

Lucas Goulart Grossi

Solução Móvel para Pré-análise de Motores de Indução

Belo Horizonte

2016

Lucas Goulart Grossi

Solução Móvel para Pré-análise de Motores de Indução

Monografia apresentada durante o Seminário dos Trabalhos de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG

Escola de Engenharia

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Sidelmo Magalhães Silva

Belo Horizonte

2016

Resumo

Nos últimos dois séculos foram notáveis os incessantes avanços tecnológicos responsáveis pelos dispositivos eletrônicos dos quais desfrutamos no nosso dia-a-dia. No âmbito de motores elétricos os principais avanços se deram a partir da invenção dos motores de corrente contínua e alternada. São notáveis as melhorias destes no último século, principalmente no que diz respeito a eficiência, controle e acionamento.

Embora primordiais para os motores funcionarem como os conhecemos hoje, tais avanços muitas vezes não são visíveis ao usuário final. Externamente os motores mantiveram basicamente a mesma estrutura e aparência de cinquenta, sessenta anos atrás, fato que ocasiona dois problemas: a falsa aparência de não melhoria ou avanço dos motores com passar dos anos e a não agregação de tecnologias atuais voltadas para interação com o usuário no âmbito das máquinas elétricas.

O presente trabalho visa agregar conceitos de interação com o usuário já difundidos em outras áreas de tecnologia, como computadores e celulares, no universo de motores elétricos. Seguindo esse propósito será projetada e implementada uma aplicação móvel para dispositivos *Android* que visa facilitar o trabalho do engenheiro em campo fornecendo, a partir dos dados de placa do motor de indução ou de ensaios simples, informações básicas sobre o mesmo que permitam a realização uma pré-análise de seu comportamento. Assim, fornece-se ao engenheiro uma visão geral da situação antes mesmo de sair do local para realizar análises mais complexas.

Palavras-chaves: tecnologia. motores elétricos. motor de indução. aplicação móvel. *android*.

Abstract

In the last two centuries the incessant technological advances responsible for the devices and technologies we have enjoyed in our day-to-day life have been remarkable. In the scope of electric motors the main advances have been made from the invention of the motors of direct and alternating current. These improvements are notable in the last century, especially in terms of efficiency, control and actuation.

Although it is important for engines to work as we know them today, such advances are often not visible to the end user. Externally, the engines have basically retained the same structure and appearance as fifty, sixty years ago, a fact that causes two problems: the false appearance that electrical engines had not been improved over the years and the fact that electrical machines do not aggregate current technologies for iteration with the user.

The present work aims to aggregate concepts of iteration with the user already diffused in other areas of technology, such as computers and cell phones, in the universe of electric motors. Following this purpose, a mobile application for Android devices will be designed and implemented which aims to facilitate the work of the engineer in field by providing from the induction motor's catalog data or simple tests, basic information about the motor that allows an pre-analysis of its behavior. Thus, the engineer has an overview of the situation before even leaving the site to perform more complex analysis.

Key-words: technology. electric motor. induction motor. mobile application. android.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Rotor do tipo gaiola de esquilo.	22
Figura 2 – Linhas de fluxo magnético diante da alimentação de estator por circuito monofásico.	23
Figura 3 – Distribuição espacial de cada fase do circuito de alimentação trifásico para geração de campo girante.	24
Figura 4 – Modelo de circuito para o motor de indução.	25
Figura 5 – Modelo de circuito para o motor de indução, com equivalente de Thevenin do circuito de estator.	26
Figura 6 – Curva característica do torque em função da velocidade do motor de indução.	32
Figura 7 – Curva característica da corrente de estator em função da velocidade do motor de indução.	33
Figura 8 – Curva característica do fator de potência em função da velocidade do motor de indução.	34
Figura 9 – Curva característica da eficiência em função da velocidade do motor de indução.	35
Figura 10 – Catálogo do motor escolhido para testes.	39
Figura 11 – Diagrama de classes com as classes principais da engine de processamento.	41

Lista de abreviaturas e siglas

OS	Operation System
IDE	Integrated Development Environment

Lista de símbolos

η	Rendimento
η_{50}	Rendimento com 50% da potência nominal
η_{75}	Rendimento com 75% da potência nominal
η_{100}	Rendimento com 100% da potência nominal
$\cos(\phi)$	Fator de potência
$\cos(\phi)_{50}$	Fator de potência com 50% da potência nominal
$\cos(\phi)_{75}$	Fator de potência com 75% da potência nominal
$\cos(\phi)_{100}$	Fator de potência com 100% da potência nominal
τ	Torque
τ_n	Torque Nominal
τ_{bl}	Torque com Rotor Bloqueado
τ_{\max}	Torque Máximo
I_n	Corrente Nominal
I_{bl}	Corrente com Rotor BloqueadoNominal
I_0	Corrente a vazio
I_1	Corrente no Estator
I_2	Corrente no Rotor
V_n	Tensão Nominal
V_{bl}	Tensão com Rotor Bloqueado
V_0	Tensão a vazio
V_1	Tensão no Estator
V_2	Tensão no Rotor
V_{th}	Tensão de Thevenin

R_1	Resistência no Estator
R_2	Resistência no Rotor
R_c	Resistência no núcleo
R_{th}	Resistência de Thevenin
X_1	Reatância no Estator
X_2	Reatância no Rotor
X_m	Reatância de magnetização
X_{th}	Reatância de Thevenin
S	Escorregamento
S_n	Escorregamento Nominal
ω	Velocidade angular
ω_s	Velocidade angular Síncrona
ω_n	Velocidade angular Nominal
n	Velocidade
n_s	Velocidade Síncrona
n_n	Velocidade Nominal
P	Potência mecânica
P_{in}	Potência de entrada
P_{bl}	Potência com rotor bloqueado
P_0	Potência a vazio
p	Número de Polos

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Contexto	15
1.2	Motivação	16
1.3	Objetivo	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
3.1	A máquina de indução	21
3.2	Princípio de Funcionamento	22
3.3	Circuito Equivalente	24
3.4	Determinação dos Parâmetros de Circuito Equivalente	26
3.4.1	Determinação a partir dos Ensaios	27
3.4.1.1	Ensaio a Vazio	27
3.4.1.2	Ensaio a Rotor Bloqueado	27
3.4.1.3	Ensaio para medição da Resistência de Estator	28
3.4.2	Determinação a partir dos Dados do Fabricante	29
3.5	Determinação de Características do Motor de Indução a partir de seu Circuito Equivalente	31
3.5.1	Torque	31
3.5.2	Corrente no Estator	32
3.5.3	Fator de Potência	33
3.5.4	Eficiência	33
4	METODOLOGIA	37
5	DESENVOLVIMENTO E DISCUSSÕES	41
5.1	<i>Backend</i>	41
5.1.1	ElectricalMachine	42
5.1.2	InductionMachine	43
5.1.3	BasicCircuit	43
5.1.4	CatalogData	44
5.1.5	InductionMachineManager	46
5.2	<i>Frontend</i>	50

6	CONCLUSÃO	51
	REFERÊNCIAS	53

1 Introdução

1.1 Contexto

Os últimos séculos foram marcados por inúmeros avanços tecnológicos que vão desde a invenção da luz elétrica e das primeiras redes de distribuição e perpassam a revolução microeletrônica da década de 1960 culminando nos dispositivos que temos hoje como computadores e *smartphones*, sistemas de automação, motores, geradores e outros.

No que diz respeito à engenharia e desenvolvimento de software, podemos destacar alguns pontos fundamentais dentre os inúmeros progressos tecnológicos ocorridos nos últimos anos.

Primeiramente, a revolução microeletrônica, que teve seu início com descobertas empíricas do século XIX como o Efeito Semicondutor (Michael Faraday - 1833), o Efeito Ratificador (Ferdinand Braum - 1874) e o Efeito Fotovoltaico (Alexandre Becquerel - 1874), que foram a base para que se desenvolvessem os fundamentos teóricos que nortearam as descobertas em torno dos dispositivos semicondutores. A invenção dos transistores do tipo CMOS e a sua utilização na produção de circuitos integrados é a base dos computadores como os conhecemos hoje.

Juntamente ao surgimento dos computadores eletrônicos, o desenvolvimento das linguagens de programação e o advento da Internet tiveram grande importância. O primeiro possibilitou oferecer maior variedade, versatilidade e especificidade aos computadores, uma vez que as linguagens de programação surgiram para - juntamente com suas IDEs e APIs de desenvolvimento - agilizar o processo de desenvolvimento de software, permitindo que aplicações para diversas áreas fossem desenvolvidas de forma mais ampla e eficiente. O surgimento da Internet, por sua vez, facilitou a interação entre vários computadores distintos simultaneamente ao redor do mundo o que contribuiu com a dissipação da tecnologia e da informação.

Um terceiro ponto fundamental foi o grande investimento nos últimos trinta anos destinado à melhoria da interface gráfica. O que antes se resumia a uma tela preta com diversos símbolos e números hoje a interface com o usuário é uma área de grande expressão e atenção dentro da computação, parte chave de qualquer software que é desenvolvido nos dias atuais. Tal investimento foi responsável por desmistificar a tecnologia, isto é, trazê-la para o contexto do usuário final, de forma amigável e possibilitando seu uso de maneira fácil, em qualquer contexto.

1.2 Motivação

No âmbito das máquinas elétricas, não obstante os significativos avanços nos campos de atuação e automação, há, uma carência significativa de avanços voltados para otimização, facilitação e melhoria na interação do usuário final com a máquina - como é o caso, por exemplo, de computadores e celulares que têm buscado ao longo dos anos ser cada vez mais amigáveis ao usuário e de fácil uso. Pouco se vê no campo de máquinas elétricas da tendência tecnológica atual que é produzir aplicações e dispositivos que tornem os processos mais ágeis, práticos e acessíveis.

Há uma série de utilizações convenientes para as tecnologias atuais voltadas para a interação com o usuário final dentro do universo das máquinas elétricas. Hoje existem soluções voltadas à análise de motores elétricos mas, em sua grande maioria, demandam o uso de computadores e softwares pesados para sua realização não cobrindo, portanto, a carência de aplicações que sejam práticas, ágeis e de fácil utilização.

Um exemplo pertinente é a demanda de uma solução que auxilie o engenheiro hoje em campo para realizar análise de uma máquina elétrica. Seja para identificar um problema de uma máquina já em funcionamento, propor uma melhoria ou a instalação de uma nova máquina, é de interesse do engenheiro ter informações sobre o funcionamento da mesma. Os motores elétricos possuem informações de placa e catálogo fornecidos pelo fabricante.

Essas informações, entretanto, são, em muitos casos, insuficientes para fazer análises simples, como a variação do torque ou da eficiência do motor em função da velocidade. Soluções móveis que conseguissem, a partir dos dados fornecidos pelo fabricante, gerar algumas dessas análises para o engenheiro facilitariam e acelerariam o processo de entendimento do funcionamento da máquina para detecção de problemas ou para determinar qual a mais adequada para se utilizar em uma dada situação.

Na conjuntura exposta, é extremamente cabível a utilização de tecnologias que possibilitem ao engenheiro realizar, de forma prática e em mãos, essa pré-análise do motor dando uma visão geral sobre o mesmo.

1.3 Objetivo

Tendo em vista essa notável deficiência, objetiva-se com esse trabalho trazer conceitos atuais já bastante difundidos em outros contextos tecnológicos para o âmbito de motores elétricos. Agilidade, portabilidade, facilidade e melhorias na interação do usuário final com os motores são concepções notavelmente escassas ou ausentes nesse cenário e agregá-las ao nosso contexto seria uma melhoria significativa.

Com isso em mente, chegou-se a conclusão que uma forma interessante de aplicar

esses conceitos seria desenvolver uma aplicação móvel com várias funcionalidades que otimizassem o trabalho do engenheiro em campo, tornando-o mais ágil, prático e diminuindo a necessidade de realizar cálculos, operações em outros lugares e utilização de outros dispositivos. Uma vez minimizados os esforços de deslocamento, cálculo e a quantidade de operações e dispositivos a serem utilizados, há claramente uma redução do tempo gasto e um aumento na facilidade de execução da tarefa. Todavia, dada a vastidão da conjuntura de motores elétricos, é incongruente tentar elaborar uma solução que consiga conciliar de uma só vez melhorias em todas as áreas envolvidas.

Por conseguinte, o presente trabalho expõe de forma clara e objetiva todo o processo de elaboração e implementação de uma aplicação móvel para dispositivos *Android* voltada para motores de indução - assim sendo, daqui para frente tudo que será mencionado sobre motores elétricos será referente exclusivamente ao motor de indução - e com um escopo pré-definido onde contemplaremos a determinação dos parâmetros de circuito equivalente do motor, bem como a utilização desses parâmetros para extrair informações úteis e traçar curvas para o motor de interesse do usuário.

O trabalho contemplará uma revisão teórica acerca de determinação de parâmetros de máquinas de indução e sua utilização na obtenção de informações e gráficos úteis relativos ao motor, uma explicitação sobre a metodologia a ser utilizada - tecnologias a serem usadas e motivo de escolha. Em seguida serão explanados detalhes do projeto da aplicação, minúcias da implementação feita, breve descrição da aplicação final resultante do trabalho e objetivos futuros.

2 Revisão Bibliográfica

Após minuciosa pesquisa não foi encontrada nenhum conteúdo significativo que contemple tópicos similares aos tratados nesse trabalho. Aplicações *Android* de motivação semelhante a deste trabalho são encontradas no *Google Play*^{1,2}. As aplicações em questão consistem em tacômetros estroboscópicos utilizando a luz de flash da câmera do celular para medir a velocidade de rotação do motor.

A escassez de literaturas similares ao do escopo do presente trabalho eram esperadas porquanto são também escassos, como já mencionado antes, avanços tecnológicos no campo de motores elétricos voltados para praticidade, agilidade e melhoria da interação do usuário com o motor.

Contudo, no âmbito de motores elétricas é notável e vale destacar, obras que versam sobre outros avanços da área. (HEATH, 1997) e (NOLA, 1977) temos patentes de melhorias na área de controle de máquinas, enquanto (MOHAN, 1980) e (NOVOTNY D.J. GRITTER, 1977) expõem formas de aprimorar a eficiência das máquinas de indução, o primeiro trata de eficiência energética do motor de indução e o segundo de eficiência de geração do motor de indução quando utilizado inversor. As quatro literaturas ilustram avanços na esfera de máquinas elétricas, mas não serão contempladas diretamente nesse trabalho por não se encaixarem no escopo e estão aqui citadas exclusivamente para exemplificar que existiram diversos avanços nesse campo nas últimas décadas.

Em (STERN, 1978) e (JIAN N. L. SCHMITZ, 1983) são apresentadas melhorias teóricas significativas no que diz respeito a novas formas de determinar algum parâmetro ou característica da máquina. (JIAN N. L. SCHMITZ, 1983), especificamente, é o eixo da nossa fundamentação teórica, juntamente com (SEN, 2007) que será versado de maneira minuciosa na sessão a seguir.

¹ <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.strobo.stroboscopetachometer&hl=en>

² <https://play.google.com/store/apps/details?id=hamidlemon.scientific.apps.stroboskop>

3 Fundamentação Teórica

O presente trabalho apresenta-se como uma obra interdisciplinar, aplicando conceitos de motores elétricos no campo da computação visando melhorias tecnológicas no âmbito do usuário final. Para tal, há a utilização de conceitos e ferramentas das duas esferas de conhecimento afim de apresentar uma solução prática para aperfeiçoar a interação usuário máquina e simplificar o trabalho do engenheiro em campo.

Tendo isso em vista, é necessário destrinchar parte da teoria de máquina de indução para que se tenha completo entendimento do que é tratado, proposto e executado neste trabalho.

3.1 A máquina de indução

Motores de indução são construídos de forma que uma de suas principais características é a produção de conjugado a partir da interação entre dois campos magnéticos girantes, característica essa que será detalhada adiante. No motor de indução, corrente elétrica alternada trifásica é fornecida diretamente ao estator.

As correntes estabelecidas no estator são responsáveis por, através de indução eletromagnética - como o nome sugere, estabelecer a corrente elétrica no rotor. Na máquina de indução não há linearidade entre o valor dos campos magnéticos (de rotor e estator) e o conjugado gerado. Como consequência disto, o controle de conjugado e velocidade de um motor de indução não é imediato e linear.

Um importante parâmetro para a operação de um motor de indução é o escorregamento, que indica a diferença entre a velocidade síncrona e a velocidade com que o rotor efetivamente gira. A maneira de se obter o valor do escorregamento para um valor momentâneo de velocidade é expresso na equação 3.1.

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (3.1)$$

Como visto na relação 3.1, para calcular o escorregamento é necessário obter a velocidade síncrona do motor, que pode ser facilmente deduzida a partir da equação 3.2.

$$n_s = \frac{120 * f}{p} \quad (3.2)$$

Uma vez deduzida a velocidade síncrona do motor pode-se obter a velocidade angular síncrona do motor pela relação 3.3.

$$\omega = \frac{2 * \pi * n}{60} \quad (3.3)$$

O rotor de um motor de indução constitui-se de uma superposição de discos finos, feitos de material ferromagnético, que são “empilhados” horizontalmente. No cilindro ferromagnético assim formado, ranhuras longitudinais em sua estrutura são preenchidas com alumínio ou cobre liquefeito, que ao se enrijecer forma um conjunto de barras condutoras que dão origem à estrutura referida como gaiola de esquilo, como ilustrado na figura 1.

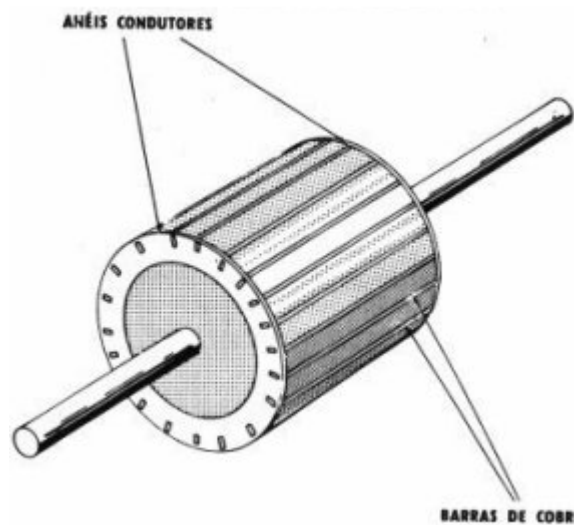


Figura 1 – Rotor do tipo gaiola de esquilo.

Nas duas extremidades do cilindro são adicionados anéis condutores, que unem física e eletricamente as barras condutoras formadas. Essa construção da máquina de indução resulta em uma estrutura construtivamente bastante simples e robusta, dispensando a manutenção frequente e de custo de fabricação consideravelmente baixo, se comparado a outras máquinas. Esta série de vantagens associadas à máquina de indução faz com que o maior número de motores empregados atualmente seja deste tipo, um dos motivos da escolha do motor de indução como objeto de estudo deste trabalho.

3.2 Princípio de Funcionamento

A operação da máquina de indução para a geração de conjugado envolve a interação de dois campos girantes no espaço e no tempo. Um destes campos é gerado pelas correntes estabelecidas nos enrolamentos de estator, enquanto o outro é gerado pelas correntes induzidas no rotor. A disposição espacial do enrolamento trifásico de estator, como será descrito, faz com que seu campo magnético tenha intensidade constante, sendo apenas sua orientação variante no tempo, de tal forma que seu eixo de direção descreve um movimento circular.

Iniciando a descrição do processo para o estabelecimento deste campo girante, a primeira imagem abaixo mostra a orientação das linhas do fluxo magnético gerado pelas correntes no enrolamento de estator no caso em que este é alimentado apenas por um circuito monofásico. Uma mesma corrente elétrica segue longitudinalmente pela estrutura cilíndrica do estator, retornando pelo “lado” oposto. Ou seja, uma fase consiste em duas correntes defasadas de 180 graus no tempo e no espaço descrito pela circunferência do estator, como ilustrado na figura 2.

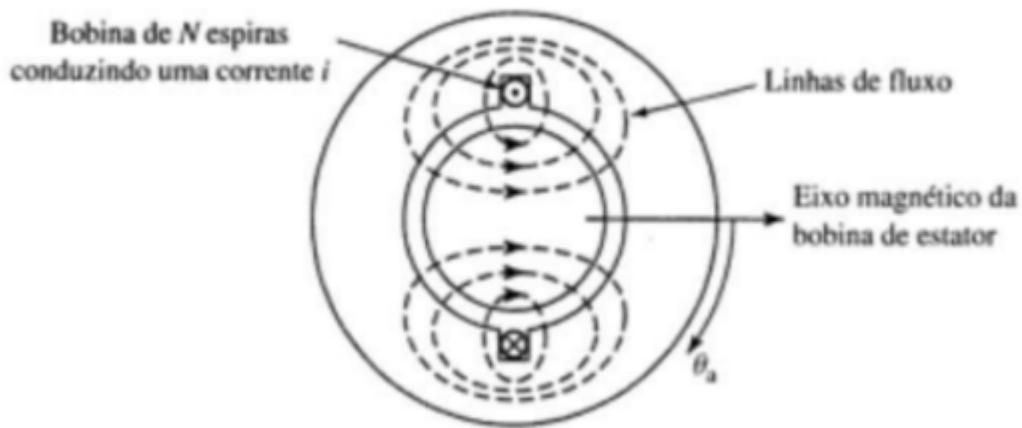


Figura 2 – Linhas de fluxo magnético diante da alimentação de estator por circuito monofásico.

O campo magnético gerado nesta situação ilustrativa tem componentes apenas em uma direção, neste caso na direção horizontal. Sendo a corrente que o origina alternada e senoidal, o sentido deste campo também o é. O valor do campo pode ser determinado a partir da equação 3.4

$$B_x(t) = B_{max} * \text{sen}(\omega_{ele} * t) \quad (3.4)$$

Este tipo de campo magnético é referido como “campo pulsante”, pois oscila no tempo apenas em uma direção. Um campo girante pode ser obtido da superposição de campos pulsantes – daí a necessidade de se utilizar um enrolamento trifásico. Estabelecendo-se três enrolamentos semelhantes àquele exemplificado na imagem acima, que conduzem correntes elétricas de mesma intensidade e de mesma frequência, defasadas de 120 graus no tempo, e ainda separados também por 120 graus no espaço da circunferência, o campo resultante da superposição é um campo girante. A distribuição espacial do enrolamento de cada fase do circuito trifásico para esta situação é mostrada na figura 3.

O campo resultante de estator, por sua vez, induz correntes no rotor, que produzem seu próprio campo girante. A interação entre o campo resultante de estator e o campo do rotor resulta na geração de conjugado. A frequência angular com que o campo resultante

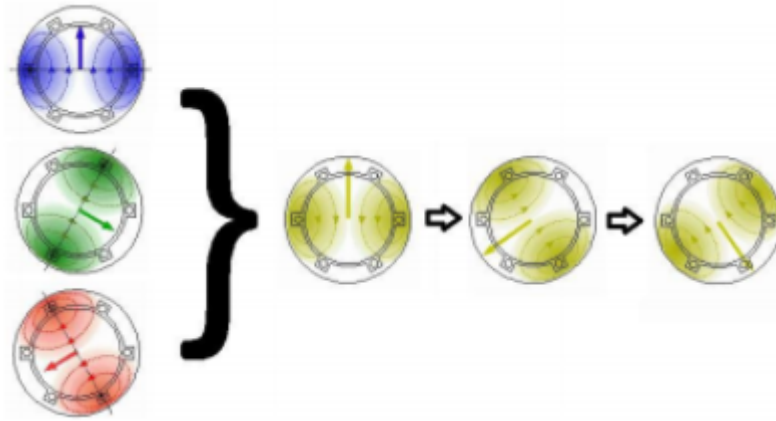


Figura 3 – Distribuição espacial de cada fase do circuito de alimentação trifásico para geração de campo girante.

de estator gira depende do número de polos da máquina de indução, como explicitado na equação 3.5

$$\omega_{campo} = \frac{2 * \omega_{ele}}{p} \quad (3.5)$$

O efeito do aumento do número de polos é a redução da velocidade do campo girante e, conseqüentemente, da velocidade síncrona do motor. Para que seja aplicado um número de polos maior, o enrolamento de cada fase da alimentação trifásica deve sofrer aumento no número de voltas que descreve longitudinalmente na estrutura cilíndrica do motor.

3.3 Circuito Equivalente

A corrente elétrica no rotor do motor de indução, como sugere o nome, é estabelecida por meio de indução eletromagnética por meio das correntes estabelecidas no estator. Por tal motivo, há uma analogia entre o motor de indução e o transformador. O modelo de circuito do motor, semelhante ao de um transformador, está ilustrado na figura 4, sendo equivalente a uma das três fases da alimentação trifásica do motor. O modelo envolve as reatâncias e resistências dos enrolamentos, o escorregamento e a magnetização do núcleo ferromagnético.

Existem modelos que apresentam ainda uma resistência em paralelo com a indutância de magnetização, representando as perdas joulicas que ocorrem no núcleo ferromagnético em função de correntes induzidas de Foucault e em função da histerese. No modelo que será utilizado neste estudo, esta resistência será desprezada por seu valor ser, normalmente, muito pequeno.

A resistência dinâmica do rotor dada por R_2/s pode ser compreendida como a

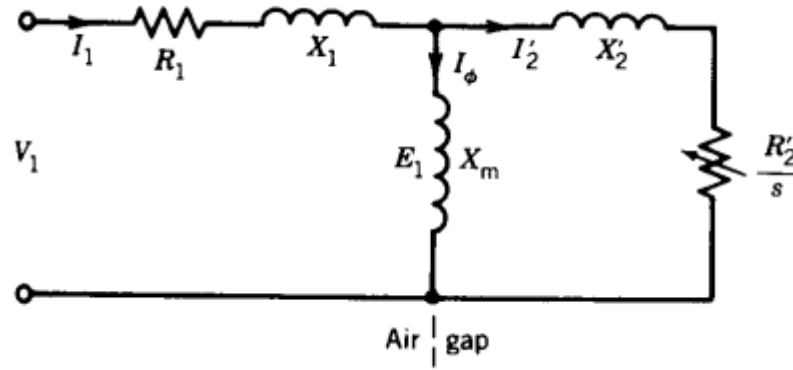


Figura 4 – Modelo de circuito para o motor de indução.

soma de duas resistências especiais, sendo uma a representação da conversão de energia elétrica em conjugado mecânico e a outra a representação de perdas ohmicas no rotor, como demonstrado na equação 3.6.

$$\frac{R_2}{s} = \frac{R_2}{s} * (1 - s) + R_2 \quad (3.6)$$

Dessa forma, podemos calcular a potência mecânica obtida da conversão eletromecânica pela expressão 3.7.

$$P = 3 * |I_2|^2 * \frac{R_2}{s} * (1 - s) \quad (3.7)$$

A multiplicação por 3 no lado direito da equação significa a união das três fases do motor trifásico na geração de conjugado, lembrando que o modelo de circuito equivale a apenas uma das três fases. Substituindo a equação 3.1 e a expressão para o torque mecânico dada em 3.8, chegamos à relação 3.9 para o torque mecânico em função da corrente e resistência de estator e velocidade angular nominal.

$$\tau = \frac{P}{\omega} \quad (3.8)$$

$$\tau = 3 * |I_2|^2 * \frac{R_2}{s * \omega_s} \quad (3.9)$$

Entretanto, dada a complexidade da obtenção do valor de I_2 por esse modelo é muito usual a utilização do equivalente de Thevenin do circuito de estator. O modelo com o equivalente de Thevenin pode ser visto na figura 5. As grandezas do equivalente de Thevenin V_{th} , R_{th} e X_{th} podem ser obtidas pelas equações 3.10, 3.11 e 3.12, respectivamente, sendo K_{th} representada pela equação 3.13.

$$V_{th} = K_{th} * V_1 \quad (3.10)$$

$$R_{th} = K_{th}^2 * R_1 \quad (3.11)$$

$$X_{th} \approx X_1 \quad (3.12)$$

$$K_{th} = \frac{X_m}{X_1 + X_m} \quad (3.13)$$

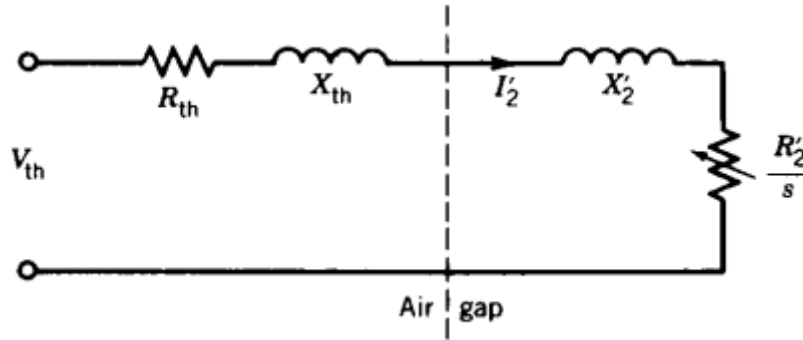


Figura 5 – Modelo de circuito para o motor de indução, com equivalente de Thevenin do circuito de estator.

A partir do equivalente de Thevenin pode-se agora calcular de forma mais fácil o valor de I_2 . Pelo circuito equivalente resultante, podemos calcular I_2 tal qual mostrado na equação 3.14.

$$I_2 = \frac{|V_{th}|}{\left| \frac{R_2}{s} + R_{th} + j(X_{th} + X_2) \right|} = \frac{|V_{th}|}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s} + R_{th} \right)^2 + (X_{th} + X_2)^2}} \quad (3.14)$$

Voltando à equação 3.9, substituindo o valor encontrado para I_2 na equação 3.14 a partir do circuito equivalente de Thevenin, podemos calcular o torque mecânico em função dos elementos do circuito equivalente, como mostrado na equação 3.15.

$$\tau = \frac{3}{\omega_s} * \frac{|V_{th}|^2}{\left(\frac{R_2}{s} + R_{th} \right)^2 + (X_{th} + X_2)^2} * \frac{R_2}{s} \quad (3.15)$$

3.4 Determinação dos Parâmetros de Circuito Equivalente

Na seção 3.3 nos atemos à teoria que envolve o circuito equivalente que representa um motor de indução, sua variante equivalente de Thevenin, bem como informações que podemos aferir a partir destes circuitos. Nesta seção, vamos discutir formas de determinação dos parâmetros do circuito equivalente, as aproximações necessárias a tal e suas implicações.

3.4.1 Determinação a partir dos Ensaios

Os parâmetros R_1 , X_1 , R_2 , X_2 e X_m , referentes ao circuito equivalente detalhado na seção anterior, podem ser determinados a partir da combinação dos resultados de três ensaios: a Vazio, a Rotor Bloqueado e medição da Resistência de Estator. Os três casos e a utilização dos mesmos para determinação dos parâmetros serão detalhados neste tópico.

3.4.1.1 Ensaio a Vazio

O ensaio a vazio na máquina de indução, assim como o ensaio de circuito aberto em um transformador, fornece informações sobre corrente de excitação e perdas rotacionais. Consiste em aplicar tensão nominal no circuito de estator estando a máquina desacoplada de toda e qualquer carga mecânica. A perda de potência constatada pode ser atribuída à perdas no núcleo e por fricção.

Medindo-se I_0 , P_0 e V_0 , pode-se calcular os valores de R_0 e X_0 , como demonstrado nas equações 3.16 e 3.17.

$$R_0 = \frac{P_0}{3 * I_0^2} \quad (3.16)$$

$$X_0 = \sqrt{\frac{V_0^2}{3 * I_0^2} - (R_0)^2} \quad (3.17)$$

3.4.1.2 Ensaio a Rotor Bloqueado

O ensaio de rotor bloqueado na máquina de indução, assim como o ensaio de curto-circuito em um transformador, fornece informações sobre impedâncias de fuga. Bloqueia-se o rotor de forma a não permitir que o motor gire e é aplicada tensão ao circuito de estator. O teste de rotor bloqueado ocorre em tensão reduzida e corrente nominal para garantir que o teste aconteça sob as mesmas condições de frequência e corrente no rotor que vão prevalecer durante sua operação em condições.

É aconselhável, também, aplicar frequência reduzida, uma vez que a resistência efetiva do rotor e a indutância de fuga em frequência reduzida - correspondente a baixos valores de escorregamento - terão diferenças significativas daqueles em frequência nominal. Sugere-se uma frequência de 25% da frequência nominal. Para motores com potência abaixo de 20-hp, entretanto, os efeitos são desprezíveis e o teste pode ocorrer em frequência nominal.

Medindo-se I_{bl} , P_{bl} e V_{bl} , pode-se calcular os valores de R_{bl} e X_{bl} , como demonstrado nas equações 3.18 e 3.19.

$$R_{bl} = \frac{P_{bl}}{3 * I_{bl}^2} \quad (3.18)$$

$$X_{bl} = \sqrt{\frac{V_{bl}^2}{3 * I_{bl}^2} - (R_{bl})^2} \quad (3.19)$$

3.4.1.3 Ensaio para medição da Resistência de Estator

A medição da resistência de estator consiste em aplicar uma corrente I entre dois terminais do motor e medir a tensão V necessária para estabelecer esse nível de corrente. Dividindo-se tensão por corrente encontramos uma resistência duas vezes maior do que a resistência de estator, considerando conexão em estrela entre os terminais. Assim, pode-se calcular R_1 a partir da equação 3.20.

$$R_1 = \frac{V}{2 * I} \quad (3.20)$$

Com os dados dos três ensaios em mãos, podemos determinar os parâmetros do circuito equivalente remanescentes. R_1 já foi determinado a partir do ensaio 3, como mostrado em 3.20. A utilização das medições dos ensaios para determinação R_2 , X_1 e X_m é ilustrada nas equações 3.22, 3.26 e 3.28, respectivamente. É válido ressaltar que a igualdade 3.24 foi utilizada para facilitar a determinação dos parâmetros, uma vez que essa é uma relação verdadeira para boa parte dos motores de indução existentes.

$$R_{bl} = R_1 + R_2 \quad (3.21)$$

$$R_2 = R_{bl} - R_1 \quad (3.22)$$

$$X_{bl} = X_1 + X_2 \quad (3.23)$$

$$X_1 = X_2 \quad (3.24)$$

$$X_{bl} = 2X_1 \quad (3.25)$$

$$X_1 = X_2 = \frac{X_{bl}}{2} \quad (3.26)$$

$$X_0 = X_1 + X_m \quad (3.27)$$

$$X_m = X_0 - X_1 \quad (3.28)$$

3.4.2 Determinação a partir dos Dados do Fabricante

Em campo, muitas vezes o engenheiro não tem a possibilidade de realizar ensaios na máquina com a qual está trabalhando, o que exige formas de determinar o circuito equivalente, cuja importância e utilização para analisar certas características será melhor detalhado na seção 3.5 deste artigo, que utilizem somente dados que ele já possui, isto é, os dados fornecidos pelo fabricante.

Tendo o catálogo do fabricante é possível estimar de forma aceitável os parâmetros R_1 , R_2 , X_1 , X_2 e X_m do circuito equivalente do motor de indução. Nossa metodologia começa desconsiderando o valor de R_1 , isto é, $R_1 = 0$. Esta é, na verdade, uma aproximação relativamente grosseira. Porém, se justifica pelo fato de, R_1 , ter valor consideravelmente baixo se comparado aos outros parâmetros e estar mais diretamente relacionado ao torque de partida do motor. Com isso, podemos considerar praticamente nula a influência direta de R_1 na faixa de torque próximo ao nominal, aquela de maior interesse nas análises que desejamos fazer (mais detalhes na sessão 3.5).

Uma vez desprezado o valor de R_1 , se voltarmos à equação 3.13, temos que $K_{th} = 1$ para valores de X_m muito maiores que X_1 . Uma vez que $K_{th} = 1$, podemos aproximar V_{th} de V_1 . Todas essas considerações nos levam às expressões 3.29, 3.31 e 3.31.

$$K_{th} = \frac{X_m}{(X_m + X_1)^2} \approx 1, se X_m \gg X_1 \quad (3.29)$$

$$V_{th} = K_{th} * V_1 = V_1 \quad (3.30)$$

$$R_{th} = K_{th}^2 * R_1 = R_1 = 0 \quad (3.31)$$

Sabe-se que o torque máximo do motor de indução pode ser calculado a partir da expressão 3.32. Uma vez que $R_1 = 0$ e considerando as expressões 3.30 e 3.31, a expressão para o torque máximo pode ser simplificada como em 3.33

$$\tau_{max} = \frac{3}{2 * \omega_s} * \frac{V_{th}^2}{R_{th} + \sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2}} \quad (3.32)$$

$$\tau_{max} = \frac{3}{2 * \omega_s} * \frac{V_1^2}{\sqrt{(X_1 + X_2)^2}} \quad (3.33)$$

Mais uma aproximação comum que será aplicada nesse trabalho é descrita em 3.34. Isso posto que esta relação entre X_1 e X_2 é verdadeira em boa parte dos motores de indução existente e, portanto, assume-se aqui que ela é verdadeira.

$$X_1 = X_2 \quad (3.34)$$

Por conseguinte, temos a equação 3.35 para o torque máximo que depende somente do parâmetro X_1 . Uma vez que as demais variáveis presentes na equação 3.35 são conhecidos, podemos isolar X_1 para determiná-lo, conforme a equação 3.36 demonstra.

$$\tau_{max} = \frac{3}{2 * \omega_s} * \frac{V_1^2}{2 * X_1} \quad (3.35)$$

$$X_1 = X_2 = \frac{3}{4 * \omega_s} * \frac{V_1^2}{\tau_{max}} \quad (3.36)$$

A resistência de rotor é o parâmetro de rotor e estator que nos resta determinar. Pode-se determinar R_2 a partir do torque nominal, cuja expressão pode ser deduzida a partir da equação 3.15. Para isso, é necessário assumir-se que, em velocidade nominal, o escorregamento é quase zero, ou ainda, considerar as condições expostas na equação 3.37. A partir disso, chega-se à expressão 3.38 para o torque nominal da qual podemos isolar R_2 para determinar seu valor, como feito na equação 3.39.

$$\frac{R_2}{s} \gg R_{th}, \frac{R_2}{s} \gg X_{th} + X_2 \quad (3.37)$$

$$\tau_N = \frac{3}{\omega_s} * \frac{V_{th}^2}{R_2} * S_n \quad (3.38)$$

$$R_2 = \frac{3}{\omega_s} * \frac{V_{th}^2}{\tau_N} * S_n \quad (3.39)$$

Com isso, conseguimos inferir os parâmetros do circuito equivalente correspondentes ao estator e ao rotor. Precisamos agora determinar a reatância de magnetização, X_m . Aplicando-se a equação 3.9 para o torque nominal, dado fornecido pelo fabricante, podemos isolar I_2 tal qual mostrado na equação 3.40.

$$I_2 = \sqrt{\frac{\tau_n * \omega_s}{3} * \frac{S_n}{R_2}} \quad (3.40)$$

Como estamos analisando o torque nominal, podemos determinar módulo e fase de I_1 a partir da corrente nominal e do fator de potência nominal, respectivamente, como demonstrado em 3.41.

$$I_1 = |I_n| / \underline{\arccos(\cos(\phi)_{100})} \quad (3.41)$$

Podemos considerar que I_1 é a soma da corrente no rotor I_2 com a corrente de magnetização I_m e isolar I_m para achar seu módulo, como na equação 3.42.

$$|I_m| = |I_2 - I_1| = |R + jI_m| = \sqrt{R^2 + I_m^2} \quad (3.42)$$

Por fim, podemos aplicar uma equação básica de circuitos para deduzir o valor de X_M , como mostrado em 3.43.

$$X_m = \frac{V_1}{|I_m|} \quad (3.43)$$

Uma prática recorrente que pode melhorar a aproximação dos valores de circuito equivalente é recalcular os parâmetros a partir dos dados aferidos. Isto é, calcular o novo K_{th} para os valores de X_m e X_1 encontrados. Esse processo recursivo pode ser realizado de duas a três vezes com intuito se obter aproximações melhores para os parâmetros.

Tem-se então duas formas de determinar os cinco parâmetros que compõe o circuito equivalente do motor de indução abordado nesse trabalho: a partir da realização de ensaios e a partir dos dados fornecidos pelo fabricante. A seção seguinte tratará da utilização desses parâmetros para apontar características importantes do funcionamento do motor.

3.5 Determinação de Características do Motor de Indução a partir de seu Circuito Equivalente

O circuito equivalente tratado nas seções 3.3 e 3.4 pode ser utilizado para prever algumas características de performance do motor de indução. As principais características que podemos prever a partir do circuito equivalente estimado anteriormente e que serão detalhadas nessa seção são: Torque, Corrente de Estator, Eficiência e Fator de Potência, todas elas em função da variação da velocidade do motor.

3.5.1 Torque

Uma vez calculados os parâmetros de circuito equivalente e de Thevenin, podemos assumir que estes são constantes. Dessa forma, se utilizarmos a equação 3.15 onde o torque varia exclusivamente em função do escorregamento e, portanto, da velocidade do motor, uma vez que a velocidade síncrona também é constante. Com isso, podemos traçar o perfil de característico do torque do motor de indução em função de sua velocidade.

A figura 6 ilustra a curva característica do motor de indução em função da sua velocidade (n) para diferentes valores de V_1 . É importante ressaltar que esse é um esboço da curva de torque e que ela varia, de amplitude e deslocando-se para esquerda e direita, dependendo do seu circuito equivalente.

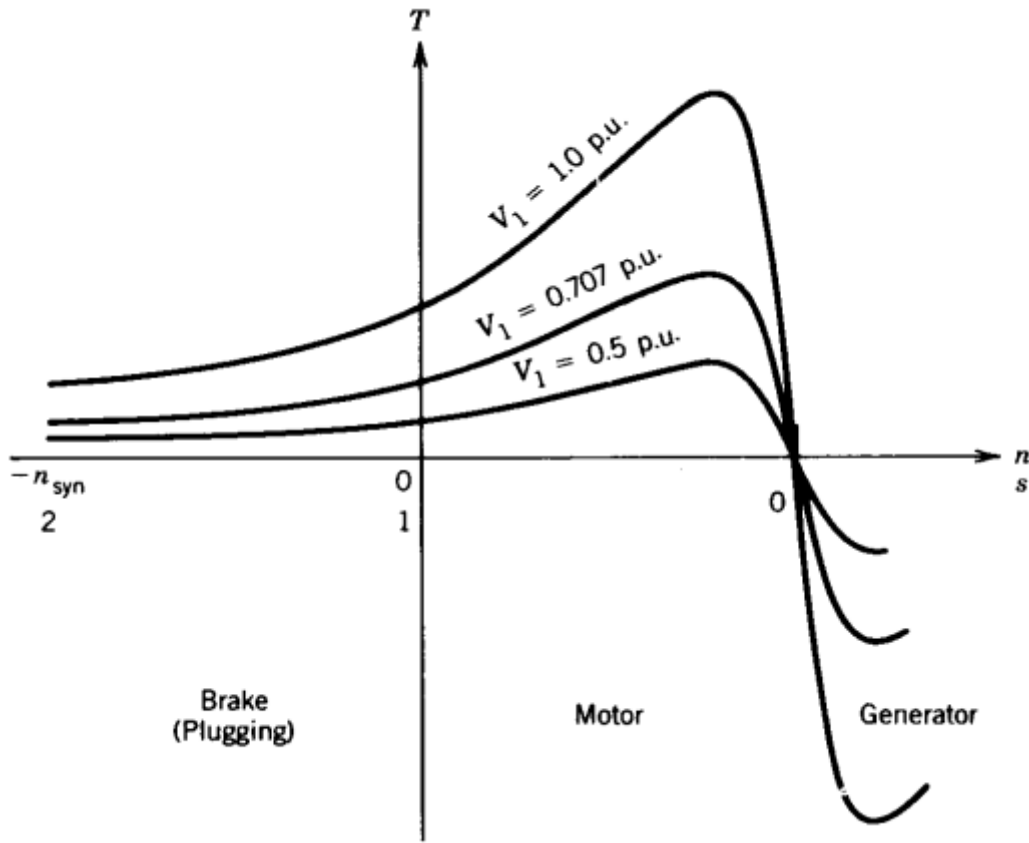


Figura 6 – Curva característica do torque em função da velocidade do motor de indução.

3.5.2 Corrente no Estator

Com base na figura 4 podemos estimar a impedância vista pelo estator, isto é, a impedância de entrada do circuito, como mostrado na equação 3.46. A partir da impedância de entrada podemos calcular a corrente no estator, como mostrado em 3.47.

$$Z_1 = R_1 + jX_1 + X_m // \left(\frac{R_2}{s} + jX_2 \right) \quad (3.44)$$

$$Z_1 = R_1 + jX_1 + \frac{jX_m * \left(\frac{R_2}{s} + jX_2 \right)}{\frac{R_2}{s} + j(X_m + X_2)} \quad (3.45)$$

$$Z_1 = |Z_1| \angle \theta_1 \quad (3.46)$$

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_1} \quad (3.47)$$

Novamente, temos uma característica do motor que depende somente de constantes relativas a seu circuito equivalente e seu escorregamento. Assim, é possível prever a curva característica do módulo da corrente de estator em função da velocidade do motor, como é ilustrado na figura 7.

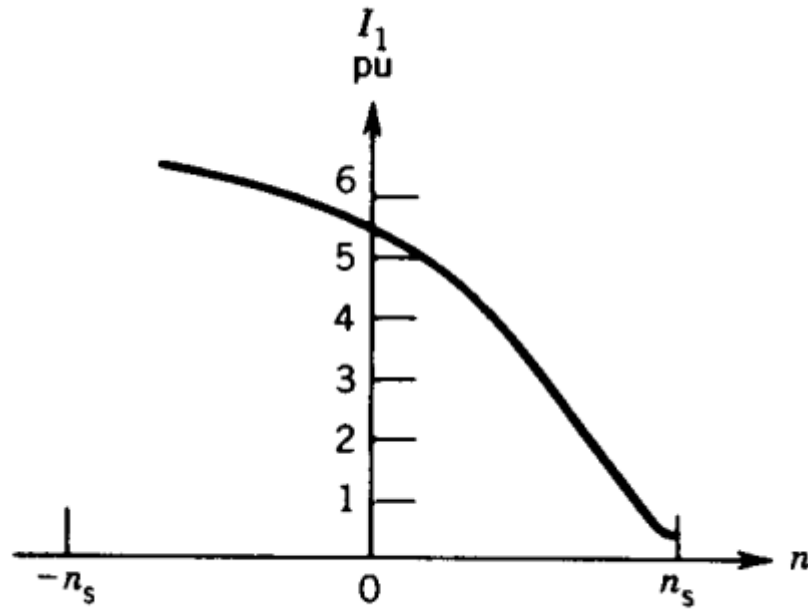


Figura 7 – Curva característica da corrente de estator em função da velocidade do motor de indução.

3.5.3 Fator de Potência

Uma vez determinadas a impedância de entrada equivalente e a corrente de estator, o fator de potência pode ser facilmente calculado utilizando o ângulo de fase da corrente de estator que, para o circuito equivalente estudado, é o mesmo ângulo da impedância de entrada. O cálculo do fator de potência a partir do ângulo de fase é mostrado em 3.48 e sua curva característica em função da velocidade do motor é ilustrada na figura 8.

$$FP = \cos \theta_1 \quad (3.48)$$

3.5.4 Eficiência

A última característica associada ao circuito equivalente do motor de indução que será avaliada nesse trabalho é a eficiência do motor. A eficiência pode ser definida como a porcentagem da potência de entrada entregue ao rotor após as perdas ôhmicas e de histerese.

Para o cálculo da eficiência precisamos, primeiramente, calcular as potências de entrada e saída do motor. Na fundamentação deste trabalho foi explicado que a resistência R_2/s é dividida em duas partes, uma associada à perdas ôhmicas e outra associada à potência mecânica do motor. A potência mecânica corresponde a potência de saída e é definida em 3.7.

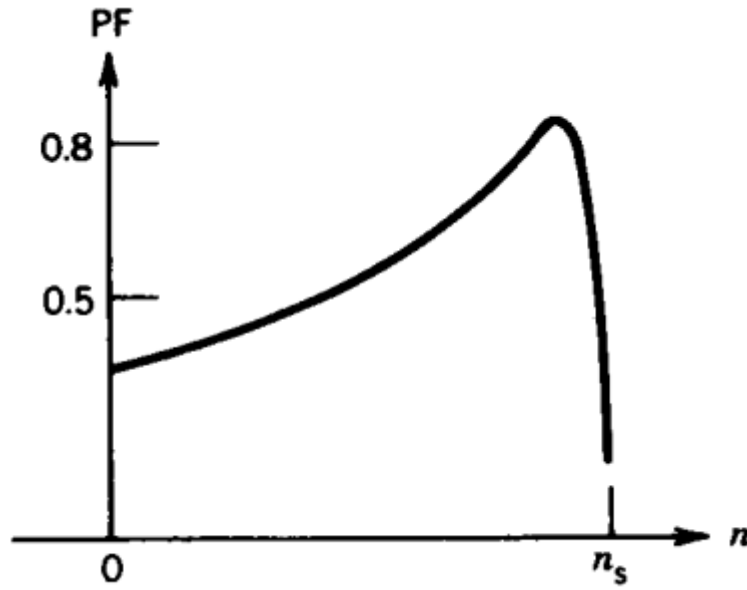


Figura 8 – Curva característica do fator de potência em função da velocidade do motor de indução.

A potência de entrada, por sua vez, pode ser calculada a partir de V_1 , I_1 e o ângulo de fase entre eles, como é mostrado na equação 3.49.

$$P_{in} = 3 * |V_1| * |I_1| * \cos(\theta_1) \quad (3.49)$$

Por fim, a eficiência pode ser calculada pela razão entre a potência de saída e a potência de entrada, como mostrado na equação 3.50. Novamente, podemos esboçar sua curva característica em função da velocidade, como ilustrado na figura 9.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P}{P_{in}} \quad (3.50)$$

Concluimos a fundamentação teórica do presente trabalho, após esmiuçar os principais conceitos do motor de indução, seus princípios de funcionamento, seu circuito equivalente e maneiras apropriadas de aproximar seus parâmetros, bem como as características importantes do motor que podem ser deduzidas a partir do seu circuito equivalente. Ter em mãos essas características e como o motor se comporta em diferentes momentos da sua atuação é de suma importância para o engenheiro estimar a causa de possíveis defeitos e/ou, ao realizar um projeto, determinar se a máquina em questão será capaz de cumprir a tarefa para a qual ela está sendo designada.

Os capítulos que se seguem tratam da proposta e elaboração de uma solução móvel onde o engenheiro conseguirá ter em mãos essas informações de forma fácil, apenas com o uso de um celular *Android*.

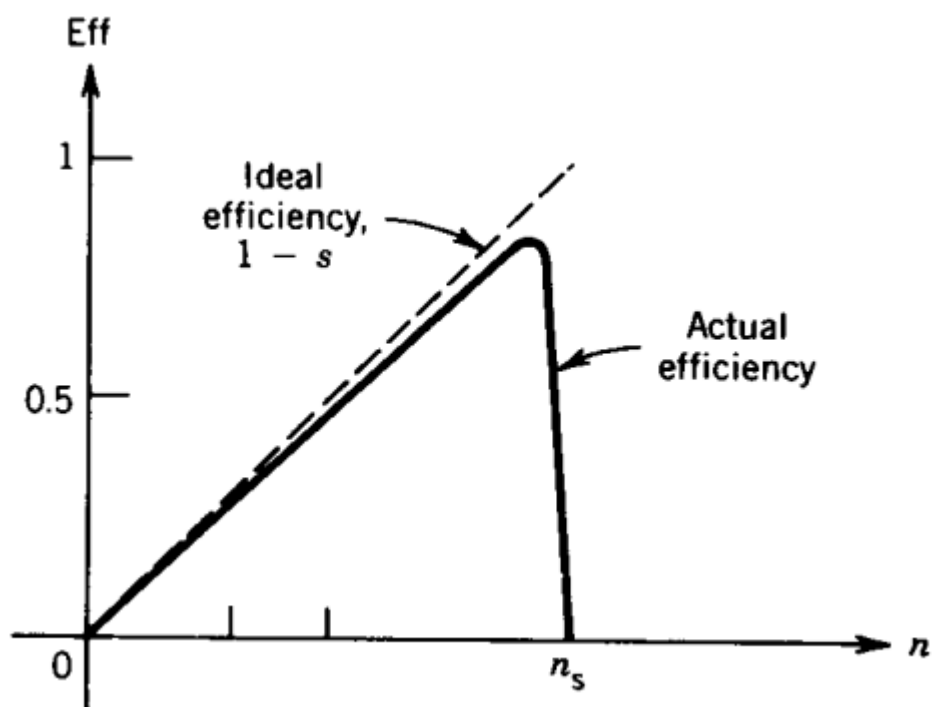


Figura 9 – Curva característica da eficiência em função da velocidade do motor de indução.

4 Metodologia

Utilizando conceitos de engenharia de software elaborou-se o projeto do aplicativo a ser desenvolvido. A primeira definição considerada foi o escopo da aplicação. Para tal, foi necessário primeiramente avaliar todas as possibilidades dentro no nosso contexto e alinhar o que foi considerado prioritário ao tempo disponível para execução do projeto - que envolve implementação, testes, correções e análise do resultado final. Com base nisso, optamos por restringir nosso escopo à somente motor de indução, uma vez que é um grupo reduzido, todavia abrangente, isto é, é um motor de ampla abrangência sendo um dos tipos de motores mais utilizados atualmente.

Definido o escopo, a etapa seguinte engloba a definição de requisitos do projeto, ou seja, funcionalidades e restrições inerentes ao software a ser desenvolvido. Neste trabalho, os requisitos estabelecidos foram:

- a) Possibilitar ao usuário inserção dos dados referentes ao motor;
 - Informações básicas que descrevem o motor;
 - Dados fornecidos pelo fabricante (placa e catálogo);
 - Dados referentes aos ensaios a vazio e bloqueado (opcional);
 - Dados referentes aos circuitos equivalentes de estator e rotor (opcional).
- b) Determinação dos parâmetros do circuito equivalente baseado nos dados fornecidos:
 - A partir dos dados de placa;
 - A partir dos dados dos ensaios;
 - A partir dos parâmetros dos circuitos diretamente fornecidos pelo o usuário.
- c) Permitir que o usuário obtenha informações e características do motor:
 - Circuito equivalente;
 - Circuito de Thevenin;
 - Curva de Torque;
 - Curva de Corrente de Estator;
 - Curva de Fator de Potência;
 - Curva de Eficiência;
- d) Permitir que o usuário armazene, edite e carregue motores de indução do banco de dados.
- e) Permitir que o usuário compartilhe os dados obtidos via e-mail.

Estabelecidos os requisitos desejáveis para o projeto, o último passo a ser tomado na definição do software a ser desenvolvido é a definição do dispositivo e do sistema operacional (OS) onde o software será executado, bem como a linguagem de programação na qual ele será escrito e programas a serem utilizados na sua execução.

Se tratando de uma solução móvel, uma vez que alguns dos objetivos são otimizar tarefas, reduzir tempo e locomoção, foi escolhido o universo dos smartphones para a implementação do nosso software. Por uma questão de facilidade, abrangência e robustez foi escolhido o sistema operacional *Android*¹, da Google. Inerente a escolha do OS há também a escolha da linguagem de programação: Java², linguagem na qual os aplicativos para *Android* são escritos, o que foi um facilitador visto que já havia experiência prévia dos envolvidos com a mesma.

Para o desenvolvimento da aplicação, isto é, implementação e testes, é utilizado o Ambiente de Desenvolvimento Integrado (IDE) da própria Google, o *Android Studio*³ e o smartphone da *Asus*⁴ *Zenfone2*.

Para a elaboração dos gráficos a partir dos dados característicos calculados foi utilizada uma biblioteca gráfica *open-source* desenvolvida para android chamada *Graph-View*⁵. Sua escolha foi definida por já conter uma série de funcionalidades úteis para a versão atual do programa bem como versões posteriores que serão abordadas no capítulo de direções futuras.

Além disso, foi utilizado também um sistema de controle de versão de arquivos, um repositório *open source*⁶ para o código desenvolvido. O objetivo do repositório é, além de garantir o versionamento do software e evitar perdas durante o desenvolvimento, disponibilizar para a comunidade a aplicação com objetivo de difundir conhecimento e reunir possíveis colaboradores no futuro.

Optou-se por realizar o desenvolvimento do software em duas partes distintas:

- a) **Backend** - que consiste na *engine* de processamento do projeto, onde foram definidas as classes pertinentes à solução de software proposta bem como as classes responsáveis pelos cálculos e processamento de dados. É o responsável por gerenciar as informações fornecidas pelo frontend e devolver as análises de interesse do usuário.
- b) **Frontend** - que é composto por toda a parte visual e de interação com o usuário final. É a casca do programa que gerencia a interação do usuário final com o *backend*. Isto é, fica responsável por receber os comandos do usuário

¹ <https://developer.android.com/develop/>

² <http://www.oracle.com/technetwork/java/javase/overview/index.html>

³ <https://developer.android.com/studio/index.html>

⁴ <https://www.asus.com/br/>

⁵ <http://www.android-graphview.org/>

⁶ <https://github.com/lgrossi/TCC>

e processá-los de forma a enviar as informações necessárias para a engine de processamento, recebendo de volta as informações que o usuário espera receber. É ele também o responsável por gerenciar a interação com o banco de dados, isso é, fazer as *queries* de consulta e armazenamento de dados fornecidos pelo o usuário.

Essa divisão foi escolhida pensando-se em uma solução abrangente e de desenvolvimento a longo prazo, isto é, que virá a ser melhorada e incrementada no futuro, podendo dar suporte a outras plataformas não *Android*. Desta forma, o backend, ou seja, toda a parte de cálculo e processamento de dados, é somente uma biblioteca importada no aplicativo final, sendo independente, portanto, do mesmo. Assim, pode-se usar essa biblioteca para outros fins, como aplicativos em outras plataformas ou mesmo um servidor online que recebe requisições *http* e devolve os cálculos necessários para o cliente.

Para fins didáticos de comprovação da eficiência do programa e da qualidade da aproximação de seus cálculos, foi utilizado o motor de indução trifásico da WEG modelo IP55, quadripolo, de frequência 60Hz e potência de 5.0 Hp, ilustrado na figura 10. A escolha desse motor se deu por seu catálogo ser de fácil acesso e por já ter um estudo prévio sobre o mesmo, ensaios e circuito equivalente já determinado, possibilitando comparar os resultados.

Potência		Carcaça	RPM	Corrente nominal em 220V (A)	Corrente com rotor bloqueado I_p / I_n	Conjugado nominal C_n (kgfm)	Conjugado com rotor bloqueado C_p / C_n	Conjugado máximo $C_{m\acute{a}x}/C_n$	Rendimento η %			Fator de potência $\cos \varphi$		
cv	kW								% da potência nominal					
									50	75	100	50	75	100

4 Pólos - 60 Hz

0,16	0,12	63	1720	0,89	4,5	0,07	3,2	3,4	45,0	52,0	57,0	0,46	0,55	0,62
0,25	0,18	63	1710	1,14	4,5	0,10	2,8	3,0	53,0	60,0	64,0	0,47	0,57	0,65
0,33	0,25	63	1710	1,44	4,5	0,14	2,9	2,9	59,0	64,0	67,0	0,48	0,59	0,68
0,50	0,37	71	1720	2,07	5,0	0,21	2,7	3,0	56,0	64,0	68,0	0,48	0,59	0,69
0,75	0,55	71	1705	2,90	5,5	0,31	3,0	3,2	62,0	69,0	71,0	0,49	0,60	0,70
1,0	0,75	80	1720	3,02	7,2	0,42	2,5	2,9	72,0	77,5	79,5	0,62	0,74	0,82
1,5	1,1	80	1720	4,43	7,8	0,62	2,9	3,2	72,0	77,0	79,5	0,60	0,73	0,82
2,0	1,5	90S	1740	6,12	6,4	0,82	2,5	3,0	77,0	81,0	82,5	0,60	0,72	0,78
3,0	2,2	90L	1725	8,70	6,8	1,25	2,6	2,8	79,0	82,0	83,0	0,64	0,75	0,80
4,0	3,0	100L	1725	11,8	7,5	1,66	2,6	2,8	82,0	83,0	83,5	0,61	0,73	0,80
5,0	3,7	100L	1715	14,0	7,6	2,09	2,9	3,1	82,5	84,3	85,5	0,63	0,75	0,81

Figura 10 – Catálogo do motor escolhido para testes.

5 Desenvolvimento e Discussões

Como mencionado na metodologia do presente trabalho, o desenvolvimento foi dividido em *backend* e *frontend*, afim de tornar o código mais reaproveitável, abrangente e aberto para receber melhorias e manutenções no futuro. As duas etapas são detalhadas ao longo deste capítulo.

5.1 Backend

Primeiramente, é ilustrado na figura 11 o diagrama de classes com as classes mais relevantes que compõem o *backend* do software.

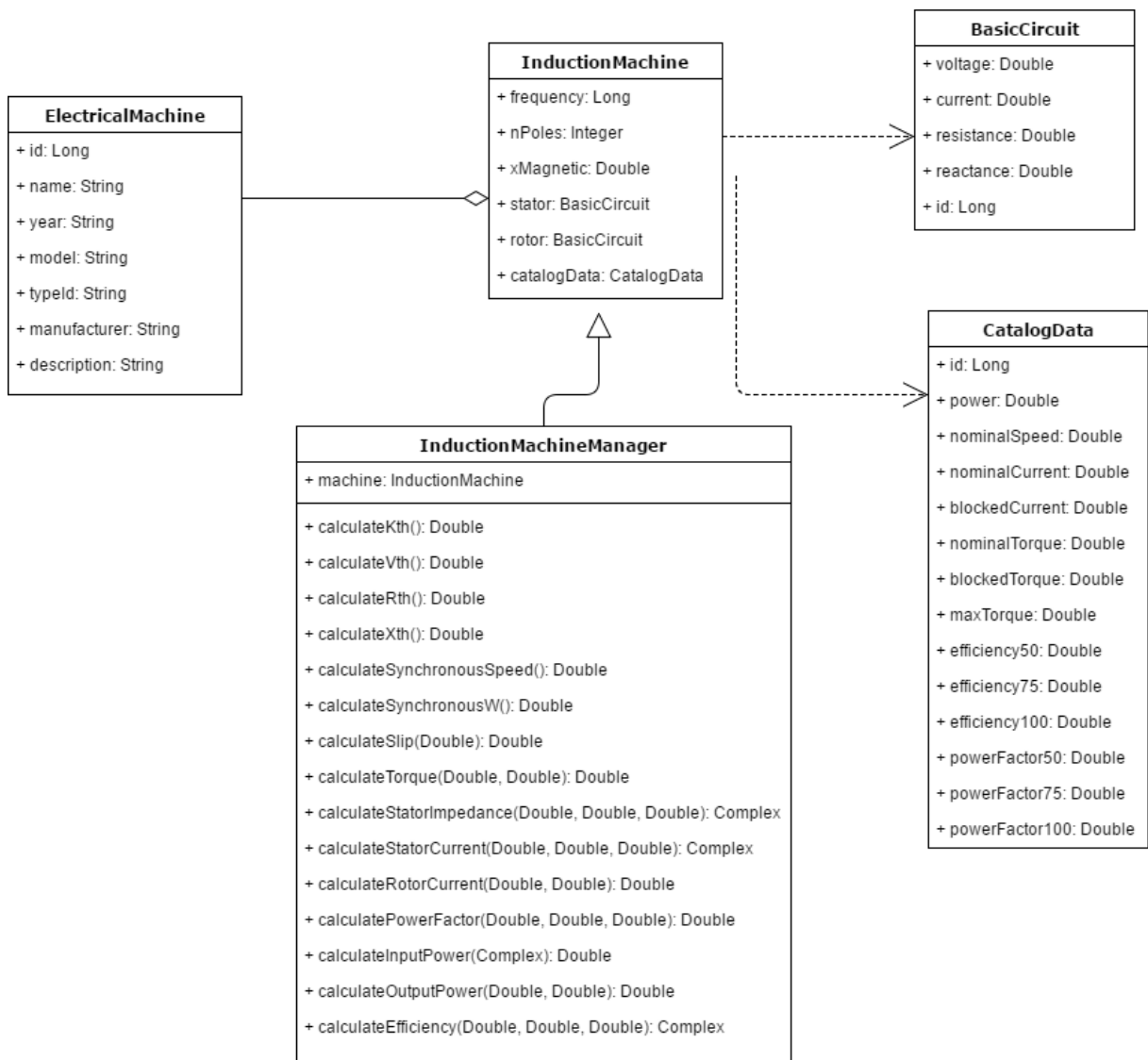


Figura 11 – Diagrama de classes com as classes principais da engine de processamento.

Será explicado a seguir cada uma das classes individualmente, assim como os atributos e métodos mais relevantes das mesmas, quando houver.

5.1.1 ElectricalMachine

Afim de realizar o encapsulamento do software e deixá-lo preparado para receber melhorias no futuro como, por exemplo, a adição de outros tipos de máquinas elétricas além dos motores de indução, foi criada uma interface genérica para máquinas elétricas.

O intuito dessa interface é ser o mais genérica possível, garantindo assim a abrangência a qualquer tipo de máquina elétrica que venha a ser adicionada ao software posteriormente. Para tal, buscou-se reunir somente atributos bastante genéricos nessa interface, isto é, atributos que qualquer máquina elétrica pode ter.

Poderia ter sido criada uma única classe `ElectricalMachine` que comportasse todas as máquinas elétricas e fosse tendo atributos novos adicionados a ela a medida que novas máquinas fossem suportadas pelo programa. Porém, essa abordagem não foi considerada a ideal por dificultar manutenção, por exigir diversas mudanças no código já funcional para adição de novas máquinas e por acabar poluindo o código com muita informação, diminuindo a redigibilidade, dificultando a edição e o entendimento do mesmo.

Os atributos considerados genéricos o suficiente para compor a classe básica de máquinas elétricas foram:

- a) **id** - Atributo do tipo `Long` correspondente ao ID da máquina no nosso sistema, isto é, um indexador único utilizado na tabela de máquinas do banco de dados para identificá-la. É gerado automaticamente ao registrar a máquina no banco de dados.
- b) **name** - Atributo do tipo `String` que corresponde ao nome dado pelo o usuário à máquina para facilitar sua identificação.
- c) **year** - Atributo do tipo `String` que corresponde ao ano de fabricação da máquina.
- d) **model** - Atributo do tipo `String` correspondente ao modelo da máquina, normalmente fornecido pelo fabricante.
- e) **typeId** - Atributo do tipo `String` correspondente ao tipo da máquina. No escopo atual, todas as máquinas são do tipo `INDUCTION_MACHINE`.
- f) **manufacturer** - Atributo do tipo `String` que corresponde ao nome do fabricante da máquina.
- g) **description** - Atributo do tipo `String` que corresponde a uma descrição dada a máquina pelo usuário.

5.1.2 InductionMachine

Essa classe estende a interface `ElectricalMachine`. A herança, em orientação a objeto, é utilizada para especializar um objeto de forma a manter as características da classe mãe ao mesmo tempo que se incorpora novas características específicas da classe filha.

Com isso, `InductionMachine` ainda é uma máquina elétrica e, como tal, possui todos os atributos da interface `ElectricalMachine`. Além dos atributos da interface que ela estende, a classe `InductionMachine` possui atributos que julgamos ser específicos ou que abrangem quase que exclusivamente as máquinas de indução. São eles:

- a) **frequency** - Atributo do tipo `Long` correspondente à frequência de funcionamento da máquina. Vale ressaltar aqui que este atributo, especificamente, não é específico de motores de indução. Porém, preferiu-se deixar específico por, nas máquinas de indução, ter grande usabilidade para determinação de alguns parâmetros, como velocidade nominal.
- b) **nPoles** - Atributo do tipo `Integer` que corresponde ao número de polos da máquina de indução.
- c) **xMagnetic** - Atributo do tipo `Double` correspondente à reatância de magnetização do circuito equivalente do motor de indução.
- d) **stator** - Atributo do tipo `BasicCircuit`, classe que será explicada mais a frente, que referencia ao circuito de estator.
- e) **rotor** - Atributo do tipo `BasicCircuit`, classe que será explicada mais a frente, que referencia ao circuito de rotor.
- f) **catalogData** - Atributo do tipo `catalogData`, classe que será explicada mais a frente, que referencia aos dados de catálogo da máquina de indução, isto é, os dados fornecidos pelo fabricante.

Cabe aqui uma observação de que, no futuro, seria uma boa prática a implementação de classes mais genéricas que `InductionMachine` que estendam `ElectricalMachine` para a divisão entre máquinas de corrente alternada e máquinas de corrente contínua. Não foi feito por não haver necessidade uma vez que, no nosso escopo, haveria uma classe ociosa não utilizada.

5.1.3 BasicCircuit

Novamente, essa classe foi criada com o intuito de possibilitar o encapsulamento de código e facilitar redigibilidade, manutenção e futuras alterações e melhorias. Uma vez que a composição tensão, corrente, resistência e reatância reference a um circuito, entendeu-se

que era uma boa prática isolar esse grupo em uma classe específica que defina um circuito básico.

A função dessa classe, portanto, é encapsular os elementos de um circuito básico em uma única classe, evitando-se criar vários atributos referentes à diferentes circuitos que possui uma máquina. Visto que, várias abordagens em vários tipos de máquinas diferentes envolve a aproximação a partir de circuitos elétricos, é prudente encapsular este grupo de informações para facilitar sua reprodução em diversos casos.

A própria classe *InductionMachine* é um exemplo onde o *BasicCircuit* teve um papel importante na organização de código. Ao invés de criar dentro da máquina de indução variáveis que referenciam os circuitos de stator e rotor, criou-se somente duas que, internamente, têm definidos os atributos que compõem um circuito básico.

Os atributos dessa classe são:

- a) **voltage** - Atributo do tipo *Double* correspondente à tensão de entrada do circuito.
- b) **current** - Atributo do tipo *Double* que corresponde à corrente do circuito.
- c) **resistance** - Atributo do tipo *Double* correspondente à resistência total do circuito.
- d) **reactance** - Atributo do tipo *Double* correspondente à reatância total do circuito
- e) **id** - Atributo do tipo *Long* correspondente ao ID do circuito no nosso sistema, isto é, um indexador único utilizado na tabela de circuitos do banco de dados para identificá-lo. É gerado automaticamente ao registrar um circuito no banco de dados.

Pode-se questionar a composição dessa classe por não flexibilizar a adição de componentes que talvez estejam presentes em um circuito básico e não são contemplados por ela, bem como a não possibilidade de elaboração de circuitos mais complexos. Entretanto, o intuito dessa classe é, justamente, mediante a uma necessidade futura tais implementações sejam possíveis simplesmente estendendo-a ou herdando-a em uma classe mais específica. Além disso, acréscimo de parâmetros à essa classe, não levariam à quebra da funcionalidade do código já existente.

5.1.4 CatalogData

A função dessa classe é reunir toda a informação dada pelo fabricante, isto é, as informações de catálogo da máquina de indução em um único objeto, facilitando obtenção, manuseio e edição de dados. A classe é auto-explicativa, a seguir são listados os atributos nela presentes:

- a) **id** - Atributo do tipo Long correspondente ao ID do dado de catálogo no nosso sistema, isto é, um indexador único utilizado na tabela de dados de catálogo do banco de dados para identificá-lo. É gerado automaticamente ao registrar um dado de catálogo no banco de dados.
- b) **power** - Atributo do tipo Double que corresponde à potência do motor, em watts.
- c) **nominalSpeed** - Atributo do tipo Double correspondente à velocidade nominal do motor.
- d) **nominalCurrent** - Atributo do tipo Double correspondente à corrente nominal do motor.
- e) **blockedCurrent** - Atributo do tipo Double correspondente à corrente com rotor bloqueado do motor.
- f) **nominalTorque** - Atributo do tipo Double que corresponde ao torque nominal do motor.
- g) **blockedTorque** - Atributo do tipo Double correspondente ao torque com rotor bloqueado do motor.
- h) **maxTorque** - Atributo do tipo Double correspondente ao torque máximo do motor.
- i) **efficiency50** - Atributo do tipo Double correspondente à eficiência do motor com 50% da potência.
- j) **efficiency75** - Atributo do tipo Double correspondente à eficiência do motor com 75% da potência.
- k) **efficiency100** - Atributo do tipo Double correspondente à eficiência do motor com 100% da potência.
- l) **powerFactor50** - Atributo do tipo Double correspondente ao fator de potência do motor com 50% da potência.
- m) **powerFactor75** - Atributo do tipo Double correspondente ao fator de potência do motor com 75% da potência.
- n) **powerFactor100** - Atributo do tipo Double correspondente ao fator de potência do motor com 100% da potência.

Pensando a nível de projeto, seria prudente a alteração do nome dessa classe para `IMCatalogData`, uma vez que outros tipos de máquinas também podem vir a possuir dados de catálogo, fornecidos pelo fabricante e os dados aqui contidos são específicos para motores de indução. Uma boa prática seria, inclusive, estender uma classe genérica

"CatalogData" que fizesse parte dos dados genéricos de máquinas elétricas, em Electrical-Machine.

5.1.5 InductionMachineManager

Corresponde à classe principal do *backend* desenvolvido. Responsável por reunir **toda** a parte de cálculo do projeto, essa classe é, como o nome diz, uma gerente de máquina de indução. Isto é, ela recebe como parâmetro um motor de indução e possibilita a requisição de diversas operações relacionadas a mesma que venham a ser necessárias.

Optou-se por esse modelo centralizado em uma classe destinada especificamente aos cálculos envolvendo motores de indução para, em primeiro lugar, deixar a classe de motor de indução simples e legível. Em segundo lugar, foi escolhido concentrar todo o código da parte de cálculos em um único lugar. Assim, facilita-se pontos considerados importantes e sobre os quais o projeto deste software foi desenvolvido como: redigibilidade, manutenção e flexibilidade para melhorias no futuro.

Como já mencionado, o único atributo que essa classe possui é uma máquina de indução, do tipo InductionMachine, correspondente à máquina sobre as quais os cálculos serão realizados.

Diferentemente das demais classes, essa classe possui métodos que vão além de *getters* e *setters* e que são de suma importância para o entendimento do funcionamento do software. Assim, nesta seção vamos nos ater à descrição detalhada de cada um dos métodos contextualizando, quando necessário, seu funcionamento com expressões relativas ao capítulo de fundamentação teórica deste trabalho.

Métodos contemplados nesta classe:

a) Double calculateKth ()

- **Descrição:** Esse método é responsável pelo cálculo de K_{th} à partir do circuito equivalente da máquina de indução. Utiliza-se da fórmula expressa na equação 3.13.
- **Parâmetros:** Não recebe nenhum parâmetro de entrada.
- **Retorno:** Retorna o valor calculado de K_{th} .

b) Double calculateVth ()

- **Descrição:** Esse método é responsável pelo cálculo de V_{th} , isto é, a tensão de Thevenin, à partir do circuito equivalente da máquina de indução. Utiliza-se da fórmula expressa na equação 3.10.
- **Parâmetros:** Não recebe nenhum parâmetro de entrada.
- **Retorno:** Retorna o valor calculado de V_{th} .

c) Double calculateRth ()

- **Descrição:** Esse método é responsável pelo cálculo de R_{th} , isto é, a resistência de Thevenin, à partir do circuito equivalente da máquina de indução. Utiliza-se da fórmula expressa na equação 3.11.
- **Parâmetros:** Não recebe nenhum parâmetro de entrada.
- **Retorno:** Retorna o valor calculado de R_{th} .

.

d) **Double calculateXth ()**

- **Descrição:** Esse método é responsável pelo cálculo de X_{th} , isto é, a reatância de Thevenin, à partir do circuito equivalente da máquina de indução. Utiliza-se da fórmula expressa na equação 3.12.
- **Parâmetros:** Não recebe nenhum parâmetro de entrada.
- **Retorno:** Retorna o valor calculado de X_{th} .

.

e) **Double calculateSynchronousSpeed ()**

- **Descrição:** Esse método é responsável pelo cálculo de n_s , isto é, a velocidade síncrona da máquina de indução. Utiliza-se da fórmula expressa na equação 3.2.
- **Parâmetros:** Não recebe nenhum parâmetro de entrada.
- **Retorno:** Retorna o valor calculado da velocidade síncrona.

.

f) **Double calculateSynchronousW ()**

- **Descrição:** Esse método é responsável pelo cálculo de ω_s , isto é, a velocidade angular síncrona da máquina de indução. Utiliza-se da fórmula expressa na equação 3.3.
- **Parâmetros:** Não recebe nenhum parâmetro de entrada.
- **Retorno:** Retorna o valor calculado de ω_s .

.

g) **Double calculateSlip (Double n)**

- **Descrição:** Esse método é responsável pelo cálculo do escorregamento da máquina dada uma velocidade n de motor. Utiliza-se da equação 3.1 para realizar o cálculo do escorregamento.
- **Parâmetros:** Variável n do tipo Double que corresponde à velocidade instantânea da máquina.
- **Retorno:** Retorna o valor calculado para o escorregamento a partir da velocidade instantânea n recebida.

h) **Double calculateTorque (Double n, Double r2)**

- **Descrição:** Esse método é responsável pelo cálculo do torque momentâneo da máquina de indução dada uma velocidade n e um valor de resistência $r2$. Por padrão, utiliza-se a resistência do próprio circuito equivalente de rotor. Entretanto, foi feito desta forma afim de suportar, no futuro, o acréscimo de resistências agregadas ao rotor para melhorar o torque de partida. Refere-se à equação 3.15.
- **Parâmetros:** Variável n do tipo Double que corresponde à velocidade instantânea da máquina e variável $r2$ do tipo Double que corresponde à resistência de rotor da máquina.
- **Retorno:** Retorna o valor calculado para o Torque momentâneo a partir da velocidade instantânea n e da resistência de rotor recebidas.

i) **Complex calculateStatorImpedance (Double n)**

- **Descrição:** Esse método é responsável pelo cálculo da impedância de entrada momentânea do estator da máquina de indução dada uma velocidade n . Refere-se à equação 3.45.
- **Parâmetros:** Variável n do tipo Double que corresponde à velocidade instantânea da máquina.
- **Retorno:** Retorna um valor do tipo Complex que corresponde a um número complexo com módulo e fase, calculados para a impedância de entrada momentânea do estator a partir da velocidade instantânea n .

j) **Complex calculateStatorCurrent (Double n)**

- **Descrição:** Esse método é responsável pelo cálculo da corrente momentânea de estator da máquina de indução dada uma velocidade n . Refere-se à equação 3.47.
- **Parâmetros:** Variável n do tipo Double que corresponde à velocidade instantânea da máquina.
- **Retorno:** Retorna um valor do tipo Complex que corresponde a um número complexo com módulo e fase, calculados para a corrente de a partir da velocidade instantânea n .

k) **Double calculateRotorCurrent (Double n, Double r2)**

- **Descrição:** Esse método é responsável pelo cálculo a corrente momentânea no rotor da máquina de indução dada uma velocidade n e um valor de resistência $r2$. Por padrão, utiliza-se a resistência do próprio circuito equivalente de rotor. Entretanto, foi feito desta forma afim de suportar, no futuro, o acréscimo de resistências agregadas ao rotor para melhorar o torque de partida. Refere-se à equação 3.14.
- **Parâmetros:** Variável n do tipo Double que corresponde à velocidade instantânea da máquina e variável $r2$ do tipo Double que corresponde à resistência de rotor da máquina.
- **Retorno:** Retorna o valor calculado para o módulo da corrente no rotor a partir da velocidade instantânea n e da resistência de rotor recebidas.

.

l) **Double calculatePowerFactor (Double n)**

- **Descrição:** Esse método é responsável pelo cálculo do fator de potência momentâneo da máquina de indução dada uma velocidade n . Refere-se à equação 3.48.
- **Parâmetros:** Variável n do tipo Double que corresponde à velocidade instantânea da máquina.
- **Retorno:** Retorna o valor calculado para o fator de potência momentâneo da máquina de indução a partir da velocidade instantânea n .

.

m) **Double calculateInputPower (Complex statorCurrent)**

- **Descrição:** Esse método é responsável pelo cálculo da potência de entrada momentânea da máquina de indução dados módulo e fase da corrente de estator. Refere-se à equação 3.49.
- **Parâmetros:** Variável do tipo Complex correspondente a corrente de estator, com seu módulo e fase.
- **Retorno:** Retorna o valor calculado para a potência de entrada momentânea da máquina de indução a partir da corrente de estator naquele momento.

.

n) **Double calculateOutputPower (Double rotorCurrent, Double slip)**

- **Descrição:** Esse método é responsável pelo cálculo da potência mecânica momentânea da máquina de indução a partir do módulo da corrente do rotor e do escorregamento momentâneos. Refere-se à equação 3.7.
- **Parâmetros:** Variáveis do tipo Double correspondentes ao módulo da corrente no rotor e ao escorregamento momentâneos.

- **Retorno:** Retorna o valor calculado para a potência mecânica momentânea da máquina de indução a partir do módulo da corrente de rotor e do escorregamento naquele momento.

.

o) **Double calculateEfficiency (Double n)**

- **Descrição:** Esse método é responsável pelo cálculo da eficiência momentânea da máquina de indução dado uma velocidade instantânea n . Refere-se à equação 3.50.
- **Parâmetros:** Variável do tipo Double correspondente a velocidade momentânea da máquina.
- **Retorno:** Retorna o valor calculado para a eficiência da máquina de indução a partir da velocidade da mesma naquele momento.

.

Nesta seção foi dada uma visão geral de como o *backend* do nosso software foi projetado, a arquitetura e organização adotados, bem como foram detalhados algumas implementações relevantes ao entendimento de seu funcionamento.

5.2 *Frontend*

6 Conclusão

Referências

HEATH, G. *Single-phase induction motor safety controller*. Google Patents, 1997. US Patent 5,670,858. Disponível em: <<https://www.google.com/patents/US5670858>>. Citado na página 19.

JIAN N. L. SCHMITZ, D. W. N. T. W. Characteristic induction motor slip values for variable voltage part load performances optimization. In: *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. [S.l.: s.n.], 1983. p. 38–46. Citado na página 19.

MOHAN, N. Improvement in energy efficiency of induction motors by means of voltage control. In: *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. [S.l.: s.n.], 1980. p. 1466–1471. Citado na página 19.

NOLA, F. *Power factor control system for ac induction motors*. Google Patents, 1977. US Patent 4,052,648. Disponível em: <<https://www.google.com/patents/US4052648>>. Citado na página 19.

NOVOTNY D.J. GRITTER, G. S. D. Self-excitation in inverter driven induction machines. In: *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. [S.l.: s.n.], 1977. p. 1117–1125. Citado na página 19.

SEN, P. C. *Principles of electric machines and power electronics*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007. Citado na página 19.

STERN, D. W. N. R. A simplified approach to the determination of induction machine dynamic response. In: *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. [S.l.: s.n.], 1978. p. 1430–1439. Citado na página 19.