

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CÂMPUS CORNÉLIO PROCÓPIO  
DIRETORIA DE GRADUAÇÃO E EDUCAÇÃO PROFISSIONAL  
ENGENHARIA ELÉTRICA

JACQUELINE JORDAN GUEDES

**ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS DE MOTORES DE INDUÇÃO  
TRIFÁSICOS UTILIZANDO EVOLUÇÃO DIFERENCIAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO  
2015

JACQUELINE JORDAN GUEDES

**ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS DE MOTORES DE INDUÇÃO  
TRIFÁSICOS UTILIZANDO EVOLUÇÃO DIFERENCIAL**

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

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Favoretto Castoldi

CORNÉLIO PROCÓPIO  
2015



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



## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Jacqueline Jordan Guedes**

### **Estimação de parâmetros de motores de indução trifásicos utilizando evolução diferencial**

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 16:00hs do dia 01/06/2015 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 - (Membro)

---

Prof(a). Me(a). Demerval Mizuyama - (Membro)

Em memória do meu padrinho  
Armando que sempre comemorou  
comigo todas as minhas vitórias e me  
encorajou em todos os meus desafios.

## AGRADECIMENTOS

Agradecer a todos que me apoiaram nessa jornada, citando nome a nome, seria algo extenso uma vez que cada um que passou por minha vida nesse período, de certa forma deixou sua contribuição. No entanto, algumas pessoas merecem uma lembrança especial.

Primeiramente ao meu orientador Prof. Dr. Marcelo Favoretto Castoldi, que se mostrou sempre homem humilde e disposto a me ajudar, em qualquer hora que fosse preciso. Cada degrau que avançamos nesse trabalho foi tão comemorado por nós dois, que me deu ainda mais forças para continuar.

Ao membro da banca Prof. Dr. Alessandro Goedtel, por aceitar participar da minha banca, por me proporcionar a oportunidade de ter o primeiro contato com a pesquisa em minha iniciação científica e por me mostrar, mesmo que indiretamente, que sou capaz de obter mais resultados do que eu mesma poderia imaginar.

Ao Prof. MSc Demerval Mizuyama e a Profa. Dra Gabriela Shiguemoto por aceitarem participar da minha banca.

Aos membros do Laboratório de Sistemas Inteligentes (LSI), do Centro Integrado de Pesquisa em Controle e Automação (CIPECA), da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Cornélio Procópio, pelo auxílio prestado para aquisição de dados experimentais, utilizados nesse trabalho.

Ao Prof. Pedro Rodrigues (em memória), um homem brilhante que me mostrou que a grandeza e a humildade caminham juntas.

Aos meus pais, Vera e Kalu, e ao meu irmão Guilherme, por toda confiança e incentivo em cada momento dessa trajetória. Tenho certeza de que vocês foram fundamentais para que eu chegasse até aqui e essa vitória com certeza é nossa.

Aos demais membros da minha família, por estarem sempre presentes quando eu precisei, principalmente minha tia Célia Jordan e meu primo Sérgio, que contribuíram para que algumas preocupações durante a graduação fossem deixadas de lado e eu pudesse me preocupar somente com os estudos.

A todos os meus amigos que contribuíram para que essa jornada ficasse mais leve, divertida e que será sempre lembrada com boas risadas e a certeza de que valeu muito a pena.

Por fim, mas não menos importante, a Deus, pois tudo o que eu precisei e desejei eu consegui.

Tudo o que um sonho precisa para ser realizado é alguém que acredite que ele possa ser realizado

Roberto Shinyashiki

## RESUMO

GUEDES, Jacqueline Jordan. Estimação de parâmetros de motores de indução trifásicos utilizando evolução diferencial. 2015. 59f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2015.

Os motores de indução trifásicos são os mais utilizados na indústria devido ao seu baixo custo, robustez e facilidade de manutenção, quando comparados com outros tipos de motores, como os de corrente contínua, por exemplo. Assim como todos os motores, esses precisam de um sistema de acionamento e controle e, para isso, necessitam dos valores de seus parâmetros como resistências do estator e rotor, indutâncias de dispersão do estator e rotor, indutância de magnetização, momento de inércia e coeficiente de atrito. Contudo, em alguns casos não é possível ter acesso a esses dados imediatamente ou os mesmos podem ser alterados por desgastes provenientes da utilização do motor. Para que se possa estimar tais parâmetros de maneira automática e de forma rápida, este trabalho propõe um método utilizando evolução diferencial, desenvolvido no *software* MATLAB<sup>®</sup>, capaz de estimar os parâmetros citados utilizando como sinal de entrada tanto a curva de uma das fases da corrente quanto a combinação entre a curva da velocidade e de uma das fases da corrente. Os resultados obtidos foram satisfatórios para ambos os sinais de entrada, mas os melhores resultados foram encontrados utilizando-se somente a corrente como sinal de entrada, o que tornou o método ainda mais simples e com custo computacional mais baixo. Para validação do método foram realizados testes com curvas simuladas através da ferramenta computacional MATLAB<sup>®</sup>/*Simulink* e também com curvas experimentais, adquiridas de um motor de 1 CV. Além disso, o método utilizando evolução diferencial foi comparado com método do ensaio a vazio e de rotor bloqueado para estimação dos mesmos parâmetros, para um mesmo motor sob as mesmas condições de operação. O método diferencial apresentou resultados mais precisos.

**Palavras-chave:** Motor de Indução Trifásico; evolução diferencial; estimação de parâmetros.

## ABSTRACT

GUEDES, Jacqueline Jordan. The Three-phase Induction Motor Parameter Estimation Using Differential Evolution. 2015. 59f. Monograph (graduation) – Electrical Engineering. Federal Technological University of Paraná. Cornelio Procopio, 2015.

Three-phase induction motors are the most used in industry due to their low cost, ruggedness, and ease of maintenance compared with other types of engines, such as direct current, for example. All motors these one a drive system and control and, therefore, require the values of their parameters as stator resistance and rotor, stator leakage inductance and rotor magnetizing inductance, moment of inertia and coefficients friction. However, in some cases it is not possible to have access to these data immediately or they may be altered by abrasion from use of the engine. To be able to estimate these parameters automatically and quickly, this paper proposes a method using differential evolution, developed in MATLAB® software, that to estimate the above parameters using as an input signal both the curve of the current phase as the combination of the speed curve and a stream of the phases. The results were satisfactory for both input signals, but the best results were found using only the current as the input signal, making the method more simply and with low computational cost. Method validation tests were performed with simulated curves by computer tool MATLAB® / Simulink and with experimental data acquired from a 1 hp motor. The method using differential evolution was compared with the test method vacuo and the locked rotor for estimating the same parameters for the same engine under the same operating conditions. The differential method showed most effective results.

**Keywords:** Three-phase Induction Motor, Differential Evolution. Parameter Estimation.

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1: COEFICIENTES DA MATRIZ DE ESPAÇO DE ESTADOS.....	28
QUADRO 2: ANALOGIA ENTRE UM ALGORITMO EVOLUTIVO E O SISTEMA NATURAL.....	31

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1: PARÂMETROS OBTIDOS DO MIT DE 5 HP ATRAVÉS DA UTILIZAÇÃO DO DE.....	41
TABELA 2: PARÂMETROS OBTIDOS DO MIT DE 200 HP ATRAVÉS DA UTILIZAÇÃO DO DE.....	42
TABELA 3: PARÂMETROS OBTIDOS DO MIT DE 1 CV ATRAVÉS DA UTILIZAÇÃO DO DE.....	45
TABELA 4: PARÂMETROS OBTIDOS DO MIT DE 1 CV ATRAVÉS DA UTILIZAÇÃO DO DE, COM CURVA DE VELOCIDADE.....	48
TABELA 5: PARÂMETROS OBTIDOS DO MIT DE 1 CV ATRAVÉS DO ENSAIO A VAZIO E DE ROTOR BLOQUEADO.....	51

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação dos enrolamentos de um MIT..	22
Figura 2: Esquemático das resistências e indutâncias do estator e rotor do motor de indução trifásico gaiola de esquilo.....	23
Figura 3: Processo para geração de um vetor mutado. ....	32
Figura 4: Modelo de MIT utilizado para simulação dos motores de 5 HP e 200 HP..	40
Figura 5: Curva de corrente da fase A, do motor de 5HP, com zoom no regime transitório permanente.....	41
Figura 6: Curva da velocidade, do motor de 5 HP, com zoom no regime transitório e permanente.....	42
Figura 7: Curva da corrente da fase A, do motor de 200 HP, com zoom no regime transitório e permanente.....	43
Figura 8: Curva da corrente da velocidade, do motor de 200 HP, com zoom no regime transitório e permanente.....	43
Figura 9: Curva da corrente da fase A, do motor de 5 HP, simulada (vermelho) e fornecida (azul).....	44
Figura 10: Curva da corrente da fase A, do motor de 1 CV, com zoom no regime transitório e permanente, para o melhor resultado obtido. ....	46
Figura 11: Curva da corrente da fase A, do motor de 1 CV, com zoom no regime transitório e permanente, para o melhor resultado obtido. ....	46
Figura 12: Curva da corrente da fase A, do motor de 1 CV, com zoom no regime transitório e permanente, para o pior resultado obtido. ....	46
Figura 13: Curva da corrente da fase A, do motor de 1 CV, com zoom no regime transitório e permanente, para o pior resultado obtido. ....	47
Figura 14: Curva da corrente da fase A do motor de 1 CV, com zoom no regime transitório e permanente, para o melhor resultado obtido. ....	49
Figura 15: Curva da corrente da velocidade do motor de 1 CV, com zoom no regime transitório e permanente, para o melhor resultado obtido. ....	49
Figura 16: Curva da corrente da fase A, do motor de 1 CV, com zoom no regime transitório e permanente, para o pior resultado obtido. ....	49
Figura 17: Curva da velocidade do motor de 1 CV, com zoom no regime transitório e permanente, para o pior resultado obtido. ....	50
Figura 18: Curva da velocidade do motor de 1 CV, simulada (vermelho) e fornecida (azul).....	50
Figura 19: Corrente da fase A do motor de 1 CV, obtida através do teste de ensaio a vazio e rotor bloqueado.....	51
Figura 20: Corrente da fase A do motor de 1 CV, obtida através do teste de ensaio a vazio e rotor bloqueado.....	52

## LISTA DE ABREVIATURAS

AEs	Algoritmos Evolutivos
AG	Algoritmo Genético
DE	Evolução Diferencial, do inglês <i>Differential Evolution</i>
EKF	Filtro de Kalman Estendido, do inglês <i>Extendet Kalman Filtering</i>
FMM	Força Magnetomotriz
FO	Função Objetivo
MIT	Motor de Indução Trifásico
PSO	Enxame de partículas, do inglês <i>Particle Swarm Optimizarion</i>

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
1.1 PROBLEMAS E PREMISSAS .....	17
1.2 OBJETIVOS .....	18
1.2.1 Objetivo geral .....	18
1.2.2 Objetivos específicos.....	18
1.3 JUSTIFICATIVA .....	19
1.4 DISPOSIÇÃO DO TRABALHO .....	19
<b>2 MODELAGEM DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO</b> .....	<b>21</b>
<b>3 EVOLUÇÃO DIFERENCIAL</b> .....	<b>29</b>
3.1 ALGORITMOS EVOLUTIVOS.....	30
3.1.1 Evolução Diferencial.....	31
<b>4 METODOLOGIA</b> .....	<b>35</b>
<b>5 RESULTADOS OBTIDOS</b> .....	<b>40</b>
5.1 RESULTADOS SIMULADOS .....	40
5.1.1 Motor de 5HP .....	41
5.1.2 Motor de 200HP .....	42
5.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....	44
5.2.1 Uso do corrente da fase A como sinal de entrada.....	45
5.2.2 Uso do corrente da fase A e da velocidade como sinais de entrada.....	48
5.3 ENSAIO A VAZIO E COM ROTOR BLOQUEADO .....	51
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>53</b>
6.1 TRABALHOS FUTUROS .....	54
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>55</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O motor de indução trifásico (MIT) pode ser considerado a principal máquina de conversão de energia elétrica em mecânica motriz e é muito utilizado nas indústrias em equipamentos como ventiladores, bombas, redutores, compressores e outras máquinas-ferramenta. Sua ampla utilização é devido a seu baixo custo, robustez e facilidade de manutenção (KOSOW, 2005).

Existem dois tipos de MIT, os de rotor bobinado e rotor em gaiola. Os motores de indução com rotor em gaiola são os mais utilizados, pois sua robustez permite que este seja aplicado em diversos ambientes: com poeira, umidade, altas temperaturas e próximo a locais explosivos. Além disso, é o único contemplado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro) como um motor de alto rendimento (PROCEL, 2009).

Estudos indicam que motores elétricos são responsáveis por 65% do consumo de energia na indústria, ou aproximadamente 40% do consumo de energia global. No entanto, muitos desses motores não são dimensionados corretamente, o que aumenta significativamente o consumo de energia elétrica. De acordo com estimativas, se forem adotadas medidas já existentes para o dimensionamento correto desses motores, aumentando a eficiência energética dos mesmos, a economia de energia pode chegar a 18% (APEC, 2008).

Para que o motor funcione de forma adequada é necessário que o acionamento e controle do mesmo sejam específicos para sua aplicação. Por isso, alguns parâmetros do motor devem ser considerados, tais como os dados do circuito elétrico equivalente – resistências de rotor e estator, indutâncias de dispersão de rotor e estator e indutância de magnetização – momento de inércia e coeficiente de atrito.

Em alguns casos não é possível obter o valor desses parâmetros exatamente, pois podem não ser fornecidos pelos fabricantes ou ainda porque estão sujeitos a alterações, uma vez que o motor sofre desgastes mecânicos e elétricos com a sua utilização decorrente de atrito, por exemplo. No entanto, existem técnicas que podem ser aplicadas para estimá-los, como, por exemplo, a técnica que determina tais parâmetros a partir de ensaios a vazio e com o rotor bloqueado (FITZGERALD et al., 2006).

Há ainda a possibilidade de obter esses parâmetros através de técnicas computacionais que utilizam dados conhecidos do motor (como a curva de corrente, velocidade e torque), obtidos através de ensaios. Nesses casos, os parâmetros são estimados através de meta-heurísticas, ou seja, algoritmos que buscam encontrar uma solução satisfatória para um problema proposto. Algumas meta-heurísticas utilizadas para estimação desses parâmetros do motor de indução são algoritmos genéticos (AG) – híbrido e adaptado – colônia de formigas (ACO – do inglês *Ant Colony Optimization*), enxame de partícula (PSO – do inglês *Particle Swarm Optimization*), Filtro de Kalman Estendido (EKF – do inglês *Extended Kalman Filtering*), evolução diferencial (DE – do inglês *Differential Evolution*), entre outros.

Sakthivel et al. (2009) sugere um método *off-line* simples baseado PSO para determinar parâmetros elétricos do motor – resistência de estator e rotor, indutância de dispersão de estator e rotor e indutância de magnetização do motor – considerando três modelos diferentes, comparando os resultados obtidos com outros métodos heurísticos.

Zhou et al. (2002) propõe a utilização de um algoritmo genético de terceira ordem adaptado para estimar parâmetros elétricos e mecânicos do motor de indução trifásico através de uma modelagem dinâmica do mesmo. A modificação implementada no algoritmo é o cálculo do melhor indivíduo (*fitness*) para cada população gerada, o que faz com que o cruzamento e a mutação do algoritmo adaptado mudem conforme cada população.

Fortes et al. (2013) realizou uma pesquisa para estimar os parâmetros do circuito elétrico equivalente de um motor de indução, utilizando um modelo baseado no motor de indução trifásico do *Simulink* (do *software* MATLAB®), mas tendo como base a modelagem estática do MIT. Foi utilizada a curva que descreve o comportamento do escorregamento sob carga para realizar a estimação dos parâmetros.

Já no estudo de Zhu et al. (2010) é proposto o desenvolvimento de um algoritmo baseado em colônia de formigas como um método de otimização para determinação de uma solução no ótimo global, onde o problema dos parâmetros é convertido em um problema de otimização. São estimados os parâmetros do circuito equivalente do motor, bem como seu torque. A modelagem utilizada é estática.

Em Zamora e Garcia-Cerrada (2000) é proposto um algoritmo para a estimação de resistência do estator, além das indutâncias de rotor e de dispersão do

rotor do MIT. O método, *online*, utiliza como sinais de entrada apenas a tensão e corrente da máquina sobre diferentes condições: baixo torque (para estimar indutância de estator), baixa velocidade e alto torque (para estimar a resistência) e alta velocidade e torque (para estimar a indutância de dispersão do estator).

Por fim, Askoy et al. (2010) apresenta um algoritmo *online* para estimação de parâmetros e estados do motor de indução trifásico, do tipo gaiola de esquilo, utilizando a técnica EKF. O algoritmo utiliza como dados de entrada os valores de tensão e corrente do estator, além da velocidade do motor. O trabalho utilizou uma modelagem dinâmica.

Assim, o principal incentivo para este trabalho está na utilização de uma meta-heurística capaz de estimar os valores do circuito elétrico equivalente – resistências de rotor e estator, indutâncias de dispersão de rotor e estator e indutância de magnetização – momento de inércia e coeficiente de atrito do motor de indução trifásico, utilizando apenas a corrente de estator de uma das fases como entrada.

## 1.1 PROBLEMAS E PREMISSAS

O motor de indução trifásico possui parâmetros específicos de acordo com suas características e modelo, dentre esses estão: resistência de estator e rotor, indutância de dispersão do estator e rotor, indutância de magnetização, momento de inércia do rotor e coeficiente de atrito. Esses parâmetros são fundamentais para o dimensionamento de acionamento e controle do mesmo e podem ser fornecidos pelo fabricante.

No entanto, com o decorrer do uso, esses dados podem ser alterados ou perdidos. A alteração dos valores pode ocorrer com a utilização do motor, pois algumas peças, como por exemplo rolamentos, sofrem desgastes, além de serem submetidos a variações, como diversas condições de cargas e mudanças de temperatura. Portanto, se faz necessária a utilização de um método que seja capaz de estimar tais parâmetros automaticamente, apresentando resultados satisfatórios.

## 1.2 OBJETIVOS

Os objetivos são abordados de maneira geral e específica para melhor explanação.

### 1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver um algoritmo evolutivo, robusto e eficiente, capaz de estimar os parâmetros do circuito elétrico equivalente – resistências de rotor e estator, indutâncias de dispersão de rotor e estator e indutância de magnetização – momento de inércia e coeficiente de atrito do motor de indução trifásico.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Desenvolver a fundamentação teórica sobre algoritmos evolutivos, estimação de parâmetros de motores de indução trifásicos e modelagem dinâmica dos motores de indução trifásicos.
- Desenvolver um algoritmo evolutivo diferencial que possa ser utilizado para a estimação de parâmetros do circuito elétrico equivalente – resistências de rotor e estator, indutâncias de dispersão de rotor e estator e indutância de magnetização – momento de inércia e coeficiente de atrito do motor de indução trifásico.
- Realizar simulações computacionais para validar o algoritmo desenvolvido, comparando com parâmetros conhecidos dos modelos apresentados na ferramenta computacional Simulink/MATLAB®.
- Validar o algoritmo desenvolvido utilizando parâmetros experimentais, através de práticas em laboratório.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

Os parâmetros do circuito elétrico equivalente – resistências de rotor e estator, indutâncias de dispersão de rotor e estator e indutância de magnetização – momento de inércia e coeficiente de atrito são essenciais para o bom desempenho dos controladores aplicados ao MIT, pois estes valores são utilizados dependendo da estratégia de controle adotada (GOEDTEL, 2007). No entanto, como nem sempre é possível obter esses parâmetros pelo fabricante ou esses sofrem alterações pela utilização da máquina, é preciso encontrar outra alternativa para determiná-los. Uma dessas alternativas é a utilização de algoritmos evolutivos diferenciais (DE) para a estimação de parâmetros de motor de indução trifásico.

Através do DE é possível determinar automaticamente quais são esses parâmetros por meio de um aproximador de função, utilizando como comparação um ou mais sinais de grandezas do MIT, coletadas diretamente da máquina, com o sistema equilibrado. Ou seja, um algoritmo evolutivo é desenvolvido – utilizando como função a modelagem da máquina e, a partir de uma ou mais curvas características adquiridas do motor – para esse trabalho serão utilizadas as curvas de velocidade *versus* tempo e corrente *versus* tempo – é realizada uma comparação ponto a ponto da curva gerada pelo DE com a curva adquirida da máquina, onde o erro é calculado através da soma da diferença entre os valores característicos desses sinais. Quando o erro atinge um valor satisfatório, pré-estabelecido, o algoritmo retorna os valores dos parâmetros estimados.

### 1.4 DISPOSIÇÃO DO TRABALHO

O capítulo inicial apresentou uma breve introdução sobre a importância da estimação de parâmetros do MIT e a proposta a ser desenvolvida nesse trabalho.

No capítulo 2 é apresentada a modelagem matemática do motor de indução trifásico utilizada no desenvolvimento desse trabalho.

No capítulo 3 são apresentados estudos sobre a evolução diferencial, seus métodos de utilização e a justificativa do uso desse método na realização desse trabalho.

No capítulo 4 é apresentada a metodologia utilizada envolvendo a evolução diferencial, tanto nos testes simulados como experimentais.

No capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos com a realização desse trabalho e a comparação com métodos existentes, para a validação do mesmo.

No capítulo 6 realizam-se as considerações finais relativas ao estimador de parâmetros utilizando o algoritmo evolutivo e as propostas de trabalhos futuros.

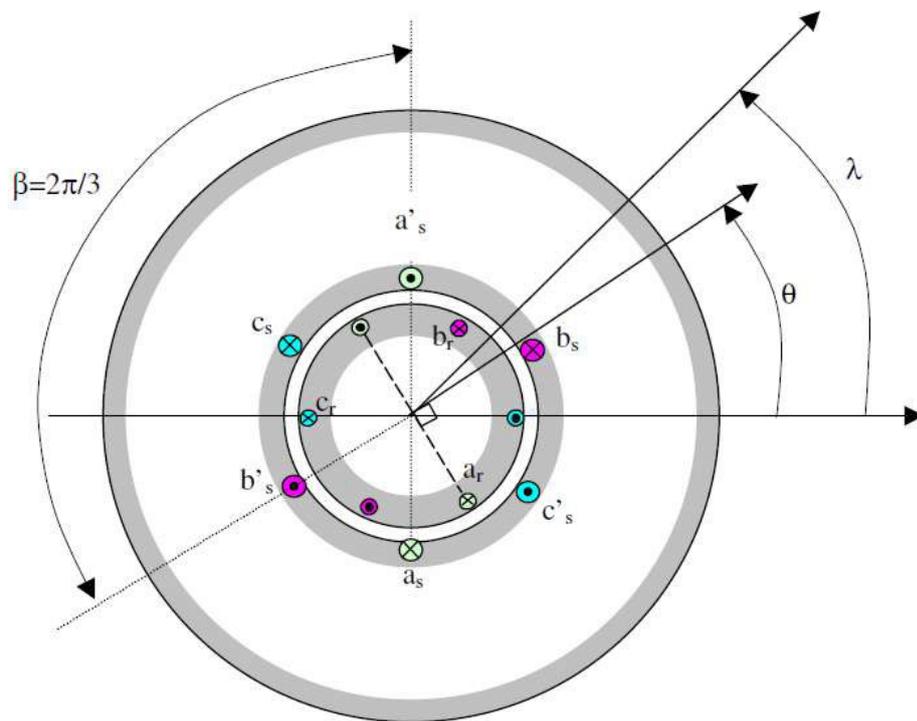
## 2 MODELAGEM DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

A modelagem do motor de indução trifásico consiste em um conjunto de equações que apresentam uma aproximação do sistema físico. Esse equacionamento permite que uma implementação computacional do sistema físico seja realizada. A construção de um modelo que simule todas as não-linearidades do MIT é um trabalho complexo. Por isso, a modelagem do mesmo é linearizada.

A seguir, será apresentado um método de modelagem através de sistemas dinâmicos de coeficientes complexos, também associados ao caso de modelagem vetorial, que proporciona uma “melhor visualização do comportamento dinâmico dos motores de corrente alternada em função do comportamento transitório de suas grandezas internas.” (AGUIAR, p.2, 2012).

A modelagem apresentada é a utilizada no desenvolvimento deste trabalho, junto ao DE, para estimar os parâmetros do MIT com rotor em gaiola. A dedução completa da modelagem do motor de indução pode ser encontrada nos estudos de KRAUSE (2002) e ONG (1997).

Para o desenvolvimento das equações diferenciais de modelagem de um MIT é necessário ter conhecimento da estrutura construtiva do motor de indução trifásico a ser estudado (CAD, 2000). Os motores mais utilizados são de rotor em gaiola, que consiste de um sistema de barras paralelas, tipicamente com inclinação de um passo, para reduzir a magnitude do conjugado harmônico das ondas da força magnetomotriz (FMM) e ruídos, e curto circuitadas em seus extremos. As características construtivas do motor podem ser observadas na Figura 1.



**Figura 1: Representação dos enrolamentos de um MIT.**  
 Fonte: Aguiar (2012, p. 3).

A Figura 1 apresenta a distribuição simétrica das três fases do rotor e estator do MIT. A defasagem entre cada uma das fases, tanto no rotor quanto no estator é de  $120^\circ$  elétricos, representada por  $\beta$ .

No que diz respeito às indutâncias e resistências do motor, por serem simétricas, são admitidas iguais entre si, sendo cada uma dessas uma grandeza por fase. A representação desses elementos dispostos no estator e rotor do MIT são apresentados na Figura 2, que apresenta os aspectos elétricos da máquina, onde  $\theta$  representa a defasagem entre a mesma fase no estator e no rotor e  $\lambda$  corresponde a defasagem entre o referencial do motor na modelagem trifásica e o referencial único adotado para simplificação das equações da modelagem, que será apresentado ainda nesse capítulo.

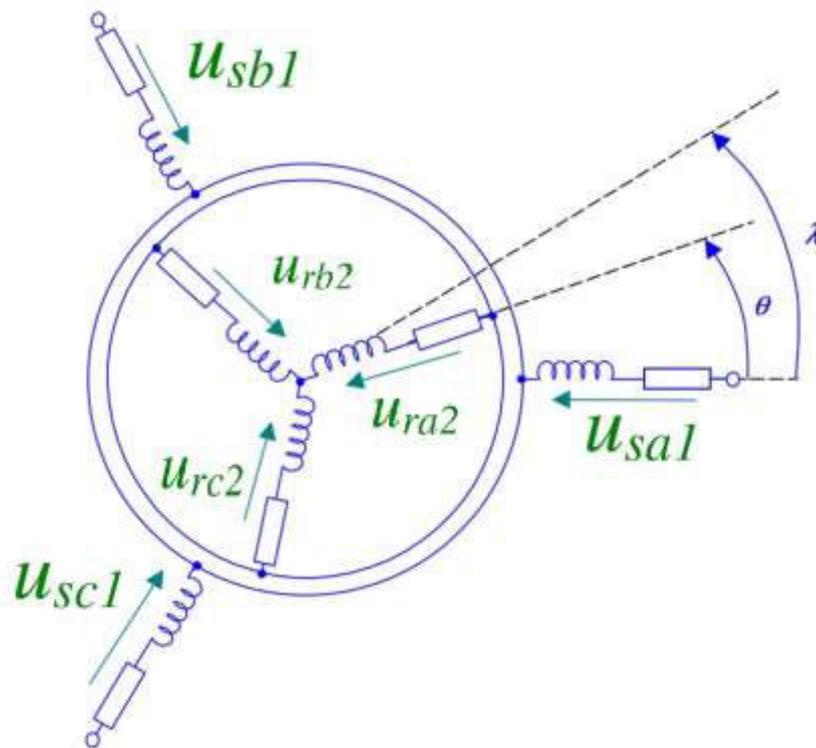


Figura 2: Esquemático das resistências e indutâncias do estator e rotor do motor de indução trifásico gaiola de esquilo. Fonte: AGUIAR (2012, p.5).

A modelagem dinâmica do motor de indução deve adotar um único referencial para o rotor e estator. O referencial único adotado normalmente é definido no próprio motor, e geralmente pode ser no estator, no rotor ou no campo do estator.

Para esse trabalho foi adotado o referencial fixo no estator. Sendo assim, a primeira consideração a se fazer é que o deslocamento angular será nulo, ou seja,

$$\omega_\lambda = 0 \quad (1)$$

O comportamento dinâmico global do motor de indução trifásico é obtido através das equações de tensão, fluxo concatenado, torque eletromagnético e movimento e posição angular. As equações das tensões e correntes no estator e rotor, respectivamente, são:

$$\underline{u}_1 = R_1 \dot{i}_1 + \frac{d}{dt} \underline{\Psi}_1 + \omega_\lambda \underline{K} \underline{\Psi}_1 \quad (2)$$

Onde,

$$\underline{K} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \text{ ou ainda}$$

$$K = \begin{bmatrix} -\sin(\lambda) & -\sin(\lambda + \beta) & -\sin(\lambda - \beta) \\ -\sin(\lambda - \beta) & -\sin(\lambda) & -\sin(\lambda + \beta) \\ -\sin(\lambda + \beta) & -\sin(\lambda - \beta) & -\sin(\lambda) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos(\lambda) & \cos(\lambda + \beta) & \cos(\lambda - \beta) \\ \cos(\lambda - \beta) & \cos(\lambda) & \cos(\lambda + \beta) \\ \cos(\lambda + \beta) & \cos(\lambda - \beta) & \cos(\lambda) \end{bmatrix}^{-1}$$

A tensão no rotor é calculada do mesmo modo que a tensão no estator. Assim,

$$\underline{u}_2 = R_2 \underline{i}_2 + \frac{d}{dt} \underline{\Psi}_2 + (\omega_\lambda - P\omega_{mec}) K \underline{\Psi}_2 \quad (3)$$

Na equação 3, o termo  $P\omega_{mec}$  representa o deslocamento do rotor em relação ao estator em um único referencial. No entanto, considerando-se que o motor utilizado na modelagem é o de rotor em gaiola, composto por barras paralelas curto-circuitadas através de anéis condutores, a tensão deste será nula. Então:

$$\underline{u}_2 = 0 \quad (4)$$

O significado de cada um dos termos apresentado nas equações de tensão é:

$\underline{u}_1, \underline{u}_2$  : tensão trifásica do estator e rotor, respectivamente;

$R_1, R_2$  : resistência do estator;

$\underline{i}_1, \underline{i}_2$  : corrente trifásica do estator;

$\underline{\Psi}_1, \underline{\Psi}_2$  : fluxo concatenado do estator;

$\omega_\lambda$  : deslocamento angular;

$\omega_{mec}$  : velocidade do rotor;

$P$  : número de pares de polos da máquina.

As equações de fluxo concatenado no estator e rotor, respectivamente, são mostradas a seguir:

$$\underline{\Psi}_1 = L_1 \underline{i}_1 + L_H \underline{i}_2 = L_H (\underline{i}_1 + \underline{i}_2) + L_{\sigma 1} \underline{i}_1 \quad (5)$$

onde,

$$L_1 = L_H + l_{\sigma 1}, \quad L_2 = L_H + l_{\sigma 2}$$

$$\underline{\Psi}_2 = L_H \underline{i}_1 + L_2 \underline{i}_2 = L_H (\underline{i}_1 + \underline{i}_2) + L_{\sigma 2} \underline{i}_2 \quad (6)$$

Para esse conjunto de equações, os significados de cada um dos termos que ainda não haviam sido apresentados são:

$L_1, L_2$  : indutância própria do estator e rotor, respectivamente.

$l_{\sigma 1}, l_{\sigma 2}$  : indutância de dispersão do estator e rotor, respectivamente.

$L_H$  : indutância de magnetização.

A equação do torque eletromagnético é dada por.

$$m_d = -P \underline{\Psi}_1^T \underline{K} i_1 \quad (7)$$

onde  $m_d$  é o torque elétrico do MIT.

Por fim, as equações de movimento e posição angular são representadas por:

$$J \frac{d}{dt} \omega_{mec} = m_d - K_D \omega_{mec} - m_l \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt} \theta_{mec} = \frac{d}{dt} \omega = \omega_{mec} \quad (9)$$

onde os coeficientes são:

$J$  : momento de inércia;

$K_D$  : coeficiente de atrito;

$m_l$  : torque de carga.

Considerando que o motor está operando a uma velocidade constante e a vazio, a equação o torque eletromagnético pode ser representado por:

$$m_d = K_D \omega_{mec} \quad (10)$$

A notação “ $\underline{\quad}$ ” representa uma notação matricial, que significa que o mesmo é um vetor coluna contendo as três fases da grandeza apresentada. Na forma matricial, (2.1) é definida como sendo:

$$\begin{bmatrix} u_{1a} \\ u_{1b} \\ u_{1c} \end{bmatrix} = R_1 \begin{bmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \\ i_{1c} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \left( L_1 \begin{bmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \\ i_{1c} \end{bmatrix} + L_H \begin{bmatrix} i_{2a} \\ i_{2b} \\ i_{2c} \end{bmatrix} \right) + \frac{\omega_\lambda}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \left( L_1 \begin{bmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \\ i_{1c} \end{bmatrix} + L_H \begin{bmatrix} i_{2a} \\ i_{2b} \\ i_{2c} \end{bmatrix} \right) \quad (11)$$

A partir de (6), pode ser obtido a primeira derivada das correntes do estator e rotor (7), que será utilizada para a implementação da modelagem do motor de indução trifásico no MATLAB®.

$$\begin{cases}
\dot{i}_{1a} = \frac{-R_1}{L_1} i_{1a} + \frac{\omega_\lambda}{\sqrt{3}} i_{1b} - \frac{\omega_\lambda}{\sqrt{3}} i_{1c} + \frac{\omega_\lambda L_H}{\sqrt{3} L_1} i_{2b} - \frac{\omega_\lambda L_H}{\sqrt{3} L_1} i_{2c} - \frac{L_H}{L_1} \dot{i}_{2a} + \frac{1}{L_1} u_{1a} \\
\dot{i}_{1b} = \frac{-R_1}{L_1} i_{1b} - \frac{\omega_\lambda}{\sqrt{3}} i_{1a} + \frac{\omega_\lambda}{\sqrt{3}} i_{1c} - \frac{\omega_\lambda L_H}{\sqrt{3} L_1} i_{2a} + \frac{\omega_\lambda L_H}{\sqrt{3} L_1} i_{2c} - \frac{L_H}{L_1} \dot{i}_{2b} + \frac{1}{L_1} u_{1b} \\
\dot{i}_{1c} = \frac{-R_1}{L_1} i_{1c} + \frac{\omega_\lambda}{\sqrt{3}} i_{1a} - \frac{\omega_\lambda}{\sqrt{3}} i_{1b} + \frac{\omega_\lambda L_H}{\sqrt{3} L_1} i_{2a} - \frac{\omega_\lambda L_H}{\sqrt{3} L_1} i_{2b} - \frac{L_H}{L_1} \dot{i}_{2c} + \frac{1}{L_1} u_{1c} \\
\dot{i}_{2a} = \frac{-R_2}{L_2} i_{2a} + \frac{\omega_2}{\sqrt{3}} i_{2b} - \frac{\omega_\lambda}{\sqrt{3}} i_{2c} + \frac{\omega_\lambda L_H}{\sqrt{3} L_1} i_{1b} - \frac{\omega_\lambda L_H}{\sqrt{3} L_1} i_{1c} - \frac{L_H}{L_1} \dot{i}_{1a} \\
\dot{i}_{2b} = \frac{-R_2}{L_2} i_{2b} - \frac{\omega_2}{\sqrt{3}} i_{2a} + \frac{\omega_\lambda}{\sqrt{3}} i_{2c} - \frac{\omega_\lambda L_H}{\sqrt{3} L_1} i_{1a} + \frac{\omega_\lambda L_H}{\sqrt{3} L_1} i_{1c} - \frac{L_H}{L_1} \dot{i}_{1b} \\
\dot{i}_{2c} = \frac{-R_2}{L_2} i_{2c} + \frac{\omega_2}{\sqrt{3}} i_{2a} - \frac{\omega_\lambda}{\sqrt{3}} i_{2b} + \frac{\omega_\lambda L_H}{\sqrt{3} L_1} i_{1a} - \frac{\omega_\lambda L_H}{\sqrt{3} L_1} i_{1b} - \frac{L_H}{L_1} \dot{i}_{1c}
\end{cases} \quad (12)$$

Sendo,  $\omega_2 = \omega_\lambda - P\omega_{mec}$ .

Analisando-se as equações é possível observar que todas as correntes possuem dois termos de derivadas que não podem ser isolados. Por exemplo, a primeira derivada da corrente  $\dot{i}_{1a}$  possui a primeira derivada da corrente  $\dot{i}_{2a}$ . No entanto, a primeira derivada da corrente  $\dot{i}_{2a}$ , também contém a primeira derivada da corrente  $\dot{i}_{1a}$ . Nesse caso, para determinação da primeira derivada de  $\dot{i}_{1a}$ , deve ser feita a substituição do termo  $\dot{i}_{2a}$  pela sua equação, para que assim seja possível isolar a derivada e obter a equação final da mesma com os termos conhecidos.

Pelo fato desse trabalho adotar o referencial único como sendo o do estator, o deslocamento angular é nulo, de forma que as equações (3), (11) e (12) podem ser simplificadas e reescritas em (13), (14) e (15) respectivamente.

$$\underline{u}_1 = R \underline{i}_1 + \frac{d}{dt} \underline{\Psi}_1 = \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} u_{1a} \\ u_{1b} \\ u_{1c} \end{bmatrix} = R_1 \begin{bmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \\ i_{1c} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \left( L_1 \begin{bmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \\ i_{1c} \end{bmatrix} + L_H \begin{bmatrix} i_{2a} \\ i_{2b} \\ i_{2c} \end{bmatrix} \right) \quad (14)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{i}_{1a} = \frac{-R_1}{L_1} i_{1a} - \frac{L_H}{L_1} \dot{i}_{2a} + \frac{1}{L_1} u_{1a} \\ \dot{i}_{1b} = \frac{-R_1}{L_1} i_{1b} - \frac{L_H}{L_1} \dot{i}_{2b} + \frac{1}{L_1} u_{1b} \\ \dot{i}_{1c} = \frac{-R_1}{L_1} i_{1c} - \frac{L_H}{L_1} \dot{i}_{2c} + \frac{1}{L_1} u_{1c} \\ \dot{i}_{2a} = \frac{-R_2}{L_2} i_{2a} + \frac{\omega_2}{\sqrt{3}} i_{2b} - \frac{L_H}{L_1} \dot{i}_{1a} \\ \dot{i}_{2b} = \frac{-R_2}{L_2} i_{2b} - \frac{\omega_2}{\sqrt{3}} i_{2a} - \frac{L_H}{L_1} \dot{i}_{1b} \\ \dot{i}_{2c} = \frac{-R_2}{L_2} i_{2c} + \frac{\omega_2}{\sqrt{3}} i_{2a} - \frac{L_H}{L_1} \dot{i}_{1c} \end{array} \right. \quad (15)$$

Depois de obtidas as derivadas das correntes de estator e rotor, e utilizando-se também a equação de movimento rotacional é possível gerar a notação em espaço de estados do MIT, que será aplicada no MATLAB<sup>®</sup> para cálculo dos parâmetros a serem estimados do motor, apresentada pelo conjunto de equações em (11).

$$\dot{\underline{x}} = \underline{A}\underline{x} + \underline{u} \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \\ \dot{x}_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & -b & c & d & -d & 0 \\ -b & a & b & -d & c & d & 0 \\ b & -b & a & d & -d & c & 0 \\ e & f & -f & g & h & -h & 0 \\ -f & e & f & -h & g & h & 0 \\ f & -f & e & h & -h & g & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n.u_{1a} \\ n.u_{1b} \\ n.u_{1c} \\ p.u_{1a} \\ p.u_{1b} \\ p.u_{1c} \\ q.md \end{bmatrix}$$

Sendo os coeficientes da matriz  $A$  definidos por:

$a = \frac{-R_1}{\sigma L_1}$	$b = \frac{1}{\sigma\sqrt{3}}(-\omega_2(1-\sigma))$	$c = \frac{R_2(1-\sigma)}{\sigma L_H}$
$d = \frac{L_H}{\sigma\sqrt{3}L_1}(-\omega_2)$	$e = \frac{R_1(1-\sigma)}{\sigma L_H}$	$f = \frac{L_H}{\sigma\sqrt{3}L_2}\omega_2$
$g = \frac{-R_2}{\sigma L_2}$	$h = \frac{1}{\sigma\sqrt{3}}(\omega_2(1-\sigma))$	$m = \frac{-K_D}{J}$
$n = \frac{1}{\sigma L_1}$	$p = \frac{-L_H}{\sigma L_1 L_2}$	$q = \frac{1}{J}$
$\sigma = 1 - \frac{L_H^2}{L_1 L_2}$		

**Quadro 1: Coeficientes da matriz de espaço de estados.**

O vetor de estado  $x$  apresentado em (11) é composto pelas correntes de fase do estator e rotor e pela velocidade angular do motor, logo:

$$[x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7]^T = [i_{1a} \ i_{1b} \ i_{1c} \ i_{2a} \ i_{2b} \ i_{2c} \ \omega_{mec}]^T \quad (12)$$

Assim, uma nova forma de se calcular o torque elétrico do motor a partir das correntes de estator e rotor é apresentado em (13).

$$\begin{aligned} md &= \frac{PL_H}{\sqrt{3}}(i_{2a}(i_{1c} - i_{1b}) + i_{2b}(i_{1a} - i_{1c}) + i_{2c}(i_{1b} - i_{1a})) = \\ &= \frac{PL_H}{\sqrt{3}}(x_4(x_3 - x_2) + x_5(x_1 - x_3) + x_6(x_2 - x_1)) \end{aligned} \quad (13)$$

Após a realização da modelagem do motor de indução trifásico em equações de espaço de estados, essas equações são utilizadas para fazer uma simulação com o *software* MATLAB<sup>®</sup>, utilizando-se o algoritmo de integração numérica de Runge-Kutta, ODE45, que determinará a solução de todos os estados em cada ponto definido no vetor de tempo.

Para cada conjunto de parâmetros, são obtidos diferentes comportamentos das grandezas, ou seja, suas curvas (de corrente e velocidade, por exemplo) dependem diretamente dos parâmetros que se deseja estimar.

Por esse motivo, essa modelagem permite que os parâmetros do MIT sejam estimados, quando combinado com os algoritmos evolucionários, e apresente resultados satisfatórios.

O próximo capítulo explica o que são algoritmos evolutivos, bem como seu funcionamento e aplicação. O algoritmo desenvolvido para esse trabalho é classificado como evolução diferencial, uma das classificações dos algoritmos evolutivos.

### **3 EVOLUÇÃO DIFERENCIAL**

Os métodos heurísticos foram criados para determinar soluções aproximadas de problemas complexos de otimização combinatória. Estes consistem em um processo iterativo, que produzem soluções de alta qualidade. Diferente dos algoritmos exatos, que apresentam a solução ótima para o problema, estes métodos oferecem soluções factíveis para problemas complexos e de grande porte, a um baixo custo computacional.

Dentro dos métodos heurísticos, existem as metaheurísticas que podem ser definidas como métodos gerais para resolução de problemas, ou seja, são independentes de problemas específicos. Portanto, uma metaheurística pode ser utilizada na resolução de diversas classes de problemas, devendo apenas ser refinada para atender as necessidades do problema em questão (COSTA, 2011).

As metaheurísticas de melhoria ou refinamento são técnicas de busca local que iniciam como uma solução factível (gerada por um método heurístico ou aleatório) e melhoram com intercalações ou trocas de vizinhanças (COSTA, 2011). Além da busca local, existe também a busca populacional, onde um conjunto de soluções factíveis pode ser re combinado para produzir soluções ainda melhores.

Este capítulo introduz a definição de algoritmos evolutivos (AEs), com ênfase para os algoritmos Evolutivos Diferenciais (DE), uma vez que a proposta desse trabalho é a utilização do DE para a estimação dos parâmetros do circuito elétrico equivalente – resistências de rotor e estator, indutâncias de dispersão de rotor e estator e indutância de magnetização –, momento de inércia e coeficiente de atrito do MIT.

### 3.1 ALGORITMOS EVOLUTIVOS

Os algoritmos evolutivos são métodos baseados na Teoria da Evolução e Genética e podem ser modelados com poucas linhas de código. Por esse motivo, estes são definidos como métodos simples, capazes de encontrar soluções adequadas para problemas complexos, além de se adaptar a problemas de diversas áreas (GABRIEL; DELBEM, 2008).

A finalidade de se utilizar um método computacional heurístico é encontrar, preferencialmente, a melhor solução para um problema proposto. Ou seja, dado uma função objetivo (FO), deseja-se maximizar ou minimizar o seu resultado.

A maioria dos AEs podem ser classificados em três classes: algoritmos genéticos, estratégias evolutivas e programação evolutiva. De uma maneira geral, o princípio de funcionamento dessas três classes é baseado nos mecanismos de seleção natural e genética. Eles combinam a sobrevivência entre os melhores com uma forma estruturada de troca de informação genética entre dois indivíduos para formar uma estrutura heurística de busca (LINDEN, 2008). De uma maneira geral, o funcionamento básico do algoritmo evolutivo pode ser descrito de acordo com o algoritmo 1.

<b>Algoritmo 1:</b> Pseudocódigo de um AE típico
<p><b>Entrada:</b> Parâmetros típicos (De Jong, 2006).</p> <p><b>Saída:</b> População final de soluções</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1 <i>INICIALIZA</i> população com soluções candidatas aleatórias</li> <li>2 <i>AVALIA</i> cada solução candidata</li> <li>3 repita</li> <li>4     <i>SELECIONA</i> pais</li> <li>5     <i>RECOMBINA</i> pares de pais</li> <li>6     <i>MUTA</i> os descendentes resultantes</li> <li>7     <i>AVALIA</i> novas soluções candidatas</li> <li>8     <i>SELECIONA</i> indivíduos para a nova geração</li> <li>9 até <i>CONDIÇÃO DE PARADA</i> <i>satisfeita</i>.</li> </ol>

Para o melhor entendimento dos algoritmos evolutivos é necessário ter conhecimento de alguns termos utilizados. Os indivíduos que constituem uma

população são denominados cromossomos, na prática computacional, normalmente um vetor. Um cromossomo é composto por um conjunto de genes (elementos do vetor), onde cada valor do gene é chamado alelo e cada posição deste, *locus*. O conjunto desses cromossomos – a população – é o genótipo, sendo suas características o fenótipo. Cada indivíduo possui um *fitness*, que é um valor correspondente ao quão adequada a solução é para o problema proposto (PACHECO, 1999).

Durante o processo de construção do algoritmo surgem também os pais, descendentes e os operadores de reprodução. Os pais são cromossomos que se combinam para gerar novos cromossomos, os descendentes. Esse processo de recombinação é um tipo de operador de reprodução, sendo o outro operador a mutação. O Quadro 2 sintetiza a analogia com sistema natural.

<b>Natureza</b>	<b>Algoritmos Evolutivos</b>
Cromossomo	Palavra binária, vetor, etc
Gene	Característica do problema
Alelo	Valor da característica
Loco	Posição da palavra, vetor
Genótipo	Estrutura
Fenótipo	Estrutura submetida ao problema
Geração	Ciclo

**Quadro 2: Analogia entre um algoritmo evolutivo e o sistema natural.**

**Fonte: Pacheco (1999, p.2)**

### 3.1.1 Evolução Diferencial

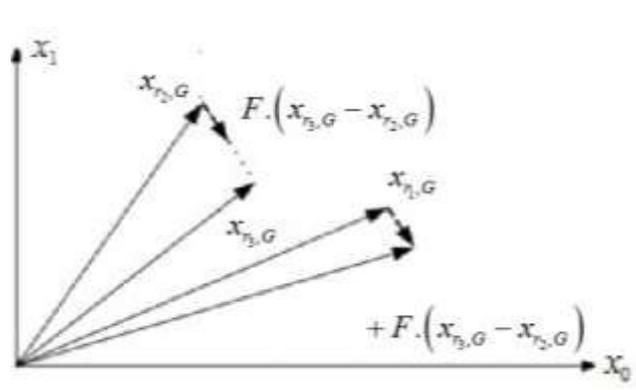
O algoritmo DE foi desenvolvido por Storn e Price em 1995 e encontra-se dentro dos algoritmos evolutivos. No entanto, possui uma abordagem um pouco diferente dos algoritmos genético, mas com o mesmo objetivo – a busca por melhores resultados para a resolução de um problema (Oliveira, 2006).

A diferença entre o DE e o algoritmo genético (AG) está na forma como ocorre o cruzamento e a mutação. Algumas das características do DE para otimização numérica são (SANCHES, 2013 *apud* CHENG, 2001):

- Busca estocástica, proveniente da seleção natural;
- Dificilmente fica preso em ótimos locais, visto que a busca a solução ótima global manipulando uma população de soluções, ou seja, busca soluções simultâneas delimitadas pelo espaço de busca;
- Permite a manipulação de entrada e saída com números ordinários reais, o que faz com que os recursos do computador sejam utilizados de forma mais eficiente;
- É eficaz trabalhando com populações pequenas;
- Devido ao seu método de cruzamento e mutação, os resultados são obtidos em tempo menor que nos AGs.

O princípio de funcionamento do DE pode ser dividido em quatro etapas. Na primeira etapa, cria-se a população inicial, que corresponde ao primeiro conjunto de soluções obtido através dos primeiros indivíduos selecionados aleatoriamente. Estes resultados aleatórios são aplicados na FO para saber qual possui o melhor *fitness*.

A segunda etapa consiste na criação de uma nova população, denominada população mutada. A mutação ocorre a partir da seleção aleatória de três indivíduos da população inicial, onde é realizada a diferença vetorial entre o segundo e o terceiro indivíduo e então, um fator de ponderação é aplicado a essa diferença. Na sequência, esse resultado é somado ao primeiro indivíduo, gerando o primeiro indivíduo da população mutada, conforme apresentado na Figura 3. Ou seja, a nova solução mutante é proveniente de uma perturbação de um vetor diferencial construído aleatoriamente – que envolve dois indivíduos – aplicados a um terceiro indivíduo (GUIMARÃES, 2009).



**Figura 3: Processo para geração de um vetor mutado.**  
 Fonte: Sanches (2013).

Matematicamente, o processo de mutação pode ser representado pela equação 14, a seguir:

$$v_{i,G+1} = x_{r_1,G} + F \cdot (x_{r_3,G} - x_{r_2,G}) \quad (14)$$

Onde  $v_{i,G+1}$  corresponde ao elemento  $i$  da população mutada,  $G+1$ ;  $x_{r_1,G}$ ,  $x_{r_2,G}$  e  $x_{r_3,G}$  são os três indivíduos selecionados aleatoriamente da primeira população,  $G$ ; e  $F$  o fator de ponderação aplicado à diferença entre os vetores. O fator de ponderação é um valor entre 0 e 1 e corresponde ao tamanho do passo a ser dado na direção dessa diferença.

A terceira etapa é o *crossover*, que é a combinação entre os indivíduos da população inicial, agora denominado *target vector*, e os indivíduos da população mutada. O cruzamento ocorre conforme mostrado na equação 15.

$$u_{i,G+1} = \begin{cases} v_{i,G+1}, & \text{se } rand_i \leq C_r \\ x_{i,G}, & \text{se } rand_i > C_r, i = 1, \dots, n \end{cases} \quad (15)$$

Onde  $u_{i,G+1}$  corresponde ao elemento  $i$  da população cruzada,  $G+1$ ;  $x_{i,G}$  representa o elemento  $i$  da população  $G$ , denominado *target vector*,  $rand_i$  é um número aleatório entre 0 e 1 atribuído ao elemento  $i$  do *target vector* e da população mutada; e  $C_r$  é um número entre 0 e 1 que indica a probabilidade de cruzamento de um indivíduo.

Devido ao fato de  $rand_i$  ser um número aleatório, cada elemento possui um índice diferente, tanto no *target vector* quanto na população mutada. Assim, se esse fator for menor que do  $C_r$ , será selecionado o elemento da população mutada, e se for maior, será selecionado o elemento do *target vector*.

Por fim, a quarta e última etapa é a geração da nova população. Após a terceira etapa, recalcula-se o *fitness* de todos os indivíduos da população mutada e cruzada faz-se uma comparação entre os indivíduos  $i$  de cada uma das populações. O melhor indivíduo entre os dois ocupará a posição  $i$  na população da nova geração. O processo se repete até que a condição estabelecida para a parada seja atingida.

Os DEs são bastante aplicados na área da engenharia. Rampazzo (2012) utilizou AGs e DEs para a resolução de um problema de planejamento hidrelétrico em subsistemas brasileiros. Nesse trabalho foi utilizada como função objetivo a minimização da complementação térmica, e a vazão turbinada pelas usinas como

período de medição. O resultado encontrado foi satisfatório, uma vez que ambos apresentaram mais de uma solução ótima, o que permite criar mais de uma estratégia para administrar esse problema. No entanto, o DE apresentou resultados melhores e mais rápidos, podendo ser considerado uma versão melhorada dos AGs (RAMPAZZO, 2012 *apud* PRICE et al., 2005).

Coelho e Mariana (2006) propõe uma metodologia híbrida para resolução do problema de despacho econômico de energia elétrica com o efeito do ponto de válvula, integrando o DE com uma técnica de programação quadrática sequencial. Nesse trabalho, o algoritmo evolutivo diferencial foi utilizado como otimizador global e a outra técnica como otimizador local, validadas para três sistemas de geradoras térmicas. Os resultados apresentados foram mais eficientes se comparado a utilização dessas técnicas de forma separada.

Sanches (2013) aplicou a evolução diferencial para reconfiguração de sistemas de redes de distribuição, que podem ser aplicadas no tratamento de redução de perdas ôhmicas para sistemas de pequeno a grande porte. Além disso, os DEs também foram utilizados para problemas de reestabelecimento de energia com falta única e múltiplas faltas. Todos os resultados obtidos satisfatórios, de acordo com o autor.

Maiagoli et al. (2014) propõe a utilização do algoritmo de evolução diferencial para aplicação na construção do estator do motor de indução trifásico, utilizando como dados de entrada os aspectos construtivos do motor, a fim de calcular o melhor e menor volume para o projeto do estator do MIT. Os resultados indicam que esta é uma interessante alternativa para auxiliar na construção a mínimo volume do estator da máquina.

A utilização da evolução diferencial para estimação de parâmetros de motor já é uma realidade. Marcic et al. (2014) faz o uso da evolução diferencial para estimação de parâmetros elétricos, magnéticos e mecânicos do motor de corrente contínua com ímã permanente. Para isso, o mesmo utiliza como entrada os sinais de tensão corrente e velocidade da máquina, com os parâmetros estimados testados em um modelo dinâmico.

Como apresentado nesse capítulo, por ser um método simples e adaptável que produz soluções computacionais eficientes e em tempo satisfatório, optou-se pela utilização do algoritmo evolutivo diferencial para a estimação dos parâmetros do motor de indução trifásico.

O capítulo a seguir apresenta a metodologia desenvolvida nesse trabalho, explicando detalhadamente o uso do DE aplicado ao problema de estimação de parâmetros do motor de indução trifásico.

## 4 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia desenvolvida nesse trabalho para a estimação dos parâmetros do motor de indução trifásico. Os parâmetros a serem estimados no MIT são: resistências de estator e rotor ( $R_1$  e  $R_2$ , respectivamente), indutâncias de dispersão do estator e rotor ( $l_{\sigma 1}$  e  $l_{\sigma 2}$ , respectivamente), indutância de magnetização ( $L_H$ ), momento de inércia ( $J$ ) e coeficiente de atrito ( $K_D$ ). Para isso, será utilizada a modelagem dinâmica do MIT, que apresenta um conjunto de equações de espaço de estados, conforme apresentado no capítulo 2 desse trabalho, combinado ao algoritmo evolucionário para estimação desses coeficientes. O algoritmo desenvolvido é um aproximador de funções, ou seja, após inserir os dados de entrada (corrente e velocidade), adquiridos através de ensaios com o motor, e obter as curvas destes dados, o algoritmo irá estimar quais os valores dos parâmetros, citados acima, que faz com que essas curvas de entrada sejam geradas.

A função objetivo (FO) do DE apresentado é uma função de minimização do erro entre a curva de entrada e a curva estimada, ou seja, o *fitness* do DE. O cálculo da FO é realizado através do método dos mínimos quadrados. A curva estimada é gerada através da aplicação dos parâmetros estimados na modelagem do MIT. O número de pontos influencia no tempo de cada iteração, pois quanto maior o número de pontos mais precisa e demorada será cada iteração. Assim, o número de pontos deste trabalho foi determinado de modo a obter um resultado preciso e uniforme, porém no menor tempo possível. O funcionamento do *fitness* e da função objetivo pode ser observado no algoritmo 2.

**Algoritmo 2:** Pseudocódigo do cálculo do *fitness***Entrada:** Corrente da fase A ou velocidade da máquina e corrente da fase A.**Saída:** Curva estimada.

1 AVALIA cada solução candidata

*Aplica* cromossomo candidato na modelagem do motor    *Armazena* Corrente da fase A ou velocidade da máquina e corrente da fase A.

2 COMPARA curva calculada com curva de entrada

*Calcula fitness*

$$fit = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{(x_{ie} - x_{ic}) * (x_{ie} - x_{ic})'}{n}$$

*Armazena* resultado

Até todos cromossomos serem testados

Para a aplicação do DE algumas constantes ainda devem ser estabelecidas. Estas constantes são: fator de ponderação da mutação ( $F$ ) e taxa de cruzamento ( $Cr$ ).

Conforme apresentado no capítulo 3, o fator de ponderação  $F$  é aplicado sobre a diferença vetorial ponderada de dois vetores e, então, esse resultado é somado a um terceiro vetor. O valor de  $F$  está compreendido entre 0 e 1, e quanto mais próximo de 1 for  $F$ , maior será a mutação que ocorrerá no indivíduo, o que auxilia para que estes resultados não fiquem presos a mínimos locais. No entanto, quando deseja-se fazer uma busca mais refinada em um pequeno espaço de busca, esse fator deve ser diminuído de modo a garantir que a mutação não seja tão significativa. Para este trabalho foram utilizados dois fatores de ponderação,  $F_1=0,8$  e  $F_2=0,2$ . O fator  $F_1=0,8$  foi aplicado até que o *fitness* atingisse 3 vezes o valor do *fitness* desejado e então, houve a troca de  $F_1$  por  $F_2$ . O algoritmo 3 apresenta o funcionamento da mutação.

**Algoritmo 3:** Pseudocódigo da mutação do DE.

1	<i>DECLARA</i> $F$ ;
2	<i>SELECIONA</i> três indivíduos aleatórios que irão participar da mutação
3	<i>DETERMINA</i> diferença vetorial entre o segundo e terceiro indivíduo
4	<i>APLICA</i> fator de ponderação sobre a diferença vetorial
5	<i>SOMA</i> vetor ponderado ao primeiro vetor
6	<i>AVALIA</i> <i>fitness</i> de cada indivíduo
7	<i>SE</i> $fitness = 3 * fitness\_desejado$ Troca $F$ para o valor menor

Na sequência da mutação, realiza-se o cruzamento, uma combinação entre a população mutada e a população inicial, agora denominada *target vector*. Conforme apresentado no capítulo 3 deste trabalho, o cruzamento, ou *crossover*, ocorre de acordo com o  $rand_i$  e o  $C_r$ . O  $rand_i$  é um vetor randômico com sete elementos entre 0 e 1, uma vez que o DE proposto realiza a estimação de sete parâmetros. Já o  $C_r$  é a taxa de cruzamento que determina a probabilidade de cruzamento de um indivíduo e também é um valor entre 0 e 1. No algoritmo proposto, a taxa de cruzamento foi  $C_r = 0,5$ , para garantir que a probabilidade de escolha do *target vector* e do vetor mutado seja a mesma.

O *crossover* ocorre analisando-se cada gene do cromossomo, ou seja, para cada posição do cromossomo é atribuído um valor aleatório entre 0 e 1. Se o valor for menor do que 0,5, seleciona o gene do *target vector*, se não, o da população mutada, formando assim o *trial vector*. O algoritmo 4 sintetiza o funcionamento do *crossover*.

**Algoritmo 4:** Pseudocódigo do *crossover* do DE.

1	<i>DECLARA</i> $C_r$ ;
2	<i>GERA</i> valor aleatório ( <i>rand</i> ) entre 0 e 1 para cada gene
3	<i>target vector</i> $\leftarrow$ população inicial
4	<i>SELECIONA</i> primeiro cromossomo do <i>target vector</i> e da população mutada
5	<i>DETERMINA</i> cromossomo da população cruzada
	<i>SE</i> $rand \leq 0.5$
	<i>Gene</i> $\leftarrow$ gene mutado
	<i>SE</i> $rand > 0.5$
	<i>Gene</i> $\leftarrow$ gene do <i>target vector</i>
	<i>Até</i> todos os genes do cromossomo serem preenchidos
<i>Até</i>	todos os cromossomos da população serem criados

Após realizado o cruzamento, calcula-se o *fitness* da população cruzada para que seja possível a criação da nova população. A seleção da nova população é feita comparando-se o *fitness* de cada cromossomo, na mesma posição, do *target vector* e da população cruzada. Então, a nova população passa a ser a população inicial da próxima geração. A implementação resumida do DE aplicado a esse trabalho pode ser entendida de acordo com o algoritmo 5.

**Algoritmo 5:** Pseudocódigo do DE para estimação dos parâmetros do MIT.

**Entrada:** Velocidade da máquina e/ou corrente da fase A.

**Saída:** Parâmetros do MIT.

1 *INICIALIZA* declaração das variáveis

- Intervalo que as variáveis se encontram;
- Número de amostras da população,  $N$ ;
- Fatores de ponderação da mutação,  $F_1$  e  $F_2$ ;
- Taxa de cruzamento,  $C_r$  ;

2 *GERA* primeira população aleatória

primeira população = [R1, L11, R2, L22, JJ, KD, LH];

3 **while**  $fitness > fitness\_desejado$  **do**

4 **for**  $i \leftarrow 1, 2, \dots, N$  **do**                   % *Analisa o fitness da primeira população*  
 curva  $\leftarrow$  parâmetros da população inicial aplicados a modelagem;

$$fit = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{(x_{ie} - x_{ic}) * (x_{ie} - x_{ic})'}{n}$$

**end for**

5 **for**  $i \leftarrow 1, 2, \dots, N$  **do**                   % *Determinando a população mutada*

seleciona 3 cromossomos aleatórios

w  $\leftarrow$  cromossomo 1

y  $\leftarrow$  cromossomo 2

z  $\leftarrow$  cromossomo 3

cromossomo mutado  $\leftarrow w + F^*(z-y)$

**end for**

6 target vector  $\leftarrow$  população inicial; %cria a população de target vector

7 **for**  $i \leftarrow 1, 2, \dots, N$  **do**                   % *Determinando a população cruzada*

rand  $\leftarrow$  vetor randômico com o número de genes

**for**  $i \leftarrow 1, 2, \dots, N$  **do**

**if** rand  $\leq 0.5$

gene(i)  $\leftarrow$  gene(i) mutado

**if** rand  $> 0.5$

gene(i)  $\leftarrow$  gene(i) target vector

**end if**

**end for**

**end for**

8 **for**  $i \leftarrow 1, 2, \dots, N$  **do**                   % *Calculando o fitness e selecionando a nova população*

curva  $\leftarrow$  parâmetros da população cruzada aplicados a modelagem;

calcula fit

**end for**

```

9 for  $i \leftarrow 1, 2, \dots, N$  do
    compara fitness do cromossomo(i) entre target vector e população cruzada
    cromossomo (i) nova população  $\leftarrow$  cromossomo (i) com melhor fitness
end for

10 população inicial  $\leftarrow$  nova população
end while

```

O algoritmo desenvolvido foi implementado utilizando como dados de entrada as curvas de velocidade e corrente de três motores de indução trifásicos. O primeiro motor, de 5HP, e o segundo, de 200HP, foram simulados no MATLAB/*Simulink*<sup>®</sup>, enquanto que o terceiro motor, de 1CV, foi utilizado para realizar o teste experimental, sendo que as curvas de corrente e velocidade foram obtidas através de ensaios no Laboratório de Sistemas Inteligentes (LSI), do Centro Integrado de Pesquisa em Controle e Automação (CIPECA), da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Cornélio Procópio (UTFPR-CP).

Para validação do DE foram realizados testes utilizando-se como dados de entrada as curvas de velocidade e corrente da fase A no MIT, somente para os testes experimentais, e também testes utilizando somente a curva de corrente da fase A, aplicado aos testes simulados e experimentais. O objetivo de realizar a simulação com e sem a curva de velocidade é analisar a diferença entre os resultados para verificar se há necessidade de adicionar a curva de velocidade, além da curva de corrente, na estimação de parâmetros, uma vez que a aquisição da curva de velocidade é um processo mais caro do que a aquisição somente da curva de corrente, visto que são necessários sensores e equipamentos de alto custo.

Além desses testes, para efeito de comparação, foi realizado o ensaio a vazio e com rotor bloqueado para determinação dos parâmetros do MIT de 1CV, do LSI (SILVA, 2014). O procedimento para ensaio a vazio e rotor bloqueado pode ser encontrado em FITZGERALD (2006) e CHAPMAN (2013).

O próximo capítulo irá apresentar os resultados obtidos com todos os testes e a discussão destes.

## 5 RESULTADOS OBTIDOS

Este capítulo apresenta os resultados desenvolvidos durante esse trabalho. Para sua consolidação, serão apresentados 4 análises distintas, sendo duas experimentais e duas simuladas. Todas as análises foram simuladas utilizando-se 2000 pontos para cada curva, pois foi um número que apresentou uma resolução gráfica satisfatória para o teste experimental, no motor de 1 CV, do laboratório LSI.

### 5.1 RESULTADOS SIMULADOS

Para os resultados simulados, utilizou-se o motor de 5 HP e de 200 HP da biblioteca *SimPowerSystems* do software *Simulink*<sup>®</sup>, conforme apresentado na Figura 4.

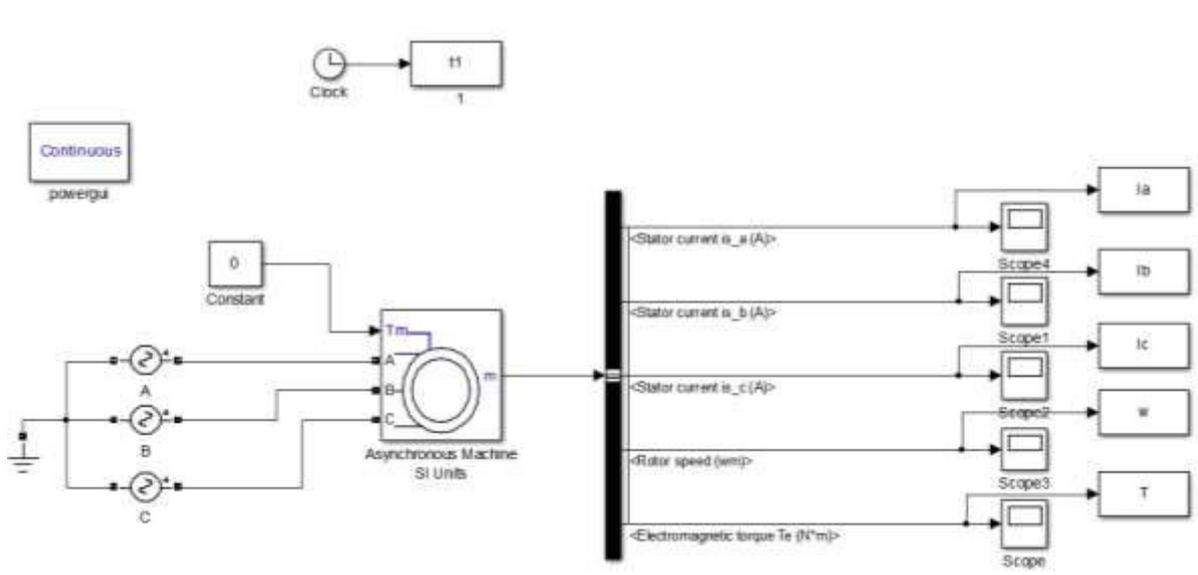


Figura 4: Modelo de MIT utilizado para simulação dos motores de 5 HP e 200 HP.  
Fonte: *Simulink*

### 5.1.1 Motor de 5HP

A primeira análise foi realizada com dados simulados no motor de 5HP, utilizando como entrada somente a curva da corrente da fase A. A tabela 1 apresenta os valores dos parâmetros do MIT obtidos através do *Simulink* e estimados através do DE, além do percentual o espaço de busca utilizado, baseado nos valores do *Simulink*.

TABELA 1: Parâmetros obtidos do MIT de 5 HP através da utilização do DE.

Curva de entrada: corrente da fase A							
Dados do motor: 5HP, 460V, 60Hz, ligação em Y (fonte: MATLAB/ <i>Simulink</i> <sup>®</sup> )							
Parâmetros estimados do MIT através do DE							
	$R_1$ ( $\Omega$ )	$l_{\sigma 1}$ (H)	$R_2$ ( $\Omega$ )	$l_{\sigma 2}$ (H)	$J$ (kg.m <sup>2</sup> )	$K_D$ (N.m.s)	$L_H$ (H)
Dados do <i>Simulink</i>	1,1150	0,00597	1,083	0,00597	0,0200	0,0057	0,2037
Dados estimados	1,1156	0,00590	1,085	0,00610	0,0200	0,0057	0,2030
Variação do espaço de busca	±100%	±100%	±100%	±100%	±100%	±100%	±100%

A curva da corrente obtida, sobreposta a curva da corrente fornecida é apresentada na Figura 5.

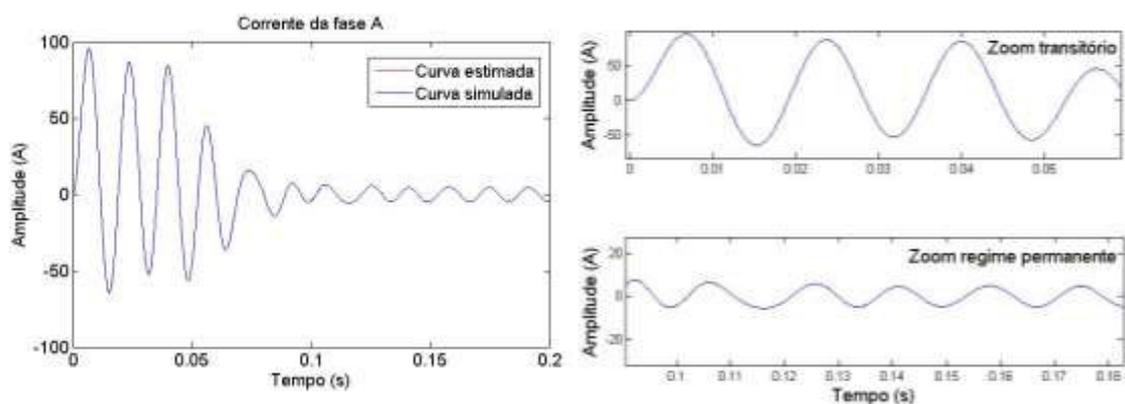
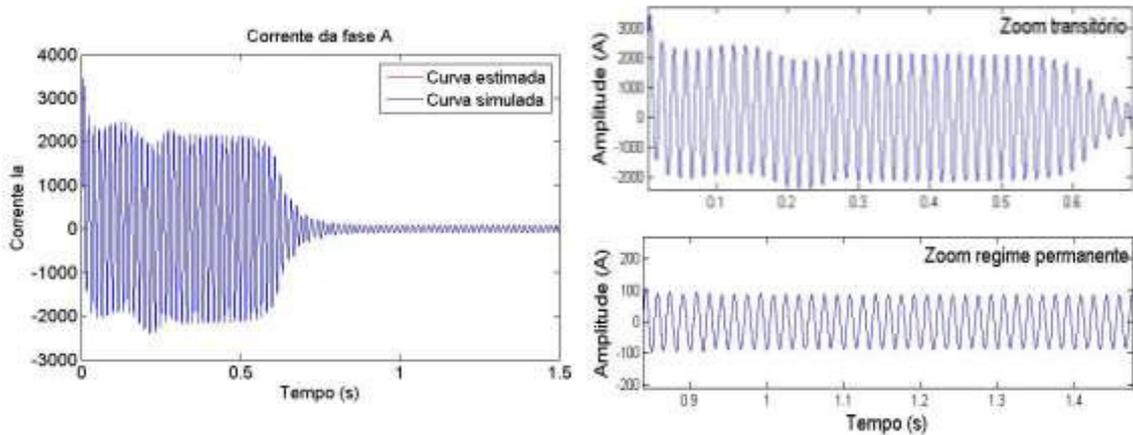


Figura 5: Curva de corrente da fase A, do motor de 5HP, com zoom no regime transitório permanente.

Para o mesmo ensaio, a curva da velocidade obtida, sobreposta a curva velocidade fornecida é apresentada na Figura 6.

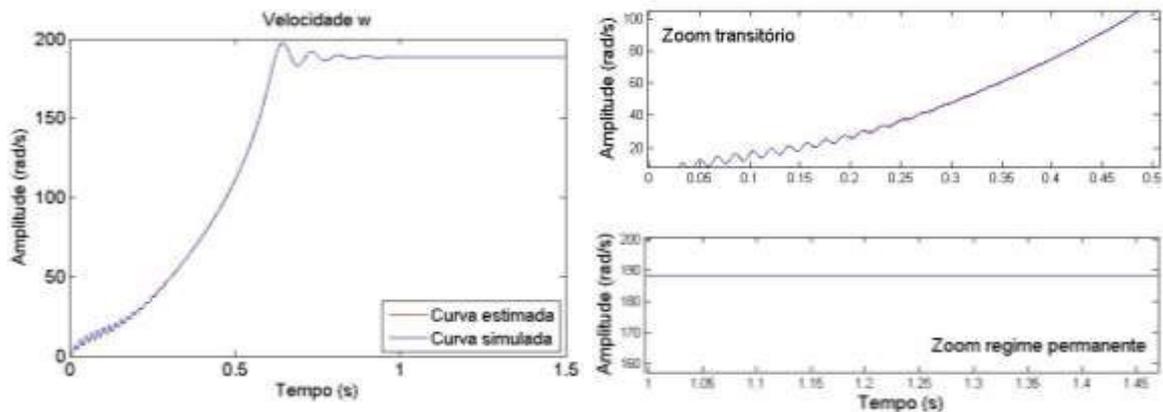


A curva da corrente obtida, sobreposta a curva da corrente fornecida é apresentada na Figura 7.



**Figura 7: Curva da corrente da fase A, do motor de 200 HP, com zoom no regime transitório permanente.**

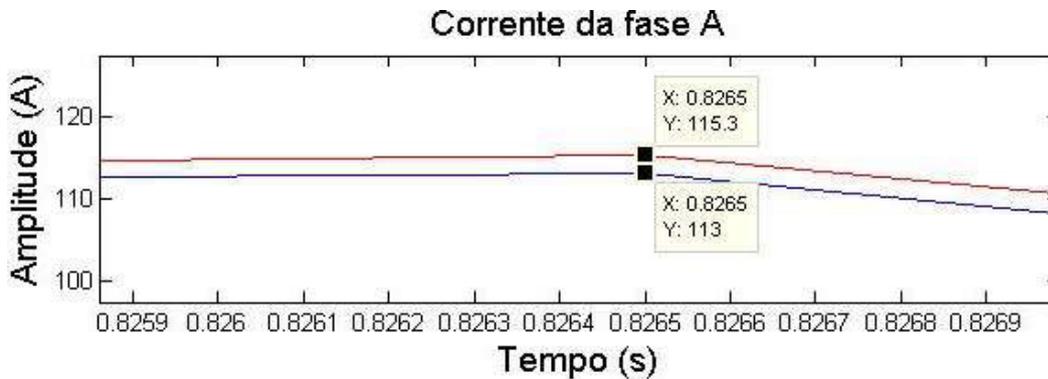
Para o mesmo ensaio, a curva da velocidade obtida, sobreposta a curva velocidade fornecida é apresentada na Figura 8.



**Figura 8: Curva da corrente da velocidade, do motor de 200 HP, com zoom no regime transitório e permanente.**

Para a segunda análise, observa-se que a potência do motor elevada resulta em um alto momento de inércia, quando comparado com o motor de 5 HP, por exemplo. Contudo, os parâmetros elétricos do motor são muito menores do que em um motor de menor potência. Ainda assim, o DE foi capaz de estimar os parâmetros da máquina, de modo a obter um resultado satisfatório. Embora as curvas estejam próximas, estas não estão sobrepostas. A Figura 9 apresenta um pequeno

fragmento da corrente da fase A, que possibilita a visualização da diferença entre uma curva e outra.



**Figura 9:** Curva da corrente da fase A, do motor de 5 HP, simulada (vermelho) e fornecida (azul).

Embora a diferença entre ambas as curvas seja de 2,3A no ponto apresentado, em porcentagem isso equivale a 1,99%. Novamente, o intervalo de busca para a estimação dos parâmetros foi de  $\pm 100\%$ , mas o resultado apresentado foi satisfatório.

## 5.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

As análises experimentais (terceira e quarta análise desse capítulo) foram realizadas com o motor de 1 CV, do Laboratório de Sistemas Inteligentes (LSI), do Centro Integrado de Pesquisa em Controle e Automação (CIPECA), da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Cornélio Procópio (UTFPR-CP). Foram realizados cinco testes utilizando somente a curva da fase A da corrente como entrada e cinco testes com a curva da corrente da fase A e velocidade como entrada.

Para aquisição das curvas reais do motor, foram realizados três ensaios, com o motor rodando a vazio, para que fosse possível escolher o melhor sinal a ser utilizado. Mesmo rodando a vazio, sem carga aplicada no eixo, e com velocidade

constante, esse motor apresenta um torque de 0,5N.m, referente ao coeficiente de atrito e as escovas da máquina CC – acoplada ao MIT –.

### 5.2.1 Uso do corrente da fase A como sinal de entrada

A terceira análise utilizou como entrada somente a curva da corrente da fase A. Para comprovação da eficiência do DE, foram feitos cinco testes, todos utilizando o mesmo critério de parada, intervalo de busca e curva de entrada. Os resultados obtidos nos cinco testes são mostrados na tabela 3.

TABELA 3: Parâmetros obtidos do MIT de 1 CV através da utilização do DE.

Curva de entrada: corrente da fase A						
Dados do motor: 1CV, 220V, 60Hz, ligação em Y. Laboratório LSI, UTFPR – CP						
	Parâmetros estimados do MIT através do DE					
Simulação	1	2	3	4	5	Intervalo de busca
$R_1$ ( $\Omega$ )	13,8539	13,8735	17,2419	16,4643	14,7011	[5 20]
$l_{\sigma 1}$ (H)	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	[0,001 0,04]
$R_2$ ( $\Omega$ )	5,6021	5,495	4,2544	4,5417	5,3881	[2 12]
$l_{\sigma 2}$ (H)	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	[0,001 0,04]
$J$ (kg.m <sup>2</sup> )	0,0279	0,0271	0,0178	0,0216	0,0245	[0,005 0,05]
$K_D$ (N.m.s)	0,0032	0,0022	0,005	0,005	0,0045	[0,0005 0,005]
$L_H$ (H)	0,9611	1	1	1	1	[0,1 1]
<i>fit</i>	0,1676	0,1777	0,158	0,1759	0,159	

As Figuras 10 e 11 apresentam, respectivamente, os sinais de corrente e velocidade obtidos com o melhor *fitness*.

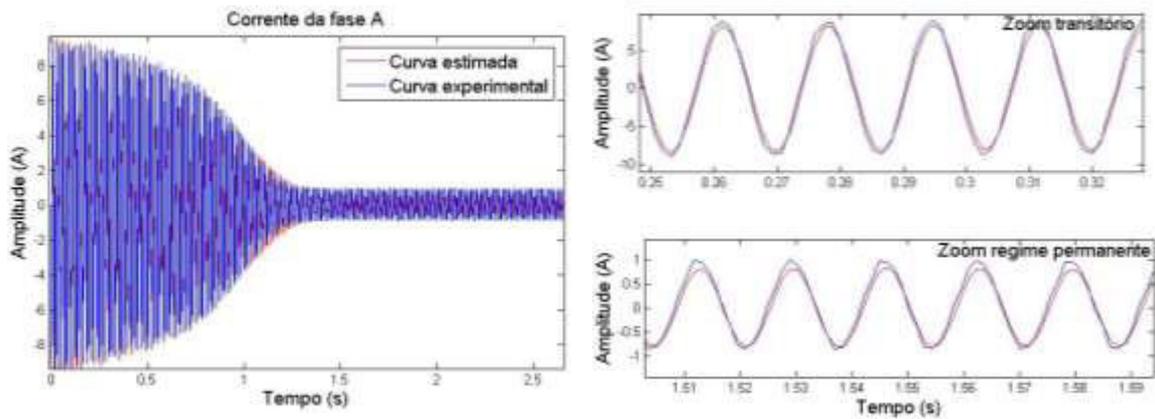


Figura 10: Curva da corrente da fase A, do motor de 1 CV, com zoom no regime transitório e permanente, para o melhor resultado obtido.

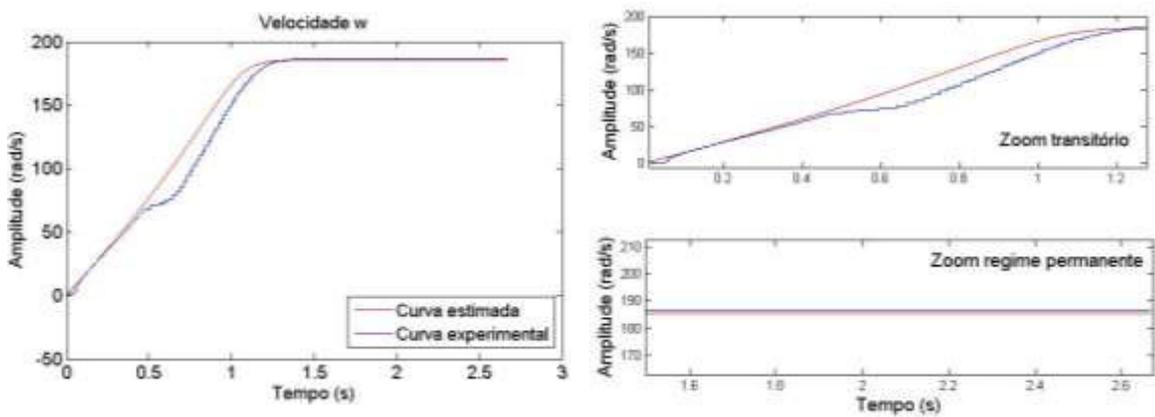


Figura 11: Curva da corrente da fase A, do motor de 1 CV, com zoom no regime transitório e permanente, para o melhor resultado obtido.

Com a finalidade de mostrar que o pior resultado obtido dentre os cinco testes também é satisfatório, as Figuras 12 e 13 apresentam, respectivamente, os sinais de corrente e velocidade obtidos com o pior *fitness*.

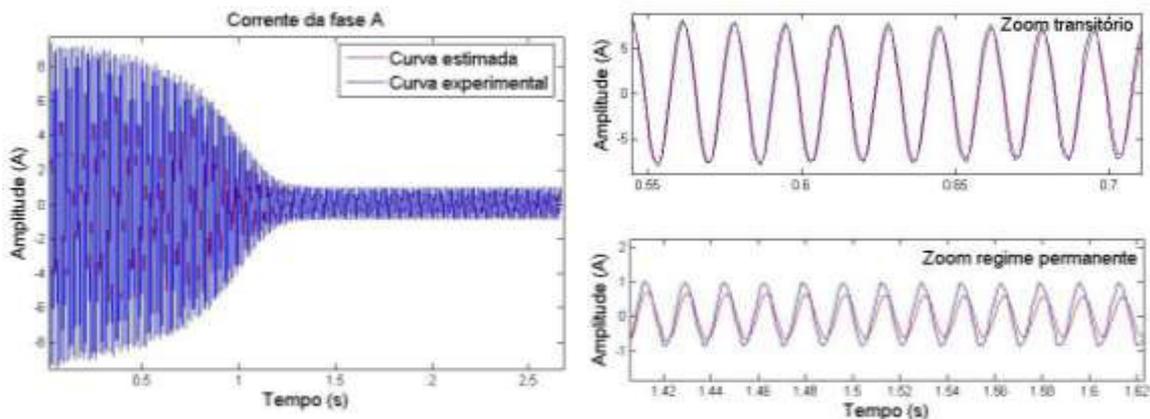
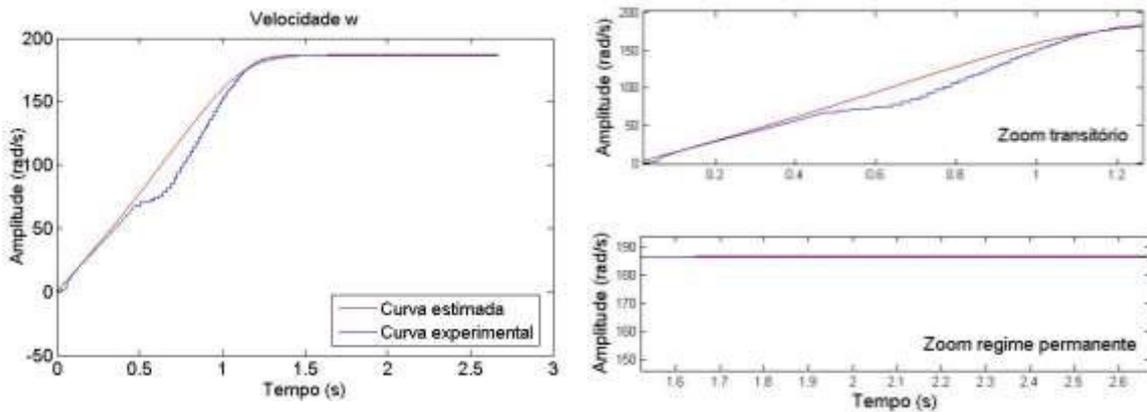


Figura 12: Curva da corrente da fase A, do motor de 1 CV, com zoom no regime transitório e permanente, para o pior resultado obtido.



**Figura 13: Curva da corrente da fase A, do motor de 1 CV, com zoom no regime transitório e permanente, para o pior resultado obtido.**

Comparando-se os resultados obtidos, é possível comprovar que o DE desenvolvido é eficiente para motores reais. Ao analisar a curva da velocidade, observa-se que há uma grande diferença entre a curva gerada e a curva fornecida pelo motor no período do transitório, que ocorre por causa da resolução do sensor de velocidade – a curva experimental foi adquirida através do torquímetro. Se for utilizado como entrada somente o sinal da corrente essa diferença não influencia na estimação dos parâmetros.

Para esses testes foram estabelecidos dois critérios de paradas. O primeiro critério estabelecido é chegar a um *fitness* de 0.1 e o segundo critério estabelecido é registrar o número de vezes em que o *fitness* se repete, desde que menor do que 0.2. Se a diferença entre o *fitness* atual e anterior for zero o contador será incrementado. Caso o contador chegue a 20 antes de o *fitness* chegar a 0.1 o programa para. Para todos os resultados apresentados foi utilizado o segundo critério de parada, que é estabelecido automaticamente pelo DE.

Para o MIT de 1CV utilizou-se como base os parâmetros obtidos através do ensaio a vazio e com rotor bloqueado para se estabelecer o intervalo de busca. Baseado nos valores encontrados (SILVA, 2014) criou-se um intervalo de busca que poderia variar aproximadamente 60% para mais ou para menos, em relação a esses valores.

O tempo para cada teste não está relacionado com *fitness* final, mas está com o inicial. Quanto menor for o *fitness* obtido na primeira população (aleatória), mais

rápido tende a ser a conversão para o resultado desejado. Para os testes realizados, o intervalo de tempo variou entre 5200s e 6300s.

### 5.2.2 Uso da corrente da fase A e da velocidade como sinais de entrada

Para a quarta análise, utilizou-se a corrente da fase A e a velocidade como sinais de entrada. A fim de comparar os resultados obtidos utilizando ou não a velocidade como sinal de entrada foram feitos cinco testes, todos utilizando o mesmo critério de parada e intervalo de busca da terceira análise, além de a curva da corrente da fase A ser a mesma. Os resultados obtidos nos cinco testes são mostrados na tabela 4.

TABELA 4: Parâmetros obtidos do MIT de 1 CV através da utilização do DE, com a curva de velocidade.

Curva de entrada: corrente da fase A e velocidade						
Dados do motor: 1CV, 220V, 60Hz, ligação em Y. Laboratório LSI, UTFPR – CP						
	Parâmetros estimados do MIT através do DE					
Simulação	1	2	3	4	5	Intervalo de busca
$R_1$ ( $\Omega$ )	17,1384	20	20	20	20	[5 20]
$L_{\sigma 1}$ (H)	0,001	0,001	0,0024	0,0024	0,0024	[0,001 0,04]
$R_2$ ( $\Omega$ )	2,9082	4,6292	4,0248	4,0248	4,0248	[2 12]
$L_{\sigma 2}$ (H)	0,0042	0,0084	0,0201	0,0201	0,0201	[0,001 0,04]
$J$ (kg.m <sup>2</sup> )	0,0164	0,0174	0,0139	0,0139	0,0139	[0,005 0,05]
$K_D$ (N.m.s)	0,005	0,0019	0,0026	0,0026	0,0026	[0,0005 0,005]
$L_H$ (H)	0,7161	0,8792	0,401	0,401	0,401	[0,1 1]
<i>fit</i>	2,4467	2,9798	2,5677	2,5677	2,5677	

As Figuras 14 e 15 apresentam, respectivamente, os sinais de corrente e velocidade obtidos com o melhor *fitness*.

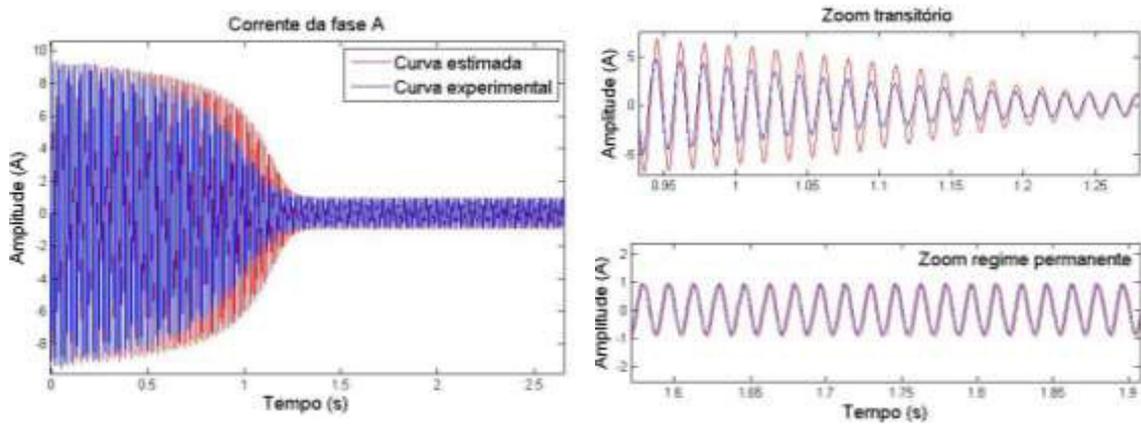


Figura 14: Curva da corrente da fase A do motor de 1 CV, com zoom no regime transitório e permanente, para o melhor resultado obtido.

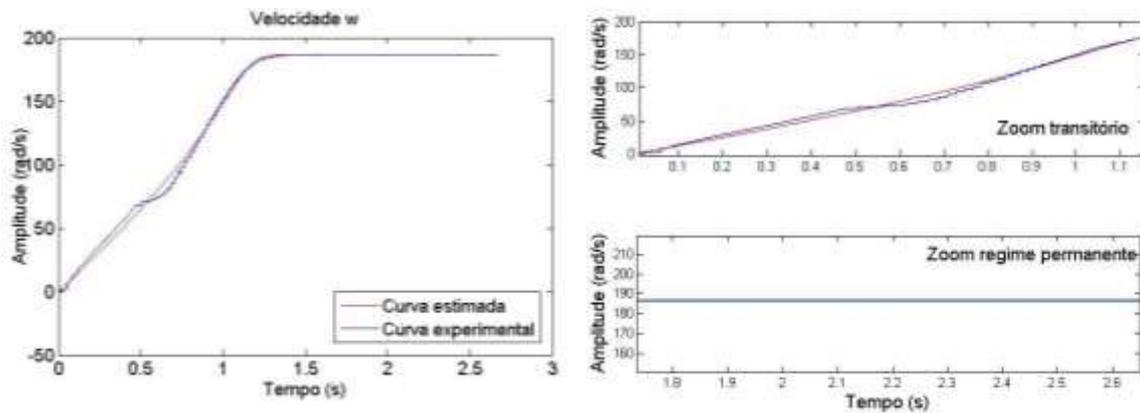


Figura 15: Curva da corrente da velocidade do motor de 1 CV, com zoom no regime transitório e permanente, para o melhor resultado obtido.

Com a finalidade de mostrar que o pior resultado obtido dentre os cinco testes também é satisfatório, as Figuras 16 e 17 apresentam, respectivamente, os sinais de corrente e velocidade obtidos com o pior *fitness*.

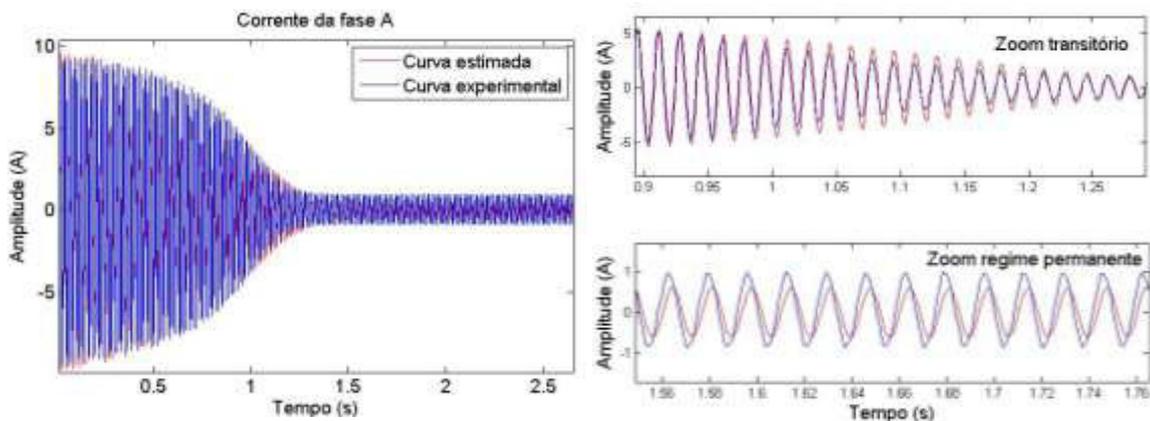


Figura 16: Curva da corrente da fase A, do motor de 1 CV, com zoom no regime transitório e permanente, para o pior resultado obtido.

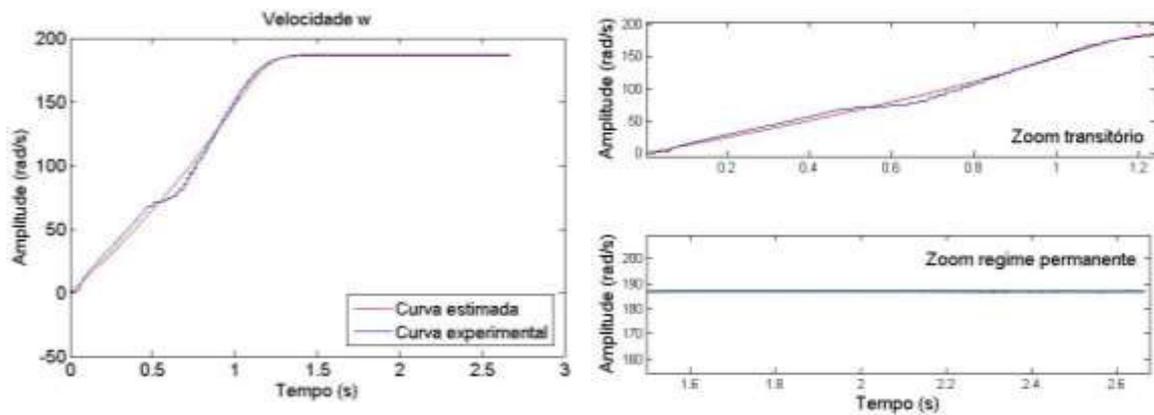


Figura 17: Curva da velocidade do motor de 1 CV, com zoom no regime transitório e permanente, para o pior resultado obtido.

Ao comparar a curva da corrente entre o melhor e o pior resultado, fica claro que a curva do melhor *fitness* apresenta uma diferença maior no final do transitório para o início do regime permanente, quando comparado com a curva da corrente do pior *fitness*. No entanto, se comparar as curvas da velocidade, a que possui o melhor *fitness* está mais próxima do que a que possui o pior *fitness*. Isso acontece porque a diferença entre os pontos da velocidade é muito maior do que os da corrente, conforme apresentado na Figura 18.

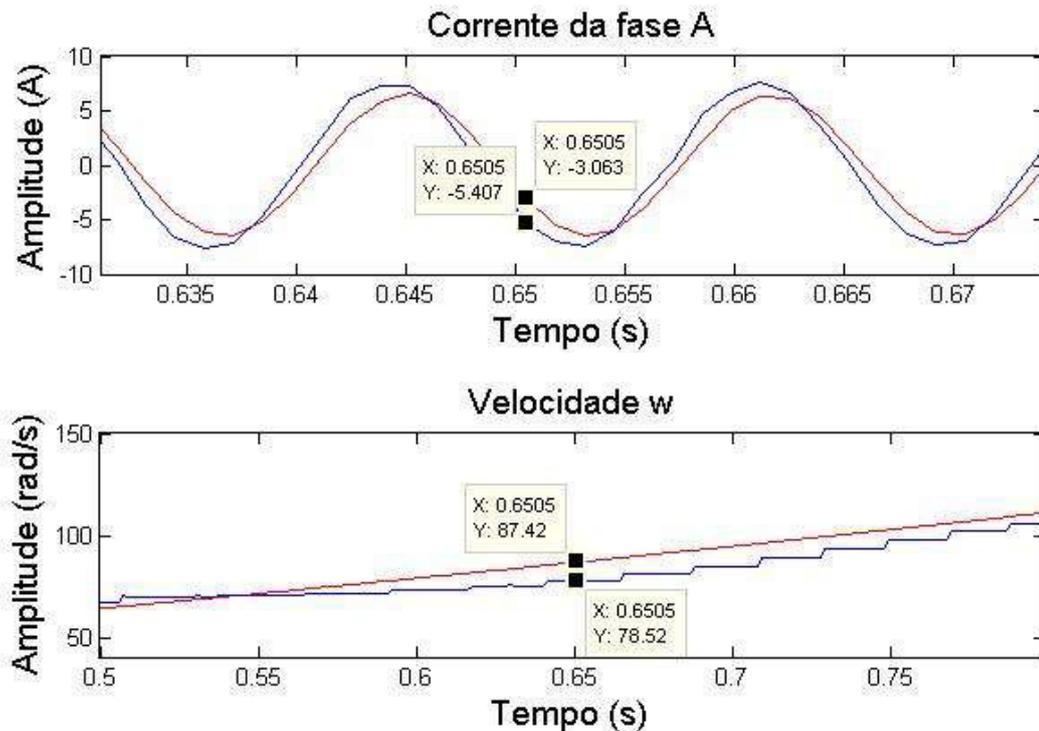


Figura 18: Curva da velocidade do motor de 1 CV, simulada (vermelho) e fornecida (azul).

### 5.3 ENSAIO A VAZIO E COM ROTOR BLOQUEADO

Para possibilitar uma melhor comparação entre o método de estimação de parâmetros do MIT através do DE e do ensaio a vazio e com rotor bloqueado, os parâmetros obtidos pelo ensaio a vazio foram aplicados a modelagem desenvolvida e a curva de corrente e velocidade geradas foram comparadas com as curvas de corrente e velocidade adquiridas direto do MIT. O valor dos parâmetros obtidos através do ensaio a vazio e de rotor bloqueado estão presentes na tabela 5.

TABELA 5: Parâmetros obtidos do MIT de 1 CV através do ensaio a vazio e de rotor bloqueado.

<b>Curva de entrada:</b> corrente da fase A – ensaio com motor a vazio e rotor bloqueado								
<b>Dados do motor:</b> 1CV, 220V, 60Hz, ligação em Y. Laboratório LSI, UTFPR – CP								
<b>Parâmetros estimados do MIT através do DE</b>								
	$R_1$ ( $\Omega$ )	$l_{\sigma 1}$ (H)	$R_2$ ( $\Omega$ )	$l_{\sigma 2}$ (H)	$J$ ( $\text{kg.m}^2$ )	$K_D$ (N.m.s)	$L_H$ (H)	<i>fit</i>
Parâmetros através do ensaio	11.2000	0.0199	5.4995	0.0199	0.0170	0.0023	0.4240	3.0327

As Figuras 19 e 20 apresentam, respectivamente, a comparação entre as curvas da corrente da fase A gerada e adquirida, e das curvas da velocidade, gerada e adquirida.

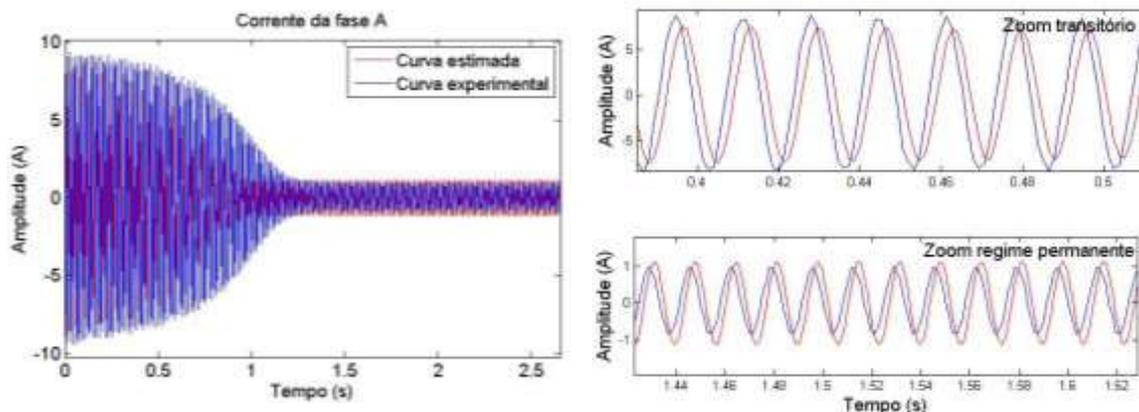
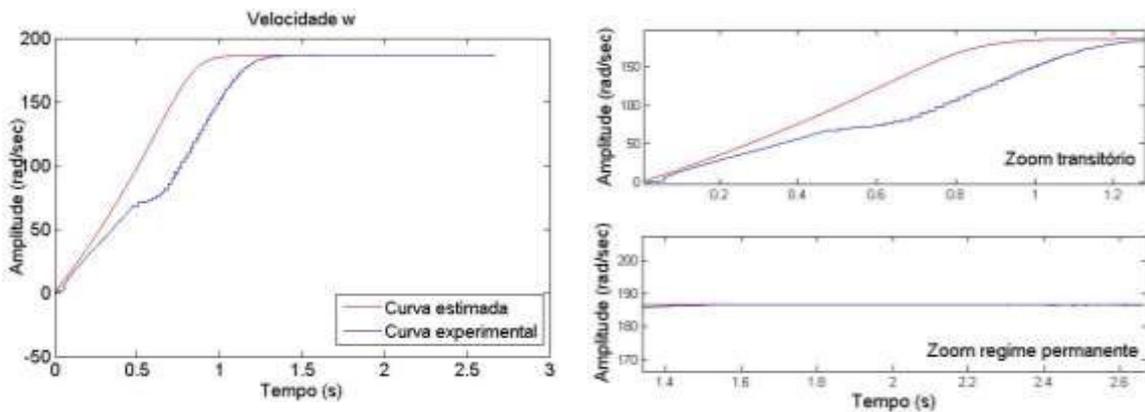


Figura 19: Corrente da fase A do motor de 1 CV, obtida através do teste de ensaio a vazio e rotor bloqueado.



**Figura 20: Corrente da fase A do motor de 1 CV, obtida através do teste de ensaio a vazio e rotor bloqueado.**

O cálculo do *fitness* para essa situação foi baseado apenas no sinal de corrente como entrada, visto que este apresentou os melhores *fitness* quando comparado ao sinal de velocidade também na entrada. Embora o resultado apresentado seja satisfatório, com a velocidade idêntica em regime permanente e mínima variação tanto no período transitório, quanto no regime permanente, o modelo desenvolvido de DE apresenta maior eficiência.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho de conclusão de curso foi proposto um estimador de parâmetros para o motor de indução trifásico utilizando evolução diferencial, aplicado ao motor operando a vazio, com tensões equilibradas e utilizando como sinais de entrada a corrente da fase A e a velocidade do motor.

Para validação do DE foram realizados testes simulados e experimentais – para o motor de 1CV – a fim de comprovar a eficiência do mesmo tanto para situações ideais, quanto para situações reais, e em ambos os casos os resultados obtidos foram satisfatórios. A evolução diferencial tem como objetivo encontrar soluções factíveis para problemas em que não é possível encontrar a solução exata. Ao analisar as soluções obtidas nos testes experimentais, todas as soluções são factíveis, no entanto, alguns parâmetros (como a resistência de estator, por exemplo) variam mais que outros, ou seja, o DE gera diferentes combinações dos parâmetros que possibilite chegar a uma boa solução.

Outra consideração importante em relação ao DE implementado é o intervalo de busca que o mesmo pode alcançar. Para o caso experimental, os valores do intervalo de busca chegaram a variar até 97% para menos e 66% para mais do valor base – que foi obtido através do ensaio a vazio e de rotor bloqueado –. Já para os casos simulados, no motor de 200 HP, a variação no intervalo de busca chegou a 100% para mais ou para menos do valor fornecido pelo *Simulink* e, após aplicado o DE, o maior erro se comparado parâmetro a parâmetro foi de 30%. Entretanto, quando analisado o resultado final, ou seja, a comparação entre as curvas estimada e simulada, essa diferença passa a ser de 1,99%. Isso ocorre, pois os parâmetros que possuem maior diferença possuem menor sensibilidade quando aplicado ao modelo da máquina, que é o caso das indutâncias de dispersão e do coeficiente de atrito. Em relação ao tempo de simulação, este varia de acordo com a solução aleatória inicial, pois quanto melhor for o *fitness* da primeira população, mais rápido tende a ser a convergência da mesma.

Comparando-se as análises experimentais, com e sem a curva de velocidade, conclui-se que a mesma não é necessária para que sejam obtidos resultados

factíveis, o que representa uma excelente vantagem, pois os métodos de aquisição da velocidade do motor são consideravelmente mais caros. Além disso, quando a velocidade é levada em consideração, uma baixa resolução do sensor pode comprometer o resultado do processo, uma vez que o *fitness* é calculado ponto a ponto. Por outro lado, quando somente o sinal de corrente é utilizado, é possível obter uma aproximação satisfatória tanto para a corrente quanto para a velocidade, a um custo computacional menor, pois a aproximação utilizando somente a curva da corrente é mais rápida, e também com um custo de aquisição de dados menor, pois não são necessários instrumentos tão sofisticados como é necessário para a aquisição da velocidade. Além disso, o método se mostrou mais preciso do que o método de ensaio a vazio e com rotor bloqueado.

Portanto, pode-se concluir que a evolução diferencial é um método eficiente, simples e robusto para aplicação na estimação de parâmetros do motor indução trifásico, para diversos tipos de motores, pois o mesmo é capaz de encontrar soluções satisfatórias em um amplo campo de busca, a um baixo custo e tempo computacional.

## 6.1 TRABALHOS FUTUROS

Para dar continuidade nessa linha de pesquisa são sugeridos os seguintes trabalhos:

- Inclusão da modelagem da temperatura no MIT, para analisar a influencia desta na variação dos parâmetros, assim como a aplicação de tensões desequilibradas e torque na máquina;
- Testar o método para motores com falhas, a fim de analisar o comportamento destes parâmetros para diversas condições do MIT, que são encontradas na indústria.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, Manoel L. **Modelos Dinâmicos de Máquinas Elétricas**. Notas didáticas da disciplina de Modelos Dinâmicos de Máquinas Elétricas. Programa de Pós-Graduação da Universidade de São Paulo , USP – São Carlos, 2012.

APEC. **Electric Motors – Alignment of Standards and Best Practice Programmes within APEC**. Final Report: 2008.

ASKOY, Saadettin; MÜHÜRÇÜ, Aydin; KIZMAZ, Hakan. **State and Parameter Estimation in Induction Motor Using the Extended Kalman Filtering Algorithm**. IEEE Modern Electric Power Systems (MEPS), 2010 Proceedings of the International Symposium. p. 1 – 5. Sept, 2010. Wroclaw, Poland.

CAD, Marcelo M. **Estratégias de Modelagem Dinâmica e Simulação Computacional do Motor de Indução Trifásico**. Dissertação de mestrado. Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2000.

CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5 ed. Porto Alegre, Mc Graw Hill. 2013.

COELHO, Leandro dos Santos; MARIANI, Viviana Cocco. **Evolução Diferencial Híbrida com Programação Quadrática Aplicada ao Problema de Despacho Econômico de Energia Elétrica**. Sba Controle & Automação, Campinas , v. 17, n. 4, p. 409-423, Dec. 2006 .

COSTA, C. R. **Condução de Experimentos Computacionais com Métodos Heurísticos**. 2011. 150 f. Dissertação (Mestrado em Computação) – Instituto de Informática. Universidade Federal de Goiás, Goiania, 2011.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY Jr, Charles; UMANS, Stephen D. **Máquinas Elétricas com Introdução a Eletrônica de Potência**. Porto Alegre, Mc Graw Hill. 2006..

FORTES, M. Z.; FERREIRA, V. H.; COELHO, A. P. F. **The Induction Motor Parameter Estimation Using Genetic Algorithm.** IEEE latin america transactions. Vol. 11. Num 5, p.1273 – 1278. Septempber 2013.

GABRIEL, Paulo Henrique R.; DELBEM, Alexandre Cláudio B. **Fundamentos de Algoritmos Evolutivos** Relatório Técnico: Notas Didáticas do ICMC-USP, 2008.

GOEDEL, Alessandro. **Estimador Neural de Velocidade para Motores de Indução Trifásicos.** Tese de Doutorado. Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.

GUIMARÃES, Frederico G. **Algoritmos de evolução diferencial para otimização e aprendizado de máquinas**, 17, 2009, Ouro preto. Anais do IX Congresso Brasileiro de Redes Neurais. Ouro Preto: UFOP, 2009.

KOSOW, Irwin L. **Máquinas Elétricas e Transformadores.** 15 ed. São Paulo, Globo, 2005.

KRAUSE, Paul C.; WASYNCZUCK, Oleg; SUDHOFF, Scott D. **Analysis of Electrical Machinery and Drive Systems**, 2ed., John Wiley & Sons.2002.

LINDEN, Ricardo. **Algoritmos genéticos: uma importante ferramenta da inteligência computacional.** 2. ed. Rio de Janeiro: Brasport, 2008.

MAIAGOLI, Juliana A.; LOBATO, Frans S.; CAMACHO, José R. **Projeto de estator de máquinas de indução trifásica usando o algoritmo de evolução diferencial.** XI Simpósio de mecânica computacional. Juíz de Fora, maio 2014.

MARCIC, Tine; STUMBERGER, Bojan; STUMBERGER, Gorazd. **Differential-Evolution-Based Parameter Identification of a Line-Start IPM Synchronous Motor.** *IEEE Transaction On Industrial Electronics*, vol 61, no 11, pp. 5921-5929. 2014.

OLIVEIRA, Giovana T. da S. **Estudo e aplicações da evolução diferencial**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Uberlândia (UFU), 2006.

ONG, Chee-Mun. **Dynamic Simulention of Electric Machinery Using Matlab/Simulink**. Prentice Hall, 1997.

PACHECO, Marco Aurélio C. **Algoritmos Genéticos: Princípios e Aplicações**. ICA: Labortório de Inteligência Computacional Aplicada. PUC-RJ, 1999.

PRICE, Kenneth; STORN, Rainer M.; LAMPINEN, Jouni A. **Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization**. 1a edição. Berlin, Germany: SpringerVerlag, 2005.

PROCEL Indústria Brasileira. **Motor Elétrico: guia básico**. 2009.

RAMPAZZO, Priscila C. B. **Algoritmo Genético e Evolução Diferencial para a Resolução do Problema de Planejamento Hidrelétrico**. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

SAKTHIVEL, V.P.; BHUVANESWARI, R.; SUBRAMANIAN, S. **Multi-objective Parameter Estimation of Induction Motor Using Particle Swarm Optimization**. Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 23, no. 3 pp.303-312. 2009.

SANCHES, Danilo S. **Algoritmos Evolucionários Multi-Objetivo Para Reconfiguração de Redes em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. 152f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

SILVA, Rafael G. **Ferramenta Computacional para Análise do Motor de Indução Trifásico**. Trabalho de conclusão de curso. 61f. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Cornélio Procópio. 2014.

ZAMORA, Juan Luis; GARCIA-CERRADA, Aurelio. **Online Estimation of the Stator Parameters in an Induction Motor Using Only Voltage and Current**

**Measurements.** *Ieee Transactions on Industry Applications*, vol. 36, no. 3, pp. 805-816. 2000.

ZHOU, Xiaoyao; CHENG, Haozhong; JU, P. **The third-order induction motor parameter estimation using na adaptative genetic algorithm.** 4<sup>th</sup> World Congresso on Intelligent Control and Automation. p. 1480 – 1484. June, 2002. Shangai, China.

ZHU, Hong-yu; CHENG, Wan-sheng; JIA, Zhu-zhi. **Parameter Estimation of Induction Motor Based on Chaotic Ant Swarm Algorithm.** IEEE Information Science and Engineering (ICISE), 2010 2nd International Conference on. p. 1370 – 1373. Dec, 2010. Hangzhou, China.