



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Vitor Eickhoff Cavallieri

DESENVOLVIMENTO DE UM ALGORITMO PARA  
ANÁLISE DA RELAÇÃO TENSÃO/FREQUÊNCIA  
EM REGIME TRANSITÓRIO DURANTE  
ACIONAMENTOS ELÉTRICOS COM FONTES DE  
ALIMENTAÇÃO VARIÁVEIS

Florianópolis

2025



Vitor Eickhoff Cavallieri

Desenvolvimento de um algoritmo para análise da  
relação tensão/frequência em regime transitório  
durante acionamentos elétricos com fontes de  
alimentação variáveis

Trabalho de conclusão de curso submetido ao Curso de  
Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade  
Federal de Santa Catarina.

**Orientador:** Cristian Franzoi Mazzola, MSc. Eng.

Florianópolis  
2025

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.  
Dados inseridos pelo próprio autor.

Cavaliheri, Vitor Eickhoff

Desenvolvimento de um algoritmo para análise da relação tensão/frequência em regime transitório durante acionamentos elétricos com fontes de alimentação variáveis / Vitor Eickhoff Cavaliheri ; orientador, Cristian Franzoi Mazzola, 2025.

76 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2025.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Eletromagnetismo . 3. Máquinas Elétricas. I. Mazzola, Cristian Franzoi. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

**Vitor Eickhoff Cavalhieri**

**DESENVOLVIMENTO DE UM ALGORITMO PARA ANÁLISE DA RELAÇÃO  
TENSÃO/FREQUÊNCIA EM REGIME TRANSITÓRIO DURANTE ACIONAMENTOS  
ELÉTRICOS COM FONTES DE ALIMENTAÇÃO VARIÁVEIS.**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Elétrica” e aceito, em sua forma final, pelo Curso de Graduação em Engenharia Elétrica.

Florianópolis, 11 de fevereiro de 2025.



---

Prof. Miguel Moreto, Dr.  
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

**Banca Examinadora:**



---

Eng. Cristian Franzoi Mazzola, MSc. - Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)



---

Prof. Jean Viane Leite, Dr. - Avaliador  
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)



---

Prof. Roberto Coelho, Dr. - Avaliador  
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)



---

Prof. Cristhian Becker, Dr. - Avaliador  
Universidade de Santiago - Chile (USACH)

*Dedico este trabalho aos meus pais, pela dedicação, amor e apoio que me permitiram chegar até aqui. Sem vocês, este sonho não teria se tornado realidade.*

---

---

# AGRADECIMENTOS

---

Agradeço primeiramente aos meus pais, pelo apoio incondicional em todas as etapas da minha vida, e por serem minha maior inspiração de força e perseverança. Sou grato também aos professores que marcaram minha trajetória, desde o ensino fundamental até os dias de hoje, por transmitirem conhecimento e valores essenciais para minha formação. Aos professores e técnicos do curso de Engenharia Elétrica, obrigado pelo aprendizado e pelos caminhos traçados conhecimento técnico, mas também ensinamentos para a vida.

Agradeço ao meu orientador e colega Cristian Mazzola, pela eterna paciência e disponibilidade ao longo da elaboração deste trabalho. Por fim, agradeço à Universidade Federal de Santa Catarina pela estrutura e pelas oportunidades que tornaram este trabalho possível, e aos meus colegas e amigos, pelo incentivo e companheirismo ao longo dessa caminhada.

Muito obrigado a todos e a todas!





*"A vida começa todos os dias."  
— Érico Veríssimo*



---

## RESUMO

---

Cavallieri, V. E. **Desenvolvimento de um algoritmo para análise da relação tensão/frequência em regime transitório durante acionamentos elétricos com fontes de alimentação variáveis.** 76 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica (DEEL), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis – SC, 2025.

**E**STE trabalho de conclusão de curso apresenta o desenvolvimento e a implementação de um algoritmo para análise da razão entre tensão e frequência (curva  $V/f$ ) em dispositivos eletromagnéticos alimentados por fontes variáveis. Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre os riscos associados à saturação do núcleo de transformadores e outros dispositivos eletromagnéticos. Em seguida, o algoritmo foi desenvolvido e implementado em MATLAB, possibilitando sua aplicação em diferentes cenários. A validação do algoritmo foi conduzida por meio de dois estudos de caso realizados no Laboratório de Máquinas e Acionamentos Elétricos (LABMAQ) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). O primeiro estudo de caso avaliou o risco de saturação de um banco de transformadores alimentados por um gerador síncrono, comparando métodos corretos e incorretos de acionamento. O segundo estudo de caso utilizou uma bancada didática para explorar condições em que a relação  $V/f$  foi significativamente extrapolada, demonstrando a robustez do algoritmo para detectar riscos potenciais. Os resultados confirmaram a eficácia do algoritmo, que se mostrou uma ferramenta importante para analisar com precisão os riscos associados à saturação do núcleo de dispositivos eletromagnéticos durante o seu regime transitório de acionamento.

**Palavras-chaves:** curva  $V/f$ , saturação de núcleo, dispositivos eletromagnéticos, MATLAB, fontes variáveis.



---

---

# ABSTRACT

---

Cavallieri, V. E. **Development of an Algorithm for Analyzing the Voltage/Frequency Ratio in Transient Regime During Electrical Drives with Variable Power Sources.** 76 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica (DEEL), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis – SC, 2025.

**T**HIS undergraduate thesis presents the development and implementation of an algorithm for analyzing the voltage-to-frequency ratio (V/f curve) in electromagnetic devices powered by variable sources. Initially, a literature review was conducted to explore the risks associated with core saturation in transformers and other electromagnetic devices. Subsequently, the algorithm was developed and implemented in MATLAB, enabling its application in various scenarios. The algorithm's validation was carried out through two case studies conducted at the Laboratory of Electrical Machines and Drives (LABMAQ) at the Federal University of Santa Catarina (UFSC). The first case study evaluated the risk of saturation in a transformer bank powered by a synchronous generator, comparing correct and incorrect startup methods. The second case study utilized a didactic test bench to explore conditions where the V/f ratio was significantly exceeded, demonstrating the algorithm's robustness in detecting potential risks. The results confirmed the effectiveness of the algorithm, establishing it as a critical tool for accurately assessing the risks associated with core saturation in electromagnetic devices during their transient startup regimes.

**Keywords:** V/f curve, core saturation, electromagnetic devices, MATLAB, variable sources.



---

---

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

---

Figura 3.1 – Amostragem da forma de onda da tensão de linha da rede do LABMAQ.	31
Figura 3.2 – Fluxograma do algoritmo. . . . .	32
Figura 4.1 – Comparação entre as curvas filtrada e não filtrada . . . . .	38
Figura 5.1 – Energização seguindo o procedimento correto no gerador de 8 polos. . .	44
Figura 5.2 – Energização seguindo o procedimento incorreto no gerador de 8 polos. .	44
Figura 5.3 – Energização seguindo o procedimento correto no gerador de 2 polos. . .	45
Figura 5.4 – Energização seguindo o procedimento incorreto no gerador de 2 polos. .	46
Figura 6.1 – Máquinas elétricas que compõem a bancada didática do LABMAQ. . .	51
Figura 6.2 – Painel de comando da bancada didática do LABMAQ. . . . .	51
Figura 6.3 – Energização seguindo o procedimento incorreto - Condição A. . . . .	54
Figura 6.4 – Energização seguindo o procedimento incorreto - Condição B. . . . .	54
Figura B.1 – Estudo de caso 1 - Acionamento correto da máquina de oito polos . . .	74
Figura B.2 – Estudo de caso 1 - Acionamento incorreto da máquina de oito polos . .	74
Figura B.3 – Estudo de caso 1 - Acionamento correto da máquina de dois polos . . .	75
Figura B.4 – Estudo de caso 1 - Acionamento incorreto da máquina de dois polos . .	75
Figura B.5 – Estudo de caso 2 - Condição A . . . . .	76
Figura B.6 – Estudo de caso 2 - Condição B . . . . .	76





---

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

---

LABMAQ	Laboratório de Máquinas e Acionamentos Elétricos
DEEL	Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
RMS	Valor Quadrático Médio
kW	Quilowatt
V	Volt
Hz	Hertz
kVA	Quilovolt-ampère
IHM	Interface Homem-Máquina
<i>cos</i>	Cosseno
<i>sen</i>	Seno



---

---

## LISTA DE SÍMBOLOS

---

$V$	Tensão
$f$	Frequência
$t$	Tempo
$V(t)$	Tensão variante no tempo
$N$	Número de espiras
$\phi(t)$	Fluxo magnético variante no tempo
$V_p$	Tensão de pico
$w$	Frequência angular
$\pi$	Pi
$\frac{d}{dt}$	Derivada
$\int$	Integral



---

# SUMÁRIO

---

1	INTRODUÇÃO . . . . .	23
1.1	OBJETIVOS METODOLÓGICOS . . . . .	23
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO . . . . .	24
2	CONTEXTUALIZAÇÃO . . . . .	25
2.1	SATURAÇÃO DO NÚCLEO EM DISPOSITIVOS ELETROMAGNÉTICOS . . . . .	25
2.1.1	<b>Relação entre a saturação do núcleo e a razão <math>V/f</math> da fonte de alimentação</b>	<b>26</b>
2.2	RISCOS DE SATURAÇÃO EM OPERAÇÕES COM FONTES VARIÁVEIS . . . . .	26
2.2.1	<b>Controle da razão <math>V/f</math> em regime transitório</b>	<b>27</b>
2.3	ESCOPO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO . . . . .	28
3	DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO . . . . .	29
3.1	APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA . . . . .	29
3.2	AQUISIÇÃO E CONDICIONAMENTO DO SINAL . . . . .	29
3.2.1	<b>Filtragem e remoção do nível DC</b>	<b>30</b>
3.3	CÁLCULO DA FREQUÊNCIA INSTANTÂNEA E DA RAZÃO $V/F$	31
3.4	FLUXOGRAMA DO ALGORITMO . . . . .	31
3.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO 3 . . . . .	33
4	IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO EM <i>MATLAB</i> . . . . .	35
4.1	DEFINIÇÃO DA LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO . . . . .	35
4.2	IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO . . . . .	36
4.2.1	<b>Detalhamento do script do projeto</b>	<b>36</b>

4.2.2	<b>Códigos periféricos</b> . . . . .	39
4.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO 4 . . . . .	40
5	<b>ESTUDO DE CASO - 1</b> . . . . .	41
5.1	ESTUDO DE CASO - 1 . . . . .	41
5.2	ANÁLISE DO RISCO DE SATURAÇÃO DO BANCO DE TRANS- FORMADORES . . . . .	42
5.2.1	<b>Ensaio realizado</b> . . . . .	42
5.2.2	<b>Resultados dos ensaios</b> . . . . .	43
5.2.2.1	Gerador de 8 polos . . . . .	43
5.2.2.2	Gerador de 2 polos . . . . .	45
5.2.3	<b>Conclusão</b> . . . . .	46
5.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO 5 . . . . .	47
6	<b>ESTUDO DE CASO 2</b> . . . . .	49
6.1	ESTUDO DE CASO - 2 . . . . .	49
6.1.1	<b>Bancada didática de ensino de máquinas elétricas do LABMAQ</b> . . . . .	50
6.2	ANÁLISE DE RISCO DE SATURAÇÃO EM ACIONAMENTOS DI- DÁTICOS COM A BANCADA DE ENSAIOS DE MÁQUINAS ELÉ- TRICAS DO LABMAQ . . . . .	51
6.2.1	<b>Ensaio realizado</b> . . . . .	52
6.2.2	<b>Resultados dos ensaios</b> . . . . .	53
6.2.3	<b>Conclusão</b> . . . . .	55
6.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO 6 . . . . .	55
	<b>CAPÍTULO 7</b> . . . . .	57
7	<b>CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA APLICAÇÕES FUTU- RAS</b> . . . . .	57
7.1	CONCLUSÃO GERAL DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO	57
7.2	SUGESTÕES DE CONTINUIDADE E APLICAÇÕES FUTURAS . .	58
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	61

---

APÊNDICES . . . . .	61
APÊNDICE A – CÓDIGO-FONTE DO PROJETO IMPLEMEN- TADO EM <i>MATLAB</i> . . . . .	65
APÊNDICE B – IMAGENS DAS AQUISIÇÕES OBTIDAS PELO OSCILOSCÓPIO NOS ESTUDOS DE CASO .	73

---





# CAPÍTULO 1

---

## INTRODUÇÃO

---

Em laboratórios de ensino e pesquisa nas áreas que envolvem a engenharia elétrica, é comum a manipulação de fontes de tensão variáveis em corrente alternada. Quando se aplicam fontes variáveis para a alimentação de dispositivos eletromagnéticos, como é o caso de motores e transformadores, é necessário que o operador da fonte tome certos cuidados para não saturar o núcleo da máquina. A saturação do núcleo ocorre quando a razão entre a tensão e a frequência de alimentação se elevam demasiadamente, podendo ocasionar falhas graves no equipamento. Neste trabalho de conclusão de curso é desenvolvido um algoritmo para calcular a razão entre tensão e frequência de fontes variáveis durante o regime transitório de alimentação de dispositivos eletromagnéticos.

O ambiente de estudo para a realização deste trabalho é o Laboratório de Máquinas e Acionamentos Elétricos (LABMAQ) do Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica (DEEL) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). No LABMAQ são realizados diversos experimentos didáticos e científicos que muitas vezes estão associados à acionamentos elétricos de dispositivos eletromagnéticos por meio de fontes de alimentação variáveis. Assim, foi possível obter um cenário propício para a implementação e validação do algoritmo desenvolvido neste TCC.

### 1.1 OBJETIVOS METODOLÓGICOS

Este trabalho de conclusão de curso tem por objetivo geral desenvolver um algoritmo para análise da relação tensão/frequência em regime transitório durante acionamentos elétricos com fontes de alimentação variáveis. Tal algoritmo é empregado na análise de risco de saturação de dispositivos eletromagnéticos quando alimentados por fontes variáveis. Os objetivos metodológicos do trabalho são:

1. Realizar uma revisão bibliográfica sobre os riscos da saturação do núcleo de dispositivos eletromagnéticos quando alimentados por fontes variáveis;
2. Elaborar uma metodologia para a obtenção da razão entre a tensão e a frequência

- (V/f) de alimentação em regime transitório baseada na análise de medições temporais da forma de onda da tensão de saída da fonte;
3. Desenvolver um algoritmo para calcular a razão V/f a cada ciclo elétrico da tensão proveniente da fonte de alimentação;
  4. Implementar o algoritmo em um software de cálculos numéricos;
  5. Aplicar o algoritmo implementado em situações práticas encontradas no Laboratório de Máquinas e Acionamentos Elétricos (LABMAQ) da UFSC;
  6. Analisar e interpretar os resultados.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado da seguinte maneira: no capítulo 1 é feita a introdução, que apresenta o escopo do trabalho e os seus objetivos metodológicos; no capítulo 2, é feita uma revisão literária sobre os riscos associados à saturação do núcleo de dispositivos eletromagnéticos quando alimentados por fontes variáveis; no capítulo 3, é desenvolvido o algoritmo de análise da razão V/f; no capítulo 4 é feita a implementação do algoritmo em um software de cálculo numérico para aplicações genéricas; no capítulo 5, o algoritmo implementado é aplicado em um estudo de caso para avaliar o risco de saturação de um banco de transformadores no LABMAQ; No capítulo 6 é apresentado um segundo estudo de caso, no qual o algoritmo implementado é utilizado para avaliar os riscos associados à realização de experimentos com uma bancada didática de ensino de máquinas elétricas; e, por fim, no capítulo 7 é feita a conclusão do trabalho e são apresentadas sugestões de continuidade e aprimoramentos.

## CAPÍTULO 2

---

# CONTEXTUALIZAÇÃO

---

Este capítulo compreende a contextualização do trabalho, que apresentada uma breve revisão bibliográfica sobre saturação do núcleo de dispositivos eletromagnéticos e medidas de controle. Ademais, é apresentado o escopo básico deste TCC e o campo de aplicação da ferramenta desenvolvida no trabalho.

### 2.1 SATURAÇÃO DO NÚCLEO EM DISPOSITIVOS ELETROMAGNÉTICOS

A saturação do núcleo em dispositivos eletromagnéticos é um processo complexo, resultante do comportamento dos materiais ferromagnéticos que compõem o núcleo. Esses materiais são caracterizados pela presença de domínios magnéticos, que se alinham em resposta a um campo magnético aplicado. À medida que o campo magnético aumenta, os domínios magnéticos tornam-se progressivamente mais alinhados, o que leva ao aumento do fluxo magnético no núcleo. No entanto, quando o campo magnético atinge níveis elevados, os domínios magnéticos saturam, e qualquer aumento adicional no campo resulta em aumentos mínimos no fluxo magnético [1]. Essa saturação limita a capacidade do dispositivo de responder a mudanças no campo magnético, o que, por sua vez, afeta a eficiência e a operação do equipamento [2].

Em um circuito magnético qualquer, composto por uma bobina de  $N$  espiras, submetida a uma diferença de potencial variável no tempo  $V(t)$ , haverá um fluxo magnético induzido  $\phi(t)$ . A equação 2.1 descreve este fenômeno [3].

$$V(t) = N \cdot \frac{d}{dt} \phi(t) \quad (2.1)$$

Integrando os dois lados da equação 2.1, tem-se:

$$\phi(t) = \frac{1}{N} \cdot \int V(t) dt \quad (2.2)$$

Seja a tensão  $V(t)$  dada pela equação 2.3, em que  $w$  é a frequência angular ( $w = 2\pi \cdot f$ ), pode-se escrever  $\phi(t)$  conforme a equação 2.4, obtida pela solução da equação

2.2. Esta solução demonstra que o fluxo magnético é dado por uma relação diretamente proporcional com a tensão e inversamente proporcional com a frequência.

$$V(t) = V_p \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (2.3)$$

$$\phi(t) = \frac{V_p}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot N} \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (2.4)$$

Assim, o controle preciso da relação entre tensão e frequência (V/f) permite que o campo magnético seja mantido em níveis seguros, evitando que o material ferromagnético atinja a saturação.

### 2.1.1 Relação entre a saturação do núcleo e a razão V/f da fonte de alimentação

A saturação do núcleo de dispositivos eletromagnéticos ocorre quando o fluxo magnético no núcleo atinge níveis excessivos, sobrecarregando o material ferromagnético utilizado na sua construção. Esse fenômeno resulta em um aumento significativo das correntes magnetizantes, que geram aquecimento excessivo e perda de eficiência [2]. O aquecimento adicional pode acelerar o desgaste dos materiais isolantes, aumentando o risco de falhas catastróficas no equipamento. Em casos extremos, a saturação pode causar danos permanentes, como a fusão dos enrolamentos ou a deterioração dos materiais ferromagnéticos, levando à necessidade de reparo ou substituição dos dispositivos. Portanto, a prevenção da saturação do núcleo é essencial para garantir a confiabilidade e a durabilidade de transformadores e motores em sistemas elétricos.

A relação entre a tensão e a frequência da fonte de alimentação é um fator crítico na determinação do risco de saturação do núcleo. A tensão aplicada ao dispositivo eletromagnético está diretamente relacionada ao fluxo magnético gerado no núcleo, enquanto a frequência da corrente alternada determina a taxa de variação desse fluxo. Assim, o fluxo magnético no núcleo é diretamente proporcional à razão entre a tensão aplicada e a frequência de operação. Quando essa relação não é devidamente controlada, especialmente durante variações transitórias, o fluxo magnético pode aumentar de forma descontrolada, levando à saturação do núcleo.

## 2.2 RISCOS DE SATURAÇÃO EM OPERAÇÕES COM FONTES VARIÁVEIS

A operação em frequências reduzidas é especialmente perigosa, pois a diminuição da frequência, sem o ajuste correspondente da tensão, resulta em um aumento excessivo do fluxo magnético [3]. Isso pode ocorrer em cenários de partida de motores ou em testes laboratoriais de dispositivos eletromagnéticos, em que são utilizados geradores síncronos

ou fontes eletrônicas controláveis. Nesses casos, a implementação de um controle eficiente da razão  $V/f$  é fundamental para evitar riscos à integridade dos equipamentos.

### 2.2.1 Controle da razão $V/f$ em regime transitório

Uma abordagem eficaz para mitigar o risco de saturação do núcleo é regular a relação entre a tensão e a frequência da fonte de alimentação. Isso pode ser feito medindo a forma de onda de tensão ao longo do tempo e ajustando a tensão conforme a frequência varia. Assim, é possível manter uma relação adequada entre a tensão e a frequência para prevenir a saturação do núcleo. No entanto, essa tarefa pode ser complexa, pois envolve a estimativa da frequência para cada ciclo elétrico durante as condições transitórias. Técnicas mais avançadas de processamento de sinais para detecção de cruzamento por zero, podem ser empregadas para extrair a frequência instantânea da forma de onda da tensão em tempo real. A implementação de um sistema de controle desse tipo requer algoritmos relativamente sofisticados e capacidade de processamento digital em alta velocidade. Isso permite uma resposta rápida às condições de operação variáveis, garantindo que o fluxo magnético no núcleo permaneça dentro dos limites seguros e evitando os efeitos adversos da saturação.

Soluções simplificadas para manter a razão  $V/f$  em níveis seguros podem ser adotadas, evitando a necessidade de um controle em tempo real. Entre as alternativas mais empregadas, pode-se destacar a inserção de dispositivos eletrônicos de proteção ou a imposição de uma limitação operacional das fontes variáveis para que não excedam valores preestabelecidos da razão entre a tensão e a frequência. Para tal, é necessário conhecer previamente a limitação operacional da razão  $V/f$  para o dispositivo eletromagnético sob teste. Este parâmetro pode ser obtido de maneira simplificada por meio de seus valores nominais de tensão e de frequência.

Uma vez que se obtém os valores limitantes da razão  $V/f$  para um determinado dispositivo eletromagnético, é necessário condicionar a fonte de alimentação. Para motores alimentados por fontes de tensão e frequência variáveis, por exemplo, são comumente implementados sistemas de controle baseados na manutenção da razão  $V/f$  conforme os parâmetros nominais do motor. Assim, em operações transitórias ou com controle de velocidade, a variação da frequência de alimentação é condicionada pelo ajuste proporcional da tensão. Em situações específicas nas quais é necessário exceder a frequência nominal do motor, ocorre o que se chama de enfraquecimento de campo, uma vez que a tensão de alimentação não deve exceder o seu valor nominal [3].

Para situações onde a fonte de alimentação não é dedicada a apenas um determinado dispositivo eletromagnético, é necessário avaliar os riscos de saturação do núcleo conforme cada caso específico. Por exemplo, para situações laboratoriais em que um transformador é alimentado por uma fonte variável, o processo de magnetização é realizado gradualmente

conforme o ajuste da fonte. Assim, é necessário controlar a razão  $V/f$  para não saturar o núcleo do transformador. Neste cenário está inserido o escopo do presente trabalho de conclusão de curso, conforme é apresentado a seguir.

### 2.3 ESCOPO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

O presente trabalho de conclusão de curso foi desenvolvido no Laboratório de Máquinas e Acionamentos Elétricos (LABMAQ) da UFSC. Neste laboratório existe uma diversidade de unidades geradoras e fontes de alimentação, com as quais os alunos podem realizar uma série de acionamentos e experimentos didáticos. Em algumas aplicações, unidades geradoras são conectadas à transformadores isoladores para proteção e/ou condicionamento de níveis de tensão. Cada unidade geradora é composta por um gerador síncrono e uma máquina primária com controle de velocidade, cabendo ao operador da bancada o monitoramento da tensão e da frequência de geração. Em outras aplicações, dispositivos eletromagnéticos diversos como motores e indutores são alimentados por fontes variáveis operadas por estudantes que devem controlar os parâmetros de energização.

O algoritmo desenvolvido neste trabalho visa permitir a análise de diferentes cenários de acionamentos para identificar os procedimentos que podem apresentar risco de saturação do núcleo de determinado dispositivo eletromagnético. A partir de ensaios de teste com os terminais de saída do gerador em circuito aberto, são realizadas aquisições da forma de onda da tensão gerada para verificar se o procedimento seria seguro caso o acionamento fosse repetido com um dispositivo eletromagnético sendo energizado.

# CAPÍTULO 3

---

## DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO

---

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento do algoritmo de análise da razão  $V/f$  de uma fonte de tensão e frequência variáveis para avaliar o risco de saturação do núcleo de determinado dispositivo eletromagnético caso seja alimentado por esta fonte.

### 3.1 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

Quando são empregadas fontes variáveis em corrente alternada para o acionamento de determinada carga de natureza eletromagnética, é necessário definir os valores alvos de tensão e de frequência. Até que estes parâmetros sejam estabelecidos, existe um intervalo de tempo de ajuste. Em fontes eletrônicas, por exemplo, é possível definir uma rampa de acionamento, que pode ou não respeitar a manutenção da relação entre tensão e frequência desde o início do acionamento, até alcançar os valores desejados.

Quando a fonte de alimentação é um gerador síncrono, para que sejam alcançados os valores alvos, existe um procedimento operacional de ajuste da velocidade da máquina primária e da corrente de campo do gerador. Durante este período de ajustes, os parâmetros de tensão e frequência não se encontram em regime permanente. Portanto, a razão  $V/f$  deve ser analisada durante todo o período transitório do acionamento, preferencialmente, a cada ciclo elétrico. A maneira proposta neste trabalho parte da aquisição temporal da forma de onda da tensão da fonte e do tratamento dos dados obtidos.

### 3.2 AQUISIÇÃO E CONDICIONAMENTO DO SINAL

A aquisição da forma de onda da tensão pode ser feita por meio do uso de um osciloscópio digital. Este procedimento resulta numa matriz de vetores de tensão espaçados por um intervalo de tempo que é definido pela taxa de amostragem do dispositivo empregado. No entanto, o sinal adquirido vem sempre somado de componentes indesejáveis como ruídos e deslocamentos em amplitude, também chamados de nível DC. A identificação do intervalo de cada ciclo está diretamente relacionada aos pontos de passagem por zero do

sinal medido. Para que estes pontos possam ser identificados com precisão, é necessário filtrar e remover o nível DC do sinal bruto <sup>(1)</sup>.

### 3.2.1 Filtragem e remoção do nível DC

Como a aplicação deste trabalho é para o acionamentos em baixa frequência, optou-se por aplicar um filtro digital Butterworth de quarta ordem com frequência de corte em 100 Hz. A identificação da componente DC do sinal pode ser feita por intermédio do cálculo do valor médio da onda adquirida. No entanto, este procedimento não pode ser aplicado em regime transitório. Assim, é necessário que haja um intervalo de tempo contínuo em regime permanente para que o cálculo possa ser executado. Define-se então, que no processo de medição, os primeiros e os últimos três segundos, pelo menos, devem ser adquiridos com a fonte em regime permanente.

A aplicação do cálculo do valor médio na parcela do sinal medido em regime permanente não deve ser realizada diretamente, pois é necessário que o número de ciclos dentro da janela de medição seja um número inteiro [4]. Este processo é chamado de janelamento e ele pode ser realizado de duas formas distintas: por meio da identificação dos picos da onda senoidal, ou pela identificação dos pontos de passagem por zero. O janelamento pelos picos é mais impreciso que pela passagem por zero, pois na região dos picos existe uma variação muito pequena dos valores instantâneos de tensão entre os pontos amostrados. No entanto, para identificar a passagem por zero é necessário que o nível DC seja removido, o que inviabiliza a aplicação deste método.

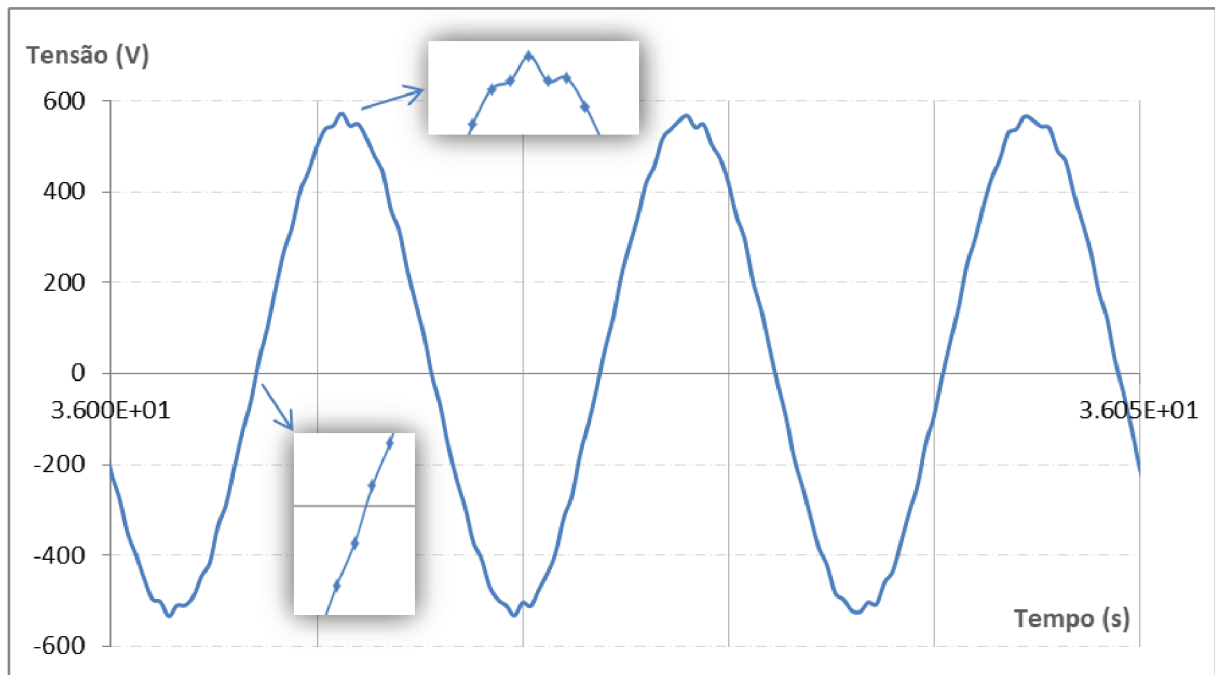
Para exemplificar, a Figura 3.1 mostra um trecho da aquisição da forma de onda da tensão de linha da rede de alimentação do LABMAQ. Este trecho de medição não está janelado, uma vez que o número de ciclos não é um número inteiro. As áreas em destaque mostram os pontos de aquisição nas regiões de passagem por zero e nas regiões dos picos. Nota-se, portanto, que a região dos picos não é regular e as variações de amplitude em cada pico são relativamente pequenas, o que dificulta a estimativa de uma posição precisa. Por outro lado, na região de passagem por zero, existe uma certa tendência de linearidade entre os pontos e a distância em amplitude entre eles é mais relevante. Assim, é possível traçar uma linha de interpolação para estimar com maior precisão cada ponto de passagem por zero. No entanto, conforme mencionado anteriormente, a existência de um nível DC torna este procedimento falho, pois o cruzamento por zero do sinal medido é deslocado, divergindo do sinal real.

---

<sup>(1)</sup> Quando se faz a amostragem de uma onda senoidal em regime permanente com um osciloscópio, é possível utilizar o acoplamento CA para remover o nível DC. No entanto, para aquisições em regime transitório é preferível utilizar o acoplamento CC e, posteriormente, remover o nível DC numericamente. Isto ocorre porque no acoplamento CA é aplicado internamente um processo de filtragem que pode causar desvios no sinal amostrado, impactando na confiabilidade da medição.



Figura 3.1 – Amostragem da forma de onda da tensão de linha da rede do LABMAQ.



Fonte: O autor.

A fim de solucionar este problema, optou-se por realizar o cálculo do valor médio em duas etapas. Primeiramente, calcula-se o nível DC por um método alternativo, que é menos preciso, mas que independe do janelamento. Trata-se do valor médio dos picos positivos e negativos do sinal. Com isto, subtrai-se o nível DC dos vetores de tensão do sinal medido e aplica-se o janelamento por meio da identificação dos pontos de passagem por zero. Assim, torna-se possível a aplicação do cálculo da média do sinal considerando todos os pontos do intervalo para obter um valor refinado e mais preciso do nível DC.

### 3.3 CÁLCULO DA FREQUÊNCIA INSTANTÂNEA E DA RAZÃO $V/f$

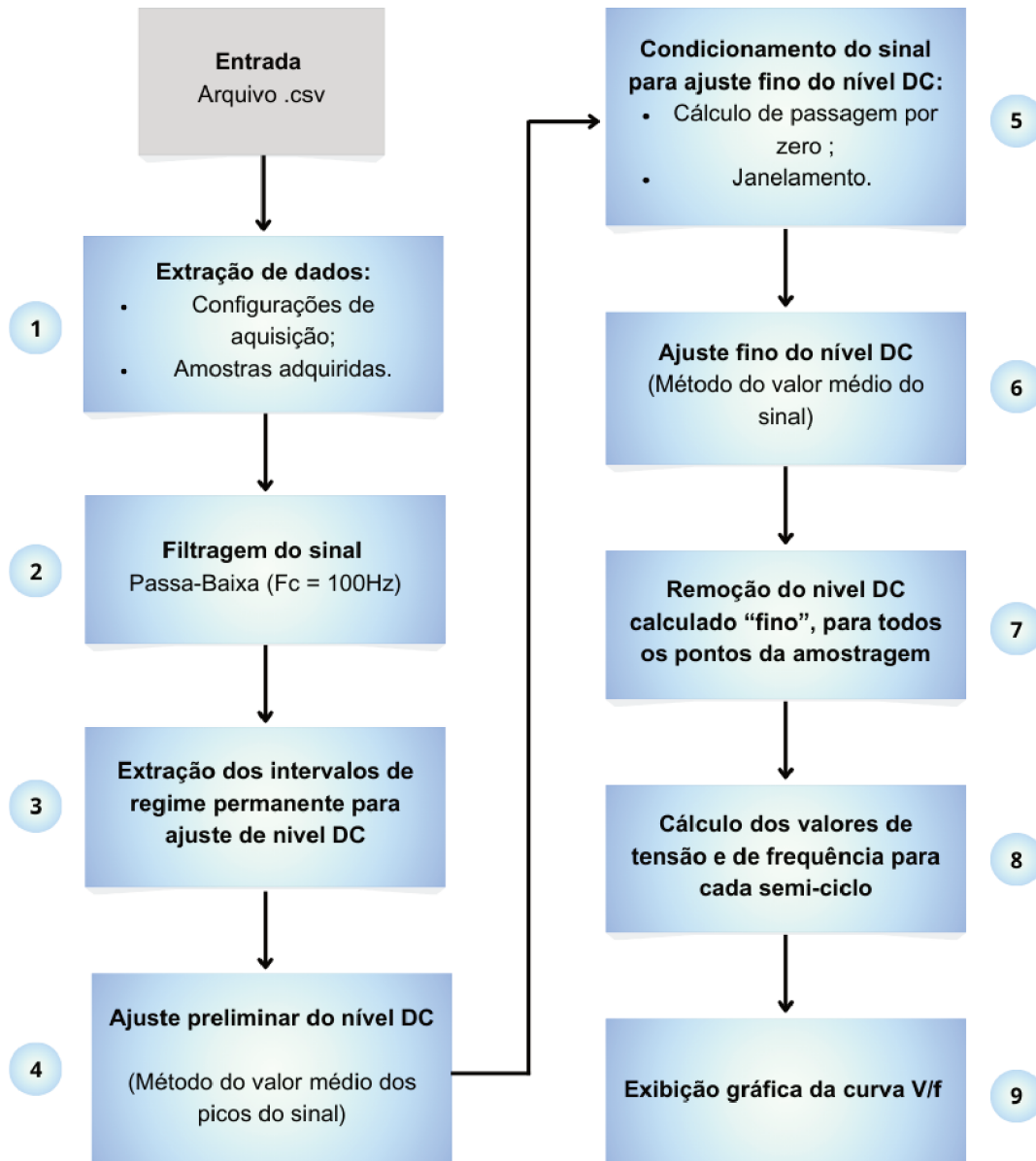
Uma vez que o sinal está condicionado com o nível DC corrigido, é possível realizar a varredura para a obtenção de uma curva  $V/f$ . Os valores de tensão e frequência são medidos para cada ciclo. A tensão é calculada pelo valor de pico do ciclo, e a frequência pelo intervalo de tempo entre cada passagem por zero.

### 3.4 FLUXOGRAMA DO ALGORITMO

O Fluxograma apresentado na Figura 3.2 ilustra o funcionamento do método proposto. Inicialmente (etapa 1) os dados são extraídos do arquivo *.csv* que é gerado por um osciloscópio digital e o sinal amostrado corresponde a uma tensão elétrica de

uma fonte variável em regime transitório. Este arquivo contém também os dados gerais de aquisição, como a frequência de amostragem, as escalas utilizadas, entre outros parâmetros.

Figura 3.2 – Fluxograma do algoritmo.



Fonte: O autor.

O segundo passo (etapa 2) consiste na filtragem do sinal para a remoção de ruídos de alta frequência provenientes da instrumentação utilizada. Estes ruídos prejudicam a precisão do algoritmo, principalmente na etapa de detecção dos picos da onda. Para a filtragem, aplica-se um filtro passa baixa Butterworth de quarta ordem, com frequência de corte em 100 Hz. Dando sequência, é necessário remover a componente DC do sinal. Conforme exposto anteriormente, este processo é relativamente complexo de se aplicar, principalmente para aquisições em regime transitório. Portanto, uma série de etapas devem ser seguidas para a remoção do nível DC (etapas 3 a 7).

Na etapa 3 é realizada a extração dos intervalos de regime permanente do sinal. Trata-se dos primeiros e dos últimos três segundos da aquisição. Apenas um dos trechos é selecionado para a realização dos cálculos que levarão à obtenção do valor de nível DC a ser corrigido. Por padrão, o trecho final é normalmente escolhido, pois aquisições de acionamentos elétricos costumam terminar em regime permanente. Apenas para os casos específicos em que se pretende analisar a desenergização de determinado dispositivo, é preferível utilizar o trecho inicial como o intervalo de regime permanente.

São realizados dois níveis de ajuste da componente DC, um ajuste “grosso” e um ajuste “fino”. Para o ajuste “grosso” (etapa 4), calcula-se o valor médio dos picos positivos e negativos do sinal. A média aritmética desses valores fornece uma aproximação do valor DC. Assim, este valor é subtraído de cada ponto do trecho de regime permanente do sinal amostrado de modo a se obter um sinal com nível DC preliminarmente ajustado e pronto para ser novamente condicionado para a realização do ajuste fino, conforme é apresentado nas etapas seguintes.

Na etapa 5, o trecho do sinal passa por um processo de janelamento. Esta etapa é crucial para que se possa obter um ajuste fino do nível DC feito pelo método do valor médio do sinal. Este método consiste em calcular a média aritmética de todos os pontos da aquisição. Se o sinal for periódico e o tempo de aquisição for um múltiplo inteiro do período de oscilação, o valor da média aritmética de todos os pontos da aquisição corresponderá ao nível DC. A etapa do janelamento, portanto, consiste em garantir que o trecho do sinal compreenda a um número inteiro de períodos de oscilação.

Mediante a exclusão de quaisquer "sobras" ou fração de ciclo, obtém-se uma "janela" na qual se pode aplicar o método do valor médio de todos os pontos para calcular o ajuste fino do nível DC (etapa 6). O valor final e absoluto do nível DC que se deseja obter compreende à soma do ajuste "grosso" com o ajuste "fino". Por fim, ele é subtraído de todo o sinal bruto (etapa 7). Após esses procedimentos, dispõe-se de todas as informações necessárias para calcular a frequência instantânea em cada ciclo de operação (etapa 8). Assim, determina-se o período de cada ciclo e o valor de tensão de pico correspondente nesses intervalos. A razão entre esses valores fornece os resultados de  $V/f$  que são agrupados e analisados graficamente.

### 3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO 3

Neste capítulo, foi apresentado o desenvolvimento de um algoritmo para a análise da razão  $V/f$  de uma fonte de tensão e frequência variáveis, com o objetivo de avaliar o risco de saturação do núcleo de dispositivos eletromagnéticos durante o acionamento transitório. Destacou-se o processo de aquisição e condicionamento do sinal, abordando questões relacionadas à filtragem, remoção do nível DC e técnicas de janelamento, fundamentais para garantir a confiabilidade das análises. Além disso, foi descrito o cálculo da frequência

instantânea e da razão  $V/f$  em cada ciclo elétrico, com base em dados condicionados. Por fim, apresentou-se o fluxograma do algoritmo proposto, evidenciando sua organização lógica e as etapas necessárias para a sua aplicação. Esse detalhamento prepara o terreno para o próximo capítulo, que trata da implementação prática desse algoritmo utilizando a linguagem de programação MATLAB.

# CAPÍTULO 4

---

## IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO EM *MATLAB*

---

Neste capítulo é apresentada a implementação do algoritmo, desenvolvida em *MATLAB*, com o objetivo de realizar análises genéricas da curva V/f em acionamentos elétricos através de aquisições de forma de onda de fontes variáveis em regime transitório.

### 4.1 DEFINIÇÃO DA LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO

Existem diversas linguagens de programação que podem ser utilizadas para análises numéricas, cada uma com características específicas que atendem a diferentes necessidades de desenvolvimento. A escolha do ambiente de programação depende de fatores como a complexidade dos cálculos, o nível de integração necessário e a facilidade de uso e de compartilhamento. Algumas das opções mais utilizadas são: *MATLAB*, *Python* e R. O *MATLAB* se destaca pela interface intuitiva, ferramentas especializadas e integração nativa entre processamento de dados e visualização gráfica. *Python* é uma alternativa flexível e personalizável que possui diversas bibliotecas gratuitas como *matplotlib* e *NumPy*. Já o R é habitualmente utilizado em projetos voltados a modelagem e análise estatística, possuindo pacotes como *dplyr* e *ggplot2* que apresentam diversas ferramentas para análise numérica e gráfica. Todas as opções citadas têm vantagens e desvantagens específicas e seriam capazes de serem utilizadas para o desenvolvimento do projeto.

Neste trabalho, optou-se por empregar o *MATLAB* devido às suas características específicas que atendem às demandas do projeto e por questões de familiaridade com a linguagem de programação. O *MATLAB* é amplamente reconhecido como uma ferramenta poderosa para cálculos numéricos, processamento de dados e rápido desenvolvimento de algoritmos. Sua interface amigável e o suporte extensivo a operações matemáticas e vetoriais proporcionam um ambiente ideal para a análise e implementação de métodos numéricos de forma eficiente e confiável. A escolha pelo *MATLAB* também foi motivada pela vasta gama de ferramentas disponíveis na plataforma. Bibliotecas como *Signal Pro-*

*cessing Toolbox*, *Control System Toolbox* e *Optimization Toolbox* oferecem funcionalidades específicas que aceleram o desenvolvimento do algoritmo. Além destas questões, o *MATLAB* possui diversas ferramentas de visualização gráfica dos dados, o que é essencial para a interpretação dos resultados e para a validação dos algoritmos implementados.

Outro fator determinante para esta tomada de decisão foi a praticidade oferecida pelo *MATLAB* no compartilhamento acadêmico, por ser uma ferramenta amplamente difundida no meio científico. A linguagem facilita o desenvolvimento rápido de protótipos e possui uma curva de aprendizado acessível, o que a torna ideal para aplicações didáticas e colaborativas. Em um contexto universitário, em que a necessidade de compartilhar códigos e resultados entre estudantes é frequente, o *MATLAB* se destaca por sua compatibilidade e portabilidade. Ademais, o uso do *MATLAB* proporciona um desenvolvimento modular do algoritmo sem a necessidade do uso de ferramentas externas a ele. O ambiente de trabalho, voltado para gerenciamento e execução de cálculos sobre os dados fornecidos, oferece a flexibilidade essencial para garantir o sucesso do projeto, uma vez que facilita a sua possível continuidade para aplicações futuras.

## 4.2 IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO

Para analisar o comportamento dos valores de tensão e frequência em regime transitório durante acionamentos elétricos com fontes variáveis, o algoritmo, desenvolvido e apresentado no capítulo anterior, é implementado em um *script* em *MATLAB* que processa, analisa e produz imagens mostrando os resultados. O código desenvolvido neste trabalho está disponível em sua integralidade no Apêndice A.

### 4.2.1 Detalhamento do script do projeto

O *script* desenvolvido para a implementação do algoritmo segue o fluxograma ilustrado pela Figura 3.2 do capítulo anterior. O arquivo de dados a ser analisado é um *.csv* fornecido por um osciloscópio digital. Este arquivo é importado e convertido em um *array* dentro do ambiente *MATLAB*, como demonstrada no código-fonte 4.1.

Código-fonte 4.1 – Excerto do código principal - Importação do arquivo de dados.

```
4 [csvFile, filePath] = uigetfile('*.csv', 'Select a CSV file');  
5 fullFileName = fullfile(filePath, csvFile);  
6 data_csv = readcell(fullFileName);
```

Após a importação do arquivo, pode-se extrair os dados de medição e de configuração do osciloscópio, como a frequência de amostragem e o tempo total do ensaio. Na sequência, determinam-se três janelas de análise: uma correspondente ao regime permanente nos primeiros três segundos de operação; outra referente ao regime permanente nos últimos três segundos; e uma terceira, compreendendo todo o sinal amostrado. O trecho

de código apresentado no código-fonte 4.2 mostra esse processo. Os dados numéricos são extraídos e armazenados para serem processados.

Código-fonte 4.2 – Excerto do código principal - Extração dos dados.

```
13 Ts=data_csv{6,2};
14 Fs=1/Ts;
15
16 window_length = 3;
17 % Tempo em segundos da janela de amostragem inicial
18
19 janela_inicio = round(window_length/Ts);
20 % número de pontos para fazer o janelamento no inicio
21
22 janela_final = round(data_csv{7,2}-janela_inicio);
23 % número de pontos para fazer o janelamento no final
```

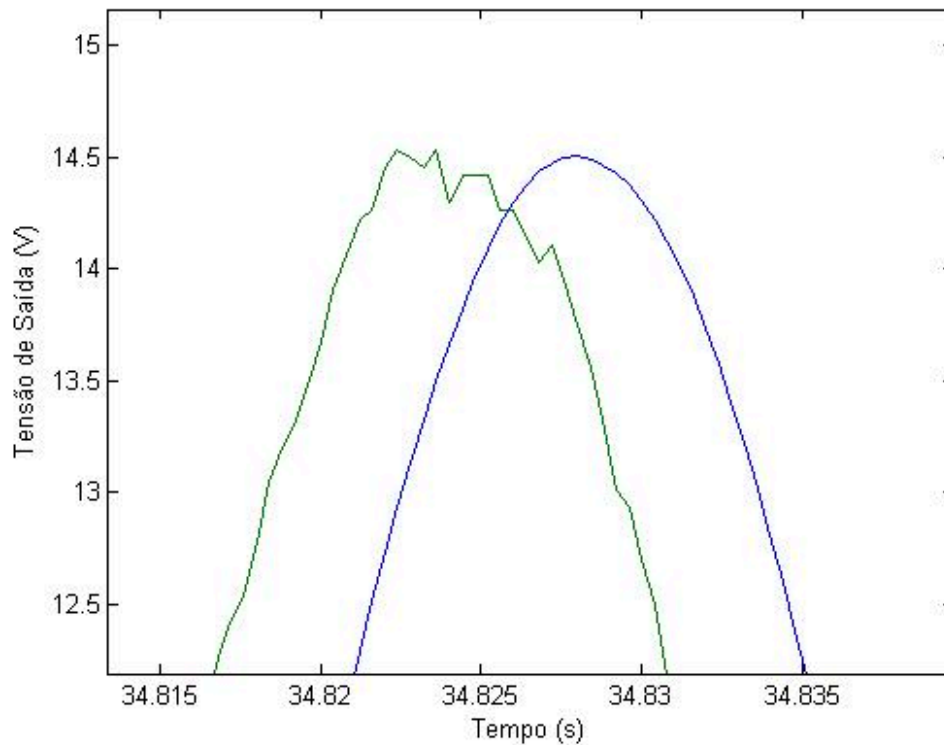
A primeira etapa do processamento é filtrar o sinal para remover ruídos indesejáveis, como por exemplo, o ruído proveniente das sondas do osciloscópio. Para tal, emprega-se um filtro digital *Butterworth* (passa baixas) de 4<sup>o</sup> ordem com frequência de corte de 100 Hz (vide código-fonte 4.3).

Código-fonte 4.3 – Excerto do código principal - Filtragem do sinal.

```
25 Fc=100; %Frequencia de corte filtro Passa baixa
26 Wn = Fc/(Fs/2); % Frequencia normalizada de corte
27 [b, a] = butter(4, Wn); % Filtro Butterworth de 4 ordem
28
29
30 numericalData = data_csv(15:end,:);
31 ens = cell2mat(numericalData); % Convert the cell array to a numerical matrix
32 Vt_unfiltered=ens(:,2);
33 Ti=ens(:,1);
34 max_time= Ti(1,1); %
35 for i=1:size(Ti)
36 Ti(i,1)=Ti(i,1) - max_time; %end
37
38 Vt = filter(b, a, Vt_unfiltered);
39 %Filtra o sinal Para remover ruído de instrumentação
```

A Figura 4.1 mostra um exemplo de aplicação do filtro, em que a curva em verde corresponde ao sinal original e, a curva azul, ao sinal após a filtragem. O ruído que se observa principalmente no pico da curva verde é problemático, pois dificulta a detecção dos pontos de máximo e mínimo do sinal.

Figura 4.1 – Comparação entre as curvas filtrada e não filtrada



Fonte: O autor.

Após a filtragem, inicia-se o processo de cálculo e remoção da tensão de *offset*. Os cálculos são realizados para um dos trechos de regime permanente do sinal e a seleção do trecho ocorre de acordo com a conveniência (depende do tipo de ensaio). Conforme apresentado no capítulo 3, este processo ocorre em dois estágios. Primeiramente, calcula-se o nível DC grosseiramente por meio da média dos picos positivos e negativos, conforme mostra o código-fonte 4.4.

Código-fonte 4.4 – Excerto do código principal - Cálculo inicial do nível DC.

```

62 peak_Vt_start = allpeaks(Ti(1:janela_inicio,1),Vt(1:janela_inicio,1));
63 % Valores dos picos da funcao na janela de inicio
64
65 high_peaks_start = peak_Vt_start(1:2:end,3);
66 % indices impares
67
68 low_peaks_start = peak_Vt_start(2:2:end,3);
69 % indices pares
70
71 mean_peak_start = (mean(high_peaks_start)+mean(low_peaks_start))/2;
72 % Media do sinal usando media dos picos/2

```



O valor calculado é então retirado do sinal original. Em seguida, é feito um ajuste fino, calculando novamente o nível DC por meio da média aritmética de todos os pontos do trecho analisado. A aplicação deste método somente é precisa quando o trecho do sinal sob análise compreende a um número inteiro de ciclos completos. Portanto, faz-se necessário aplicar um processo de janelamento do sinal. Para tal, deve-se calcular o intervalo de tempo que corresponde a um ciclo completo. Como se trata de um sinal com característica sinusoidal, o ciclo se completa quando o valor da tensão cruzar o zero duas vezes. Deste modo, o janelamento pode ser feito por meio da detecção das passagens por zero e da remoção dos pontos excedentes aos ciclos. Assim, foi desenvolvida uma função, chamada de *zerocross\_interpol.m*, que calcula estes intervalos em que a tensão troca de sinal (passagem por zero). Esta função fornece os índices de tempo de cada cruzamento de modo que se pode estabelecer uma janela do sinal contendo apenas ciclos inteiros de operação, podendo assim calcular o valor médio deste intervalo e obter o valor DC com maior precisão.

Uma vez calculado o valor do *offset*, é feita a correção do sinal completo, viabilizando o início dos cálculos dos valores de tensão e de frequência em cada ciclo de operação em regime transitório. Para isso, os mesmos cálculos de passagens por zero e detecção de picos realizados anteriormente são replicados, agora para o sinal completo. Dentro de cada ciclo, o valor da tensão RMS é calculado pelo valor de pico (valor máximo dentro de cada intervalo) e a frequência é calculada pelo inverso do período. Os valores de tensão e frequência são armazenados e depois processados por uma função chamada *plot\_unitario.m*, que gera uma representação gráfica desses dados.

#### 4.2.2 Códigos periféricos

Durante o desenvolvimento do código, foram elaborados alguns códigos periféricos que são chamados pelo código principal e realizam funções específicas. A Função *allpeaks.m*, é apresentada no código-fonte A.2 do apêndice A. Ela retorna uma matriz com os pontos em que o sinal fornecido tem seus valores máximos e mínimos. Portanto, ela é responsável pela obtenção dos valores dos picos do sinal. Este cálculo é feito comparando cada valor do sinal com seus vizinhos imediatos, se o valor é maior que ambos os seus vizinhos, ele é um valor de pico da função e tem seu valor armazenado na variável de saída.

A função *zerocross\_interpol.m* foi desenvolvida para identificar os pontos em que um sinal discretizado cruza por zero. Além de localizar os índices de tempo e amplitude, ela também realiza uma interpolação linear entre os pontos encontrados para encontrar o valor de tempo que de fato corresponde à passagem por zero, minimizando as imprecisões causadas pela amostragem do sinal. Esta função é apresentada no código-fonte A.3 do apêndice A.

A função *plot\_unitario* tem como objetivo gerar gráficos com base nos dados fornecidos pela função principal e salvar esses gráficos no formato *.jpg* dentro de um

diretório na área de trabalho do *MATLAB*. São gerados dois subgráficos por imagem, o primeiro apresenta dois eixos y distintos, um para exibir o percentual da frequência nominal e outro para o percentual da tensão nominal, ambos em função do tempo. O segundo subgráfico, exibe a relação entre tensão e a frequência, ou seja, a curva  $V/f$ . Esta função é apresentada no código-fonte [A.4](#) do apêndice [A](#).

### 4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO 4

Neste capítulo foi apresentada a implementação do algoritmo desenvolvido neste trabalho de conclusão de curso. Foram feitas considerações acerca da definição da linguagem de programação utilizada, sendo que se optou pelo emprego do *MATLAB* como ambiente de desenvolvimento. Ademais, foi apresentado de forma estrutural e resumida o código-fonte desenvolvido, que está disponibilizado integralmente no apêndice [A](#). Nos próximos capítulos são relatados dois estudos de caso onde o algoritmo implementado é aplicado para a análise da curva  $V/f$  de acionamentos transitórios no LABMAQ da UFSC.

# CAPÍTULO 5

---

## ESTUDO DE CASO - 1

---

Neste capítulo é apresentado um estudo de caso onde o algoritmo implementado em *MATLAB* é aplicado na análise da curva  $V/f$  de acionamentos elétricos transitórios de uma unidade geradora do LABMAQ.

### 5.1 ESTUDO DE CASO - 1

O LABMAQ conta com uma bancada de geradores síncronos para testes, ensaios de operação e injeção de potência na rede elétrica. Trata-se de um conjunto composto por uma máquina primária e duas unidades geradoras. A máquina primária é um motor de corrente contínua de 10 kW de potência nominal, que opera em velocidades até 3600 rpm. As unidades geradoras são máquinas síncronas, uma de dois polos e outra de oito polos. Os valores nominais de geração são: 380 V, 60 Hz, 10 kVA. Por se tratar de uma bancada de ensaios experimentais, os valores nominais das máquinas são tidos apenas como condições de limite, de modo que a operação cabe ao usuário, que pode controlar a tensão e a frequência das unidades de geração por meio dos ajustes da corrente de excitação dos geradores e da velocidade da máquina primária, respectivamente. Dependendo do tipo de ensaio realizado, esta bancada pode ser empregada na alimentação de motores e transformadores.

Para os ensaios de injeção de potência na rede elétrica, por exemplo, é realizado um procedimento de sincronismo para conectar o gerador ao barramento de alimentação do laboratório. Por questões de segurança, emprega-se um banco de transformadores isoladores entre a rede e a unidade geradora. Trata-se de banco trifásico composto de três transformadores monofásicos conectados em delta-estrela. Este dispositivo atua como elemento de proteção e de filtragem de harmônicos. Nessas aplicações, o banco de transformadores é conectado aos terminais da unidade geradora e depois é realizado o acionamento para a energização do sistema. Após o ajuste dos parâmetros nominais da rede, inicia-se o procedimento de sincronismo para a conexão do secundário do banco trifásico no barramento da rede elétrica do laboratório. Vale ressaltar que o banco de transformadores é conectado

ao gerador antes do acionamento para que a sua magnetização ocorra gradualmente, evitando picos de corrente. Portanto, haverá um regime transitório de magnetização, em que a tensão e a frequência variam até atingir os valores nominais.

Conforme apresentado no capítulo 2, a razão entre a tensão e a frequência de alimentação de um dispositivo eletromagnético está associada diretamente com o fluxo magnético que circula em seu interior. Portanto, para garantir que não haja saturação do núcleo, esta razão deve ser mantida inferior à sua condição nominal (380 V/60 Hz). Assim, o algoritmo desenvolvido e implementado neste trabalho, foi aplicado na análise de risco de saturação do núcleo do banco de transformadores durante o regime transitório de energização.

## 5.2 ANÁLISE DO RISCO DE SATURAÇÃO DO BANCO DE TRANSFORMADORES

O sistema de acionamento da bancada de geradores síncronos garante uma velocidade mínima da máquina primária antes de fechar os contatos elétricos dos terminais dos geradores. Após este primeiro acionamento, cabe ao operador controlar a velocidade do motor de corrente contínua e a excitação do gerador para ajustar os parâmetros de alimentação. O método seguro de operação da bancada requer, antes da imposição do campo, o ajuste da velocidade da máquina primária para seu valor nominal, que é de 900 rpm para o gerador de oito polos e de 3600 rpm para o de dois polos. Uma vez neste ponto de operação, o sistema garante a frequência nominal e, assim, se pode impor a excitação de campo para ajustar a tensão. No entanto, deseja-se avaliar a existência de risco caso o operador erroneamente ajuste o campo antes de impor a velocidade síncrona.

### 5.2.1 Ensaios realizados

Para a realização desta investigação, foram feitos ensaios para avaliar o comportamento dos parâmetros de tensão e de frequência durante o acionamento das unidades geradoras em dois modos distintos: com o acionamento realizado pelo método mais seguro (correto), ajustando a frequência antes da tensão; e no inverso dele, em que se eleva a excitação de campo antes do estabelecimento da velocidade nominal (método incorreto).

Por questões de segurança, os ensaios foram realizados em circuito aberto, sem a conexão do banco de transformadores. Ademais, nos ensaios com o método incorreto, o estabelecimento do campo foi limitado à corrente nominal de circuito aberto, ou seja, o valor de campo necessário para alcançar a tensão nominal de 380 V em 60 Hz com a máquina sem carga. A corrente nominal de circuito aberto é inferior à corrente nominal do gerador em plena carga. Portanto, a bancada teria capacidade de exceder este valor, o que não foi feito por medidas de segurança.

A aquisição da tensão gerada foi feita por meio de um osciloscópio digital da marca *Tektronix*, modelo *DPO3034*. Foi adquirida uma janela de tempo de 40 segundos,

compreendendo todo o processo de acionamento até a condição nominal. No Apêndice B são disponibilizadas as imagens dos arquivos de aquisição dos ensaios. No total, foram realizados quatro ensaios distintos:

1. Gerador de 8 polos - Energização seguindo o procedimento correto;
2. Gerador de 8 polos - Energização seguindo o procedimento incorreto;
3. Gerador de 2 polos - Energização seguindo o procedimento correto;
4. Gerador de 2 polos - Energização seguindo o procedimento incorreto.

### 5.2.2 Resultados dos ensaios

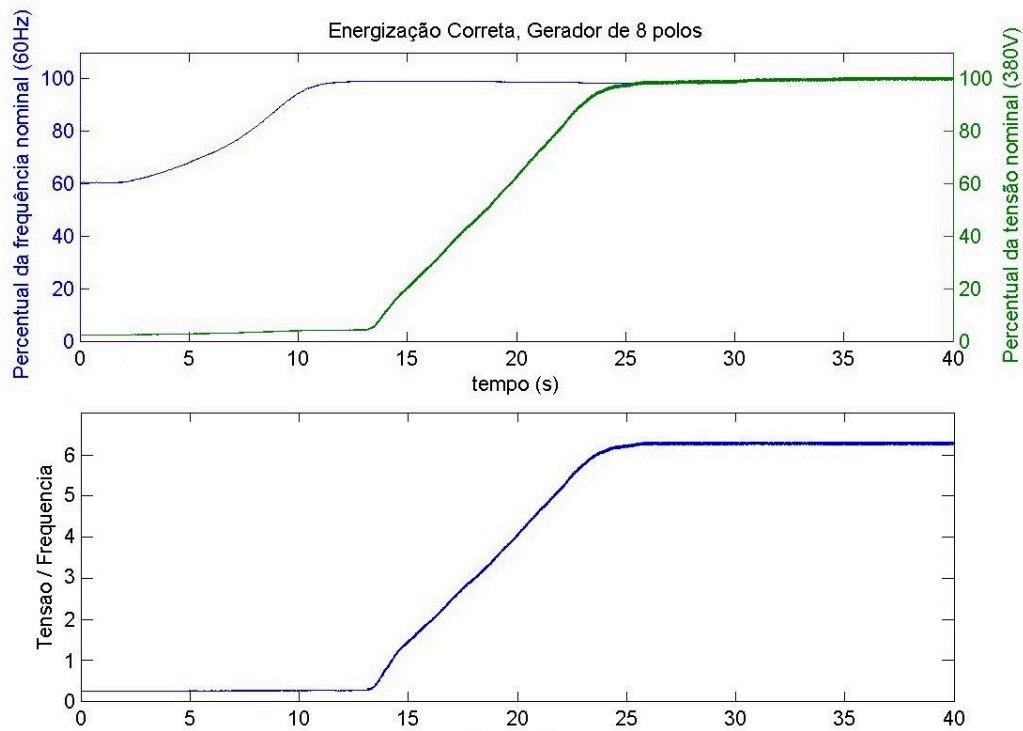
Os ensaios foram realizados e os arquivos de aquisição foram processados pelo programa desenvolvido, que forneceu os gráficos e curvas necessários para as análises das curvas V/f. As subseções seguintes mostram os resultados obtidos para os geradores de oito polos e de dois polos, respectivamente.

#### 5.2.2.1 Gerador de 8 polos

Os gráficos da Figura 5.1 mostram a dinâmica de energização do gerador de 8 polos seguindo o procedimento correto. Observa-se que na energização, a velocidade inicial da máquina primária garante uma frequência gerada de 60% da nominal. Ou seja, 36 Hz. Neste ponto, ainda sem excitação de campo, a máquina é acelerada até a velocidade síncrona que se estabelece nos 11 segundos da aquisição. No ponto de 13 segundos, é aplicada a corrente de campo até que a tensão atinja seu valor nominal. A curva V/f mostra que, seguindo o procedimento correto, em nenhum momento ocorre a extrapolação razão nominal (aproximadamente 6,3), que por sua vez é alcançado a partir dos 25 segundos.

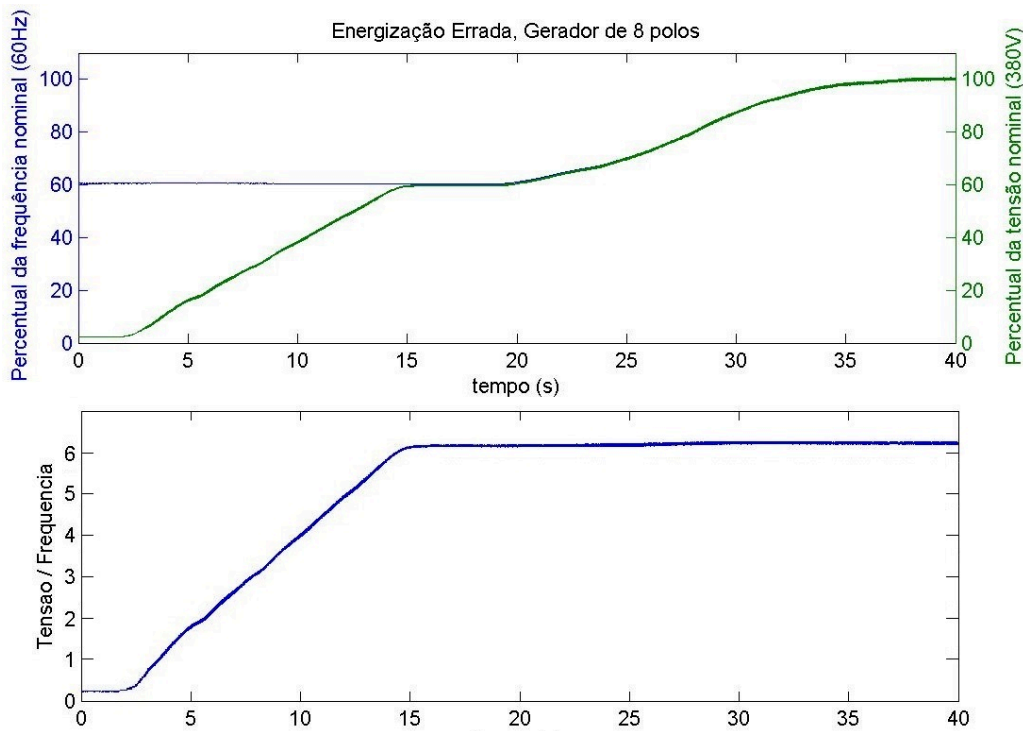
Os gráficos da Figura 5.2 mostram o processo de energização do gerador de oito polos seguindo o procedimento incorreto. Do mesmo modo, a máquina primária inicia com velocidade em 60% da nominal. Aos 2,5 segundos, o campo é excitado até o valor de corrente nominal de circuito aberto. Este processo é findado aos 15 segundos. Então, incrementa-se a velocidade até alcançar a frequência nominal. Observa-se que, do mesmo modo como no procedimento correto, a razão V/f não foi excedida em nenhum momento. No entanto, é importante observar que o valor limite para a razão entre a tensão e a frequência é alcançado logo com o estabelecimento do campo do gerador, que foi cuidadosamente ajustado para a corrente nominal de circuito aberto. Isto evidencia que, caso o operador não saiba ao certo o valor da corrente de campo nominal de circuito aberto, o limite da razão V/f poderia ser facilmente extrapolado.

Figura 5.1 – Energização seguindo o procedimento correto no gerador de 8 polos.



Fonte: Autor.

Figura 5.2 – Energização seguindo o procedimento incorreto no gerador de 8 polos.



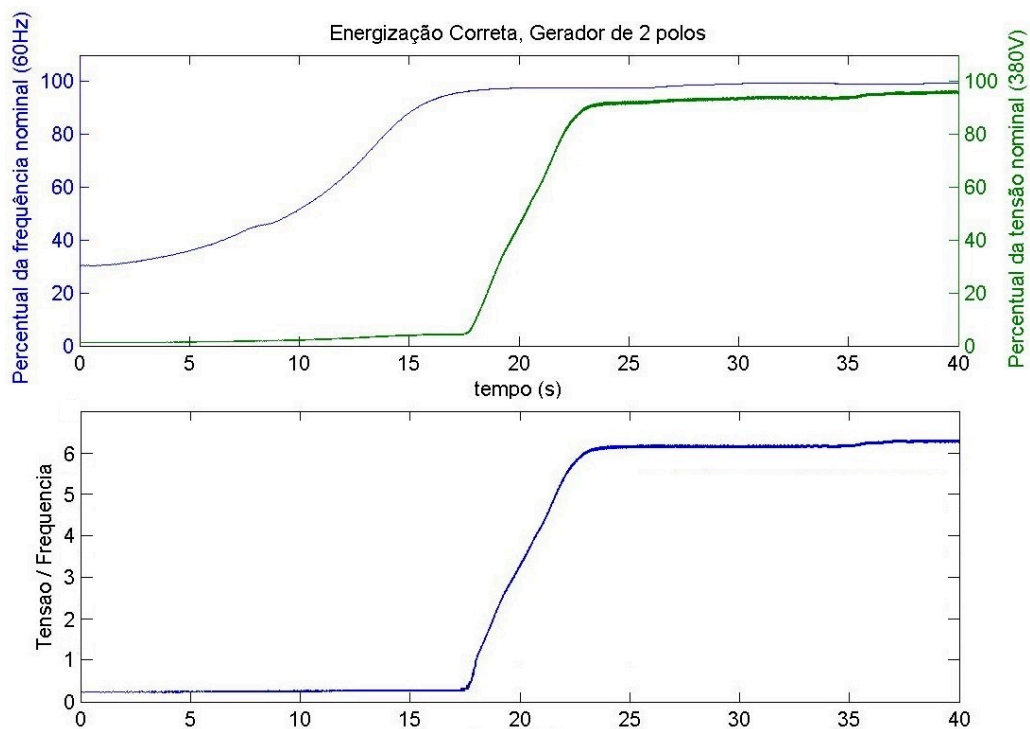
Fonte: Autor.

## 5.2.2.2 Gerador de 2 polos

Os gráficos da Figura 5.3 mostram a dinâmica de energização do gerador de dois polos seguindo o procedimento correto. Observa-se que a velocidade inicial da máquina primária garante uma frequência gerada de 30% da nominal, ou seja, 18 Hz. A máquina é então acelerada até a velocidade síncrona que se estabelece aos 16 segundos. Em seguida, é aplicada a corrente de campo até que a tensão atinja seu valor nominal. A análise das curvas mostra que em nenhum momento ocorre a extrapolação do valor nominal da razão  $V/f$ , que por sua vez, é alcançado aos 23,5 segundos.

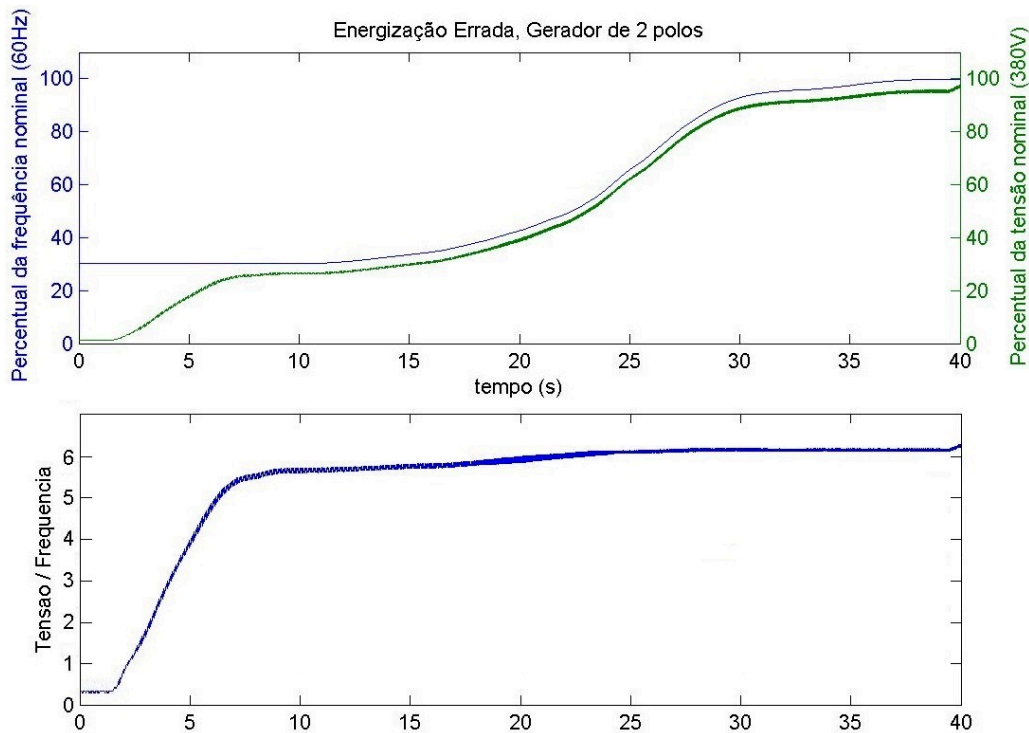
Por fim, analisando a dinâmica de energização pelo método incorreto, conforme os gráficos da Figura 5.4, observa-se que a máquina primária também inicia com velocidade em 30% da nominal e aos dois segundos, o campo é excitado até o valor de corrente nominal de circuito aberto. Este processo é findado aos oito segundos. Então, incrementa-se a velocidade até a frequência de 60 Hz. Do mesmo modo como para a máquina de oito polos, o valor limite para a razão entre a tensão e a frequência é alcançado com o estabelecimento do campo do gerador, o que evidencia o risco de se exceder a o valor da razão  $V/f$  caso o operador desconheça os parâmetros de circuito aberto da máquina.

Figura 5.3 – Energização seguindo o procedimento correto no gerador de 2 polos.



Fonte: Autor.

Figura 5.4 – Energização seguindo o procedimento incorreto no gerador de 2 polos.



Fonte: Autor.

### 5.2.3 Conclusão

Findada a investigação, observou-se que, tanto para o gerador de oito polos quanto para o de dois polos, não há risco de saturação do banco de transformadores, desde que o valor da corrente de campo não ultrapasse o nominal de circuito aberto. Para os ensaios com a energização feita pelo método incorreto, vale destacar, que o comportamento observado já era esperado, pois a tensão induzida nos terminais do gerador é diretamente e linearmente proporcional a variação do fluxo que atravessa as bobinas do estador. Portanto, uma vez estabelecida a intensidade do fluxo por meio da corrente de campo, a variação da velocidade acarreta o aumento da frequência e também da tensão induzida na armadura, proporcionalmente. Assim, a razão  $V/f$  deve permanecer constante. Os ensaios foram realizados com o objetivo de demonstrar o fenômeno sem abrir mão da segurança. Por este motivo, a corrente de campo estabelecida foi definida como sendo a corrente nominal de circuito aberto, que por sua vez é em torno de apenas 60% do limite de corrente de campo total, para ambas as máquinas. Logo, se o operador estiver desatento a ponto de estabelecer a corrente de campo nominal antes de regular a velocidade, o valor da relação  $V/f$  pode extrapolar consideravelmente o limite ao ponto de, eventualmente, ocasionar danos irreversíveis ao banco de transformadores.



### 5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO 5

Neste capítulo o algoritmo implementado foi empregado em um estudo de caso onde se avaliou o risco de saturação do núcleo de um banco de transformadores isoladores durante o regime transitório de energização. A fonte de alimentação sob análise foi uma bancada de geração localizada no LABMAQ, que é comumente operada por alunos, professores e profissionais da área. Os resultados obtidos nos ensaios concluíram que, se a bancada for operada com prudência, o risco de saturação do núcleo no banco de transformadores é relativamente baixo, mesmo que o acionamento seja realizado com o ajuste simultâneo da corrente de campo e da velocidade da máquina primária. No entanto, para isto é necessário conhecer os limites adequados de corrente de campo. Caso esses limites sejam desconhecidos, deve-se seguir o procedimento padrão, no qual o ajuste da frequência é realizado antes do ajuste da tensão terminal.

No capítulo seguinte, são realizados ensaios para segundo estudo de caso, em que outro grupo gerador do LABMAQ é utilizado para a energização de um transformador trifásico comumente empregado em experimentos didáticos. Neste estudo, a bancada de testes não possui limitação de valor mínimo de velocidade e, por se tratar de uma máquina menor, ela oferece maior segurança para realizar acionamentos limitando a corrente de campo em seu valor nominal de placa ao invés do nominal de circuito aberto.



# CAPÍTULO 6

---

## ESTUDO DE CASO 2

---

Neste capítulo é apresentado um segundo estudo de caso, onde o algoritmo implementado em *MATLAB* é aplicado na análise da curva V/f de acionamentos elétricos transitórios com uma bancada didática de ensaios de máquinas elétricas do LABMAQ.

### 6.1 ESTUDO DE CASO - 2

Neste segundo estudo de caso é feita a análise de acionamentos em condições relativamente semelhantes ao que foi apresentado no estudo de caso 1 do capítulo anterior. No entanto, as bancadas utilizadas nos dois ensaios são estruturalmente diferentes, de modo que as condições e os limites de operação se distinguem em aspectos que tornam o estudo de caso 2 mais oportuno para demonstrar os riscos de saturação de núcleo de dispositivos eletromagnéticos como motores, indutores e transformados, durante regimes transitórios de acionamento.

Anteriormente, a bancada utilizada era maior e a sua máquina primária era um motor de corrente contínua. Por conta da inércia elevada e da maior dificuldade de ajuste de velocidade, julgou-se inapropriada a realização de ensaios cuja dinâmica de operação fosse completamente inadequada, em que a limitação para o ajuste da corrente de campo se daria pelo valor nominal do gerador. Ao invés disso, o ajuste foi feito para a corrente nominal de circuito aberto, o que proporcionou ensaios mais seguros. Porém, apesar de ter sido possível demonstrar as condições de risco durante o acionamento, no estudo de caso 1 não foi possível reproduzir uma condição extrema em que a curva V/f extrapola os limites nominais.

No estudo de caso 2, a bancada utilizada é consideravelmente menor e a máquina primária é um motor de indução controlado por um inversor de frequência em malha fechada. Neste caso, os ajustes de velocidade e do ponto de operação do gerador são facilitados, permitindo a realização de ensaios mais ousados. Além disso, a bancada oferece maior liberdade operacional, permitindo que o operador controle a velocidade da máquina primária por meio de um cursor que ajusta o inversor de frequência. Diferentemente

dos ensaios anteriores, nos quais a velocidade inicial de operação já iniciava com um valor mínimo, nesta bancada didática é possível ajustar a velocidade para qualquer ponto desejado, desde zero rpm até seu valor nominal.

### 6.1.1 Bancada didática de ensino de máquinas elétricas do LABMAQ

A bancada didática do LABMAQ é uma bancada versátil que permite a realização de experimentos envolvendo motores e geradores elétricos [5]. Ela é composta por três máquinas acopladas mecanicamente em um mesmo eixo, além de um painel de comando que oferece recursos de medição, proteção e controle das operações, conforme mostram as Figuras 6.1 e 6.2. A descrição dos componentes da bancada é apresentada a seguir:

1. **Motor de Indução com Rotor Bobinado** - Localizado à esquerda na Figura 6.1, este motor com 5 kW de potência nominal é utilizado para demonstrações e estudos envolvendo diferentes condições de operação de máquinas de indução, como ensaios de rendimento, desempenho e segregação de perdas.
2. **Motor de Indução Gaiola de Esquilo** - Localizado à direita na Figura 6.1, este motor de 5,5 kW é empregado tanto para ensaios com o motor de indução com rotor bobinado (atuando como carga mecânica) quanto com o gerador síncrono (atuando como máquina primária). Ele é controlado por um inversor de frequência com monitoramento de velocidade através de um *encoder* acoplado ao eixo.
3. **Gerador Síncrono** - Posicionado ao centro na Figura 6.1, o gerador apresenta os seguintes parâmetros nominais: 5 kVA de potência; geração em 220 V; frequência de 60 Hz; e 4 A de corrente de campo máxima. É uma máquina quatro polos e, portanto, requer uma velocidade de 1800 rpm para alcançar a frequência nominal.
4. **Painel de comando** - Apresentado na Figura 6.2, o painel de comando centraliza as operações da bancada, dispondo de: boteiras e seccionadores para acionamento das máquinas; dispositivos de proteção; instrumentação para medição de tensão, corrente e potência trifásica; interface homem-máquina (IHM) para o controle do conversor de frequência e consequente ajuste da operação da máquina primária; e na sua parte superior, o reostato de regulação da corrente de campo do gerador.

Para os ensaios propostos neste trabalho, são utilizados os seguintes recursos da bancada: o gerador síncrono e seus mecanismos de acionamentos; o sistema de regulação da tensão terminal do gerador, feito pelo reostato de ajuste da corrente de excitação do campo do gerador; e o motor de indução gaiola de esquilo, atuando como máquina primária, bem como o seu sistema de controle de velocidade para o ajuste da frequência de saída do gerador.

Figura 6.1 – Máquinas elétricas que compõem a bancada didática do LABMAQ.



Fonte: Autor.

Figura 6.2 – Painel de comando da bancada didática do LABMAQ.



Fonte: Autor.

## 6.2 ANÁLISE DE RISCO DE SATURAÇÃO EM ACIONAMENTOS DIDÁTICOS COM A BANCADA DE ENSAIOS DE MÁQUINAS ELÉTRICAS DO LABMAQ

O estudo de caso 2 aborda o acionamento do gerador síncrono da bancada didática do LABMAQ, com o objetivo de observar o comportamento da curva  $V/f$  em regime transitório durante a energização da armadura do gerador. A análise de risco toma como cenário

de avaliação a possível aplicação da bancada para a alimentação de um transformador trifásico que é amplamente utilizado em experimentos didáticos nas aulas de laboratório. Vale salientar que os resultados obtidos neste estudo de caso, também se aplicam a outros dispositivos eletromagnéticos que, por ventura, venham a ser energizados pelo gerador da bancada.

Esta fonte de alimentação variável, que no caso é o gerador síncrono da bancada, pode ser ajustada seguindo procedimentos distintos. Do mesmo modo como foi observado no estudo de caso 1, o método seguro (correto) consiste em ajustar a velocidade da máquina primária para seu valor nominal antes da imposição do campo do gerador. Uma vez neste ponto de operação, o sistema garante a frequência nominal e assim se pode impor a excitação de campo para o ajuste da tensão. Já o método incorreto não segue esta mesma sequência de passos, de modo que o acionamento é realizado com o estabelecimento do campo antes do ajuste da velocidade.

Este estudo de caso é particularmente relevante para o LABMAQ, uma vez que a bancada didática de ensino de máquinas elétricas empregada nos ensaios é regularmente utilizada por alunos de graduação ao longo de cada semestre. Assim, o estudo tem o potencial de conscientizar estudantes e demais usuários sobre os cuidados necessários para a operação segura das máquinas, bem como sobre os riscos potenciais envolvidos.

### 6.2.1 Ensaios realizados

A realização dos ensaios foi conduzida de modo a se obter as curvas de energização do gerador seguindo o método incorreto em duas condições distintas: na "condição A" o operador conhece previamente o valor da corrente de campo nominal de circuito aberto e utiliza este parâmetro como limite de campo; e na "condição B", o operador desconhece este valor, utilizando como limite o valor da corrente nominal do campo da máquina síncrona. O procedimento adotado para o primeiro ensaio consiste em aplicar o método incorreto de energização conforme a condição A. Neste caso, antes que a máquina primária seja acionada (velocidade nula), a corrente de campo é ajustada para o seu valor nominal de circuito aberto, que é de aproximadamente 2,2 A. Como ainda não há rotação, a tensão terminal do gerador permanece igual a zero. Depois disso, é feito o acionamento da máquina primária e, à medida que a velocidade aumenta, um fluxo variável se estabelece, induzindo tensões na armadura do gerador até alcançar os parâmetros nominais de tensão e frequência. Para facilitar o ensaio, emprega-se uma rampa de aceleração que pode ser configurada no inversor de frequência, variando a velocidade de 0 até 1800 rpm, gradualmente, dentro de uma janela de 20 segundos.

No segundo ensaio é testada a condição B. Assim, a corrente de campo é ajustada para o seu valor nominal (4 A), antes que a máquina primária seja acionada. Neste caso, a tensão terminal do gerador também permanece igual a zero mesmo com o campo em seu

valor máximo. Depois disso, é feito o acionamento da máquina primária manualmente pelo inversor (sem rampa de aceleração). Isto se dá pois, ao atingir uma determinada velocidade, a tensão terminal alcançará o valor nominal de 220 V. Isto deve ocorrer antes dos 1800 rpm, pois o nível de excitação de campo foi definido para o valor nominal da máquina e não para o nominal de circuito aberto. Portanto, a partir desse ponto, o usuário deverá ajustar cuidadosamente os dois parâmetros (campo e velocidade) concomitantemente, mantendo o limite de tensão em 220 V até que a energização se complete e a frequência nominal de 60 Hz seja alcançada. No Apêndice B são disponibilizadas as imagens dos arquivos de aquisição dos ensaios.

### 6.2.2 Resultados dos ensaios

Os gráficos da Figura 6.3 mostram a dinâmica de energização do gerador pelo método incorreto conforme a condição A. Durante os primeiros cinco segundos é feito o estabelecimento do campo para o seu valor nominal de circuito aberto (2,2 A). No entanto, este procedimento não é visível nas curvas dos gráficos pois, como a máquina primária se encontra desligada, não há indução de tensão. A partir dos cinco segundos a máquina primária é acionada em rampa de aceleração até alcançar a velocidade nominal, que se estabelece aos 25 segundos da aquisição. A curva  $V/f$  mostra que, ao realizar o acionamento limitando a corrente pelo seu valor nominal de circuito aberto, em nenhum momento ocorre a extrapolação razão nominal entre a tensão e a frequência (aproximadamente 3,65). Este comportamento já era esperado, conforme foi observado no estudo de caso 1 do capítulo anterior.

Os gráficos da Figura 6.4 mostram o processo de energização do gerador pelo método incorreto conforme a condição B. Durante os primeiros quatro segundos é feito o estabelecimento do campo para o valor nominal do gerador (4 A). Do mesmo modo como no ensaio anterior, este procedimento não é visível nas curvas dos gráficos pois não há indução de tensão na armadura. A partir dos quatro segundos a máquina primária é acionada manualmente até que o limite de tensão nominal (220 V) seja alcançado. Isto ocorre aos 22 segundos, com a máquina primária rotacionando a uma velocidade de aproximadamente 1200 rpm. Em seguida, diminui-se o campo e eleva-se a velocidade até que sejam alcançadas as configurações desejadas (220 V e 60 Hz). A curva  $V/f$  mostra que, logo no início do acionamento, a relação entre a tensão e a frequência sobe rapidamente, extrapolando o limite nominal em aproximadamente 37%. Portanto, caso este gerador estivesse sendo empregado na alimentação do transformador trifásico, por exemplo, as curvas indicam que haveria elevado risco de saturação do seu núcleo durante o regime transitório de energização.



Figura 6.3 – Energização seguindo o procedimento incorreto - Condição A.

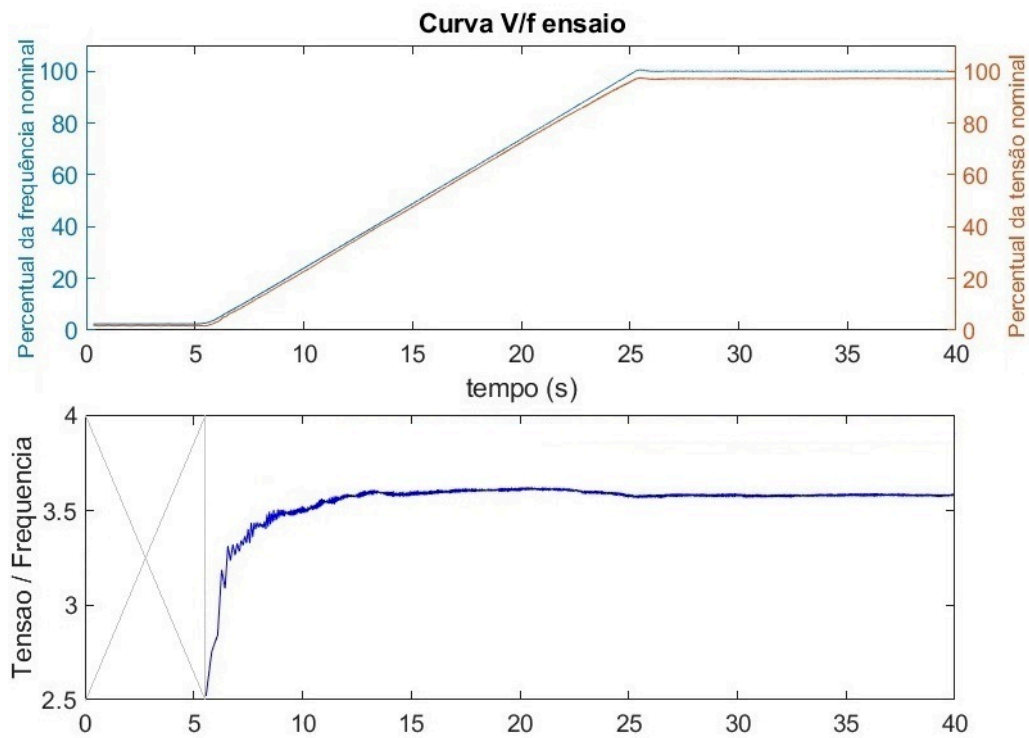
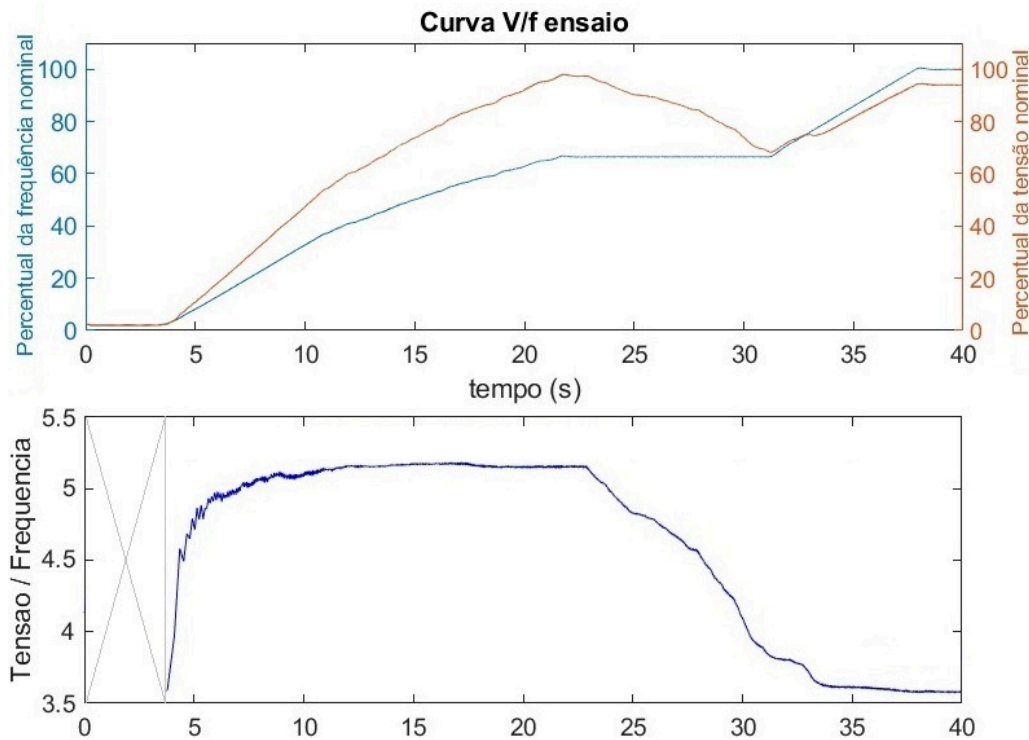


Figura 6.4 – Energização seguindo o procedimento incorreto - Condição B.





É importante observar também que durante a etapa final de ajustes, no intervalo de tempo entre os segundos 22 e 40, foi tomado o devido cuidado para não se exceder o limite de tensão nominal de 220 V em nenhum momento. No entanto, caso o operador esteja desatento a isto, ele pode facilmente continuar elevando a velocidade da máquina primária sem corrigir o campo, ocasionando assim uma sobretensão. Ainda, mesmo que ele corrija o campo concomitantemente com o avanço da velocidade, se o ajuste não for feito proporcionalmente, o resultado pode ser praticamente o mesmo.

### 6.2.3 Conclusão

O estudo de caso 2 demonstrou, de forma prática, a importância de procedimentos adequados para o acionamento do gerador síncrono da bancada didática do LABMAQ, destacando os impactos significativos do método de energização sobre a curva  $V/f$  e, conseqüentemente, sobre os riscos de saturação do núcleo de dispositivos alimentados, como no exemplo utilizado, do transformador trifásico. A análise realizada evidenciou que o método inadequado de energização, especialmente na condição B, resulta em uma rápida extrapolação da relação  $V/f$  durante o regime transitório.

A aplicação desses ensaios não só valida o algoritmo desenvolvido para a análise da curva  $V/f$  como também contribui significativamente para a conscientização de estudantes e usuários da bancada sobre os riscos associados ao regime transitório de energização. Além disso, os resultados obtidos se aplicam a outros dispositivos eletromagnéticos que venham a ser alimentados pela bancada, ampliando o escopo e a relevância deste estudo.

Por fim, o estudo de caso destaca a necessidade de atenção aos detalhes operacionais, especialmente em um ambiente de ensino, onde práticas inadequadas podem comprometer tanto a segurança dos equipamentos quanto a qualidade do aprendizado. A adoção de procedimentos seguros e bem planejados deve ser incentivada, assegurando que as operações sejam conduzidas de forma eficaz e sem riscos desnecessários para os dispositivos envolvidos.

## 6.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO 6

Neste capítulo, foram apresentados os resultados do estudo de caso 2, que explorou os impactos de dois diferentes métodos de acionamento do gerador síncrono da bancada didática do LABMAQ sobre a curva  $V/f$  durante o regime transitório. A análise evidenciou a relevância de se adotar procedimentos adequados para minimizar os riscos de saturação do núcleo de dispositivos alimentados. Além disso, os ensaios realizados contribuem com a validação da eficácia do algoritmo desenvolvido para monitorar e avaliar a relação entre tensão e frequência ao longo do processo de energização.

No próximo capítulo, são apresentadas as conclusões gerais do trabalho de conclusão de curso, destacando a contribuição do algoritmo implementado para o estudo de

acionamentos elétricos em regime transitório, bem como sugestões para aplicações futuras, abrangendo cenários em que o monitoramento da curva  $V/f$  seja essencial para garantir a operação segura e eficiente de máquinas elétricas alimentadas por fontes variáveis.

## CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA APLICAÇÕES FUTURAS

---

Este capítulo apresenta as conclusões gerais do trabalho, destacando os principais resultados obtidos nos estudos realizados durante a elaboração deste trabalho de conclusão de curso e a contribuição do algoritmo desenvolvido para a análise da curva  $V/f$  durante o regime transitório de acionamentos elétricos com fontes variáveis. Além disso, são discutidas possíveis aplicações futuras do algoritmo em contextos diversos, com foco na prevenção de riscos operacionais e na otimização do desempenho de máquinas e dispositivos eletromagnéticos alimentados por fontes variáveis de tensão e frequência. Essas perspectivas visam ampliar o impacto do trabalho, incentivando a continuidade das pesquisas na área e a implementação prática da metodologia proposta.

### 7.1 CONCLUSÃO GERAL DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um algoritmo para análise da curva  $V/f$  em acionamentos elétricos com fontes variáveis de alimentação e sua implementação em *MATLAB*. Inicialmente, foi realizada uma revisão literária sobre os riscos associados à saturação do núcleo de dispositivos eletromagnéticos, destacando as implicações práticas da relação entre tensão e frequência. Em seguida, o algoritmo foi desenvolvido, implementado e validado por meio de dois estudos de caso realizados no LABMAQ, utilizando geradores síncronos de diferentes portes como fontes variáveis.

No primeiro estudo de caso, foi avaliado o risco de saturação de um banco de transformadores isoladores durante operações com uma bancada de geradores síncronos. Compararam-se dois métodos de energização: no primeiro, julgado como o método correto, é feito o ajuste prévio da velocidade da máquina primária antes da imposição da excitação de campo; no segundo, tido como o método incorreto, a ordem sequencial é invertida. O estudo permitiu concluir que, em algumas situações específicas, o método incorreto pode levar à extrapolação da curva  $V/f$ , aumentando significativamente o risco de saturação do

núcleo dos transformadores do banco.

No segundo estudo de caso, uma bancada didática para o ensino de máquinas elétricas foi utilizada para simular cenários mais desafiadores, permitindo a extrapolação controlada da curva  $V/f$ . Foram avaliadas duas configurações do método incorreto de acionamento: na condição A, o campo foi limitado à corrente nominal de circuito aberto; e, na condição B, utilizou-se a corrente nominal de campo do gerador. Os resultados demonstraram que, na condição B, a relação  $V/f$  foi significativamente extrapolada, confirmando o elevado risco de saturação em dispositivos alimentados sob essas condições.

O algoritmo desenvolvido e implementado neste TCC se mostrou eficaz para prever e analisar o comportamento da curva  $V/f$  de fontes de alimentação variáveis, sendo uma ferramenta valiosa para prevenir danos aos equipamentos e bancadas do laboratório. Além disso, os resultados obtidos são relevantes para aplicações práticas e didáticas, pois destacam a importância de procedimentos seguros de acionamento nos mais variados cenários.

## 7.2 SUGESTÕES DE CONTINUIDADE E APLICAÇÕES FUTURAS

Neste trabalho, optou-se por não realizar os ensaios com as cargas conectadas ao gerador para preservar os equipamentos do LABMAQ. A alimentação das cargas eletromagnéticas citadas nos estudos de caso, durante regimes transitórios e, principalmente, em condições com risco de saturação, poderia ocasionar sobrecorrentes significativas com potencial dano aos equipamentos utilizados. Assim, os ensaios foram conduzidos em circuito aberto, o que permitiu a observação do comportamento extremo da curva  $V/f$  sem riscos associados.

Como sugestão para estudos futuros, propõe-se avaliar o comportamento da curva  $V/f$  com o gerador alimentando cargas reais, como por exemplo, transformadores com o secundário em vazio, motores elétricos ou bancos de indutores com diferentes características. Este tipo de análise é especialmente relevante porque, ao alimentar uma carga, a circulação de corrente no gerador provoca uma queda de tensão nos enrolamentos devido às impedâncias internas da máquina. Esse fenômeno, conhecido como regulação de tensão, resulta em uma atenuação da curva  $V/f$ , cuja magnitude depende da intensidade da carga e de sua natureza (resistiva, indutiva ou capacitiva). A avaliação desse comportamento em condições reais é crucial para compreender de forma mais completa os limites operacionais de dispositivos eletromagnéticos e para garantir a segurança e eficiência em aplicações práticas. A continuidade deste estudo, com o devido planejamento e implementação de sistemas de proteção adequados, poderá fornecer resultados ainda mais abrangentes sobre o comportamento das curvas em condições reais de operação.

Além disso, sugere-se investigar a aplicação do algoritmo em fontes eletrônicas variáveis, cujas características de controle tornam a regulação da tensão são relativa-

mente independente da carga. Isto torna o comportamento da curva  $V/f$  semelhante ao dos casos simulados neste trabalho, porém, com aplicações distintas. Essas extensões podem contribuir para ampliar o escopo e a aplicabilidade do algoritmo, beneficiando tanto o ensino quanto a prática industrial.



---

## REFERÊNCIAS

---

- [1] SOLYMAR, L. et al. *Electrical properties of materials 9th ed.* [S.l.: s.n.], 2014. 0-501 p. ISBN 9780198702771. Citado na página 25.
- [2] SUDHOFF, S. D. *POWER MAGNETIC DEVICES - A multi-objective design approach.* [S.l.: s.n.], 2014. 1-469 p. ISBN 978-1-118-48999-4. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.
- [3] CHAPMAN, S. J. *Fundamentos de Máquinas Elétricas, 5th Ed.* [S.l.: s.n.], 2013. v. 53. 684 p. ISSN 1098-6596. ISBN 9788578110796. Citado 3 vezes nas páginas 25, 26 e 27.
- [4] ANTONIOU; ANDREAS. *Digital Signal Processing.* [S.l.]: McGraw-Hill, 2006. 1-965 p. Citado na página 30.
- [5] ELY, F. N. Análise do sistema de medição trifásica dos ensaios de máquinas rotativas elétricas do LABMAQ tendo como objetivo a quantificação das incertezas de medição. Universidade Federal de Santa Catarina, p. 73, 2018. Citado na página 50.





# Apêndices



# APÊNDICE A

---

## CÓDIGO-FONTE DO PROJETO IMPLEMENTADO EM *MATLAB*

---

Neste apêndice é apresentado o código fonte do projeto implementado em *MATLAB*.

O algoritmo desenvolvido neste trabalho de conclusão de curso foi implementado em *MATLAB* e o código-fonte é apresentado a seguir. O código A.1, corresponde ao código-fonte principal. Existe ainda três funções complementares que as sub-rotinas do código principal: *Allpeaks*, *Zerocross interpol*, e *Plot unitario*. Tais funções são apresentadas nos códigos A.2, A.3 e A.4, respectivamente.

Código-fonte A.1 – Código principal implementado em *MATLAB*.

```

1 clear all
2 close all
3
4 [csvFile, filePath] = uigetfile('*.csv', 'Select a CSV file');
5 if isequal(csvFile, 0)
6 disp('User canceled file selection. Exiting script...');
7 return; % Exit the script
8 end
9 fullFileName = fullfile(filePath, csvFile);
10 data_csv = readcell(fullfile(fullFileName));
11 disp(['File imported: ', fullFileName]);
12
13 Ts=data_csv{6,2};
14 Fs=1/Ts;
15
16 window_length = 3;
17 % Tempo em segundos da janela de amostragem inicial
18
19 janela_inicio = round(window_length/Ts);
20 % numero de pontos para fazer o janelamento no inicio
21
22 janela_final = round(data_csv{7,2}-janela_inicio);
23 % numero de pontos para fazer o janelamento no final
24
25 Fc=100; %Frequencia de corte filtro Passa baixa
26 Wn = Fc/(Fs/2); % Frequencia normalizada de corte
27 [b, a] = butter(4, Wn); % Filtro Butterworth de 4 ordem
28
29
30 numericalData = data_csv(15:end,:);
31
32 ens = cell2mat(numericalData);
33 % Convert the cell array to a numerical matrix
34
35 Vt_unfiltered=ens(:,2);
36 Ti=ens(:,1);
37
38 max_time= Ti(1,1);

```

```
39 % Valor de tempo a ser deslocado (Mover Ti para começar em zero)
40
41 for i=1:size(Ti)
42 Ti(i,1)=Ti(i,1) - max_time;
43 % Desloca a Matriz Ti para começar em t=0
44
45 end
46
47 Vt = filter(b, a, Vt_unfiltered);
48 % Filtra o sinal Para remover ruído de instrumentação
49
50 mean_abs_start=abs((max(Vt(1:janela_inicio,:)))-min(Vt(1:janela_inicio,:)))/2;
51 % Media grossa por valor absoluto no começo
52
53 mean_fun_start=mean(Vt(1:janela_inicio,:));
54 % Media por valor medio dos pontos no começo
55
56 mean_abs_end=(abs(max(Vt(janela_final:end,:)))-min(Vt(janela_final:end,:)))/2;
57 % Media grossa por valor absoluto no final
58
59 mean_fun_end=mean(Vt(janela_final:end,:));
60 % Media por valor medio dos pontos no final
61
62 peak_Vt_start = allpeaks(Ti(1:janela_inicio,1),Vt(1:janela_inicio,1));
63 % Valores dos picos da funcao na janela de inicio
64
65 high_peaks_start = peak_Vt_start(1:2:end,3);
66 % indices impares
67
68 low_peaks_start = peak_Vt_start(2:2:end,3);
69 % indices pares
70
71 mean_peak_start = (mean(high_peaks_start)+mean(low_peaks_start))/2;
72 % Media do sinal usando media dos picos/2
73
74 peak_Vt_end = allpeaks(Ti(janela_final:end,1),Vt(janela_final:end,1));
75 % Valores dos picos da funcao na janela final
76
77 high_peaks_end = peak_Vt_end(1:2:end,3);
78 % indices impares
79
80 low_peaks_end = peak_Vt_end(2:2:end,3);
81 % indices pares
82
83 mean_peak_end = (mean(high_peaks_end)+mean(low_peaks_end))/2;
84 % Media do sinal usando media dos picos/2
```

```
85
86 for i=1:size(Vt)
87 Vt(i,1)=Vt(i,1)-mean_peak_start;
88 % Retira o valor DC estimado grosso usando começo do teste
89
90 Vt(i,1)=Vt(i,1)-mean_peak_end;
91 % Retira o valor DC estimado grosso usando final do teste
92
93 end
94
95
96 % Janelamento Inicial para ajuste fino DC
97
98 [Zero_crossing_index,Zero_crossing_index_interpoled,Vzero,Vz_interpol]=
99 zerocross_interpol(Vt(1:janela_inicio,1));
100 %Analisa a passagem por zero em uma janela inicial do sinal
101
102 [Zero_crossing_index,Zero_crossing_index_interpoled,Vzero,Vz_interpol]=
103 zerocross_interpol(Vt(janela_final:end,1));
104 %Analisa a passagem por zero em uma janela no final do sinal
105
106 Vjanela=Vt(Zero_crossing_index(1,1):Zero_crossing_index(end,1),1);
107 mean_janela = mean(Vjanela(:,1));
108 % Media aritimetica do janelamento - Fina
109
110 picos_janela =
111 allpeaks(Ti(Zero_crossing_index(1,1):Zero_crossing_index(end,1),1),Vjanela);
112 mean_janela_picos = mean(picos_janela(1:2:end,3))/mean(picos_janela(2:2:end,3));
113 % Media por picos - Fina
114
115 for i=1:size(Vt)
116 Vt(i,1)=Vt(i,1)-mean_janela; % Retirando Valor fino DC
117 end
118
119
120 [Zero_crossing_index,Zero_crossing_index_interpoled,Vzero,Vz_interpol]=
121 zerocross_interpol(Vt);
122
123 Peaks=allpeaks(Ti,Vt);
124
125 for i=1:size(Vz_interpol,1)
126 Vz_interpol(i,1)=Vz_interpol(i,1)*Ts;
127 % Refatorando Indices de tempo para Valores do ensaio
128
129 end
130
```

```

131 for i=1:size(Vzero,1)
132 Vzero(i,2)=Vzero(i,2)*Ts; % Refatorando Indices de tempo para Valores do ensaio
133 end
134
135 Ft=zeros(size(Vz_interpol,1)-2,3);
136 Vpeak=zeros(size(Vz_interpol,1)-2,4);
137 for i=1:size(Ft,1)
138 Ft(i,1)=Vz_interpol(i,1);
139 Ft(i,2)=1/((Vz_interpol(i+2,1)-Vz_interpol(i,1)));
140 % Frequencia para cada ciclo de operacao
141
142 Ft(i,3)=100*(Ft(i,2)/60);
143 % Percentual da frequencia calculada em relacao 60Hz
144
145 ind1=round(Vz_interpol(i,1)/Ts);
146 ind2=round(Vz_interpol(i+1,1)/Ts);
147 Vpeak(i,1)=Vz_interpol(i,1);
148 Vpeak(i,2)=max(abs(Vt(ind1:ind2)));
149
150 Vpeak(i,3)=Vpeak(i,2)/(sqrt(2)*Ft(i,2));
151 % Valor dos indices V/f
152
153 Vpeak(i,4)=100*(Vpeak(i,2)/537.4012);
154 % Percentual da tensao calculada em relacao a tensao nominal
155
156 end
157
158 ensaios{1}=struct('Vt',Vt,'Vt_unfiltered',Vt_unfiltered,'Ti',Ti,'Ft',Ft,'Vpeak',Vpeak,
159 'Zero_crossing_index',Zero_crossing_index,'Zero_crossing_index_interpoled',
160 Zero_crossing_index_interpoled,'Vzero',Vzero,'Vz_interpol',Vz_interpol,'Peaks',Peaks,
161 'mean_abs_start',mean_abs_start,'mean_fun_start',mean_fun_start,'mean_abs_end',
162 mean_abs_end,'mean_fun_end',mean_fun_end,'mean_peak_start',mean_peak_start,
163 'mean_peak_end',mean_peak_end,'mean_janela',mean_janela,'mean_janela_picos',
164 mean_janela_picos);
165
166 tmp = ensaios{1,1};
167 currentDate = datetime('now', 'Format', 'yyyy-MM-dd_HH-mm');
168 filename = sprintf('ensaio_%s.mat', char(currentDate));
169 save(filename, 'tmp');
170
171 plot_unitario(filename);
172 %

```

## Código-fonte A.2 – Allpeaks (subrotina do código principal).

```

1 %
2 function P=allpeaks(x,y)
3
4 peak=0;
5 for k = 2:length(x)-1
6 if y(k) > y(k-1)
7 if y(k) > y(k+1)
8 peak = peak + 1;
9 P(peak,:)=[peak x(k) y(k)];
10 end
11 end
12 end

```

## Código-fonte A.3 – Zerocross interpol (subrotina do código principal).

```

1 function [dy,x0,Vz,Vz_interpol]=zerocross_interpol(y)
2
3 x=1:length(y);
4 zci = @(v) find(v(:).*circshift(v(:), [-1 0]) <= 0);
5 dy = zci(y);
6 for k1 = 1:size(dy,1)-1
7 b = [[1;1] [x(dy(k1)); x(dy(k1)+1)]]\[y(dy(k1)); y(dy(k1)+1)];
8 x0(k1) = -b(1)/b(2);
9 mb(:,k1) = b;
10
11 end
12
13 x0=x0.' ; %'
14 Vz = zeros(size(dy,1),2);
15 Vz_interpol = zeros(size(x0,1),2);
16
17 for k2 = 1:size(dy,1)
18 Z_temp = dy(k2,1) ;
19 Vz(k2,1) = y(Z_temp,1) ;
20 Vz(k2,2) = Z_temp ;
21 end
22
23 for k2 = 1:size(x0,1)
24 Vz_interpol(k2,1) = x0(k2,1) ;
25 end

```



## Código-fonte A.4 – Plot unitario (subrotina do código principal).

```
1 function plot_unitario(ensaio,y)
2
3 close all
4
5 folder = 'graficos';
6
7 if ~exist(folder, 'dir')
8 mkdir(folder);
9 end
10
11 currentDate = datetime('now', 'Format', 'yyyy-MM-dd_HH-mm');
12 currentDate=char(currentDate);
13 ensaio01=load(ensaio);
14
15
16 %fig = figure('visible','off');
17 subplot(2,1,1);
18 hold
19
20 [hAx1,hLine1,hLine2] =
    plotyy(ensaio01.tmp.Vpeak(:,1),ensaio01.tmp.Ft(:,3),ensaio01.tmp.Vpeak(:,1),
21 ensaio01.tmp.Vpeak(:,4));
22 xlabel('tempo (s)');
23 title('Titulo do gráfico')
24 ylabel(hAx1(1),'Percentual da frequencia nominal (60Hz)'); % left y-axis
25 ylabel(hAx1(2),'Percentual da tensao nominal (380V)'); % right y-axis
26 set(hAx1(1),'YLim',[0 110]);
27 set(hAx1(2),'YLim',[0 110]);
28 set(hAx1(1),'YTick',0:20:100);
29 set(hAx1(2),'YTick',0:20:100);
30
31 subplot(2,1,2);
32 hold off
33 plot(ensaio01.tmp.Vpeak(:,1),ensaio01.tmp.Vpeak(:,3),'b');
34 xlabel('tempo (s)');
35 ylabel('Tensao / Frequencia');
36
37 filename = ['ensaio01-', currentDate, '.jpg'];
38 fullPath = fullfile(folder, filename);
39 saveas(fig, fullPath); % saveas(fig,'ensaio01','jpg');
40 clear fig hAx1 hLine1 hLine2;
41
42 fig = figure('visible','off');
43 subplot(2,1,1);
44 hold
```



## APÊNDICE B

---

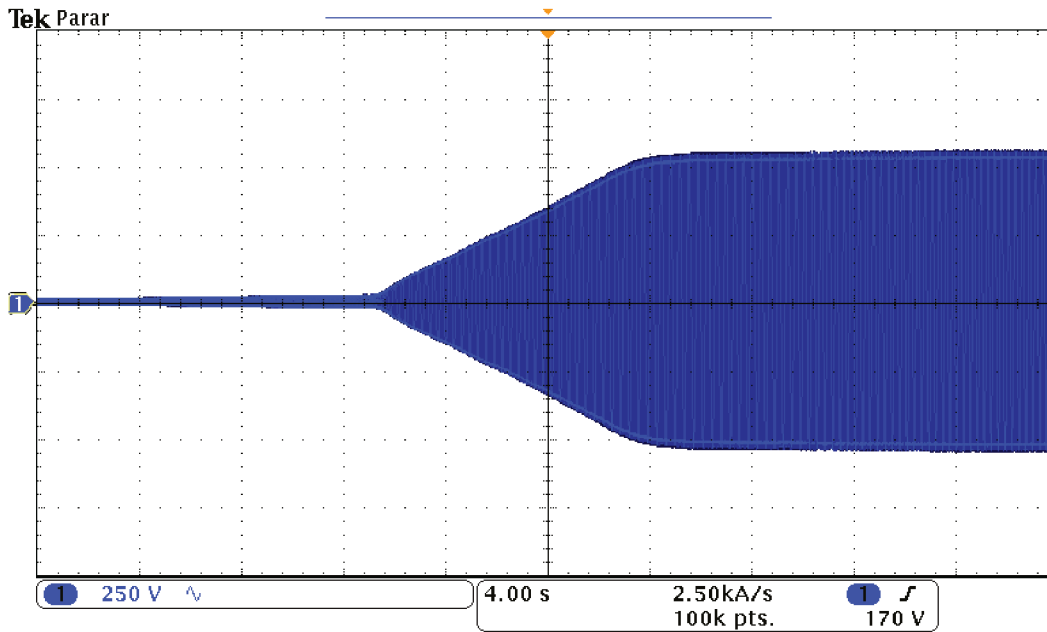
# IMAGENS DAS AQUISIÇÕES OBTIDAS PELO OSCILOSCÓPIO NOS ESTUDOS DE CASO

---

Neste apêndice são apresentadas as imagens das formas de onda da tensão de saída dos geradores para cada ensaio realizado nos estudos de caso deste trabalho.

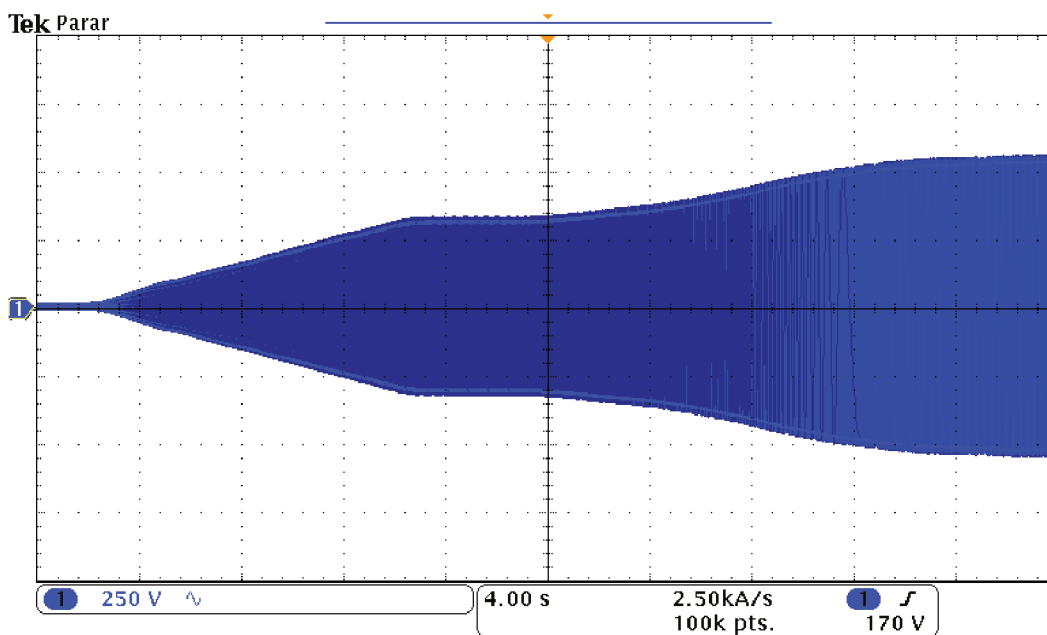
As Figuras B.1 e B.2 mostram as imagens dos arquivos de aquisição das formas de onda da tensão terminal do gerador de oito polos durante os períodos de acionamento da bancada no estudo de caso 1. A Figura B.1 se refere ao acionamento correto e, a Figura B.2, ao incorreto.

Figura B.1 – Estudo de caso 1 - Acionamento correto da máquina de oito polos



Fonte: O autor.

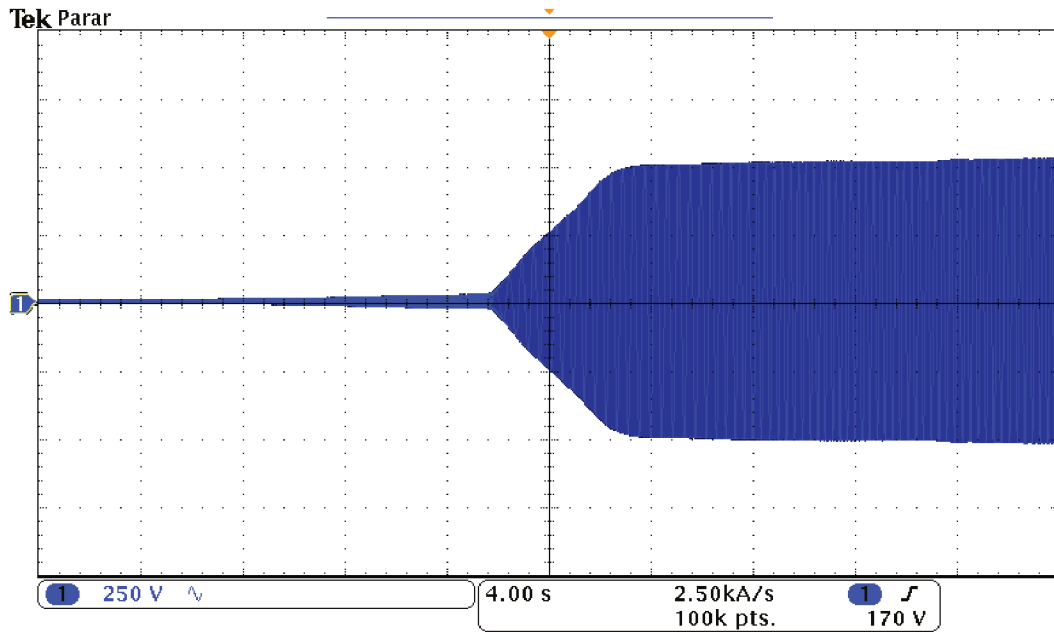
Figura B.2 – Estudo de caso 1 - Acionamento incorreto da máquina de oito polos



Fonte: O autor.

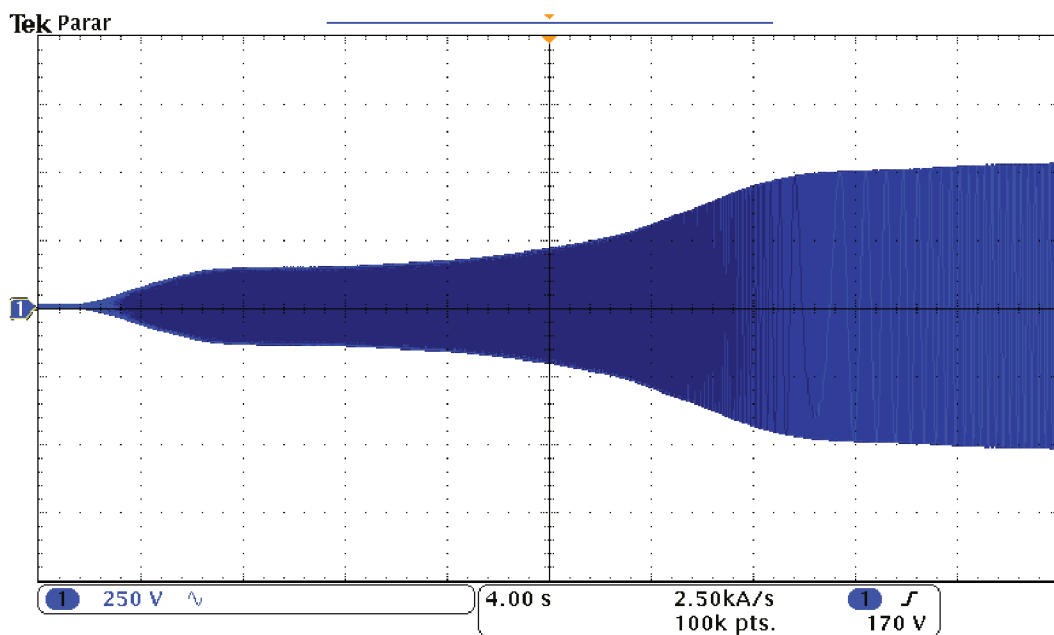
As Figuras B.3 e B.4 mostram as imagens dos arquivos de aquisição das formas de onda da tensão terminal do gerador de dois polos durante os períodos de acionamento da bancada no estudo de caso 1. A Figura B.3 se refere ao acionamento correto e, a Figura B.4, ao incorreto.

Figura B.3 – Estudo de caso 1 - Acionamento correto da máquina de dois polos



Fonte: O autor.

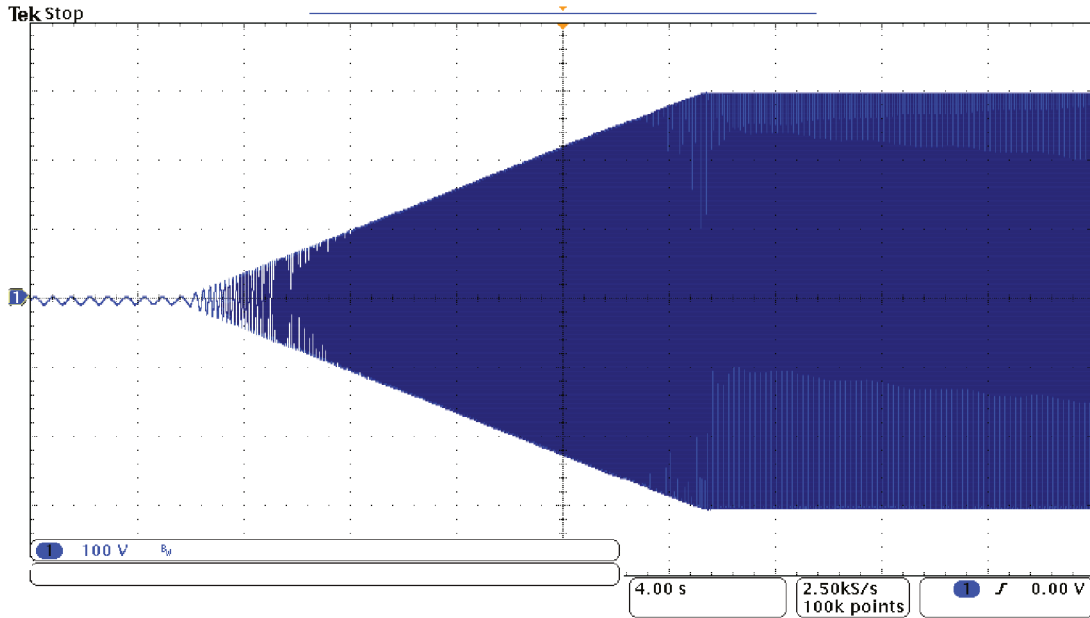
Figura B.4 – Estudo de caso 1 - Acionamento incorreto da máquina de dois polos



Fonte: O autor.

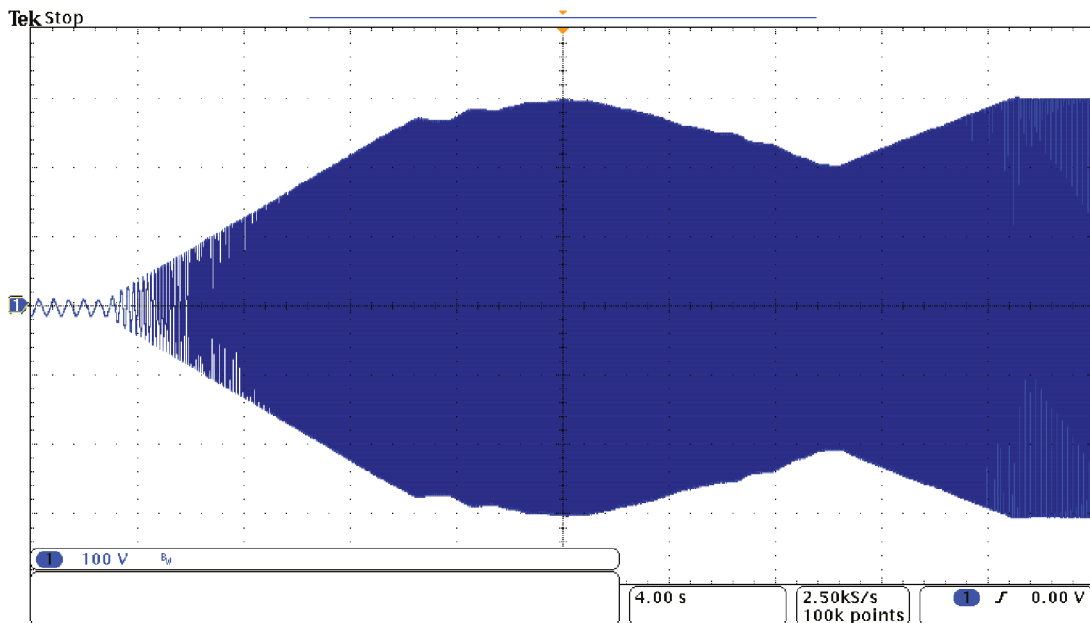
As Figuras B.5 e B.6 mostram as imagens dos arquivos de aquisição das formas de onda da tensão terminal do gerador de quatro polos durante os períodos de acionamento da bancada no estudo de caso 2. A Figura B.5 se refere ao acionamento na condição A e, a Figura B.6, ao acionamento na condição B.

Figura B.5 – Estudo de caso 2 - Condição A



Fonte: O autor.

Figura B.6 – Estudo de caso 2 - Condição B



Fonte: O autor.

