

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DAELE - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
ENGENHARIA ELÉTRICA

IGOR VINICIUS FORNAZIERI FERRI

**ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DE UM MOTOR  
DE INDUÇÃO TRIFÁSICO UTILIZANDO SUAS CURVAS DE  
DESEMPENHO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO  
2018

IGOR VINICIUS FORNAZIERI FERRI

**ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DE UM MOTOR  
DE INDUÇÃO TRIFÁSICO UTILIZANDO SUAS CURVAS DE  
DESEMPENHO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação apresentado à disciplina EL10A - Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná - UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Favoretto Castoldi

Coorientador: Prof. Dr. Alessandro Goedel

CORNÉLIO PROCÓPIO  
2018



**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
**Campus Cornélio Procópio**  
**Departamento Acadêmico de Elétrica**  
**Curso de Engenharia Elétrica**



## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Igor Vinicius Fornazieri Ferri**

### **Estimação dos parâmetros elétricos de um motor de indução trifásico utilizando suas curvas de desempenho**

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 15:00hs do dia 29/11/2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof(a). Dr(a). Marcelo Favoretto Castoldi - Presidente (Orientador)

---

Prof(a). Dr(a). Alessandro Goedel - (Coorientador)

---

Prof(a). Dr(a). Francisco de Assis Scannavino Junior - (Membro)

---

Prof(a). Dr(a). Danilo Sipoli Sanches - (Membro)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por todas as bênçãos que Ele tem proporcionado à minha vida.

Agradeço aos meus pais e à minha irmã por todo o apoio, inspiração e carinho, bem como tudo que fizeram em minha vida, por estarem ao meu lado, nos momentos mais felizes e também, os mais difíceis.

Agradeço ao meu orientador, professor Dr. Marcelo Favoretto Castoldi, pela amizade, pelos grandes ensinamentos e por estar sempre disposto a me ajudar e auxiliar no meu desenvolvimento tanto como aluno, quanto como profissional.

Agradeço ao meu co-orientador, professor Dr. Alessandro Goedel, por aceitar fazer parte deste trabalho, além dos grandes ensinamentos que me fizeram crescer e encarar a graduação de uma maneira diferente, após as aulas de Máquinas Elétricas 1.

Agradeço aos responsáveis pelo Laboratório de Eletrônica de Potência, Qualidade de Energia e Energias Renováveis (LEPQUER) e do Laboratório de Sistemas Inteligentes (LSI) por disponibilizarem os equipamentos necessários a realização dos ensaios, bem como aos amigos do LSI, em especial ao Clayton, por todo o apoio durante o período de ensaios.

Ao Prof. Dr. Francisco de Assis Scannavino Junior e ao Prof. Dr. Danilo Sipoli Sanches por aceitarem participar da banca deste trabalho.

Agradeço a todos os professores e demais colaboradores da UTFPR - Campus Cornélio Procopio que de alguma forma me auxiliaram nessa conquista e que fizeram com que eu me sentisse bem durante esse período em que lá estive.

Agradeço a todos os amigos que a faculdade me deu, sem a amizade de vocês, seria uma jornada muito mais complicada, em especial aos amigos do período de van, da Toca do Guaxinim, da Rep.produtores e aos demais amigos a vida me deu, em especial ao Renato e Leônidas.

Por último, gostaria de agradecer ao meu grande amigo, Luiz Gustavo Roncon (*em memória*), por ter me dado a oportunidade de ser seu amigo, pela parceria ao longo da faculdade, em todos os trabalhos, provas e aulas, bem como os momentos fora da faculdade. Infelizmente você partiu tão cedo, algo que jamais poderemos entender, cabendo a nós apenas aceitar e aprender a conviver com isso. Mais uma vez, muito obrigado.

*"O dicionário é o único lugar onde o sucesso vem antes do trabalho. O trabalho duro é o preço que todos devemos pagar pelo sucesso."*  
Vince Lombardi.

## RESUMO

FERRI, I. V. F.. Estimação dos parâmetros elétricos de um motor de indução trifásico utilizando suas curvas de desempenho. 2018. 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2018.

Os motores de indução trifásicos estão presentes nos mais diversos setores da indústria, sendo responsáveis por aproximadamente 30% do consumo de energia elétrica do Brasil. Para o correto acionamento e controle do motor é necessário o conhecimento dos valores de seus parâmetros, porém estes podem não ser diretamente fornecidos pelos fabricantes. O método mais usual para a obtenção desses valores é através de ensaios, a vazio e o de rotor bloqueado. Estes testes são normatizados e podem haver discrepâncias entre as normas. A fim de simplificar e automatizar o processo de estimação dos parâmetros, este trabalho propõe a implementação de um algoritmo de evolução diferencial para estimar os parâmetros de um motor de indução trifásico, utilizando dados de catálogos fornecido pelos fabricantes. Para a validação do método foram realizadas a estimação utilizando quatro modelos, combinando duas modelagens matemáticas e duas configurações de circuito, porém os parâmetros de controle dos algoritmos foram os mesmos para os quatro cenários. O modelo de circuito e modelagem mais simples, ou seja, desconsiderando a resistência de perdas no núcleo e as perdas suplementares, foi o que apresentou o melhor resultado, no caso, o menor *fitness* dentre os quatro modelos, apresentando erros menores que 3% em relação as grandezas conhecidas, retiradas por meio das curvas de desempenho do motor. Em nenhum dos casos, o erro em relação a alguma grandeza foi superior a 5%. Através da análise dos parâmetros, foi possível verificar o comportamento dos parâmetros e a distribuição da potência através do circuito equivalente. Este trabalho apresentou também como esses parâmetros se comportam quando o mesmo está sendo acionado por uma tensão não-senoidal e também, trabalhando fora das condições nominais, com tensão e frequência reduzida e então, comparando o que foi obtido computacionalmente com o que foi medido em laboratório.

**Palavras-chave:** Estimação de parâmetros. Motor de indução trifásico. Evolução Diferencial.

## ABSTRACT

FERRI, I. V. F.. Estimation of the electrical parameters of a three-phase induction motor using its characteristic curves . 2018. 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2018.

Induction motors are present in a wide range of industrial sectors, being responsible for almost 30% of Brazil's electricity consumption. For the correct motor's drive and control it is required know its parameters values, however, the manufacturers usually do not present directly these parameters. The most usual method to obtaining these values is through tests, no-load test and locked rotor test. These tests are standardized but there may be unconformity between the standards. In order to simplify and automate the parameters estimation, this work proposes the use of a differential evolution algorithm to estimate the electrical parameters of a three-phase induction motor, using data provided by the manufacturer's datasheet. For the validation of the method, the estimation was made using four models, combining two mathematical models and two circuit configurations, but the control parameters of the algorithms were the same for the four scenarios. The simplest circuit and modeling model, excluding core loss resistance and supplemental losses was the one that presented the best result, in this case, the smallest fitness of the four models, presenting errors less than 3% in relation to the known electrical magnitude, obtained through the motor performance curves. In none of the cases, the error for some magnitude was greater than 5%. Through the analysis of the parameters, it was possible to verify the behavior of the parameters and the power distribution through the equivalent circuit. This work also presented how these parameters behave when a non-sinusoidal voltage is driving it, also, working outside the nominal conditions, with reduced voltage and frequency, and then comparing what was obtained computationally with what was measured in laboratory.

**Keywords:** Parameters Estimation. Three-Phase Induction Motor. Differential Evolution.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Vista lateral em corte de uma máquina de indução. . . . .	18
Figura 2 – Representação por fase do modelo de transformador do motor de indução trifásico. . . . .	19
Figura 3 – Circuito equivalente do MIT. . . . .	20
Figura 4 – Circuito equivalente simplificado do MIT. . . . .	21
Figura 5 – Curvas de desempenho do motor em função da potência fornecida. . . . .	25
Figura 6 – Curvas de conjugado e corrente do motor em função da velocidade síncrona. . . . .	26
Figura 7 – Etapa do processo de mutação. . . . .	30
Figura 8 – Etapa do processo de cruzamento. . . . .	31
Figura 9 – Fluxograma para exemplificar o funcionamento do DE. . . . .	32
Figura 10 – Curvas de desempenho do motor escolhido para o trabalho. . . . .	38
Figura 11 – Tela do equipamento utilizado para a realização das medições e coleta dos dados do motor acionado por inversor de frequência. . . . .	40
Figura 12 – Vista parcial da bancada de ensaios e dos equipamentos utilizados nos ensaios. . . . .	41



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores assumidos de perda suplementar em carga nominal. . . . .	22
Tabela 2 – Folha de dados fornecidos pelo fabricante. . . . .	23
Tabela 3 – Dados fornecidos pelo fabricante referente ao fator de potência e rendimento. . . . .	24
Tabela 4 – Folha de dados fornecidos pelo fabricante para o motor utilizado. . . . .	37
Tabela 5 – Dados obtidos através das curvas do MIT para o motor de 1cv do LSI. . . . .	38
Tabela 6 – Parâmetros estimados pelo algoritmo para o primeiro modelo de circuito. . . . .	42
Tabela 7 – Dados das grandezas retornadas pelo algoritmo para o primeiro modelo adotado. . . . .	42
Tabela 8 – Parâmetros estimados pelo algoritmo para o segundo modelo de circuito. . . . .	43
Tabela 9 – Dados das grandezas retornadas pelo algoritmo para o segundo modelo adotado. . . . .	43
Tabela 10 – Parâmetros estimados pelo algoritmo para o terceiro modelo de circuito. . . . .	44
Tabela 11 – Dados das grandezas retornadas pelo algoritmo para o terceiro modelo adotado. . . . .	44
Tabela 12 – Parâmetros estimados pelo algoritmo para o quarto modelo de circuito. . . . .	45
Tabela 13 – Dados das grandezas retornadas pelo algoritmo para o quarto modelo adotado. . . . .	45
Tabela 14 – Comparativo dos parâmetros estimados e o <i>fitness</i> para cada caso. . . . .	46
Tabela 15 – Comparativo dos valores obtidos, tensão e frequência nominal e torque menor que o nominal. . . . .	47
Tabela 16 – Comparativo dos valores obtidos, tensão de 184,5V, frequência de 50 Hz e torque menor que o nominal. . . . .	47
Tabela 17 – Comparativo dos valores obtidos, tensão de 149,5V, frequência de 40 Hz e torque menor que o nominal. . . . .	48

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABC	Colônia Artificial de Abelha - do inglês <i>Artificial Bee Colony</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACO	Otimização por Colônia de Formigas, do inglês <i>Ant Colony Optimization</i>
AE	Algoritmos Evolutivos
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CIPECA	Centro Integrado de Pesquisa em Controle e Automação
DE	Evolução Diferencial, do inglês <i>Differential Evolution</i>
EKF	Filtro de Kalman Estendido, do inglês <i>Extended Kalman Filter</i>
FO	Função Objetivo
GA	Algoritmo Genético, do inglês <i>Genetic Algorithm</i>
LEPQER	Laboratório de Eletrônica de Potência, Qualidade de Energia e Energias Renováveis
LSI	Laboratório de Sistemas Inteligentes
MIT	Motor de Indução Trifásico
PSO	Otimização por Enxame de Partículas, do inglês <i>Particle Swarm Optimization</i>
RNA	Redes Neurais Artificiais

## LISTA DE ALGORITMOS

Algoritmo 1 – Estrutura comum a todas classes de algoritmos evolutivos . . . . .	28
Algoritmo 2 – Estrutura inicial do algoritmo. . . . .	35
Algoritmo 3 – Rotina principal do algoritmo. . . . .	36

## SUMÁRIO

<b>1 – INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1 OBJETIVOS	15
1.1.1 Objetivo Geral	15
1.1.2 Objetivos Específicos	15
1.2 JUSTIFICATIVA	15
1.3 DISPOSIÇÃO DO TRABALHO	16
<b>2 – MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO</b>	<b>17</b>
2.1 CIRCUITO EQUIVALENTE DO MIT	18
2.2 CURVAS DE DESEMPENHO	23
<b>3 – EVOLUÇÃO DIFERENCIAL</b>	<b>27</b>
3.1 INTRODUÇÃO	27
3.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	27
<b>4 – METODOLOGIA</b>	<b>33</b>
4.1 ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS PELO DE	33
4.2 VALIDAÇÃO DO ALGORITMO	36
4.2.1 CURVAS DE DESEMPENHO	37
4.2.2 MODELOS UTILIZADOS	38
4.2.3 ENSAIOS LABORATORIAIS	39
<b>5 – RESULTADOS</b>	<b>42</b>
5.1 ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS	42
5.1.1 MODELO 1	42
5.1.2 MODELO 2	43
5.1.3 MODELO 3	44
5.1.4 MODELO 4	45
5.2 ENSAIOS LABORATORIAIS.	46
<b>6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>49</b>
6.1 PERSPECTIVA PARA TRABALHOS FUTUROS	50
6.2 TRABALHOS PUBLICADOS	50
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>51</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo o estudo "Plano Nacional de Eficiência Energética", realizado pelo Ministério de Minas e Energia, cerca de 43,7% de toda energia consumida no Brasil é devida às atividades industriais, sendo que deste percentual, 68% são consumidos devido a utilização de máquinas elétricas, com isso, tem-se que aproximadamente 30% de toda a energia elétrica consumida no Brasil se deve a utilização de máquinas elétricas rotativas (MME, 2011).

Dentro das máquinas elétricas rotativas utilizadas nos processos industriais, destaca-se o motor de indução trifásico (MIT), este por sua vez, é o motor mais utilizado em sistemas de acionamentos eletromecânicos, devido principalmente a características como a sua simples construção, o que permite uma operação isenta de manutenção, a sua robustez, o seu baixo custo e a possibilidade de trabalhar em localizações remotas, como por exemplo, locais onde a poeira e outros materiais abrasivos devam ser considerados (KOSOW, 2005).

O MIT é constantemente aplicado com superdimensionamento, ou seja, trabalham com um fator de carga - razão entre a carga aplicada e a carga nominal do motor - menor que 75%. Isso faz com que o motor trabalhe com um fator de potência baixo, comprometendo a eficiência energética da instalação, como por exemplo, uma planta industrial (MARQUESIN JUNIOR, 2011).

Apesar de ser uma alternativa recente, o acionamento e controle dos motores utilizando inversores de frequência é amplamente utilizado em processos industriais. Para executar um projeto eficiente de acionamento e controle do motor é necessário que sejam conhecidos os seus parâmetros.

Os *datasheets* podem não apresentar os valores dos parâmetros elétricos e mecânicos de maneira direta, mas apresentam curvas de desempenho do motor, as quais expressam seu comportamento em tensão e frequência nominais. No caso de motores alimentados por inversores de frequência, o motor trabalha com valores de tensão e frequência diferentes do nominal, logo, não é possível determinar o comportamento do motor operando com o inversor.

Portanto, é necessário algum processo para a estimação dos valores dos parâmetros do MIT para que então, seja conhecido todo o comportamento do motor. O método mais comum é a estimação dos parâmetros realizando ensaios no MIT, como por exemplos os testes a vazio, o de rotor bloqueado e o ensaio em corrente contínua.

Os ensaios necessários para a estimação dos parâmetros são normatizados, ou sejam, dependem da localidade na qual o motor foi projetado e construído, com isso, podem haver discrepâncias entre as normas. No Brasil, os ensaios são regulamentados pela ABNT NBR 5383-1 (2002), sendo que esta define três categorias para motores: Categoria H, N e D. Já a IEEE Std. 112 (2004) define quatro categorias: Categoria A, B, C e D.

A fim de simplificar e automatizar o processo de estimação dos parâmetros elétricos e mecânicos do MIT, surgiu-se a possibilidade da utilização de métodos computacionais que

utilizam-se de grandezas conhecidas do motor como, por exemplo, tensão e corrente para a estimação dos parâmetros e, assim substituírem a tradicional determinação de parâmetros por ensaios elétricos. Os métodos computacionais surgiram a fim de se obterem resultados factíveis para problemas complexos de otimização. Existem diversos métodos computacionais que, neste caso, podem ser utilizados para a estimação dos parâmetros desejados, ou serem aplicados na resolução de diversos problemas de engenharia como, por exemplo, o estimador de estado Filtro de Kalman Estendido (EKF - do inglês *Extended Kalman Filter*), sendo a versão não-linear do Filtro de Kalman, desenvolvido por Kalman (1960), e meta-heurísticas como os Algoritmos Genéticos (GA - do inglês *Genetic Algorithm*), inicialmente desenvolvido por Holland (1975). Com o passar dos anos, surgiram novos métodos de otimização baseado em comportamentos da natureza, como por exemplo os métodos de Otimização por Colônia de Formigas (ACO - do inglês *Ant Colony Optimization*) que foi introduzido Dorigo (1992), a Otimização por Enxame de Partículas (PSO - do inglês *Particle Swarm Optimization*), inicialmente proposto por Kennedy e Eberhart (1995), Colônia Artificial de Abelha (ABC - do inglês *Artificial Bee Colony*), entre outros métodos.

Aksoy, Mühürçü e Kizmaz (2010) propuseram um algoritmo online utilizando a técnica Filtro de Kalman Estendido (EKF) para estimar os parâmetros de um motor de indução trifásico. A modelagem matemática utilizada no algoritmo foi o modelo dinâmico e, para os dados entrada do algoritmo, foram utilizadas medidas de tensão e corrente do estator e velocidade do rotor.

Sarem et al. (2007) realizou um estudo na qual foram utilizados um algoritmo genético e um algoritmo genético híbrido para fazerem a estimação dos parâmetros elétricos de dois geradores síncronos usando dados obtidos através do Ensaio de Resposta em Frequência com Rotor Travado (SSFR - do inglês *Stand-Still Frequency Response*).

Já o estudo de Sankardoss e Geethanjali (2017) estimou os parâmetros de um motor de corrente contínua utilizando diversas técnicas computacionais. Foram utilizados os métodos de otimização por enxame de partículas (PSO), sendo este implementado em três modelos distintos, o modelo padrão, dinâmico com peso de inércia constante e por fim com peso de inércia variável. Outra técnica utilizada foi a otimização por colônia de formiga (ACO), e por último, colônia artificial de abelha (ABC), inicialmente proposto por Karaboga (2005). Os resultados obtidos pelos meios computacionais foram comparados com os resultados obtidos experimentalmente.

O algoritmo de evolução diferencial, inicialmente proposto por Storn e Price (1995), sendo uma boa alternativa para os métodos citados anteriormente, pois é um algoritmo robusto, de fácil implementação, afinal este necessita de apenas três parâmetros de controle, dificilmente fica preso em ótimos locais e tende a ter uma convergência mais rápida que os algoritmos genéticos (CHENG; HWANG, 2001).

## 1.1 OBJETIVOS

A fim de uma melhor explanação, os objetivos deste trabalho serão discutidos de maneira geral e específica.

### 1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um algoritmo baseado em evolução diferencial, que seja eficiente e robusto, capaz de estimar os parâmetros elétricos do circuito equivalente do motor de indução trifásico - resistências de estator e de rotor e as indutâncias de dispersão de estator e de rotor e indutância de magnetização - tendo como entrada os dados de operação obtidos através das curvas de desempenho fornecidas pelo fabricante.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver uma fundamentação teórica sobre o motor de indução trifásico, algoritmos evolutivos, destacando-se o de evolução diferencial e a modelagem em regime permanente da máquina.
- Implementar um algoritmo de evolução diferencial para a estimação dos parâmetros elétricos do circuito equivalente da máquina, utilizando quatro modelos distintos de circuito e modelagem da máquina.
- Realizar ensaios em laboratório para a medida de dados com o motor operando em diversas condições de operação.
- Comparar os resultados obtidos pelo por meio das curvas de desempenho e por meio dos ensaios.
- Analisar o comportamento dos parâmetros elétricos de acordo com a modelagem e o circuito equivalente adotado.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Os controladores aplicados a um determinado motor irá depender inicialmente da estratégia de controle adotada, com isso, o cálculo para a determinação dos controladores utilizam-se dos parâmetros elétricos do circuito equivalente do motor de indução - resistências de estator, de rotor e perdas no núcleo, indutâncias de dispersão de rotor e estator e indutância de magnetização. Uma vez que esses parâmetros nem sempre são fornecidos diretamente pelo fabricante, é necessário um método eficiente para a estimação desses, para que então, o

projeto do acionamento e controle do motor seja feito de maneira correta (GOEDTEL, 2007; JACOBINA; LIMA, 2002).

O algoritmo de evolução diferencial será implementado portanto, para realizar de maneira confiável, a estimação desses parâmetros, utilizando-se de dados obtidos por meio das curvas de desempenho do motor, que são fornecidas pelos fabricantes. Para o algoritmo serão fornecidos três pontos de operação com os seus valores de corrente, rendimento, fator de potência e escorregamento. Esses dados serão inseridos na função objetivo do algoritmo, que utilizará as equações da modelagem em regime permanente da máquina. O algoritmo irá realizar iterações até que um critério de parada seja atingido. Após uma série de repetições serem realizadas, o algoritmo apresentará os valores dos parâmetros estimados.

A fim de se verificar a confiabilidade dos parâmetros estimados, será simulado e implementado em um motor de indução trifásico, a operação do motor com carga em distintos pontos de operação. Será realizado também o acionamento do motor por meio de inversor de frequência, a fim de se comparar as medidas obtidas em ambiente laboratorial com as obtidas por meio do algoritmo.

### **1.3 DISPOSIÇÃO DO TRABALHO**

O capítulo inicial apresenta uma breve introdução sobre a importância e necessidade da estimação dos parâmetros do MIT, é apresentado também as propostas a serem desenvolvidas neste trabalho.

No segundo capítulo é apresentado a análise do circuito equivalente do motor de indução, apresentando as equações em regime permanente da máquina, sendo estas utilizadas pelo algoritmo DE para que este realize a estimação dos parâmetros.

No terceiro capítulo é apresentada uma breve introdução sobre os algoritmos evolutivos, com foco no algoritmo de evolução diferencial, detalhando as suas etapas de funcionamento.

No quarto capítulo é apresentada a metodologia utilizada para a realização da estimação dos parâmetros por meio das curvas de desempenho, assim como o método utilizado para validar o algoritmo proposto.

No quinto capítulo são apresentados os resultados obtidos por meio do algoritmo, validando o mesmo.

No sexto capítulo realizam-se as considerações finais relativas ao algoritmo e ao processo de estimação de parâmetros e as propostas para os trabalhos futuros.



## 2 MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

As máquinas polifásicas de indução e síncronas são conversores eletromecânicos rotativos baseados na geração de um campo magnético girante em seu estator e por essa razão, são também conhecidas como máquinas de campo girante. Na máquina de indução, as tensões e correntes que fluem pelo estator e rotor são alternadas. A máquina síncrona possui tensão e corrente alternada em seu enrolamento de estator, sendo o enrolamento de campo do rotor, é excitado com corrente contínua. Os enrolamentos polifásicos geram forças magnetomotrizes girantes (fmm) em relação a estrutura física nas quais os enrolamentos estão presente.

A máquina de indução trifásica, alimentada por um fonte também trifásica estabelece uma distribuição de campo magnético girante em relação ao estator. A velocidade em que o campo gira é a chamada velocidade síncrona ( $\omega_s$ ), esta por sua vez, é dependente do número de pólos do enrolamento do estator e da frequência de alimentação da fonte trifásica. Esta distribuição de campo magnético do estator, concatena o enrolamento do rotor, fazendo com que haja a indução de tensões polifásicas no rotor e, conseqüentemente, correntes polifásicas no rotor. Estas correntes de rotor produzem forças magnetomotrizes, portanto, é estabelecido uma distribuição de fluxo no rotor. (BIM, 2014).

O torque na máquina de indução é gerado através da interação entre os fluxos de rotor e estator. A frequência das tensões induzidas no rotor e das correntes são definidas através da velocidade relativa entre as velocidades do rotor ( $n$ ) e do campo girante ( $n_s$ ) produzido no estator, sendo esta diferença de velocidade conhecida como escorregamento ( $s$ ), que é uma propriedade exclusiva da máquina de indução. O escorregamento é geralmente apresentado em seu valor percentual (%) e é dado através equação (1):

$$s = 100\% \cdot \left( \frac{n_s - n}{n_s} \right) [\%] \quad (1)$$

Ao contrário das máquinas de corrente contínua, as máquinas de indução não possuem um enrolamento específico de campo. O estator possui ranhuras igualmente espaçadas entre si, nas quais são distribuídas as bobinas que constituem o enrolamento do estator, no caso do motor de indução, a armadura. Referente ao rotor, a máquina de indução possui dois tipos de enrolamentos, podendo ser montado na forma em que os enrolamentos do rotor estão distribuídos de forma semelhante ao estator, conhecida como "rotor bobinado" ou na forma de barras de cobre curto circuitadas, conhecidas como "rotor gaiola de esquilo".

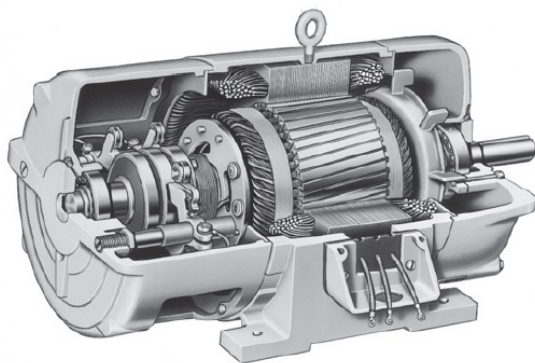
O rotor do tipo bobinado possui um conjunto completo de enrolamentos trifásicos, sendo semelhantes aos presentes no estator, que são usualmente ligados em estrela (Y) e os seus terminais são conectados externamente a anéis deslizantes no eixo do rotor. Os enrolamentos do rotor são curto-circuitados através de escovas presas nos anéis. Isso torna as correntes do rotor acessíveis, portanto é possível alterar o comportamento da máquina inserindo resistências externas ao seu circuito, o que altera a característica de torque do motor. Este tipo de motor

possui poucas aplicações e um custo elevado em relação ao do tipo gaiola de esquilo. A Figura 1-a) apresenta a vista em corte lateral do motor de indução do tipo rotor bobinado (CHAPMAN, 2013).

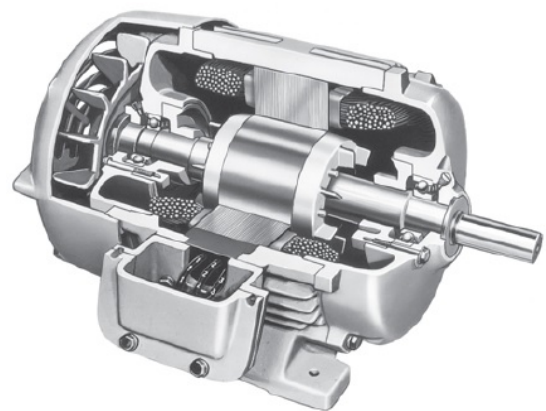
O rotor do tipo gaiola de esquilo consiste em uma série de barras condutoras que são colocadas em curto circuito em ambas as extremidades por meio de grandes anéis. A extrema simplicidade e robustez da sua construção faz com que o motor com esse tipo de rotor seja amplamente utilizado nas indústrias. A Figura 1-b) apresenta a vista em corte lateral do motor de rotor gaiola de esquilo.

Figura 1 – Vista lateral em corte de uma máquina de indução.

(a) Rotor bobinado.



(b) Rotor gaiola de esquilo.



Fonte: Adaptado de Chapman (2013).

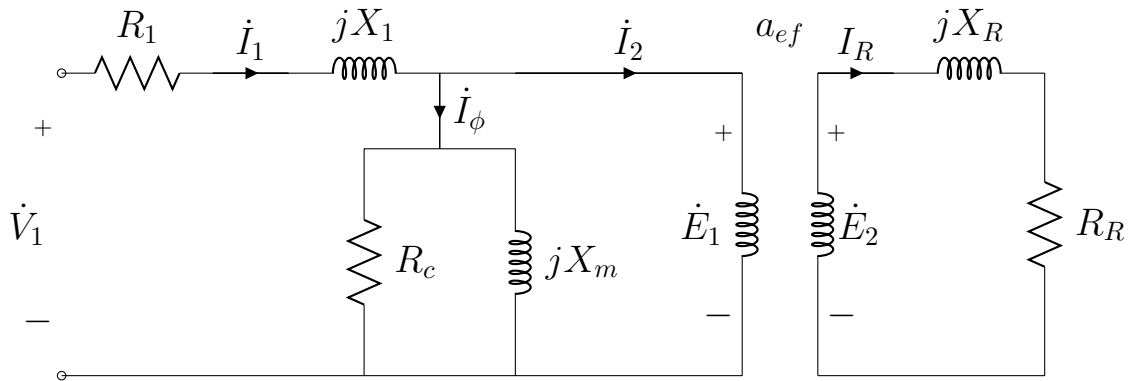
Em termos de funcionamento os motores são iguais, com isso, ambos são modelados de forma igual. Para a estimação dos parâmetros elétricos da máquina, pode ser realizado a modelagem estática, ou em regime permanente. A maneira utilizada para descrever matematicamente o funcionamento do motor de indução trifásico é realizada por meio da análise do circuito equivalente.

## 2.1 CIRCUITO EQUIVALENTE DO MIT

Devido ao fato de que os enrolamentos polifásicos são simétricos, alimentados por fontes de tensão polifásica também simétricas, adota-se a análise do circuito monofásico. A ligação usual das máquinas é em estrela (Y), logo, as correntes e tensões são expressas em seu valor de fase. Ao escolher uma das fases para a análise, subentende-se que os valores de tensão e corrente nas demais fases são iguais, porém com uma defasagem angular de 120 graus elétricos, para mais ou para menos.

As correntes que circulam no rotor representam o resultado de uma ação de transformador, por serem consequência dos fluxos magnético produzido no enrolamento trifásico do estator. A representação monofásica dos circuitos de estator e rotor do motor de indução trifásico, ambos conectados por meio de um transformador ideal é dado pela Figura 2.

Figura 2 – Representação por fase do modelo de transformador do motor de indução trifásico.



Fonte: Adaptado de Chapman (2013).

onde:

- $\dot{V}_1$ : tensão de fase de estator;
- $\dot{I}_1$ : corrente de fase de estator;
- $R_1$ : resistência efetiva de estator;
- $jX_1$ : reatância de dispersão de estator;
- $\dot{I}_\phi$ : corrente de magnetização;
- $R_c$ : resistência representando as perdas no núcleo;
- $jX_m$ : reatância de magnetização;
- $\dot{I}_2$  corrente do rotor referida ao primário;
- $\dot{E}_1$ : tensão induzida do rotor referida ao primário;
- $a_{ef}$ : relação de transformação do trafo ideal;
- $\dot{E}_2$ : tensão induzida no circuito do rotor;
- $\dot{I}_R$ : corrente no circuito do rotor;
- $R_R$ : resistência efetiva do rotor;
- $jX_R$ : reatância de dispersão do rotor;

O circuito de estator pode ser representado como:

$$\dot{V}_1 = \dot{E}_1 + \dot{I}_1(R_1 + jX_1) \quad (2)$$

O circuito do rotor pode ser representado como:

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_R(R_R + jX_R) \quad (3)$$

ou então:

$$\dot{I}_R = \frac{\dot{E}_2}{(R_R + jX_R)} \quad (4)$$

Entretanto, a indução no rotor só ocorre quando há uma diferença relativa de velocidade entre a rotação mecânica do rotor e a rotação do campo magnético girante, esta diferença é conhecida como escorregamento, conforme dado pela Equação (1). Em geral, quanto maior

o movimento relativo entre os campos do rotor e estator, maior será a tensão e frequência induzida no rotor. A máxima tensão e frequência ocorre com o rotor parado, ou então, com rotor bloqueado. A tensão no rotor quando este está bloqueado é dada por  $E_{R0}$ , desse modo, a tensão no rotor para qualquer escorregamento é:

$$E_R = s \cdot E_{R0} \quad (5)$$

A resistência do rotor possui um valor fixo, enquanto que a reatância do rotor de um motor de indução depende da indutância do rotor e da frequência da tensão e da corrente do rotor. Sendo esta escrita em forma do escorregamento da seguinte maneira:

$$X_R = s \cdot X_{R0} \quad (6)$$

Sendo  $X_{R0}$  a impedância com o rotor bloqueado. Com isso, o circuito de rotor considerando o escorregamento pode ser escrito como:

$$\dot{I}_R = \frac{\dot{E}_{R0}}{(R_R/s + jX_{R0})} \quad (7)$$

Para se obter o circuito equivalente final, deve-se referir a corrente, tensão e impedância para o estator, por meio da relação de transformação dada por  $a_{ef}$ , de acordo com as Equações (8), (9), (10) e (11):

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{I}_R}{a_{ef}} \quad (8)$$

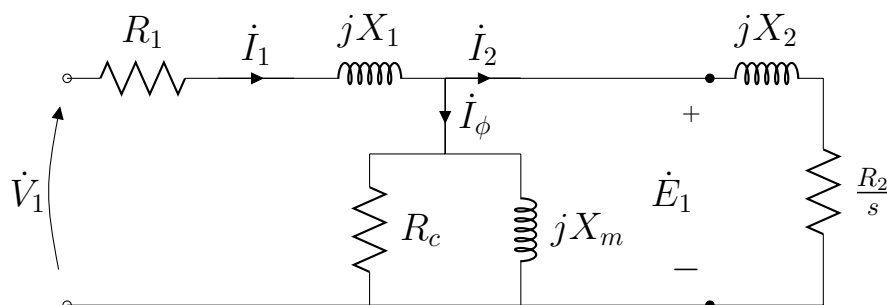
$$\dot{E}_1 = a_{ef} \cdot \dot{E}_{R0} \quad (9)$$

$$R_2 = a_{ef}^2 \cdot R_R \quad (10)$$

$$X_2 = a_{ef}^2 \cdot X_{R0} \quad (11)$$

o circuito equivalente por fase do MIT é portanto:

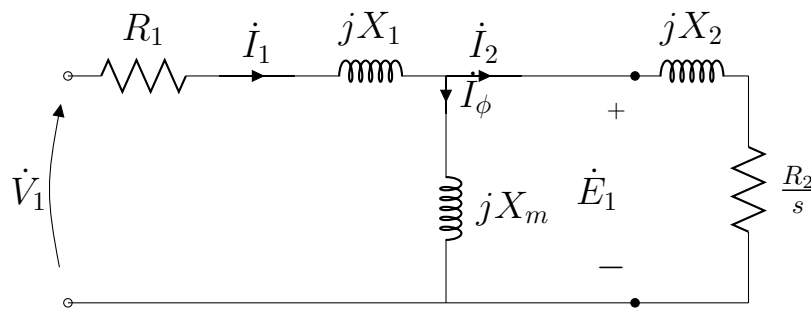
Figura 3 – Circuito equivalente do MIT.



Fonte: Adaptado de Chapman (2013).

No circuito apresentado pela Figura 3, a tensão é expressa em Volts, a corrente em Ampères e as reatâncias e resistências, todas são expressas em Ohms. No estudo dos transformadores, o ramo de magnetização é geralmente desprezado por inteiro, porém no caso das máquinas de indução, devido a presença do entreferro, a impedância de magnetização é baixa, o que faz com que em condições normais de funcionamento, a corrente de magnetização possua um valor elevado, geralmente entre 30% a 50% da corrente nominal. Com isso, no circuito do motor de indução, a única aproximação que é usual, é a retirada da resistência de magnetização  $R_c$  (FITZGERALD; KINGSLEY JR; UMANS, 2006). A Figura 4 apresenta o circuito simplificado por fase do motor de indução trifásico.

Figura 4 – Circuito equivalente simplificado do MIT.



Fonte: Adaptado de Chapman (2013).

Os parâmetros a serem estimados serão, portanto, as resistências de estator ( $R_1$ ), de rotor ( $R_2$ ) e a resistência de perdas no núcleo ( $R_c$ ). Uma vez que os valores das reatâncias são dependentes da frequência da rede, para se ter um valor físico e independente das frequências, serão estimados as reatâncias de dispersão de estator ( $L_1$ ), do rotor ( $L_2$ ) e a reatância de magnetização ( $L_m$ ). A relação entre indutância e reatância é dada pela equação (12):

$$L = \frac{X}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (12)$$

A corrente obtida através do *datasheet* é a corrente de estator ( $I_1$ ), com isso a primeira simplificação do circuito é a determinação da impedância de magnetização ( $Z_m$ ), conforme dado pela equação (13):

$$Z_m = (R_c^{-1} + jX_m^{-1})^{-1} \quad (13)$$

A equivalência entre os ramos do rotor, sendo este já referido ao estator e o ramo de magnetização, tem-se a impedância equivalente  $Z_f$ , conforme dado pela equação (14):

$$Z_f = \left[ \left( \frac{R_2}{s} + jX_2 \right)^{-1} + Z_m^{-1} \right]^{-1} \quad (14)$$

Com isso, a impedância de entrada por fase do MIT em Ohms é portanto:

$$Z_{in} = Z_f + R_1 + jX_1 \quad (15)$$

A corrente de estator é obtida por meio da equação (16):

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{V}_1}{Z_{in}} \quad (16)$$

A fim de se simplificar o processo de determinação do fator de potência da máquina, a sua tensão de fase foi adotada como referência, sendo assim o seu ângulo é considerado nulo. O fator de potência do motor é obtido através do cosseno da diferença das fases de tensão e corrente. Com as devidas considerações, bem como o fato de que a função cosseno é uma função par, o cálculo do fator de potência se resume conforme descrito pela equação (17):

$$FP = \cos(\theta_{V_1} - \theta_{I_1}) = \cos(-\theta_{I_1}) = \cos(\theta_{I_1}) \quad (17)$$

A potência trifásica de entrada do motor é dada pela equação (18):

$$P_{in} = 3 \cdot |V_1| \cdot |I_1| \cdot FP \quad (18)$$

Sendo  $R_{zf}$  a parte real da impedância  $Z_f$ , a potência transferida através do entreferro desde o estator é:

$$P_g = 3 \cdot R_{zf} \cdot |I_1|^2 \quad (19)$$

A potência eletromagnética que é transferida para o rotor, é a seguinte:

$$P_{mec} = (1 - s) \cdot P_g \quad (20)$$

A potência efetiva na ponta do eixo é dada após o desconto das perdas suplementares. Segundo a ABNT NBR 5383-1 (2002), existem alguns métodos para o cálculo da perda suplementar. Neste trabalho, será considerado dois modelos quanto a esse cálculo, sendo que, no primeiro caso, as perdas serão desconsideradas. No segundo caso, será considerado o método de perda suplementar assumida. O valor da perda suplementar para a carga nominal é dado conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Valores assumidos de perda suplementar em carga nominal.

Potência do motor	Perda assumida [% da pot. saída]
0,75 - 90 kW (1 - 125 cv)	1,8
91 - 375 kW (126 - 500 cv)	1,5
376 - 1.839 (501 - 2.499 cv)	1,2
1.840 e acima (2.500 cv e acima)	0,9

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 5383-1 (2002).

A perda suplementar é representada como  $P_{sup}$ . Para os demais pontos de operação que não sejam em carga nominal, é assumido que a perda suplementar é proporcional a corrente

do rotor ao quadrado, conforme dado pela equação (21):

$$P'_{sup} = P_{sup} \cdot \left( \frac{I'_2}{I_2} \right)^2 \quad (21)$$

onde:

- $P'_{sup}$ : valor da perda suplementar para o ponto de operação distinto da carga nominal.
- $P_{sup}$ : valor da perda suplementar em carga nominal, conforme Tabela 1.
- $I'_2$ : valor da corrente do rotor referida ao estator para o ponto de operação distinto da carga nominal.
- $I_2$ : valor da corrente do rotor referido ao estator em carga nominal.

A potência fornecida na ponta do eixo será portanto:

$$P_{out} = P_{mec} - P'_{sup} \quad (22)$$

O rendimento do motor( $\eta$ ) é dado através da equação (23):

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (23)$$

O algoritmo é desenvolvido utilizando a modelagem apresentada e utilizando uma função objetivo de aproximação para que os parâmetros sejam estimados.

## 2.2 CURVAS DE DESEMPENHO

Os catálogos fornecidos pelos fabricantes informam os dados relevantes quanto a construção e operação do motor, sendo esses dados de extrema importância quando se busca definir qual o motor ideal para determinada aplicação. Para exemplificação, foi escolhido um motor da fabricante WEG. Os dados referente ao motor estão disponíveis para consulta no próprio site da fabricante. A Tabela 2 apresentam os dados referentes ao motor escolhido.

Tabela 2 – Folha de dados fornecidos pelo fabricante.

<b>FOLHA DE DADOS</b>	
<b>Motor trifásico de indução - Rotor de gaiola</b>	
Linha do produto	W22Xd IR2
Carcaça	90S/L
Potência	1 HP
Freqüência	60 Hz
Polos	4
Rotação nominal	1765 rpm
Escorregamento	1,94 %
Tensão nominal	220/380 V

*Continua na próxima página*

Tabela 2 – Continuação da página anterior.

<b>FOLHA DE DADOS</b>	
<b>Motor trifásico de indução - Rotor de gaiola</b>	
Corrente nominal	3,22/1,86 A
Corrente de partida	23,5/13,6 A
$I_p/I_n$	7,3
Corrente a vazio	2,20/1,27 A
Conjugado nominal	4,06 Nm
Conjugado de partida	200 %
Conjugado máximo	290 %
Categoria	—
Classe de isolamento	F
Elevação de temperatura	80 K
Tempo de rotor bloqueado	21 s (quente)
Fator de serviço	1,00
Regime de serviço	S1
Temperatura ambiente	-20°C - +40°C
Altitude	1000 m
Proteção	IPW55
Massa aproximada	42 kg
Momento de inércia	0,00492 kgm <sup>2</sup>
Nível de ruído	51 dB(A)
Rolamento Dianteiro	6205 ZZ
Rolamento Traseiro	6204 ZZ

Fonte: Adaptado de WEG (2018).

Nesta folha de dados são apresentadas, também, informações referentes ao rendimento e o fator de potência do motor para três pontos de operação, sendo estes dispostos na Tabela 3:

Tabela 3 – Dados fornecidos pelo fabricante referente ao fator de potência e rendimento.

<b>FOLHA DE DADOS</b>		
<b>Motor trifásico de indução - Rotor de gaiola</b>		
Linha do produto	W22Xd IR2	
Carga	Fator de potência	Rendimento (%)
100 %	0,74	82,5
75 %	0,65	81,5
50 %	0,53	78,0

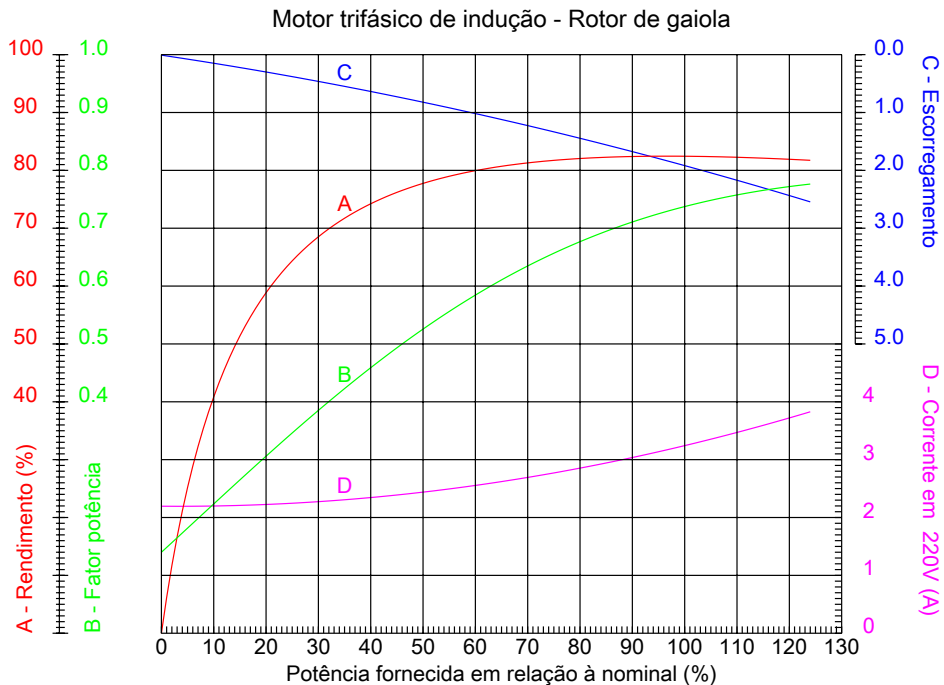
Fonte: Adaptado de WEG (2018).

As curvas características de algum equipamento ou dispositivo tem como objetivo



apresentar o comportamento de uma ou mais grandezas em função de outra grandeza. A Figura 5 apresenta um exemplo de curva característica.

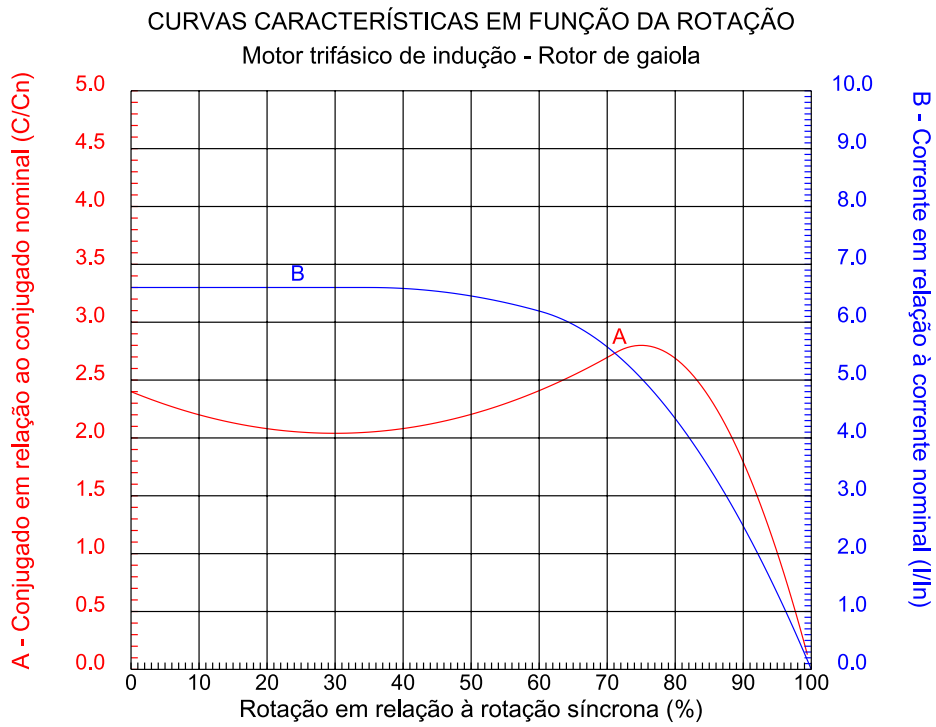
Figura 5 – Curvas de desempenho do motor em função da potência fornecida.



Fonte: Adaptado de WEG (2018).

A Figura 5 apresenta o comportamento de quatro grandezas: rendimento, fator de potência, escorregamento e corrente de estator. A variação das grandezas está diretamente relacionada à potência que o motor está fornecendo a carga e, por isso, a curva de desempenho do mesmo é dada em função do fator de carregamento, ou seja, a relação entre a carga fornecida e a carga nominal. Os *datasheets* costumam fornecer também os dados referentes ao conjugado exercido pelo motor e a corrente do motor em função da velocidade síncrona. Esses dados são fornecidos dessa maneira pois assim é possível identificar pontos importantes na escolha do motor para determinada operação como, por exemplo, o torque e a corrente de partida, a velocidade de rotação do motor quando este fornece o torque máximo, dentre outros. Para este caso, os dados são apresentados em valores no sistema por unidade, conforme dado pela Figura 6:

Figura 6 – Curvas de conjugado e corrente do motor em função da velocidade síncrona.



Tendo em vista o que foi apresentado sobre as curvas, vale ressaltar que para o algoritmo proposto neste trabalho, os dados inseridos no algoritmo serão retirados das curvas características.

## 3 EVOLUÇÃO DIFERENCIAL

### 3.1 INTRODUÇÃO

A otimização no seu conceito puro é a busca pela excelência, ou seja, buscando melhorar aquilo que já existe. Tomando um sistema qualquer como base, a otimização do mesmo irá maximizar ou minimizar alguns pontos que irão melhorar este sistema. No meio científico é comum a presença de sistemas complexos, cuja otimização não é obtida de forma trivial ou por meio de métodos matemáticos que apresentem uma solução exata, entretanto, é possível obter soluções factíveis e que satisfaçam os objetivos e restrições do respectivo problema (TALBI, 2009).

Existem diversos métodos aplicáveis para a resolução de problemas complexos de otimização, sendo estes, baseados nos mais diversos comportamentos como, por exemplo, na área de sistemas inteligentes, as Redes Neurais Artificiais (RNA) (HAYKIN, 1999) que se baseiam em comportamentos neurológicos. Existem os métodos baseados em comportamentos da natureza, como por exemplo, Otimização por enxame de partículas (PSO) (KENNEDY; EBERHART, 1995), colônia de formigas (ACO) (DORIGO, 1992), entre outras.

Uma classe muito utilizada na resolução de problemas complexos de otimização é a classe dos algoritmos evolutivos (AEs), que são baseados na Teoria da Evolução e Genética. OS AEs são considerados métodos simples, pois apresentam características como, por exemplo, possibilidade de implementação com poucas linhas de código e possuem uma fácil adaptação para problemas de diversas áreas. Há três grandes classes de AEs: algoritmos genéticos, programação evolutiva e estratégias evolutivas. O princípio básico dessas técnicas é, no entanto, a mesma.

Este trabalho propõe a implementação de um algoritmo evolutivo, o DE para a estimação de parâmetros elétricos de um MIT através da minimização do erro entre as curvas de desempenho do motor.

### 3.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O algoritmo proposto é baseado na teoria da evolução, com isso, a população composta pelas soluções candidatas são manipuladas e um índice de aptidão é determinado. Essa aptidão é dada através de um escalar, denominado *fitness*, que é determinado de acordo com a função a ser otimizada, podendo ser a maximização ou minimização (GABRIEL; DELBEM, 2008; SANCHES, 2013).

Para melhor entendimento quanto ao funcionamento de um DE, é necessário que se tenha o conhecimento do significado de alguns termos presentes no algoritmo (RUTKOWSKI, 2008):

- **População:** são as soluções candidatas, também chamadas de cromossomos e

são eles que irão sofrer alterações no processo evolutivo;

- **Fitness** : habilidade de um indivíduo para sobreviver e se reproduzir, ou seja, grau de aptidão da solução candidata em relação a função objetivo;
- **Seleção**: os indivíduos mais aptos (o *fitness* pode ser maior ou menor, dependerá de qual é o tipo da FO, maximização ou minimização) irão sobreviver e continuar a evolução;
- **Cruzamento ou crossover**: método de reprodução que consiste na transferência de material genético dos ancestrais aos sucessores.

Embora existam diversas classes de AEs, pode-se considerar o algoritmo base comum a todas, dados através do algoritmo 1:

---

**Algoritmo 1:** Estrutura comum a todas classes de algoritmos evolutivos .

---

```
//Adaptado de (SANCHES, 2013).
// Inicia o contador de tempo
g ← 1
IniciaPopulação( $P_g$ )
// Avalia o fitness dos indivíduos ( $P_g$ )
Avalia ( $P_g$ )
// Verifica o critério de parada
while critério de parada não é atingido do
    // Incrementa a geração
    g ← g + 1
    // Seleciona os indivíduos para a geração dos descendentes
     $P_g \leftarrow$  Seleciona( $P_{g-1}$ )
    // Realiza o cruzamento dos pais selecionados
    Cruzamento( $P_g$ )
    // Realiza a mutação sobre a nova população
    Mutação( $P_g$ )
    // Avalia o fitness dos indivíduos  $P_g$ 
    Avalia( $P_g$ )
end
```

---

O algoritmo de evolução diferencial (DE - do inglês *Differential Evolution*) foi desenvolvido por Storn e Price (1995) e pertence a classe de algoritmos evolutivos que visam a busca por melhores resultados, porém com uma abordagem diferente das utilizadas nos algoritmos genéticos e nas estratégias de evolução. O DE utiliza-se da diferença de vetores para perturbar a população, resultando em um método robusto, com poucas variáveis de controle e de rápida convergência (OLIVEIRA, 2006).

A principal diferença entre o DE e o algoritmo genético (GA) está na maneira como ocorrem os processos de mutação e cruzamento. A escolha pelo DE se deve as seguintes características (SANCHES, 2013 apud CHENG; HWANG, 2001):

- É um algoritmo de busca estocástica, proveniente dos mecanismos de seleção natural.
- Dificilmente se torna preso a ótimos locais, uma vez que o DE busca simultaneamente a solução em diferentes regiões do espaço de busca.
- Permite que os parâmetros de entrada e saída sejam manipulados como números ordinários reais (pontos flutuantes), com isso, utiliza eficientemente os recursos do computador, não necessitando de processamento extra.
- Eficaz ao trabalhar com populações pequenas.

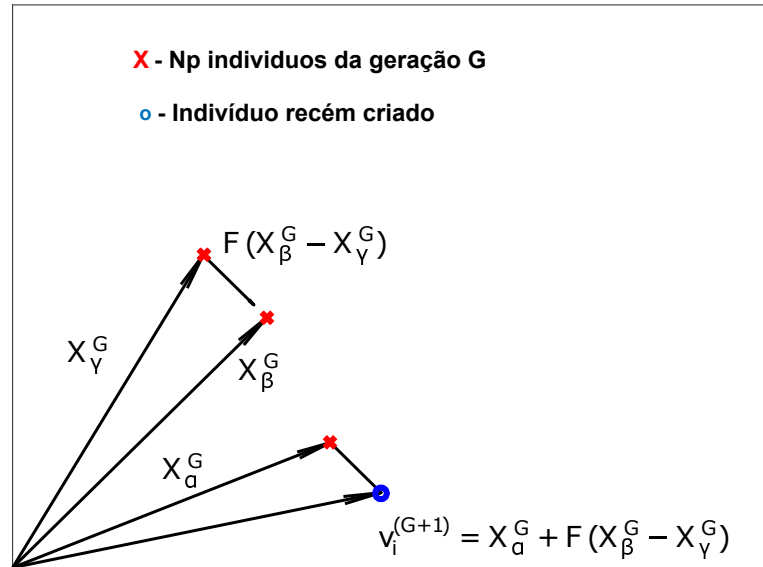
O algoritmo DE possui uma estrutura simples, sendo que o seu funcionamento ocorre basicamente em quatro etapas. Resumidamente, na primeira etapa ocorre a geração da população inicial e são testados os indivíduos quanto a sua aptidão. A segunda etapa é o processo de mutação, onde uma nova população é criada através da seleção aleatória de indivíduos da população inicial. A terceira etapa é o cruzamento, também conhecido como *crossover*, na qual ocorre a combinação entre a população inicial e a mutada. Na quarta etapa é realizada a comparação das populações inicial e cruzada para a geração de uma nova população, formada pelos indivíduos mais aptos.

Ao ser iniciado, o algoritmo gera uma população composta por  $N_p$  indivíduos (vetores), cujos valores são escolhidos aleatoriamente dentro de uma faixa de valores. Esta população é criada geralmente por uma distribuição de probabilidade uniforme. A população irá seguir uma evolução natural, porém o número de indivíduos permanece fixo (SANCHES, 2013).

Além da dimensão da população ( $N_p$ ), o DE necessita de mais dois parâmetros inicialmente: o fator de ponderamento ( $F$ ), referente a ponderação aplicada no processo de mutação e o coeficiente de probabilidade de cruzamento ( $C_r$ ), presente na etapa de recombinação.

A evolução diferencial busca criar uma nova população, na qual, escolhe-se de maneira aleatória, três indivíduos distintos. Inicialmente é realizado a diferença entre o segundo e o terceiro indivíduo e, então, aplicado o fator  $F$  ao resultado dessa diferença. Posteriormente, adiciona-se o resultado da diferença ponderada ao primeiro indivíduo escolhido. Este processo é feito para todos os indivíduos da população até que uma nova população mutada seja criada. A Figura 7 apresenta um exemplo desse processo:

Figura 7 – Etapa do processo de mutação.



Fonte: Adaptado de Sanches (2013).

Matematicamente este processo é descrito pela equação (24):

$$v_i^{(G+1)} = X_\alpha^G + F \cdot (X_\beta^G - X_\gamma^G) \quad (24)$$

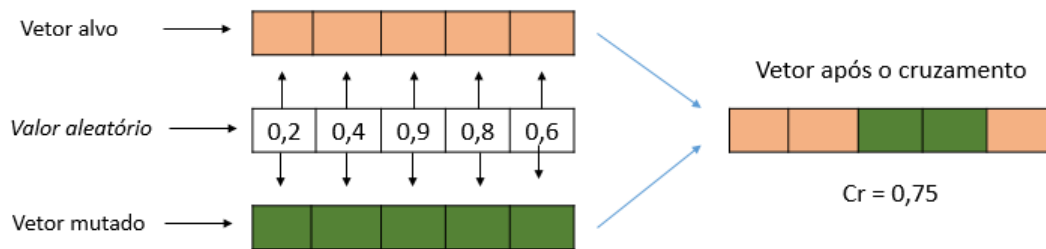
onde o vetor mutado é  $v_i^{(G+1)}$ , os índices  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  são inteiros, cujo o seu valor está presente no conjunto  $\{1, \dots, N_p\}$  e é necessário que eles sejam distintos entre si, enquanto que o fator  $F$  recebe um valor que vai de 0 a 1.

Após a mutação, o vetor mutado é comparado com um vetor da população inicial, que resultará em um vetor experimental  $U^{G+1}$ , sendo este determinado de acordo com a seguinte equação:

$$U(i)^{G+1} = \begin{cases} v(i)^{G+1} & \text{se } rand_i \geq C_r \\ X(i)^G & \text{se } rand_i < C_r \end{cases} \quad (25)$$

onde  $v(i)^{G+1}$  a  $i$ -ésima componente do vetor modificado  $v_i^{(G+1)}$ ,  $X(i)^G$  é a componente do vetor alvo,  $rand_i$  é um número cujo o seu valor é definido de forma aleatória no intervalo  $[0,1]$ .  $C_r$  é um dos parâmetros a serem definidos inicialmente para o algoritmo, representando a probabilidade do vetor herdar os valores das variáveis do vetor modificado. O processo de cruzamento conforme dado pela Equação (25) é conhecido como cruzamento binomial, existem outros métodos de se fazerem o cruzamento, como por exemplo, o cruzamento exponencial (LIN; QING; FENG, 2011). A Figura 8 exemplifica esta etapa, para uma taxa de cruzamento definida como  $C_r = 0,75$ . Se o valor escolhido aleatoriamente pela função  $rand_i$  foi igual ou maior, ocorre o cruzamento.

Figura 8 – Etapa do processo de cruzamento.

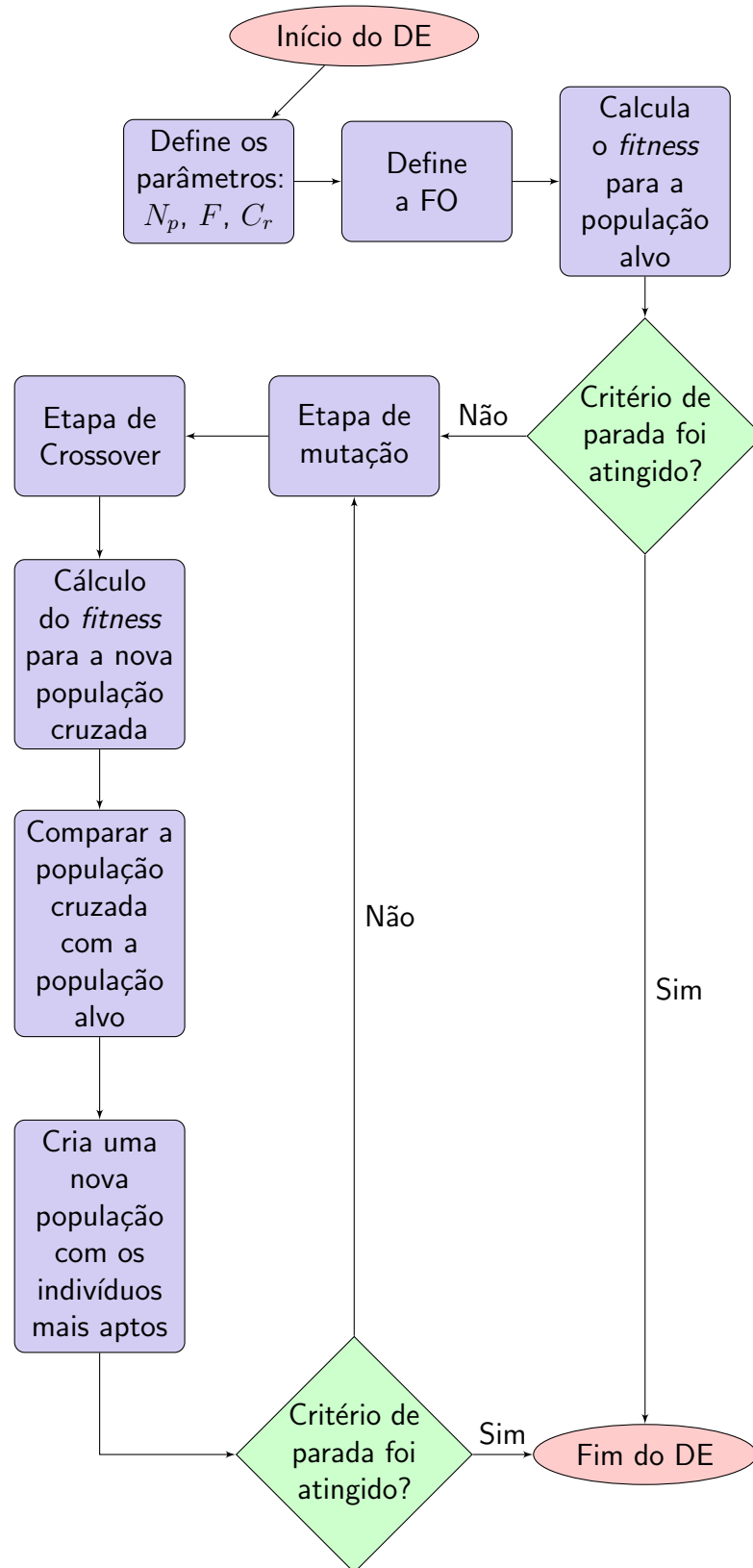


Fonte: Autoria própria.

Após o cruzamento, a etapa que ocorre é a seleção, na qual o vetor *fitness* é calculado novamente para o vetor modificado e comparado com o *fitness* do vetor alvo. Aquele que for mais apto para o problema específico - menor valor para casos de minimização e maior valor para casos de maximização - será escolhido e atualizará a população, o próximo componente ( $i + 1$ ) da população será escolhido como alvo e o processo ocorrerá até que todos os indivíduos sejam testados.

Após a verificação de todos os indivíduos e a população atualizada, o algoritmo irá conferir se o critério de parada foi satisfeito, caso não seja, este cria uma nova geração e essas etapas citadas anteriormente se repetem até que o algoritmo atinja os resultados esperados. A Figura 9 apresenta um fluxograma que visa exemplificar o funcionamento do DE.

Figura 9 – Fluxograma para exemplificar o funcionamento do DE.



Fonte: Autoria própria.



## 4 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia proposta neste trabalho para a estimação dos parâmetros de um motor de indução trifásico. Os parâmetros a serem estimados serão de acordo com o modelo de circuito adotado. Para o modelo completo, os cromossomos terão 6 genes, sendo cada gene referente a um parâmetro elétrico, são eles :resistência de estator ( $R_1$ ), rotor ( $R_2$ ) e de perdas no núcleo ( $R_c$ ), indutância de dispersão de estator ( $L_1$ ) e rotor ( $L_2$ ) e a indutância de magnetização ( $L_m$ ). Para o modelo de circuito simplificado, será desconsiderado a resistência de perdas no núcleo ( $R_c$ ), sendo portanto um cromossomo de 5 genes. O algoritmo desenvolvido é baseado na modelagem em regime permanente da máquina, dada pelas equações fornecidas no capítulo 2.

### 4.1 ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS PELO DE

Inicialmente são definidos os parâmetros de controle do algoritmo DE, a população foi definida como  $N_p = 15$ , ou seja, possuirá quinze cromossomos. O fator de ponderação é definido como  $F = 0,8$ , e o coeficiente de probabilidade de cruzamento, definido como  $C_r = 0,75$ . A definição desses valores para a configuração dos parâmetros se deu de forma empírica.

A primeira etapa do algoritmo é a inserção dos dados retirados por meio das curvas de desempenho, com isso, são inseridos todos os valores que serão tomados como referência e estarão na FO que o algoritmo irá buscar a minimização do seu erro. Os valores retirados das curvas de desempenho são os de corrente, escorregamento, fator de potência e rendimento, além dos valores de identificação da máquina, como faixa de tensão, frequência elétrica da rede, número de polos, potência e torque nominal. Os demais dados que não se conhecem, são calculados de acordo com as equações da máquina, como por exemplo, potência e torque desenvolvidos fora do ponto de operação nominal.

Após carregado todos os dados necessários para o algoritmo, o mesmo cria a população e irá avaliar a sua aptidão, ou seja, irá calcular o quão próximo os valores das grandezas calculadas por meio das equações da máquina estão dos valores das grandezas de referência. O índice que mensura essa aptidão é o chamado *fitness*. Para este trabalho, os valores que serão tomados como referência pelo algoritmo são:

- $\eta_R$ : Rendimento do motor.
- $|I_1|$ : Valor RMS da corrente de estator.
- $FP_R$ : Fator de potência do motor.
- $P_{out}$ : Potência de saída do motor.

A equação regressiva para o cálculo do *fitness* é dada por (26).

$$fit(k) = \frac{1}{n} \sum_{ii=1}^n \left[ \left( \frac{I_{1,ii} - I_{1Rii}}{I_{1Rii}} \right)^2 + \left( \frac{\eta_{ii} - \eta_{Rii}}{\eta_{Rii}} \right)^2 + \left( \frac{FP_{ii} - FP_{Rii}}{FP_{Rii}} \right)^2 + \left( \frac{P_{out,ii} - P_{Rout,ii}}{P_{Rout,ii}} \right)^2 \right] \quad (26)$$

sendo *ii* correspondente ao ponto de operação do motor, com isso,  $n = 3$ , enquanto que o índice *k* refere-se ao número do indivíduo da população cujo o *fitness* está sendo calculado.

As grandezas com o índice *R* são as de referência. No caso da corrente de estator, a representação  $I_{1Rii}$  assume o valor da corrente de estator retirada da curva para um determinado ponto de operação, por exemplo,  $I_{1R1}$  é a corrente de estator com o motor operando a 100% da carga nominal. O mesmo é adotado as demais grandezas de referência.

Caso não atingido o critério de parada inicialmente, ou seja, caso o valor do menor *fitness* de todas as possíveis soluções candidatas não atinja o valor desejado, o algoritmo irá entrar em sua rotina principal, dando-se início ao processo de mutação. Matematicamente a mutação é descrita pela Equação (24). O algoritmo escolhe aleatoriamente três vetores e realiza a diferença vetorial do segundo e terceiro elemento, aplica-se o fator de ponderação sobre a diferença vetorial, que por sua vez é adicionada ao primeiro cromossomo. Este processo é realizado até que uma nova população seja criada.

A população inicial é agora denominada de população alvo, a mesma será combinada com a nova população criada, sendo esta a etapa de *crossover*. Esta etapa é descrita matematicamente pela Equação (25), sendo que o fator de cruzamento é definido na primeira etapa do algoritmo. Após o cruzamento, cria-se a população cruzada, são essas as novas soluções candidatas que serão aplicadas nas equações da máquina, posteriormente será calculado o nível de aptidão de cada indivíduo da população, os mais aptos permanecem na população. Após a população atualizada, é testado o critério de parada, caso não seja atingido, o processo se reinicia até que o mesmo seja atingido.

A fim de se ter uma maior confiabilidade no resultado, foi determinado que o algoritmo realize por 200 vezes o processo de estimação, sendo que, em cada um dos processos, as soluções candidatas que satisfizeram o critério de parada, são alocadas em uma variável que armazena todos os duzentos cromossomos. Para este teste inicial, o espaço de busca foi limitado apenas no limite inferior, ou seja, como sabe-se que existem os efeitos de reatância indutiva e o efeito da resistência, ou seja, os parâmetros não podem assumir valores inferiores ou iguais a zero. Após esse primeiro processo de estimação, os dados foram analisados e com isso foi definido um espaço de busca limitando, para evitar que se obtenham resultados discrepantes. O algoritmo 2 apresenta de forma simplificada, a estrutura do algoritmo implementado neste processo de estimação, sendo que,  $F$ ,  $N_p$ ,  $C_r$  são os já conhecidos parâmetros de controle do algoritmo. A variável referente a população é dada por *pop* que, matematicamente é uma matriz, cujo o número de linhas se refere a quantidade de indivíduos, dado por  $N_p$  e, o número de colunas definidas de acordo com o modelo de circuito, representado por  $n_{genes}$ .

A função *rand* retorna um número cujo o seu valor é definido de forma aleatória no intervalo [0,1]

---

**Algoritmo 2:** Estrutura inicial do algoritmo.

---

**Input:** Dados retirado das curvas de desempenho.

**Output:** Parâmetro elétricos do motor estimados pelo algoritmo.

// PRIMEIRA ETAPA

Definição dos parâmetros de controle  $\rightarrow F, N_p, C_r$

Carregam-se os dados retirados das curvas de desempenho - Inseridos na FO.

// Escolhe-se o modelo de circuito e modelagem

//SEGUNDA ETAPA

Geração da primeira população  $\rightarrow pop = rand(N_p, n_{genes})$

//Testa-se o grau de aptidão, caso atingido, o algoritmo retorna os valores se não o mesmo entra na rotina principal até atingir o critério de parada.

---

O Algoritmo 3 apresenta a rotina principal do algoritmo implementado. A variável *fitness* é dado pelo menor valor calculado pela Equação (26), enquanto que *fit\_desejado* é o critério de parada do algoritmo. O índice *ii* apresentado refere-se a posição do cromossomo na população, matematicamente, é o número da linha da matriz. A função *randperm* é responsável por selecionar três cromossomos distintos na população que, são respectivamente alocados nas variáveis apresentadas como *X*, *Y* e *Z*. O processo de criação de um cromossomo mutado é descrito e alocado na variável *Cromo\_mut(ii)*. Ao final do processo de criação de uma população mutada, esta é alocada na variável *target\_vector*.

A etapa de *crossover* é realizada comparando os valores da população mutada, dada por *target\_vector* em comparação com o escalar *rand* e, caso atingido os critérios, atualiza-se com o gene cruzado (*gene(i)mutado*), se não, mantém-se o gene inicial (*gene(i)inicia*).

Ao final da etapa de cruzamento, cria-se uma população, chamada de população cruzada (*pop\_cruzada*) e, aplicam-se esse conjunto de possíveis soluções nas equações da máquina, calcula-se o grau de de aptidão desta nova população, dado pelo vetor *fit\_cruzada*.

A ultima etapa da é a comparação entre os *fitness* da população cruzada e a população alvo (inicial). Caso o critério de parada seja atingido, o algoritmo retorna os valores dos parâmetros, caso contrário, inicia-se o processo de mutação novamente.

Abaixo, é descrito a rotina principal do algoritmo:

---

**Algoritmo 3:** Rotina principal do algoritmo.

---

```

while fitness > fit_desejado do
  for ii → 1,2,...,N do
    // análise do fitness de cada cromossomo da população inicial
    
$$fit(ii) = \frac{1}{n} \sum_{ii=1}^n \left( \frac{X_{ii} - X_{ref,ii}}{X_{ref,ii}} \right)^2$$

  end
  //Determinação da população mutada
  for ii → 1,2,...,N do
    // seleção de 3 cromossomos aleatórios e distintos (X,Y,Z)
    X,Y,Z = randperm(Np,3)
    Cromo_mut(ii) = X + F · (Y - Z)
  end
  target_vector ← Criada população alvo
  //Etapa de Crossover após a criação da população mutada (alvo)
  for ii → 1,2,...,N do
    rand //fator aleatório que varia de 0 a 1
    if rand ≥ Cr then
      gene(i) ← gene(i) mutado else
      | gene(i) ← gene(i) inicial
    end
  end
  //Aplica-se a população cruzada nas equações da máquina e calcula o fit
  for ii → 1,2,...,N do
    pop_cruzada(ii) ← teste da população cruzada na equações
    fit_cruzada(ii) // Aplica-se a equação do fitness
  end
  for ii → 1,2,...,N do
    Comparação dos fitness entre pop_cruzada e inicial
    Cromossomo da nova população recebe o cromossomo de melhor fitness
  end
  População Inicial ← Atualizada com os cromossomos de melhor aptidão
end

```

---

## 4.2 VALIDAÇÃO DO ALGORITMO

A fim de validar o algoritmo desenvolvido para esta proposta foram realizadas duas etapas, uma computacional e outra em bancada experimental. A etapa computacional consiste na realização da estimação dos parâmetros do motor de indução utilizando como referência, os

valores obtidos por meio das curvas de desempenho fornecidas pelo fabricante. A segunda parte foi a realização de ensaios em um motor real, instalado no Laboratório de Sistemas Inteligentes (LSI), do Centro Integrado de Pesquisa em Controle e Automação (CIPECA), da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Cornélio Procopio (UTFPR-CP).

#### 4.2.1 CURVAS DE DESEMPENHO

Alguns dados do motor são apresentados na placa de identificação deste. Dentre os dados fornecidos, está o número de série e, acessando o site do fabricante do motor WEG (2018), foi obtido o seu *datasheet*, contendo os dados e aspectos construtivos, conforme apresentado pela Tabela 4.

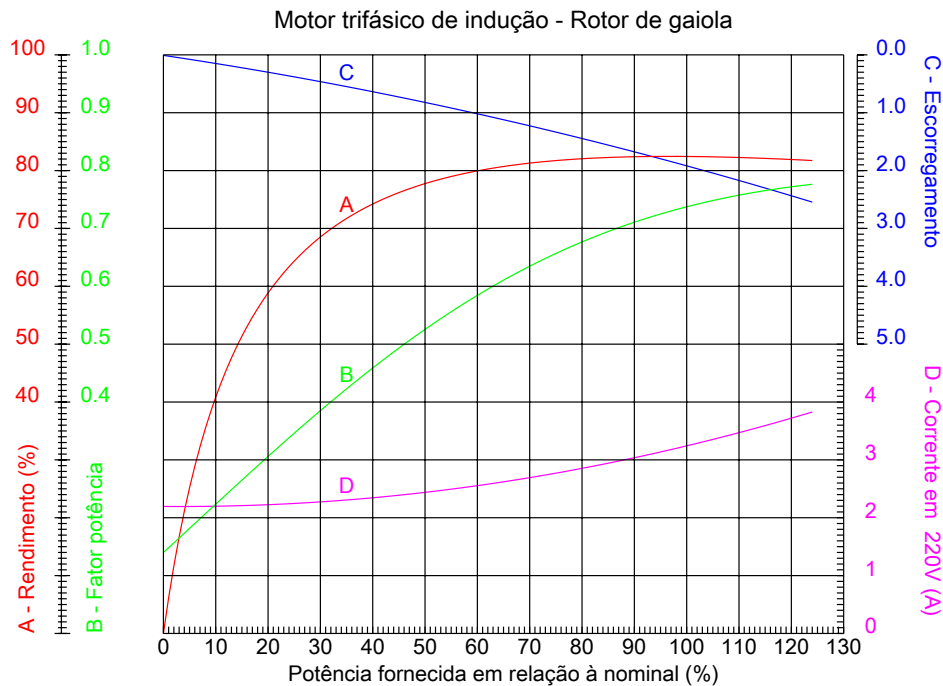
Tabela 4 – Folha de dados fornecidos pelo fabricante para o motor utilizado.

<b>FOLHA DE DADOS</b>	
<b>Motor trifásico de indução - Rotor de gaiola</b>	
Linha do produto	W22Xd IR2 Trifásico
Potência	0.75 kW (1 HP-cv)
Frequência	60 Hz
Polos	4
Rotação nominal	1730 rpm
Escorregamento	3,89 %
Tensão nominal	220/380 V
Corrente nominal	3,02/1,75 A
Corrente de partida	19,9/11,5 A
Ip/In	6,6
Corrente a vazio	2,10/1,22 A
Conjugado nominal	4,14 N.m
Conjugado de partida	240 %
Conjugado máximo	280 %
Classe de isolamento	F
Tempo de rotor bloqueado	21 s (quente)
Fator de serviço	1,15
Regime de serviço	S1
Proteção	IPW55
Massa aproximada	16,3 kg
Momento de inércia	0,0032 kgm <sup>2</sup>

Fonte: Adaptado de WEG (2018).

A Figura 10 apresenta as curvas de desempenho do motor, cujo os dados retirados foram inseridos no algoritmo.

Figura 10 – Curvas de desempenho do motor escolhido para o trabalho.



Fonte: Adaptado de WEG (2018).

Com a análise das curvas de desempenho, retirou-se os seguintes dados a serem inseridos na função objetivo do algoritmo, e conseqüentemente, serão utilizados como referencia para a estimação dos parâmetros. Os dados são para a ligação triângulo/delta ( $\Delta$ ), com tensão nominal de 220 V (entre fases) e estão dispostos na Tabela 5.

Tabela 5 – Dados obtidos através das curvas do MIT para o motor de 1cv do LSI.

Carregamento [%]	100	75	50
Escorregamento [%]	3,89	2,67	1,64
Rendimento [%]	80,5	80,0	77,5
Corrente de linha [A]	3,02	2,59	2,23
Corrente de fase [A]	1,75	1,50	1,29
FP	0,81	0,71	0,57

#### 4.2.2 MODELOS UTILIZADOS

O algoritmo realizou a estimação de parâmetros de quatro modelos distintos para que, ao final do processo de estimação possa ser analisado o comportamento dos parâmetros elétricos para cada tipo de circuito e modelagem matemática. Os modelos adotados se diferenciam quanto a configuração do circuito equivalente e quanto a modelagem adotada. A configuração do circuito equivalente irá se distinguir quanto a presença ou não da resistência de perdas no núcleo ( $R_c$ ), logo, o número de parâmetros a ser estimado pelo algoritmo irá depender da configuração do circuito. Quanto a modelagem, a distinção entre os modelos adotados será no tratamento de perdas suplementares, das quais se incluem as perdas rotacionais. Os modelos ficaram separados da seguinte forma:

1. Sem  $R_c$  e sem  $P_{sup}$ .
2. Sem  $R_c$  e com  $P_{sup}$ .
3. Com  $R_c$  e sem  $P_{sup}$ .
4. Com  $R_c$  e com  $P_{sup}$ .

O primeiro modelo proposto foi o do circuito equivalente simplificado, desconsiderando a resistência de perdas no núcleo ( $R_c$ ), conforme dado pela Figura 4. Quanto a modelagem matemática considerada para este primeiro caso, foi desconsiderado a presença da perda suplementar. Para este modelo serão estimados cinco parâmetros do circuito equivalente, as resistências de estator ( $R_1$ ), rotor ( $R_2$ ), indutância de dispersão de estator ( $L_1$ ), rotor ( $R_1$ ) e a de magnetização ( $L_m$ ). A perda suplementar será desconsiderada, logo,  $P_{sup} = 0$ .

O segundo modelo irá se diferenciar quanto a modelagem matemática e na distribuição de perdas, sendo que neste caso, a perda suplementar será considerada conforme determinado pela ABNT NBR 5383-1 (2002), sendo adotado o modelo de perda suplementar assumida. Quanto aos parâmetros a serem estimados, uma vez que não houve alteração na disposição do circuito, serão estimados os mesmos parâmetros do modelo 1. A perda suplementar será considerada, portanto, pode-se afirmar que  $P_{sup} > 0$ .

Para o terceiro modelo proposto a resistência de perdas no núcleo ( $R_c$ ) será considerada e, com isso, o algoritmo irá estimar um parâmetro a mais do que nos dois primeiros modelos. Este circuito é representado pela Figura 3. A modelagem apresentada será conforme utilizada para o primeiro modelo, porém incluindo a resistência  $R_c$  nas equações do motor de indução trifásico, com isso, pode-se analisar a influência que os parâmetros sofreram devido a presença deste parâmetro, que por sua vez, é desconsiderado em muitos dos casos.

O quarto e último modelo é o mais completo, pois neste caso todos os parâmetros e perdas estão sendo considerados. O algoritmo irá estimar, portanto, as resistências de estator ( $R_1$ ), rotor ( $R_2$ ), perdas no núcleo ( $R_c$ ), indutância de dispersão de estator ( $L_1$ ), rotor ( $R_1$ ) e a de magnetização ( $L_m$ ). A perda suplementar será considerada, logo,  $P_{sup} > 0$ .

#### 4.2.3 ENSAIOS LABORATORIAIS

Os ensaios laboratoriais foram realizados na bancada experimental do Laboratório de Sistemas Inteligentes (LSI). A bancada do LSI dispõe de diversos equipamentos como fonte, gerador e carga CC, varistores de tensão, torquímetro e tacômetro. Foram realizados diversos ensaios, tanto a vazio quanto com carga, sendo este último necessário pois as curvas de desempenho apresentam o funcionamento do motor, quando alimentado por tensão e frequência nominal, para diversos valores de carga no eixo.

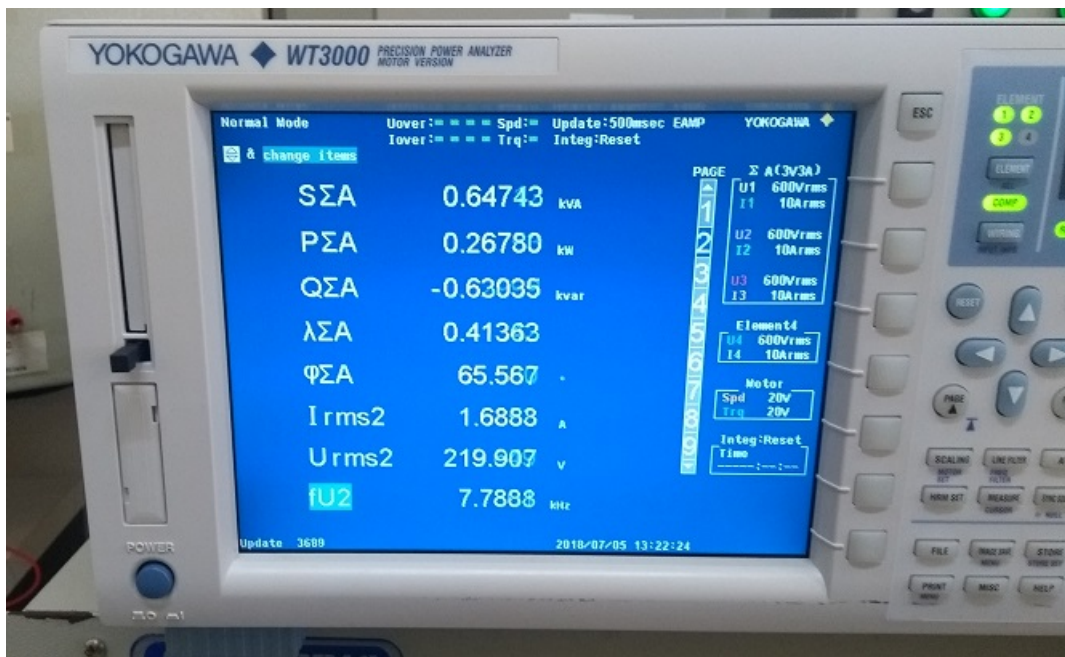
As curvas de desempenho não apresentam o comportamento do mesmo quando este

é acionado por uma tensão não-senoidal, ou seja, quando é acionado por um inversor de frequência. Uma vez que os parâmetros foram estimados para os quatro modelos e, com a modelagem da máquina, foi realizado a operação do motor fora das condições nominais.

Foram testados os quatro modelos de circuitos com valores de tensão e frequência fora da condição nominal e, com isso, foram realizados na bancada experimental do LSI, o acionamento e operação do motor com o inversor de frequência, da mesma forma que foi realizado computacionalmente. Para a medição e coleta dos dados, foi utilizado um medidor de alta precisão e analisador de qualidade de energia, modelo "Yokogawa WT3000". Com isso, é possível ter uma análise mais concreta da aplicabilidade do método, sendo o mesmo testado em condições nominais e não nominais.

As Figuras 11, 12a e 12b foram tiradas na etapa de execução dos ensaios.

Figura 11 – Tela do equipamento utilizado para a realização das medições e coleta dos dados do motor acionado por inversor de frequência.



Fonte: Autoria própria.

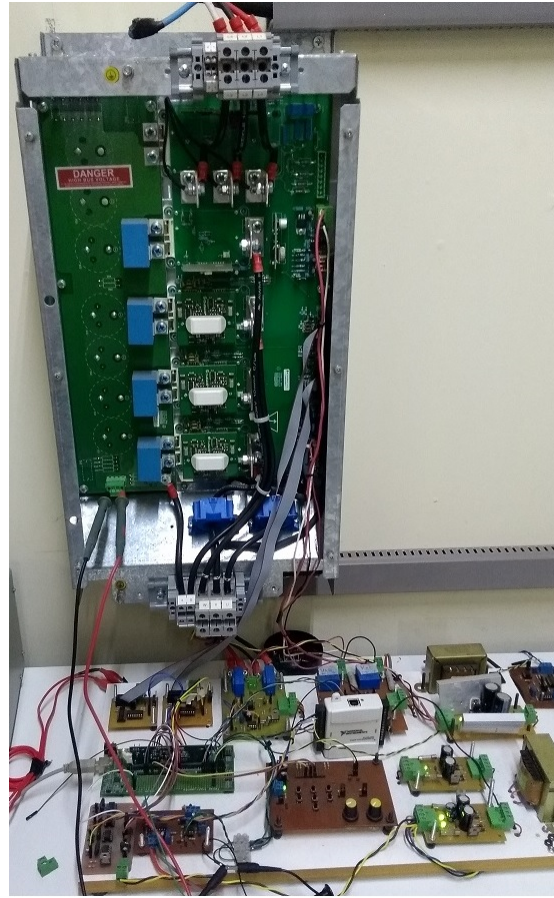


Figura 12 – Vista parcial da bancada de ensaios e dos equipamentos utilizados nos ensaios.

(a) Foto do rotor acoplado a carga.



(b) Foto do inversor utilizado no acionamento do motor.



Fonte: Autoria própria.

## 5 RESULTADOS

Este capítulo irá apresentar os resultados obtidos pelo algoritmo de evolução diferencial, implementado conforme os procedimentos descritos nos capítulos anteriores, baseado em dados retirados das curvas de desempenho fornecidas pelos fabricantes. O DE foi implementado no ambiente MATLAB®.

### 5.1 ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS

Para a estimação dos parâmetros elétricos da máquina, foi determinado que o algoritmo realizasse diversas vezes o processo de estimação, com isso, os dados foram filtrados e selecionados os melhores indivíduos seguindo o seu grau de aptidão, dado pelo *fitness*. Este processo foi repetido para todos os quatros modelos adotados neste trabalho.

Em todos os casos, o algoritmo recebeu os dados retirados do *datasheet*, conforme dado pela Tabela 4 enquanto que os dados inseridos na função objetivo foram retirados por meio das curvas de desempenho, dado pela Figura 10, conformem apresentado por meio da Tabela 5.

#### 5.1.1 MODELO 1

A Tabela 6 apresenta os valores obtidos por meio do algoritmo para o primeiro modelo de circuito, ou seja, desprezando os efeitos da resistência de perdas no núcleo ( $R_c$ ) e as perdas suplementares ( $P_{sup}$ ).

Tabela 6 – Parâmetros estimados pelo algoritmo para o primeiro modelo de circuito.

<b>Resultado apresentado pelo algoritmo.</b>					
	$R_1[\Omega]$	$R_2[\Omega]$	$L_1[mH]$	$L_2[mH]$	$L_m[mH]$
Valor estimado	18,8229	5,2116	0,0146	0,0146	0,4771
Intervalo de busca	[10,20]	[3, 10]	[0, 1]	[0, 1]	[0, 1]

Na Tabela 7 estão dispostos os valores dados pelo algoritmo referente as grandezas inseridas na função objetivo e que foram utilizadas no cálculo do *fitness* para o primeiro modelo adotado.

Tabela 7 – Dados das grandezas retornadas pelo algoritmo para o primeiro modelo adotado.

Grandeza		100%	75%	50%
Corrente de fase - $I_{1F}$ [A]	Estimado	1,771	1,487	1,291
	Real	1,748	1,5046	1,290
	Erro (%)	1,36	-1,15	-0,09

*Continua na próxima página*

Tabela 7 – Continuação da página anterior.

Grandeza		100%	75%	50%
Corrente de linha - $I_{1L}$ [A]	Estimado	3,068	2,576	2,236
	Real	3,027	2,606	2,234
	Erro (%)	1,36	-1,15	0,09
Rendimento ( $\eta$ )	Estimado	0,7832	0,8004	0,7883
	Real	0,805	0,800	0,775
	Erro (%)	-2,71	0,05	1,72
Fator de potência - $FP$	Estimado	0,821	0,719	0,558
	Real	0,81	0,71	0,57
	Erro (%)	1,36	1,20	-2,14
Potência de saída $P_{out}$ [W]	Estimado	749,659	562,993	373,591
	Real	750	562,0	375,0
	Erro (%)	-0,05	0,09	-0,38
Torque de saída $T_{out}$ [N · m]	Estimado	4,138	3,069	2,069
	Real	4,138	3,104	2,069
	Erro (%)	0,00	-1,14	-2,61

Fonte: Autoria própria.

## 5.1.2 MODELO 2

A Tabela 8 apresenta os valores obtidos para o segundo modelo de circuito, sem resistência de perdas no núcleo ( $R_c$ ) e com as perdas suplementares ( $P_{sup}$ ) na modelagem da máquina.

Tabela 8 – Parâmetros estimados pelo algoritmo para o segundo modelo de circuito.

<b>Resultado apresentado pelo algoritmo.</b>					
	$R_1[\Omega]$	$R_2[\Omega]$	$L_1[mH]$	$L_2[mH]$	$L_m[mH]$
Valor estimado	17,835	5,2582	0,012	0,012	0,4806
Intervalo de busca	[10,20]	[3, 10]	[0, 1]	[0, 1]	[0, 1]

Na Tabela 9 estão dispostos os valores fornecidos pelo algoritmo referente as grandezas inseridas na função objetivo e que foram utilizadas no cálculo do *fitness* para o segundo modelo adotado.

Tabela 9 – Dados das grandezas retornadas pelo algoritmo para o segundo modelo adotado.

Grandeza		100%	75%	50%
Corrente de fase - $I_{1F}$ [A]	Estimado	1,773	1,487	1,291
	Real	1,748	1,505	1,290
	Erro (%)	1,45	-1,15	0,06

Continua na próxima página

Tabela 9 – Continuação da página anterior.

Grandeza		100%	75%	50%
Corrente de linha - $I_{1L}$ [A]	Estimado	3,071	2,576	2,235
	Real	3,027	2,606	2,234
	Erro (%)	1,45	-1,15	0,06
Rendimento ( $\eta$ )	Estimado	0,779	0,800	0,792
	Real	0,805	0,8	0,775
	Erro (%)	-3,24	-0,01	2,21
Fator de potência - $FP$	Estimado	0,824	0,719	0,556
	Real	0,81	0,71	0,57
	Erro (%)	1,69	1,27	-2,47
Potência de saída $P_{out}$ [W]	Estimado	748,599	563,018	374,025
	Real	750,00	562,50	375,00
	Erro (%)	-0,19	0,09	-0,26
Torque de saída $T_{out}$ [N · m]	Estimado	4,132	3,069	2,017
	Real	4,138	3,104	2,069
	Erro (%)	-0,14	-1,13	-2,50

Fonte: Autoria própria.

### 5.1.3 MODELO 3

A Tabela 10 apresenta os valores obtidos por meio do algoritmo para o terceiro modelo de circuito, com a resistência de perdas no núcleo ( $R_c$ ) e sem as perdas suplementares ( $P_{sup}$ ).

Tabela 10 – Parâmetros estimados pelo algoritmo para o terceiro modelo de circuito.

<b>Resultado apresentado pelo algoritmo.</b>						
	$R_1[\Omega]$	$R_2[\Omega]$	$R_c[\Omega]$	$L_1[mH]$	$L_2[mH]$	$L_m[mH]$
Valor estimado	18,7226	5,4942	3151,5	0,0170	0,0170	0,4763
Intervalo de busca	[10,20]	[3, 10]	[2500, 10000]	[0, 1]	[0, 1]	[0, 1]

Na Tabela 11 estão dispostos os valores fornecidos pelo algoritmo para as grandezas inseridas na função objetivo e que foram utilizadas no cálculo do *fitness* para neste modelo.

Tabela 11 – Dados das grandezas retornadas pelo algoritmo para o terceiro modelo adotado.

Grandeza		100%	75%	50%
Corrente de fase - $I_{1F}$ [A]	Estimado	1,759	1,489	1,300
	Real	1,748	1,505	1,290
	Erro (%)	0,67	-1,01	0,76
Corrente de linha - $I_{1L}$ [A]	Estimado	3,047	2,580	2,251
	Real	3,027	2,606	2,234

Continua na próxima página

Tabela 11 – Continuação da página anterior.

Grandeza		100%	75%	50%
Rendimento ( $\eta$ )	Erro (%)	0,67	-1,01	0,76
	Estimado	0,784	0,801	0,792
	Real	0,805	0,8	0,775
	Erro (%)	-2,63	0,11	2,25
Fator de potência - $FP$	Estimado	0,814	0,718	0,571
	Real	0,81	0,71	0,57
	Erro (%)	0,48	1,06	0,09
Potência de saída $P_{out}[W]$	Estimado	738,687	563,306	386,677
	Real	750,00	562,50	375,00
	Erro (%)	-1,51	0,14	3,11
Torque de saída $T_{out}[N \cdot m]$	Estimado	4,077	3,070	2,086
	Real	4,138	3,104	2,069
	Erro (%)	-1,46	-1,08	0,80

Fonte: Autoria própria.

## 5.1.4 MODELO 4

A Tabela 12 apresenta os valores obtidos por meio do algoritmo para o quarto modelo de circuito adotado, este considera todos os parâmetros e perdas.

Tabela 12 – Parâmetros estimados pelo algoritmo para o quarto modelo de circuito.

<b>Resultado apresentado pelo algoritmo.</b>						
	$R_1[\Omega]$	$R_2[\Omega]$	$R_c[\Omega]$	$L_1[mH]$	$L_2[mH]$	$L_m[mH]$
Valor estimado	17,5605	5,5133	0,0135	0,0135	0,4737	4353,8
Intervalo de busca	[10,20]	[3, 10]	[2500, 10000]	[0, 1]	[0, 1]	[0, 1]

Na Tabela 13 estão dispostos os valores fornecidos pelo algoritmo para as grandezas inseridas na função objetivo e que foram utilizadas no cálculo do *fitness* para o quarto e ultimo modelo adotado.

Tabela 13 – Dados das grandezas retornadas pelo algoritmo para o quarto modelo adotado.

Grandeza		100%	75%	50%
Corrente de fase - $I_{1F} [A]$	Estimado	1,767	1,496	1,309
	Real	1,748	1,505	1,290
	Erro (%)	1,12	-0,54	1,47
Corrente de linha - $I_{1L} [A]$	Estimado	3,061	2,592	2,267
	Real	3,027	2,606	2,234
	Erro (%)	1,12	-0,54	1,47

Continua na próxima página

Tabela 13 – Continuação da página anterior.

Grandeza		100%	75%	50%
Rendimento ( $\eta$ )	Estimado	0,780	0,800	0,793
	Real	0,805	0,8	0,775
	Erro (%)	-3,14	-0,03	2,37
Fator de potência - $FP$	Estimado	0,814	0,712	0,558
	Real	0,81	0,71	0,57
	Erro (%)	0,43	0,24	-2,04
Potência de saída $P_{out}[W]$	Estimado	737,784	560,622	381,601
	Real	750,00	562,50	375,00
	Erro (%)	-1,63	-0,33	1,76
Torque de saída $T_{out}[N \cdot m]$	Estimado	4,072	3,056	2,058
	Real	4,138	3,104	2,069
	Erro (%)	-1,58	-1,55	-0,52

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 14 apresenta um comparativo dos resultados obtidos pelo algoritmo, bem como o *fitness* calculado para cada modelo.

Tabela 14 – Comparativo dos parâmetros estimados e o *fitness* para cada caso.

	<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>Rc</b>	<b>L1</b>	<b>L2</b>	<b>Lm</b>	<i>fitness</i>
<b>Modelo 1</b>	18,8229	5,2116	-	0,0146	0,0146	0,4771	$0,715 \cdot 10^{-3}$
<b>Modelo 2</b>	17,8352	5,2582	-	0,0120	0,0120	0,4806	$0,983 \cdot 10^{-3}$
<b>Modelo 3</b>	18,7226	5,4942	3151,5	0,0170	0,0170	0,4763	$0,913 \cdot 10^{-3}$
<b>Modelo 4</b>	17,5605	5,5133	4353,8	0,0135	0,0135	0,4737	$0,982 \cdot 10^{-3}$

## 5.2 ENSAIOS LABORATORIAIS.

O primeiro comparativo entre os valores obtidos computacionalmente e os medidos em bancada experimental estão dispostos na Tabela 15, sendo que foram aplicados tensão e frequência nominal, porém com torques de referência menores que o nominal. Na Tabela 15, tem-se que, LSI é representação para as medidas obtidas com o motor real,  $T$  é o torque de saída do motor, dado em N.m,  $n$  representa a rotação em RPM,  $Fp$  o fator de potência,  $I_L$  a corrente de linha dada em amperes [A].  $P_{out}$  e  $P_{in}$  são as potências de saída e entrada do motor respectivamente, ambas dadas em watts ( $W$ ) e por fim,  $\eta$  representa o rendimento do motor.

Tabela 15 – Comparativo dos valores obtidos, tensão e frequência nominal e torque menor que o nominal.

	LSI	Mod. 1	Erro %	Mod. 2	Erro %	Mod. 3	Erro %	Mod. 4	Erro %
$T_{out}$	4,00	4,01	0,17	4,02	0,37	4,01	0,21	4,01	0,24
$n$	1717	1733	0,93	1733	0,93	1732	0,87	1732	0,87
$Fp$	0,719	0,809	12,53	0,812	12,89	0,807	12,24	0,807	12,20
$I_L$	3,34	3,00	-10,39	3,00	-10,33	3,08	-7,92	3,02	-9,69
$P_{out}$	720,00	726,92	0,96	726,35	0,88	727,04	0,98	727,22	1,00
$P_{in}$	914,00	923,00	0,98	927,45	1,47	924,91	1,19	929,77	1,73
$\eta$	0,788	0,788	-0,02	0,783	-0,58	0,786	-0,21	0,782	-0,71
	LSI	Mod.1	Erro %	Mod. 2	Erro %	Mod. 3	Erro %	Mod. 4	Erro %
$T_{out}$	3,05	3,06	0,21	3,05	-0,06	3,05	0,06	3,07	0,61
$n$	1739	1752	0,75	1752,7	0,79	1752	0,75	1751,9	0,74
$Fp$	0,682	0,715	4,82	0,714	4,74	0,713	4,57	0,712	4,35
$I_L$	2,73	2,57	-5,96	2,57	-6,03	2,57	-5,96	2,60	-4,91
$P_{out}$	556,00	560,93	0,89	559,46	0,62	560,13	0,74	563,71	1,39
$P_{in}$	708,50	700,66	-1,11	699,05	-1,33	699,18	-1,32	704,77	-0,53
$\eta$	0,785	0,801	2,02	0,800	1,98	0,801	2,09	0,800	1,92

Fonte: Autoria própria.

O segundo comparativo foi realizado com a tensão e frequência reduzida na mesma proporção, sendo que a tensão aplicada foi de 184,5 V e a frequência de 50 Hz. Conforme dado pela Tabela 16.

Tabela 16 – Comparativo dos valores obtidos, tensão de 184,5V, frequência de 50 Hz e torque menor que o nominal.

	LSI	Mod. 1	Erro %	Mod. 2	Erro %	Mod. 3	Erro %	Mod. 4	Erro %
$T_{out}$	3,07	3,08	0,21	3,07	0,05	3,07	0,07	3,07	0,04
$n$	1416	1450,6	2,44	1451	2,47	1450	2,40	1449	2,33
$Fp$	0,651	0,738	13,36	0,746	14,53	0,736	13,12	0,735	12,87
$I_L$	2,88	2,58	-10,49	2,59	-10,11	2,58	-10,40	2,61	-9,41
$P_{out}$	455,00	467,35	2,71	466,52	2,53	466,53	2,53	466,20	2,46
$P_{in}$	596,00	608,00	2,01	613,13	2,87	607,22	1,88	612,67	2,80
$\eta$	0,763	0,769	0,69	0,761	-0,33	0,768	0,64	0,761	-0,33
	LSI	Mod. 1	Erro %	Mod. 2	Erro %	Mod. 3	Erro %	Mod. 4	Erro %
$T_{out}$	2,01	2,00	-0,34	2,01	-0,12	2,02	0,45	2,01	-0,08
$n$	1449	1470	1,48	1467	1,44	1471	1,52	1470,6	1,49
$Fp$	0,592	0,573	-3,21	0,577	-2,50	0,572	-3,31	0,567	-4,19
$I_L$	2,12	2,23	5,14	2,22	4,72	2,23	5,00	2,25	6,32
$P_{out}$	305,00	308,44	1,13	308,99	1,31	308,42	1,12	309,28	1,40
$P_{in}$	398,00	408,17	2,56	407,71	2,44	407,25	2,32	408,57	2,66
$\eta$	0,766	0,756	-1,39	0,758	-1,10	0,757	-1,18	0,757	-1,22

Fonte: Autoria própria.

Por fim, para a tensão de 149,5 V e frequência de 40 Hz. No ensaio experimental não foi realizado em carga próxima a nominal devido a elevação de corrente. A Tabela 17 apresenta os valores obtidos.

Tabela 17 – Comparativo dos valores obtidos, tensão de 149,5V, frequência de 40 Hz e torque menor que o nominal.

	LSI	Mod. 1	Erro %	Mod. 2	Erro %	Mod. 3	Erro %	Mod. 4	Erro %
$T_{out}$	2,07	2,07	0,05	2,08	0,26	2,07	0,02	2,08	0,50
$n$	1130	1168	3,36	1166	3,19	1168	3,36	1168	3,36
$Fp$	0,569	0,610	7,21	0,630	10,79	0,611	7,38	0,610	7,24
$I_L$	2,26	2,24	-1,12	2,23	-1,46	2,24	-1,18	2,27	0,44
$P_{out}$	245,00	253,48	3,46	253,55	3,49	253,43	3,44	254,43	3,85
$P_{in}$	331,00	354,50	7,10	357,01	7,86	353,80	6,89	359,12	8,50
$\eta$	0,740	0,715	-3,40	0,710	-4,05	0,716	-3,22	0,708	-4,28

Fonte: Autoria própria.



## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho propõe um método simples para a implementação de um algoritmo capaz de estimar os parâmetros de qualquer máquina de indução fornecendo dados retirados de suas curvas de desempenho, além dos dados básicos da máquina, fornecidos pelo *datasheet* ou até mesmo pela placa de identificação, dispensando a necessidade de se realizar ensaios elétricos normatizados para a determinação dos valores dos parâmetros. É necessário a utilização de algum método, seja ele computacional ou experimental, para que esses valores sejam conhecidos, uma vez que nem sempre os fabricantes fornecem esses dados diretamente.

Para a validação do algoritmo, foram utilizados testes computacionais e experimentais a fim de comprovar a eficiência do método. A fim de se encontrar um modelo que seja aplicável a qualquer tipo de motor de indução trifásico foram adotados quatro modelos distintos, com isso, foram implementados quatro algoritmos baseados em evolução diferencial, com os mesmos parâmetros de controle, espaço de busca e função objetivo, porém cada um considerando um circuito e uma modelagem específica.

Quanto ao algoritmo implementado, foi possível perceber que o mesmo é capaz de estimar valores baixos, como no caso das indutâncias de dispersão, e valores altos, como no caso da resistência de perdas no núcleo. Um ponto a ser destacado é o amplo espaço de busca que o algoritmo pode alcançar, inicialmente a única limitação quanto ao espaço de busca é que as soluções candidatas assumam valores maior que zero, pois sabe-se que os valores de indutância e resistência não são nulos. Após uma primeira estimação preliminar, os espaços de busca foram definidos a fim de se diminuir o tempo para convergência do algoritmo. Um ponto positivo do algoritmo de evolução diferencial refere-se quanto a parametrização, pois o mesmo possui apenas três variáveis de controle e com isso, se torna muito fácil de parametrizar.

Quanto aos modelos propostos, o primeiro modelo foi o que apresentou o maior grau de aptidão, ou seja, é o modelo que apresentou resultados mais próximos dos valores de referência e, conseqüentemente, possui o menor *fitness*. O terceiro modelo se difere do primeiro pela inclusão da resistência das perdas no núcleo. Conforme dado pela Tabela 14, nota-se que a inserção desta resistência não causou uma grande variação nos valores dos parâmetros estimados no primeiro modelo.

O segundo modelo proposto apresentou a inserção das perdas suplementares e, causou uma variação nos parâmetros maior do que apenas a consideração das perdas no núcleo. Quando se compara com o quarto modelo, que é o modelo mais completo, nota-se que os parâmetros não variaram significativamente com a inserção da resistência de perdas no núcleo, devido ao seu alto valor, ela poderia ser desprezada, visto que o grau de aptidão dos dois modelos são muito próximos.

O quarto modelo é o modelo mais completo e com isso, teoricamente mais próximo da realidade, porém foi o modelo que apresentou os maiores erros em comparação com os valores

de referência. Computacionalmente, os modelos foram ficando mais complexos e, com isso, exigindo um maior esforço computacional e tempo para convergência.

Quanto a operação do motor em condições fora das nominais como, por exemplo, tensão, frequência e torque abaixo dos valores nominais a fim de simular a operação com um inversor de frequência, foi possível comparar os resultados obtidos por meio da modelagem em regime permanente com os valores medidos em laboratório.

Portanto, pode-se concluir que o algoritmo de evolução diferencial é um método eficiente, simples e robusto, pois o mesmo forneceu soluções factíveis e que trazem diferenças pequenas em relação as grandezas que são conhecidas e disponibilizadas pelos fabricantes, podendo ser uma ferramenta confiável e de baixo custo computacional para a realização da estimação dos parâmetros elétricos de qualquer motor de indução.

## **6.1 PERSPECTIVA PARA TRABALHOS FUTUROS**

A fim de dar continuidade nessa linha de pesquisa, são sugeridos os seguintes trabalhos para o aperfeiçoamento e continuidade do método proposto:

- Realizar a estimação dos parâmetros com outras técnicas computacionais e compará-las a fim de se determinar qual o método mais eficaz para este processo;
- Realizar estimação dos parâmetros para motores de potências maiores a fim de confirmar a aplicabilidade do método para qualquer motor de indução trifásico;
- Utilizar a modelagem no regime transitório para a estimação dos parâmetros elétricos e mecânicos da máquina, comparando-os resultados obtidos com os da modelagem em regime permanente.

## **6.2 TRABALHOS PUBLICADOS**

FERRI, I.V.F.; CASTOLDI, M.F.; GOEDTEL, A.; SANCHES, D. S.. Estimação dos parâmetros elétricos de um motor de indução trifásico utilizando suas curvas de desempenho. In: XIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI 2017), 2017, Porto Alegre. Proceedings of XIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI 2017), 2017. v. 1. p. 2165-2170.

## REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5383-1 Máquinas Elétricas Girantes parte 1: Motores de Indução - ensaio**. Rio de Janeiro, 2002.
- AKSOY, S.; MÜHÜRÇÜ, A.; KIZMAZ, H. **State and parameter estimation in induction motor using the Extended Kalman Filtering algorithm**. 2010 Modern Electric Power Systems, p. 1–5, Sept 2010.
- BIM, E. **Máquinas Elétricas e Acionamento**. 3. ed. Rio de Janeiro: Campus, 2014.
- CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: McGraw-Hill, 2013.
- CHENG, S.-L.; HWANG, C. Optimal approximation of linear systems by a differential evolution algorithm. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans**, v. 31, n. 6, p. 698–707, Nov 2001. ISSN 1083-4427.
- DORIGO, M. **Optimization, learning and natural algorithms**. Tese (Doutorado) — Politecnico di Milano, Milão, Italia, 1992.
- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR, C.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas: Com introdução à eletrônica de potência**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- GABRIEL, P. H. R.; DELBEM, A. C. B. **Fundamentos de Algoritmos Evolutivos**. Relatório Técnico: Notas Didáticas do ICMC-USP, 2008.
- GOEDEL, A. **Estimador Neural de Velocidade Para Motores de Indução Trifásico**. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.
- HAYKIN, S. **Neural Networks: a comprehensive foundation**. 2. ed. Ontario, Canada.: Prentice Hall, 1999.
- HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence**. 1. ed. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators**. Nova Iorque - EUA, 2004.
- JACOBINA, C. B.; LIMA, M. N. **Acionamento de Máquinas Elétricas de Alto Desempenho**. 2002. Minicurso XIV CBA.
- KALMAN, R. E. A new approach to linear filtering and prediction problems. **ASME Journal of Basic Engineering**, 1960.
- KARABOGA, D. **An idea based on honey bee swarm for numerical optimization**. [S.l.], 2005.
- KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle swarm optimization. In: IEEE. **Micro Machine and Human Science, 1995. MHS'95., Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks IV**. Australia, 1995. p. 1942–1945.

- KOSOW, I. L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. 15. ed. São Paulo: Globo, 2005.
- LIN, C.; QING, A.; FENG, Q. A comparative study of crossover in differential evolution. **Journal of Heuristics**, v. 17, n. 6, p. 675–703, 2011.
- MARQUESIN JUNIOR, N. **Estudo de eficiência energética em uma planta industrial**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso.
- MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano Nacional de Eficiência Energética**. Rio de Janeiro, 2011.
- OLIVEIRA, G. T. da S. **Estudo e Aplicação da Evolução Diferencial**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, 2006.
- RUTKOWSKI, L. **Computational Intelligence: Methods and Techniques**. [S.l.]: Springer, 2008.
- SANCHES, D. S. **Algoritmos Evolucionários Multi-Objetivo Para Reconfiguração De Redes Em Sistemas De Distribuição De Energia Elétrica**. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade Estadual de São Paulo, São Carlos., 2013.
- SANKARDOSS, V.; GEETHANJALI, P. **PMDC Motor Parameter Estimation using Bio-Inspired Optimization Algorithms**. **IEEE Access**, PP, n. 99, p. 1–1, 2017. ISSN 2169-3536.
- SAREM, Y. N.; POSHTAN, J.; GHOMI, M.; POSHTAN, M. **Synchronous generator parameters estimation**. 2007 International Conference on Intelligent and Advanced Systems, p. 870–875, Nov 2007.
- STORN, R.; PRICE, K. **Differential Evolution: a simple and efficient adaptative scheme for global optimization over continuous space**. 1995. Technical Report TR-95-012, International Computer Science Institute, Berkeley.
- TALBI, E.-G. **Metaheuristics: from design to implementation**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2009. v. 1.
- WEG. **Seleção de Produtos**. 2018. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/>>. Acesso em: 2 de julho de 2018.