

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

AGNES FERNANDA FERREIRA REZENDE

**APLICAÇÃO DO *SIMULATED ANNEALING* PARA ESTIMAÇÃO DE PARÂ-
METROS EM MÁQUINAS ELÉTRICAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2020

AGNES FERNANDA FERREIRA REZENDE

**APLICAÇÃO DO *SIMULATED ANNEALING* PARA ESTIMAÇÃO DE PARÂ-
METROS EM MÁQUINAS ELÉTRICAS**

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. Alessandro Goedel.
Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Favoretto Castoldi.

CORNÉLIO PROCÓPIO
2020



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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Agnes Fernanda Ferreira Rezende

Aplicação do Simulated Annealing para estimação de parâmetros em máquinas elétricas

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 16:00hs do dia 16/11/2020 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). Alessandro Goedel - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Marcelo Favoretto Castoldi - (Coorientador)

Engenheiro(a) Me(a). Gustavo Henrique Bazan - (Membro)

Prof(a). Igor Da Silva Elias - (Membro)

Prof(a). Dr(a). Cristiano Marcos Agulhari - (Membro)

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso.

RESUMO

REZENDE, AGNES, F.F. **Aplicação do *Simulated Annealing* para estimação de parâmetros em máquinas elétricas**. 46f. Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2020.

Os motores de indução trifásicos são amplamente utilizados no setor industrial devido à sua robustez para atuar em diversos ambientes e ao seu baixo custo. Estes possuem características em seu modelo estrutural que são importantes para a análise de desempenho da máquina, sendo uma destas características os parâmetros elétricos da máquina. As informações sobre os parâmetros do motor nem sempre estão disponíveis, por isso, realiza-se a estimação de parâmetros. O avanço científico e tecnológico tem colaborado para o desenvolvimento de novas ferramentas capazes de auxiliar neste cenário. O presente trabalho propõe uma metodologia de estimação de parâmetros, fundamentada na meta-heurística *Simulated Annealing*, utilizando o modelo do circuito elétrico equivalente do motor de indução trifásico, onde a estimação é realizada por meio de valores de corrente e tensão no ambiente Matlab®/Simulink®. Foi efetuada a estimação para quatro diferentes motores e os resultados são apresentados por meio de análise gráfica e quantitativa.

Palavras-chave: Motor de indução; Estimação de parâmetros; Meta-heurística; *Simulated Annealing*.

ABSTRACT

REZENDE, Agnes F.F. **Application of Simulated Annealing for parameters estimation in the electrical machines**. 2020. 46f. Monograph (Graduation) – Electrical Engineering. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procopio, 2020.

Three-phase induction motors are widely used in the industrial sector due to their robustness to act in several environments and their low cost. These machines have technical features in the structural model that are important for machine performance analysis, such as the electrical parameters. The information about the motor's parameters is not always available, thus justifying the parameters estimation. The scientific and technological advance has collaborated for the development of new techniques that contribute to this area. This work proposes a methodology of parameters estimation based on metaheuristic Simulated Annealing, using a three-phase induction motor's electric circuit model, where the estimation is realized through voltage and current values using Matlab®/Simulink®. The estimation of four different motors was made, and the results are presented through graphical and quantitative analysis.

Keyword: Induction Motor; Parameters estimation; Metaheuristic; Simulated Annealing

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Motor de indução como modelo de transformador.....	13
Figura 2: Circuito elétrico por fase do motor de indução	14
Figura 3: Espaço de busca com ótimo local e global em problema de maximização	17
Figura 4: Pseudo-Código do <i>Simulated Annealing</i>	20
Figura 5: Esquemático da metodologia realizada.....	24
Figura 6:Gráficos de Corrente para o motor de 5HP com e sem R1 fixo	29
Figura 7:Gráficos de Corrente para o motor de 5HP condição a vazio e nominal	29
Figura 8:Gráficos de Corrente para o motor de 50HP com e sem R1 fixo	33
Figura 9:Gráficos de Corrente para o motor de 50HP condição a vazio e nominal.....	33
Figura 10: Gráficos de Corrente para o motor de 20HP com e sem R1 fixo	36
Figura 11: Gráficos de Corrente para o motor de 20HP a vazio e nominal	36
Figura 12:Gráficos de Corrente para o motor de 150HP com e sem R1 fixo ...	38
Figura 13:Gráficos de Corrente para o motor de 150HP a vazio e nominal	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:Intervalo de busca único.....	22
Tabela 2:Características dos motores utilizados	25
Tabela 3: Média de 10 estimações para o Motor de 5HP	28
Tabela 4: Iterações e Erro médio para o motor de 5HP – 10 estimações	28
Tabela 5: Uma estimacão feita para o motor de 5HP.....	31
Tabela 6: Média de 10 estimações para o Motor de 50HP	32
Tabela 7: Iterações e Erro médio para o motor de 50HP – 10 estimações	32
Tabela 8: Média de10 estimações para o Motor de 20HP	35
Tabela 9: Iterações e Erro médio para o motor de 20HP – 10 estimações	35
Tabela 10: Média de 10 estimações para o motor de 150HP	37
Tabela 11: Iterações e Erro médio para o motor de 150HP – 10 estimações ..	37

LISTA DE ABREVIATURAS

MIT	Motor de Indução Trifásico
SA	<i>Simulated Annealing</i>
FO	Função Objetivo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	7
1.2 OBJETIVOS	10
1.2.1 Objetivo Geral	10
1.2.2 Objetivos Específicos	10
1.3 JUSTIFICATIVA.....	10
1.4 DISPOSIÇÃO DO TRABALHO	11
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	12
2.1 MOTOR DE INDUÇÃO.....	12
2.2 <i>SIMULATED ANNEALING</i>	16
3 METODOLOGIA.....	21
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	27
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
REFERÊNCIAS.....	42

1 INTRODUÇÃO

Motores de indução trifásicos (MIT) possuem diversas características que os tornam propícios à instalação em ambientes industriais, entre elas podem ser destacadas a facilidade de manutenção e o baixo custo para sua aquisição (BAZAN et al., 2018). Estas máquinas apresentam ainda uma adaptação frente às diferentes condições e cargas mecânicas às quais são submetidas e robustez para diversas aplicações, incluindo ambientes agressivos (BAZAN, 2016). De acordo com dados do Ministério de Minas e Energia referente ao ano de 2017, o consumo da classe industrial era de 167.398GWh, o que corresponde a 35,8% de toda energia produzida no Brasil. Segundo SAUER et al (2015), os motores de indução, representam aproximadamente 68% do consumo energético industrial.

Os MIT possuem características que permitem realizar análises referente à sua eficiência e colaboram para implementação efetiva de métodos de controle. Entre essas características, encontram-se os denominados parâmetros da máquina, que são informações de natureza elétrica e mecânica sobre o seu modelo estrutural (SOARES, 2006). Porém, estes parâmetros nem sempre são fornecidos pelos fabricantes ou, ainda, fatores internos ou externos, como desgaste e aquecimento, podem alterar os parâmetros da máquina (GUEDES, 2017).

A estimação de parâmetros elétricos é um método que procura, por meio do circuito elétrico equivalente do motor, inferir os valores de resistências e indutâncias intrínsecos da máquina, permitindo o diagnóstico de possíveis irregularidades e auxiliando em processos de controle. Utiliza como variáveis de análise sinais de tensão e corrente da máquina.

A literatura aborda diferentes procedimentos de estimação de parâmetros em motores de indução. Os métodos clássicos consistem em realizar testes laboratoriais na máquina previstos em normas internacionais, como: ensaio a vazio e ensaio de rotor bloqueado. Estes ensaios precisam ser executados

sob condições de controle precisas, pois os parâmetros podem se alterar conforme a temperatura e frequência (CHAPMAN, 2013)

A manutenção preditiva avalia equipamentos e procura prever falhas por meio do monitoramento de variáveis e condições destes. Este tipo de manutenção está se tornando essencial nas plantas industriais, pois otimiza o processo produtivo, influenciando na rentabilidade e segurança (LEME, 2017).

Existem diversas metodologias voltadas ao diagnóstico de falhas em motores de indução. No artigo de Bazan et al. (2017), há a utilização do método de informação mútua, que quantifica a informação de uma variável aleatória sobre a outra, para identificar falhas utilizando sinais de corrente. O artigo de Godoy et Al (2015) realiza uma avaliação de classificadores inteligentes para o diagnóstico de falhas em MIT alimentados com inversor, a metodologia utilizando sinais de corrente no tempo.

A estimação de parâmetros tem potencial para ser utilizada na identificação de falhas. No artigo de Duan et al. (2013), é feita a análise da mudança das características dos parâmetros, na presença de falhas de estator. No contexto de manutenção preditiva, a estimação pode ser um método fundamental para processos industriais, pois pode evitar paradas não programadas que acarretam custos indesejados.

Em controle e acionamentos de MIT são utilizados geralmente inversores de frequência e o ajuste destes controladores depende dos parâmetros do motor. Realizar uma estimativa adequada dos parâmetros do motor de indução pode influenciar o desempenho dos inversores de frequência (GUEDES, 2018). Deste modo, a estimação de parâmetros também se faz importante na área de controle e acionamento para garantir precisão nos métodos.

Os procedimentos para estimação feitos em laboratório empregam equipamentos que dificilmente podem ser transportados para o campo ou não são disponíveis nas indústrias e ainda podem ser caros e demorados (FILHO, 1997). Sendo assim, diversas pesquisas são elaboradas na área de estimação de parâmetros envolvendo métodos que possam agregar agilidade, baixo custo e maior exatidão nos resultados.

No artigo de Guedes et al (2018) é proposto um método baseado no algoritmo de evolução diferencial. A metodologia é escolhida para realizar, de maneira eficiente, a estimação de parâmetros elétricos e mecânicos em motores de indução trifásicos. Neste trabalho é usada, numa primeira abordagem, a corrente de uma fase apenas e o sinal de corrente de uma fase associada com a mediação de velocidade de um tacogerador e um torquímetro.

Boudissa e Bounekhla (2012) desenvolvem em seu trabalho uma estratégia, fundamentada em algoritmo genético, de estimação de parâmetros elétricos e mecânicos em máquinas de indução. Os parâmetros estimados são: inércia do rotor, constante de tempo do rotor e do estator, indutâncias do rotor e do estator, coeficientes de dispersão e de atrito viscoso. Os autores utilizam a corrente de partida e a tensão de fase para a estimativa e empregam uma minimização do erro quadrático de saída, obtido da corrente estimada e a real da máquina.

Um estudo feito por Liao et al (2016) propõe um algoritmo que se baseia na meta-heurística *Simulated Annealing* (SA) combinada com o método iterativo de maximização de expectativa, para efetuar o diagnóstico de máquinas, buscando melhorar a estimação de parâmetros e evitar ótimos locais no problema de otimização.

O propósito deste trabalho consiste em desenvolver um método de estimação de parâmetros em motores de indução trifásicos a partir do modelo do circuito elétrico equivalente da máquina, utilizando o algoritmo de otimização *Simulated Annealing*. O algoritmo foi desenvolvido no ambiente Matlab®/Simulink® e para realizar a estimação foram utilizados sinais de tensão e corrente, e velocidade do motor para o cálculo de escorregamento. Serão estimados os seguintes parâmetros: Resistência do estator, Resistência do rotor, Indutância de dispersão do estator, Indutância de dispersão do rotor e Indutância mútua.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Efetuar a estimação de parâmetros em motores de indução trifásicos, utilizando o algoritmo de otimização *Simulated Annealing*.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do presente trabalho são listados a seguir:

- Modelar o MIT através do modelo do circuito elétrico equivalente;
- Desenvolver um algoritmo fundamentado na meta-heurística SA;
- Realizar a análise de corrente estimada pelo algoritmo;
- Executar simulações com diferentes motores para averiguar o desempenho do método;
- Analisar o comportamento dos parâmetros de diferentes MIT.

1.3 JUSTIFICATIVA

É essencial garantir que os motores operem com confiabilidade e eficiência, considerando a aplicação destes nos processos industriais e no consumo elétrico nacional. As análises de desempenho e ainda o controle e acionamento destas máquinas podem ser elaborados com a obtenção dos parâmetros da máquina, que nem sempre são fornecidos pelo fabricante ou estão sujeitos a alterações devido a influências externas. Os métodos clássicos de estimação nem sempre podem ser aplicados em qualquer ambiente ou situação. Sendo assim, a estimação de parâmetros utilizando algoritmos de otimização pode realizar estimativas de forma eficiente.

Tendo isso em vista, o presente estudo propõe a implementação de um algoritmo fundamentado na meta-heurística *Simulated Annealing*. O objetivo é efetuar a estimação de parâmetros de motores com potências diferentes (5 a 150HP), o qual pode auxiliar na análise de desempenho e em técnicas de controle dos MIT.

1.4 DISPOSIÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho se divide da seguinte forma: No Capítulo 2, são apresentados conceitos teóricos sobre o motor de indução trifásico, grandezas a serem calculadas e a modelagem de seu circuito elétrico equivalente, junto à definição de meta-heurística e os princípios de rotina do SA. No Capítulo 3, é descrita a metodologia realizada no trabalho. O Capítulo 4 apresenta a discussão dos resultados obtidos com a metodologia proposta. O Capítulo 5 aborda as considerações finais deste estudo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta o estudo sobre o motor de indução, incluindo a modelagem através do circuito elétrico equivalente que permite a identificação dos parâmetros da máquina. Em seguida, aborda-se a definição de meta-heurística e a teoria do algoritmo *Simulated Annealing* utilizado neste trabalho para estimar os parâmetros da máquina.

2.1 MOTOR DE INDUÇÃO

Um MIT é constituído de uma parte estática denominada estator e uma parte rotativa denominada rotor, que pode possuir duas construções diferentes o rotor bobinado e o gaiola de esquilo, sendo o segundo mais utilizado nas indústrias devido ao seu menor custo (CHAPMAN, 2013).

No motor de indução, o estator é alimentado diretamente com tensão alternada, por intermédio da indução eletromagnética, tensões são induzidas no circuito de rotor. Se a excitação é feita por uma fonte polifásica equilibrada, um campo magnético girante é produzido no entreferro com uma velocidade síncrona (UMANS, 2014). A velocidade depende da quantidade de polos P da máquina de indução e da frequência aplicada no estator f_s . A Equação (1) descreve a velocidade síncrona.

$$n_s = \frac{120f_s}{P} \quad (1)$$

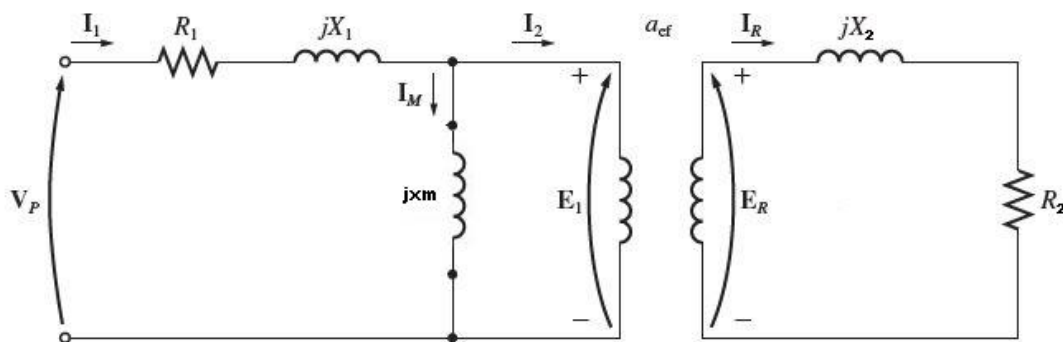
Define-se por escorregamento a diferença de velocidade entre rotor n e estator, n_s . Em geral, o escorregamento é denotado como sendo uma fração da velocidade síncrona, podendo ser calculado pela Equação (2).

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (2)$$

O MIT pode ser representado através de um circuito elétrico equivalente, considerando sua operação em regime permanente e conexão em Y com valores de tensão e corrente expressos em fase. Deste modo, considerando a alimentação do motor trifásica e equilibrada pode-se realizar a modelagem para uma fase e para as outras efetuar a defasagem de $\pm 120^\circ$ (GUEDES, 2017).

Em uma máquina de indução, as correntes e as tensões no rotor são a representadas realizando a conexão entre estator e rotor por meio de um transformador ideal, como apresentado na Figura 1 (CHAPMAN, 2013).

Figura 1: Motor de indução como modelo de transformador



Fonte: Adaptado de CHAPMAN (2013)

O circuito elétrico exibido na Figura 1, contém em sua entrada uma resistência R_1 e uma reatância X_1 denominadas resistências do estator e reatância de dispersão do estator, respectivamente, que relacionam as perdas nos enrolamentos do estator. A tensão terminal de fase do estator é dada por V_p , e I_1 é a corrente de fase do estator. A reatância de magnetização é representada por X_m , sendo E_1 a tensão induzida no estator da máquina. O rotor possui uma tensão induzida dada por E_R e contém uma resistência e uma reatância associadas às suas perdas, dadas por R_2 e X_2 , respectivamente.

Para obter o circuito elétrico final do MIT, deve-se refletir o rotor para o lado do estator, da mesma forma que em um transformador as impedâncias são refletidas utilizando a relação de espiras. É necessário considerar a influência do escorregamento na impedância do rotor, assim, sua impedância na frequência do escorregamento é demonstrada na Equação (3):

$$Z_2 = R_2 + jsX_2 \quad (3)$$

Onde:

R_2 é a resistência do rotor referida para o lado do circuito elétrico do estator [Ω];

X_2 é a reatância referida do rotor sendo dada em [Ω].

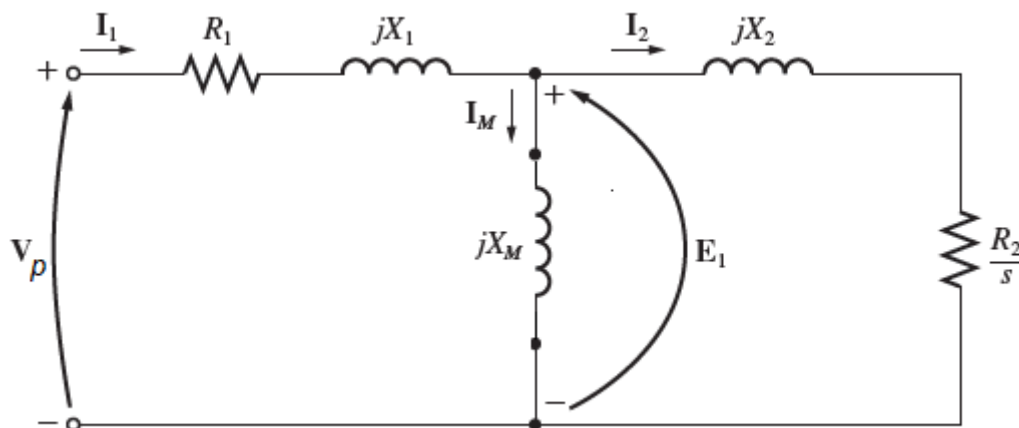
$$X_2 = 2\pi f_s L_2 \quad (4)$$

Sendo:

L_2 a indutância de dispersão do rotor, dado em [H].

O circuito elétrico final é apresentado na Figura 2.

Figura 2: Circuito elétrico por fase do motor de indução



Fonte: Adaptado de Chapman (2013)

A partir do circuito elétrico final, exibido na Figura 2, calcula-se a impedância equivalente. Realizando uma associação com os elementos do rotor, e dividindo a Equação (3) pelo escorregamento, obtém-se a impedância equivalente, Z_2 , dada pela Equação (5).

$$Z_2 = \frac{R_2}{s} + jX_2 \quad (5)$$

A mesma associação é feita para os elementos do estator, relacionada na Equação (6).

$$Z_1 = R_1 + jX_1 \quad (6)$$

Onde:

R_1 é a resistência do estator [Ω];

X_1 é a reatância do estator apresentada na Equação (7), sendo dado em [Ω].

$$X_1 = 2\pi f_s L_1 \quad (7)$$

Sendo L_1 a indutância de dispersão do estator [H].

A impedância equivalente Z_{eq} é obtida pela associação em paralelo de Z_2 e X_m , seguida de uma associação em série com Z_1 cujo resultado é dado pela Equação (8).

$$Z_{eq} = R_1 + jX_1 + \left(\frac{\frac{R_2}{s} + jX_2 X_m}{\frac{R_2}{s} + jX_2 + X_m} \right) \quad (8)$$

Onde:

$$X_m = 2\pi f_s L_m \quad (9)$$

Sendo:

L_m a indutância mútua dado em [H].

Com a Equação (8), pode-se obter a corrente, I_1 , que circulará pelo circuito elétrico equivalente, demonstrada na Equação (10).

$$I_1 = \frac{V_p}{Z_{eq}} \quad (10)$$

A Equação (10) servirá como base de comparação entre a corrente esperada da máquina e as aproximações realizadas pelo algoritmo *Simulated*

Annealing na estimativa de parâmetros. O tópico seguinte abordará com maior ênfase o algoritmo de otimização SA.

2.2 *SIMULATED ANNEALING*

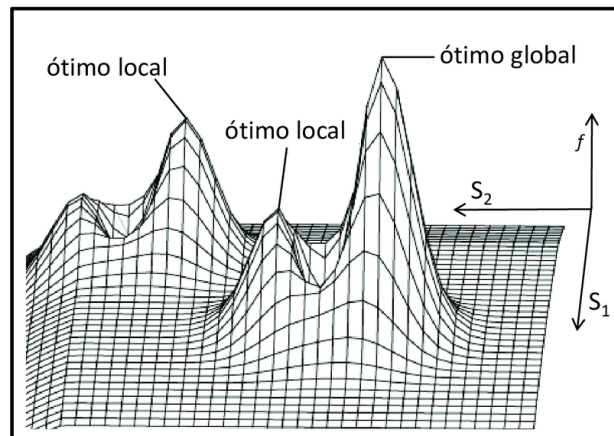
Otimização é o processo relacionado a escolher o melhor elemento, entre diversas opções satisfatórias disponíveis, de modo a minimizar ou maximizar uma determinada Função Objetivo (FO), que visa resolver um problema (LUZIA E RODRIGUES, 2012).

A área que estuda as meta-heurísticas é considerada um subcampo da otimização estocástica, uma classe de algoritmos que encontram soluções tão ótimas quanto possíveis, utilizando a aleatoriedade para resolução de problemas difíceis (LUZIA E RODRIGUES, 2012).

As meta-heurísticas são técnicas de otimização, que procuram encontrar soluções de problemas que possuem um vasto e complexo campo de busca, a definição do método também envolve toda abordagem que adota estratégias para o escape de ótimos locais (LUZIA E RODRIGUES, 2012). A Figura 3 apresenta um espaço de busca contendo ótimos locais e um ótimo global, exemplificando as características dos problemas em que se utilizam meta-heurísticas.

Considerando o domínio de soluções, vizinhança se define por aqueles pontos próximos no espaço de busca. Realizar a busca na vizinhança de determinada solução, permite a análise da variação do custo da função objetivo e colabora na tomada de decisão em adotar soluções como ótimas. O objetivo da abordagem meta-heurística é encontrar o ótimo global e evitar os ótimos locais, utilizando o conceito de vizinhança. É importante afirmar que estas técnicas visam garantir um resultado satisfatório para determinado problema, mas não garantem a otimalidade.

Figura 3: Espaço de busca com ótimo local e global em problema de maximização



Fonte: (Adaptado de Barion, 2009)

O *Simulated Annealing* é uma técnica utilizada em otimização para solucionar problemas complexos. Em 1954 Metropolis et al propôs um algoritmo, no qual o SA é embasado, que efetua a procura aleatória de um estado de energia e utiliza critério de probabilidade para aceitação de soluções. Em 1980, o então SA, foi introduzido pioneiramente na área de otimização por Kirkpatrick et al. (YANG, 2010).

O SA é fundamentado no princípio de tratamento térmico dos metais, onde um sólido é aquecido até a sua temperatura de fusão e posteriormente é resfriado de maneira lenta e gradativa para se reduzir os defeitos da estrutura cristalina (YANG, 2010). A força da estrutura depende da taxa de resfriamento, se a temperatura inicial não é suficientemente alta ou há uma queda rápida de temperatura, imperfeições são geradas. Assim, o algoritmo simula a mudança de energia ocorrida dentro de um sistema sujeito ao processo de recozimento até atingir o estado de equilíbrio (TALBI, 2009).

Considerando uma analogia com o processo térmico, o estado de energia do sistema no algoritmo é equivalente à função objetivo, ou seja, a solução

do problema de otimização corresponde ao estado do sistema. As variáveis de decisão associadas com a solução do problema são análogas às posições moleculares, o ótimo global representa o estado fundamental do sistema, ou seja, o equilíbrio e os ótimos locais, por sua vez, são os estados metaestáveis, pontos nos quais há estabilidade, mas ela é diferente do equilíbrio (TALBI, 2009).

Previamente à execução do *Simulated Annealing* são inicializadas variáveis que serão atualizadas no decorrer da simulação: temperatura inicial T_{IN} ; solução inicial S_{IN} ; custo inicial E_{IN} ; constante de resfriamento α e o critério de parada Em_0 , que no presente trabalho é adotado como sendo o erro quadrático médio entre corrente estimada e esperada.

O SA inicia sua rotina com uma solução randômica pré-definida. A cada iteração é realizada uma busca na vizinhança do ponto que está sendo considerado atualmente como solução ótima. Após encontrar um novo ponto vizinho, ou seja, uma nova solução, é feita a análise de custo da função objetivo, também chamada de *fitness*. A Equação (11), considera o custo da FO no ponto atual, E_{atual} , e no novo valor, E_{novo} .

$$\Delta E = E_{novo} - E_{atual} \quad (11)$$

O princípio básico do SA é aceitar mudanças que melhorem ou não a energia da função objetivo. Mudanças melhores sempre serão aceitas, enquanto as piores podem ser aceitas, sujeitas à uma função probabilística p , denominada probabilidade de Boltzman, que depende do *fitness* da FO e do nível de temperatura, T , a relação é dada pela Equação (12). O valor desta função a cada iteração, quando ΔE não é melhorado, é comparado com o valor de uma distribuição uniforme que possibilitará a adoção de uma solução ruim.

$$p = e^{-\frac{\Delta E}{T}} \quad (12)$$

Deste modo, as soluções serão aceitas se respeitarem a uma das condições a seguir:

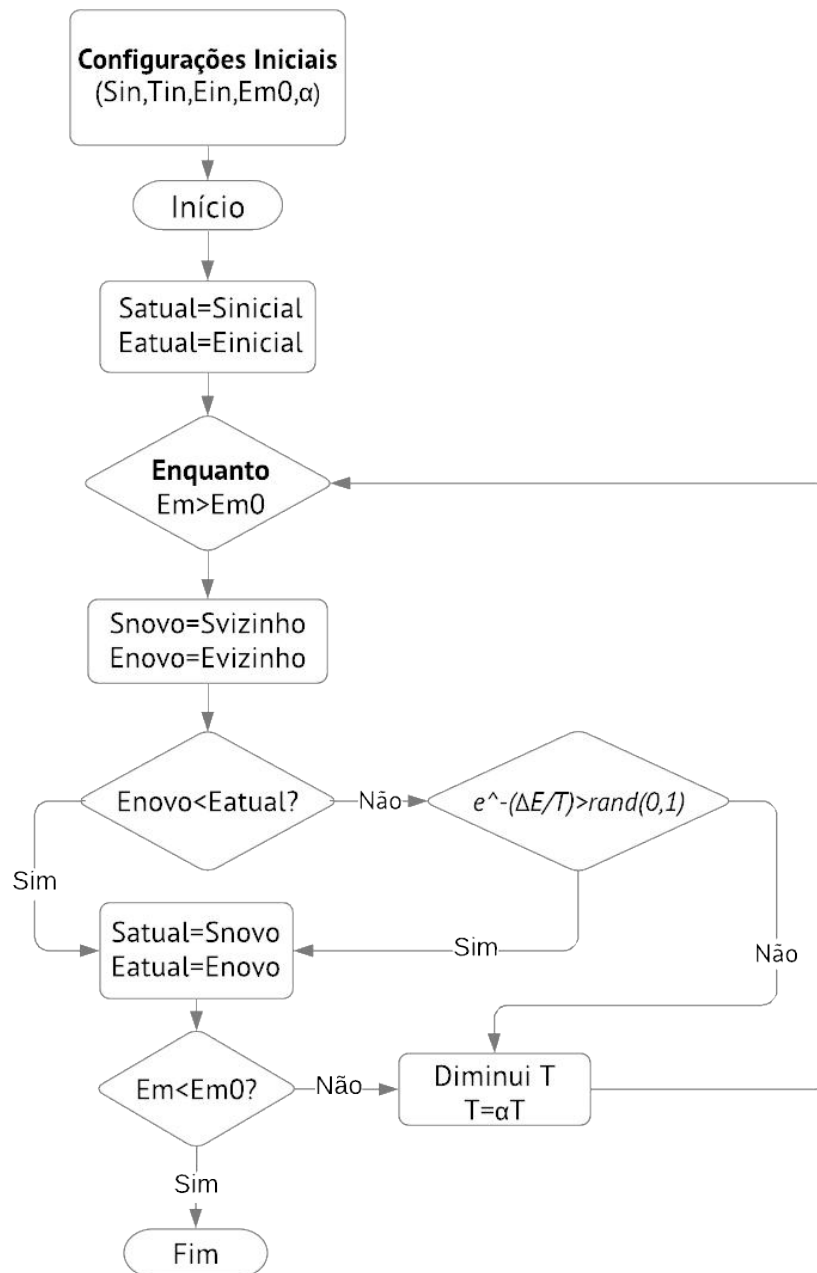
1. Se $\Delta E > 0$, implica que o novo resultado melhora a função objetivo, portanto, ele é aceito.

2. Se $\Delta E < 0$, a solução só será aceita, se $p > rand(1)$, ou seja, maior que uma distribuição uniforme entre 0 e 1.

A temperatura é decrescida conforme a execução do algoritmo, respeitando uma taxa de resfriamento α que é um valor menor que 1, como sugere (YANG, 2010). A Equação (13) demonstra a estratégia de decréscimo.

$$T = \alpha T_{anterior} \quad (13)$$

Utilizando a abordagem da probabilidade de Boltzman, o SA consegue evitar o confinamento em ótimos locais. Por meio da Equação (12), pode-se observar que a redução de temperatura acarreta na menor probabilidade de aceitar uma solução que seja pior, já para valores elevados de T , praticamente todas as soluções serão aceitas. A Figura 4 apresenta um pseudocódigo da rotina do *Simulated Annealing*.

Figura 4: Pseudo-Código do *Simulated Annealing*

Fonte: (Autoria Própria)

O circuito elétrico equivalente do MIT e o algoritmo SA foram abordados neste capítulo e serão utilizados em conjunto para a estimação de parâmetros. O Capítulo 3 abordará a metodologia utilizada na estimação de parâmetros que será aplicada em quatro motores diferentes

3 METODOLOGIA

O motor de indução é um elemento significativo no setor industrial, pois é responsável pela maior parte da força motriz dos processos. A estimação de parâmetros é importante, pois pode auxiliar nas análises de desempenho da máquina, bem como seu controle e acionamento. Nesse sentido, este trabalho tem o propósito de abordar a estimação de parâmetros por intermédio do método de otimização *Simulated Annealing*.

A implementação do algoritmo foi efetuada no Matlab®/Simulink®, para a estimação de parâmetros. O modelo do circuito elétrico equivalente do motor de indução foi executado em conjunto com o SA. Por meio do circuito elétrico realiza-se a aquisição de valores de corrente e a tensão de entrada. Simulou-se cada motor a vazio e com carga e obteve-se as respectivas velocidades, necessárias para calcular o escorregamento. As Equações (8) e (10) foram usadas para o cálculo de corrente esperada, obtida pelo *Simulink*®, e corrente estimada, utilizando os parâmetros obtidos pelo SA. Os parâmetros estimados foram: Resistência do estator (R_1), Resistência do rotor (R_2), Indutância de dispersão do estator (L_1), Indutância de dispersão do rotor (L_2) e Indutância mútua (L_m).

Inicialmente foram realizadas as configurações iniciais necessárias para o algoritmo SA. A temperatura inicial foi adotada neste trabalho para 30. Como descrito no trabalho de YANG (2010) quanto maior os valores de temperatura, mais soluções não satisfatórias serão aceitas, deste modo maior é o tempo de convergência, enquanto em níveis baixos de temperatura não há a garantia que ótimos locais serão evitados.

A taxa de resfriamento foi definida como 0.9 para que a temperatura diminuísse de forma lenta. Valores pequenos acarretariam o decréscimo rápido da temperatura e conseqüentemente, poderiam ocasionar uma convergência insatisfatória. Por outro lado, valores próximos de 1 aumentariam o tempo de simulação. Como solução inicial, foi configurado um vetor contendo os parâme-

tros iniciais do MIT a partir do qual o algoritmo iniciaria sua busca e adotou-se como solução inicial um vetor de números aleatórios.

Inicialmente a metodologia consistiu em adotar um intervalo de busca para cada motor individual. Sendo este intervalo correspondente a porcentagem de 5%, 10% ,50% e 100% do parâmetro da máquina que é conhecido pelo *Simulink*®.

A estipulação do espaço de busca limitado ao valor da máquina, que neste caso é conhecido, mas na prática não, torna a estimação restrita e não genérica para qualquer motor. Assim, como parte da estratégia deste trabalho, em estimar parâmetros desconhecidos de motores com potências diferentes (5HP à 150HP), foi adotado um intervalo de busca único para todos os motores, sendo este fundamentado nos maiores parâmetros do motor de 5HP e nos menores parâmetros do motor de 150HP do *Simulink*®. O intervalo escolhido se encontra na Tabela 1.

Tabela 1:Intervalo de busca único

Intervalo de busca

R_1	[0,01 1,5]
R_2	[0,02 1,5]
L_1	[0,00035 0,008]
L_2	[0,00035 0,008]
L_m	[0,01 0,3]

A cada iteração, efetuou-se uma busca dentro do intervalo estipulado para cada um dos parâmetros. A tomada de decisão em aceitar uma nova solução como sendo a melhor, foi efetuada conforme probabilidade e a rotina intrínseca do algoritmo descrita no capítulo 2. Como critério de parada fez-se o uso do erro quadrático médio, uma ferramenta comumente utilizada na estatística, que estima a média dos valores contidos em determinado vetor. O erro, Em_0 , utilizado é dado pela Equação (14).

$$Em_0 = \frac{1}{N} 0,5 \sum_{i=1}^N (Ir - Ie)^2 \quad (14)$$

Onde

Ir é a corrente esperada [A];

Ie é a corrente estimada [A];

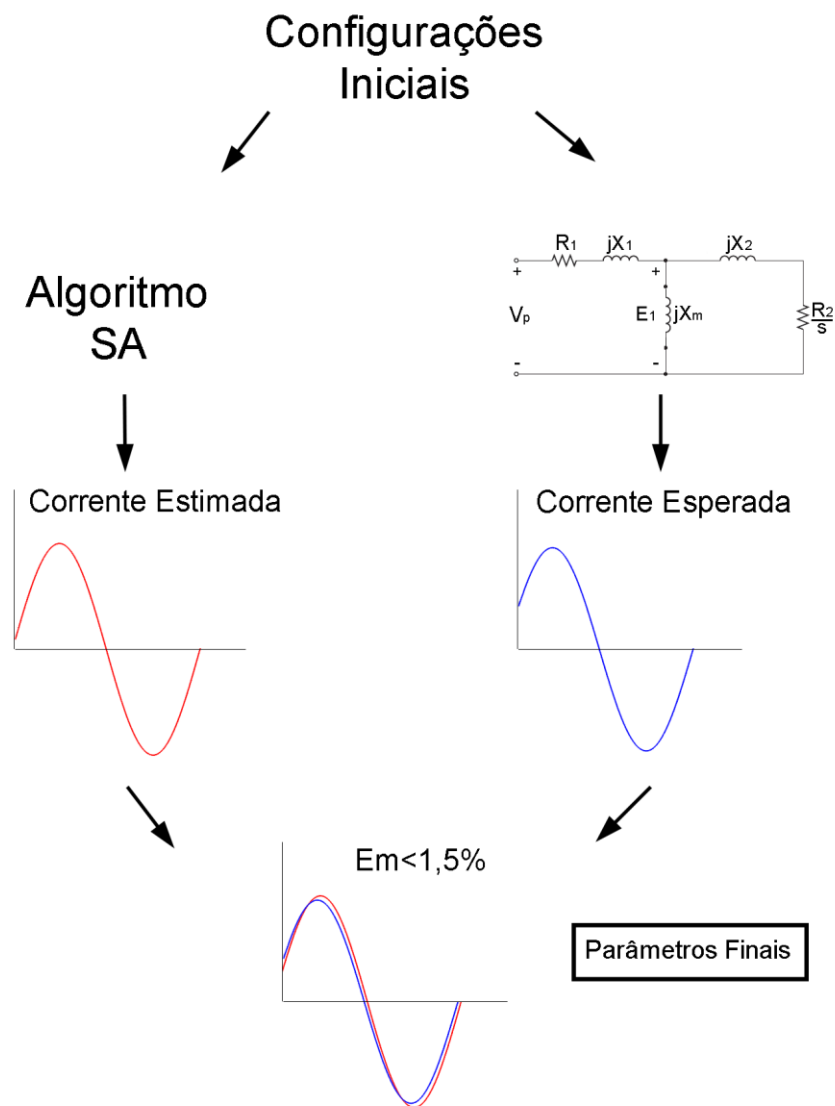
N é a quantidade de pontos do vetor de corrente estimada e esperada, ambos os vetores possuem mesma quantidade de pontos.

A cada execução do código foram encontrados os valores de resistência e indutância estimados pelo algoritmo. Conhecendo-se a tensão aplicada no motor e os novos parâmetros encontrados, efetuou-se o cálculo do valor de corrente e obteve-se um gráfico de corrente estimada.

O intervalo estipulado engloba os parâmetros de todos os motores analisados. Quando houve um erro quadrático alto entre as correntes, excedendo o critério de parada, e desta forma não permitindo a convergência, o intervalo de busca inicial foi reduzido. A redução força o algoritmo a buscar novos valores e sair do ponto estagnado. Desta forma evitam-se possíveis situações em que o algoritmo possa ficar preso em algum ponto do espaço de busca e não obter a estimação desejada.

Em conjunto com o SA foi simulado o circuito elétrico equivalente do motor cujo modelo está contido no *Simulink*®. O circuito elétrico foi configurado inicialmente com os parâmetros apresentados pelo modelo do *Simulink*® da máquina e, obteve-se então, a forma de onda de corrente para os parâmetros originais. Os valores de corrente estimados e originais foram comparados utilizando o erro quadrático médio, onde o processo se repetiu até que o erro fosse menor que 1,5%, encontrando assim os valores de parâmetros que satisfizessem esse critério. A Figura 5 ilustra o esquemático da metodologia realizada.

Figura 5: Esquemático da metodologia realizada



Fonte: Autoria Própria

Realizou-se a estimação de parâmetros através do SA para 4 diferentes motores que possuem modelos disponíveis do *Simulink*®, cujas características dos motores são apresentadas na Tabela 2. Os maiores parâmetros do motor de 5HP e os menores do motor de 150HP, foram adotados como referência para a estimação dos demais motores e a partir dos valores de seus parâmetros foi definido um intervalo de busca único.

Tabela 2: Características dos motores utilizados

Motores	Motor 1	Motor 2	Motor 3	Motor 4
Potência (HP)	5	50	20	150
Tensão(V)	460	460	575	575
Número de Polos	4	4	4	4
Resistência do estator(Ω)	1,115000	0,099610	0,454000	0,045870
Indutância do estator(H)	0,005974	0,000867	0,002915	0,000424
Resistência do rotor(Ω)	1,083000	0,058370	0,293800	0,026340
Indutância do rotor(H)	0,005974	0,000867	0,002915	0,000424
Indutância mútua(H)	0,203700	0,030390	0,107700	0,015990

Fonte: Matlab®/Simulink

O presente trabalho faz as análises considerando o circuito elétrico equivalente do motor, sendo assim todas as observações são referentes ao regime permanente da máquina. Para aprimorar a estimação de parâmetros, efetuou-se as simulações em duas condições de operação para cada motor, sendo um ensaio a vazio e um ensaio com carga nominal. Desta forma, pode-se analisar dois momentos diferentes de operação obtendo a mesma resposta e garantindo uma melhor estimação.

Como estratégia de estimação, realizou-se primeiro o ensaio a vazio, posteriormente o ensaio com duas curvas: a vazio e nominal e por fim o ensaio com duas condições de operação e R_1 fixo. Os resultados dos ensaios e comparações são apresentados na Seção 4.

Para a condição nominal inseriu-se o valor de torque nominal correspondente a cada motor em sua respectiva simulação. O valor do torque foi calculado de acordo com a Equação (15).

$$T = \frac{745,6P_n}{\omega_m} \quad (15)$$

Onde:

P_n é a potência nominal do motor [HP];

ω_m é a velocidade nominal [rad/s].

Em cada simulação, a vazio e com carga nominal, examinou-se a velocidade correspondente e, para cada motor, foi necessário calcular o escorregamento dado pela Equação (2). A velocidade síncrona, Equação (1), foi calculada considerando a frequência de 60Hz e a quantidade de polos de cada motor. Da simulação realizada no *Simulink*® foi obtido o vetor de tensão necessário para calcular a corrente estimada para comparação com a corrente apresentada do modelo do *Simulink*®.

Cada ciclo da simulação contém 1667 pontos, considerando a frequência do sinal analisado 60Hz igual à da rede, tem-se que a taxa de aquisição dos dados foi de 100kHz.

Este Capítulo foi dedicado à abordagem da modelagem utilizado para estimação de parâmetros do motor de indução em conjunto com o SA, conceituando a rotina da implementação realizada. No Capítulo 4, serão descritos os resultados das estimações com o algoritmo proposto considerando 4 motores.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo aborda as discussões dos resultados obtidos na estimação para as diversas simulações realizadas. São elas: Simulação em uma condição de operação do MIT: Motor a vazio, Simulação em duas condições de operação: A vazio e com carga nominal em regime permanente, e Simulação em duas condições de operação e R_1 fixo. Todas as simulações foram executadas com um intervalo de busca único demonstrado na Tabela 1.

A simulação mantendo o valor de R_1 fixo foi realizada a fim de verificar alteração na precisão da convergência, pois na prática este valor tende a ser fácil de ser medido.

Foram feitas 10 estimações em cada simulação e calculou-se a média e o desvio padrão dos valores dos parâmetros estimados. Observou-se a quantidade de iterações, que avalia a velocidade de convergência do algoritmo e os gráficos de corrente estimada e esperada. Os resultados obtidos para cada motor são apresentados neste capítulo.

Na Tabela 3, encontram-se a média e o desvio padrão dos valores de parâmetros estimados para o motor de 5HP para as duas condições de operação com e sem R_1 fixo, e a condição com um estado de operação: a vazio. Há também a média da diferença percentual de cada parâmetro em relação ao valor esperado.

Tabela 3: Média de 10 estimações para o Motor de 5HP

Vetor Referência	1,115	1,083	0,005974	0,005974	0,2037
	$R_1(\Omega)$	$R_2(\Omega)$	$L_1(H)$	$L_2(H)$	$L_m(H)$
	Uma condição de operação: A vazio				
Parâmetros Estimados	0,413331	0,242489	0,002626	0,002626	0,028958
Desvio Padrão	0,1125	0,161041	0,00218	0,00218	0,002073
Diferença (%)	314,9491	325,6131	227,2381	227,2381	6,041942
	Duas condições de operação: A vazio e carga nominal				
Parâmetros Estimados	0,62198	1,28653	0,00471	0,00471	0,24931
Desvio Padrão	0,68450	0,14983	0,00340	0,00340	0,02892
Diferença (%)	65,36721	20,51899	51,82695	51,82695	23,67392
	Duas condições de operação e R_1 fixo				
Parâmetros Estimados		1,20335	0,00410	0,00410	0,24742
Desvio Padrão		0,19704	0,00384	0,00384	0,03189
Diferença (%)		18,43314	60,86616	60,86616	23,03462

Fonte: Autoria própria

A Tabela 4 apresenta a média da quantidade de iterações e do erro quadrático médio, o critério de parada, para cada simulação.

Tabela 4: Iterações e Erro médio para o motor de 5HP – 10 estimações

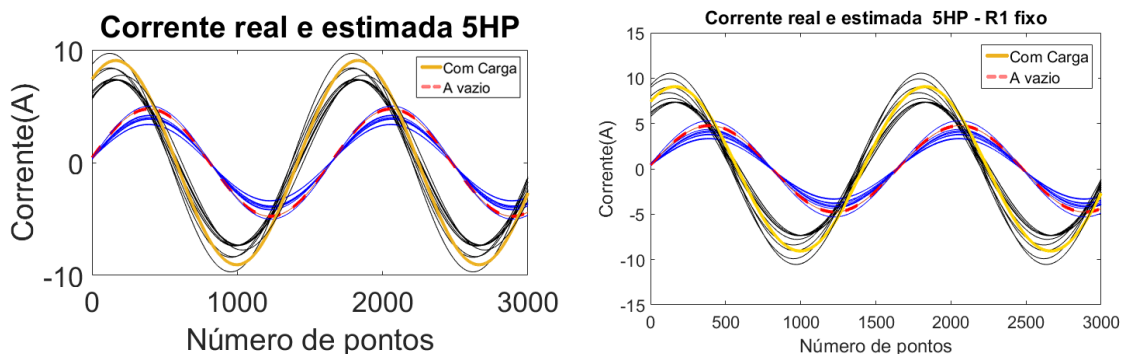
	Sem R_1 fixo	Com R_1 fixo	A vazio
Iterações	2551	2487	3465
Erro quadrático médio	0,01379	0,01389	0,01109

Fonte: Autoria própria

A Figura 6 exibe os gráficos de corrente esperada e estimada nas duas condições de operação, para o motor de 5HP com e sem R_1 fixo. A Figura 7

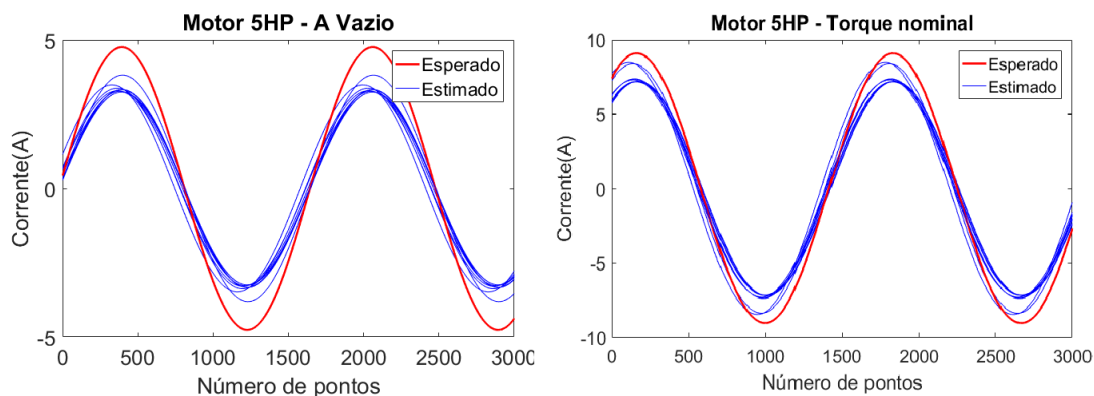
apresenta as curvas para a condição a vazio. Em cada gráfico, há o total de 10 curvas referentes à quantidade de estimações realizadas e sua respectiva curva de referência. O erro percentual entre as curvas, das Figuras 6 e 7, é de 1,5% que foi adotado como critério de parada do algoritmo.

Figura 6: Gráficos de Corrente para o motor de 5HP com e sem R1 fixo



Fonte: Autoria própria

Figura 7: Gráficos de Corrente para o motor de 5HP condição a vazio e nominal



Fonte: Autoria própria

Na Tabela 3, pode-se notar que os parâmetros melhores estimados foram a resistência do rotor R_2 e a indutância mútua L_m para as simulações com duas condições de operação. De acordo com o desvio padrão pode-se afirmar que não houve distâncias significativas entre as amostras, ou seja, elas se encontram em geral em torno do valor médio.

Para a simulação a vazio nota-se valores altos em relação às diferenças percentuais de cada parâmetro, com exceção da indutância mútua que em geral é o parâmetro melhor estimado e garante a convergência do método. Estas ocorrências apoiam a justificativa de não utilizar somente uma condição de

operação para estimar os parâmetros, pois isto afeta na precisão da estimação de todos os parâmetros.

Na Tabela 4, observa-se que conhecendo R_1 não há alteração significativa em questão de velocidade de convergência e precisão de resultado, para este motor. Na simulação com apenas uma condição de operação nota-se menor erro quadrático médio, mas isto não reflete em uma estimação individual satisfatória de cada parâmetro.

Nas Figuras 6 e 7 são mostradas as diferenças de corrente estimada e a esperada para todas as simulações. Observa-se que para este motor, há divergências significativas entre as curvas em todas as situações. Ainda na Figura 7, há a presença da curva com torque nominal, nota-se que ambas as situações com uma condição de operação somente, não produzem resultados satisfatórios.

O motor de 5HP foi escolhido como uma das referências para a escolha do intervalo único, devido a isto a convergência ocorre de forma mais rápida, porém não necessariamente estima bem todos os parâmetros. Sendo assim, a impedância equivalente pode possuir uma divergência significativa do valor esperado e este fato é refletido no gráfico de corrente. Estes erros podem ser reduzidos, diminuindo a condição de critério de parada do algoritmo, forçando-o a encontrar valores mais próximos aos esperados.

A Tabela 5 apresenta o resultado para o motor de 5HP, considerando uma estimação e simulação com duas condições de operação, onde o critério de parada foi adotado para um erro menor que 0,15% entre a curva estimada e a esperada.

Tabela 5: Uma estimacão feita para o motor de 5HP

	<i>Duas condioes de operao e erro < 0,15%</i>				
	<i>R₁ (Ω)</i>	<i>R₂ (Ω)</i>	<i>L₁ (H)</i>	<i>L₂ (H)</i>	<i>L_m (H)</i>
<i>Parâmetros Estimados</i>	0,8018	1,11962	0,0007	0,0007	0,2054
<i>Diferença (%)</i>	28,0877	3,3795	88,282	88,282	0,8386

Fonte: Autoria própria

Como pode ser analisado, os valores obtidos para um critério de parada menor, produzem diferenças percentuais menores para a maioria dos parâmetros. Porém, esta alterao acarreta o aumento do tempo da simulao,

A Tabela 6 demonstra os resultados de estimacão para o motor de 50HP e a Tabela 7 apresenta as informaçoes acerca de velocidade e exatidão da convergência. Nas Figuras 8 e 9, são exibidos os gráficos de corrente esperada e estimada para o motor de 50HP, contendo 10 curvas cada um e a curva de referência, sendo o erro percentual entre elas de 1,5%.

Tabela 6: Média de 10 estimações para o Motor de 50HP

Vetor Referência	0,099610	0,058370	0,000867	0,000867	0,030390
	$R_1 (\Omega)$	$R_2 (\Omega)$	$L_1 (H)$	$L_2 (H)$	$L_m (H)$
Uma condição de operação: A vazio					
Parâmetros Estimados	0,564514	0,736448	0,004555	0,004555	0,264371
Desvio Padrão	0,657702	0,581005	0,003543	0,003543	0,054261
Diferença (%)	68,44171	55,41569	54,31076	54,31076	35,86138
Duas condições de operação: A vazio e carga nominal					
Parâmetros Estimados	0,21485	0,05680	0,00097	0,00097	0,02999
Desvio Padrão	0,24880	0,00391	0,00030	0,00030	0,00101
Diferença (%)	149,27312	4,70167	26,40662	26,40662	2,97373
Duas condições de operação e R_1 fixo					
Parâmetros Estimados		0,05812	0,00086	0,00086	0,03042
Desvio Padrão		0,00056	0,00012	0,00012	0,00067
Diferença (%)		0,87352	10,17659	10,17659	1,75166

Fonte: Autoria própria

Tabela 7: Iterações e Erro médio para o motor de 50HP – 10 estimações

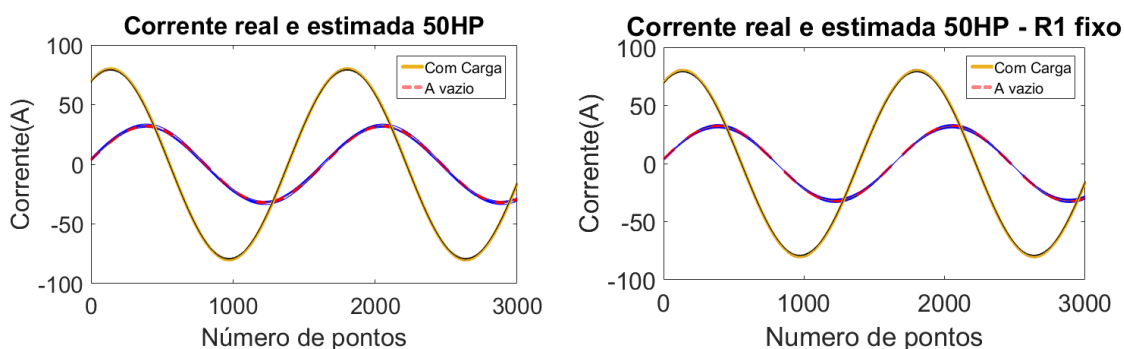
	Sem R_1 fixo	Com R_1 fixo	A vazio
Iterações	20744	9233	372
Erro médio	0,01089	0,00724	0,00907

Fonte: Autoria Própria

Na Tabela 6, observa-se que a resistência do estator teve a maior diferença percentual e novamente a indutância mútua e a resistência do rotor possuíram os menores valores percentuais. Para este motor nota-se uma diferença em relação ao motor anterior, mantendo R_1 fixo a estimação foi melhor considerando os resultados individuais, o número de iterações e o erro quadrático médio. A vazio, por sua vez, apresentou valores maiores em relação aos resultados com duas condições de operação, mesmo possuindo menor quantidade de iterações.

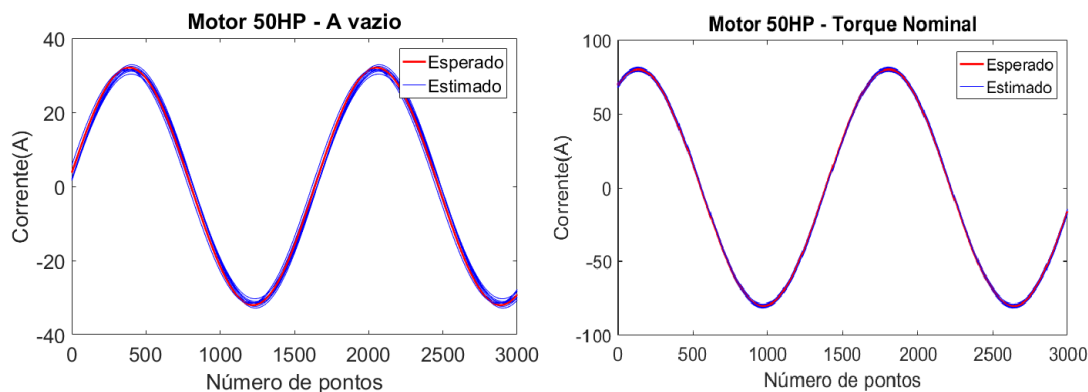
O desvio padrão apresentou valores altos em algumas situações, como exemplo: resistência do estator com duas condições de operação, o que demonstra que houve um considerável distanciamento entre as estimações deste parâmetro. Para os demais parâmetros em geral houve homogeneidade entre as amostras.

Figura 8: Gráficos de Corrente para o motor de 50HP com e sem R_1 fixo



Fonte: Autoria Própria

Figura 9: Gráficos de Corrente para o motor de 50HP condição a vazio e nominal



Fonte: Autoria Própria

Nas Figuras 8 e 9 pode-se notar uma boa aproximação entre as curvas esperada e estimada em todos os casos, indicando que para o erro de 1,5% adotado como critério de parada, para este motor apresentou uma maior aproximação entre corrente esperada e corrente estimada. Uma atenção maior deve ser dada a simulação com duas condições de operação que produz melhores resultados individuais como observado no motor anterior. Embora os gráficos com uma operação somente, exibidos na Figura 9, apresentem curvas próximas, existem diferenças percentuais significativas nos parâmetros individuais, o que torna inviável a escolha de somente uma condição de operação para a estimação.

Nas Tabelas 8 e 9 são descritas as informações para motor de 20HP e nas Figuras 10 e 11 são mostrados os respectivos gráficos, contendo as 10 curvas das estimações realizadas, as curvas de referência e erro percentual de 1,5%.

Tabela 8: Média de 10 estimações para o Motor de 20HP

Vetor Referência	0,454000	0,293800	0,002915	0,002915	0,107700
	$R_1 (\Omega)$	$R_2 (\Omega)$	$L_1 (H)$	$L_2 (H)$	$L_m (H)$
	Uma condição de operação: A vazio				
Parâmetros Estimados	0,748463	0,565716	0,003043	0,003043	0,126526
Desvio Padrão	0,320406	0,289965	0,002321	0,002321	0,013161
Diferença (%)	91,98754	96,15704	75,24017	75,24017	20,21435
	Duas condições de operação: A vazio e carga nominal				
Parâmetros Estimados	0,33130	0,29804	0,00185	0,00185	0,10156
Desvio Padrão	0,06059	0,01880	0,00105	0,00105	0,00444
Diferença (%)	27,02553	4,56173	37,72872	37,72872	6,38398
	Duas condições de operação e R_1 fixo				
Parâmetros Estimados		0,29694	0,00244	0,00244	0,09877
Desvio Padrão		0,01850	0,00078	0,00078	0,00392
Diferença (%)		4,83419	17,43267	17,43267	8,28938

Fonte: Autoria Própria

Tabela 9: Iterações e Erro médio para o motor de 20HP – 10 estimações

	Sem R_1 fixo	Com R_1 fixo	A vazio
Iterações	1890	1107	205
Erro médio	0,01176	0,01274	0,01101

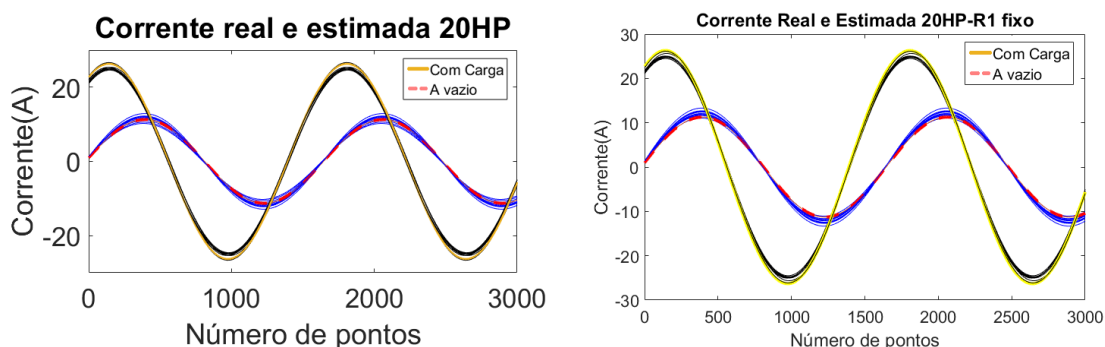
Fonte: Autoria Própria

Nas Tabelas 8 e 9, percebe-se uma boa estimacão para as duas condioes de operao, o que não se reflete na simulao a vazio. Os parâmetros de indutância de estator e rotor para todos os motores possuem diferenças maiores, porém não são requisitos para garantir a convergência. Uma veloci-

dade maior é obtida quando R_1 é fixo. Os parâmetros melhores estimados novamente foram indutância mútua e resistência do rotor.

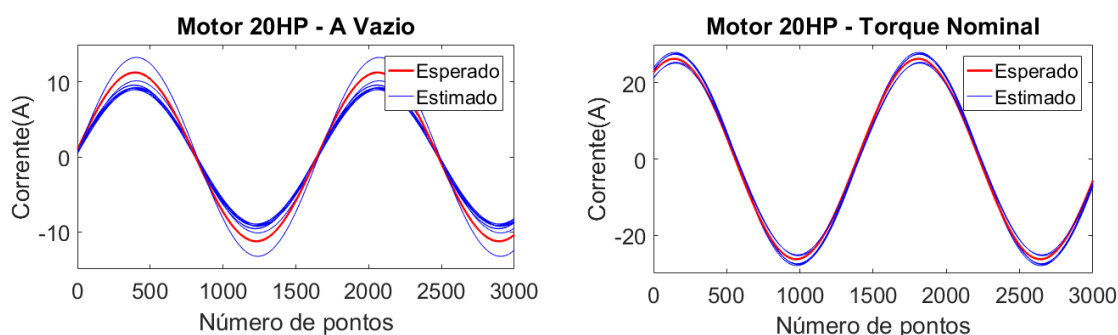
O desvio padrão possuiu valores maiores no parâmetro de resistência do estator, o que indica uma maior dificuldade de estimação para este parâmetro, considerando o distanciamento entre as amostras.

Figura 10: Gráficos de Corrente para o motor de 20HP com e sem R_1 fixo



Fonte: Autoria Própria

Figura 11: Gráficos de Corrente para o motor de 20HP a vazio e nominal



Fonte: Autoria Própria

Nota-se uma boa aproximação entre as curvas na Figura 10, refletindo os resultados satisfatórios, para o erro percentual de 1,5% entre as curvas, apresentados na tabela correspondente ao motor. Enquanto na Figura 11 há divergência significativa nas simulações a vazio e com torque nominal, demonstrando um distanciamento da impedância equivalente esperada e a estimada, e a diferença percentual dos parâmetros como observado na Tabela 8.

Nas Tabelas 10 e 11, são apresentadas as informações da estimação para o motor de 150HP. Nas Figuras 12 e 13 são exibidos os gráficos de cor-

rente estimada e esperada contendo as 10 curvas estimadas e a curva de referência em cada gráfico.

Tabela 10: Média de 10 estimações para o motor de 150HP

Vetor Referência	0,045870	0,026340	0,000424	0,000424	0,015990
	$R_1(\Omega)$	$R_2(\Omega)$	$L_1(H)$	$L_2(H)$	$L_m(H)$
	Uma condição de operação: A vazio				
Parâmetros Estimados	0,539958	0,405721	0,001724	0,001724	0,014523
Desvio Padrão	0,350303	0,307063	0,001787	0,001787	0,00154
Diferença (%)	1086,806	1461,995	315,431	315,431	9,176683
	Duas condições de operação: A vazio e carga nominal				
Parâmetros Estimados	0,06283	0,02615	0,00042	0,00042	0,01588
Desvio Padrão	0,00150	0,00015	0,00002	0,00002	0,00009
Diferença (%)	36,98118	0,72429	4,29668	4,29668	0,82188
	Duas condições de operação e R_1 fixo				
Parâmetros Estimados		0,02629	0,00041	0,00041	0,01592
Desvio Padrão		0,00009	0,00000	0,00000	0,00018
Diferença (%)		0,38139	4,31530	4,31530	1,12337

Fonte: Autoria Própria

Tabela 11: Iterações e Erro médio para o motor de 150HP – 10 estimações

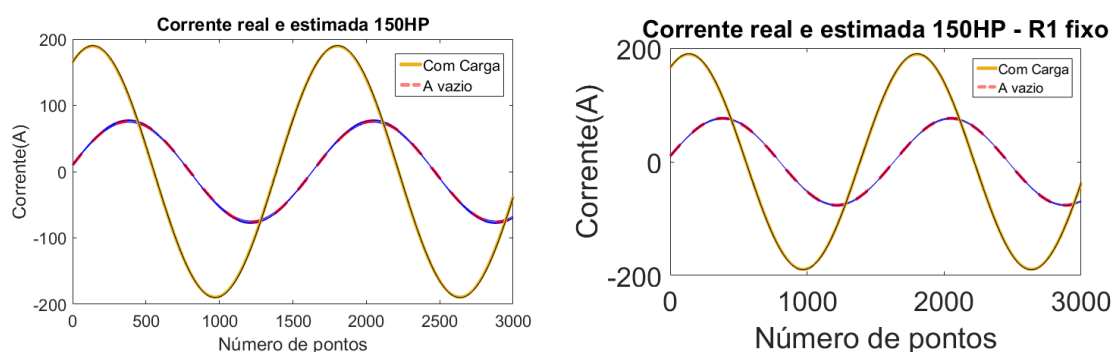
	Sem R_1 fixo	Com R_1 fixo	A vazio
Iterações	10290	5922	318
Erro médio	0,00324	0,00633	0,0079

Fonte: Autoria Própria

O mesmo padrão do motor anterior pode ser verificado nas Tabelas 10 e 11. A indutância mútua e a resistência do estator são os parâmetros com melhor estimativa, há interferência na convergência e na precisão de estimativa

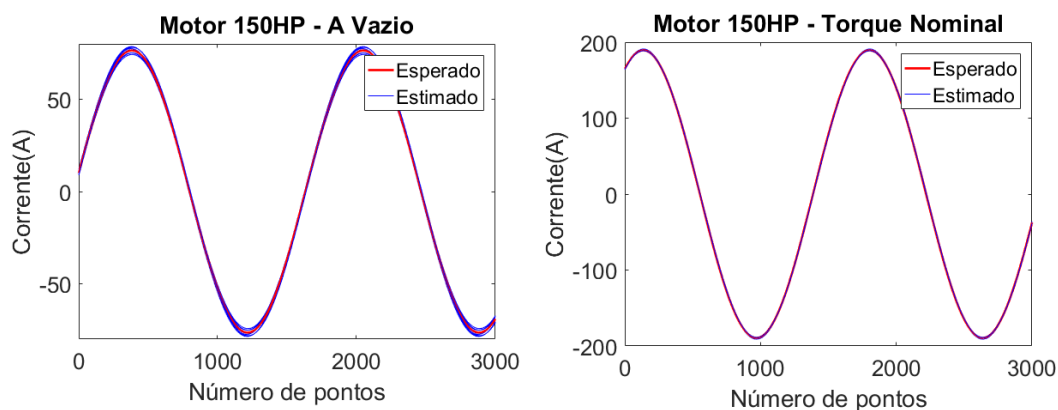
quando R_1 é fixo e as amostras possuem certa homogeneidade em relação a média. A simulação a vazio, embora possuindo menor média de iterações e erro menor, apresenta valores altos de diferenças percentuais, enquanto a simulação com duas condições de operação exibe resultados satisfatórios para os parâmetros individuais.

Figura 12: Gráficos de Corrente para o motor de 150HP com e sem R_1 fixo



Fonte: Autoria Própria

Figura 13: Gráficos de Corrente para o motor de 150HP a vazio e nominal



Fonte: Autoria Própria

A Figura 12 exibe um comportamento esperado de acordo com os resultados demonstrados nas tabelas referentes ao motor de 150HP, curvas bem próximas, demonstrando uma aproximação satisfatória de impedância equivalente e individual, para o critério de parada de 1,5% de diferença entre as curvas.

A Figura 13 apresenta curvas próximas, validando o critério de parada de 1,5% para este motor, mas novamente os erros individuais para a simulação

com uma condição de operação não foram satisfatórios de maneira geral. Este fato reforça a estimação com duas condições de operação, para que além de uma impedância equivalente satisfatória seja alcançada, o mesmo possa acontecer com os valores individuais.

Para todos os motores houve resultados satisfatórios de estimação, individual e de impedância equivalente. Pode-se observar que estratégia adotada de reduzir o intervalo de busca inicial, a fim de evitar que o algoritmo ficasse preso em determinado ponto se mostrou melhor para os motores com parâmetros pequenos, que alcançaram diferenças médias de até 0,38139%.

A indutância mútua é crucial para a convergência do algoritmo, observa-se que mesmo em casos que houve altas diferenças percentuais e as curvas ficaram distantes da esperada, o valor deste parâmetro foi o melhor estimado e houve convergência de acordo com o critério estabelecido.

O parâmetro R_1 apresenta relevância em questão de convergência e de precisão dos resultados. Nas simulações com duas condições de operação e este parâmetro fixo, houve diferenças percentuais individuais, como apresentado nas tabelas 3, 6, 8 e 10, menores comparadas as simulações em que o parâmetro não era fixo.

De acordo com os resultados obtidos, ainda é possível observar que os parâmetros de indutância do estator e do rotor, não são tão significativas para garantir que haja a convergência do algoritmo, dentro do critério de parada estabelecido. Este fato pode ser visualizado em casos que houve a convergência, porém L_1 e L_2 , possuíram diferenças percentuais individuais maiores, a título de exemplo as estimações no motor de 20HP, que possuíram diferenças de 17,4% e 37,7%.

O fato notado, referente à relevância dos parâmetros de indutância do estator e do rotor, foi importante na decisão da estratégia de reduzir o espaço de busca. Garantindo que o intervalo de cada parâmetro fosse reduzido de maneira individual, pode-se obter uma boa estimação para todos os parâmetros sem exceção. Do contrário a convergência ocorreria, porém somente alguns parâmetros seriam bons, como exemplo: a indutância mútua.

Analisando o desvio padrão, houve homogeneidade entre as amostras em torno da média para a maioria dos parâmetros. Os valores maiores desta ferramenta estatística foram apresentados na resistência do estator R_1 . Pode-se concluir que é uma boa estratégia adotar R_1 fixo, já que há a dispersão das estimações em torno da média.

Como parte da abordagem, escolheu-se adotar um critério de parada único para todos os motores. Isto pode ocasionar algumas diferenças maiores do resultado esperado, pois cada motor possui sua particularidade, valores diferentes e sensibilidade diferente ao critério de parada. Isto foi observado no motor de 5HP que apresentou maiores erros e maior distanciamento entre as curvas estimadas e esperada em relação aos outros motores. Porém, isto pode ser corrigido adotando um critério de parada menor, de maneira a forçar o algoritmo a convergir para valores que produzam uma corrente mais próxima da esperada e conseqüentemente parâmetros mais próximos dos esperados, sob um custo de aumento de tempo de simulação.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo do estudo foi realizar um método de estimação de parâmetros em máquinas elétricas, particularmente os motores de indução trifásicos, considerando sua importância e participação no cenário industrial. Para isto foi utilizado a meta-heurística *Simulated Annealing*, aplicando a metodologia em quatro diferentes motores. A proposta apresenta um diferencial de usar um intervalo único considerando os maiores parâmetros do motor de 5HP e os menores parâmetros do motor de 150HP.

Os resultados encontrados, demonstrados na forma de tabelas e gráficos, sugerem que o algoritmo SA pode ser uma boa ferramenta na estimação de parâmetros. A estratégia de redução do intervalo inicial, aliado a simulação com duas condições de operação, a vazio e com carga, com ou sem a resistência do estator fixo, obteve valores satisfatórios, que alcançaram uma média de até 0,38139% de diferença percentual em relação ao valor esperado.

Os erros maiores apresentados, como vistos no motor de 5HP, podem ser melhorados, diminuindo o critério de parada, o que pode ser um fator particular para cada motor. Desta forma a metodologia apresentada é válida e pode ser mais uma ferramenta para estimação de parâmetros.

REFERÊNCIAS

BARIONI, L. GUSTAVO, I. **Modelagem dinâmica e otimização meta-heurística para apoio à tomada de decisões na recria e engorda de bovinos de corte.** 2009.

BAZAN, G.H; **Medidas de informação e sistemas inteligentes aplicados no diagnóstico de curto-circuito do estator de motores de indução trifásicos.** – 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio.

BAZAN, G. H. SCALASSARA, P. R. ENDO, W. GOEDEL, A. PALÁCIOS, R. H. C. GODOY, W. F. **Stator fault analysis of three-phase induction motors using information measures and artificial neural networks.** *Electric Power Systems Research*, Elsevier, v. 143, p. 347–356, 2017.

BAZAN, G. H. SCALASSARA, P. R. ENDO, W. GOEDEL, A. PALÁCIOS, R. H. C. GODOY, W. F. **Stator Short-Circuit Diagnosis in Induction Motors Using Mutual Information and Intelligent Systems.** *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 4, pág. 3237-3246, 2018.

BOUDISSA, E.; BOUNEKHLA, M. **Genetic algorithm with dynamic selection based on quadratic ranking applied to induction machine parameters estimation.** *Electric Power, Components and Systems*, Taylor & Francis, v. 40, n. 10, p. 1089–1104, 2012.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas.** AMGH Editora, 2013.

DUAN, F.; ZIVANOVIC, R. **Induction motor stator faults diagnosis by using parameter estimation algorithms.** *IEEE International Symposium. Conference: Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED).* 2013

FILHO, E. R.; ALMEIDA, A.T.L. **Estimação de parâmetros e determinação de características de desempenho de motores de indução trifásicos de rotor em gaiola.** *SBA Controle & Automação* Vol.8 no. 1.1997

GODOY, W.F; SILVA, I.N; GOEDEL, A.; PALACIOS, R.H.C. **Evaluation of stator winding faults severity in inverter-fed induction motors**. Electric Power Systems Research, Elsevier, v. 32, p. 420–431, 2015.

GUEDES, J. J. **Identificação de falhas de curto-circuito de estator em motores de indução trifásicos utilizando evolução diferencial**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio

GUEDES, J. J; AGULHARI, C. M.; CASTOLDI, M.F.; GOEDEL, A.; SANCHES, D.S. **Parameters estimation of three-phase induction motors using differential evolution**. Electric Power Systems Research, Elsevier, v. 154, p. 204–212, 2018.

LEME, M. O. **Metodologia de manutenção preditiva para motores elétricos baseada em monitoramento de variáveis físicas e análise multicritério**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa

LIAO, W.; LI, D.; CUI, S.; **A heuristic optimization algorithm for HMM based on SA and EM in machinery diagnosis**. Spring Science + Business Media V. 29, p 1845–1857, 2016.

LUZIA, L. F.; RODRIGUES, M. C. **Introdução ao Escalonamento e Aplicações: Estudo sobre as Meta-heurísticas**. 2012. Disponível em: <<https://www.ime.usp.br/~gold/cursos/2009/mac5758/LeandroMauricioHeuristica.pdf>>. Acesso em 8 de out. 2019

METROPOLIS, N. ROSENBLUTH, A. W., TELLER, A. H., TELLER, E. **Equation of state calculations by fast computing machines**. J Chem. Phys. V 21 1087-1092, 1954.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Anuário estatístico de energia elétrica 2018 ano base 2017**. Rio de Janeiro. 2018

RIBEIRO, G. V. **Planejamento de rede de distribuição de energia elétrica com restrições geográficas e elétricas**. Goiânia. 2009. 95f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Computação). Universidade Federal de Goiás.

SAUER, I. L.; TATIZAWA, H.; SALOTTI, F. A. M.; MERCEDES, S. S. **A comparative assessment of Brazilian electric motors performance with minimum efficiency standards**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 41, p. 308 – 318, 2015.

SOARES, A; JÚNIOR, F.R.C; ROMERO, J. F. A. **Identificação dos parâmetros elétricos de um motor de corrente alternada**.2006. Disponível em: <http://www.bibl.ita.br/xiiencita/ELE-05.pdf>>. Acesso em 20 out. 2019

TALBI, EL G. **Metaheuristics: From Design to implementation**. New Jersey:Wiley, 2009. 624 pág.

UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. AMGH, 2014. 7ed Porto Alegre.

YANG, X. S. **Engineering optimization An Introduction with Metaheuristic Applications**. Canadá, 2010, 377 pág.