

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELÉTRICA  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

JEAN CARLOS GALON

**ANÁLISE DA DEFORMAÇÃO DINÂMICA DE UM  
CONTATOR ELETROMECHANICO UTILIZANDO REDES  
DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2018

JEAN CARLOS GALON

# **ANÁLISE DA DEFORMAÇÃO DINÂMICA DE UM CONTATOR ELETROMECHANICO UTILIZANDO REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Elétrica da Coordenação de Engenharia Elétrica - CO-ELT - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Kleiton de Moraes Sousa

Coorientador: Prof. Dr. Jorge Luis Roel Ortiz

PATO BRANCO

2018

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

O Trabalho de Conclusão de Curso intitulado **ANÁLISE DA DEFORMAÇÃO DINÂMICA DE UM CONTATOR ELETROMECAÂNICO UTILIZANDO REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA** do acadêmico **Jean Carlos Galon** foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata da banca examinadora **Nº 207** de **2018**.

Fizeram parte da banca examinadora os professores:

**Prof. Dr. Kleiton de Moraes Sousa**

**Prof. Dr. Jorge Luis Roel Ortiz**

**Prof. Me. César Augusto Portolann**

**Prof. Dr. Ivo de Lourenço Júnior**

**A Ata de Defesa assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica**

Aos meus pais por sempre terem se esforçado para dar seu melhor na minha criação e o incentivo que sempre me deram.

*Comece de onde você está. Use o que você tiver.  
Faça o que você puder.*

Arthur Ashe

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço principalmente meus pais por terem sempre me apoiado nas minhas escolhas e sempre me incentivarem ir atrás dos meus sonhos. Aos professores Kleiton e Ortiz pela disponibilidade e orientação ao longo desse trabalho. Agradeço também as entidades de fomentos Fundação Araucária, UTFPR-PB, UTFPR-CB, CNPQ e CAPES. Aos demais colegas de curso e amigos por terem sempre me ajudado sendo forma de conhecimento ou por momentos de alegrias. E meus primos pela parceria na vida.

## RESUMO

Os contatores eletromecânicos são amplamente utilizados em ambientes industriais para conectar e desconectar circuitos de carga de energia. Devido a sua variedade de aplicações, é importante garantir sua operação, mesmo em condições adversas, como quedas de tensão. A medição da deformação dinâmica do núcleo do contator pode ser usada para analisar sua operação, uma vez que a força eletromagnética, que causa a deformação, depende da tensão e corrente do contator. Os sensores de redes de Bragg em fibra podem ser utilizados para medição de deformação do núcleo do contator devido à sua imunidade eletromagnética e tamanho pequeno. Medições obtidas durante os testes de acionamento do contator, estado estacionário e desligamento do contator mostram a deformação dinâmica devido a forças eletromagnéticas. Ambas as partes das forças eletromagnéticas, constantes e senoidais, podem ser observadas nas curvas de deformação. A parte senoidal tem uma frequência fundamental de 120 Hz, duas vezes do fornecimento de frequência. Este trabalho apresenta resultados que viabilizam a utilização de sensores FBG para análise de contatores eletromecânicos.

**Palavras-chave:** Contator eletromecânico, força eletromagnética, redes de Bragg em fibra óptica, sensores ópticos.

## ABSTRACT

The electromechanical contactors are widely used in industrial environment to connect and disconnect of power load circuits. Due to its variety of applications it is important to guarantee its operation, even in adverse conditions such as voltage sags. The measurement of the dynamic strain of the contactor core can be used to analyze its operation, since the electromagnetic force, that causes the strain, depends on contactor's voltage and current. The fiber Bragg gratings sensors can be used for contactor core strain measurement due to its electromagnetic immunity and small size. Measurements obtained during tests of contactor's turn on, steady state and contactor turn off shows the dynamic strain due to electromagnetic forces. Both parts of the electromagnetic forces, constant and sinusoidal, can be observed on the strain curves. The sinusoidal part has a fundamental frequency of 120 Hz, twice of the frequency supply. This work presents results that make feasible the use of FBG sensors for the analysis of electromechanical contactors.

**Keywords:** Electromechanical contactor, electromagnetic force, fiber Bragg gratings, optical sensors.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Estrutura do contator. . . . .	17
Figura 2:	Circuito análogo elétrico equivalente. . . . .	18
Figura 3:	Representação de uma FBG: (a) fibra óptica contendo três FBGs e (b) espectros associados. . . . .	23
Figura 4:	Fluxograma para simulação. . . . .	27
Figura 5:	Sensor FBG fixado ao núcleo fixo do contator. . . . .	28
Figura 6:	Arranjo experimental. . . . .	28
Figura 7:	Deformação do núcleo fixo do contator. Do período de 1s até 18,5s o contator está em funcionamento. . . . .	30
Figura 8:	Deformação do núcleo fixo do contator durante o transitório quando a bobina de excitação está ligada. A posição do núcleo móvel é ilustrada acima da curva de deformação. . . . .	31
Figura 9:	Transitório da corrente na bobina de excitação durante o acionamento do contator. Canal 1 (azul escuro) mostra a curva da tensão de entrada em divisões de 100 V. Canal 2 (azul claro) mostra a curva da corrente elétrica da bobina de excitação em divisões de 500 mA. A escala de tempo (eixo horizontal) esta em 10 ms por divisão. . . . .	32
Figura 10:	Deformação do núcleo fixo durante estado estacionário do contator. . . . .	32
Figura 11:	Espectro de frequência deformação dinâmica do núcleo fixo do contator. . . . .	33
Figura 12:	Corrente e tensão na bobina de excitação durante o estado estacionário do contator. Canal 1 (azul escuro) mostra a curva da tensão de entrada em divisões de 100 V. Canal 2 (azul claro) mostra a curva da corrente elétrica da bobina de excitação em divisões de 500 mA. A escala de tempo (eixo horizontal) esta em 10 ms por divisão. . . . .	33

Figura 13: Deformação do núcleo fixo do contator quando a bobina de excitação é desligada. . . . .	34
Figura 14: Transitório da deformação dinâmica do núcleo fixo do contator durante o acionamento. . . . .	35
Figura 15: Transitório da corrente na bobina de excitação durante o acionamento do contator. Canal 1 (azul escuro) mostra a curva da tensão de entrada em divisões de 100 V. Canal 2 (azul claro) mostra a curva da corrente elétrica da bobina de excitação em divisões de 500 mA. A escala de tempo (eixo horizontal) esta em 10 ms por divisão. . . . .	35
Figura 16: Transitório da deformação dinâmica do núcleo fixo do contator durante o acionamento. . . . .	36
Figura 17: Transitório da corrente na bobina de excitação durante o acionamento do contator. Canal 1 (azul escuro) mostra a curva da tensão de entrada em divisões de 100 V. Canal 2 (azul claro) mostra a curva da corrente elétrica da bobina de excitação em divisões de 500 mA. A escala de tempo (eixo horizontal) esta em 10 ms por divisão. . . . .	36
Figura 18: Transitório da deformação dinâmica do núcleo fixo do contator durante o acionamento. . . . .	37
Figura 19: Transitório da corrente na bobina de excitação durante o acionamento do contator. Canal 1 (azul escuro) mostra a curva da tensão de entrada em divisões de 100 V. Canal 2 (azul claro) mostra a curva da corrente elétrica da bobina de excitação em divisões de 500 mA. A escala de tempo (eixo horizontal) esta em 20 ms por divisão. . . . .	38
Figura 20: Espectro de frequência deformação dinâmica do núcleo fixo do contator. . . . .	38
Figura 21: Transitório da deformação dinâmica do núcleo fixo do contator durante o acionamento. . . . .	39

Figura 22:	Transitório da corrente na bobina de excitação durante o acionamento do contator. Canal 1 (azul escuro) mostra a curva da tensão de entrada em divisões de 100 V. Canal 2 (azul claro) mostra a curva da corrente elétrica da bobina de excitação em divisões de 500 mA. A escala de tempo (eixo horizontal) esta em 20 ms por divisão. . . . .	39
Figura 23:	Resposta em frequência de deformação dinâmica do núcleo fixo do contator. . . . .	40
Figura 24:	Gráficos obtidos com a simulação computacional. Primeiro gráfico mostra a corrente de excitação e o segundo o posicionamento do núcleo móvel em relação ao núcleo fixo. . . . .	41

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
1.1	CONTADORES ELETROMECCÂNICOS	11
1.2	SENSORES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA	13
1.3	OBJETIVOS E METAS	14
1.3.1	Objetivo Geral	14
1.3.2	Objetivos Específicos	14
1.4	JUSTIFICATIVA	14
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	15
<b>2</b>	<b>CONTADORES ELETROMECCÂNICOS</b>	<b>16</b>
2.1	MODELAGEM DINÂMICA	17
<b>3</b>	<b>SENSORES EM FIBRA ÓPTICA</b>	<b>21</b>
3.1	SENSORES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA	22
3.2	SENSIBILIDADE CRUZADA DE DEFORMAÇÃO E TEMPERATURA NAS REDES DE BRAGG	24
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>26</b>
4.1	SIMULAÇÃO	26
4.2	ARRANJO EXPERIMENTAL	27
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>29</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>42</b>
	<b>ANEXO A - ALGORITMO DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL</b>	<b>46</b>

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 CONTADORES ELETROMECAÑICOS

Os contadores eletromecânicos, ou simplesmente contadores, são dispositivos amplamente utilizados para comutação e controle, e eles têm sido utilizados em processos industriais por muitas décadas. Mais de 80% deles estão equipados com bobinas alimentadas por corrente alternada (CA) (COLLINS; ZAPARDIEL, 1997). A preocupação da indústria com a qualidade de energia acentuou o interesse em entender o comportamento do contador durante distúrbios da rede, como queda de tensão. Quando os contadores enfrentam perturbações de energia, eles podem abrir seus contatos e desconectar circuitos causando interrupções indevidos em processos industriais. É importante entender a resposta desse dispositivo para prever seu comportamento durante perturbações de tensão.

O funcionamento adequado de um contador CA durante distúrbios de tensão depende da quantidade de energia armazenada na bobina do contador, que é energizada a partir de uma das fases da alimentação (WELDEMARIAM *et al.*, 2016). Esses dispositivos são diagnosticados como elos fracos e geralmente têm baixa capacidade de afundamentos de tensão (COLLINS; BRIDGWOOD, 1997), pois, um disparo de um contador pode interromper toda a linha de produção, o que pode levar a um desligamento descontrolado do processo, o qual pode ser extremamente caro, mesmo se todos os outros equipamentos estiverem imunes a tais distúrbios .

Uma desvantagem dos contadores CA é o movimento mecânico de suas partes durante o acionamento e o desgaste que isso causa. No momento que os contatos são fechados a parte móvel bate na parte fixa fazendo que os contatos tenham um sobressalto. Este fenômeno é indesejável, pois a reabertura dos contatos durante o fechamento causa aquecimento devido a um arco elétrico e degradação dos contatos o que impacta diretamente na vida útil do contador (RUIZ *et al.*, 2010).

A sensibilidade de um processo contra afundamentos de tensão depende da resposta de componentes individuais e interação entre os componentes do processo durante esse distúrbio (WU *et al.*, 2016). O comportamento elétrico de contadores CA sob afundamentos de tensão podem apresentar uma ligeira variação em seu limiar

de sensibilidade (magnitude, duração) (MOHAMAD; NOR, 2004). O desengate dos contatos acontece devido a força eletromagnética ser menor que a força da mola. A força eletromagnética depende da intensidade do fluxo magnético que passa pelos núcleos. Quando ocorre um afundamento de tensão abaixo do limite da tensão de controle, o fluxo diminui e a força eletromagnética resultante é menor do que a força exercida pela mola, como os contatos a se abrem e interrompe a alimentação principal para a carga.

Um importante fenômeno do contator é o salto dos contatos móveis. Os contatos e os núcleos dos contatores CA colidem em alta velocidade e grandes forças de impacto atuam entre eles (WADA *et al.*, 2002). Tais impactos levam a um salto de contato, que é um conjunto de colisões ocorrendo repetidamente em pouco tempo, questão de milissegundos. O salto de contato resulta na redução da vida útil do equipamento, porque surgem arcos elétricos durante o período de salto. Portanto, reduzir o salto de contato é uma das questões mais importantes para projetar o contator CA. Uma mola amortecedora é instalado para aliviar os impactos. Assim, o movimento do contator CA é altamente dinâmico, com acoplamentos complicados entre sistemas mecânicos e eletromagnéticos (WANG *et al.*, 2011).

Os movimentos dos contatores variam de acordo com vários parâmetros, como ângulo de fase da tensão, amplitude da tensão, massa, inércia das partes mecânicas. Além disso, os movimentos mecânicos e os comportamentos eletromagnéticos são acoplados entre si (KOLTERMANN *et al.*, 1992). Entretanto, para analisar o movimento geral dos contatores, é necessário analisar os comportamentos dinâmicos, e os fatores de acoplamento simultaneamente.

Portanto, é desejável que o desempenho de contatores se tornem cada vez melhor. Pesquisas e desenvolvimentos tem sido realizado há décadas para melhorar o comportamento dos contatores (COLLINS; ZAPARDIEL, 1997), (KOLTERMANN *et al.*, 1992), (MOHAMAD; NOR, 2004), (WANG *et al.*, 2011) e (WU *et al.*, 2016). Controles eletrônicos e sensores foram adicionados aos contatores para controlar a abertura do contator para minimizar a erosão do contato e para controlar o fechamento do contator para reduzir o ressalto do contato (LI *et al.*, 2004). Esse Arranjo de controle com sensores necessita de uma instrumentação precisa, sendo neste quesito a utilização de sensores a fibra óptica uma boa escolha para obtenção de resultados.

## 1.2 SENSORES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA

O emprego de sensores elétricos garante a operação de diversos sistemas e tecnologias atuais. Algumas aplicações exigem, entretanto, o desenvolvimento de sensores adaptados, nos quais os materiais utilizados em sensores elétricos tornam-se uma barreira para o desenvolvimento dos mesmos (CARNEIRO; BARBERO, 2014).

Desde a primeira demonstração da utilização de fibra óptica como sensor (GIALLORENZI *et al.*, 1982), o avanço tecnológico e utilização destes sensores tem sido cada vez mais disseminado. Muitas aplicações para esse tipo de sensores já foram demonstrados em varias áreas (UDD; SPILLMAN, 2011), oferecendo soluções mais eficazes pelo monitoramento mais preciso e em tempo real (HILL; MELTZ, 1997). Até mesmo para sensoriamento de meios magnéticos a utilização de sensores de fibra óptica é utilizada (LENZ; EDELSTEIN, 2006).

Os sensores de fibra óptica baseados em redes de Bragg (FBG - *Fiber Bragg Grating*) apresentam vantagens relevantes, como ser totalmente passivo por não precisar de fonte de alimentação local, volume reduzido, sendo menores que seus sensores equivalentes elétricos, imunes à interferência eletromagnética e capazes de serem multiplexados em uma única fibra (SOUSA *et al.*, 2011).

Esses sensores já foram utilizados tanto para medir temperatura quanto para deformação e vibração em equipamentos elétricos como geradores de energia elétrica, maquinas de indução e entre outras aplicações (SOUSA *et al.*, 2015).

As características intrínsecas dos sensores FBGs, fazem deles uma das tecnologias mais promissoras a serem usadas na análise de vibrações e aquecimento em máquinas elétricas (SOUSA *et al.*, 2012). Os sensores baseados em FBG, aproveitam algumas propriedades oferecidas pela fibra ótica, ou seja, transmissão de baixa perda, isolamento elétrico, peso e volume reduzidos, durabilidade e flexibilidade (LINESSIO *et al.*, 2015). Além disso, o isolamento elétrico e a imunidade a interferências eletromagnéticas são características fundamentais a serem consideradas em sua aplicação em máquinas de alta tensão e ambientes sujeitos a intensas interferências eletromagnéticas (SOUSA *et al.*, 2012). As informações adquiridas pelas FBGs estão moduladas em frequência e, conseqüentemente, apresentam menor suscetibilidade a interferências externas, o que melhora a relação sinal-ruído. Existe vários tipos de sensores FBG, como sensores de temperatura, deslocamento, pressão, pH, aceleração, entre outros, os quais podem ser multiplexados na mesma fibra óptica, reduzindo a necessidade de cabeamento múltiplo e pesado usado na detecção tradi-

cional (SOUSA *et al.*, 2015) e (LINESSIO *et al.*, 2016).

Os sensores ópticos formados por redes de Bragg em fibra óptica possuem alterações feitas no núcleo da fibra óptica. Tais núcleos, passam por um tratamento o qual ficam gravadas as redes de Bragg. Existe varias técnicas de gravação dos sensores de FBG (HILL; MELTZ, 1997). Outro fator importante a considerar-se, é que não se possui um modelo padrão de técnicas de leitura desses sensores (UDD; SPILLMAN, 2011).

### 1.3 OBJETIVOS E METAS

O presente trabalho tem como objetivos e metas os itens que estão descritos nessa sessão.

#### 1.3.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do trabalho é analisar o comportamento dinâmico da deformação do núcleo de um contator eletromecânico CA utilizando redes de Bragg em fibra óptica, a partir da medida da deformação do núcleo.

#### 1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisar bibliografias referentes aos contadores CA e sensores FBGs;
- Estudar e analisar um modelo para simulação de um contator CA;
- Determinar o local de medição da deformação;
- Instalação do sensor óptico no núcleo do contator;
- Realizar ensaios;
- Analisar os resultados obtidos.

### 1.4 JUSTIFICATIVA

A análise de um contator, é de bastante complexidade, pois, não possui um funcionamento padrão e sua estrutura física o torna de difícil instalação de sensores para poder entender o que acontece, onde geralmente se utiliza dados os quais são



obtidos por parâmetros que se obtém externamente, como corrente e tensão de entrada. Por tais motivos, a utilização de um sensor de fibra óptica se mostrou uma forma de analisar o funcionamento, principalmente pelo tamanho físico de tais sensores.

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O texto foi organizado visando a melhor compreensão de sensores FBG e contadores. Estão descritos a seguir os capítulos que compõem o texto.

- **Capítulo 2:** Aborda as características e aspectos de funcionamento dos contadores eletromecânicos;
- **Capítulo 3:** Demonstra de forma sucinta as características e funcionamento dos sensores FBG;
- **Capítulo 4:** Apresenta como serão feitas as análises para obtenção de resultados;
- **Capítulo 5:** Apresenta e discute os resultados obtidos;
- **Capítulo 6:** As conclusões do trabalho com base em o que foi apresentado.

## 2 CONTADORES ELETROMECÂNICOS

O contator eletromecânico de corrente alternada (CA), é um dos equipamentos mais comum em plantas industriais. Este equipamento é integrado em outros importantes circuitos, com as mais diversas formas de atuação, tais como, proteção de sistemas, partida de motores elétricos e controle automatizado de processos industriais.

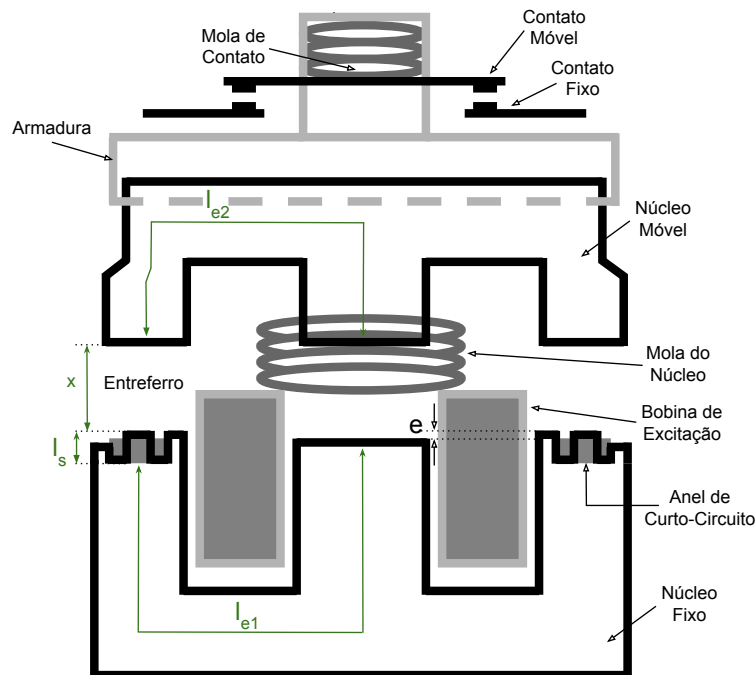
A estrutura de um contator, Figura 1, é composta por dois núcleos em formato de  $E$ , um móvel e um fixo. Uma bobina de excitação na coluna central e uma bobina em cada coluna externa, localizada no final das colunas externas, chamada de anel de curto-circuito ou bobina de sombreamento, ambas no núcleo fixo. Entre os dois núcleos existe uma mola de retorno. Uma armadura de plástico rígido é acoplada ao núcleo móvel. Junto a esta armadura possui os contatos, e também uma mola de retorno dos contatos. As dimensões do núcleo fixo são maiores que a do núcleo móvel.

O funcionamento desse equipamento depende da intensidade da força eletromagnética, a qual depende da corrente elétrica drenada pela bobina de excitação. A tensão aplicada aos terminais da bobina geram uma corrente elétrica, a qual induz fluxo magnético na coluna central do núcleo, o qual se divide para as colunas laterais. O fluxo da coluna central tem a função de intensificar a força eletromagnética no entreferro entre dos núcleos, até que as faces das colunas laterais da parte móvel se encontrem com as faces das colunas laterais da parte fixa. Tal força, tem que ser maior que a força exercida pelas molas tanto do núcleo, quanto dos contatos. As molas tem finalidade de reduzir um sobressalto gerado na hora que os núcleo se colidem, criando um arco elétrico, tudo isso diminui a vida útil do equipamento.

A força magnética tem que ser dimensionada levando em conta um fator importante, a fusão dos contatos na hora que se chocam e assim tornando-o inutilizável, essa força não pode ser muito maior que a força máxima que as molas podem exercer, essa resultante também é a que define uma vida útil estimada das molas, por consequência do contator.

Quando se encontram, os núcleo ainda possuem entreferros presentes nas colunas laterais e central. Os entreferros nas colunas laterais existem para intensificar

o fluxo que passa pelas faces sombreadas e não sombreadas das extremidades, a dispersão magnética é mínima nesses pontos. O anel de curto-circuito tem finalidade de defasar o fluxo gerado pela bobina de excitação, quando a corrente passar por zero não acontecer um desatracamento dos núcleos, essa defasagem tende a ser  $90^\circ$  atrasado com o fluxo da bobina de excitação. Na coluna central é presente um entreferro constante quando o contator é atracado, esse entreferro existe para a que a força magnética tenha um valor constante e maior que a força das molas.



**Figura 1: Estrutura do contator.**  
Fonte: Autoria Própria

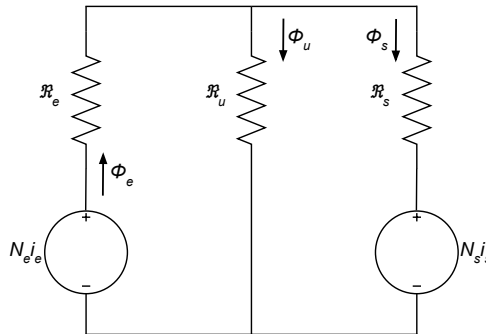
## 2.1 MODELAGEM DINÂMICA

Muitos trabalhos na literatura modelam os comportamentos dinâmicos do contator, no entanto, a maioria baseia-se no método dos elementos finitos (FEM), porém para finalidades de entendimento, será mostrada apenas o equacionamento do contator CA (KOLTERMANN *et al.*, 1992), (WU *et al.*, 2016), (WANG *et al.*, 2011) e (WADA *et al.*, 2002).

A modelagem que será demonstrada neste trabalho usa das Leis de Kirchhoff, Leis de Maxwell e Leis de Newton para demonstrar os equacionamentos do contator CA e analogia entre circuitos magnéticos e elétricos.

A Figura 2 ilustra o circuito elétrico análogo equivalente ao circuito magnético, e a modelagem do contator é baseada nesse circuito. As tensões de terminal utili-

zando a Lei das malhas de Kirchoff é dada pelas equações 1 e 2. Porém, para o anel de curto-circuito a tensão é zero, pois, possui um caminho fechado, o qual terá somente corrente induzida.



**Figura 2: Circuito análogo elétrico equivalente.**  
Fonte: Autoria Própria

$$V = R_e i_e + N_e \frac{d\phi_e}{dt} \quad (1)$$

$$0 = 2R_s i_s + N_s \frac{d\phi_s}{dt}, \quad (2)$$

em que  $V$  corresponde a tensão aplicada aos terminais da bobina de excitação,  $i_e$  e  $i_s$  são as correntes que passam pela bobina de excitação e pelo anel de curto-circuito, respectivamente,  $N_e$  e  $N_s$  o número de voltas na bobina de excitação e no anel de curto-circuito, no anel de curto circuito só possui uma volta, logo  $N_s=1$ ,  $\phi_e$  é o fluxo magnético gerado pela bobina de excitação,  $\phi_s$  é o fluxo magnético na parte do núcleo sombreado pelo anel de curto-circuito,  $\phi_u$  é o fluxo magnético na parte do núcleo não sombreado, é proporcional ao fluxo gerado pela bobina de excitação.

Utilizando da analogia de circuitos magnéticos mostrada na Figura 2, aplicando a lei das malhas e deixando em função das tensões induzidas nas bobinas, obtemos as equações 3 e 4.

$$N_e i_e = (\mathfrak{R}_e + \mathfrak{R}_u) \phi_e + \mathfrak{R}_u \phi_s \quad (3)$$

$$N_s i_s = \mathfrak{R}_u \phi_e + (\mathfrak{R}_u + \mathfrak{R}_s) \phi_s, \quad (4)$$

sendo que o anel de curto-circuito só possui uma espira,  $N_s$  igual a 1.

As relutâncias, incluindo os entreferros, são dadas pelas equações 5, 6 e 7. Onde  $\mathfrak{R}_e$ ,  $\mathfrak{R}_s$ ,  $\mathfrak{R}_u$  são as relutâncias da bobina de excitação, da parte sombreada pelo

anel de curto-circuito das colunas externas, e da parte não sombreada pelo anel de curto-circuito das colunas laterais, respectivamente.

$$\mathfrak{R}_e = \frac{l_{e1} + l_{e2}}{\mu_0 \mu_r A_e} + \frac{e + x}{\mu_0 A_e} \quad (5)$$

$$\mathfrak{R}_s = \frac{l_s}{\mu_0 \mu_r A_s} + \frac{x}{\mu_0 A_s} \quad (6)$$

$$\mathfrak{R}_u = \frac{l_u}{\mu_0 \mu_r A_u} + \frac{x}{\mu_0 A_u}, \quad (7)$$

em que  $l_{e1}$  e  $l_{e2}$  são os caminhos médios magnéticos do fluxo gerado pela bobina de excitação no núcleo fixo e móvel,  $l_s$  é o caminho médio magnético do fluxo sombreado pelo anel de curto-circuito na extremidade das colunas e  $l_u$  pela parte não sombreada das bobinas,  $A_e$ ,  $A_s$  e  $A_u$  representam a área da secção transversal que passa o fluxo da bobina de excitação, da parte sombreada pelo anel de curto-circuito e não sombreada,  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do ar e  $\mu_r$  permeabilidade relativa do material do núcleo.  $x$  é a distância presente entre os núcleos.

Das equações 3 e 4 tem-se a seguinte representação para os fluxos:

$$\begin{bmatrix} \phi_e \\ \phi_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathfrak{R}_e + \mathfrak{R}_u & \mathfrak{R}_u \\ \mathfrak{R}_u & \mathfrak{R}_s + \mathfrak{R}_u \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} N_e & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_e \\ i_s \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Substituindo 8 nas equações 1 e 2, e deixando em termos de  $di/dt$ , tem-se:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_e \\ i_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_e(\mathfrak{R}_e + \mathfrak{R}_u)}{N_e^2} & \frac{-2R_s \mathfrak{R}_u}{N_e} \\ \frac{-R_e \mathfrak{R}_u}{N_e} & -2R_s(\mathfrak{R}_u + \mathfrak{R}_s) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} i_e \\ i_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\mathfrak{R}_e + \mathfrak{R}_u}{N_e^2} \\ \frac{\mathfrak{R}_u}{N_e} \end{bmatrix} V. \quad (9)$$

Utilizando o Tensor de Maxwell (ALBUQUERQUE, 1998), é obtido a força eletromagnética,  $F_{mag}$ , entre os núcleos do contator, ou seja, a força de atração que atua nos entreferros, equação 10.

$$F_{mag} = \frac{\phi_e^2 \sin^2(\omega t + \theta)}{2\mu A} \quad (10)$$

Utilizando identidade trigonométrica, considerando que fluxo gerado pela coluna central  $\phi_e$  se divide para as duas colunas externas, sendo metade para cada e

valores de pico. Em termos do fluxo  $\phi_u$  e  $\phi_s$ , ambos possuem defasagem em relação ao  $\phi_e$ , e aplicando em 10, temos:

$$F_{mag} = \frac{\phi_u^2}{4\mu_0 A_u} + \frac{\phi_s^2}{4\mu_0 A_s} - \frac{\phi_u^2 \cos(2\omega t + \varphi)}{4\mu_0 A_u} - \frac{\phi_s^2 \cos(2\omega t - \theta)}{4\mu_0 A_s}. \quad (11)$$

Em conjunto com a força eletromagnética, possui a força peso 13 e a força elástica das molas 14. O movimento da parte móvel é dada pela velocidade que os núcleos se atracam, a qual pode ser representada por 13.

$$\frac{dVel}{dt} = \frac{F_{mag} + F_{peso} - F_{el}}{m} \quad (12)$$

Onde  $m$  é a massa que exerce força sobre as molas, referente a parte móvel do núcleo e a armadura acoplada a ele.

As expressões para força peso e elástica são exibidas nas equações 13 e 14 respectivamente.

$$F_{peso} = mg, \quad (13)$$

em que  $g$  representa a aceleração da gravidade.

Sendo que as molas presentes, mola contato e de retorno não possuem linearidade em suas constantes elásticas,  $k$ . Tendo duas condições para a força elástica, primeiro somente a mola de retorno exerce força até a parte móvel estiver na posição em que a mola dos contatos se encontra, então as duas vão exercer uma força repulsiva a força eletromagnética. Essas condições são exibidas na equação 14.

$$F_{el} = \begin{cases} k_m(x_m - x) & \text{se } x_c \leq x \leq x_{max} \\ k_m(x_m - x) + k_c(x_c - x), & \text{se } 0 \leq x \leq x_c, \end{cases} \quad (14)$$

em que  $k_m$  e  $x_m$  representam a constante elástica da mola de retorno e a distância entre os núcleos, e  $k_c$  e  $x_c$  das molas de contatos e a distância entre os contatos móveis e fixos.

A solução desse modelo depende de equações diferenciais parciais e não lineares, ou seja, usar métodos numéricos complexos.

A modelagem apresentada, foi elaborada com base em (ALBUQUERQUE, 1998) e (JEONG *et al.*, 2009).

### 3 SENSORES EM FIBRA ÓPTICA

Muitos desconhecem a existência de sensores em fibra óptica, apesar de sua importância na inovação dos sistemas de monitoramento em diversas áreas tecnológicas. As redes de Bragg em fibra óptica podem ser descritas como tecnologias capacitantes, ou do inglês *enabling technologies*, pois permitem um rápido desenvolvimento, e eficiente de novos sensores cujos benefícios superam as limitações de sensores elétricos tradicionais.

Até os anos de 1970, a principal aplicação das fibras ópticas era em instrumentos endoscópicos que são usados frequentemente em procedimentos clínicos para observar o interior do corpo humano com um meio de transmitir luz e imagem (MENDEZ, 2007).

Em 1988, um importante avanço na pesquisa de fotossensibilidade em fibras foi relatado, demonstrando a fabricação de redes de Bragg no núcleo de fibra óptica pela exposição lateral, externa à fibra, de um padrão de interferência na região espectral do ultravioleta (MELTZ *et al.*, 1989).

A fabricação desses sensores necessita de técnicas avançadas, as quais dependem de um tratamento especial no núcleo da fibra óptica, podendo ser por exposições a gases, feixes de luz e lasers. Uma técnica de gravação de redes com máscara de fase, a mais difundida atualmente, apresentada por (HILL *et al.*, 1993), foi adaptada na fabricação de rede de Bragg, essa técnica é a mais simples e reprodutível das técnicas de fabricação de redes de Bragg. Com o melhoramento das fibras ópticas e das técnicas de gravação das rede de Bragg, sua utilização no desenvolvimento de dispositivos para aplicações em telecomunicação e sensoriamento tem se tornado mais acessível.

As características que fazem esses sensores serem excelentes alternativas a sensores elétricos são a baixa perda relacionada por comprimento, imunidade à interferências eletromagnéticas, pequeno e leve, operação segura em ambientes onde existem ambientes perigosos, alta sensibilidade, multiplexação de sensores na mesma fibra e confiabilidade a longo prazo. Tais sensores, vem sendo empregados em aplicações como: sensores acústicos, sensores de temperatura, sensores de deformação e entre outros, (GIALLORENZI *et al.*, 1982).

### 3.1 SENSORES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA

Os sensores FBG, podem ser classificados na categoria de sensores por modulação de frequência. Esses sensores, são sensíveis a mudanças de algumas grandezas físicas como temperatura, deslocamento e até mesmo a presença de elementos químicos junto as fibras ópticas. Alterações nessas grandezas físicas modificam a frequência da luz refletida pelas redes de Bragg. Essa variação, pode então ser detectada e traduzida pelo interrogador óptico. Os interrogadores ópticos são os equipamentos responsáveis por detectar e traduzir as medições feitas pelos sensores ópticos. Os sensores de FBG usam endereçamento por comprimento de onda, *wavelength division multiplexing* (WDM), a informação referente ao estado do sensor é determinada por um comprimento específico do espectro de radiação da fonte, sendo assim não precisa de componentes eletrônicos de processamento rápido e baixas perdas ópticas.

A estrutura dos sensores de FBG é feita diretamente ao núcleo da fibra óptica, as redes de Bragg podem ser descritas como uma modulação do índice de refração no núcleo de uma fibra óptica, e apresentam um período espacial,  $\Lambda$ . A rede de Bragg em fibra óptica em sua forma mais simples é constituída pela interferência dos feixes e é responsável pela modulação periódica do índice de refração no núcleo de uma fibra óptica, com índice efetivo denominado  $\eta_{ef}$ . Figura 3a ilustra uma FBG em fibra óptica.

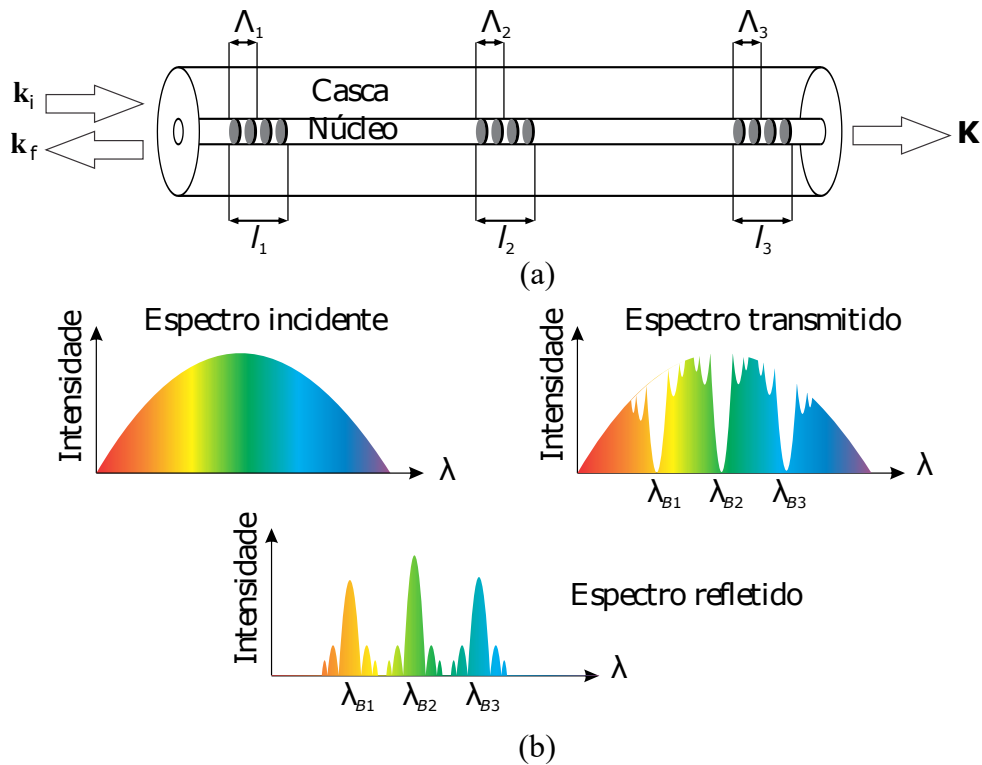
Uma rede de Bragg em fibra óptica, Figura 3, constitui em uma modulação local e periódica do índice de refração do núcleo da fibra óptica. A rede de Bragg, opera como um filtro passa faixa, que seleciona um comprimento de onda de onde uma banda larga de comprimentos de onda tenham sido acoplados a fibra óptica (CUNHA, 2007). Este comprimento de onda de Bragg  $\lambda_B$ , está relacionado com a periodicidade da modulação do índice de refração  $\Lambda$ , e com o índice de refração efetivo do núcleo  $\eta_{ef}$ .

Devido aos efeitos fotoelástico e termo óptico, tanto esforços mecânicos longitudinais quanto variações na temperatura provocam o deslocamento do comprimento de onda de Bragg (PEREIRA, 2003). No caso de deformações, se ocorrer contração, a variação do comprimento de onda de Bragg será um menor que comprimento original, e tração faz o comprimento de onda ser maior.

A luz guiada ao longo da fibra óptica é refletida em cada plano da rede de Bragg. Para as frequências que não satisfazem a condição de Bragg, a luz refletida



por cada plano subsequente torna-se progressivamente fora de fase e eventualmente se cancela (PATERNO, 2006). Quando a condição de Bragg é satisfeita, a parcela da luz refletida em cada plano da rede contribui construtivamente na direção contra propagante, formando uma banda de reflexão com comprimento de onda central definidos pelos parâmetros da rede.



**Figura 3: Representação de uma FBG: (a) fibra óptica contendo três FBGs e (b) espectros associados.**  
**Fonte: (SOUSA, 2011)**

O princípio do funcionamento dos sensores FBG baseia-se na lei de Snell-Descartes (HALLIDAY, 2009). Sendo assim, os feixes de luz incidentes ao núcleo que obedecem as condições de Bragg sofrem reflexão construtivas, ou seja, os que se enquadram no comprimento de onda de Bragg, e os feixes de luz que não obedecem acabam por se cancelar. Para satisfazer a condição do comprimento de onda de Bragg, o raio incidente deve atender a equação 15. Assim, a rede de Bragg funciona como um filtro seletivo, que permite a passagem de radiação em todos os comprimentos de onda, exceto, o comprimento de onda de Bragg. A Figura 3b ilustra o que acontece com um feixe de luz que incide na fibra.

$$\lambda_B = 2 \cdot \eta_{ef} \cdot \Lambda \quad (15)$$

A leitura dos sensores FBG se dá pela variação do comprimento de onda,

que é em função direta da variação do sinal obtido pelo interrogador óptico, o qual está associado a condição de ressonância de Bragg. A leitura do interrogador é conhecida como interrogação do sensor óptico acoplado ao interrogador óptico.

### 3.2 SENSIBILIDADE CRUZADA DE DEFORMAÇÃO E TEMPERATURA NAS REDES DE BRAGG

A ressonância das redes de Bragg, que é o comprimento de onda central da luz refletida de um período da rede de Bragg, depende do índice efetivo de refração do núcleo e da periodicidade da rede. O índice efetivo de refração, bem como o espaçamento periódico entre os períodos, serão afetados por variações de deformação e temperatura. Usando a equação 16, a variação no comprimento de onda do centro da rede de Bragg devido a mudanças de deformação e temperatura é dada por

$$\Delta\lambda_B = 2\left(\Lambda\frac{\partial n}{\partial l} + n\frac{\partial\Lambda}{\partial l}\right)\Delta l + 2\left(\Lambda\frac{\partial n}{\partial T} + n\frac{\partial\Lambda}{\partial T}\right)\Delta T. \quad (16)$$

O primeiro termo da equação 16 representa o efeito de deformação em uma fibra óptica. Isso corresponde a uma mudança no espaçamento do período e à mudança induzida por deformação óptica no índice de refração. O termo de efeito de deformação acima pode ser expresso como

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - p_e)\epsilon_Z, \quad (17)$$

onde  $p_e$  é uma constante de deformação-óptica eficaz definida como

$$p_e = \frac{n^2}{2}[p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})], \quad (18)$$

onde  $p_{11}$  e  $p_{12}$  são componentes do tensor de deformação óptica,  $n$  é o índice do núcleo e  $\nu$  é a relação de Poisson. Para uma fibra óptica típica  $p_{11}=0,113$ ,  $p_{12}=0,252$ ,  $n=1,482$  e  $\nu=0,16$ . Usando esses parâmetros e as equações acima, a sensibilidade esperada em 1550 nm é uma mudança de 1,2 pm como resultado da aplicação de  $1 \mu\epsilon$  de deformação na rede de Bragg. Esses valores são resultados experimentais de um deslocamento de comprimento de onda do centro de Bragg com deformação aplicada a uma rede de Bragg de 1548,2 nm (OTHONOS, 1997).

O segundo termo na equação 16 representa o efeito da temperatura em uma fibra óptica. Uma variação no comprimento de onda de Bragg devido à expansão

térmica altera o espaçamento da grade e altera o índice de refração. Este desvio de comprimento de onda fracionário para uma mudança de temperatura  $\Delta T$  pode ser escrito como

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(\alpha + \zeta)\Delta T, \quad (19)$$

onde um  $\alpha=(1/\Lambda)(\partial\Lambda/\partial T)$  é o coeficiente de expansão térmica para a fibra (aproximadamente  $0,55 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ). A quantidade  $\zeta=(1/n)(\partial n/\partial T)$  representa a coeficiente termo-óptico e é aproximadamente igual a  $8,6 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  para a fibra de núcleo de sílica dopada com germânio. Claramente, a mudança de índice é de longe o efeito dominante. Da equação 19, a sensibilidade esperada a uma rede de Bragg de 1550 nm é de aproximadamente  $13,7 \text{ pm}/^\circ\text{C}$  (OTHONOS, 1997).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho tem por etapas de obtenção de resultados por meio de simulação computacional e experimento prático de um contator CA, com base em um contator comercial. As medidas e parâmetros foram obtidas através de medições com equipamentos como paquímetro e multímetro digital, valores que não puderam ser obtidos com os instrumentos disponíveis no laboratório foi feita analogia com valores apresentados em artigos científicos.

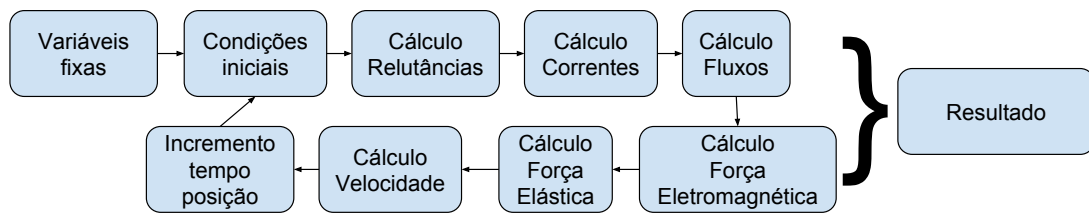
Os parâmetros do contator CA para simulação e experimento prático tem por tensão nominal 220 V, resistência da bobina de excitação 280  $\Omega$ , resistência do anel de curto-circuito 1,92  $\Omega$ , permeabilidade magnética do núcleo considerada constante para ferro-silício em um ponto de operação de 5500 H/m, obtido em artigos científicos de transformadores que utilizam do mesmo material, entreferro de 7 mm, espaçamento da coluna central quando contatos fechados 0,1 mm, e demais medidas de dimensionamento foram feitas com paquímetro digital.

### 4.1 SIMULAÇÃO

A simulação foi realizada utilizando algoritmo no *software* computacional *MATLAB*®. O algoritmo é feito seguindo a modelagem apresentada no Capítulo 2, porém, como não é possível medir as defasagens dos fluxos apresentados na equação 11, pois com os equipamentos disponíveis no laboratório não é possível obter os ângulos, o cálculo da força eletromagnética é feito através da equação 20, que apresenta somente a parcela constante da força magnética então (JEONG *et al.*, 2009).

$$F_{mag} = \frac{\phi_e^2}{2\mu_0(A_e + A_u)} + \frac{\phi_s^2}{2\mu_0(A_s + A_u)} + \frac{\phi_e\phi_s}{\mu_0 A_u} \quad (20)$$

A Figura 4 apresenta um fluxograma da rotina de cálculo efetuado pelo algoritmo e o Anexo A apresenta o algoritmo desenvolvido.



**Figura 4: Fluxograma para simulação.**  
**Fonte: Autoria própria.**

## 4.2 ARRANJO EXPERIMENTAL

Os testes foram realizados com um contator comercial de corrente alternada. Para a medição da deformação, é utilizado um cabo de fibra óptica com um sensor FBG gravado no seu final, com comprimento de onda igual a 1542 nm, fixado com cola de cianoacrilato no núcleo fixo do contator, como mostra a Figura 5. A aquisição do comprimento de onda de pico da FBG é feita com um interrogador óptico, e optou-se por uma taxa de amostragem de 1 kHz. Em paralelo com a medição da deformação, é feita a medição elétrica de tensão e corrente nos terminais do contator com auxílio de um osciloscópio digital, utilizando ponteiras de corrente e diferença de potencial. A configuração experimental é apresentada na Figura 6.

Os testes experimentais consistem em ligar e desligar a bobina de excitação, primeiro com tensão nominal, 220 V, e em seguida com tensão reduzida entre 137 V e 139 V respectivamente. O teste de tensão reduzida foi realizado para identificar o limite mínimo de tensão para o fechamento dos contatos, e três situações diferentes podem ser analisadas. O primeiro é o transiente durante a ativação da bobina de excitação. Logo após, é apresentado um regime de deformação oscilatória causado pela força oscilatória. A última situação, é o transitório quando a bobina de excitação é desligada, a forma de corrente para esta situação não é mostrado, pois a corrente vai para zero instantaneamente. Devido à sensibilidade do FBG, à deformação e temperatura, somente a deformação dinâmica será analisada neste trabalho. Esta análise, pode ser feita uma vez que a variação no pico de comprimento de onda de Bragg, devido à temperatura ser lenta em comparação com a deformação dinâmica. Em conjunto com as formas de onda de cada situação é apresentada as formas de corrente e tensão.

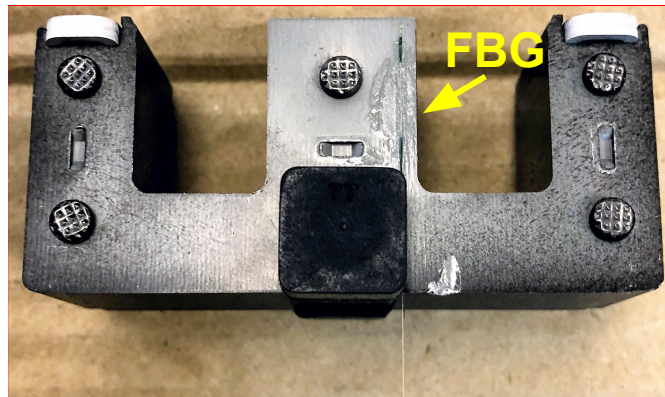


Figura 5: Sensor FBG fixado ao núcleo fixo do contator.

Fonte: Autoria própria.

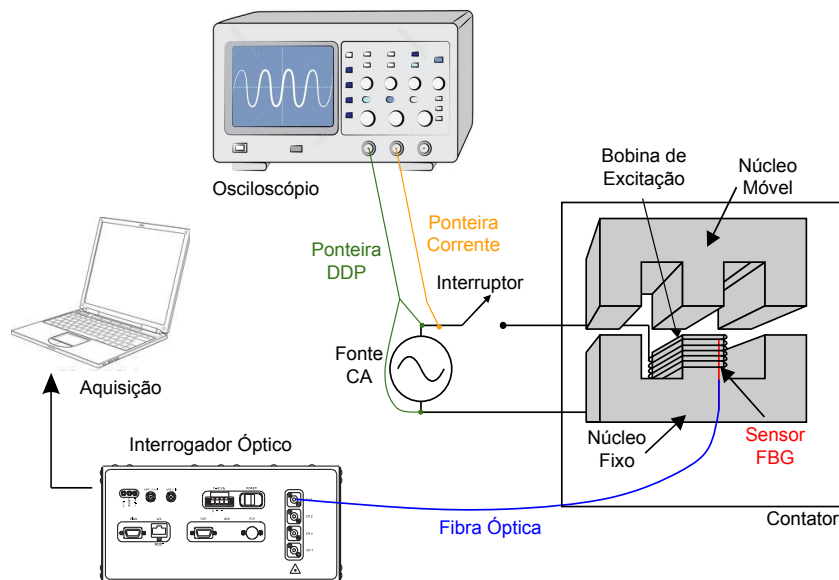


Figura 6: Arranjo experimental.

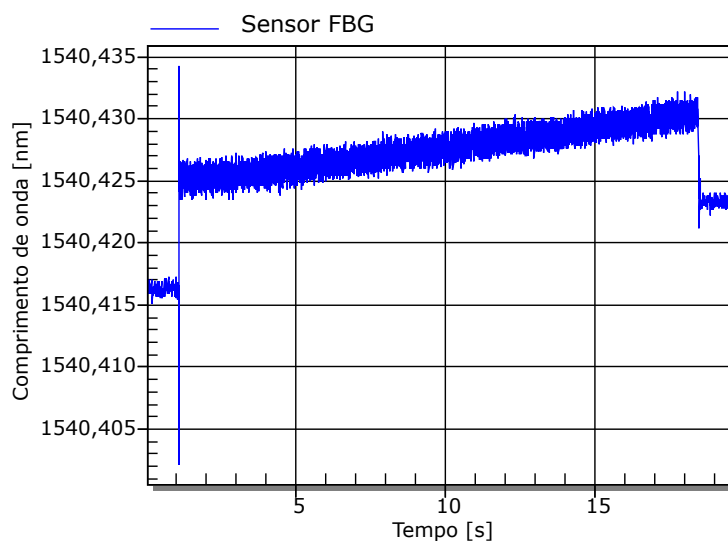
Fonte: Autoria própria.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados são obtidos ligando e desligando o interruptor da fonte da bobina de excitação. A Figura 7 apresenta a leitura da medição do comprimento de onda do sensor FBG e também é possível identificar a situação de alimentação da bobina. Durante os 20 segundos de medição, uma variação lenta no comprimento de onda do sensor FBG pode ser observada, a variação lenta é devido ao aumento de temperatura dentro do contator causado pela circulação de corrente elétrica. A corrente elétrica é responsável pelas perdas joule da bobina de excitação, essas perdas e as perdas magnéticas do núcleo do contator levam à um aumento de temperatura do contator.

A variação do comprimento de onda FBG devido à deformação dinâmica é mais rápida do que a variação devido à temperatura, como pode ser observado quando o interruptor liga ou desliga. Devido ao efeito da temperatura, apenas a variação do comprimento de onda dinâmico é analisado neste trabalho. Assim, apenas pequenos intervalos de tempo são mostrados nas Figuras seguintes e a variação do comprimento de onda nessas situações é devida apenas à deformação. Junto com essas análises de deformação é mostrado o comportamento da tensão e corrente nos terminais da bobina de excitação, sendo que a corrente é a única que apresenta variação notáveis.

A bobina do contator é energizada um segundos após o início da aquisição, em detalhe da deformação é apresentado na Figura 8. O sensor FBG tem uma sensibilidade de deformação de  $1,2 \text{ pm}/\mu\epsilon$ . No entanto, os resultados deste trabalho são apresentados em variação de comprimento de onda, e um processo de calibração precisa ser feito como um trabalho futuro. Quando a bobina do contator é energizada, o núcleo móvel é puxado para baixo pela força eletromagnética e colide com o núcleo fixo. Esta colisão, faz com que o núcleo fixo sofra compressão devido ao impacto, posição 2 da Figura 8, resultando em uma diminuição no comprimento de onda medido. Após ter sofrido essa compressão, a deformação do núcleo fixo sobre um aumento no comprimento de onda medido, causando uma expansão do material, essa expansão é devido a força exercida pela mola e da força eletromagnética procurando um ponto de equilíbrio da deformação do material do núcleo. Esse comportamento



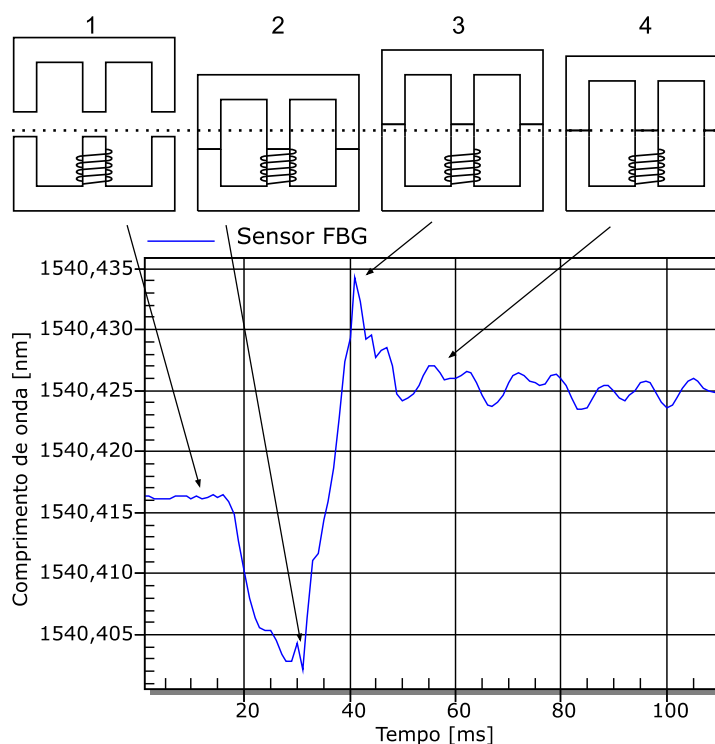
**Figura 7: Deformação do núcleo fixo do contator. Do período de 1s até 18,5s o contator está em funcionamento. Fonte: Autoria Própria**

está presente no sobressalto observado na posição 3 da Figura 8. Após o transitório, a deformação do núcleo móvel é causada apenas pela força eletromagnética, que possui uma componente constante e uma componente oscilatória de acordo com a equação 11, onde a componente constante faz com que a deformação do núcleo tenha um comprimento de onda em média de 1540,425 nm, já a componente oscilatória não é possível dizer quanto influência na deformação do núcleo, mas é notável durante o acionamento e desligar do contator mostrado pela Figura 7. Em um contator ideal, a parte da força oscilatória deve ser zero, mas isso não ocorre no contator usado neste documento. Isto pode ser identificado pela deformação do núcleo fixo quando o sistema entra no estado estacionário. A tensão da deformação do núcleo fixo é ilustrada na Figura 8 para cada situação.

A Figura 9 demonstra o transitório da corrente durante o acionamento mostrado na Figura 8. Nota-se que o ponto da curva da tensão em que o contator foi acionado representa a intensidade máxima que a corrente pode chegar, sendo para esse caso, aproximadamente  $-90^\circ$  elétricos na tensão respondeu a uma amplitude máxima da corrente de 1,5 A. Em aproximadamente 15 ms os núcleos se encontram em contato, esse instante para a curva mostrada na Figura 8 corresponde a posição 2. As próximas pequenas variações na corrente, correspondem até a estabilização da deformação que permanecem até entrar em estado estacionário a partir de 55 ms.

Durante o estado estacionário, a deformação experimentada pelo núcleo fixo é devida à força eletromagnética com uma componente constante e uma componente senoidal. Devido à sensibilidade simultânea do FBG à deformação e temperatura, não é possível determinar a deformação causada apenas pela porção constante





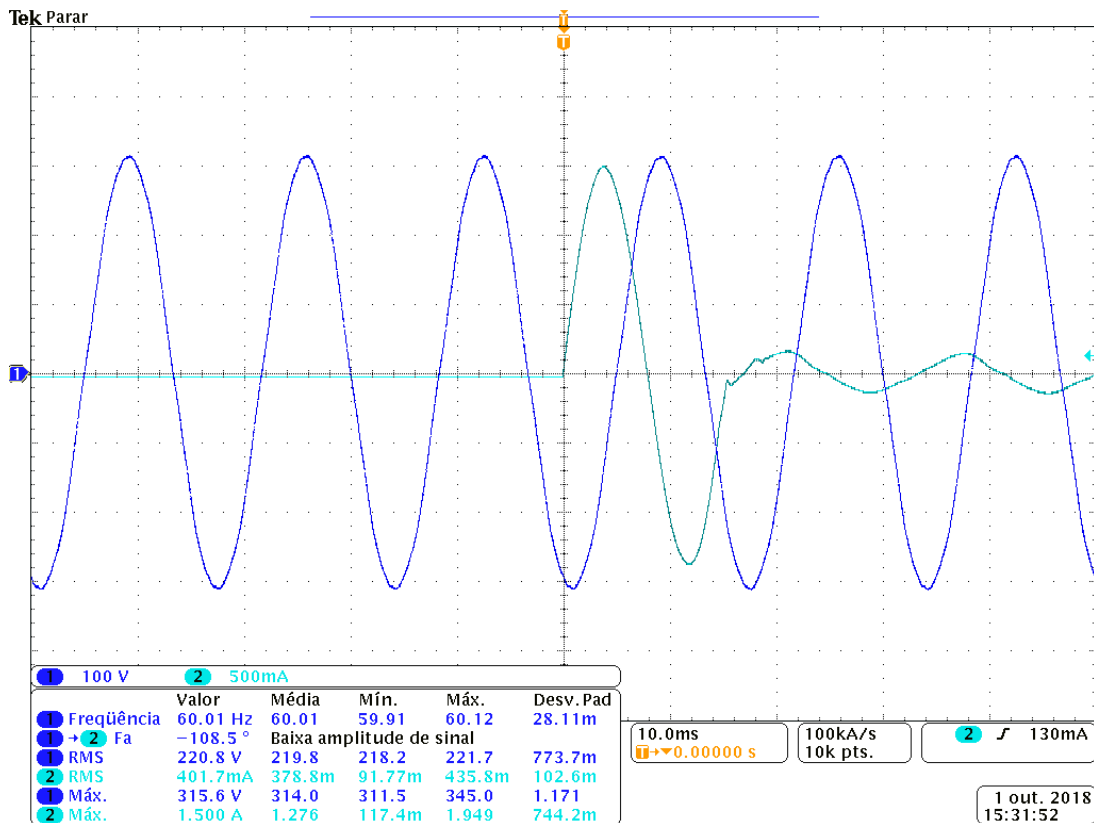
**Figura 8: Deformação do núcleo fixo do contator durante o transitório quando a bobina de excitação está ligada. A posição do núcleo móvel é ilustrada acima da curva de deformação.**

**Fonte: Autoria Própria**

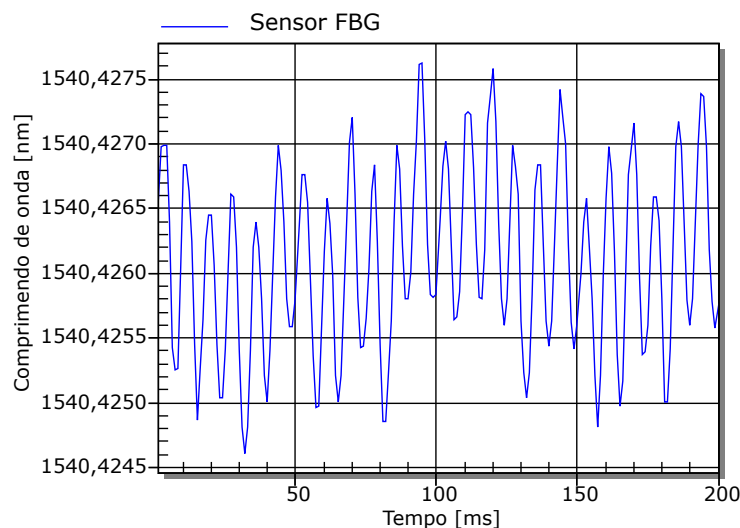
da força eletromagnética. A variação de temperatura leva a uma variação no comprimento de onda de Bragg e leva a uma expansão térmica do núcleo. Esses dois efeitos ocorrem com uma frequência mais lenta em comparação com a deformação dinâmica causada pela porção senoidal da força eletromagnética. Assim, com a instrumentação usada neste trabalho, somente a deformação devido a componente constante da força eletromagnética no estado estacionário pode ser analisada. Esta deformação é mostrada na Figura 10 e o componente de frequência fundamental é de 120 Hz, o dobro da frequência da bobina de excitação, como esperado de acordo com a equação 11.

Contatores comerciais são projetados de modo que a força eletromagnética senoidal seja a menor possível, alterando a forma do núcleo, modificando a bobina, material do anel de curto-circuito e entre outros. Devido a isso, a amplitude da deformação é pequena e um sensor com boa sensibilidade, boa relação sinal-ruído e imunidade à interferência eletromagnética é necessário. Essas características podem ser encontradas em um sensor de deformação FBG.

A transformada de Fourier da deformação dinâmica em estado estacionário é mostrada na Figura 11, onde é possível identificar a frequência fundamental de 120 Hz.

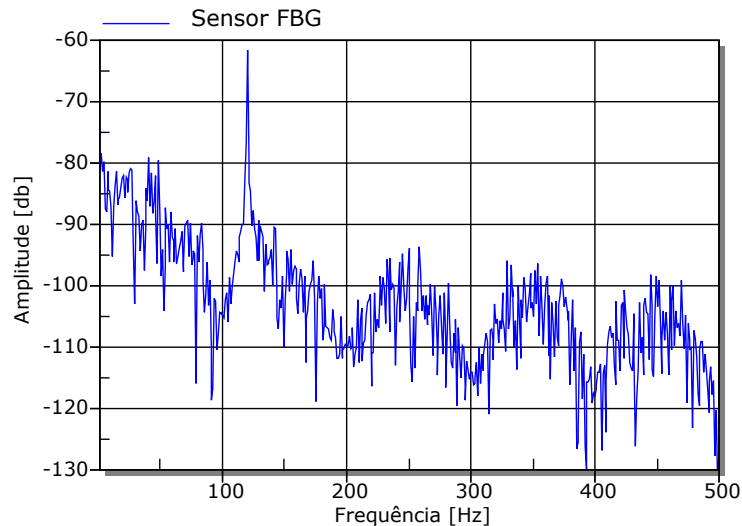


**Figura 9: Transitório da corrente na bobina de excitação durante o acionamento do contator. Canal 1 (azul escuro) mostra a curva da tensão de entrada em divisões de 100 V. Canal 2 (azul claro) mostra a curva da corrente elétrica da bobina de excitação em divisões de 500 mA. A escala de tempo (eixo horizontal) está em 10 ms por divisão.**  
**Fonte: Autoria Própria**



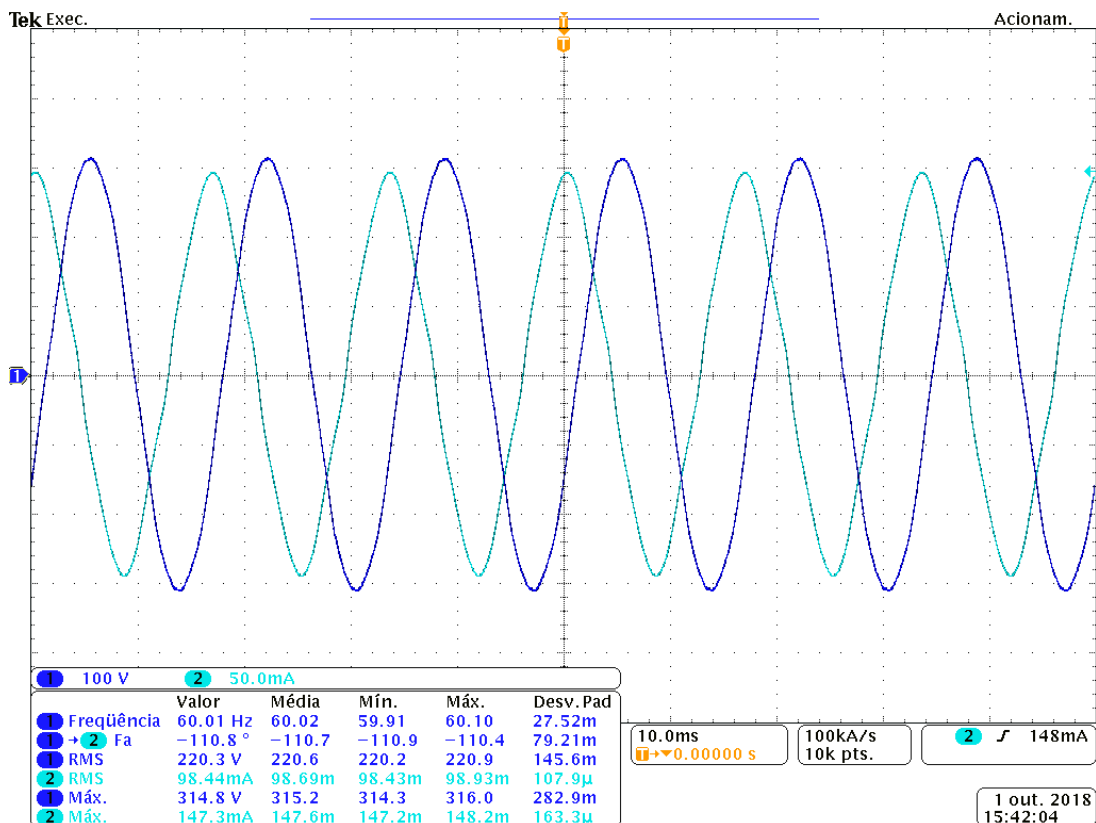
**Figura 10: Deformação do núcleo fixo durante estado estacionário do contator.**  
**Fonte: Autoria Própria**

A Figura 12 ilustra o sinal de corrente e tensão na bobina de excitação durante o estado estacionário. Observa-se que uma defasagem média entre elas é de  $-110^\circ$  elétricos. Essa defasagem teoricamente deveria ser  $-90^\circ$  elétricos, porém esse acréscimo é devido ao anel de curto-circuito impactar no fluxo elétrico que atua



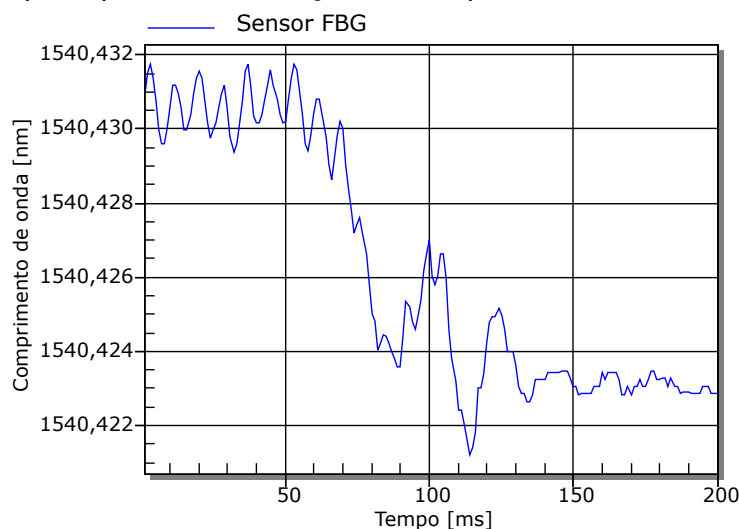
**Figura 11: Espectro de frequência de deformação dinâmica do núcleo fixo do contator.**  
**Fonte: Autoria Própria**

no núcleo do contator, o que gera um atraso no fluxo total da bobina de excitação. Ainda podemos ver na Figura 12 que para o contator estar atuando a corrente que flui pela bobina de excitação é baixa, em média 147,6 mA.



**Figura 12: Corrente e tensão na bobina de excitação durante o estado estacionário do contator. Canal 1 (azul escuro) mostra a curva da tensão de entrada em divisões de 100 V. Canal 2 (azul claro) mostra a curva da corrente elétrica da bobina de excitação em divisões de 500 mA. A escala de tempo (eixo horizontal) está em 10 ms por divisão.**  
**Fonte: Autoria Própria**

A deformação do núcleo do contator quando a chave é desligada é apresentada na Figura 13. A força eletromagnética é zero e o transitório na Figura 13 é devido à energia armazenada nas molas. Em 135 ms a tensão na bobina de excitação é zero e a pequena variação no comprimento de onda do Bragg é devida a ruídos que o sensor detecta, principalmente variação de temperatura interna do contator.



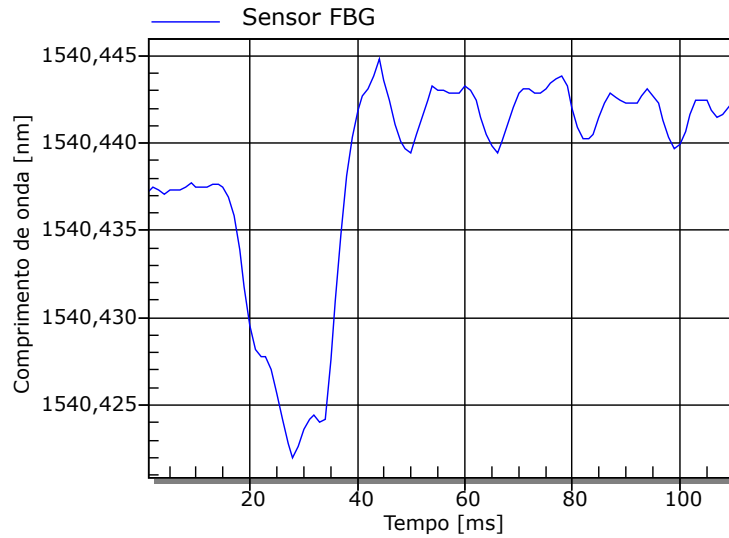
**Figura 13: Deformação do núcleo fixo do contator quando a bobina de excitação é desligada.**

**Fonte: Autoria Própria**

Um segundo teste ligando o contator foi efetuado, um ponto na curva de tensão em aproximadamente  $+90^\circ$  elétricos, mostrado na Figura 15. Na Figura 14 o transitório da deformação segue as mesmas posições mostradas na Figura 8, como neste teste o ponto na curva de tensão foi mais próximo de  $90^\circ$  elétricos, indiferente se for positivo ou negativo, teve um pico máximo de corrente de 1,521 A e apresentou uma variação menor do sobressalto.

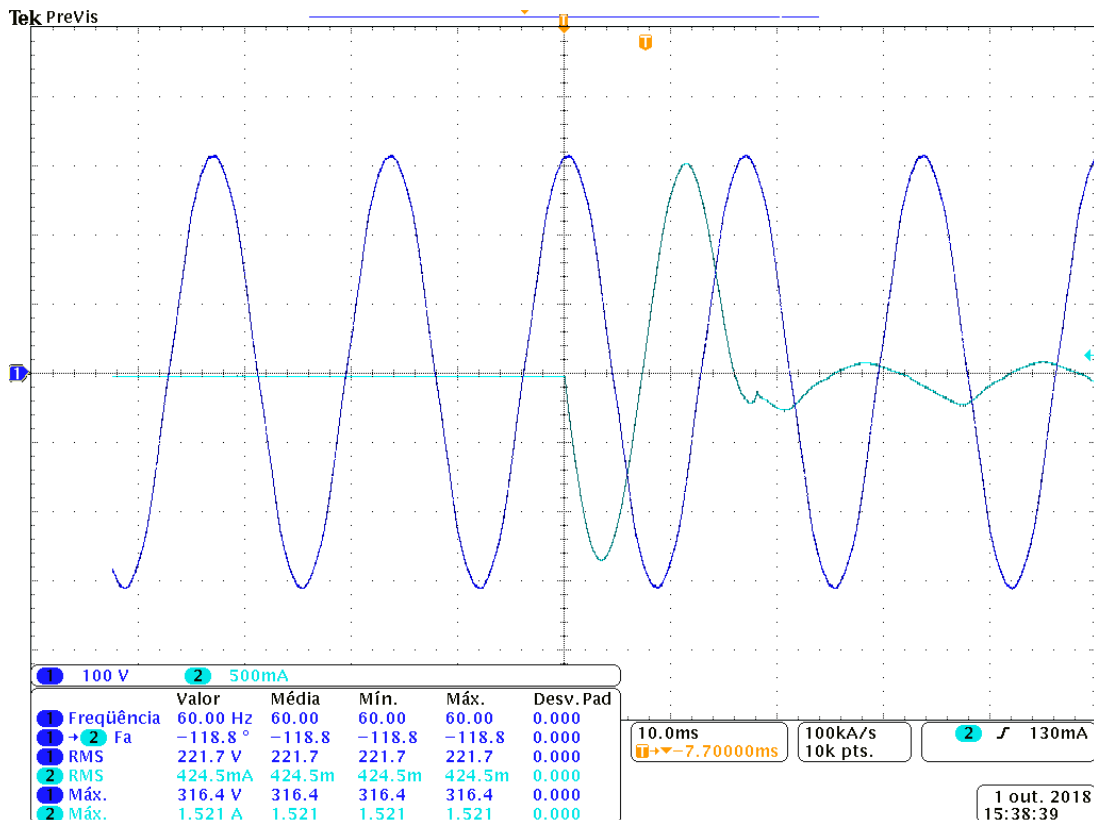
As Figuras 16 e 17 ilustra um teste feitos durante o acionamento do contator em aproximadamente  $0^\circ$  elétricos na curva de tensão. A Figura 16 mostra que quanto mais próximo de  $0^\circ$  elétricos maior será a corrente pela bobina de excitação durante o transitório, atingindo 1,9000 A aproximadamente e ilustrado na Figura 17, e não demonstrou ter o sobressalto na etapa de expansão do núcleo fixo.

Feitas essas análises pelo ponto de vista que o sobressalto do núcleo do contator é um dos principais aspectos a ser evitado para o bom funcionamento deste equipamento, o melhor momento para acionar a bobina de excitação seria o ponto da curva de tensão em  $0^\circ$  elétricos, mesmo sendo neste ponto a maior corrente necessário para que os núcleos se encontrem. Tendo um mínimo ou nenhum sobressalto a vida útil do equipamento é prolongada. A duração dos períodos transitórios mostraram-se iguais para os testes realizados, indiferente do ponto da curva de tensão



**Figura 14: Transitório da deformação dinâmica do núcleo fixo do contator durante o acionamento.**

Fonte: Autoria Própria

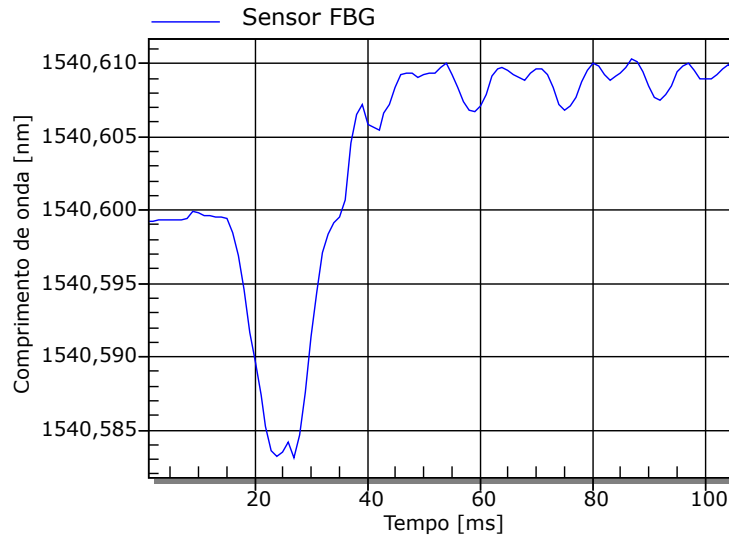


**Figura 15: Transitório da corrente na bobina de excitação durante o acionamento do contator. Canal 1 (azul escuro) mostra a curva da tensão de entrada em divisões de 100 V. Canal 2 (azul claro) mostra a curva da corrente elétrica da bobina de excitação em divisões de 500 mA. A escala de tempo (eixo horizontal) esta em 10 ms por divisão.**

Fonte: Autoria Própria

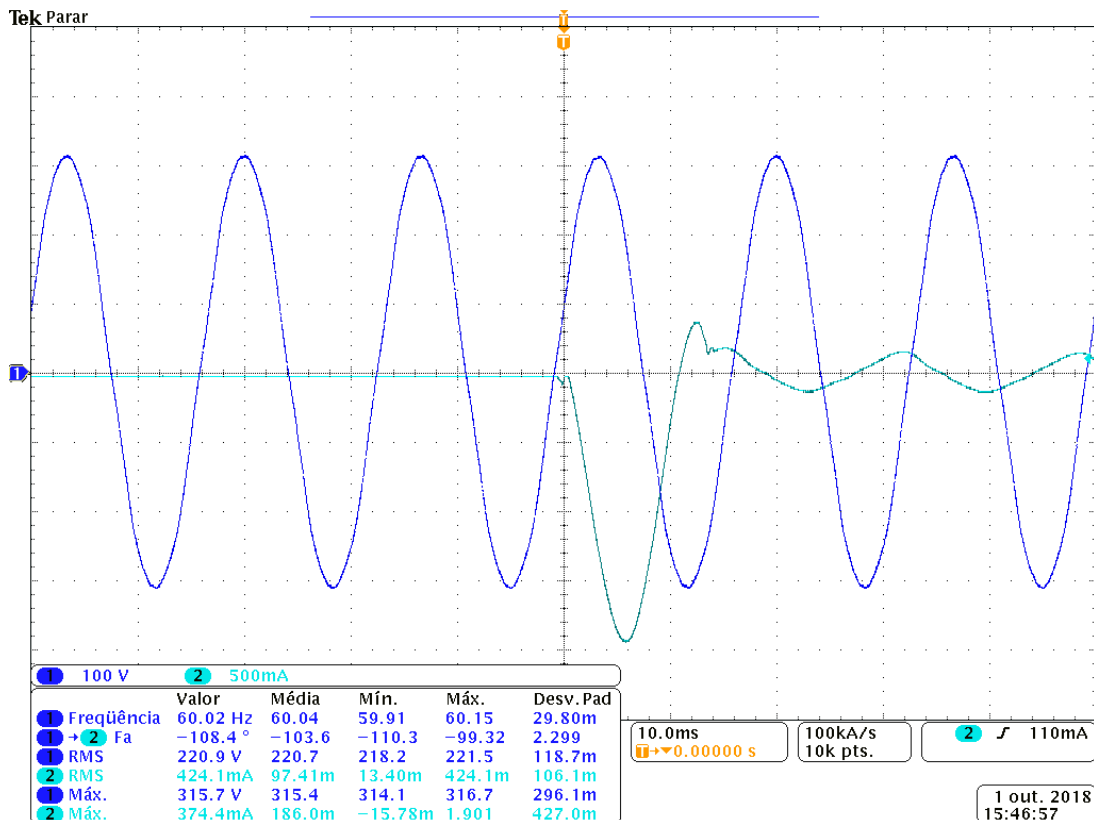
que é dado o acionamento da bobina de excitação.

Testes com novos parâmetros de tensão reduzida foram feitos para saber o limite que o contator pode operar, para isso foram feitas reduções na tensão de



**Figura 16:** Transitório da deformação dinâmica do núcleo fixo do contator durante o acionamento.

Fonte: Autoria Própria

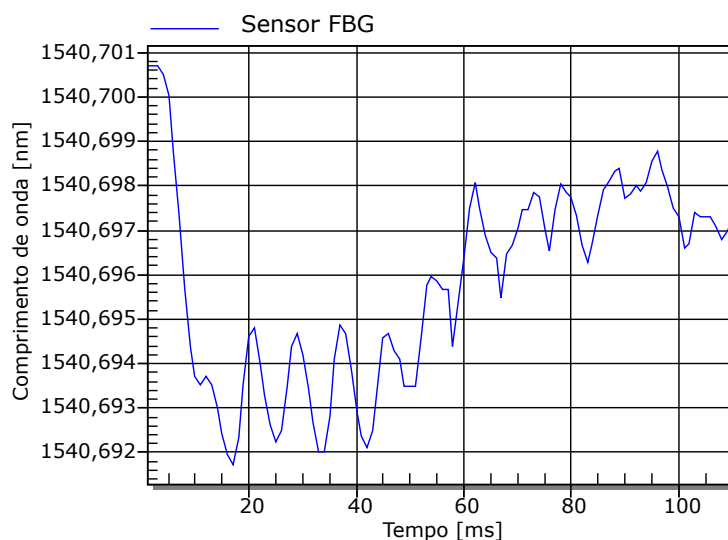


**Figura 17:** Transitório da corrente na bobina de excitação durante o acionamento do contator. Canal 1 (azul escuro) mostra a curva da tensão de entrada em divisões de 100 V. Canal 2 (azul claro) mostra a curva da corrente elétrica da bobina de excitação em divisões de 500 mA. A escala de tempo (eixo horizontal) está em 10 ms por divisão.

Fonte: Autoria Própria

alimentação da bobina de excitação, e foi encontrado um limite em 137,5 V. Com esta amplitude de tensão o contator não pode operar adequadamente durante seu transitório e não fechou seus contatos.

As Figura 18 e 19 ilustram a deformação dinâmica e o comportamento da corrente durante a redução de tensão para 137,5 V, onde paroximadamente 1 A de corrente é drenada da fonte de alimentação. Após 60 ms o contator fica abrindo e fechando seus contatos, isso acontece pois a força eletromagnética máxima não vence a força exercida pelas molas, e não fecha os contatos até que a tensão suba novamente.

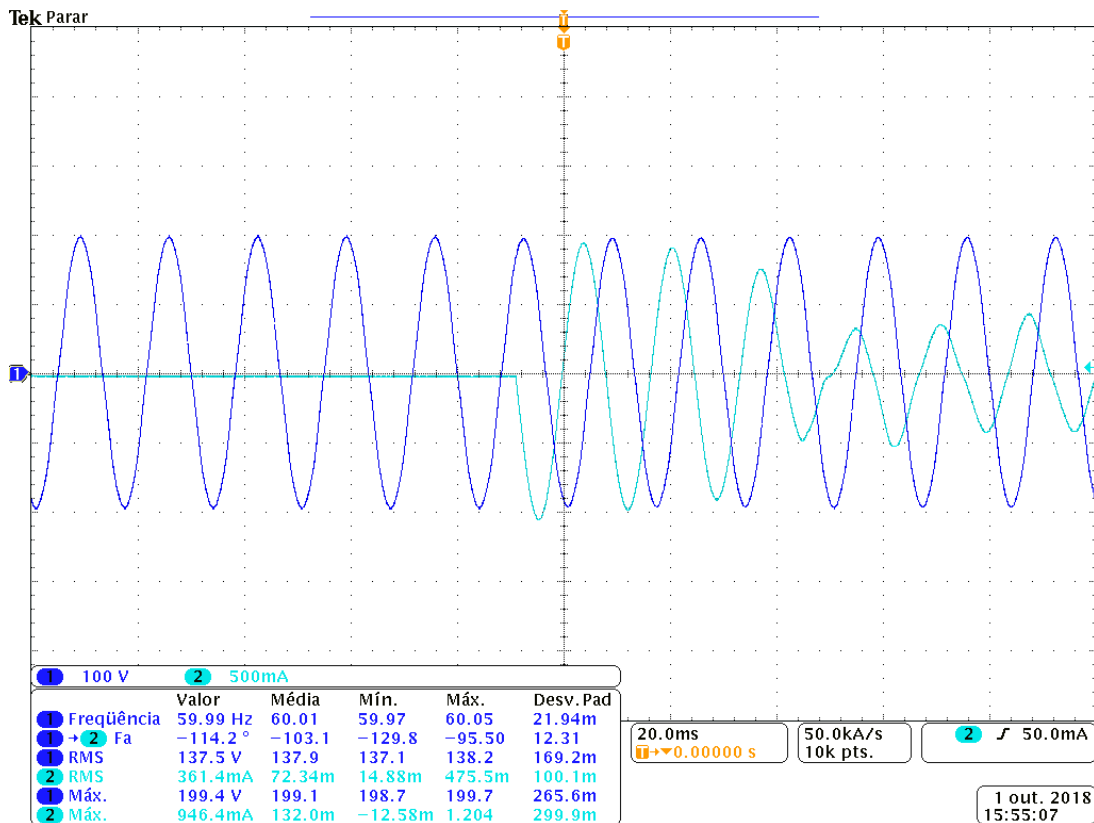


**Figura 18: Transitório da deformação dinâmica do núcleo fixo do contator durante o acionamento.**  
**Fonte: Autoria Própria**

Durante a tentativa de fechar totalmente o contato entre os núcleos, o contator possui grandes vibrações e emite um som o qual pode-se identificar quando não consegue funcionar adequadamente. A resposta em frequência para essas vibrações é ilustrado na Figura 20. Nota-se que além da componente fundamental de 120 Hz, as demais harmônicas mostram altas amplitudes, correspondendo assim ao mal funcionamento do contator.

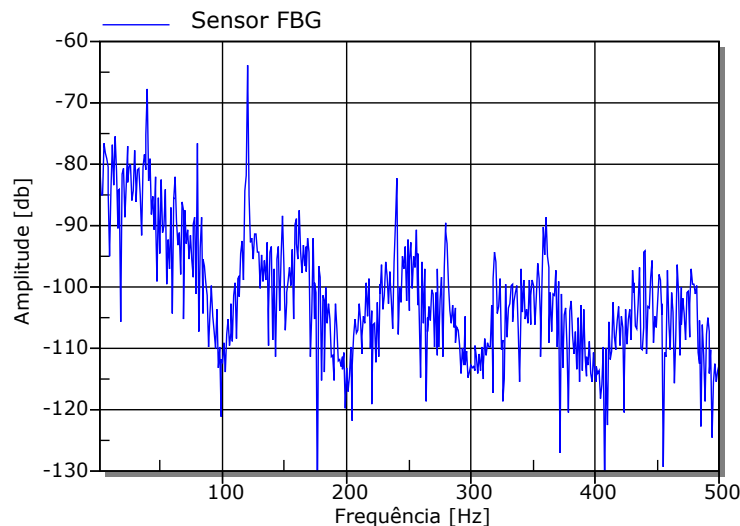
Um segundo teste para a tensão reduzida foi feito, mediu-se uma tensão de 138,4 V, como mostra a Figura 21, essa variação diferente da anterior se da a não linearidade do equipamento utilizado, podendo ser caracterizado pela falta de precisão do mesmo e ainda um acréscimo de tensão residual ao teste anterior, pois não foram feitas alterações no equipamento.

Com a tensão tendo sido elevada pela não linearidade do material e o núcleo estar com temperatura já elevada durante o teste, o a deformação dinâmica do contator mostrou que em 50 ms o contator efetua total contato entre os núcleos. Sendo assim o contator teve funcionamento normal após o transitório, o qual mostrou ser semelhante ao transitório mostrado na Figura 18.



**Figura 19:** Transitório da corrente na bobina de excitação durante o acionamento do contato. Canal 1 (azul escuro) mostra a curva da tensão de entrada em divisões de 100 V. Canal 2 (azul claro) mostra a curva da corrente elétrica da bobina de excitação em divisões de 500 mA. A escala de tempo (eixo horizontal) está em 20 ms por divisão.

Fonte: Autoria Própria

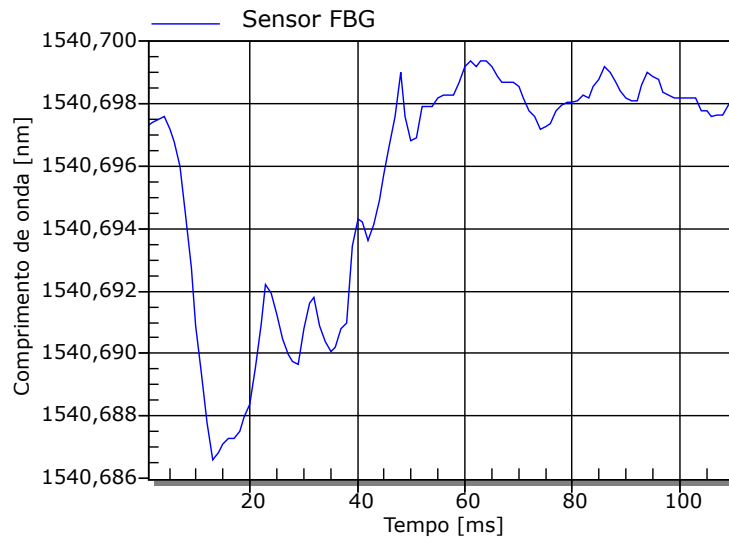


**Figura 20:** Espectro de frequência de deformação dinâmica do núcleo fixo do contato.

Fonte: Autoria Própria

Um ponto a ser analisado na Figura 22 é que o ponto da curva de tensão quando acionado a bobina de excitação foi próximo de  $0^\circ$  elétricos, o qual foi responsável pela máxima corrente de 1,3000 A aproximadamente, o qual pode-se dizer que foi responsável por gerar uma força eletromagnética máxima maior que a força

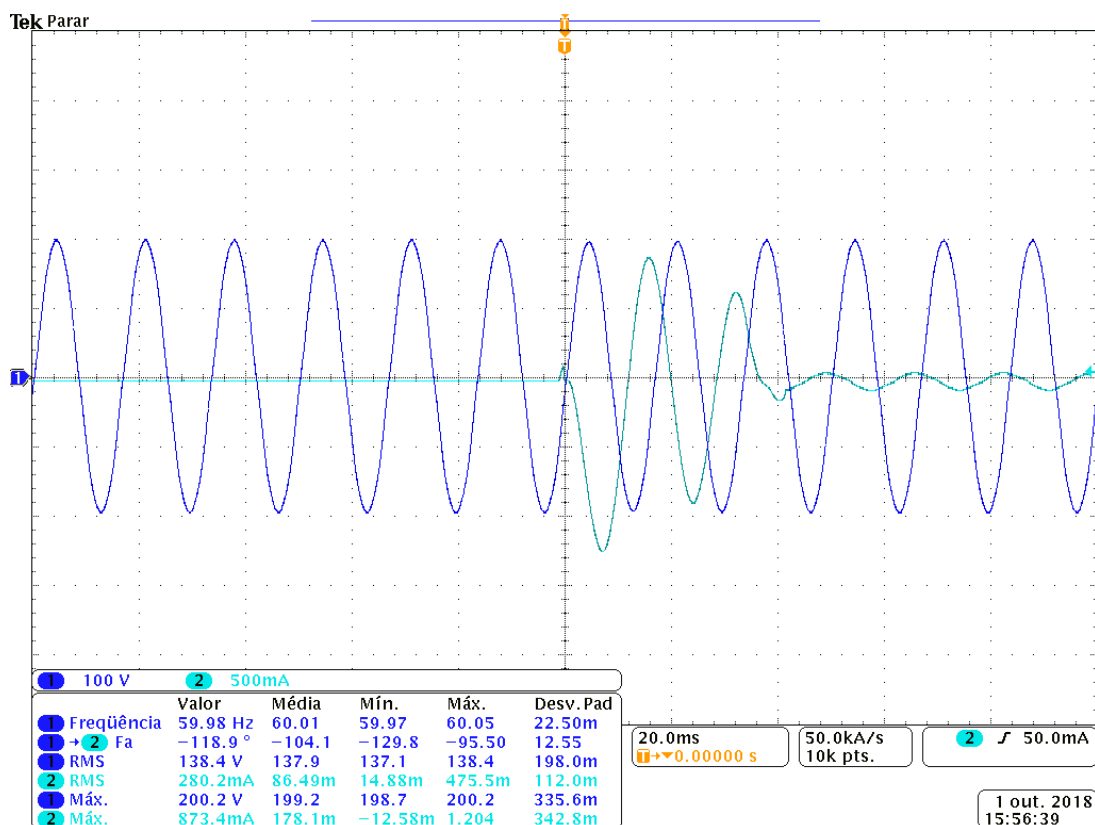




**Figura 21:** Transitório da deformação dinâmica do núcleo fixo do contator durante o acionamento.

Fonte: Autoria Própria

exercida pelas molas, e assim fechando totalmente o contato entre os núcleos, e estabilizando em regime estacionário com cerca de 100 mA.

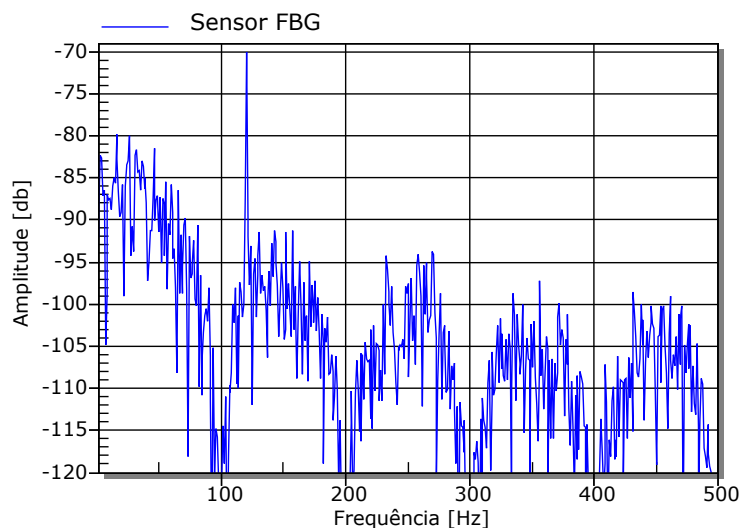


**Figura 22:** Transitório da corrente na bobina de excitação durante o acionamento do contator. Canal 1 (azul escuro) mostra a curva da tensão de entrada em divisões de 100 V. Canal 2 (azul claro) mostra a curva da corrente elétrica da bobina de excitação em divisões de 500 mA. A escala de tempo (eixo horizontal) está em 20 ms por divisão.

Fonte: Autoria Própria

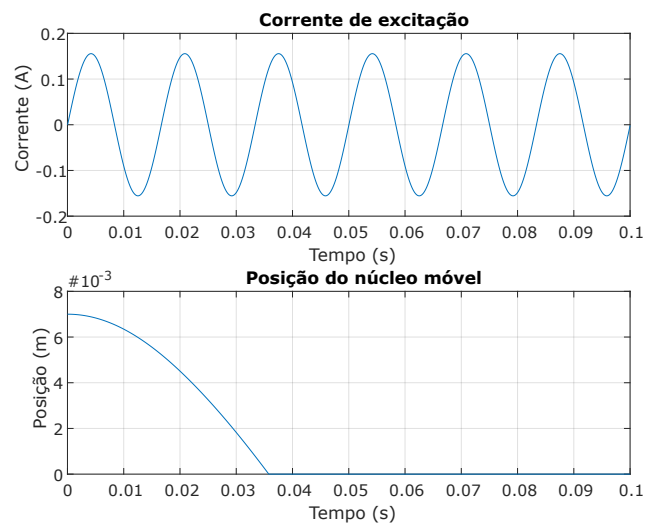
O espectro de frequência da deformação dinâmica do núcleo fixo do con-

tator é ilustrada na Figura 23, como em estado estacionário o contator está operando normalmente, sua resposta em frequência segue o mesmo padrão demonstrada em 11, com amplitude maior na frequência fundamental devido a operação fora das condições nominais.



**Figura 23: Resposta em frequência de deformação dinâmica do núcleo fixo do contator.**  
Fonte: Autoria Própria

E por último a análise da simulação computacional. Esta etapa não foram alcançado resultados esperados para comparação com as medições feitas com osciloscópio, sendo assim, a Figura 24 demonstra que em estado estacionário para condições nominais de funcionamento assemelham-se muito com as encontradas na Figura 8. Porém, não demonstrou transitório mesmo com a movimentação do núcleo móvel até o entreferro ser zero, e o tempo desse movimento também não condiz com o tempo da posição 2 da Figura 7. Por não mostrar o período de transitório da corrente de excitação, outro fator que implicou em não utilizar essa simulação para comparar resultados com os experimentos prático é o fato que os valores medidos para resistência da bobina de excitação, anel de curto-circuito e o número de espiras resultaram em valores diferentes dos obtidos experimentalmente, sendo assim os gráficos mostrados na Figura 24 é resultado de valores testados empiricamente para mostrar que o algoritmo funciona e acredita-se que utilizando métodos numéricos as equações apresentadas no Capítulo 2 a simulação os resultados devam alcançar os padrões e valores mostrados experimentalmente.



**Figura 24:** Gráficos obtidos com a simulação computacional. Primeiro gráfico mostra a corrente de excitação e o segundo o posicionamento do núcleo móvel em relação ao núcleo fixo.

**Fonte:** Autoria Própria

## 6 CONCLUSÃO

Este Trabalho apresenta a medição da deformação dinâmica do núcleo de um contator eletromecânico. Três situações são analisadas, o transitório quando a bobina do contator é ligada, a deformação dinâmica do núcleo do contator no estado estacionário e o transitório quando a bobina do contator é desligada. O uso do FBG para medir a deformação permitiu a identificação das duas componentes da força eletromagnética no núcleo do contator, uma componente constante e outra senoidal. A componente senoidal, observada durante o estado estacionário, tem uma frequência fundamental de 120 Hz, que é o dobro da frequência da rede elétrica. Devido à sensibilidade intrínseca cruzada do FBG, apenas a componente constante da força eletromagnética é possível ser analisada. Os resultados mostram que as características dos sensores FBG comprovaram ser válidas para esta aplicação.

Os resultados apresentados mostram um potencial para sensores FBG para monitoramento e análise de máquinas elétricas. As características desses sensores justificam sua aplicação em máquinas elétricas, principalmente seu tamanho reduzido, sua imunidade eletromagnética, possibilidade de multiplexação de vários sensores na mesma fibra óptica. O grande empecilho em sua utilização em ambientes industriais, é seu alto custo envolvido, onde o maior custo está no interrogador óptico. Sendo assim, para máquinas e equipamentos elétricos como o apresentado neste trabalho, não se torna economicamente viável, uma vez que o custo da instrumentação pode chegar ou ultrapassar o valor da máquina ou equipamento a ser instalado. Por outro lado, em máquinas e equipamentos de alta potência e custos muito mais elevados, onde necessita que o funcionamento ideal e o monitoramento são indispensáveis para não causar um gasto ainda mais elevado, a utilização de sensores FBG, passa a ser economicamente viável.

Trabalhos futuros devem utilizar a técnica de instrumentação para validação de modelos de simulação dinâmica e para estudar o comportamento do contator durante quedas de tensão. Além disso, a instrumentação também pode ser melhorada com o uso de um pacote para medição simultânea de temperatura e deformação e a tensão causada pela parte constante da força eletromagnética pode ser identificada.

## REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, Andre de Barros. **PROJETO E SIMULACAO DE CONTADORES CA**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal De Santa Catarina, Florianopolis, 1998.
- CARNEIRO, Alexander Cascardo; BARBERO, Andrés Pablo López. Princípio de funcionamento dos sensores ópticos baseados em grades em fibras ópticas e sua importância nas diferentes áreas tecnológicas. **Engevista**, v. 16, n. 4, p. 389–403, 2014.
- COLLINS, E. R.; BRIDGWOOD, M. A. The impact of power system disturbances on ac-coil contactors. In: **1997 IEEE Annual Textile, Fiber and Film Industry Technical Conference**. [S.l.: s.n.], 1997. p. 2. 6 pp.–.
- COLLINS, E. R.; ZAPARDIEL, F. An experimental assessment of ac contactor behavior during voltage sags. In: **Industrial Electronics, 1997. ISIE '97., Proceedings of the IEEE International Symposium on**. [S.l.: s.n.], 1997. v. 2, p. 439–444 vol.2.
- CUNHA, Jos? Renato Ferreira Alves da. **MODELO TE?RICO DE SENSORES ?PTICOS BASEADOS EM FIBRAS COM GRADE DE BRAGG**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Par?, Bel?m, 2007.
- GIALLORENZI, T.; BUCARO, J.; DANDRIDGE, A.; SIGEL, G.; COLE, J.; RASHLEIGH, S.; PRIEST, R. Optical fiber sensor technology. **IEEE Journal of Quantum Electronics**, v. 18, n. 4, p. 626–665, Apr 1982.
- HALLIDAY, Robert Resnick e Jearl Walker David. **Fundamentos de Fisica**. 9. ed. [S.l.]: LTC, 2009.
- HILL, K. O.; MALO, B.; BILODEAU, F.; JOHNSON, D. C.; ALBERT, J. Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by uv exposure through a phase mask. In: . [S.l.: s.n.], 1993. v. 62, n. 10, p. 1035–1037.
- HILL, K. O.; MELTZ, G. Fiber bragg grating technology fundamentals and overview. **Journal of Lightwave Technology**, v. 15, n. 8, p. 1263–1276, Aug 1997.
- JEONG, S. W.; LEE, G. J.; GIM, J. H. The study on the characteristics of operating limits of ac contactor during voltage sag. In: **2009 Transmission Distribution Conference Exposition: Asia and Pacific**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–4.
- KOLTERMANN, P. I.; BASTOS, J. P. A.; ARRUDA, S. R. A model for dynamic analysis of ac contactor. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 28, n. 2, p. 1348–1350, Mar 1992.
- LENZ, J.; EDELSTEIN, S. Magnetic sensors and their applications. **IEEE Sensors Journal**, v. 6, n. 3, p. 631–649, June 2006.

LI, Wenxiong; LU, Jianguo; GUO, Hui; LI, Wenhua; SU, Xiuping. Ac contactor making speed measuring and theoretical analysis. In: **Proceedings of the 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts and the 22nd International Conference on Electrical Contacts Electrical Contacts, 2004**. [S.l.: s.n.], 2004. p. 403–407.

LINESSIO, R. P.; SOUSA, K. d. M.; SILVA, J. C. C. da; ANTUNES, P. F. d. C. Analysis of vibrations in electrical machines with an optical fiber accelerometer. In: **2015 SBMO/IEEE MTT-S IMOC**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–5.

LINESSIO, R. Pomorski; SOUSA, K. d. M.; SILVA, T. da; BAVASTRI, C. A.; ANTUNES, P. F. d. C.; SILVA, J. C. Cardozo da. Induction motors vibration monitoring using a biaxial optical fiber accelerometer. **IEEE Sensors Journal**, v. 16, n. 22, p. 8075–8082, Nov 2016.

MELTZ, G.; MOREY, W. W.; GLENN, W. H. Formation of bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method. In: . [S.l.]: Optical Society of America, 1989. v. 14, n. 15, p. 823 – 825.

MENDEZ, A. Fiber bragg grating sensors: a market overview. In: **INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING; 1999. PROCEEDINGS-SPIE THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING**. [S.l.: s.n.], 2007. v. 6619, p. 661905.

MOHAMAD, H.; NOR, K. M. Evaluation on sensitivity of ac contactor during voltage sag. In: **2004 IEEE Region 10 Conference TENCON 2004**. [S.l.: s.n.], 2004. C, p. 295–298 Vol. 3.

OTHONOS, Andreas. Fiber bragg gratings. In: . [S.l.: s.n.], 1997. v. 68, n. 12, p. 4309–4341.

PATERNIO, Aleksander Sade. **Análise e implementação com aplicações na instrumentação de processos petroquímicos**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

PEREIRA, Dionísio Cerqueira Alves. **Sensores de fibra óptica baseados em redes de Bragg para monitorização ambiental e estrutural**. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Porto-PT, 2003.

RUIZ, J. R. Riba; ESPINOSA, A. Garcia; ROMERAL, L. A computer model for teaching the dynamic behavior of ac contactors. **IEEE Transactions on Education**, v. 53, n. 2, p. 248–256, May 2010.

SOUSA, K. d. M.; HAFNER, A. A.; KALINOWSKI, H. J.; SILVA, J. C. C. da. Determination of temperature dynamics and mechanical and stator losses relationships in a three-phase induction motor using fiber bragg grating sensors. **IEEE Sensors Journal**, v. 12, n. 10, p. 3054–3061, Oct 2012.

SOUSA, Kleiton de Moraes. **Validação de modelo térmico e elétrico de motor de indução empregando redes de bragg em fibra óptica**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2011.

- SOUSA, K. de Morais; DREYER, U. J.; MARTELLI, C.; SILVA, J. C. C. da. Vibration measurement of induction motor under dynamic eccentricity using optical fiber bragg grating sensors. In: **2015 SBMO/IEEE MTT-S IMOC**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–5.
- SOUSA, K. de Morais; HAFNER, A. A.; CRESPIM, M.; SOMENZI, J.; OLIVEIRA, V. de; KALINOWSKI, H. J.; SILVA, J. C. C. da. Fiber bragg grating sensing applications in temperature monitoring of three-phase induction motors. In: **2011 SBMO/IEEE MTT-S IMOC 2011**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 862–866.
- UDD, Eric; SPILLMAN, William B. Fiber grating sensors. In: \_\_\_\_\_. **Fiber Optic Sensors An Introduction for Engineers and Scientists**. [S.l.]: Wiley Telecom, 2011. p. 512–.
- WADA, M.; YOSHIMOTO, H.; KITAIDE, Y. Dynamic analysis and simulation of electromagnetic contactors with ac solenoids. In: **IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society. IECON 02**. [S.l.: s.n.], 2002. v. 4, p. 2745–2751 vol.4.
- WANG, H.; WANG, J.; BAO, Q.; BAO, Z. Analysis of electrical contact performance for alternating current contactor. In: **2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation**. [S.l.: s.n.], 2011. v. 1, p. 463–466.
- WELDEMARIAM, L. E.; G?RTNER, H. J.; CUK, V.; COBBEN, J. F. G. Mitigation strategies to improve the performance of ac contactor against voltage dips. In: **2016 51st International UPEC**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6.
- WU, Z.; WU, G.; CHEN, C.; FANG, Y.; PAN, L.; HUANG, H. A novel breaking strategy for electrical endurance extension of electromagnetic alternating current contactors. **IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology**, v. 6, n. 5, p. 749–756, May 2016.

## ANEXO A - ALGORITMO DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

### MATLAB CODE

```

1  clc ;
2  clear all ;
3  close all ;
4
5  %% Definição de variáveis
6  f = 60; %frequência
7  Re = 280; % resistência da bobina de excitação
8  Rs = 1.92; %resistência do anel cc
9  Ne = 5000; % número de espiras da bobina de excitação
10 Ns = 1; % número de espiras do anel cc
11 u0 = 4*pi*10e-7; %permeabilidade magnética no vácuo
12 um = u0*5500; %permeabilidade magnética do material
13 w = 2*pi*60; %velocidade angular
14 gap = 7e-3; %entreferro
15 gap_e = 0.1e-3; %diferença entre entreferro central e lateral
16 g = 9.81; %aceleração da gravidade
17 m = 0.150; %massa da parte móvel
18
19 %% Comprimento médio
20 le1 = 73.75e-3; %Caminho excitação parte fixa
21 le2 = 50.725e-3; %Caminho excitação parte móvel
22 ls = 3.1e-3; %Caminho na área do anel
23 lu = ls ;
24
25 %% Profundidade
26 Pn = 19.75e-3; %nucleo
27
28 %% Áreas
29 Ae = (16e-3 + gap_e)*(Pn + gap_e); %excitação
30 As = 4.5e-3 * Pn; %Sombreada
31 Au = 2.25e-3 * Pn; %Não sombreada
32
33 %% Molas

```



```

34 % Constante elástica das molas
35 Km = 121; %mola de retorno
36 Kc = 175; %mola de contato
37
38 %% Comprimento das molas
39 Xm = gap ; %mola de retorno
40 Xc = 4e-3; %mola de contato
41
42 %% Condição inicial
43 fluxo = 0;
44 Fmag = 0;
45 Fe = 0;
46 Fpeso = m*g; %Forca peso
47
48 dt = 1e-6;
49 t = 0:dt:100e-3;
50
51 V = sqrt(2)*220*sin(w*t);
52 x = zeros(1,length(t));
53 x(1) = -7e-3; %posicao inicial dada como -5mm condicao do tempo
    até x=0
54 Vel = zeros(1,length(t));
55 I0 = [0; 0];
56 Ie = zeros(1,length(t));
57 Is = zeros(1,length(t));
58 Fmag = zeros(1,length(t));
59
60 for k=2:length(t)
61     %% Relutancias
62     Re1 = (Ie1+Ie2)/(u0*um*Ae) + (gap_e+(-x(k-1)))/(u0+Ae); %
        bobina excitacao
63     Rs1 = Is/(u0*um*As) + (-x(k-1))/(u0+As); %sombreada
64     Ru1 = Iu/(u0*um*Au) + (-x(k-1))/(u0+Au); %nao sombreada
65
66     %% Correntes
67     I1 = ((-Re*(Re1+Ru1))/Ne^2 (-2*Rs*Ru1)/Ne; (-Re*Ru1)/Ne

```

```

        -2*Rs*(Ru1+Rs1)]*I0 + [(Re1+Ru1)/Ne^2; Ru1/Ne]*V(k))*dt+
        I0;
68     I0 = I1;
69     Ie(k)=I0(1);
70     Is(k)=I0(2);
71
72     %% Fluxos
73     fluxo = ([(Re1+Ru1) Ru1; Ru1 (Rs1+Ru1)]^(-1))*([Ne 0; 0 Ns
        ]) * I1;
74
75     %% Forca Magnetica
76     Fmag(k) = fluxo(1)^2/(2*u0*(Au+Ae)) + fluxo(2)^2/(2*u0*(As+
        Au)) + (fluxo(1)*fluxo(2))/(u0*Au);
77
78     %% Forca mola
79     if (-x(k-1)) < Xc
80         Fe = Km*(Xm-(-x(k-1)));
81     else
82         Fe = Km*(Xm-(-x(k-1))) + Kc*(Xc-(-x(k-1)));
83     end
84
85     %% velocidade
86     Vel(k) = ((Fpeso+Fmag(k)-Fe)/m)*dt + Vel(k-1);
87     x(k)=x(k-1)+Vel(k)*dt;
88
89     if x(k) >= 0
90         x(k) = 0;
91     end
92 end
93
94 figure(1)
95 subplot(2, 1, 1)
96 plot(t, Ie)
97 ylabel('Corrente (A)');
98 xlabel('Tempo (s)');
99 title('Corrente de excitação'); grid on;

```

```
100
101 subplot(2, 1, 2);
102 plot(t, -x);
103 title('Posição do núcleo móvel'); grid on;
104 ylabel('Posição (m)');
105 xlabel('Tempo (s)');
```