



Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEL

Associação ampla UFSJ / CEFET-MG

---

## **Desenvolvimento de Aplicação em Python para Simulação de Falhas em Motores de Indução a Partir de Informações Disponíveis em Catálogos de Fabricantes**

---

**Lucas Henrique Gonçalves Ribeiro**

**Orientador:** Lane Maria Rabelo

**Coorientador:** Nome do Coorientador

São João del-Rei, DD de MMMMMM de AAAA.





Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEL

Associação ampla UFSJ / CEFET-MG

---

## **Desenvolvimento de Aplicação em Python para Simulação de Falhas em Motores de Indução a Partir de Informações Disponíveis em Catálogos de Fabricantes**

---

**Lucas Henrique Gonçalves Ribeiro**

Dissertação apresentada à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, associação ampla entre a Universidade Federal de São João del-Rei e o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

**Orientador:** Lane Maria Rabelo

**Coorientador:** Nome do Coorientador

São João del-Rei, DD de MMMMMM de AAAA.

Ficha catalográfica elaborada pela Divisão de Biblioteca (DIBIB)  
e Núcleo de Tecnologia da Informação (NTINF) da UFSJ,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

O89a      Ottoni, André Luiz Carvalho .  
Análise de Sensibilidade dos Parâmetros do  
Aprendizado por Reforço na Solução do Problema do  
Caixeiro Viajante / André Luiz Carvalho Ottoni ;  
orientador Erivelton Geraldo Nepomuceno;  
coorientador Marcos Santos de Oliveira. -- São João  
del-Rei, 2016.  
68 p.

Dissertação (Mestrado - Mestrado em Engenharia  
Elétrica) -- Universidade Federal de São João del  
Rei, 2016.

1. Inteligência Artificial. 2. Aprendizado por  
Reforço. 3. Problema do Caixeiro Viajante. 4. Análise  
de Sensibilidade dos Parâmetros. 5. Metodologia de  
Superfície de Resposta. I. Nepomuceno, Erivelton  
Geraldo, orient. II. Oliveira, Marcos Santos de , co  
orient. III. Título.

*Dedico este trabalho... (em uma única frase dedique o seu trabalho).*



---

# Agradecimentos

---

Deixe aqui os seus agradecimentos...





*"Aqui deve-se escrever a epígrafe."*

Autor(es) da epígrafe



---

# Resumo

---

Resumo em português do trabalho.

**Palavras-chave:** Modelo Latex, Dissertação de Mestrado, Engenharia Elétrica, UFSJ, CEFET.



---

# Abstract

---

Resumo em inglês do trabalho.

**Keywords:** Palavras-chave em inglês.



---

## Lista de Figuras

---

2.1	Tela inicial do SMIT . . . . .	3
2.2	Janela de Seleção de Variável . . . . .	5
3.1	Tela do Estimador de Parâmetros . . . . .	13
4.1	Tela do Modo Banco de Dados . . . . .	15





---

## Lista de Tabelas

---



---

## Lista de Símbolos

---

$\alpha$ : taxa de aprendizado.

$\alpha_k$ : taxa de aprendizado constante.

$\alpha_n(s,a)$ : taxa de aprendizado decaindo ao longo do tempo.

$\gamma$ : fator de desconto.

$\epsilon$ : parâmetro da política  $\epsilon - greedy$ .

$\lambda$ : traço de elegibilidade.

$s_t$ : estado no instante  $t$ .

$a_t$ : ação no instante  $t$ .

$r_{t+1}$ : reforço no instante  $t + 1$ .

$S$ : conjunto de estados possíveis do sistema.

$A$ : conjunto de ações que o agente pode realizar.

$T$ : função de transição de estados.

$R$ : função de recompensa.

$v_n(s,a)$ : contador do número de visitas ao par estado-ação.

$\pi$ : política de decisão para  $s_t$ .



---

## Lista de Abreviações

---

AG: Algoritmos Genéticos.

AR: Aprendizado por Reforço.

IA: Inteligência Artificial.

MDP: Processos de Decisão de Markov (*Markov Decision Processes*).

PCV: Problema do Caixeiro Viajante.

PKS: Problema dos K-Servos.

PRV: Problema de Roteamento de Veículos.

RSM: Metodologia de Superfície de Resposta (*Response Surface Methodology*).

SI: Sistemas Inteligentes.

TSP: *Symmetric Traveling Salesman Problem*.

ATSP: *Asymmetric Traveling Salesman Problem*.

VI: Variável Independente.

KS: Teste de Kolmogorov-Smirnov.



---

# Sumário

---

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Simulador</b>	<b>3</b>
2.1	Barra de Tarefas . . . . .	4
2.1.1	Arquivo . . . . .	4
2.1.2	Estimador de Parâmetros . . . . .	4
2.1.3	Banco de Dados . . . . .	4
2.2	Iniciar Simulação . . . . .	5
2.3	Variáveis da Simulação . . . . .	6
2.3.1	Frequência de amostragem . . . . .	6
2.3.2	Tempo de simulação . . . . .	6
2.4	Dados da Máquina . . . . .	6
2.4.1	Tensão eficaz de linha . . . . .	6
2.4.2	Frequência de alimentação . . . . .	7
2.4.3	Número de polos . . . . .	7
2.4.4	Velocidade nominal . . . . .	7
2.4.5	Corrente eficaz de linha . . . . .	7
2.4.6	Momento de inércia . . . . .	7
2.4.7	Carga nominal . . . . .	7
2.4.8	Parâmetros do circuito . . . . .	8
2.5	Configurações de Carga . . . . .	8
2.5.1	Tipo de partida . . . . .	8
2.5.2	Tipo de carga . . . . .	8

2.5.3	Tempo de partida . . . . .	9
2.5.4	Carga aplicada . . . . .	9
2.5.5	Momento de inércia . . . . .	9
2.6	Desequilíbrio de Tensão . . . . .	9
2.6.1	Percentual de desequilíbrio . . . . .	10
2.6.2	Desequilíbrio angular . . . . .	10
2.7	Curto-Circuito nas Espiras do Estator . . . . .	10
2.7.1	Relação de espiras em curto . . . . .	10
2.7.2	Multiplicador . . . . .	10
2.8	Barras Quebradas do Rotor . . . . .	11
2.8.1	Número de barras total . . . . .	11
2.8.2	Número de barras quebradas . . . . .	11
2.8.3	Nível da falha . . . . .	11
2.9	Falhas Mecânicas . . . . .	12
2.9.1	Conjugado da falha . . . . .	12
<b>3</b>	<b>Estimador de Parâmetros</b>	<b>13</b>
<b>4</b>	<b>Modo Banco de Dados</b>	<b>15</b>
4.1	Voltar . . . . .	16
4.2	Iniciar Simulação . . . . .	17
4.3	Seleção de Motor . . . . .	17
4.3.1	Motor . . . . .	17
4.3.2	Número de Simulações . . . . .	17
4.4	Configurações de Carga . . . . .	18
4.5	Desequilíbrio de Tensão . . . . .	18
4.6	Curto Circuito nas Espiras do Estator . . . . .	18
4.7	Barras Quebradas do Rotor . . . . .	18
4.8	Falhas Mecânicas . . . . .	18
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>19</b>



---

## Introdução

---

O SMIT, sigla para Simulador do Motor de Indução Trifásico, é um programa desenvolvido por Lucas Henrique Gonçalves Ribeiro, mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEL) da Universidade Federal de São João del-Rei, e pela Dra. Lane Maria Rabelo, orientadora e professora do PPGEL.

O objetivo deste trabalho consistiu em implementar os modelos simétricos e assimétricos do motor de indução trifásico (MIT), trabalhados em [Baccarini \(2005\)](#), e integra-los a uma interface gráfica. Dessa forma, seria possível democratizar o acesso a estes modelos, facilitando o seu uso em novas metodologias de detecção de falhas no MIT e *Machine Learning*.

Com o intuito de oferecer maiores benefícios aos usuários do SMIT, também foi implementada uma ferramenta de estimação de parâmetros do MIT, desenvolvido por [Amaral et al. \(2021\)](#), assim como um modo de utilização que desenvolve um banco de dados com somente uma única configuração, repetindo o processo de simulação enquanto aleatoriza algumas entradas de forma automática.

O *software* foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação Python, sendo considerado um programa de código aberto. Assim, espera-se obter, também, atualizações e edições provenientes da comunidade.

Este documento apresenta um pequeno manual de instruções do funcionamento do SMIT, apresentando as suas funções e entradas. Dúvidas e opiniões quanto ao funcionamento podem ser encaminhadas pelo canal do GitHub do produto ou através do endereço de e-mail: [lucash.gribeiro@gmail.com](mailto:lucash.gribeiro@gmail.com).



# Simulador

Arquivo Estimator de Parâmetros Banco de Dados

**Variáveis da Simulação**

Frequência de amostragem (Hz): 10000.0 Tempo de simulação (s): 5

**Dados Nominais da Máquina**

Tensão eficaz de linha (V): 460  
 Velocidade nominal (RPM): 1705  
 Carga nominal (Nm): 198

**Parâmetros do Circuito (Y)**

Resistência do estator (ohms): 0.087  
 Reatância mútua (ohms): 13.08  
 Resistência do rotor (ohms): 0.228  
 Reatância do rotor (ohms): 0.302

**Configurações de Carga**

Tipo de Partida: Sem Carga  
 Tempo de partida (s): 1.6667  
 Tipo de Carga: Constante  
 Carga aplicada (%): 100

**Desequilíbrio de Tensão**

Percentual de desequilíbrio (%): 100  
 Desequilíbrio angular (°): 0

**Curto Circuito nas Espiras do Estator**

Relação de espiras em curto (%): 1  
 Multiplicador: 1

**Barras Quebradas do Rotor**

Número de barras total: 28  
 Número de barras quebradas: 1  
 Nível da falha: Quebra (100%)

**Falhas Mecânicas**

Conjugado da falha (%): 1

**8**

**9**

**3**

**4**

**5**

**6**

**7**

Figura 2.1: Tela inicial do programa SMIT, onde configura-se o simulador principal.

## 2.1 Barra de Tarefas

A barra de tarefas da página inicial do SMIT possui 4 botões, neste capítulo, serão abordados os três primeiros:

- Arquivo;
- Estimador de Parâmetros;
- Banco de Dados.

### 2.1.1 Arquivo

Ao acionar o botão **Arquivo**, um menu é aberto onde são disponibilizados mais três botões: Abrir, Salvar e Sair.

As funções **Abrir** e **Salvar** estão correlacionadas, já que a última permite salvar os dados do motor presentes na página do simulador. Ao selecionar a função, o programa requisita o caminho onde o arquivo .txt será salvo.

Para se ter acesso aos dados salvos, utiliza-se a função **Abrir**, onde o programa solicita o arquivo e, ao final, insere as entradas em seus respectivos locais.

Por fim, o botão **Sair** é uma função redundante ao botão fechar do Windows ("X"), permitindo encerrar o aplicativo.

### 2.1.2 Estimador de Parâmetros

O botão **Estimador de Parâmetros** aciona a função do estimador de parâmetros, que permite encontrar os parâmetros do circuito do motor de indução trifásico a partir dos dados de catálogo da máquina. A correta configuração e funcionamento são aprofundadas no Capítulo 3.

### 2.1.3 Banco de Dados

Por fim, o botão **Banco de Dados** ativa o modo Banco de Dados do SMIT, onde é possível obter os dados de quantas simulações o usuário desejar, com uma variação aleatória de algumas configurações. O funcionamento deste modo é aprofundado no Capítulo 4.

## 2.2 Iniciar Simulação

O botão representado por um triângulo verde é utilizado para iniciar a simulação do motor de indução trifásico. Após a configuração do simulador e acionamento do botão, o SMIT faz uma verificação das entradas inseridas, dando um feedback ao usuário através de uma janela pop-up, caso venha a possuir algo que irá impossibilitar a simulação.

Caso não tenha um impeditivo, o programa solicita ao usuário quais as variáveis de saída são desejadas para serem salvas e mostradas ao final da simulação, como mostrado na Figura 2.2. Enquanto as variáveis Tensão de alimentação e Corrente do estator são sempre salvas, as outras podem ser marcadas, através da caixa de seleção a esquerda de cada nome, para também serem mantidas.

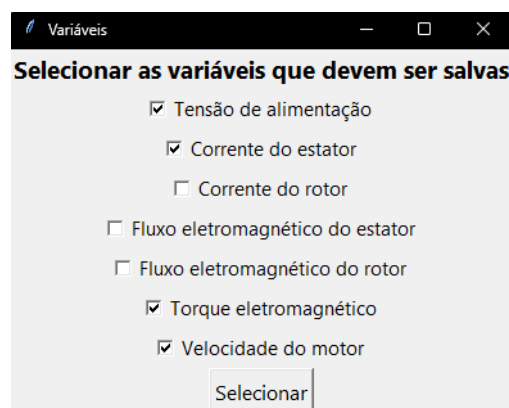


Figura 2.2: Local onde o usuário seleciona quais variáveis serão salvas e mostradas ao final da simulação

Por fim, é solicitado o caminho onde o arquivo .txt com os vetores de saída selecionados serão salvos, para que possam ser acessados pelo usuário futuramente.

A partir desta última interação, o programa iniciará a simulação, substituindo o botão constituído por um triângulo verde para um quadrado, vermelho. Este possui a função de interromper a simulação, fazendo com que o SMIT retorne para a sua etapa de configuração.

Porém, caso não seja interrompido, o andamento da simulação pode ser acompanhado através de uma barra de progresso que aparece na parte inferior da tela inicial. Ao final do processo, são mostrados os gráficos das variáveis selecionadas em relação ao tempo, além da Transformada Rápida de Fourier (FFT) da corrente da fase a do estator, a fim de facilitar na verificação das falhas inseridas.

## 2.3 Variáveis da Simulação

Nesta parte do simulador, são inseridas as configurações de passo e tempo do simulador, que impactam não só no seu funcionamento, mas também na velocidade de processamento dos resultados. São aceitos somente valores numéricos como entradas.

### 2.3.1 Frequência de amostragem

Esta entrada determina o passo da simulação, com o seu valor impactando diretamente no tempo de simulação. Valores muito pequenos podem acarretar na falha do programa, enquanto que valores muito grandes demandam de muito poder de processamento. Recomenda-se manter a frequência de amostragem entre 10 a 100 kHz, para um equilíbrio entre uma boa resolução e tempo.

### 2.3.2 Tempo de simulação

Indica o tempo total de simulação, ou seja, quantos segundos do funcionamento do motor serão simulados no total. Também é uma entrada que impacta no funcionamento do programa, já que um valor pequeno pode não ser suficiente para que o motor chegue a um regime permanente — encerrando a simulação antes do término da partida, por exemplo —, mas um valor grande também eleva o tempo de simulação, já que ela possuirá um número maior de pontos.

## 2.4 Dados da Máquina

As entradas que compõem esta parte do programa são adquiridas através dos catálogos e placas dos motores, além de ensaios ou estimadores. A função **Salvar** armazena estes dados, junto com as Variáveis da Simulação, para serem utilizados posteriormente. São aceitos somente valores numéricos como entradas.

### 2.4.1 Tensão eficaz de linha

É a tensão, dada em V, eficaz de linha que alimenta o motor, encontrada tanto no catálogo, quanto na placa da máquina. É possível alterá-lo, em relação ao nominal, a fim de verificar o impacto nas saídas da simulação.

### **2.4.2 Frequência de alimentação**

Dada em Hz, é a frequência que o sinal de alimentação do motor deve estar. Seu valor impacta diretamente na velocidade final da máquina, tornando possível explorá-lo, junto com a tensão, para realizar o estudo do comportamento da simulação em outras velocidades.

### **2.4.3 Número de polos**

Indica o número de polos magnéticos presente no motor. Sendo uma característica construtiva da máquina, o número de polos deve ser inserido de forma correta, para que a saída seja relacionada corretamente com o motor simulado.

### **2.4.4 Velocidade nominal**

Inserida em RPM, a velocidade nominal é utilizada, principalmente, para a simulação de Falhas Mecânicas. Pode ser encontrada no catálogo e placa do motor.

### **2.4.5 Corrente eficaz de linha**

A corrente eficaz de linha, dada em A, também é encontrada no catálogo e placa da máquina. No programa, é utilizada somente quando há um Curto Circuito nas Espiras do Estator, não impactando quando esta falha não está presente.

### **2.4.6 Momento de inércia**

O momento de inércia, dado em  $\text{kgm}^2$ , indica a resistência que o eixo do motor possui contra o movimento, impactando no tempo de partida e, quando não inserida corretamente, no funcionamento do simulador. Normalmente, este dado é encontrado nos catálogos das máquinas

### **2.4.7 Carga nominal**

Dada em Nm, indica o que será movido pelo motor, ou seja, a carga acoplada. Nesta entrada, indica-se manter sempre o valor nominal pois, posteriormente, há uma entrada onde é possível controlar o quanto desta carga será aplicada na máquina.

### 2.4.8 Parâmetros do circuito

Por fim, há os parâmetros do circuito do motor de indução, ou seja, os valores das resistências do estator e rotor, além das reatâncias do estator, do rotor e mútua, todos dados em  $\Omega$ .

Estas entradas também são de grande importância para o funcionamento correto da simulação, precisando sempre estar próximas do real e para o circuito equivalente em estrela, já que os modelos foram desenvolvidos para esta configuração.

Seus valores podem ser obtidos através de ensaios, com os motores que deseja-se simular, ou utilizando estimadores de parâmetros, que utilizam de dados disponíveis e ferramentas matemáticas para estimar estes valores. No SMIT é disponibilizado um estimador de parâmetros, apresentado no Capítulo 3, já integrado ao simulador principal.

## 2.5 Configurações de Carga

Nesta etapa, o usuário deve configurar a partida e a carga que será aplicada ao longo da simulação.

### 2.5.1 Tipo de partida

Variável que indica o tipo de partida que será utilizada na simulação. Esta entrada é controlada utilizando uma lista selecionável, que possui duas opções:

- Sem carga: Neste modo, não é possível aplicar um tipo de carga, porém o usuário precisa entrar com um tempo de partida. Desta forma, enquanto este tempo estabelecido não for superado, nem a carga e nem as falhas serão inseridas na simulação;
- Com carga: Neste modo, a partida do motor acontece com a carga já aplicada, sendo possível determinar o tipo da carga.

### 2.5.2 Tipo de carga

Quando o motor parte com carga, é possível selecionar três tipos de carga, que variam com a velocidade:

- Constante;



- Linear
- Quadrática.

OBS: É importante salientar que a carga do tipo Constante pode causar divergência no modelo utilizado, principalmente quando os parâmetros são obtidos através do Estimador de Parâmetros implementado. Este problema é causado pelo fato de que os parâmetros são calculados para o regime de trabalho próximo ao nominal, não englobando a partida. Caso seja imprescindível a aplicação de carga na partida, recomenda-se testar os outros dois tipos de variação de carga.

### **2.5.3 Tempo de partida**

Dado em segundos e utilizado quando deseja-se simular um motor partindo sem carga, o tempo de partida, por padrão, assume o valor de um terço do tempo de simulação, podendo ser alterado. Durante este intervalo, as cargas e falhas não são aplicadas na simulação, porém, caso esta variável seja igual ou superior ao tempo total, a simulação ocorrerá, porém não serão aplicadas as cargas e falhas.

### **2.5.4 Carga aplicada**

Indica a porcentagem de carga que será aplicada durante a simulação, sendo permitido de 0 a 110% da carga nominal, inserida nos Dados da Máquina.

### **2.5.5 Momento de inércia**

Também dado em  $\text{kgm}^2$ , indica o momento de inércia adicionado ao sistema pela adição da carga. Este valor deve ser calculado ou estimado pelo usuário, já que depende não só da carga, mas também do tipo de acoplamento e outros parâmetros.

## **2.6 Desequilíbrio de Tensão**

Primeira das falhas disponíveis no SMIT, o desequilíbrio de tensão ocorre quando há uma diferença na amplitude e/ou ângulo do sinal de tensão. No caso do simulador, o desequilíbrio ocorre na fase a, porém também impacta a fase c, já que esta é calculada utilizando a soma das

outras duas. Para aplicar esta falha na simulação, basta selecionar a caixa de seleção presente do lado esquerdo do nome, liberando as configurações da falta.

### 2.6.1 Percentual de desequilíbrio

O percentual de desequilíbrio é um multiplicador aplicado na amplitude da tensão da fase a, permitindo-a variar de 90 a 110% do valor nominal.

### 2.6.2 Desequilíbrio angular

O desequilíbrio angular aplica o ângulo escolhido pelo usuário — mas dentro do limite de  $\pm 30^\circ$  — na fase a, que normalmente possui a sua fase igual a  $0^\circ$ .

## 2.7 Curto-Circuito nas Espiras do Estator

De forma análoga ao Desequilíbrio de Tensão, para se aplicar a falha no estator, basta assinalar a caixa de seleção ao lado esquerdo do nome, permitindo configurá-la. O curto-circuito — ou baixa isolamento — é causado quando há a perda do material isolante que protege as espiras que forma o estator do motor de indução. Esta falha depende não só da porcentagem de espiras em curto, mas também da resistência deste novo caminho, impactando na simulação final.

### 2.7.1 Relação de espiras em curto

Também podendo ser nomeada como porcentagem de espiras em curto, esta variável consiste na relação de espiras que estão com a falha e o total, podendo variar, portanto, de 0 a 100%. Para fim de testes, recomenda-se utilizar valores pequenos para esta relação, de 1 a 5%.

### 2.7.2 Multiplicador

Com a intenção de associar a resistência do curto com o motor simulado, utilizou-se de uma metodologia que calcula este parâmetro a partir do valor da corrente de curto esperada. Desta forma, a entrada **Multiplicador** consiste no valor que será multiplicado pela corrente nominal da máquina para ser a corrente de curto e, consequentemente, encontrar a resistência da falha.

Desta forma, caso o usuário deseje trabalhar com a corrente de curto igual a metade da corrente nominal, basta entrar com o valor 0,5, enquanto caso decida trabalhar com uma corrente

maior, pode entrar com um multiplicador igual à 6, por exemplo. Assim, é possível simular desde situações de baixa isolação, até curto-circuito franco.

Porém, dada as características construtivas da máquina e do modelo utilizado, um valor elevado da variável **Multiplicador** pode resultar em uma resistência negativa ou inexistente, indicando que esta corrente ultrapassa o máximo desenvolvido pelo motor. Assim, o SMIT é preparado para substituir o valor da resistência para 0, resultando na situação de curto mais crítica para aquele motor, naquela porcentagem de curto.

## 2.8 Barras Quebradas do Rotor

As avarias nas barras do rotor ocorrem quando uma ou mais barras são danificadas, podendo ser uma trinca ou um rompimento completo. Utiliza-se a caixa de seleção da falha para ativá-la e configurá-la.

### 2.8.1 Número de barras total

A primeira entrada da falha de barras quebradas é uma característica construtiva da máquina, consistindo na quantidade de barras total que constituem o rotor. Este valor interfere no modelo utilizado, precisando ser o mais exato possível.

### 2.8.2 Número de barras quebradas

Esta variável é um grande indicador da gravidade do defeito, indicando quantas das barras estão quebradas. O seu valor não pode ultrapassar o número de barras total e, por conveniência, as falhas sempre acontecem em barras sequenciais, já que facilita na aplicação do modelo.

### 2.8.3 Nível da falha

Por fim, modificando a entrada **Nível da falha**, é possível controlar os estágios da falta, podendo ser:

- Trinca;
- Rachadura;
- Quebra.

Cada tipo define o quanto a corrente nas barras danificadas é reduzida, sendo em 10, 50 e 100%, respectivamente. Desta forma, é possível simular motores com falha insipiente ou severa.

## 2.9 Falhas Mecânicas

As falhas mecânicas ocorrem quando há problemas mecânicos no motor, como folga, desbalanceamento, defeitos nos rolamentos, entre outras excentricidades. A fim de simula-la, aplica-se um torque variável ao conjugado de carga, dependente do conjugado nominal do motor.

### 2.9.1 Conjugado da falha

A entrada **Conjugado da falha** indica ao programa a porcentagem do conjugado de carga inserido no simulador que será utilizado para desenvolver o sinal da falha. Ou seja, a entrada é um percentual que será multiplicado pelo conjugado nominal e porcentagem de carga, duas entradas discutidas anteriormente, o que resultará na amplitude do sinal variável somado ao conjugado de carga.

---

## Estimador de Parâmetros

---

**Dados do MIT**

Potência nominal (HP):	<input type="text"/>	Tensão nominal de linha (V):	<input type="text"/>
Frequência nominal (Hz):	<input type="text"/>	Corrente nominal (A):	<input type="text"/>
Número de polos:	<input type="text"/>	Velocidade nominal (rpm):	<input type="text"/>
Categoria do motor:	<input type="text"/>	<input type="text"/>	

Carga:	50%	75%	100%
Eficiência (%)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Fator de Potência	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

☐ Mostrar Gráficos

Figura 3.1: Tela do estimador de parâmetros integrado ao SMIT.

O Estimador de Parâmetros consiste em um algoritmo capaz de utilizar os dados de catálogo dos motores de indução trifásicos para encontrar os parâmetros do circuito equivalente da máquina.

Para isso, como visto na Figura 3.1, o SMIT precisa dos seguintes dados:

- Potência nominal, em HP;
- Tensão nominal de linha, em V;
- Frequência nominal, em Hz;
- Corrente nominal, em A;
- Número de polos;
- Velocidade nominal, em RPM;
- Categoria do motor, que pode ser A, B, C ou D (NEMA), ou D, N ou H (NBR);

- Eficiência para 50, 75 e 100% de carga;
- Fator de Potência para 50, 75 e 100% de carga.

Com estes dados preenchidos, o *software* utiliza de relações matemáticas para estimar os parâmetros, quando o botão **ESTIMAR** é pressionado. Porém, antes, é feita uma verificação de cada variável, para que estejam no formato aceitado pelo programa e é requisitado o caminho onde os valores dos parâmetros serão salvos, em formato .txt, para acesso futuro do usuário.

Automaticamente, após a estimacão, o SMIT já transfere os dados de catálogo inseridos neste janela e os parâmetros estimados para o simulador principal, reduzindo a quantidade de configurações necessárias para já simular o motor desejado.

Para fins de verificação, desenvolveu-se a opção **Mostrar Gráficos**, acionada através da caixa de seleção no canto inferior esquerdo. Quando a estimacão é realizada com esta opção marcada, o SMIT também constrói e salva os gráficos da eficiência e fator de potência, em relação a razão da potência de saída e potência nominal. Assim, é possível o usuário verificar o erro da estimacão a partir da comparação com as variáveis do catálogo.

OBS: O Estimador de Parâmetros implementado foi desenvolvido para calcular os parâmetros do motor de indução trifásico em regime próximo ao nominal. Desta forma, as respostas do simulador na partida e em outras velocidades podem conter uma quantidade maior de erros.

## Modo Banco de Dados

**Seleção do Motor**

Motor:  Selecionar Arquivo:  Número de simulações:

**Configurações de carga**

Tipo de Partida:  Tipo de Carga:

Intervalo:  Mínimo  Máximo

Carga aplicada (%):

Momento de inércia ( $\text{kgm}^2$ ):

☒ **Desequilíbrio de Tensão**

Intervalo:  Mínimo  Máximo

Percentual de desequilíbrio (%):

Desequilíbrio angular (%):

☒ **Curto Circuito nas Espiras do Estator**

Intervalo:  Mínimo  Máximo

Relação de espiras em curto (%):

Multiplicador:

☒ **Barras Quebradas do Rotor**

Número de barras total:  Nível da falha:

Intervalo:  Mínimo  Máximo

Número de barras quebradas:

☒ **Falhas Mecânicas**

Intervalo:  Mínimo  Máximo

Conjugado da falha (%):

Figura 4.1: Tela do modo banco de dados.

O Modo Banco de Dados do SMIT foi desenvolvido para facilitar a sua utilização em testes de novos métodos de detecção de falhas e técnicas de *Machine Learning*, já que possibilita realizar diversas simulações de um motor, em situações diferentes, com uma única configuração. Posteriormente é apresentado o funcionamento de cada quadrante da tela, apresentada na Figura 4.1, e como configurá-lo.

A fim de desenvolver o banco de dados com situações distintas, aplicou-se um algoritmo de aleatorização nas entradas possíveis, sendo elas:

- Carga aplicada;
- Momento de inércia da carga;
- Percentual de desequilíbrio;
- Desequilíbrio angular;
- Relação de espiras em curto;
- Multiplicador;
- Número de barras quebrados;
- Conjugado da falha.

Dessa forma, o usuário entra com os intervalos máximos e mínimos e, a cada simulação, o programa seleciona um número entre estes valores. Caso não seja para aleatorizar alguma entrada, basta adicionar o mesmo valor em ambos os intervalos, que esta variável assumirá sempre este mesmo valor.

É importante ressaltar que o Modo Banco de Dados possui o método de ativação de falhas idêntico ao simulador principal, bastando marcar a caixa de seleção do respectivo defeito para liberar as suas configurações.

## 4.1 Voltar

O botão **Voltar** é utilizado para quando deseja-se retornar ao modo de simulação única.



## 4.2 Iniciar Simulação

O botão para **Iniciar Simulação** possui um comportamento idêntico ao modo de simulação principal. Após pressionado, o programa realiza uma verificação das entradas e, caso não tenha nenhum impeditivo, solicita ao usuário as variáveis que devem ser salvas e o caminho para o armazenamento dos resultados.

As saídas, salvas em .txt, são aglomeradas em uma única pasta de forma a facilitar o acesso do usuário. Junto, também são armazenadas as entradas que passam pelo processo de aleatorização, de forma a ser possível comparar entradas com saídas.

De forma a permitir o acompanhamento das simulações, o Modo Banco de Dados do SMIT também apresenta uma barra de progresso para indicar o andamento da simulação atual, porém também apresenta um indicador, abaixo da barra, que mostra quantas simulações já foram finalizadas.

## 4.3 Seleção de Motor

Neste quadrante o programa recebe os dados básicos de funcionamento: o motor que será simulado e quantas simulações serão feitas.

### 4.3.1 Motor

Para entrar com os dados do motor a ser simulado, assim como as configurações da simulação, utilizou-se da ferramenta **Salvar** do simulador principal. Assim, é necessário abrir o arquivo .txt utilizando o botão **Selecionar Arquivo**, que abre uma janela do sistema onde pode-se escolher o arquivo com os dados da máquina.

### 4.3.2 Número de Simulações

Nesta entrada o usuário informa ao programa quantas simulações devem ser realizadas para a construção do banco de dados desejado. Agora, além da frequência de amostragem e tempo total informados no arquivo salvo, o número de simulações também impacta no tempo da tarefa, já que uma maior quantidade de simulações reflete em repetir a simulação do motor por mais tempo.

## 4.4 Configurações de Carga

Enquanto as entradas **Tipo de Partida**, **Tempo de partida** e **Tipo de Carga** apresentam um funcionamento igual ao modo de simulação unitária, as variáveis **Carga aplicada** e **Momento de inércia** possuem a possibilidade de serem alteradas em cada repetição, bastando o usuário entrar com os intervalos máximos e mínimos.

## 4.5 Desequilíbrio de Tensão

As duas configurações presentes no modelo para desequilíbrio de tensão são passíveis de randomização: **Percentual de desequilíbrio** e **Desequilíbrio angular**, sendo necessário entrar com os valores dos intervalos.

## 4.6 Curto Circuito nas Espiras do Estator

De forma análoga ao desequilíbrio de tensão, as entradas para a falha de curto-circuito nas espiras do estator também precisam dos intervalos: **Relação de espiras em curto** e **Multiplificador**

## 4.7 Barras Quebradas do Rotor

Enquanto o **Número de barras total** e **Nível da falha** permanecem imutáveis, quando comparados a simulação simples, o defeito de barras quebradas do rotor permite aleatorizar o **Número de barras quebradas**.

## 4.8 Falhas Mecânicas

Por fim, o **Conjugado da falha**, para aplicação das falhas mecânicas, permite entrar com os intervalos máximos e mínimos para que ela seja alterada nas simulações do banco de dados.

---

## Referências Bibliográficas

---

- Amaral, G. F. V., Baccarini, J. M. R., Coelho, F. C. R., e Rabelo, L. M. (2021). A high precision method for induction machine parameters estimation from manufacturer data. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 36(2):1226–1233.
- Baccarini, L. M. R. (2005). Detecção e diagnóstico de falhas em motores de indução.