

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
ENGENHARIA ELÉTRICA

ANA BEATRIZ RODRIGUES

**OTIMIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM ACIONAMENTO V/F  
UTILIZANDO EVOLUÇÃO DIFERENCIAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO  
2016

ANA BEATRIZ RODRIGUES

**OTIMIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM ACIONAMENTO V/F  
UTILIZANDO EVOLUÇÃO DIFERENCIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 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  
2016



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

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Ana Beatriz Rodrigues**

**Análise da eficiência energética de um acionamento V/f utilizando evolução diferencial**

Trabalho de conclusão de curso apresentado às hs do dia 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. Dr. Marcelo Favoretto Castoldi - Presidente (Orientador)

---

Prof. Dr. Alessandro Goedel - (Membro)

---

Prof. Dr. André Luís Shiguemoto - (Membro)

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

Dedico este trabalho aos meus pais Aderson e Suely, por toda dedicação,  
apoio e confiança.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à Deus e à Nossa Senhora Aparecida.

Aos meus pais Aderson e Suely que fizeram mais por mim do que por eles próprios durante estes anos, meus exemplos de força e honestidade. Sempre me apoiaram nas minhas decisões, principalmente em questões acadêmicas, o que me trouxe ao sonho de cursar engenharia em uma universidade pública.

Agradeço aos meus irmãos Afranio e Adeilton que foram base da minha formação e graças a eles sou quem sou.

Ao meu namorado Victor, por estar sempre ao meu lado nos momentos de estresse e tristeza me incentivando a ser mais forte e paciente. Também por cada risada e descontração nos momentos de alegrias, com você as coisas se tornam mais fáceis.

Agradeço as minhas tias Eni e Jacira que sempre agem como minhas mães, com todo amor e carinho.

A todos os familiares que de alguma forma me ajudaram na minha formação acadêmica e pessoal.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Marcelo Favoretto Castoldi, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória. O qual foi um dos grandes responsáveis pela realização deste sonho e sei que ainda me auxiliará na realização de mais sonhos em trabalhos futuros.

Agradeço ao Prof. Dr. Alessandro Goedel por ter disponibilizado o Laboratório de Sistemas Inteligentes, sem o qual não seria possível a realização experimental deste trabalho.

Ao Prof. Me. Clayton Graciola por ter cooperado na elaboração experimental do trabalho, o qual foi de suma importância.

Agradeço aos meus amigos, aos que passaram e aos que permaneceram, sejam eles de infância, de festa, de faculdade ou de todas as horas, cada um de alguma forma contribuiu para a realização deste sonho e serei eternamente grata.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização deste sonho chamado engenharia elétrica.

A persistência é o caminho do êxito.

Charles Chaplin

## RESUMO

RODRIGUES, Ana Beatriz. **Otimização da eficiência energética de um acionamento v/f utilizando evolução diferencial**. 2016. 69 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2016.

O motor de indução trifásico é amplamente utilizado na indústria, sendo que em muitas vezes é operado com cargas muito abaixo da carga nominal, ocasionando a diminuição da eficiência energética. Uma estratégia para o aumento da eficiência energética consiste em controlar o fluxo de entreferro da máquina por meio de um *driver* escalar. Assim, este trabalho propõe o uso de um algoritmo de Evolução Diferencial para otimização do fluxo de entreferro, com o objetivo de aumentar a eficiência do motor de indução trifásico. Resultados de simulação e experimentais são apresentados para validar a metodologia proposta.

**Palavras-chave:** Motor de indução trifásico. Eficiência energética. *Driver* escalar. Evolução Diferencial.

## ABSTRACT

RODRIGUES, Ana Beatriz. **Energy efficiency optimization of a drive v/f using differential evolution.** 2016. 69 f. Completion of Course Work – Electrical Engineering Graduate. Technological University Federal of the Paraná. Cornélio Procopio, 2016.

The three-phase induction motor is widely used in industry, and oftenly operated with loads far below the rated load, resulting in decreased energy efficiency. A strategy for increasing energy efficiency is to control the air-gap flux of the machine through a scalar driver. This work proposes the use of an algorithm Differential Evolution to optimize the air-gap flux, in order to increase the three-phase induction motor efficiency. Simulation and experimental results are presented to validate the proposed methodology.

**Keywords:** Three-phase induction motor. Energy efficiency. Driver scalar. Differential Evolution.



## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Circuito equivalente monofásico de um motor de indução ..... | 21 |
| Figura 2 – Circuito equivalente de Thévenin .....                       | 21 |
| Figura 3 – Curvas de torque para diferentes valores de frequência ..... | 24 |
| Figura 4 – Representação da mutação .....                               | 26 |
| Figura 5 – Representação do cruzamento .....                            | 27 |
| Figura 6 – Fluxograma da Evolução Diferencial .....                     | 28 |
| Figura 7 – Estrutura de desenvolvimento do trabalho .....               | 30 |
| Figura 8 – Pontos de operação .....                                     | 32 |
| Figura 9 – Estrutura de desenvolvimento do ED .....                     | 33 |
| Figura 10 – Bancada experimental .....                                  | 34 |
| Figura 11 – Gerador CC acoplado ao eixo do MIT .....                    | 35 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Parâmetros do MIT .....         | 31 |
| Tabela 2 – Pontos de operação .....        | 31 |
| Tabela 3 – Ponto de operação nominal ..... | 36 |
| Tabela 4 – Ponto de operação 1 .....       | 37 |
| Tabela 5 – Ponto de operação 2 .....       | 38 |
| Tabela 6 – Ponto de operação 3 .....       | 39 |
| Tabela 7 – Ponto de operação 4 .....       | 39 |
| Tabela 8 – Ponto de operação 5 .....       | 40 |
| Tabela 9 – Ponto de operação 6 .....       | 41 |
| Tabela 10 – Ponto de operação 7 .....      | 41 |

## LISTA DE SIGLAS

|        |  |
|--------|--|
| MIT    | Motores de Indução Trifásicos                        |
| ED     | Evolução Diferencial                                 |
| PSO    | <i>Particle Swarm Optimization</i>                   |
| CA     | Corrente Alternada                                   |
| Cv     | Cavalo-vapor   |
| W      | Watts  |
| V      | Volts  |
| Hz     | Hertz  |
| Rpm    | Rotações por Minuto                                  |
| N.m    | Newton-metro   |
| LSI    | Laboratório de Sistemas Inteligentes                 |
| CIPECA | Centro Integrado de Pesquisa em Controle e Automação |
| UTFPR  | Universidade Tecnológica Federal do Paraná           |
| CC     | Corrente Contínua                                    |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|               |  |
|---------------|--|
| $V/f$         | Relação de tensão e frequência de alimentação                |
| $n_s$         | Velocidade síncrona em rpm                                   |
| $f_e$         | Frequência de alimentação                                    |
| $p$           | Número de polos de estator                                   |
| $p$           | Tensão induzida  |
| $B$           | Densidade do fluxo magnético                                 |
| $v$           | Velocidade das barras do rotor em relação ao campo magnético |
| $l$           | Comprimento das barras do rotor                              |
| $n$           | Velocidade Mecânica do MIT em rpm                            |
| $s$           | Escorregamento   |
| $V_1$         | Tensão de alimentação (fase)                                 |
| $R_1$         | Resistencia do estator                                       |
| $X_1$         | Reatância do estator   |
| $R_C$         | Perdas no entreferro   |
| $X_m$         | Reatância de magnetização                                    |
| $R_2$         | Resistencia do rotor   |
| $X_2$         | Reatância do estator   |
| $V_{TH}$      | Tensão equivalente de Thévenin                               |
| $Z_{TH}$      | Impedância equivalente de Thévenin                           |
| $R_{TH}$      | Resistencia equivalente de Thévenin                          |
| $X_{TH}$      | Reatância equivalente de Thévenin                            |
| $E_1$         | Tensão Induzida no entreferro                                |
| $T_{eixo}$    | Conjugado do eixo  |
| $\omega_s$    | Velocidade síncrona em radianos por segundo                  |
| $P_{saída}$   | Potência de saída  |
| $P_{entrada}$ | Potência de entrada  |
| $\omega_m$    | Velocidade mecânica em radianos por segundo                  |
| $\eta$        | Rendimento   |
| $K_\omega$    | Fator de enrolamento do estator                              |
| $\phi_m$      | Máximo fluxo de entreferro                                   |
| $f$           | Frequência de alimentação                                    |
| $N_{espiras}$ | Número de espiras por fase do estator                        |
| $V$           | Tensão de alimentação  |

|             |                                 |
|-------------|---------------------------------|
| $V_{boost}$ | Tensão adicional de alimentação |
| $R_s$       | Resistência de estator          |
| $I_s$       | Corrente nominal do estator     |
| $\Omega$    | Ohm                             |
| $i$         | Contador                        |
| $NP$        | Número de cromossomos           |
| $G$         | Número de genes                 |
| $F$         | Constante de passo              |
| $r_i$       | Vetor aleatório                 |
| $CR$        | Constante de Cruzamento         |
| $\Delta$    | Ligação do MIT em delta         |

## SUMÁRIO

|  |    |
|--|----|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....  | 15 |
| 1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA .....  | 16 |
| 1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS.....   | 16 |
| 1.3 OBJETIVOS.....   | 17 |
| 1.3.1 Objetivo Geral .....   | 17 |
| 1.3.2 Objetivos específicos .....  | 17 |
| 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....   | 18 |
| <b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....   | 19 |
| 2.1 MODELO DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO EM REGIME<br>PERMANENTE .....             | 19 |
| 2.1.1 Funcionamento .....  | 19 |
| 2.1.2 Modelagem em regime permanente .....   | 20 |
| 2.2 CONTROLE DE VELOCIDADE PELO MÉTODO DE VARIAÇÃO DE TENSÃO<br>E FREQUÊNCIA ..... | 23 |
| 2.3 EVOLUÇÃO DIFERENCIAL.....  | 25 |
| 2.3.1 Mutação .....  | 26 |
| 2.3.2 Cruzamento.....  | 27 |
| 2.3.3 Seleção .....  | 28 |
| <b>3 MÉTODO DE PESQUISA</b> .....  | 30 |
| 3.1 PARÂMETROS DO MIT .....  | 30 |
| 3.2 MAPEAMENTO DOS PONTOS DE OPERAÇÃO.....   | 31 |
| 3.3 ALGORITMO DE EVOLUÇÃO DIFERENCIAL .....  | 32 |
| 3.4 EXECUÇÃO DE TESTES EXPERIMENTAIS .....   | 34 |
| <b>4 RESULTADOS E DISCUSÕES</b> .....  | 36 |
| 4.1 PONTO DE OPERAÇÃO NOMINAL.....   | 36 |
| 4.2 PONTO DE OPERAÇÃO 1 .....  | 37 |
| 4.3 PONTO DE OPERAÇÃO 2 .....  | 38 |
| 4.4 PONTO DE OPERAÇÃO 3 .....  | 38 |
| 4.5 PONTO DE OPERAÇÃO 4 .....  | 39 |
| 4.6 PONTO DE OPERAÇÃO 5 .....  | 40 |
| 4.7 PONTO DE OPERAÇÃO 6 .....  | 40 |
| 4.8 PONTO DE OPERAÇÃO 7 .....  | 41 |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>        | <b>43</b> |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>                  | <b>44</b> |
| <b>ANEXO A – PONTOS DE OPERAÇÃO .....</b> | <b>46</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Os Motores de Indução Trifásicos (MIT) possuem diversas aplicações nas indústrias, devido sua robustez, confiabilidade e baixos custos de aquisição e manutenção (SANTOS et al., 2014). Frequentemente as indústrias adquirem motores com elevado torque de carga nominal, dessa forma as referidas máquinas podem acionar diversos níveis de carga em suas operações. Contudo, ao trabalhar com cargas menores que a carga nominal, o motor opera superdimensionado e tem sua eficiência reduzida (KABOLI; ZOLGHADRI; VAHDATI-KHAJEH, 2007).

É possível aumentar a eficiência global do MIT, seja realizando a substituição do motor por outro corretamente dimensionado ou pelo uso de controladores de fluxo. Dentre as técnicas de controle mais utilizadas na indústria estão o controle vetorial e o controle escalar (SANTOS et al., 2014).

As estratégias de controle escalar ou vetorial proporcionam um melhor desempenho dinâmico do sistema. Entretanto, no controle escalar a resposta pode sofrer perturbações no período transitório, uma vez que, o controle possui uma resposta de acomodação lenta. Assim, ao se considerar o regime permanente, a inconstância do período transitório é aceitável (CACCIATO et al., 2006).

O controle escalar é o mais utilizado na indústria, devido seu *drive* de controle ser de simples aplicação, baixo custo e alta confiabilidade (SUETAKE; SILVA; GOEDTEL, 2011). Tal controle mantém a relação entre tensão e frequência de alimentação ( $V/f$ ) constante, desta forma, conforme Fitzgerald et al. (2006), o fluxo de entreferro da máquina também se mantém constante.

Segundo Consoli et al. (2013) alterando-se a relação tensão *versus* frequência, o desempenho do controle escalar em baixas rotações pode ser otimizado, assim como o consumo de energia do MIT. Da mesma forma, Cacciato et al. (2006) propõe reduzir o fluxo de entreferro para cargas mecânicas baixas. Tal proposta faz com que as dispersões do fluxo do entreferro reduzam e assim haja aumento da eficiência.

Portanto, diferentes algoritmos de otimização são utilizados afim de buscar o melhor controle escalar, ou seja, otimizar o fluxo de entreferro para determinada carga de operação, para que assim haja redução do consumo de energia (CONSOLI et al., 2013).



Diversos trabalhos utilizam o controle escalar afim de minimizar as perdas em determinados pontos de operação de torque e velocidade, como no método proposto em Waheedabeev, Sukeshkumar e Nair (2012). Em Hamid et al. (2006) é utilizada a otimização por enxame de partículas (*Particle Swarm Optimization* (PSO)) para encontrar o fluxo ótimo para pontos de operação de torque e velocidade.

Este trabalho tem por objetivo desenvolver o controle de velocidade de um MIT pelo método de variação da frequência de alimentação, sem a obrigatoriedade de ser mantida a relação  $V/f$  constante. O desenvolvimento de tal controle será realizado por um algoritmo de Evolução Diferencial (ED), em que a partir de valores de torque e velocidade especificados apresenta o valor de tensão e de frequência de alimentação que resultam no rendimento ótimo do motor em regime permanente.

## 1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O *drive* de controle escalar convencional, que mantém a relação  $V/f$  constante é, como já mencionado, o controle mais utilizado nas indústrias para acionamento de motores de indução trifásicos, devido seu baixo custo e alta confiabilidade (SUETAKE; SILVA; GOEDTEL, 2011).

Este trabalho irá abordar uma proposta diferente de controle escalar, sendo esta a de diminuir o fluxo de entreferro para valores de torque abaixo do nominal, pois, segundo Cacciato et al. (2006) desta forma as dispersões do fluxo diminuem, com isso o rendimento aumenta e há economia de energia.

## 1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

O problema consiste em analisar se há necessidade em manter constante a relação  $V/f$  ou se é possível não haver a obrigatoriedade de manter tal relação constantes para que haja aumento na eficiência do motor.

Portanto, mostra-se interessante desenvolver um método para estimar a frequência e tensão de alimentação, a fim de se obter aumento na eficiência do MIT considerando determinados pontos de operação. Para isto o algoritmo de Evolução Diferencial será utilizado como método de otimização.

### 1.3 OBJETIVOS

#### 1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver um controle escalar que otimize o fluxo de entreferro e desta forma aumente a eficiência do motor de indução. Para isso, faz-se necessário desenvolver um algoritmo de Evolução Diferencial que, a partir dos parâmetros do MIT e para determinados pontos de velocidade e torque de operação, consiga-se estimar a frequência e tensão de alimentação.

#### 1.3.2 Objetivos específicos

Tem-se como objetivos específicos deste trabalho:

- Realizar o estudo dos conceitos teóricos sobre Motores de Indução Trifásicos.
- Realizar o estudo dos conceitos teóricos sobre o algoritmo de Evolução Diferencial.
- Aplicar o algoritmo de Evolução Diferencial para diversos pontos de operação.
- Realizar ensaios com o MIT utilizando um inversor de frequência para validar os resultados obtidos por simulação.
- Obter as devidas conclusões a respeito do controle escalar de otimização do fluxo do entreferro.

## 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho possui a seguinte estrutura: o Capítulo 2 apresenta os conceitos teóricos sobre o motor de indução trifásico, método de controle de velocidade e sobre o algoritmo de Evolução Diferencial; o Capítulo 3 descreve a metodologia em que a pesquisa foi realizada; o Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos por simulação e experimentalmente e suas respectivas discussões; o Capítulo 5, por sua vez descreve as conclusões do trabalho.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, serão apresentados alguns conceitos teóricos para conclusão deste trabalho. Dentre eles, será apresentado o MIT, o controle de velocidade utilizando o acionamento  $V/f$  e a evolução diferencial.

### 2.1 MODELO DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO EM REGIME PERMANENTE

No MIT, a corrente alternada é fornecida diretamente ao estator da máquina e então induzida uma corrente também alternada ao rotor, sem que haja qualquer tipo de ligação física entre eles. Considerando esta excitação no estator como equilibrada, ocorre a produção de um fluxo magnético girando na velocidade síncrona do motor, que depende da frequência de alimentação e do número de polos do estator.

Por sua vez, as correntes que foram induzidas no rotor produzem um fluxo que gira sincronicamente com o fluxo do estator, e o torque é produzido quando essas duas ondas de fluxo se interagem (FITZGERALD et al, 2006).

#### 2.1.1 Funcionamento

O princípio de funcionamento contido neste tópico é amplamente discutido em Chapman (2013). No motor de indução gaiola de esquilo, a velocidade do campo magnético do estator é a mesma que a velocidade síncrona ( $n_s$ ). Tal velocidade é calculada em (1) em termos da frequência de alimentação ( $f_e$ ) e do número de polos do estator ( $p$ ).

$$n_s = \frac{120f_e}{p} \quad (1)$$

Tal campo magnético corta as barras do rotor e induz uma tensão ( $e$ ) proporcional ao produto escalar do vetor densidade de fluxo magnético ( $B$ ) com a

velocidade da barra em relação ao campo magnético ( $v$ ) e do seu comprimento ( $l$ ), conforme (2).

$$e = (v \times B)l \quad (2)$$

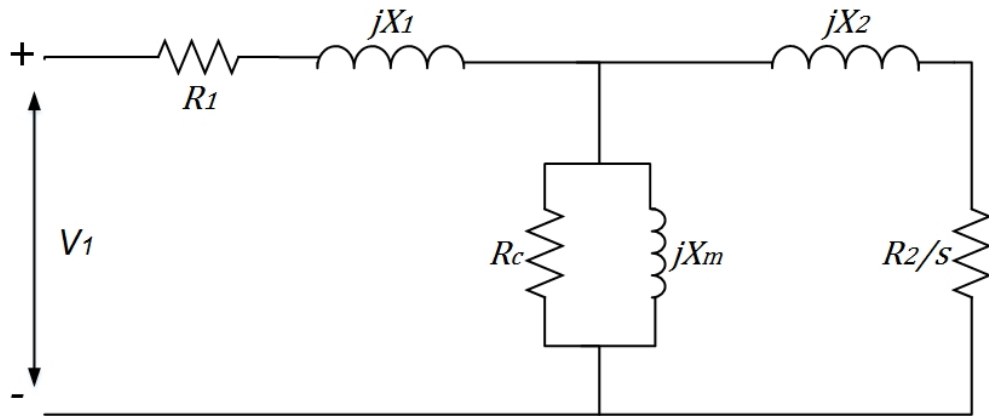
Segundo Chapman (2013) é o movimento relativo do rotor em relação ao campo magnético do estator que produz a tensão induzida em uma barra do rotor. Com isso, o conjugado interno induzido na máquina é proporcional à ambos os fluxos, chamado de conjugado assíncrono. O conjugado interno existe para qualquer velocidade mecânica do motor que seja diferente da velocidade síncrona.

### 2.1.2 Modelagem em regime permanente

O motor de indução é uma máquina assíncrona, ou seja, seu rotor gira a uma velocidade diferente e inferior que a velocidade síncrona. A diferença entre a velocidade síncrona e a mecânica ( $n$ ) de uma máquina é denominada escorregamento ( $s$ ) e pode ser obtido por (3), considerando as velocidades em rpm (CHAPMAN, 2013).

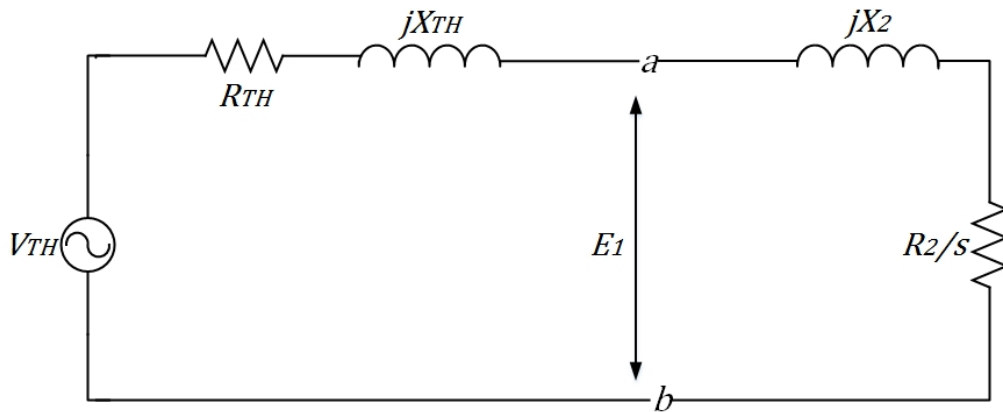
$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (3)$$

O circuito equivalente monofásico do motor de indução trifásico é apresentado afim de facilitar as análises. Na Figura 1,  $V_1$  é o valor de fase da tensão de alimentação,  $R_1$  a resistência de estator,  $X_1$  a reatância de estator,  $R_c$  e  $X_m$  representa as perdas no núcleo e a reatância de magnetização respectivamente,  $R_2$  é a resistência do rotor e  $X_2$  é a reatância do rotor (CHAPMAN, 2013).



**Figura 1– Circuito equivalente monofásico de um motor de indução**  
**Fonte: Autoria Própria**

Quando o objetivo da análise se refere às relações de potência e conjugado, a maneira utilizada para simplificar o circuito equivalente consiste em utilizar o teorema de Thévenin. A partir dos terminais “a” e “b” todos os elementos do circuito podem ser substituídos por uma fonte de tensão ( $V_{TH}$ ) e uma impedância equivalente ( $Z_{TH}$ ) representada por uma resistência equivalente ( $R_{TH}$ ) e uma reatância equivalente ( $X_{TH}$ ), sendo que  $E_1$  é a tensão induzida no entreferro, resultando em um circuito como o da Figura 2.



**Figura 2– Circuito equivalente de Thévenin**  
**Fonte: Autoria Própria**

Portanto, a tensão da fonte equivalente é a tensão resultante entre os terminais “a” e “b” quando os circuitos do rotor são removidos, expresso em (4). Observa-se que a resistência de entreferro  $R_c$  é desconsiderada.

$$V_{TH} = V_1 \frac{jX_m}{R_1 + j(X_1 + X_m)} \quad (4)$$

A impedância equivalente de Thévenin entre os terminais “a” e “b” é obtida por (5).

$$Z_{TH} = \frac{jX_m(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + R_1)} = R_{TH} + jX_{TH} \quad (5)$$

Deste modo, (6) é a expressão do conjugado no eixo ( $T_{eixo}$ ), onde  $\omega_s$  é a velocidade síncrona em radianos por segundo.

$$T_{eixo} = \frac{1}{\omega_s} \frac{3 * V_{TH}^2 (R_2/s)}{(R_{TH} + (R_2/s))^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \quad (6)$$

A forma geral da curva traçada é do conjugado versus velocidade ou conjugado versus escorregamento, considerando que o motor está sendo alimentado por uma fonte de tensão e frequência constantes. Para fins de cálculo do rendimento do motor, é necessário conhecer as potências de saída ( $P_{saída}$ ) e entrada ( $P_{entrada}$ ). A potência no eixo ou de saída da máquina é calculada por (7), em que  $\omega_m$  é a velocidade mecânica do motor em radianos por segundo (FITZGERALD et al, 2006) (CHAPMAN, 2013).

$$P_{saída} = \frac{T_{eixo}}{\omega_m} \quad (7)$$

Assim sendo, o rendimento ( $\eta$ ) é a relação da potência de saída pela potência de entrada, conforme (8). Tal relação terá sempre valores entre 0 e 1 pois a potência no eixo sempre será menor que a potência fornecida à máquina, devido às perdas (FITZGERALD et al, 2006) (CHAPMAN, 2013).

$$\eta = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \quad (8)$$

Quanto maior forem as perdas no motor, menor a potência de saída e conseqüentemente menor será sua eficiência.

## 2.2 CONTROLE DE VELOCIDADE PELO MÉTODO DE VARIAÇÃO DE TENSÃO E FREQUÊNCIA

Como mencionado anteriormente, motores de indução trifásicos possuem velocidade de operação dependentes do conjugado de carga no eixo e tensão de alimentação do enrolamento de estator. Assim, uma maneira de controle de velocidade de um MIT consiste na variação de sua frequência de armadura (FITZGERALD et al, 2006).

Além da frequência, a tensão de alimentação também precisa ser variada para manter o fluxo de entreferro constante. A tensão induzida no entreferro de uma máquina de corrente alternada (CA) é expressa por (9) conforme Krishnan (2001).

$$E_1 = 4,44K_\omega \phi_m f N_{espiras} \quad (9)$$

em que  $K_\omega$  é o fator de enrolamento do estator,  $\phi_m$  é o máximo fluxo de entreferro,  $f$  é a frequência de alimentação e  $N_{espiras}$  é o número de espiras por fase do estator. Desprezando a impedância do estator, a tensão induzida é aproximadamente igual à tensão de alimentação. Portanto, como evidenciado em (10), o fluxo de entreferro é proporcional à relação de tensão e frequência de alimentação nominal. Tal relação mantém o torque máximo constante (KRISHNAN, 2001).

$$\phi_m \propto \frac{V}{f} \quad (10)$$

De acordo com Fitzgerald, para uma dada tensão de armadura, a densidade de fluxo da máquina é inversamente proporcional à frequência e, desse modo, quando a frequência diminui, a densidade de fluxo aumenta. Portanto, para uma máquina típica que opera saturada na tensão e frequência nominais, qualquer redução de frequência aumentará ainda mais a densidade de fluxo da máquina. De fato, uma queda significativa de frequência aumentará a densidade de fluxo até o ponto em que a máquina pode ser danificada devido ao aumento das perdas no núcleo e das correntes de máquina necessárias para manter a densidade de fluxo mais elevado.

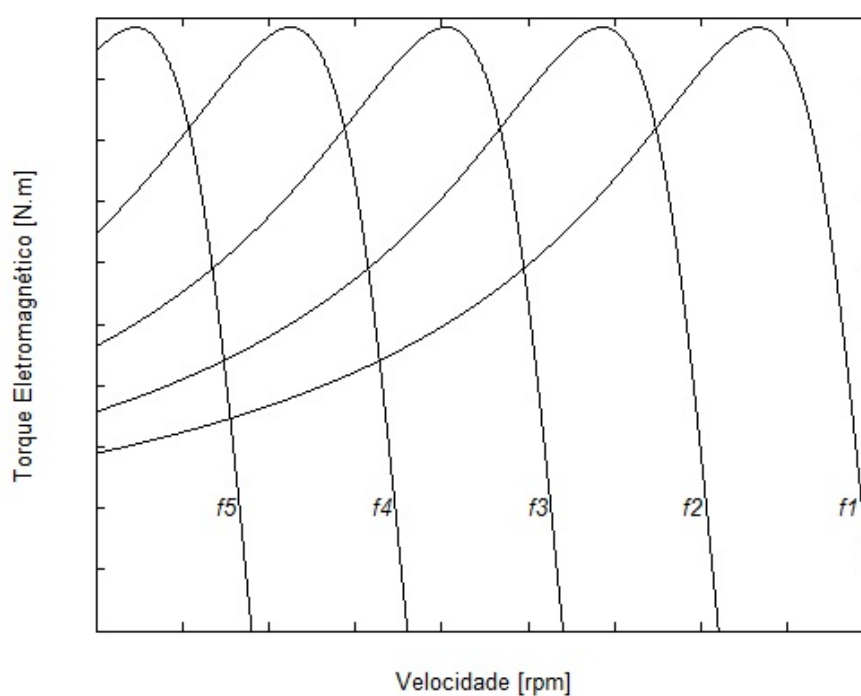


Entretanto, não se pode desconsiderar a impedância de estator, pois a mesma está presente em qualquer motor de indução trifásico. O método utilizado para manter o máximo torque da máquina constante é inserir uma tensão adicional a sua alimentação, denominada  $V_{boost}$ . Tal tensão pode ser calculada por (11) (SANTOS, 2012).

$$V_{boost} = R_s I_s \sqrt{2} \quad (11)$$

em que  $R_s$  é a resistência do estator e  $I_s$  é a corrente nominal que circula pelo circuito de estator.

A Figura 3 ilustra as curvas de torque de um motor exemplo para frequências abaixo da nominal e considerando uma tensão  $V_{boost}$  adicionada à alimentação. A curva é apenas deslocada para esquerda e o valor do seu conjugado máximo é mantido constante, sendo que  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$ ,  $f_4$  e  $f_5$  são valores de frequência decrescentes, ou seja,  $f_5$  é menor que  $f_4$  que é menor que  $f_3$  que é menor que  $f_2$  que por fim é menor que  $f_1$ . Assim, é possível mapear e controlar a velocidade do motor com a variação da frequência e da tensão de alimentação para quaisquer pontos abaixo das curvas.



**Figura 3–** Curvas de torque para diferentes valores de frequência  
**Fonte:** autoria Própria

O controle escalar é utilizado de forma controlar a velocidade do MIT mantendo o fluxo constante, a proposta apresentada neste trabalho consiste na otimização do fluxo de entreferro da máquina afim de aumentar o rendimento do motor de indução em um determinado ponto de operação, vale ressaltar que para cada ponto de operação é necessário realizar o acionamento do MIT com um determinado fluxo.

O método de otimização utilizado é a Evolução Diferencial, que consiste na busca da tensão e frequência de acionamento do MIT que permitam que este opere na velocidade e torque desejados resultando na otimização de seu rendimento.

### 2.3 EVOLUÇÃO DIFERENCIAL

A Evolução Diferencial (ED) foi desenvolvida por Storn e Price em meados da década de 1990. Baseada na computação evolutiva, inspira-se em princípios da teoria da evolução, como recombinação, mutação e seleção. A Evolução Diferencial é uma ferramenta computacional estocástica para a resolução de problemas de otimização possuindo uma estrutura algorítmica meta-heurística. Este método não garante a resolução ótima global, mas obtém a melhor resolução dentro do critério de parada (STORN; PRICE, 1995).

A escolha do algoritmo ED para este trabalho dentre os demais métodos de otimização está relacionada ao fato de sua implementação ser simples, possuir poucos parâmetros de controle e, principalmente, ter um método de busca eficiente. Na ausência de qualquer conhecimento acerca do espaço de busca utiliza-se uma distribuição uniforme para obter a população inicial (SILVA, 2012).

O algoritmo gera uma população aleatória de  $NP$  cromossomos (indivíduos) e  $D$  genes, escolhidos aleatoriamente contemplando todo o espaço de busca. De maneira resumida, a ED faz recombinação e mutação de alguns indivíduos da população, avalia todo o repertório de soluções candidatas e seleciona segundo algum critério quais soluções irão para a próxima geração (QING, 2009).

### 2.3.1 Mutação

Mutação é o processo que mantem a diversidade da população. Para cada cromossomo da geração, ou seja, conjunto de soluções, um novo cromossomo denominado doador ( $v_{i,G+1}$ )   gerado por meio de uma relação entre três das soluções escolhidas aleatoriamente ( $x_{rand,G}$ ), para todos os processos  $i$  representa o número de  $NP$  indivíduos ( $i = 1, \dots, NP$ ) e  $G$  o número de gerações. A equa o (12) simplifica o processo de mutação (QING, 2009).

$$v_{i,G+1} = F(x_{rand1,G} - x_{rand2,G}) + x_{rand3,G} \quad (12)$$

Com duas das soluções é feito um vetor diferença, em que um indivíduo   subtraído do outro e então é multiplicado por  $F$ , que é um valor constante entre 0 e 1 que determina o tamanho do passo a ser dado na direção denotada pelo vetor diferença, e por fim, o vetor é somado ao terceiro vetor de soluções. A Figura 4 representa o processo de mutação de forma vetorial.

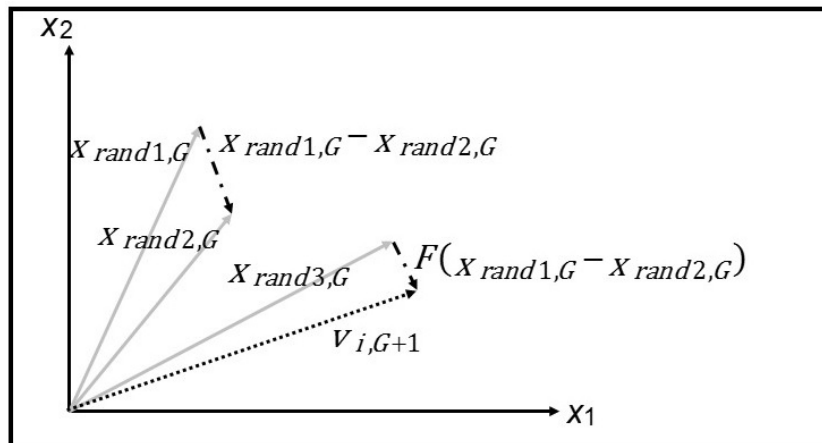


Figura 4-Representa o da muta o

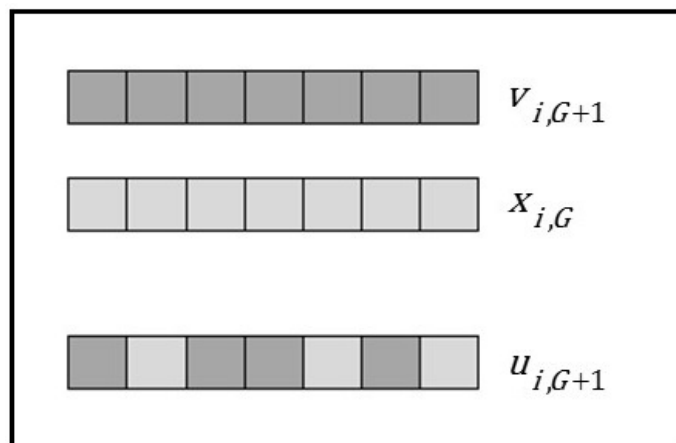
Fonte: Autoria Própria

### 2.3.2 Cruzamento

O processo de cruzamento aumenta a diversidade dos vetores doadores. Inicialmente, é necessário selecionar qual será o alvo, ou seja, o vetor da população que será combinado com o doador criado anteriormente. É necessário que cada indivíduo da população seja o alvo pelo menos uma vez na iteração, para assim aumentar ainda mais a diversidade da população (OLIVEIRA, 2006). O procedimento pode ser representado por (13).

$$u_{i,G+1} = \begin{cases} v_{i,G+1} & \rightarrow \text{Se } r_i > CR \\ x_{i,G} & \rightarrow \text{Se } r_i \leq CR \end{cases} \quad (13)$$

em que  $u_{i,G+1}$  representa o vetor experimental,  $r_i$  é um valor entre 0 e 1 escolhido aleatoriamente,  $x_{i,G}$  é o vetor alvo que será recombinado com o doador e  $CR$  é a probabilidade de ocorrer o cruzamento. A Figura 5 ilustra o processo de cruzamento (SILVA, 2012).



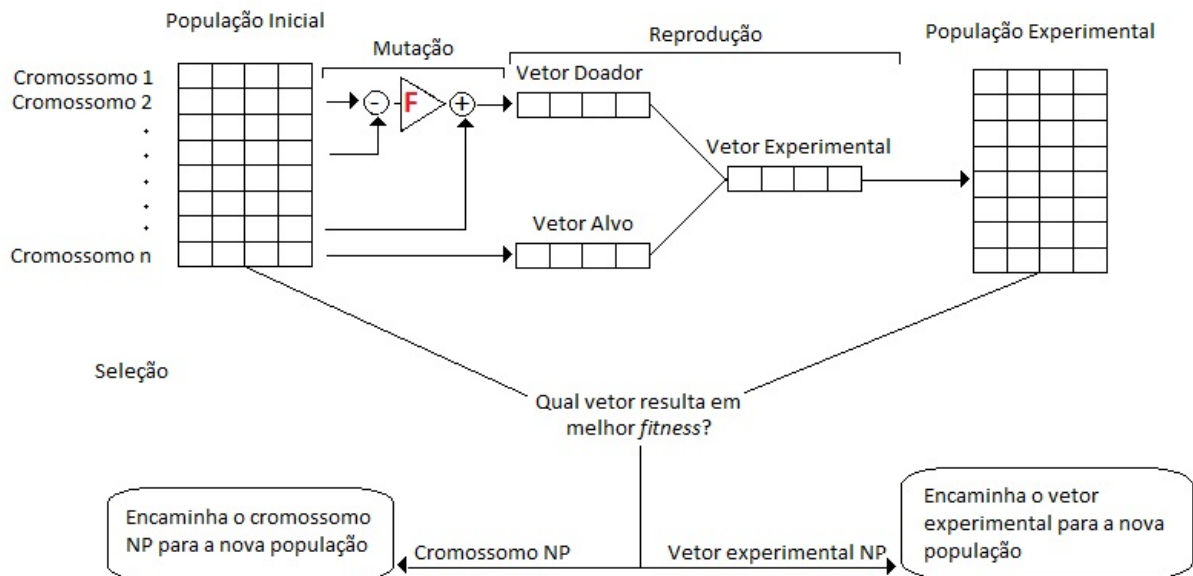
**Figura 5– Representação do Cruzamento**  
**Fonte: Autoria Própria**

### 2.3.3 Seleção

Nesta etapa verifica-se se o novo vetor criado tem um *fitness* maior que o do vetor alvo, assim calcula-se o *fitness* do vetor experimental e o compara com o *fitness* do alvo. *Fitness* pode ser denominado como uma avaliação que mede o grau de adequação da otimização, ou seja, um *fitness* ótimo é equivalente a um rendimento ótimo. Portanto, se o vetor experimental apresentar maior *fitness* para a solução, este substitui o vetor alvo na seleção. Este trabalho será realizado um processo de maximização de rendimento, portanto, conforme (14), o vetor com maior *fitness* é selecionado para a nova geração (QING, 2009).

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Se } fitness(u_{i,G+1}) \geq fitness(x_{i,G}) \text{ então } u_{i,G+1} \text{ substitui } x_{i,G} \\ \text{Se } fitness(u_{i,G+1}) < fitness(x_{i,G}) \text{ manem } x_{i,G} \end{array} \right\} \quad (14)$$

Como resultado dos processos realizados, a primeira geração é criada. O número de iterações irá depender do critério de parada estabelecido pelo usuário, podendo ser pela determinação do número de iterações ou pelo valor do *fitness* desejado. A Figura 6 relaciona todos os processos da evolução diferencial.



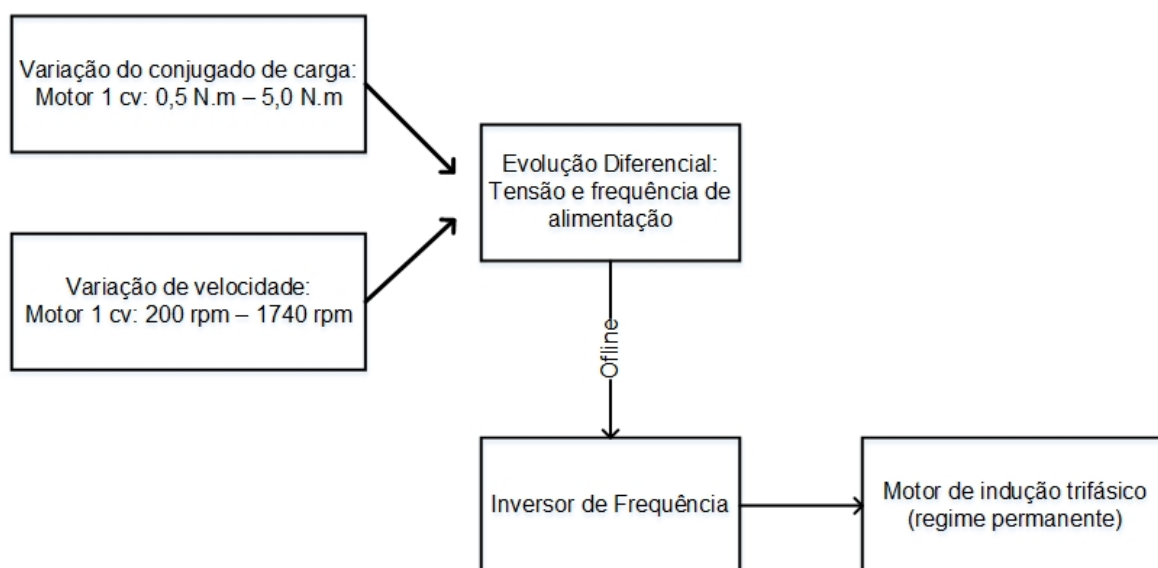
**Figura 6 – Fluxograma da evolução diferencial**  
**Fonte: Autoria Própria**

Dentre diversos métodos de controle de velocidade do motor de indução, o controle escalar de fluxo de entreferro constante é um dos mais utilizados na indústria, esta estratégia fornece um rendimento do motor consideravelmente maior do que outros métodos (CACCIATO et al., 2006). A proposta de realizar o controle escalar sem obrigatoriedade que se mantenha o fluxo constante fornecerá um rendimento maior que o controle escalar convencional para determinados pontos de operação.

Neste capítulo foram descritos os fundamentos teóricos sobre o motor de indução trifásico, o controle de escalar e sobre o algoritmo de Evolução Diferencial, os quais serão necessários para a consolidação da proposta apresentada.

### 3 MÉTODO DE PESQUISA

Neste capítulo serão apresentados os métodos e materiais utilizados para obtenção dos resultados simulados e experimentais para que seja possível realizar a análise de eficiência do MIT. A Figura 7 exemplifica a estrutura de desenvolvimento do trabalho que será discutido neste capítulo. São abordados aspectos físicos do MIT, metodologia do algoritmo de Evolução Diferencial e da bancada experimental em que foram realizados os testes.



**Figura 7 – Estrutura de desenvolvimento do trabalho**

**Fonte: Autoria Própria**

#### 3.1 PARÂMETROS DO MIT

O motor de indução trifásico utilizado para análise trata-se de um motor com potência de 1 cv, o equivalente a 746 W, sua tensão nominal é de 220/380 V, frequência de 60 Hz, velocidade nominal de 1740 rpm e torque nominal de 4,1 N.m. Seus parâmetros mecânicos foram obtidos a partir de ensaios a vaio e com o rotor bloqueado, que são os ensaios mais utilizados na indústria, apresentados na Tabela 1 (COSTA, 2015).

**Tabela 1 – Parâmetros do MIT**

|                                      |          |
|--------------------------------------|----------|
| Número de Polos                      | 4        |
| Resistência do estator ( $\Omega$ )  | 7,8667   |
| Reatância do estator ( $\Omega$ )    | 7,9168   |
| Resistência do rotor ( $\Omega$ )    | 6,0840   |
| Reatância do rotor ( $\Omega$ )      | 7,9168   |
| Reatância de entreferro ( $\Omega$ ) | 173,1143 |

**Fonte: Autoria Própria**

### 3.2 MAPEAMENTO DOS PONTOS DE OPERAÇÃO

Alguns pontos de torque e velocidade foram selecionados para realização dos testes de simulação do algoritmo de Evolução Diferencial e também os testes experimentais do motor de indução. Os níveis de torque foram variados de 0,5 N.m até 5,0 N.m, a princípio com passos de 0,5 N.m e posteriormente à passos de 1,0 N.m, já os níveis de velocidade foram realizados de 200 rpm á 1740 rpm. Realizou-se também testes para o ponto nominal da máquina, que é à 4,1 N.m e 1740 rpm.

Na Tabela 2 tem-se valores detalhados de cada ponto de operação colocados à teste.

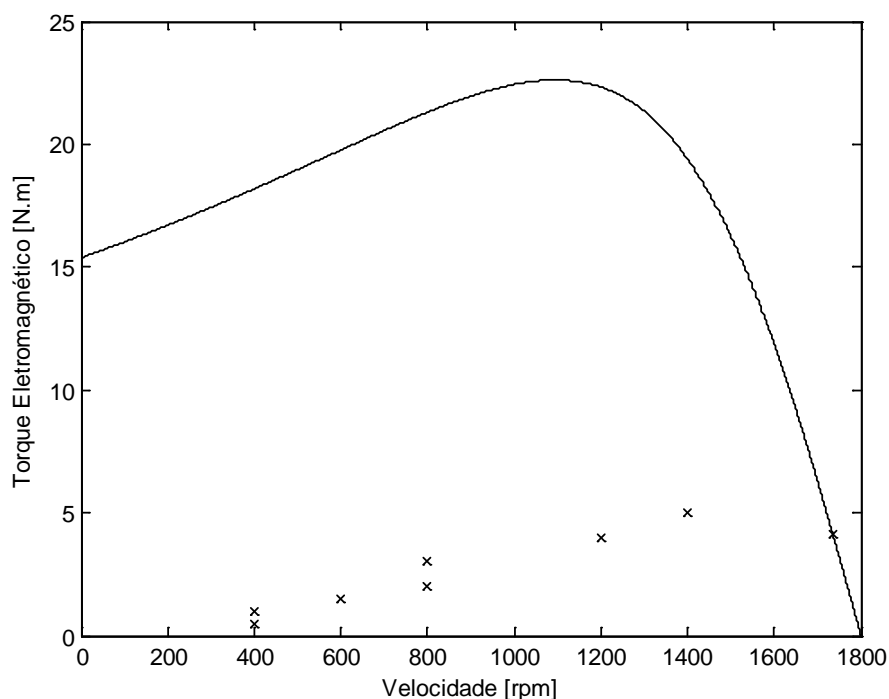
**Tabela 2 – Pontos de Operação**

| Ponto de Operação | Torque [N.m] | Velocidade [rpm] |
|-------------------|--------------|------------------|
| Nominal           | 4,1          | 1740             |
| 1                 | 0,5          | 400              |
| 2                 | 1,0          | 400              |
| 3                 | 1,5          | 600              |
| 4                 | 2,0          | 800              |
| 5                 | 3,0          | 800              |
| 6                 | 4,0          | 1200             |
| 7                 | 5,0          | 1400             |

**Fonte: Autoria Própria**

A Figura 8 ilustra os mesmos pontos descritos na Tabela 2 relacionados com a curva de torque do MIT, marcados por “x”.





**Figura 8 – Pontos de Operação**  
**Fonte: Autoria Própria**

### 3.3 ALGORITMO DE EVOLUÇÃO DIFERENCIAL

A determinação dos operadores do algoritmo de Evolução Diferencial foi realizada em sua maioria de forma empírica, sendo que diversos testes foram realizados até que as saídas do algoritmo apresentassem homogeneidade. Contudo, o número de genes da população é determinado como sendo o mesmo número de pontos de operação analisados e o número de cromossomos deve ser o suficiente para que haja diversidade na população.

O algoritmo de Evolução Diferencial foi implementado pelo *software* MATLAB®, o qual irá determinar o valor de tensão e frequência de alimentação do MIT para cada ponto de operação que resultam em rendimento ótimo. Para isso, o algoritmo é inicializado com uma população de valores de tensão aleatórios de 10 cromossomos com 7 genes, porém estes valores são limitados entre um mínimo de 15 V, para que não haja um enfraquecimento exagerado de fluxo e, um limite máximo equivalente a tensão nominal.

A seguir, o processo de mutação é inicializado com uma constante de passo  $F$  de 0,4 e, para o processo de cruzamento, a constante  $CR$  é determinada com 0,5. Assim, tem-se uma população submetida ao processo de mutação e cruzamento e uma população inicial aleatória.

A população inicial de tensão é mapeada para que seja determinada a frequência que faça com que o motor de indução opere no ponto de torque e velocidade pré determinado, a seguir é calculado o valor do rendimento que esta tensão e frequência de alimentação resultam. Este processo é realizado para cada gene de todos os cromossomos, assim, tem-se uma matriz, com as mesmas dimensões da população inicial, com valores de rendimento. O *fitness* é a soma dos rendimentos equivalentes de todos genes de um cromossomo.

O mesmo processo realizado pela população inicial, é agora realizado pela população que já passou pelos processos de mutação e cruzamento. Após, se compara o *fitness* das duas populações e, por se tratar de uma função objetivo de maximização, o cromossomo que resulta no maior *fitness* é encaminhado para uma nova população, este processo é denominado de seleção.



**Figura 9 – Estrutura de desenvolvimento do ED**  
**Fonte: Autoria Própria**

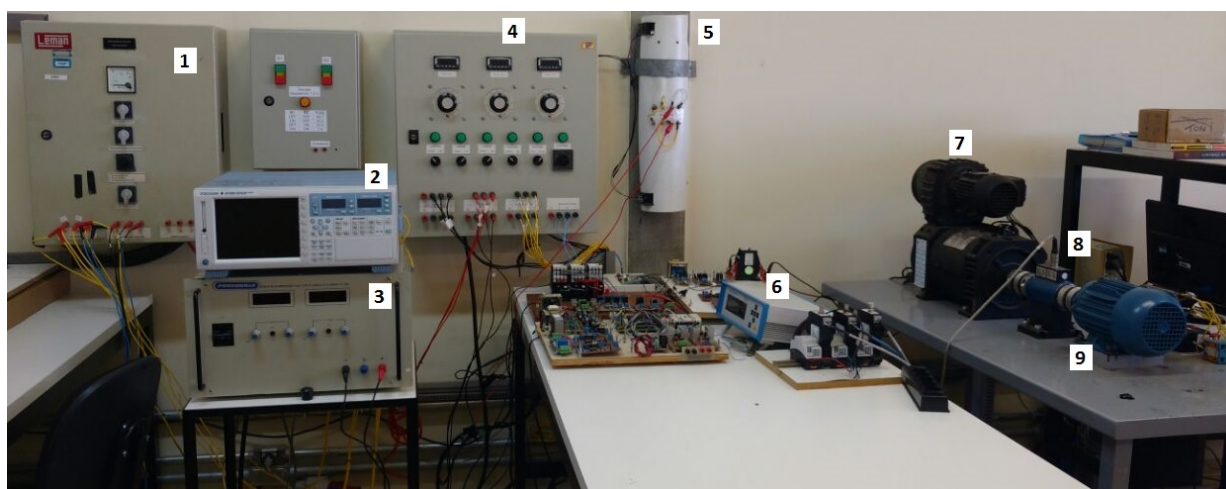
Todos os processos descritos são realizados repetidamente até que o critério de parada seja satisfeito, sendo ele o número de gerações, ou seja, o número de vezes que tais processos são realizados, determinado como sendo 50 gerações.

A Figura 9 ilustra a estrutura de desenvolvimento do algoritmo de Evolução Diferencial, sendo que o critério de parada foi determinado pelo número de gerações.

Os resultados obtidos computacionalmente estão evidenciados no próximo capítulo, juntamente com suas respectivas discussões.

### 3.4 EXECUÇÃO DE TESTES EXPERIMENTAIS

O procedimento experimental foi realizado no Laboratório de Sistemas Inteligentes (LSI) do Centro Integrado de Pesquisa em Controle e Automação (CIPECA) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) campus Cornélio Procópio. A configuração da bancada está na Figura 10.



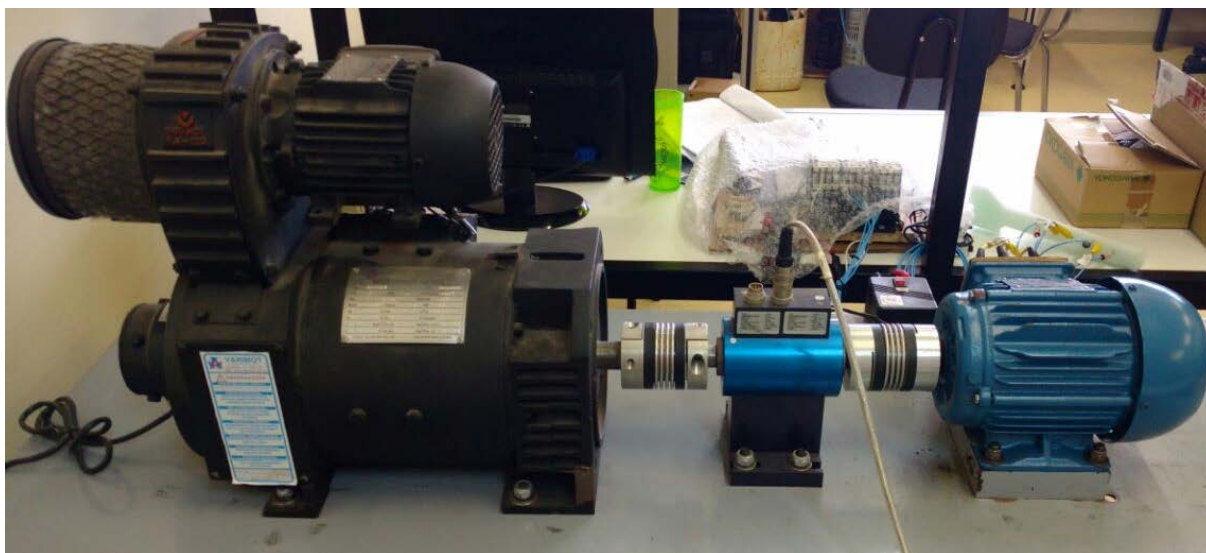
**Figura 10 – Bancada experimental: (1) Saída do Inversor de Frequência, (2) Analisador de Qualidade de Energia, (3) Fonte CC, (4) Variadores de Tensão, (5) Carga da Máquina CC, (6) Display do Torquímetro, (7) Gerador de Corrente Contínua, (8) Torquímetro e (9) Motor de Indução**

**Fonte: A autoria Própria**

A conexão do MIT foi configurada em delta ( $\Delta$ ) com estratégia de acionamento dos inversores de frequência escalar variável, ou seja, para cada ponto de operação é feita alimentação de um par distinto de tensão e frequência. A entrada da rede é ligada ao analisador de qualidade de energia modelo WT3000 da marca *Yokogawa*, para medição da tensão, frequência, corrente e potência trifásica de entrada com precisão de 0,02% (YOKOGAWA, 2014).

A bancada utilizada possui um motor de indução trifásico acoplado a um gerador de corrente contínua de 2kW de potência, 250 V de tensão nominal de campo e 250 V de tensão nominal de armadura, sendo este gerador que faz a imposição de conjugado de carga no eixo do MIT (GODOY, 2016).

Entre as máquinas é posicionado um torquímetro modelo 4503A50W da *Kistler* que permite a leitura máxima de 50 N.m e 7000 rpm de sinais analógicos e digitais, o qual também possui sensor de velocidade integrado (GODOY, 2016). Seu *display* mostra a velocidade do motor de indução, o torque que está sendo aplicado pelo gerador e a potência trifásica do eixo. A Figura 11 ilustra o posicionamento do torquímetro entre os eixos das máquinas (GOEDEL, 2007).



**Figura 11 – Gerador CC acoplado ao eixo do MIT**  
**Fonte: Autoria Própria**

A partir dos valores de potência trifásica de entrada e de saída é possível realizar o cálculo da eficiência do MIT. Os resultados e discussões obtidos por cada ponto de operação encontram-se no próximo capítulo.

## 4 RESULTADOS E DISCUSÕES

Este capítulo contém os principais resultados apresentados via simulação e via procedimentos experimentais que resultaram na otimização do rendimento do motor de indução para determinados pontos de torque e velocidade.

Para melhor compreensão e comparação dos resultados, os mesmos foram separados por ponto de operação de estudo. Desta forma, apresentam-se os valores de tensão por fase, frequência de acionamento e o respectivo rendimento do MIT tanto para o controle escalar de fluxo constante quanto para o controle escalar de fluxo otimizado.

### 4.1 PONTO DE OPERAÇÃO NOMINAL

O primeiro ponto de operação analisado trata-se do nominal da máquina, ou seja, o valor de velocidade e torque que teoricamente resultam no melhor rendimento do MIT. Com os parâmetros obtidos à vazio e à rotor bloqueado tem-se as relações de tensão, frequência e rendimento contidos na Tabela 3, tanto obtidos por simulação quanto experimentalmente.

**Tabela 3 – Ponto de Operação Nominal (Torque 4,1 N.m – Velocidade 1740 rpm)**

| <b>SIMULAÇÃO</b>    |          |
|---------------------|----------|
| Tensão [V/fase]     | 219,1884 |
| Frequência [Hz]     | 60,41    |
| Rendimento          | 0,875    |
| <b>EXPERIMENTAL</b> |          |
| Tensão [V/fase]     | 220,0    |
| Frequência [Hz]     | 60,00    |
| Rendimento          | 0,787    |

**Fonte: Autoria Própria**

Contudo, na placa contida no motor de indução indica que o rendimento nominal é de 0,81. Portanto, pode-se observar que os parâmetros estimados em Costa (2015) sejam parâmetros próximos dos reais da máquina, porém não os exatos. A mudança dos parâmetros pode ocorrer devido a grandes esforços que o motor já tenha sofrido, principalmente levando em consideração que não se trata de um motor novo. Desta forma, em todos os pontos analisados a seguir o valor do rendimento podem ter algumas pequenas divergências.

#### 4.2 PONTO DE OPERAÇÃO 1

O ponto de operação 1, com baixo torque e baixa velocidade, faz parte de uma região de operação muito abaixo dos valores de trabalho que o motor foi projetado e isso ocasiona um baixo rendimento. Nesta região de trabalho, obtém-se através do controle  $V/f$  otimizado um aumento de eficiência quando comparado ao controle  $V/f$  constante, conforme pode-se observar na Tabela 4.

**Tabela 4 – Ponto de Operação 1 (Torque 0,5 N.m – Velocidade 400 rpm)**

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 48,80223 | Tensão [V/fase]        | 25,4483  |
| Frequência [Hz]        | 13,32    | Frequência [Hz]        | 14,88    |
| Rendimento             | 0,391223 | Rendimento             | 0,64164  |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 64,01%   |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 52,2     | Tensão [V/fase]        | 25,8     |
| Frequência [Hz]        | 13,60    | Frequência [Hz]        | 14,88    |
| Rendimento             | 0,310296 | Rendimento             | 0,572917 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 84,63%   |

**Fonte: Autoria Própria**

### 4.3 PONTO DE OPERAÇÃO 2

O seguinte ponto analisado possui a mesma velocidade que o anterior, porém com uma carga maior. A resposta do algoritmo de Evolução Diferencial neste caso fornece um aumento no rendimento do MIT em relação ao controle escalar convencional, o mesmo ocorre para os testes experimentais. Na Tabela 5 pode-se observar que o aumento da eficiência é em torno de 22%, o que representa uma economia considerável em relação à máquinas elétricas.

**Tabela 5 – Ponto de Operação 2 (Torque 1,0 N.m – Velocidade 400 rpm)**

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 50,93577 | Tensão [V/fase]        | 35,8564  |
| Frequência [Hz]        | 13,93    | Frequência [Hz]        | 14,90    |
| Rendimento             | 0,546237 | Rendimento             | 0,641471 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 17,43%   |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 52,2     | Tensão [V/fase]        | 35,1     |
| Frequência [Hz]        | 13,90    | Frequência [Hz]        | 14,90    |
| Rendimento             | 0,460157 | Rendimento             | 0,562249 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 22,19%   |

**Fonte: Autoria Própria**

### 4.4 PONTO DE OPERAÇÃO 3

No ponto de operação 3, de 1,5 N.m e 600 rpm há aumento na eficiência de aproximadamente 10% experimentalmente, conforme Tabela 6. Nota-se que tanto a velocidade quanto a carga são maiores que no ponto e operação 2 e com isso o aumento de rendimento entre os dois tipos de controle é menor, porém ainda é relativamente alto.

**Tabela 6 – Ponto de Operação 3 (Torque 1,5 N.m – Velocidade 600 rpm)**

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 76,3488  | Tensão [V/fase]        | 60,3062  |
| Frequência [Hz]        | 20,88    | Frequência [Hz]        | 21,62    |
| Rendimento             | 0,697894 | Rendimento             | 0,728199 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 4,34%    |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 78,8     | Tensão [V/fase]        | 57,5     |
| Frequência [Hz]        | 20,75    | Frequência [Hz]        | 21,62    |
| Rendimento             | 0,588235 | Rendimento             | 0,652325 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 10,90%   |

**Fonte: Autoria Própria**

#### 4.5 PONTO DE OPERAÇÃO 4

O seguinte ponto, com carga e velocidade de 2,0 N.m e 800 rpm respectivamente, o aumento na eficiência é menor, podendo ser observado pela Tabela 7. Contudo, ainda há aumento da eficiência, o que torna o controle  $V/f$  mais eficiente.

**Tabela 7 – Ponto de Operação 4 (Torque 2,0 N.m – Velocidade 800 rpm)**

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 101,7618 | Tensão [V/fase]        | 93,1836  |
| Frequência [Hz]        | 27,83    | Frequência [Hz]        | 28,11    |
| Rendimento             | 0,774809 | Rendimento             | 0,781188 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 0,82%    |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 103,9    | Tensão [V/fase]        | 85,4     |
| Frequência [Hz]        | 27,60    | Frequência [Hz]        | 28,11    |
| Rendimento             | 0,663507 | Rendimento             | 0,707889 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 6,69%    |

**Fonte: Autoria Própria**



#### 4.6 PONTO DE OPERAÇÃO 5

Na Tabela 8, propositalmente foi analisado um ponto de operação com uma carga maior, porém com a mesma velocidade que o ponto de operação 4. Computacionalmente, o algoritmo de Evolução Diferencial tem como resposta ótima, a própria resposta do controle  $V/f$  constante. Porém experimentalmente, há um leve aumento na eficiência, sendo tal diferença justificável pela imprecisão da estimativa paramétrica do motor.

**Tabela 8 – Ponto de Operação 5 (Torque 3,0 N.m – Velocidade 800 rpm)**

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 104,2483 | Tensão [V/fase]        | 104,2483 |
| Frequência [Hz]        | 28,51    | Frequência [Hz]        | 28,51    |
| Rendimento             | 0,77892  | Rendimento             | 0,77892  |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | ---      |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 104,6    | Tensão [V/fase]        | 98,0     |
| Frequência [Hz]        | 28,50    | Frequência [Hz]        | 28,52    |
| Rendimento             | 0,683365 | Rendimento             | 0,694252 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 1,59%    |

**Fonte: Autoria Própria**

#### 4.7 PONTO DE OPERAÇÃO 6

O ponto de operação 6, conforme Tabela 9, é um ponto com carga e velocidade maiores que os pontos tratados até aqui e, da mesma forma que o ponto de operação anterior, computacionalmente a resposta ótima é o controle  $V/f$  constante e experimentalmente há um leve aumento de eficiência.

**Tabela 9 – Ponto de Operação 6 (Torque 4,0 N.m – Velocidade 1200 rpm)**

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 155,0744 | Tensão [V/fase]        | 155,0744 |
| Frequência [Hz]        | 42,41    | Frequência [Hz]        | 42,41    |
| Rendimento             | 0,829818 | Rendimento             | 0,829818 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | ---      |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 157,6    | Tensão [V/fase]        | 147,5    |
| Frequência [Hz]        | 42,20    | Frequência [Hz]        | 42,42    |
| Rendimento             | 0,727509 | Rendimento             | 0,731101 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 0,49%    |

**Fonte: Autoria Própria**

#### 4.8 PONTO DE OPERAÇÃO 7

Sétimo e último ponto de operação, possui um torque 20% superior ao torque nominal da máquina e velocidade abaixo da nominal, porém superior aos pontos analisados anteriormente, conforme Tabela 10.

**Tabela 10 – Ponto de Operação 7 (Torque 5,0 N.m – Velocidade 1400 rpm)**

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 181,8038 | Tensão [V/fase]        | 181,8038 |
| Frequência [Hz]        | 49,72    | Frequência [Hz]        | 49,72    |
| Rendimento             | 0,834521 | Rendimento             | 0,834521 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | ---      |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 181,2    | Tensão [V/fase]        | 179,2    |
| Frequência [Hz]        | 49,30    | Frequência [Hz]        | 49,72    |
| Rendimento             | 0,721366 | Rendimento             | 0,728236 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 0,95%    |

**Fonte: Autoria Própria**

A análise realizada pela Tabela 10 é equivalente à análise do ponto de operação 6, discutido anteriormente. Em simulação, o rendimento ótimo é equivalente ao rendimento obtido pelo fluxo constante e experimentalmente, há um pequeno aumento na eficiência.

Com os resultados obtidos, pode-se observar que para determinar se o controle  $V/f$  constante ou o controle  $V/f$  otimizado é qual determina o maior rendimento do motor de indução, é necessário conhecer o ponto de operação de torque e velocidade de aplicação, não podendo analisa-los separadamente.

Portanto, o controle escalar de fluxo otimizado é mais eficiente que o controle escalar convencional quando necessário que o motor de indução opere a baixos conjugados de carga e baixas velocidades. Entretanto, o conjugado de carga possui relevância maior, ou seja, ao se aumentar a carga e manter a velocidade constante o controle que fornece maior rendimento pode mudar de controle de fluxo otimizado para o controle de fluxo constante. Já ao se manter o conjugado de carga constante e aumentar a velocidade, o mesmo controle fornecerá rendimento otimizado para todos os pontos de operação.

Diversos pontos de operação, além dos já citados, foram realizados e seus respectivos resultados encontram-se no Anexo A.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho realizou-se uma proposta de controle escalar com o fluxo de entreferro otimizado para aumento da eficiência energética de um motor de indução trifásico. A estimativa dos valores de tensão e frequência de acionamento foi obtida pelo algoritmo de otimização de Evolução Diferencial e posteriormente foi realizado testes experimentais para a validação dos resultados simulados.

Observou-se que para valores baixos de torque, o rendimento mecânico do motor é mais eficiente quando o fluxo de entreferro é otimizado do que quando se mantém o fluxo constante, chegando a pontos de operação com até 84% de otimização. A variação de velocidade também interfere no aumento de rendimento em comparação com os dois métodos de controle, porém, não tão significativamente quanto o aumento da carga.

A diferença entre os rendimentos obtidos por simulação e os experimentais ocorre devido ao uso de parâmetros mecânicos da máquina estimados. Desta forma, fica evidente que quanto mais precisa a estimação dos parâmetros da máquina, melhores e mais confiáveis serão os resultados fornecidos pela metodologia proposta.

Por fim, é importante ressaltar que o trabalho possui grande potencial de aplicação no setor industrial, uma vez que este, tipicamente, possui motores sobre dimensionados, operando com cargas inferiores à nominal.

## REFERÊNCIAS

CACCIATO, M., CONSOLI, A., SCARCELLA, G., SCELBA, G., TESTA A. **Efficiency optimization techniques via constant optimal slip control of induction motor drives**. International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, p. 33–38, 2006.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. Porto Alegre, Brasil: AMGH, 2013.

CONSOLI, A., SCELBA, G., SCARCELLA, G., CACCIATO, M. **An effective energy-saving scalar control for industrial pmsm drives**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 60, n. 9, p. 3658–3669, 2013.

FITZGERALD, A. E., KINGSLEY, C., UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas: com introdução à eletrônica de potência**. Porto Alegre, Brasil: Bookman, 2006.

GODOY, W. F. **Multiclassificador Inteligente de Falhas no Domínio do Tempo em Motores de Indução Trifásicos Alimentados por Inversores de Frequência**. Tese de doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2016.

GOEDEL, A. **Estimador Neural de Velocidade para Motores de Indução Trifásicos**. Tese de doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.

HAMID, R. H. A., AMIN, A. M. A., AHMED, R. S., EL-GAMMAL, A. A. A. **New technique for maximum efficiency and minimum operating cost of induction motors based on particle swarm optimization (PSO)**. IEEE 32nd Annual Conference on Industrial Electronics, p. 1029–1034, 2006.

KABOLI, S., ZOLGHADRI, M., VAHDATI-KHAJEH, E. **A fast flux search controller for dtc based induction motor drives**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 54, n. 5, p. 2407–2416, 2007.

KRISHNAN, R. **Electric Motor Drives: modeling, analysis, and control**. New Jersey, USA: Prentice Hall, 2001.

OLIVEIRA, G. T. S. **Estudo e Aplicações da Evolução Diferencial**. Dissertação – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Uberlândia, 2006.

QING, A. **Differential Evolution: Fundamentals and Applications in Electrical Engineering**. Noida, India: Wiley 2009.

SANTOS, T. H. dos. **Estimador Neural de Velocidade Aplicado a um Driver de Controle Escalar no Motor de Indução Trifásico**. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2012.

SANTOS, T. H., GOEDEL, A., SILVA, S. A. O. da, SUETAKE, M. **Scalar control of an induction motor using a neural sensorless technique**. Electric Power Systems Research, v. 108, n. 0, p. 322 – 330, 2014.

SILVA, R. C. P. **Um Estudo Sobre a Configuração Automática do Algoritmo de Evolução Diferencial**. Dissertação – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2012.

STORN, R., PRICE, K. **Differential Evolution: a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces**. Technical Report TR-95-012. International Computer Science Institute. Berkeley, mar. 1995.

SUETAKE, M., SILVA, I. da, GOEDEL, A. **Embedded DSP-based compact fuzzy system and its application for induction-motor v/f speed control**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 58, n. 3, p. 750–760, 2011.

WAHEEDABEEVI, M., SUKESHKUMAR, A., NAIR, N. S. **New online loss-minimization-based control of scalar and vector-controlled induction motor drives**. IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, p. 1–7, 2012.

YOKOGAWA METERS & INSTRUMENTS CORPORATION. **WT3000 Precision Power Analyzer User's Manual**. YMI, 2014, 384 p.

## ANEXO A – PONTOS DE OPERAÇÃO

Tabela 11 – Ponto de Operação 8 (Torque 0,5 N.m – Velocidade 200 rpm)

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 25,59586 | Tensão [V/fase]        | 15,6617  |
| Frequência [Hz]        | 7,00     | Frequência [Hz]        | 8,2      |
| Rendimento             | 0,269694 | Rendimento             | 0,472309 |
| Aumento de Eficiência  |          | 75,13%                 |          |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 25,2     | Tensão [V/fase]        | 16,6     |
| Frequência [Hz]        | 7,00     | Frequência [Hz]        | 8,20     |
| Rendimento             | 0,26455  | Rendimento             | 0,387597 |
| Aumento de Eficiência  |          | 46,51%                 |          |

Fonte: Autoria Própria

Tabela 12 – Ponto de Operação 9 (Torque 0,5 N.m – Velocidade 600 rpm)

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 74,15487 | Tensão [V/fase]        | 35,3531  |
| Frequência [Hz]        | 20,28    | Frequência [Hz]        | 21,55    |
| Rendimento             | 0,485327 | Rendimento             | 0,728713 |
| Aumento de Eficiência  |          | 50,15%                 |          |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 79,5     | Tensão [V/fase]        | 34,4     |
| Frequência [Hz]        | 20,21    | Frequência [Hz]        | 21,55    |
| Rendimento             | 0,314721 | Rendimento             | 0,621118 |
| Aumento de Eficiência  |          | 97,35%                 |          |

Fonte: Autoria Própria

**Tabela 13 – Ponto de Operação 10 (Torque 0,5 N.m – Velocidade 800 rpm)**

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 98,5075  | Tensão [V/fase]        | 44,9519  |
| Frequência [Hz]        | 26,94    | Frequência [Hz]        | 28,25    |
| Rendimento             | 0,551412 | Rendimento             | 0,781566 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 41,74%   |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 105,4    | Tensão [V/fase]        | 44,1     |
| Frequência [Hz]        | 26,87    | Frequência [Hz]        | 28,25    |
| Rendimento             | 0,340081 | Rendimento             | 0,667727 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 96,34%   |

**Fonte: Autoria Própria****Tabela 14 – Ponto de Operação 11 (Torque 0,5 N.m – Velocidade 1000 rpm)**

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 122,8967 | Tensão [V/fase]        | 55,3452  |
| Frequência [Hz]        | 33,61    | Frequência [Hz]        | 34,88    |
| Rendimento             | 0,608473 | Rendimento             | 0,817464 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 34,35%   |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 133,5    | Tensão [V/fase]        | 54,9     |
| Frequência [Hz]        | 33,51    | Frequência [Hz]        | 34,88    |
| Rendimento             | 0,349076 | Rendimento             | 0,701299 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 100,90%  |

**Fonte: Autoria Própria**



**Tabela 15 – Ponto de Operação 12 (Torque 0,5 N.m – Velocidade 1200 rpm)**

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 147,2493 | Tensão [V/fase]        | 64,7951  |
| Frequência [Hz]        | 40,27    | Frequência [Hz]        | 41,58    |
| Rendimento             | 0,645727 | Rendimento             | 0,842406 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 30,46%   |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 160,4    | Tensão [V/fase]        | 63,9     |
| Frequência [Hz]        | 40,20    | Frequência [Hz]        | 41,58    |
| Rendimento             | 0,369076 | Rendimento             | 0,727069 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 97,58%   |

**Fonte: Autoria Própria****Tabela 16 – Ponto de Operação 13 (Torque 0,5 N.m – Velocidade 1400 rpm)**

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 171,6385 | Tensão [V/fase]        | 74,8070  |
| Frequência [Hz]        | 46,94    | Frequência [Hz]        | 48,24    |
| Rendimento             | 0,682654 | Rendimento             | 0,862459 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 26,34%   |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 186,8    | Tensão [V/fase]        | 73,4     |
| Frequência [Hz]        | 46,89    | Frequência [Hz]        | 48,24    |
| Rendimento             | 0,371134 | Rendimento             | 0,714286 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 92,46%   |

**Fonte: Autoria Própria**

**Tabela 17 – Ponto de Operação 14 (Torque 0,5 N.m – Velocidade 1600 rpm)**

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 195,9912 | Tensão [V/fase]        | 78,9468  |
| Frequência [Hz]        | 53,6     | Frequência [Hz]        | 55,19    |
| Rendimento             | 0,706055 | Rendimento             | 0,875029 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 23,93%   |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 213,5    | Tensão [V/fase]        | 78,6     |
| Frequência [Hz]        | 53,55    | Frequência [Hz]        | 55,19    |
| Rendimento             | 0,384615 | Rendimento             | 0,727117 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 89,05%   |

**Fonte: Autoria Própria****Tabela 18 – Ponto de Operação 15 (Torque 0,5 N.m – Velocidade 1740 rpm)**

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 213,0673 | Tensão [V/fase]        | 93,6443  |
| Frequência [Hz]        | 58,27    | Frequência [Hz]        | 59,50    |
| Rendimento             | 0,725493 | Rendimento             | 0,886181 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 22,15%   |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 233,4    | Tensão [V/fase]        | 92,3     |
| Frequência [Hz]        | 58,22    | Frequência [Hz]        | 59,50    |
| Rendimento             | 0,374844 | Rendimento             | 0,730924 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 94,99%   |

**Fonte: Autoria Própria**

**Tabela 19 – Ponto de Operação 16 (Torque 1,0 N.m – Velocidade 600 rpm)**

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 75,2153  | Tensão [V/fase]        | 49,9992  |
| Frequência [Hz]        | 20,57    | Frequência [Hz]        | 21,55    |
| Rendimento             | 0,635677 | Rendimento             | 0,728645 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 14,62%   |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 79,5     | Tensão [V/fase]        | 46,9     |
| Frequência [Hz]        | 20,54    | Frequência [Hz]        | 21,55    |
| Rendimento             | 0,490157 | Rendimento             | 0,656085 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 33,65%   |

**Fonte: Autoria Própria****Tabela 20 – Ponto de Operação 17 (Torque 1,0 N.m – Velocidade 800 rpm)**

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 99,5313  | Tensão [V/fase]        | 64,8530  |
| Frequência [Hz]        | 27,22    | Frequência [Hz]        | 28,17    |
| Rendimento             | 0,694575 | Rendimento             | 0,781534 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 12,52%   |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 104,7    | Tensão [V/fase]        | 59,8     |
| Frequência [Hz]        | 27,02    | Frequência [Hz]        | 28,17    |
| Rendimento             | 0,51875  | Rendimento             | 0,690236 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 33,06%   |

**Fonte: Autoria Própria**

Tabela 21 – Ponto de Operação 18 (Torque 1,0 N.m – Velocidade 1000 rpm)

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 123,8840 | Tensão [V/fase]        | 78,0769  |
| Frequência [Hz]        | 33,88    | Frequência [Hz]        | 34,89    |
| Rendimento             | 0,737952 | Rendimento             | 0,817239 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 10,74%   |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 132,7    | Tensão [V/fase]        | 72,8     |
| Frequência [Hz]        | 33,79    | Frequência [Hz]        | 34,89    |
| Rendimento             | 0,531969 | Rendimento             | 0,720165 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 35,38%   |

**Fonte: Autoria Própria**

Tabela 22 – Ponto de Operação 19 (Torque 1,0 N.m – Velocidade 1200 rpm)

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 148,2732 | Tensão [V/fase]        | 92,3396  |
| Frequência [Hz]        | 40,55    | Frequência [Hz]        | 41,55    |
| Rendimento             | 0,772483 | Rendimento             | 0,843003 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 9,13%    |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 159,1    | Tensão [V/fase]        | 86,5     |
| Frequência [Hz]        | 40,42    | Frequência [Hz]        | 41,55    |
| Rendimento             | 0,546329 | Rendimento             | 0,744868 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 36,34%   |

**Fonte: Autoria Própria**

Tabela 23 – Ponto de Operação 20 (Torque 1,0 N.m – Velocidade 1400 rpm)

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 172,6258 | Tensão [V/fase]        | 106,0941 |
| Frequência [Hz]        | 47,21    | Frequência [Hz]        | 48,23    |
| Rendimento             | 0,796905 | Rendimento             | 0,862274 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 8,20%    |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 185,4    | Tensão [V/fase]        | 103,1    |
| Frequência [Hz]        | 47,08    | Frequência [Hz]        | 48,23    |
| Rendimento             | 0,550669 | Rendimento             | 0,750888 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 36,36%   |

**Fonte: Autoria Própria**

Tabela 24 – Ponto de Operação 21 (Torque 1,0 N.m – Velocidade 1600 rpm)

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 196,9784 | Tensão [V/fase]        | 123,2139 |
| Frequência [Hz]        | 53,87    | Frequência [Hz]        | 54,81    |
| Rendimento             | 0,816219 | Rendimento             | 0,87734  |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 7,49%    |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 211,5    | Tensão [V/fase]        | 118,9    |
| Frequência [Hz]        | 53,76    | Frequência [Hz]        | 54,81    |
| Rendimento             | 0,560215 | Rendimento             | 0,762943 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 36,19%   |

**Fonte: Autoria Própria**

**Tabela 25 – Ponto de Operação 22 (Torque 1,0 N.m – Velocidade 1740 rpm)**

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 214,0545 | Tensão [V/fase]        | 133,2352 |
| Frequência [Hz]        | 58,54    | Frequência [Hz]        | 59,48    |
| Rendimento             | 0,829158 | Rendimento             | 0,885975 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 6,85%    |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 232,6    | Tensão [V/fase]        |          |
| Frequência [Hz]        | 58,42    | Frequência [Hz]        | 129,1    |
| Rendimento             | 0,555387 | Rendimento             | 59,48    |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 37,05%   |

**Fonte: Autoria Própria****Tabela 26 – Ponto de Operação 23 (Torque 1,5 N.m – Velocidade 400 rpm)**

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 52,1790  | Tensão [V/fase]        | 44,3408  |
| Frequência [Hz]        | 14,27    | Frequência [Hz]        | 14,85    |
| Rendimento             | 0,61352  | Rendimento             | 0,641501 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 4,56%    |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 52,3     | Tensão [V/fase]        | 42,7     |
| Frequência [Hz]        | 14,24    | Frequência [Hz]        | 14,85    |
| Rendimento             | 0,540301 | Rendimento             | 0,59044  |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 9,28%    |

**Fonte: Autoria Própria**

**Tabela 27 – Ponto de Operação 24 (Torque 1,5 N.m – Velocidade 800 rpm)**

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 100,6283 | Tensão [V/fase]        | 76,2446  |
| Frequência [Hz]        | 27,52    | Frequência [Hz]        | 28,34    |
| Rendimento             | 0,751934 | Rendimento             | 0,781084 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 3,88%    |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 104,4    | Tensão [V/fase]        | 71,0     |
| Frequência [Hz]        | 27,30    | Frequência [Hz]        | 28,34    |
| Rendimento             | 0,613437 | Rendimento             | 0,695847 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 13,43%   |

**Fonte: Autoria Própria****Tabela 28 – Ponto de Operação 25 (Torque 1,5 N.m – Velocidade 1000 rpm)**

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 124,9444 | Tensão [V/fase]        | 96,6311  |
| Frequência [Hz]        | 34,17    | Frequência [Hz]        | 34,85    |
| Rendimento             | 0,789426 | Rendimento             | 0,817336 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 3,53%    |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 131,7    | Tensão [V/fase]        | 90,2     |
| Frequência [Hz]        | 34,00    | Frequência [Hz]        | 34,85    |
| Rendimento             | 0,627247 | Rendimento             | 0,736597 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 17,43%   |

**Fonte: Autoria Própria**

**Tabela 29 – Ponto de Operação 26 (Torque 1,5 N.m – Velocidade 1200 rpm)**

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 149,2970 | Tensão [V/fase]        | 111,8986 |
| Frequência [Hz]        | 40,83    | Frequência [Hz]        | 41,59    |
| Rendimento             | 0,817486 | Rendimento             | 0,842916 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 3,11%    |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 157,6    | Tensão [V/fase]        | 104,0    |
| Frequência [Hz]        | 40,70    | Frequência [Hz]        | 41,59    |
| Rendimento             | 0,645271 | Rendimento             | 0,753589 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 16,79%   |

**Fonte: Autoria Própria****Tabela 30 – Ponto de Operação 27 (Torque 1,5 N.m – Velocidade 1400 rpm)**

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 173,6496 | Tensão [V/fase]        | 127,1981 |
| Frequência [Hz]        | 47,49    | Frequência [Hz]        | 48,31    |
| Rendimento             | 0,838768 | Rendimento             | 0,862132 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 2,78%    |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 183,9    | Tensão [V/fase]        | 117,2    |
| Frequência [Hz]        | 47,30    | Frequência [Hz]        | 48,31    |
| Rendimento             | 0,649159 | Rendimento             | 0,768152 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 18,33%   |

**Fonte: Autoria Própria**



**Tabela 31 – Ponto de Operação 28 (Torque 1,5 N.m – Velocidade 1600 rpm)**

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 198,0023 | Tensão [V/fase]        | 147,8804 |
| Frequência [Hz]        | 54,15    | Frequência [Hz]        | 54,88    |
| Rendimento             | 0,855458 | Rendimento             | 0,877383 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 2,56%    |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 209,4    | Tensão [V/fase]        | 135,9    |
| Frequência [Hz]        | 54,00    | Frequência [Hz]        | 54,88    |
| Rendimento             | 0,658824 | Rendimento             | 0,775194 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 17,66%   |

**Fonte: Autoria Própria****Tabela 32 – Ponto de Operação 29 (Torque 1,5 N.m – Velocidade 1740 rpm)**

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 215,0418 | Tensão [V/fase]        | 160,3268 |
| Frequência [Hz]        | 58,81    | Frequência [Hz]        | 59,54    |
| Rendimento             | 0,864984 | Rendimento             | 0,886154 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 2,45%    |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 230,2    | Tensão [V/fase]        | 153,0    |
| Frequência [Hz]        | 58,70    | Frequência [Hz]        | 59,54    |
| Rendimento             | 0,67019  | Rendimento             | 0,775393 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 15,70%   |

**Fonte: Autoria Própria**

**Tabela 33 – Ponto de Operação 30 (Torque 2,0 N.m – Velocidade 400 rpm)**

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 53,5685  | Tensão [V/fase]        | 51,5165  |
| Frequência [Hz]        | 14,65    | Frequência [Hz]        | 14,82    |
| Rendimento             | 0,638621 | Rendimento             | 0,64124  |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 0,41%    |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 53,2     | Tensão [V/fase]        | 51,0     |
| Frequência [Hz]        | 14,80    | Frequência [Hz]        | 14,82    |
| Rendimento             | 0,563934 | Rendimento             | 0,573333 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 1,67%    |

**Fonte: Autoria Própria****Tabela 34 – Ponto de Operação 31 (Torque 2,0 N.m – Velocidade 600 rpm)**

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 77,5555  | Tensão [V/fase]        | 69,9286  |
| Frequência [Hz]        | 21,21    | Frequência [Hz]        | 21,60    |
| Rendimento             | 0,722741 | Rendimento             | 0,72848  |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 0,79%    |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 78,5     | Tensão [V/fase]        | 65,5     |
| Frequência [Hz]        | 21,11    | Frequência [Hz]        | 21,60    |
| Rendimento             | 0,627213 | Rendimento             | 0,656168 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 4,62%    |

**Fonte: Autoria Própria**

**Tabela 35 – Ponto de Operação 32 (Torque 2,0 N.m – Velocidade 1000 rpm)**

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 126,0413 | Tensão [V/fase]        | 112,4924 |
| Frequência [Hz]        | 34,47    | Frequência [Hz]        | 34,82    |
| Rendimento             | 0,810334 | Rendimento             | 0,817235 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 0,85%    |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 131,0    | Tensão [V/fase]        | 103,4    |
| Frequência [Hz]        | 34,30    | Frequência [Hz]        | 34,82    |
| Rendimento             | 0,683069 | Rendimento             | 0,736842 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 7,87%    |

**Fonte: Autoria Própria****Tabela 36 – Ponto de Operação 33 (Torque 2,0 N.m – Velocidade 1200 rpm)**

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 150,3574 | Tensão [V/fase]        | 126,6068 |
| Frequência [Hz]        | 41,12    | Frequência [Hz]        | 41,67    |
| Rendimento             | 0,836173 | Rendimento             | 0,842594 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        |          |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 157,4    | Tensão [V/fase]        | 118,2    |
| Frequência [Hz]        | 41,90    | Frequência [Hz]        | 41,67    |
| Rendimento             | 0,694444 | Rendimento             | 0,753138 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 8,45%    |

**Fonte: Autoria Própria**

**Tabela 37 – Ponto de Operação 34 (Torque 2,0 N.m – Velocidade 1400 rpm)**

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 174,71   | Tensão [V/fase]        | 150,4487 |
| Frequência [Hz]        | 47,78    | Frequência [Hz]        | 48,22    |
| Rendimento             | 0,855981 | Rendimento             | 0,862324 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 0,74%    |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 181,5    | Tensão [V/fase]        | 139,6    |
| Frequência [Hz]        | 47,50    | Frequência [Hz]        | 48,22    |
| Rendimento             | 0,703542 | Rendimento             | 0,770039 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 9,45%    |

**Fonte: Autoria Própria****Tabela 38 – Ponto de Operação 35 (Torque 2,0 N.m – Velocidade 1600 rpm)**

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 199,0627 | Tensão [V/fase]        | 169,8005 |
| Frequência [Hz]        | 54,44    | Frequência [Hz]        | 54,9     |
| Rendimento             | 0,87146  | Rendimento             | 0,877401 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 0,68%    |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 206,5    | Tensão [V/fase]        | 157,2    |
| Frequência [Hz]        | 54,20    | Frequência [Hz]        | 54,90    |
| Rendimento             | 0,71536  | Rendimento             | 0,780488 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 9,10%    |

**Fonte: Autoria Própria**

**Tabela 39 – Ponto de Operação 36 (Torque 2,0 N.m – Velocidade 1740 rpm)**

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 216,1022 | Tensão [V/fase]        | 187,2984 |
| Frequência [Hz]        | 59,1     | Frequência [Hz]        | 59,5     |
| Rendimento             | 0,87146  | Rendimento             | 0,886089 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 0,65%    |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 225,8    | Tensão [V/fase]        | 173,1    |
| Frequência [Hz]        | 58,90    | Frequência [Hz]        | 59,50    |
| Rendimento             | 0,717656 | Rendimento             | 0,785531 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 9,46%    |

**Fonte: Autoria Própria****Tabela 40 – Ponto de Operação 37 (Torque 3,0 N.m – Velocidade 600 rpm)**

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 80,2613  | Tensão [V/fase]        | 80,2613  |
| Frequência [Hz]        | 21,95    | Frequência [Hz]        | 21,95    |
| Rendimento             | 0,73326  | Rendimento             | 0,73326  |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | ---      |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 79,4     | Tensão [V/fase]        | 79,1     |
| Frequência [Hz]        | 22,10    | Frequência [Hz]        | 21,96    |
| Rendimento             | 0,622105 | Rendimento             | 0,633734 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 1,87%    |

**Fonte: Autoria Própria**

Tabela 41 – Ponto de Operação 38 (Torque 3,0 N.m – Velocidade 1000 rpm)

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 128,3815 | Tensão [V/fase]        | 128,3815 |
| Frequência [Hz]        | 35,11    | Frequência [Hz]        | 35,11    |
| Rendimento             | 0,81583  | Rendimento             | 0,81583  |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | ---      |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 131,0    | Tensão [V/fase]        | 120,1    |
| Frequência [Hz]        | 35,90    | Frequência [Hz]        | 35,11    |
| Rendimento             | 0,711864 | Rendimento             | 0,728121 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 2,28%    |

Fonte: Autoria Própria

Tabela 42 – Ponto de Operação 39 (Torque 3,0 N.m – Velocidade 1200 rpm)

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 152,6245 | Tensão [V/fase]        | 152,6245 |
| Frequência [Hz]        | 41,74    | Frequência [Hz]        | 41,74    |
| Rendimento             | 0,842025 | Rendimento             | 0,842025 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | ---      |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 156,5    | Tensão [V/fase]        | 140,5    |
| Frequência [Hz]        | 41,60    | Frequência [Hz]        | 41,77    |
| Rendimento             | 0,736472 | Rendimento             | 0,747551 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 1,50%    |

Fonte: Autoria Própria

**Tabela 43 – Ponto de Operação 40 (Torque 3,0 N.m – Velocidade 1400 rpm)**

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 176,9040 | Tensão [V/fase]        | 176,9040 |
| Frequência [Hz]        | 48,38    | Frequência [Hz]        | 48,38    |
| Rendimento             | 0,861672 | Rendimento             | 0,861672 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | ---      |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 182,7    | Tensão [V/fase]        | 162,0    |
| Frequência [Hz]        | 48,10    | Frequência [Hz]        | 48,41    |
| Rendimento             | 0,745636 | Rendimento             | 0,766951 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 2,86%    |

**Fonte: Autoria Própria****Tabela 44 – Ponto de Operação 41 (Torque 3,0 N.m – Velocidade 1600 rpm)**

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 201,2200 | Tensão [V/fase]        | 201,2200 |
| Frequência [Hz]        | 55,03    | Frequência [Hz]        | 55,03    |
| Rendimento             | 0,876938 | Rendimento             | 0,876938 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | ---      |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 208,0    | Tensão [V/fase]        | 183,8    |
| Frequência [Hz]        | 54,80    | Frequência [Hz]        | 55,04    |
| Rendimento             | 0,756189 | Rendimento             | 0,7791   |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 3,03%    |

**Fonte: Autoria Própria**

**Tabela 45 – Ponto de Operação 42 (Torque 3,0 N.m – Velocidade 1740 rpm)**

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 218,2596 | Tensão [V/fase]        | 218,2596 |
| Frequência [Hz]        | 59,69    | Frequência [Hz]        | 59,69    |
| Rendimento             | 0,885745 | Rendimento             | 0,885745 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | ---      |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 226,6    | Tensão [V/fase]        | 189,9    |
| Frequência [Hz]        | 59,40    | Frequência [Hz]        | 59,69    |
| Rendimento             | 0,758333 | Rendimento             | 0,788946 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 4,04%    |

**Fonte: Autoria Própria****Tabela 46 – Ponto de Operação 43 (Torque 4,0 N.m – Velocidade 600 rpm)**

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 83,3694  | Tensão [V/fase]        | 83,3694  |
| Frequência [Hz]        | 22,80    | Frequência [Hz]        | 22,80    |
| Rendimento             | 0,694143 | Rendimento             | 0,694143 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | ---      |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 84,5     | Tensão [V/fase]        | 85,2     |
| Frequência [Hz]        | 23,90    | Frequência [Hz]        | 22,80    |
| Rendimento             | 0,5238   | Rendimento             | 0,587031 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 12,07%   |

**Fonte: Autoria Própria**



**Tabela 47 – Ponto de Operação 44 (Torque 4,0 N.m – Velocidade 800 rpm)**

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 106,9907 | Tensão [V/fase]        | 106,9907 |
| Frequência [Hz]        | 29,26    | Frequência [Hz]        | 29,26    |
| Rendimento             | 0,758785 | Rendimento             | 0,758785 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | ---      |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 107,1    | Tensão [V/fase]        | 106,8    |
| Frequência [Hz]        | 29,50    | Frequência [Hz]        | 29,26    |
| Rendimento             | 0,638177 | Rendimento             | 0,65782  |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 3,08%    |

**Fonte: Autoria Própria****Tabela 48 – Ponto de Operação 45 (Torque 4,0 N.m – Velocidade 1000 rpm)**

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 130,9411 | Tensão [V/fase]        | 130,9411 |
| Frequência [Hz]        | 35,81    | Frequência [Hz]        | 35,81    |
| Rendimento             | 0,80064  | Rendimento             | 0,80064  |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | ---      |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 132,4    | Tensão [V/fase]        | 126,3    |
| Frequência [Hz]        | 35,70    | Frequência [Hz]        | 35,81    |
| Rendimento             | 0,691657 | Rendimento             | 0,699865 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 1,19%    |

**Fonte: Autoria Própria**

Tabela 49 – Ponto de Operação 46 (Torque 4,0 N.m – Velocidade 1400 rpm)

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |           |
|------------------------|----------|------------------------|-----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |           |
| Tensão [V/fase]        | 179,2807 | Tensão [V/fase]        | 179,2807  |
| Frequência [Hz]        | 49,03    | Frequência [Hz]        | 49,03     |
| Rendimento             | 0,851513 | Rendimento             | 0,851513  |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | ---       |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |           |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |           |
| Tensão [V/fase]        | 182,7    | Tensão [V/fase]        | 168,9     |
| Frequência [Hz]        | 48,80    | Frequência [Hz]        | 49,03     |
| Rendimento             | 0,744735 | Rendimento             | 0,753478% |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 1,17%     |

**Fonte: Autoria Própria**

Tabela 50 – Ponto de Operação 47 (Torque 4,0 N.m – Velocidade 1600 rpm)

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 203,5237 | Tensão [V/fase]        | 203,5237 |
| Frequência [Hz]        | 55,66    | Frequência [Hz]        | 55,66    |
| Rendimento             | 0,868325 | Rendimento             | 0,868325 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | ---      |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 208,0    | Tensão [V/fase]        | 191,7    |
| Frequência [Hz]        | 55,40    | Frequência [Hz]        | 55,66    |
| Rendimento             | 0,767383 | Rendimento             | 0,769406 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 0,26%    |

**Fonte: Autoria Própria**

**Tabela 51 – Ponto de Operação 48 (Torque 4,0 N.m – Velocidade 1740 rpm)**

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 220,5266 | Tensão [V/fase]        | 220,5266 |
| Frequência [Hz]        | 60,31    | Frequência [Hz]        | 60,31    |
| Rendimento             | 0,877921 | Rendimento             | 0,877921 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | ---      |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 225,6    | Tensão [V/fase]        | 206,8    |
| Frequência [Hz]        | 60,10    | Frequência [Hz]        | 60,31    |
| Rendimento             | 0,770201 | Rendimento             | 0,778767 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 1,11%    |

**Fonte: Autoria Própria****Tabela 52 – Ponto de Operação 49 (Torque 5,0 N.m – Velocidade 600 rpm)**

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 87,02593 | Tensão [V/fase]        | 87,02593 |
| Frequência [Hz]        | 23,80    | Frequência [Hz]        | 23,80    |
| Rendimento             | 0,651761 | Rendimento             | 0,651761 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | ---      |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 98,1     | Tensão [V/fase]        | 93,5     |
| Frequência [Hz]        | 27,15    | Frequência [Hz]        | 23,81    |
| Rendimento             | 0,353741 | Rendimento             | 0,529206 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 49,60%   |

**Fonte: Autoria Própria**

**Tabela 53 – Ponto de Operação 50 (Torque 5,0 N.m – Velocidade 800 rpm)**

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 110,0988 | Tensão [V/fase]        | 110,0988 |
| Frequência [Hz]        | 30,11    | Frequência [Hz]        | 30,11    |
| Rendimento             | 0,727633 | Rendimento             | 0,727633 |
| Aumento de Eficiência  |          | ---                    |          |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 110,2    | Tensão [V/fase]        | 114,5    |
| Frequência [Hz]        | 30,70    | Frequência [Hz]        | 30,11    |
| Rendimento             | 0,582011 | Rendimento             | 0,612128 |
| Aumento de Eficiência  |          | 5,17%                  |          |

**Fonte: Autoria Própria****Tabela 54 – Ponto de Operação 51 (Torque 5,0 N.m – Velocidade 1000 rpm)**

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 133,7932 | Tensão [V/fase]        | 133,7932 |
| Frequência [Hz]        | 36,59    | Frequência [Hz]        | 36,59    |
| Rendimento             | 0,775911 | Rendimento             | 0,775911 |
| Aumento de Eficiência  |          | ---                    |          |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 132,8    | Tensão [V/fase]        | 134,2    |
| Frequência [Hz]        | 36,50    | Frequência [Hz]        | 36,59    |
| Rendimento             | 0,663537 | Rendimento             | 0,664207 |
| Aumento de Eficiência  |          | 0,10%                  |          |

**Fonte: Autoria Própria**

**Tabela 55 – Ponto de Operação 52 (Torque 5,0 N.m – Velocidade 1200 rpm)**

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 157,7436 | Tensão [V/fase]        | 157,7436 |
| Frequência [Hz]        | 43,14    | Frequência [Hz]        | 43,14    |
| Rendimento             | 0,809538 | Rendimento             | 0,809538 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | ---      |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 156,5    | Tensão [V/fase]        | 155,9    |
| Frequência [Hz]        | 42,90    | Frequência [Hz]        | 43,14    |
| Rendimento             | 0,694874 | Rendimento             | 0,699355 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 0,65%    |

**Fonte: Autoria Própria****Tabela 56 – Ponto de Operação 53 (Torque 5,0 N.m – Velocidade 1600 rpm)**

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 205,9736 | Tensão [V/fase]        | 205,9736 |
| Frequência [Hz]        | 56,33    | Frequência [Hz]        | 56,33    |
| Rendimento             | 0,853527 | Rendimento             | 0,853527 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | ---      |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 206,2    | Tensão [V/fase]        | 199,3    |
| Frequência [Hz]        | 55,80    | Frequência [Hz]        | 56,33    |
| Rendimento             | 0,742053 | Rendimento             | 0,749218 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 0,96%    |

**Fonte: Autoria Própria**

**Tabela 57 – Ponto de Operação 54 (Torque 5,0 N.m – Velocidade 1740 rpm)**

| <b>SIMULAÇÃO</b>       |          |                        |          |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 222,9400 | Tensão [V/fase]        | 222,9400 |
| Frequência [Hz]        | 60,97    | Frequência [Hz]        | 60,97    |
| Rendimento             | 0,864313 | Rendimento             | 0,864313 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | ---      |
| <b>EXPERIMENTAL</b>    |          |                        |          |
| <b>Fluxo Constante</b> |          | <b>Fluxo Otimizado</b> |          |
| Tensão [V/fase]        | 222,7    | Tensão [V/fase]        | 215,7    |
| Frequência [Hz]        | 60,49    | Frequência [Hz]        | 60,97    |
| Rendimento             | 0,749591 | Rendimento             | 0,758111 |
| Aumento de Eficiência  |          |                        | 1,13%    |

**Fonte: Autoria Própria**