

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

JEAN SAVOLDI

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE UM CONTATOR DE
CORRENTE ALTERNADA NA PRESENÇA DE AFUNDAMENTO DE
TENSÃO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2013

JEAN SAVOLDI

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE UM CONTATOR DE
CORRENTE ALTERNADA NA PRESENÇA DE AFUNDAMENTO DE
TENSÃO**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado à Comissão de Diplomação do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luis Roel Ortiz.

PATO BRANCO

2013

TERMO DE APROVAÇÃO

O trabalho de Conclusão de Curso intitulado **ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE UM CONTATOR DE CORRENTE ALTERNADA NA PRESENÇA DE AFUNDAMENTO DE TENSÃO**, do aluno **JEAN SAVOLDI** foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata da banca examinadora N° **20** de 2013.

Fizeram parte da banca os professores:

Jorge Luis Roel Ortiz

Ana Cristina Alves Silveira Lima

Filomena Barbosa Rodrigues Mendes

DEDICATÓRIA

A minha família por todo o apoio, a ajuda de vocês foi essencial para a conclusão desse trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente á Deus, por iluminar o meu caminho.

Agradeço a minha família, pelo amor e carinho fornecido. Agradeço, também, pela ajuda financeira em todo o período da faculdade, o que possibilitou o término desse trabalho.

Agradeço aos meus amigos e colegas de aula por toda a ajuda, conselhos e ensinamentos dados durante toda a faculdade e durante o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao meu orientador prof. Dr. Jorge Luis Roel Ortiz pela ideia inicial desse trabalho, e por toda ajuda fornecida do início ao fim desse trabalho.

Agradeço também aos demais professores que ajudaram a esclarecer as minhas dúvidas em relação ao projeto.

Agradeço aos estagiários e amigos que sempre me forneceram os materiais que necessitei para desenvolvimento desse trabalho.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que direta ou indiretamente ajudaram na concretização desse trabalho. Obrigado.

RESUMO

SAVOLDI, Jean. ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE UM CONTATOR DE CORRENTE ALTERNADA, NA PRESENÇA DE DISTÚRBIOS DE TENSÃO. 2013. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Pato Branco, 2013.

Os contadores CA são utilizados para manobra, controle ou proteção no acionamento de motores de indução trifásicos. Quando ocorre o fenômeno de afundamento de tensão na rede de distribuição de energia, o contator sofre algumas vibrações nos contatos, conhecidas como repique. Essas vibrações podem afetar o funcionamento dos equipamentos que estão ligados em conjunto com o contator. Este trabalho apresenta um estudo do princípio de funcionamento de um contator e seu comportamento quando ocorrem afundamentos de tensão na rede de alimentação. Para isto, será feita a modelagem matemática do contator e uma simulação no programa MatLab, para verificar o comportamento dinâmico e as forças magnéticas no contator durante a ocorrência de um afundamento de tensão. Para validar os resultados obtidos nas simulações, será realizado um ensaio no contator através de um experimento simples.

Palavras-chaves: Contator CA. Afundamento de tensão. Dispositivo de comando. Dispositivos eletromecânicos. Fenômeno de repique.

ABSTRACTS

SAVOLDI, Jean. STUDY OF BEHAVIOR'S AC CONTACTOR IN THE PRESENCE OF TENSION'S DISTURBANCE. 2013. 69 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Pato Branco, 2013.

AC contactors are used to maneuver, control and / or protection of drive induction motors. When the voltage sag phenomenon occurs in the power distribution network, contactor undergoes some vibrations in its contacts, known as ringing, these vibrations can affect the equipment operation connected with the contactor. This work presents a study of the operation principle of a contactor and its behavior when voltage sags occur in the power supply. For this, the mathematical modeling of the contactor and a simulation in the MatLab program is done, to check the dynamic behavior and magnetic forces on the contactor when voltage sag occur. To validate simulations results, will be accomplished a test on the contactor through a simple experiment.

Keywords: AC contactor. Voltage sag. Command device. Electromechanical devices. Ringing Phenomenon.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Campo com divergente diferente de zero.	22
Figura 2: Regra da mão direita.....	24
Figura 3: (a) Linhas de campo em uma espira percorrida por uma corrente I ; (b) linhas de campo em uma bobina percorrida por uma corrente I , observe os lados Norte e Sul.	25
Figura 4: Direção das linhas do campo magnético em um material ferromagnético.	26
Figura 5: Reaproximação da parte móvel do material ferromagnético.....	26
Figura 6: Força restauradora, Lei de Hook.....	28
Figura 7: Implementação de uma mola presa à parte móvel do sistema.	29
Figura 8: Exemplo do circuito elétrico análogo do circuito magnético.	30
Figura 9: Esquema simplificado das partes de um contator eletromagnético.	32
Figura 10: Representação dos contatos (a) principais e (b) NF e NA, respectivamente.....	33
Figura 11: Modelo do núcleo magnético de um contator CA com anel de curto circuito.....	34
Figura 12: Afundamento de tensão no ponto de 90° , com diferença de fase igual a $T_b - T_a$	37
Figura 13: Contator CA, tensão de 127V e frequência de 60Hz.....	40
Figura 14: Partes que constituem o núcleo do contator, bobina, núcleo ferromagnético e as molas de retorno e de contatos.	40
Figura 15: Esquema da disposição espacial dos componentes internos do contator.	41
Figura 16: a) Esquema do circuito magnético do contator. b) Representação da analogia do circuito magnético do contator em circuito elétrico. c) Simplificação do circuito elétrico apresentado em b.....	42
Figura 17: a) Núcleo ferromagnético com as áreas de cada região destacadas e b) Detalhes do caminho médio magnético do ponto P_0 ao ponto P_1	43
Figura 18: Forças que atuam na parte móvel do contator.....	45
Figura 19: Ilustração do contator em situação de repouso e energizado.	46
Figura 20: Esquema detalhado das medidas do núcleo ferromagnético e do anel de curto circuito do contator, medidas em milímetros.	49

Figura 21: Passo a passo da montagem para determinação do número de espiras da bobina principal N_1 .	50
Figura 22: Esquema para ligação do gerador de função e do multímetro, no núcleo do contator.	50
Figura 23: Esquema montado para determinar a constante elástica da mola de retorno e das molas de contato NA e NF.	52
Figura 24: Linhas de campo magnéticas traçadas pelo programa EFCAD, em a) linhas de campo magnético traçadas para o núcleo inteiro do contator e b) para apenas metade do núcleo.	55
Figura 25: Comportamento do entreferro do contator CA.	56
Figura 26: Comportamento do fluxo magnético gerado pela bobina principal (Fluxo 1) e pelo anel CC (Fluxo 2).	57
Figura 27: Comportamento da corrente que circula pela bobina principal (I_1) e da corrente induzida no anel CC (I_2).	57
Figura 28: Comportamento da Força Magnética (F_{mag}) e da Força das Molas (F_{mola}).	58
Figura 29: Comportamento da Força das Molas (F_{mola}).	58
Figura 30: Afundamento de tensão Nível I.	60
Figura 31: Afundamento de tensão Nível II.	60
Figura 32: Afundamento de tensão Nível III.	61
Figura 33: Afundamento de tensão Nível IV.	61
Figura 34: Afundamento de tensão Nível V.	62
Figura 35: Afundamento de tensão de 70% da tensão nominal com duração de 0,02 s.	62
Figura 36: Afundamento de tensão de 70% da tensão nominal com duração de 0,01 ms.	63
Figura 37: Comparação do comportamento do entreferro para a simulação da Figura 35 e Figura 36, respectivamente.	63
Figura 38: Fluxograma do programa feito no Matlab para resolução das EDOs (Equações (34), (35), (36) e (37)).	65
Figura 39: Esquema de montagem do experimento prático.	66
Figura 40: Gráficos A á H mostrando o comportamento da tensão V_1 .	68
Figura 41: Problema causado durante a comutação entre V_a e V_q .	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Forma geral das equações de Maxwell.....	22
Tabela 2: Analogia entre um circuito elétrico de cc e um circuito magnético.	29
Tabela 3: Dados das medições realizadas no experimento da Figura 22.....	51
Tabela 4: Constante de elasticidade K da mola de retorno e das molas de contato.	52
Tabela 5: Classificação dos níveis de afundamento de tensão.....	59
Tabela 6: Resultado das medições do experimento prático.....	67

LISTA DE ABREVIACOES

Div	Divergente de um vetor;
Rot	Rotacional de um vetor;
Esp	Espiras;
CA	Corrente alternada;
CC	Corrente continua;
NF	Normalmente Fechado;
NA	Normalmente Aberto;
Anel CC	Anel de curto circuito;
Fmag	Força Magnética;
Fmola	Resultante das forças das molas de contato e de retorno;
V1	Tensão nos terminais da bobina principal;
I1	Corrente na bobina principal;
I2	Corrente no anel de curto circuito;
R1	Resistência da bobina principal;
Ra	Resistência do anel de curto circuito;
N1	Número de espiras da bobina principal;
N2	Número de espiras do anel de curto circuito;
L1	Indutância da bobina principal;
X	Espessura do Entreferro;
G	Aceleração da gravidade;
k1	Constante elástica da mola de retorno;
k2	Constante elástica da mola de contato NF;
k3	Constante elástica da mola de contato NA;
X _{mp}	Comprimento da mola de retorno;
X _{mnf}	Comprimento da mola de contato normalmente fechado;
X _{mna}	Comprimento da mola de contato normalmente aberto;
R	Relutância no ferro e entreferro central;
R _f	Relutância no ferro;
R _s	Relutância externa ao anel de curto circuito e entreferro lateral
R _u	Relutância interna ao anel de curto circuito e entreferro lateral
Fluxo1	Fluxo magnético gerado pela bobina principal;

Fluxo ₂	Fluxo magnético gerado pelo anel de curto circuito;
V _q	Tensão nos terminais do varistor;
V _a	Tensão nos terminais da bancada;
F _{peso}	Força peso, referente a massa da parte móvel do contator;

LISTA DE SIGLAS

IEC	International Electrotechnical Commission
EFCAD	Electromagnetic Fields Computer Aided Design
MATLAB	MATrix LABoratory

LISTA DE SIMBOLOS

\vec{E}	Campo Elétrico	[V/m]
\vec{D}	Indução Elétrica	[C/m ²]
\vec{H}	Campo Magnético	[A/m]
\vec{B}	Indução Magnética	[T]
\vec{J}	Densidade Superficial de Corrente	[A/m ²]
ρ	Densidade Volumétrica de Carga	[C/m ³]
ϵ	Constante Dielétrica ou Permissividade Elétrica	[F/m]
ϵ_0	Constante Dielétrica do vácuo ou Permissividade Elétrica do vácuo	[F/m]
ϵ_r	Constante Dielétrica relativa ou Permissividade Elétrica relativa	[F/m]
μ	Permeabilidade Magnética	[H/m]
μ_0	Permeabilidade Magnética do vácuo	[H/m]
μ_r	Permeabilidade Magnética relativa	[H/m]
\vec{B}_0	Indução Magnética Remanente	[T]
σ	Condutividade Elétrica	[1/Ω]
q	Carga elétrica	[C]
S	Superfície de um objeto	[m ²]
dS	Diferencial da superfície	[m]
f_{em}	Força Eletromotriz	[V]
V_{fem}	Tensão induzida pela força eletromotriz	[V]
t	Tempo	[s]
V	Tensão elétrica	[V]
I	Corrente Elétrica	[A]
l	Caminho percorrido pela corrente	[m]
dl	Diferencial do caminho percorrido pela corrente	
r	Raio de uma circunferência	[m]
N	Numero de espiras	[esp]
F_{mm}	Força magneto motriz	[A·esp]
Φ_m	Fluxo Magnético	[Wb]
x	Deslocamento de um objeto	[m]
x_0	Posição inicial de um objeto	[m]
Δx	Variação do deslocamento de um objeto	[m]
g	Tamanho do entreferro	[mm]
v	Velocidade de um objeto	[m/s]
a	Aceleração de um objeto	[m/s ²]
F_{mola}	Força restauradora da mola	[N]
K	Constante elástica da mola	[N/m]
F_{mag}	Força de origem magnética	[A·Wb]
F_r	Força resultante do sistema	[N]
m	Massa de um objeto	[Kg]
R	Resistência	[Ω]

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
1.1	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	17
1.2	OBJETIVOS	17
1.2.1	Objetivo Geral:	17
1.2.2	Objetivos Específicos	18
1.3	RESULTADOS E BENEFÍCIOS	18
1.4	ORGANIZAÇÃO Do trabalho	18
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	EQUAÇÕES DE MAXWELL	20
2.1.1	Lei de Gauss.....	22
2.1.2	Lei de Faraday	23
2.1.3	Lei de Ampère	23
2.2	CIRCUITOS MAGNÉTICOS	24
2.3	CONVERSÃO ELETROMECAÂNICA DE ENERGIA	27
2.4	ANALOGIA ENTRE SISTEMAS.....	29
3.	CONTADORES CA	31
3.1	ANALOGIA ENTRE SISTEMAS.....	32
3.2	SIMBOLOGIA DOS CONTATOS	33
3.3	CIRCUITO ELETROMAGNÉTICO DO CONTADOR.....	34
3.4	NÚCLEO, ARMADURA, BOBINA E SUPORTE DO CONTADOR.	34
3.5	ANEL DE CURTO CIRCUITO.....	35
3.6	MOLAS DE RETORNO E DE PRESSÃO DOS CONTATOS.....	35
3.7	CÂMARA DE EXTINÇÃO DO ARCO ELÉTRICO	36
3.8	FUNCIONAMENTO DE UM CONTADOR ELETROMECAÂNICO	36
3.9	AFUNDAMENTO DE TENSÃO.....	37
3.10	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA E SOLUÇÃO PROPOSTA.....	38
3.11	METODOLOGIA	38

4.	MODELAGEM MATEMÁTICA DA DINÂMICA DO CONTATOR CA	40
5.	SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DO CONTATOR CA	54
5.1	SIMULAÇÃO DO CONTATOR CA NO PROGRAMA EFCAD	54
5.2	SIMULAÇÃO DO CONTATOR CA NO PROGRAMA MATLAB	55
5.3	SIMULAÇÃO DO AFUNDAMENTO DE TENSÃO	58
6.	EXPERIMENTO PRÁTICO	66
	CONCLUSÃO	70
	REFERÊNCIAS.....	72
	ANEXO A – FLUXOGRAMA A.....	74
	ANEXO B – FLUXOGRAMA B.....	76
	ANEXO C – FOTO DO EXPERIMENTO PRÁTICO.....	78

1. INTRODUÇÃO

Todos os sistemas elétricos que necessitam de um controle eficiente, isolamento, proteção e sinalização, utilizam elementos de comutação. Os dispositivos tradicionais de comutação eletromecânica são os contatores, disjuntores e relés, pois para a maioria das aplicações esses dispositivos apresentam uma boa relação custo/benefício. Os contatores possibilitam o controle remoto ou centralizado de motores e outras máquinas industriais, além de poderem executar funções mais complexas, quando integrados a outros circuitos como, por exemplo, uma proteção coordenada dependente do tempo de operação, ou de automação de fábrica.

Existem contatores que operam com corrente contínua (CC) e contatores que operam com corrente alternada (CA). Os contatores CA possuem contatos sensíveis à variação de tensão aplicada, o que torna sua ligação potencialmente fraca em processos industriais, principalmente quando ocorre o fenômeno de afundamento de tensão da rede de alimentação. Contudo, os contatores tem um ponto forte que é a praticidade em poder efetuar o controle de diferentes tipos de cargas através de um circuito de comando.

O contator opera de forma a fechar seus contatos quando sua bobina principal é alimentada com tensão e corrente CA, entretanto, durante o afundamento de tensão essa alimentação da bobina do contator é prejudicada, ou seja, não é suficiente para que o contator feche ou abra seus contatos, pois é necessária uma corrente mínima na bobina principal do contator para que a força magnética criada seja maior que a força estabelecida pelas molas presentes neste sistema. A função destas molas é manter os contatos do contator em seu estado inicial, abertos ou fechados.

Portanto, devido a velocidade com que a força das molas tenta restabelecer a posição dos contatos e a força magnética tenta alterar a posição dos contatos, essas forças provocam uma vibração (conhecida como repique) e um ruído devido à colisão dos contatos. Após o impacto inicial ocorrem vários repiques que dão origem a arcos elétricos, provocando aquecimento, podendo levar a corrosão dos contatos. A permanência desse efeito por muito tempo pode danificar o contator e essa vibração e ruído podem ser transmitidos aos componentes que estão ligados no mesmo circuito que o contator.

1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Problemas como afundamento de tensão na rede de alimentação são fatores que influenciam na operação de dispositivos de controle e manobra como no caso do contator. Uma queda de tensão por um pequeno intervalo de tempo pode fazer com que o contator funcione de maneira inadequada. Durante esse mau funcionamento ocorre o “repique dos contatos”, fazendo com que o contator abra e feche seus contatos inúmeras vezes dentro de um pequeno intervalo de tempo, onde pode haver ocorrência de arco elétrico, gerando aquecimento e um desgaste prematuro dos contatos.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo apresentar a dinâmica do comportamento de um contator e o estudo do mesmo quando acontece o afundamento de tensão. Será feita a análise do comportamento das forças magnéticas que interagem nos entreferros do contator, durante os distúrbios na rede de alimentação. Essa análise será feita por simulação nos programas computacionais EFCAD e do Matlab®/Simulink®. Para comparar tais resultados será feita uma experiência prática para verificar o comportamento do contator em situações reais.

1.2.1 Objetivo Geral:

Primeiramente é necessário conhecer o contator e como ele opera durante os problemas de falhas de tensão. Portanto, o objetivo geral do trabalho é:

- Estudo do contator AC quando ocorre falha de tensão;
- Análise do fenômeno de repique durante um afundamento de tensão na rede de alimentação do contator;

1.2.2 Objetivos Específicos

Tendo o conhecimento de como o contator se comporta durante as falhas de tensão, e de posse de um contator e seus dados construtivos fornecidos pelo fabricante, tem-se como objetivos específicos:

- Modelar a dinâmica do contator;
- Determinar a força de origem magnética no entreferro do contator;
- Observar o comportamento do contator através de simulações em programas computacionais como EFCAD e/ou Matlab®/Simulink® e experimentos práticos;

1.3 RESULTADOS E BENEFICIOS

O estudo do comportamento do contator em falhas de tensão e a modelagem da dinâmica do contator durante essas falhas permite um estudo mais aprofundado e detalhado do contator. O contator é um dispositivo usado para manobra e controle de acionamento de motores de indução trifásicos e para proteção quando devidamente acompanhado de dispositivos apropriados, como os relés. O problema de repique sofrido pelos contadores pode ser transmitido aos motores e outros dispositivos ligados ao mesmo circuito que o contator.

A simulação computacional e o experimento prático visam à verificação e estudo do fenômeno de repique, cuja finalidade é fornecer uma base de estudo para trabalhos futuros que visem possíveis soluções para esse fenômeno de vibração. Tal Vibração é desnecessária e muitas vezes causa o acionamento do contator em momentos desnecessários a operação do circuito.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho está organizado de forma a fornecer o conhecimento necessário para entender o funcionamento de um contator CA, onde primeiramente

apresentam-se as equações de Maxwell (seção 2.1) que demonstram o princípio de funcionamento de qualquer circuito magnético, o qual é explicado em detalhes na seção 2.2. A seção 2.3 descreve a conversão eletromecânica de energia, onde é mostrada a conversão de energia elétrica em energia mecânica. Para a modelagem matemática que será realizada do contator, será necessário analisar um circuito elétrico juntamente com um circuito magnético, e isso será feito por uma analogia entre estes sistemas, a qual é apresentada na seção 2.4.

O contator CA propriamente dito é apresentado na seção 3, onde seus componentes e suas características são descritas nas seções 3.1 à 3.5. Um problema comum que afeta os contadores é o afundamento de tensão, esse fenômeno é definido na seção 3.6 para melhor compreender o seu comportamento.

A seção 4 apresenta o desenvolvimento da modelagem dinâmica do comportamento do contator, enquanto que, a seção 5 apresenta a simulação do contator no programa MatLab com base nas equações definidas na seção 4.

Após apresentadas as simulações computacionais a seção 6 apresenta um simples experimento que visa aplicar na prática os problemas realizados em simulação.

Por fim, tem-se uma conclusão comparativa a respeito dos resultados obtidos nas simulações e no experimento prático.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção apresenta os conceitos envolvidos no funcionamento de um contator eletromagnético, assim como as características do contator CA. Em seguida, é apresentada a metodologia.

2.1 EQUAÇÕES DE MAXWELL

De acordo com Bastos (1996), o princípio do eletromagnetismo pode ser representado pelas quatro equações de Maxwell, apresentadas na Tabela 1, as quais são baseadas em trabalhos e experiências de Faraday, Gauss e Ampère. Bastos separa o eletromagnetismo em dois domínios, o domínio das altas frequências (estuda as ondas eletromagnéticas e a propagação de energia pelas mesmas) e o domínio das baixas frequências (compreendem os dispositivos eletromagnéticos, contadores, transformadores, reles, etc). As equações de Maxwell são aplicadas a ambos os domínios desde que sejam feitas algumas considerações com relação às variáveis em estudo. Este trabalho abordará apenas o domínio das baixas frequências, onde o estudo de campos elétricos e magnéticos pode ser realizado separadamente.

As grandezas eletromagnéticas envolvidas nas equações de Maxwell são:

- Campo Elétrico \vec{E} ;
- Indução Elétrica \vec{D} ;
- Campo Magnético \vec{H} ;
- Indução Magnética \vec{B} ;
- Densidade Superficial de Corrente \vec{j} ;
- Densidade Volumétrica de Carga ρ ;

Existe um grupo de relações que dependem do meio onde existe o campo, são elas:

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E}$$

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} + \vec{B}_0 \quad 2$$

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad 3$$

Onde:

- σ : Condutividade Elétrica que é a medida da capacidade de um material em conduzir corrente elétrica;
- B_0 : Indução Magnética Remanente;
- μ : Permeabilidade Magnética que é a facilidade com que o fluxo magnético, ou seja, as linhas de campo podem se estabelecer no interior de um material. A permeabilidade magnética no vácuo é aproximadamente igual a $4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m]. A razão entre a permeabilidade magnética do material (μ) e a do vácuo (μ_0) é denominada de "permeabilidade relativa", que é dada pela equação:

$$\mu_r = \mu / \mu_0 \quad 4$$

Em geral, os materiais ferromagnéticos possuem $\mu_r = 1000$ e os materiais não magnéticos, $\mu_r \approx 1,0$.

- ϵ : Constante Dielétrica ou Permissividade Elétrica é a capacidade que um material tem de permitir à formação de um campo elétrico no seu interior. O valor da permissividade no vácuo ϵ_0 é de aproximadamente $8,854 \cdot 10^{-12}$ [F/m]. A permissividade relativa ϵ_r é:

$$\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0 \quad 5$$

A Tabela 1 apresenta as equações de Maxwell e nos tópicos seguintes, será descrito um pouco sobre cada lei envolvida nessas equações.

Tabela 1 - Forma geral das equações de Maxwell.

Forma Diferencial	Forma Integral	Comentários
*Div $\vec{D} = \rho$	$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \int_V \rho_{vol} \cdot dVol$	Lei de Gauss.
*Div $\vec{B} = 0$	$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$	Demonstra que o campo é conservativo.
*Rot $\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$V = \oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$	Lei de Faraday.
*Rot $\vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$	$I = \oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{S}$	Lei de Ampère.

*Representa o divergente (Div.) e o Rotacional (Rot.) de algum vetor.
 Fonte: SADIKU (2004, p. 348).

2.1.1 Lei de Gauss

“A Lei de Gauss estabelece que o fluxo de campo elétrico total através de qualquer superfície fechada é igual à carga total encerrada por essa superfície” (Sadiku, 2004).

A equação (6) mostra que o fluxo da indução elétrica (\vec{D}) não é conservativo (Div $\vec{D} \neq$ zero). Assim, se por exemplo, colocar uma carga elétrica “q” no centro de uma esfera, o fluxo de campo elétrico através da superfície S desta esfera será igual à carga total envolvida pela esfera (ver Figura 1), ou seja, será igual à densidade volumétrica de carga ρ no interior da esfera.

$$\text{Div } \vec{D} = \rho$$

6

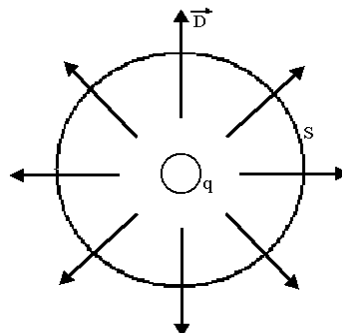


Figura 1: Campo com divergente diferente de zero.
 Fonte: Bastos (1996, p. 36).

Já a equação (7), que também é referida como sendo a Lei de Gauss para campos magnéticos, define que não há divergência do campo magnético, pois todo o fluxo magnético que entra em um determinado volume é idêntico ao que sai deste mesmo volume.

$$\text{Div } \vec{B} = 0 \quad 7$$

2.1.2 Lei de Faraday

“Faraday evidenciou inicialmente que uma variação de fluxo magnético cria uma força eletromotriz (fem) na espira que limita a seção através do qual este fluxo variou” (Bastos, 1996). Com isso, a lei de Faraday pode ser expressa pela equação (8), onde um campo elétrico \vec{E} rotacional é criado pela variação temporal da indução magnética, que é o princípio em que se baseia o funcionamento do transformador de tensão, já que a circulação de E gera uma fem.

$$\text{Rot } \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad 8$$

2.1.3 Lei de Ampère

Das quatro equações de Maxwell, a equação referente à lei de Ampère é considerada a mais importante, pois essa lei evidencia que a corrente que circula por um fio retilíneo cria, em volta do mesmo, linhas de campo magnético rotacionais e que são perpendiculares à direção da corrente. O sentido do campo magnético pode ser determinado pela regra da mão Direita, conforme ilustra a Figura 2, onde o polegar indica o sentido da corrente e os outros dedos indicam o sentido do campo magnético.

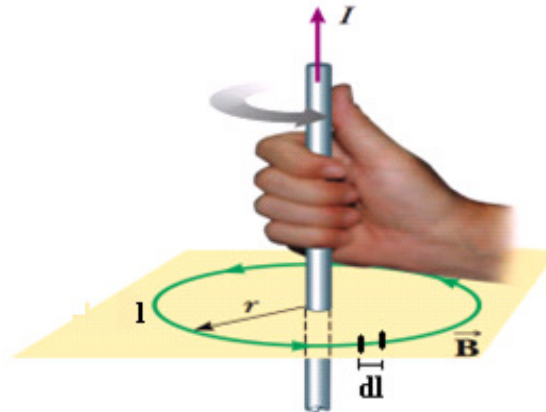


Figura 2: Regra da mão direita.
Fonte: ARANA (2011).

A Lei de Ampère pode ser representada de acordo com a Tabela 1 pela seguinte equação:

$$I = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} \quad 9$$

Onde a corrente I é igual à soma do campo magnético H criado em uma fração dl do caminho total l .

Assim, a intensidade de um campo magnético a uma distância “ r ” de um condutor infinito percorrido por uma corrente “ I ”, será:

$$I = \oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = 2\pi r H \Rightarrow H = I/2\pi r \text{ [A/m]} \quad 10$$

2.2 CIRCUITOS MAGNÉTICOS

Se o condutor da Figura 2 for enrolado formando uma espira (Figura 3a), as linhas de campo terão a mesma direção e sentido no centro da espira. Se o mesmo condutor for enrolado de forma a ter uma bobina com N espiras, o campo magnético produzido terá um caminho contínuo em torno da bobina (Figura 3b), cuja distribuição das linhas de campo da bobina se torna bastante similar à de um ímã permanente.

Para várias espiras a equação (10) pode ser escrita da seguinte forma:

$$\mathcal{F}_{mm} = N \cdot I = \oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} \quad 11$$

Onde N indica o número de espiras da bobina e o termo \mathcal{F}_{mm} (ou NI) representa a força magnetomotriz, pois é capaz de gerar um campo magnético (Nasar, 1984).

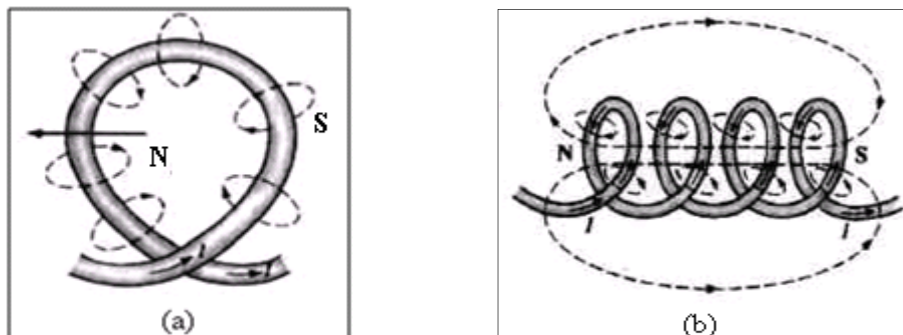


Figura 3: (a) Linhas de campo em uma espira percorrida por uma corrente I ; (b) linhas de campo em uma bobina percorrida por uma corrente I , observe os lados Norte e Sul. Fonte: ARANA (2011).

Conforme a Figura 3b, para melhor aproveitar e aumentar o fluxo magnético criado no interior da bobina e assim poder direcionar o caminho pelo qual essas linhas irão passar coloca-se um material ferromagnético no interior da bobina, conforme a Figura 4. As linhas de campo seguem a trajetória descrita pela forma do material magnético devido à permeabilidade do material ser muito maior do que a permeabilidade do ar, criando assim um fluxo magnético Φ_m . Este material ferromagnético é chamado de núcleo.

Um detalhe que se pode observar na Figura 4 é que, como não se pode determinar exatamente o caminho das linhas de fluxo magnético, considera-se então, o caminho médio desse fluxo, o qual está representado pela linha tracejada no centro do núcleo com flechas que indicam o sentido do fluxo magnético.

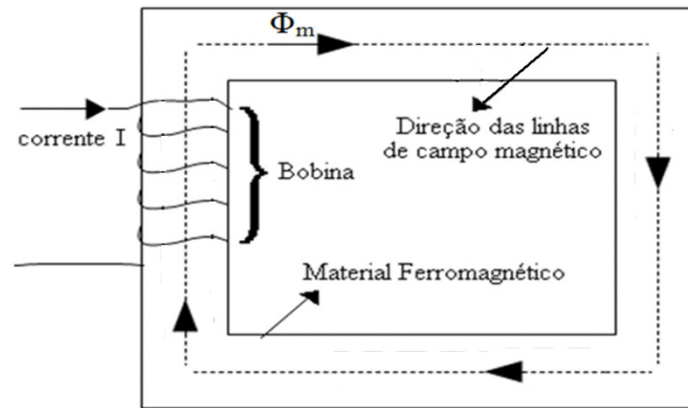


Figura 4: Direção das linhas do campo magnético em um material ferromagnético.

Se o núcleo da Figura 4 for dividido em duas partes, como na Figura 5, uma parte que permanece numa posição fixa, chamada de parte fixa do núcleo, e outra que muda a sua posição, chamada de parte móvel do núcleo, então será criado um espaço entre a parte fixa e a parte móvel chamado de entreferro.

Ao aproximar a parte móvel da parte fixa, verifica-se a existência de um campo magnético, que circula entre a parte fixa e a parte móvel, que produz um fluxo magnético, como mostra a Figura 5. Pode-se dizer que aparecem polos na parte móvel, devido à imantação produzida pelo campo magnético. O aparecimento destes polos produzem forças de atração entre a parte fixa e a parte móvel do núcleo.

Para a situação descrita na Figura 4 e Figura 5, considera-se que o material ferromagnético não está saturado. Como o núcleo está representado por uma configuração retangular, o fluxo magnético representado pelas linhas tracejadas, deve apresentar nos cantos do núcleo uma forma arredondada e não retangular como mostrado nas figuras, pois as figuras são meramente ilustrativas.

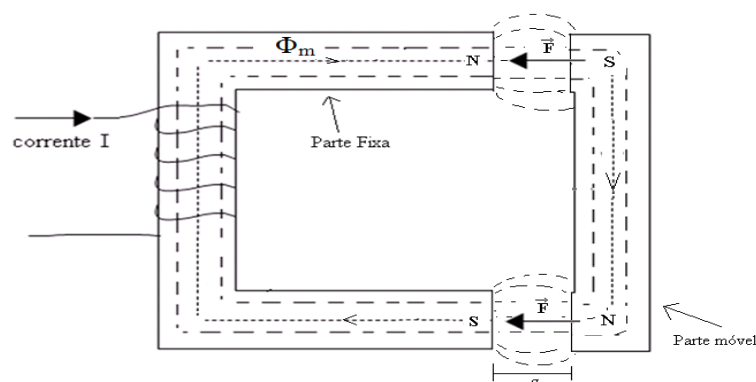


Figura 5: Reaproximação da parte móvel do material ferromagnético.

2.3 CONVERSÃO ELETROMECHANICA DE ENERGIA

As linhas de fluxo ao se direcionarem para a parte móvel do núcleo criam uma força F em cada entreferro “g” de forma a reduzir o espaço entre as peças. Portanto esta força F , de origem magnética, pode ser calculada através da metade da tensão de Maxwell (Bastos, 1996), onde a força para cada entreferro é:

$$F = \frac{\mu_0 H^2 S}{2} \quad 12$$

Onde H é o campo conhecido através da superfície S .

Essa força irá gerar um deslocamento “ Δx ” da parte móvel (onde $x = g$), esse deslocamento (Δx) se dará a uma velocidade “ v ”, que pode ser expressa pela equação (13):

$$v = \frac{dx}{dt} \quad 13$$

A aceleração que pode ocorrer durante esse movimento pode ser expresso por:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{dx^2}{dt^2} \quad 14$$

A fim de evitar esse movimento da parte móvel do núcleo, coloca-se uma mola presa na parte móvel (Figura 7), cuja força F_{mola} é calculada pela lei de Hooke que diz que “As deformações são diretamente proporcionais às tensões que as produzem”. Ou seja, essa lei descreve a força restauradora que existe em diversos sistemas quando comprimidos ou estendidos, essa força tende a recuperar o formato original do material. (Provenza, 1984) (Takakura, 2008).

A Figura 6a mostra uma mola em seu formato e comprimento natural “ x_0 ”. A Figura 6b e a Figura 6c, mostram que quando uma mola sofre uma variação no seu comprimento normal Δx ($\Delta x = x - x_0$) surge uma força restauradora F , sempre contrária ao movimento de compressão ou extensão da mola, onde a F depende da constante elástica da mola, conforme a equação (15).

$$F_{\text{mola}} = K \cdot \Delta x \quad (\text{Lei de Hooke})$$

15

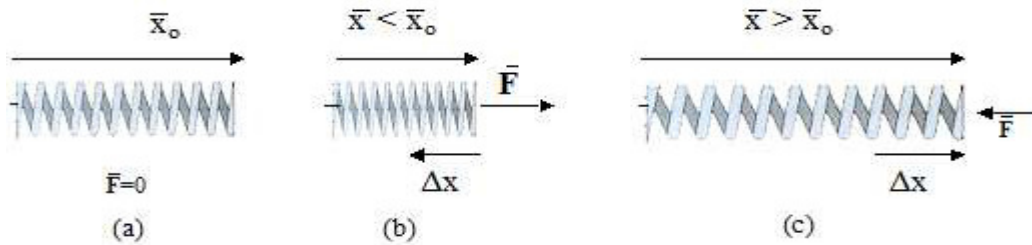


Figura 6: Força restauradora, Lei de Hooke.
Fonte: TAKAKURA (2008).

De acordo com a segunda Lei de Newton (equação 16), a resultante da somatória das forças desse sistema é dada pela equação (17) e (18).

$$\sum F_r = ma \quad 16$$

Onde F_r é a resultante das forças do sistema e “m” é a massa do corpo em movimento. Para o caso do sistema da Figura 7, desprezando o atrito e a força peso, a resultante de forças será,

$$F_{\text{mag}} - F_{\text{mola}} = m \cdot a \quad 17$$

$$F_{\text{mag}} - m \frac{dx^2}{dt^2} = F_{\text{mola}} = K \cdot \Delta x \quad 18$$

Onde F_{mag} é a força de origem magnética, “K” é a constante elástica da mola, “ Δx ” o deslocamento e “m” é a massa da parte móvel do núcleo.

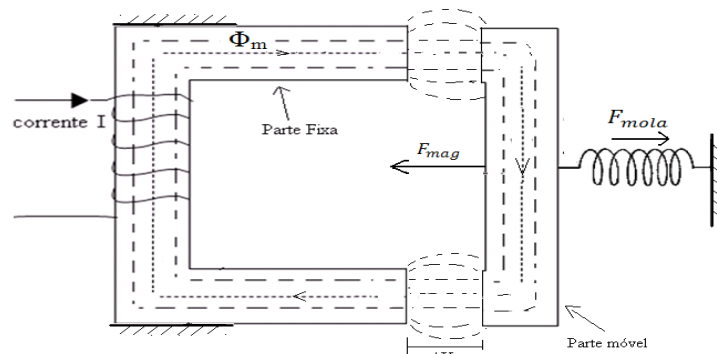


Figura 7: Implementação de uma mola presa à parte móvel do sistema.

2.4 ANALOGIA ENTRE SISTEMAS

A fim de possibilitar a modelagem matemática de sistemas como o da Figura 7, onde em um mesmo sistema tem-se um circuito elétrico, um circuito magnético e um movimento mecânico, foram criadas analogias entre esses sistemas. A Tabela 2 apresenta a analogia entre o circuito elétrico e o circuito magnético.

Tabela 2: Analogia entre um circuito elétrico de cc e um circuito magnético.

Circuito Elétrico	Circuito Magnético
Resistência, $R = l/(\sigma A^*)$	Relutância, $R = l/(\mu A^*)$
Corrente, I	Fluxo Magnético, Φ_m
Tensão, V	Força Magneto Motriz, \mathcal{F}_{mm}
Condutividade, σ	Permeabilidade, μ
Condutância, G	Permeância, \mathcal{P}

* A é a área da seção transversal do caminho, ou para a corrente no circuito elétrico, ou para o fluxo no circuito magnético.

Fonte: NASAR (1984, p.4).

A Figura 8 apresenta um exemplo de analogia entre circuito magnético e um circuito elétrico, onde é possível observar que a F_{mm} gerada no circuito magnético equivale à tensão (V) aplicada no circuito elétrico, assim como o fluxo magnético (Φ) equivale a corrente elétrica (i).

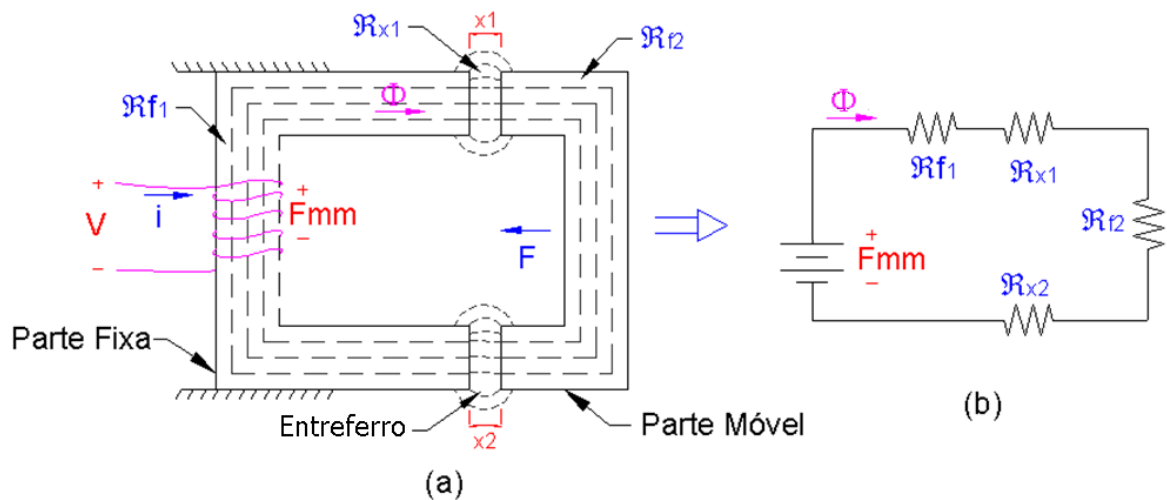


Figura 8: Exemplo do circuito elétrico análogo do circuito magnético.

Legenda da Figura 8:

$V(t)$ = Tensão; $i(t)$ = Corrente; F_{mm} = Força MagnetoMotriz; $F(t)$ = Força de atração; Φ = Fluxo Magnético; \mathfrak{R}_{f1} e \mathfrak{R}_{f2} = Relutância do material ferromagnético fixo e móvel, respectivamente; \mathfrak{R}_{x1} e \mathfrak{R}_{x2} = Relutância do entreferro $x1$ e $x2$, respectivamente; R = Resistência da bobina.

As relutâncias \mathfrak{R}_{f1} , \mathfrak{R}_{f2} , \mathfrak{R}_{x1} , \mathfrak{R}_{x2} , apresentadas na Figura 8a, equivalem às resistências elétricas da Figura 8b. Por fim, a resistência R do circuito elétrico equivale à resistência da bobina do circuito magnético.

3. CONTADORES CA

A principal característica do contator que o tornou muito utilizado é a sua capacidade em realizar operações de comando ou manobra, não manual, de máquinas elétricas, ou outros dispositivos, de forma a estabelecer, conduzir ou interromper a corrente desse circuito. Os contadores são fabricados para operar em tensão contínua ou tensão alternada (geralmente em 50 Hz ou 60 Hz) e, realizar manobras com circuitos que exijam corrente contínua (CC) ou corrente alternada (CA), sendo que, essa corrente pode variar de dezenas à milhares de ampères. No caso dos contadores para tensão alternada, eles podem ser construídos dos mais diversos tamanhos e capacidades possibilitando a sua aplicação nos mais variados locais (residências, eletrodomésticos, entre outras).

A Comissão Eletrotécnica Internacional (International Electrotechnical Commission - IEC) define o contator, em sua norma IEC 60947-1 (IEC, 2001), como sendo um dispositivo mecânico de comutação que possui um único estado de repouso. O contator é capaz de estabelecer, conduzir e interromper correntes sob condições normais do circuito além de condições de sobrecarga, podendo ser operado de qualquer forma que não seja manualmente.

Considerando a tensão e corrente de operação, os contadores podem ser classificados de acordo com a forma pelo qual é desenvolvida a força de fechamento dos seus contatos principais. Portanto, os contadores podem ser eletromagnéticos, eletromecânicos, pneumático ou hidráulico. Podem ser classificados também quanto à disposição de seus contatos, onde se tem contator a ar, contator a óleo e contator a vácuo (Roldán, 1982).

Este trabalho está voltado para o estudo dos contadores eletromagnéticos, em virtude disto, o decorrer deste capítulo tratará dos componentes básicos que constituem esta classe de dispositivo, que são:

- Contatos;
- Circuito eletromagnético, sendo este constituído por:
 - ✓ Núcleo, Armadura e Bobina;
 - ✓ Suporte ou estrutura do aparelho.
 - ✓ Anel de curto circuito.
- Molas de Retorno e de Pressão;

- Câmara de extinção ou Sistema de sopro;

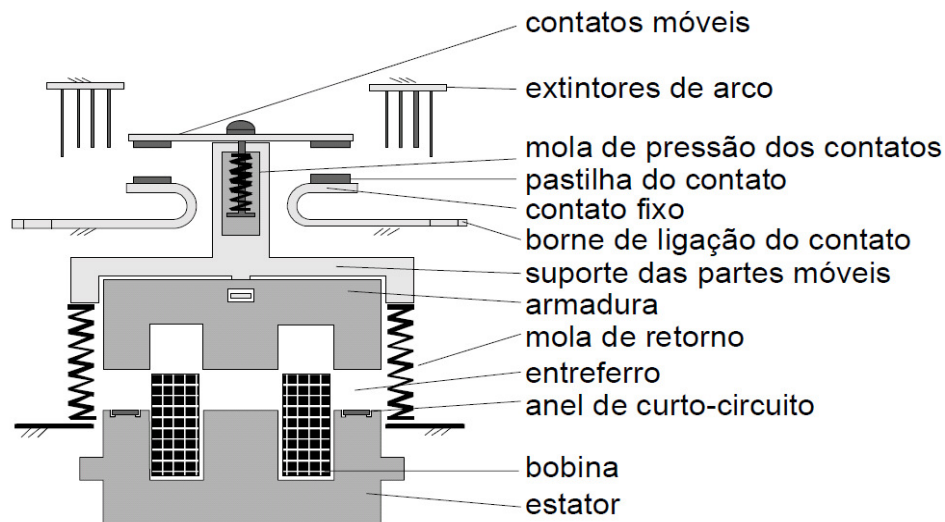


Figura 9: Esquema simplificado das partes de um contator eletromagnético.
Fonte: SANTOS (2004).

A Figura 9 apresenta de forma sintetizada as partes anteriormente citadas de um contator eletromagnético. A forma real de um contator pode ser muito distinta da figura apresentada.

3.1 ANALOGIA ENTRE SISTEMAS

A Figura 9 apresenta os contatos fixos e móveis presente em um contator, esses contatos podem ser denominados de normalmente aberto (NA) ou normalmente fechado (NF) conforme a posição que apresentam durante o estado de repouso do contator. Os contatos NA estão abertos quando o contator está em repouso e fecham quando o contator é excitado. O mesmo ocorre aos contatos de abertura NF por agir de forma oposta aos contatos NA. Os contatos NF e NA podem realizar funções principais (realizam o fechamento ou a abertura do circuito principal) ou auxiliares (comando e sinalização de circuitos auxiliares), sendo considerados de contatos principais ou contatos auxiliares respectivamente. Contatos temporizados são acionados para abrir ou para fechar em um determinado instante de tempo após a excitação do contator.

Geralmente os contatos são feitos de cobre eletrolítico, ou seja, de materiais de liga¹, e nunca de materiais puros a não ser para aplicações em baixas intensidades de corrente. Como exemplo, podem-se citar as ligas de Prata-cádmio, Prata-paládio e Prata-níquel que são as ligas mais utilizadas por apresentarem boas características como: serem mecanicamente resistente e não oxidáveis, apresentar pouca resistência no ponto de contato e resistência à corrosão produzida pelo arco elétrico (Roldán, 1982).

Um bom contato deve suportar a corrente máxima de serviço, de fechamento e de abertura dos contatos sem aquecer de forma excessiva devido ao arco elétrico que se origina devido a essas correntes. Por isso é importante que os contatos funcionem corretamente em condições normais, protegidos contra o pó, graxa, umidade, insetos, etc.

3.2 SIMBOLOGIA DOS CONTATOS

A norma IEC (2001) define a representação dos contatos principais do contator, conforme demonstra a Figura 10a, onde os números ímpares definem os terminais de entrada e os números pares os terminais de saída. Já a Figura 10b, representa os contatos NF e NA quando o contator está em repouso.

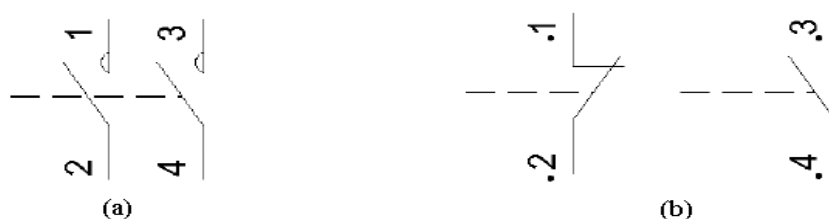


Figura 10: Representação dos contatos (a) principais e (b) NF e NA, respectivamente.
Fonte: IEC (2001).

¹ Materiais de Liga: neste caso faz-se referência as ligas metálicas que são “substâncias que consistem em misturas íntimas de dois ou mais elementos químicos, dos quais pelo menos um é metal, e possuindo propriedades metálicas” (CHIAVERINI, 1986, p. 67).

3.3 CIRCUITO ELETROMAGNÉTICO DO CONTATOR

O contator eletromecânico é um dispositivo que tem uma grandeza elétrica como entrada e um movimento mecânico como saída, utilizando como acoplamento entre a parte elétrica e a parte mecânica um campo magnético. Assim, utiliza um circuito eletromagnético para realizar o acionamento mecânico dos contatos NA e NF. Esse circuito eletromagnético é constituído basicamente de um núcleo, uma armadura, uma bobina de excitação e um anel de curto circuito conforme demonstra a Figura 11.

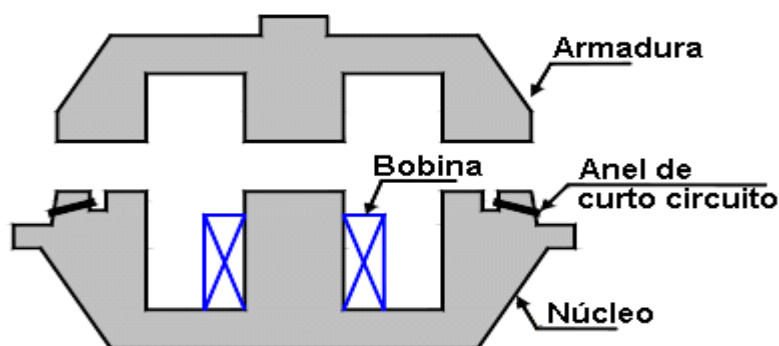


Figura 11: Modelo do núcleo magnético de um contator CA com anel de curto circuito. Fonte: SANTANA (2007).

3.4 NÚCLEO, ARMADURA, BOBINA E SUPORTE DO CONTATOR.

De acordo com a Figura 11 o núcleo e a armadura possuem forma de “E” e são constituídos de chapas metálicas isoladas. Porém, a armadura é móvel e o núcleo é fixo ao suporte do contator juntamente com os contatos principais e auxiliares.

O suporte do contator é um compartimento feito de material isolante de forma a manter o circuito eletromagnético isolado do exterior, a fim de evitar a introdução de sujeira e com isso prejudicar o seu funcionamento. Somente os contatos principais e auxiliares ficam expostos no exterior desse compartimento, para que assim possam ser feitas as devidas ligações dos circuitos ao contator.

A função da bobina é criar o fluxo magnético, o qual ao passar pelo entreferro cria uma força nas faces da armadura e do núcleo de forma que uma

atraia a outra. Essa bobina é constituída de cobre eletrolítico laminado, enrolado em um carretel e sua posição é na coluna central do núcleo. A tensão nessa bobina pode ser idêntica à tensão da linha ou inferior pela redução através de transformadores (Roldán, 1982).

3.5 ANEL DE CURTO CIRCUITO

A bobina do contator eletromecânico, que é alimentada em tensão alternada, gera um campo magnético senoidal que produz uma força magnética (esta força atrai a armadura para junto do núcleo). Essa característica da força gera uma vibração dos contatos, pois as forças de restauração das molas presentes no sistema tende a fazer com que a mola volte a sua forma original, pois neste instante de tempo, a $F_{mola} > F_{mág}$ e com isso, a armadura tende a voltar à sua posição inicial, mas em um instante seguinte $F_{mola} < F_{mág}$ o que faz com que a armadura volte a ter contato com o núcleo, dando origem ao fenômeno conhecido como repique dos contatos (Ruiz, Espinosa, & Romeral, 2010).

Para evitar essas vibrações, são colocados dois anéis de curto circuito ou anéis de sombreamento (geralmente de cobre) conforme mostra a Figura 11. Esse anel de curto circuito terá uma corrente induzida pelo fluxo magnético gerado pela bobina principal do núcleo ferromagnético, essa corrente induzida no anel irá gerar um fluxo magnético defasado de aproximadamente 90° em relação ao fluxo da bobina, essa defasagem é essencial para que a força magnética não caia a zero durante o ciclo senoidal.

3.6 MOLAS DE RETORNO E DE PRESSÃO DOS CONTATOS

O contator possui molas de pressão dos contatos e molas de retorno ou de curso. As molas de pressão de contatos são destinadas a regulação da pressão dos contatos móveis sobre os contatos fixos, já as molas de retorno permitem uma abertura brusca do contator no momento em que a bobina perde a excitação, de forma que, a armadura retorna à posição de repouso. Essas molas

representam a maior parte da resistência à movimentação da armadura para realizar o fechamento dos contatos, porém, forças como atrito entre as partes móveis e a estrutura de suporte também influenciam nesse movimento. (Roldán, 1982)

3.7 CÂMARA DE EXTINÇÃO DO ARCO ELÉTRICO

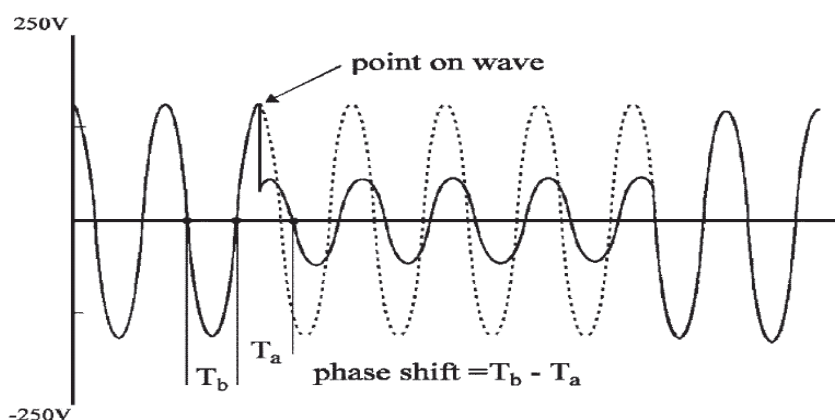
Os contatores possibilitam o chaveamento de circuitos de baixa corrente assim como para circuitos de corrente elevada. No caso dos circuitos com elevada corrente no momento em que é realizada a abertura dos contatos, os quais dão passagem à corrente que alimenta o circuito de potência, o circuito não se abre instantaneamente e, durante um breve instante de tempo há a ocorrência de um arco elétrico. Como a resistência é muito grande, origina-se muito calor, debilitando os contatos, desgastando-os por corrosão. Logo, em circuitos que absorvem muita corrente, é conveniente reduzir o arco e apagá-lo o mais rápido possível, para isso, são utilizadas câmaras de extinção (também chamadas de sistema de sopro) as quais realizam a extinção do arco elétrico através de diversos métodos, como sopro de ar comprimido, sopro magnético, banho de óleo, câmaras desionizadoras (Roldán, 1982).

3.8 FUNCIONAMENTO DE UM CONTATOR ELETROMECAÂNICO

O funcionamento do contator eletromecânico consiste na energização da bobina central, a qual irá gerar um campo magnético que se concentra no núcleo fixo do dispositivo, esse fluxo criará uma força magnética no entreferro que irá atrair a armadura (parte móvel) onde estão também os contatos, os quais também serão deslocados. A velocidade com que os contatos irão fechar leva em consideração a força magnética proveniente da bobina e a força mecânica das molas que atuam no sentido contrário, as quais são responsáveis pela abertura dos contatos.

3.9 AFUNDAMENTO DE TENSÃO

O afundamento de tensão é definido com sendo uma redução súbita da tensão de alimentação, para um valor que corresponde entre 10% e 90% da tensão nominal seguida de uma recuperação da tensão nominal em um pequeno intervalo de tempo, ver Figura 12. A análise do nível de afundamento de tensão leva em consideração apenas a magnitude e a duração do evento. Sendo que, para tensões abaixo de 10% da tensão nominal e com duração de alguns segundos ou mais, são consideradas como transitórios de subtensão e definidos pela norma como pequenas interrupções (Djokic', Milanovic', & Kirschen, 2004).



**Figura 12: Afundamento de tensão no ponto de 90°, com diferença de fase igual a $T_b - T_a$.
Fonte: DJOKIC', MILANOVIC' e KIRSCHEN (2004).**

O fenômeno de afundamento de tensão tem como principais causas:

- Chaveamento de cargas pesadas: O chaveamento de grandes cargas, tais como grandes motores, ou as fortes flutuações características de algumas cargas podem causar grandes variações de corrente, que, no seu efeito, são semelhantes a corrente de curto-circuito. Embora, geralmente os chaveamentos de cargas tenham consequências menos severas nos pontos em que ocorrem, as alterações de tensão que provocam em locais distantes podem ser indistinguíveis daquelas causadas por curtos-circuitos (MAIA, 2008).
- Partida de motores: Assim como no chaveamento de cargas pesadas, a partida de motores causa uma queda momentânea na tensão de

alimentação devido ao pico de corrente necessário para magnetizar o núcleo e vencer a inércia do rotor até que o motor atinja a velocidade nominal de operação.

- Falta no sistema elétrico: Quando da ocorrência de faltas no sistema, os afundamentos de tensão ocorrem devido à circulação de corrente de falta pela impedância do sistema, ocasionando uma queda de tensão no ponto de interesse. Nestes casos os afundamentos têm seu tempo determinado por dispositivos de eliminação de faltas (FERNANDES, 1999).

3.10 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA E SOLUÇÃO PROPOSTA

Os contatores são muito utilizados nas indústrias, é nesses locais que ocorre frequentemente os afundamentos de tensão devido à variação de carga. Durante esse afundamento de tensão, a alimentação da bobina do contator é prejudicada por um pequeno intervalo de tempo e em seguida, a bobina é energizada novamente com a restauração da tensão normal de operação. Isso faz com que os contatos abram e fechem rapidamente (fenômeno de repique), isso se repete por um pequeno intervalo de tempo, mas que danifica os contatos e a própria instalação, pois pode causar o desligamento do circuito o qual o contator é responsável de comandar, com isso, pode haver prejuízo para as empresas que necessitem que esses circuitos estejam ligados.

Este projeto não visa fornecer uma solução para este problema, mas sim, um estudo das forças que interagem no núcleo magnético do contator durante esse afundamento de tensão e dessa forma, caracterizar o problema de repique para que uma solução apropriada possa ser encontrada em projetos futuros.

3.11 METODOLOGIA

O desenvolvimento do projeto se baseia primeiramente em um estudo do contator e suas partes, para compreender as principais causas de seus

problemas principalmente em relação a fenômeno de repique, que ocorre no contator e cujos efeitos podem ser transmitidos aos demais componentes do circuito ao qual o contator está ligado.

Num segundo momento, será feito uma modelagem matemática das forças magnéticas e mecânicas que interagem no circuito magnético presente no interior do contator sem considerar o efeito da histerese. Através dos dados construtivos (fornecidos pelo fabricante) do contator será feita uma simulação no EFCAD a fim de, verificar a distribuição das forças magnéticas e das linhas de fluxo magnético no entreferro do contator e também retirar alguns dados necessários para complementar à modelagem matemática. Uma segunda simulação será feita no programa Matlab®/Simulink® com a modelagem matemática, para verificar o comportamento dinâmico do contator um afundamento de tensão na rede de alimentação e com isso, analisar as forças magnéticas distribuídas ao longo do núcleo ferromagnético do contator.

A terceira etapa consiste em fazer uma experiência prática, onde será reproduzido o fenômeno de repique no contator, dessa forma, serão analisadas as características desse fenômeno. E por fim, uma comparação entre os resultados simulados e a experiência prática será apresentada.

4. MODELAGEM MATEMÁTICA DA DINÂMICA DO CONTATOR CA

Nesta seção serão apresentados detalhadamente os procedimentos tomados para a elaboração do trabalho proposto nas seções anteriores. Todo o desenvolvimento apresentado a seguir se baseia no contator exibido na Figura 13.

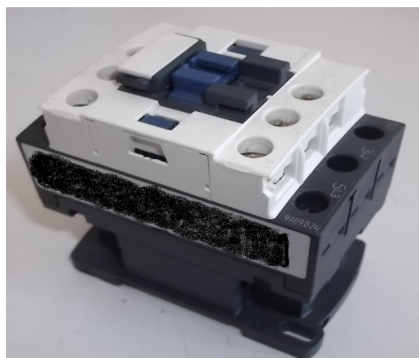


Figura 13: Contator CA, tensão de 127V e frequência de 60Hz.

A Figura 14 mostra as partes constituintes do núcleo do contator exibido na Figura 13, da esquerda para a direita tem-se respectivamente a bobina, o núcleo ferromagnético, a mola de retorno e as molas de contato. Sendo que, a parte do núcleo ferromagnético que possui o anel de curto circuito (anel cc) é chamada de parte fixa, por ficar fixo na carcaça do contator durante sua operação, enquanto que, a outra parte é dita parte móvel, pois ela se movimenta de modo a alterar a posição do entreferro quando o contator entra ou sai de operação.

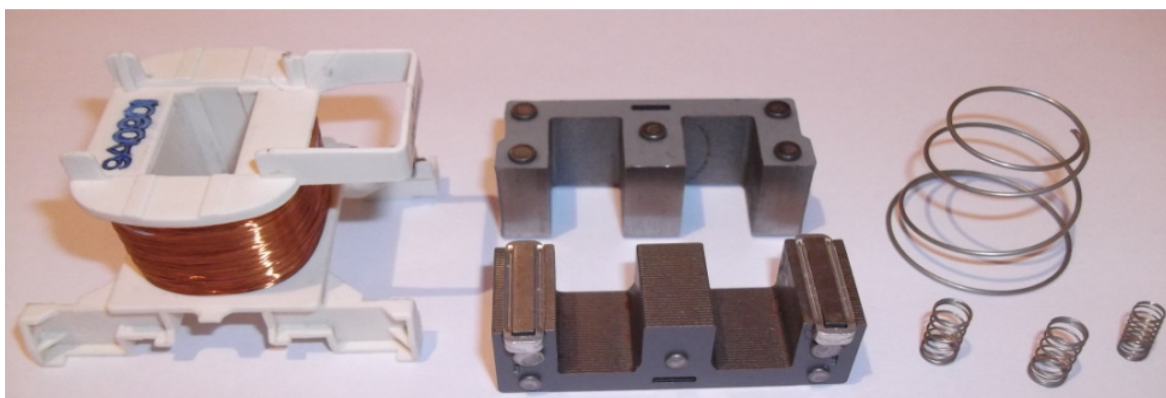


Figura 14: Partes que constituem o núcleo do contator, bobina, núcleo ferromagnético e as molas de retorno e de contatos.

A Figura 15 apresenta o esquema da parte interna do contator CA apresentado na Figura 13 e a posição de cada uma das partes individuais do contator apresentadas na Figura 14.

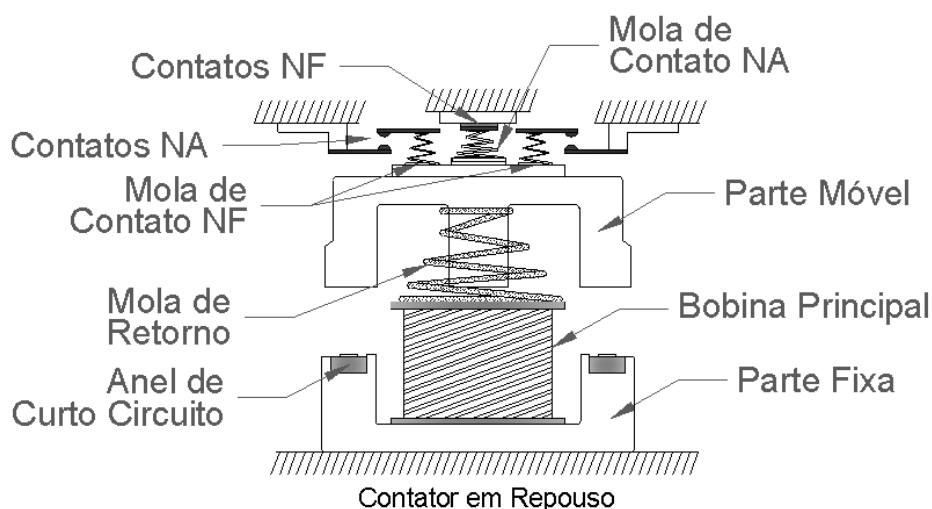


Figura 15: Esquema da disposição espacial dos componentes internos do contator.

Para a realização de cálculos e análises do comportamento dinâmico de um contator CA é feito a modelagem matemática da dinâmica do mesmo, para tal, se utiliza a analogia do circuito magnético do contator com o seu circuito elétrico equivalente apresentado na Figura 16.

O circuito elétrico da Figura 16b foi obtido baseado na analogia entre circuito elétrico e magnético apresentado na seção 2.4. A simplificação desse circuito, Figura 16c, é obtida considerando-se que ambos os lados (esquerdo e direito) do circuito da Figura 16b são iguais, com isso, de acordo com Bastos (1996), pode-se simplificar o circuito magnético da Figura 16a utilizando apenas metade do circuito magnético para análise. Isso faz com que o fluxo magnético (Φ_1) que circula pela lateral do circuito da Figura 16b seja igual ao que circula pelo centro do circuito. Porém, as resistências R_f , R_u e R_s diminuem para metade do seu valor original, para que assim, possa se manter a equivalência entre os circuitos da Figura 16b e da Figura 16c.

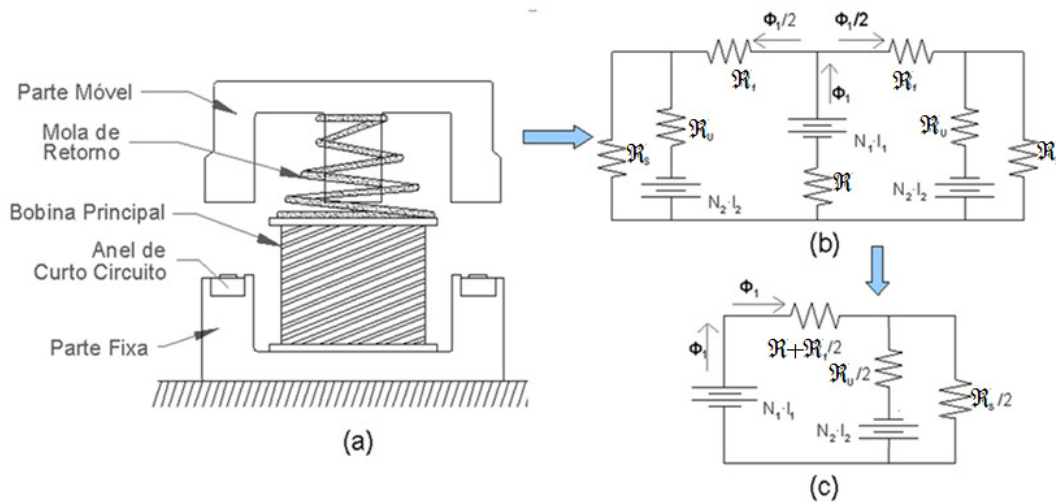


Figura 16: a) Esquema do circuito magnético do contator. b) Representação da analogia do circuito magnético do contator em circuito elétrico. c) Simplificação do circuito elétrico apresentado em b.

Fonte: (Ruiz, Espinosa, & Romeral, 2010)

Inicia-se a modelagem matemática através da determinação das relutâncias (\mathfrak{R}) do circuito magnético do contator apresentadas na Figura 16b e simplificadas na Figura 16c, tais relutâncias podem ser expressas por:

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu \cdot A} \quad 19$$

Onde: l é caminho médio magnético, μ é a permeabilidade magnética do meio e A é a área da seção transversal por onde o fluxo magnético atravessa.

Na Figura 16b aparece uma relutância \mathfrak{R} no centro do circuito, que representa a resistência dos enrolamentos devido a não idealidade da fonte de alimentação. A mesma resistência \mathfrak{R} permanece no circuito simplificado da Figura 16c.

Para determinação da relutância total do contator apresentado na Figura 16a, é feita uma análise apenas de metade do contator para simplificação de cálculos, para tal, define-se dois caminhos magnéticos partindo do ponto P_1 para o ponto P_0 , conforme ilustra a Figura 17b.

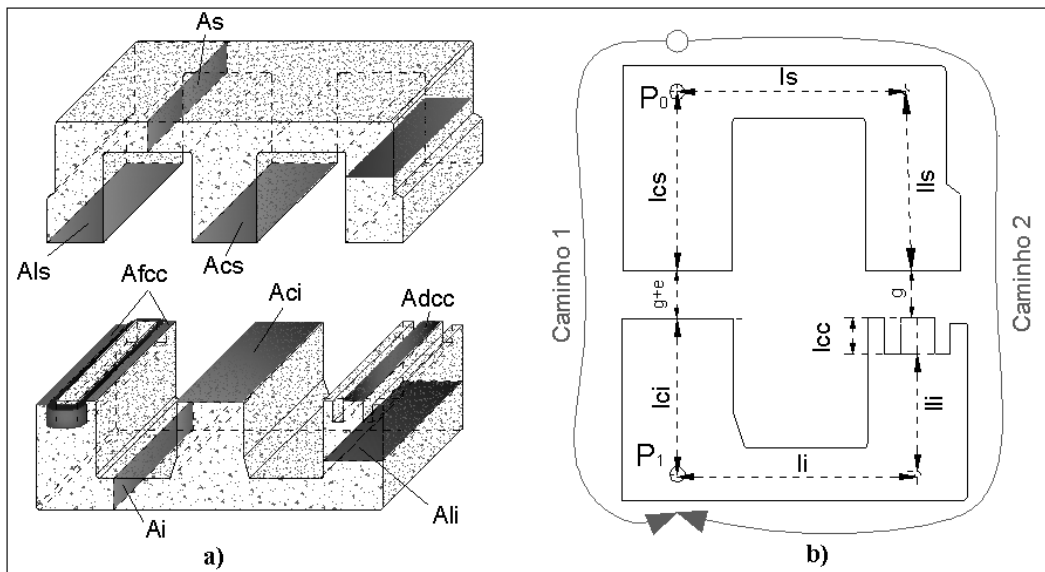


Figura 17: a) Núcleo ferromagnético com as áreas de cada região destacadas e b) Detalhes do caminho médio magnético do ponto P_0 ao ponto P_1 .

A Figura 17a ilustra as áreas utilizadas para as análises das relutâncias pelos caminhos 1 e 2, enquanto a Figura 17b ilustra os caminhos magnéticos, as equações das relutâncias definidas com base na equação (19), são apresentadas a seguir:

- Caminho 1:

- Relutância no ferro e entreferro central (\mathfrak{R})

$$\mathfrak{R} = \frac{l_{cs}}{u_m \cdot A_{cs}} + \frac{l_{ci}}{u_m \cdot A_{ci}} + \frac{e}{u_0 \cdot A_e} + \frac{g}{u_0 \cdot (A_{cs} + A_{ci})/2} \quad 20$$

- Caminho 2:

- Relutância do ferro (\mathfrak{R}_f)

$$\mathfrak{R}_f = \frac{l_s}{u_m \cdot A_s} + \frac{l_i}{u_m \cdot A_i} + \frac{l_{ls}}{u_m \cdot A_{ls}} + \frac{l_{li}}{u_m \cdot A_{li}} \quad 21$$

- Relutância interna ao anel de curto circuito e entreferro lateral (\mathfrak{R}_u)

$$\mathfrak{R}_u = \frac{l_{cc}}{u_m \cdot A_{dcc}} + \frac{g}{u_0 \cdot A_{dcc}} \quad 22$$

- Relutância externa ao anel de curto circuito e entreferro lateral (\mathfrak{R}_s)

$$\mathfrak{R}_s = \frac{l_{cc}}{u_m \cdot A_{fcc}} + \frac{g}{u_0 \cdot A_{fcc}} \quad 23$$

Onde: g é o valor do entreferro, “ u_0 ” é permeabilidade magnética no vácuo e “ u_m ” é a permeabilidade magnética do material e “ e ” é a diferença entre o entreferro central e o entreferro lateral.

As equações elétricas (equações (24) e (25)) são obtidas através das equações magnéticas (equações (26) e (27)), por meio de uma analogia entre o circuito magnético (Figura 16c) e o seu respectivo circuito elétrico. Enquanto que, as equações magnéticas são obtidas da aplicação da lei das malhas de Kirchhoff no circuito da Figura 16c, desde que, se considere que o contator opera na região linear da sua curva de saturação.

$$V = I_1 \cdot R_1 + N_1 \cdot \frac{d\phi_1}{dt} \quad 24$$

$$0 = 2 \cdot I_2 \cdot R_2 + N_2 \cdot \frac{d\phi_2}{dt} \quad 25$$

$$I_1 = \frac{\phi_1}{N_1} \cdot \left(\mathfrak{R} + \frac{\mathfrak{R}_f}{2} + \frac{\mathfrak{R}_u}{2} \right) - \frac{\phi_2}{N_1} \cdot \left(\frac{\mathfrak{R}_u}{2} \right) \quad 26$$

$$I_2 = \frac{\phi_2}{N_2} \cdot \left(\frac{\mathfrak{R}_s}{2} + \frac{\mathfrak{R}_u}{2} \right) - \frac{\phi_1}{N_2} \cdot \left(\frac{\mathfrak{R}_u}{2} \right) \quad 27$$

Onde: ϕ_1 é o fluxo magnético gerado pela bobina principal, ϕ_2 é o fluxo magnético gerado pelo anel de curto circuito, R_1 é a resistência da bobina, I_1 é a corrente na bobina principal, I_2 é a corrente induzida no anel de curto circuito (anel cc), N_1 é o número de espiras da bobina principal e N_2 é o número de espiras do anel cc.

A Figura 18 exhibe as forças que atuam na parte móvel do contator (lembrando que se considerou apenas a metade do núcleo magnético conforme ilustra a Figura 17b).

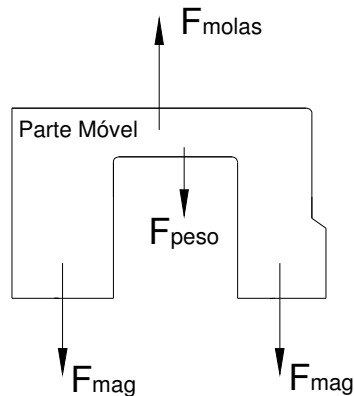


Figura 18: Forças que atuam na parte móvel do contator.

Onde: F_{mag} é a força de origem magnética, F_{peso} é a força peso e F_{molas} é a força resultante das molas de retorno e de contato.

De acordo com a segunda lei de Newton e considerando que a aceleração é equivalente a segunda derivada do deslocamento em relação ao tempo, as forças exibidas na Figura 18 podem ser expressas da seguinte forma:

$$m \cdot a = \sum F$$

$$m \cdot \frac{dX^2}{d^2t} = F_{mag} + F_{peso} - F_{molas} \quad 28$$

Onde: “m” é a massa e “a” é a aceleração da parte móvel do contator; “X” é o deslocamento da parte móvel do contator;

Através do método do tensor de maxwell (Bastos, 1996) determinou-se a força magnética (F_{mag}) em função apenas dos fluxos magnéticos em cada entreferro, obtendo-se a seguinte equação:

$$F_{mag} = \frac{\phi_1^2}{2 \cdot u_0 \cdot A_{cs}} + \frac{\phi_2^2}{2 \cdot u_0 \cdot A_{ls}} + \frac{\phi_1 \cdot \phi_2}{2 \cdot u_0 \cdot (A_{cs} + A_{ls})} \quad 29$$

A F_{peso} é o produto entre a massa da parte móvel e a aceleração da gravidade ($g = 9,8m/s^2$), conforme apresenta a equação (30).

$$F_{\text{peso}} = m \cdot g$$

A Figura 19a apresenta a disposição espacial de cada componente presente no contator em estudo, tal figura exhibe os componentes do contator na posição de repouso, ou seja, para o momento em que o contator não possui nenhum tipo de energização.

Já a Figura 19b apresenta uma situação que demonstra o comportamento dos componentes para quando o contator está energizado (Figura 19b).

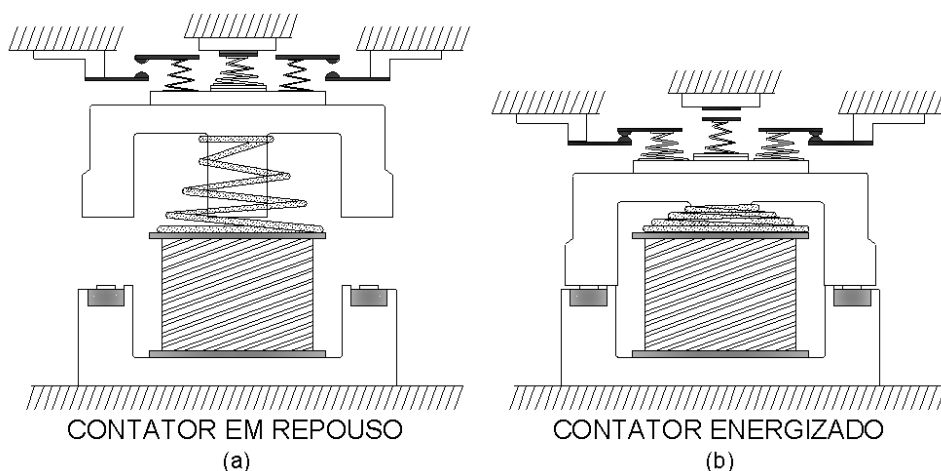


Figura 19: Ilustração do contator em situação de repouso e energizado.

Conforme a Figura 15 o contator apresenta uma mola de retorno, duas molas de contato normalmente abertas (NA) e um mola de contator normalmente fechada (NF). Para determinar a F_{molas} analisam-se na Figura 19 quais as molas que influenciam na operação do contator tanto na situação de repouso como na energizada. Com isso, considerando a posição de repouso do contator, as molas dos contatos NA não exercem nenhuma força sobre a parte móvel do contator, entretanto, quando o contator está energizado, é o contato NF que não exerce nenhuma força, pois a mola do contato NF fica totalmente livre da ação de forças de tração ou compressão.

Portanto, a F_{molas} é determinada para dois instantes, o primeiro é para a situação de repouso onde o deslocamento (X) da parte móvel é nulo ($X = 0$), o segundo instante é referente à situação de energização onde a parte móvel sofre

deslocamento, ou seja, $X \neq 0$. Com isso, a F_{molas} pode ser descrita conforme a equação (31).

$$F_{molas} = \begin{cases} k_1 \cdot (X_{mp} - X) - k_2 \cdot (X_{mnf} - X), & X = 0 \\ k_1 \cdot (X_{mp} - X) + 2 \cdot k_3 \cdot (X_{mna} - X), & X \neq 0 \end{cases} \quad 31$$

Onde “X” é o deslocamento da parte móvel; k_1 , k_2 e k_3 são as constantes de elasticidade das molas de retorno, molas de contato NF e contatos NA, respectivamente; X_{mp} comprimento da mola de retorno; X_{mnf} comprimento da mola do contato NF; X_{mna} comprimento da mola do contato NA.

Sabendo que a derivada segunda da posição é igual á derivada primeira da velocidade, conforme apresenta a equação (32), pode-se substituir a equação (32) na equação (28), obtendo-se a equação (33).

$$\frac{dX^2}{d^2t} = \frac{dVel}{dt} = a \quad 32$$

$$(F_{mag} + F_{peso} - F_{mola}) = \frac{dVel}{dt} \cdot m \quad 33$$

Para simular o comportamento dinâmico do contator definiram-se quatro equações de estado baseadas nas equações descritas anteriormente nesta seção. A primeira é obtida substituindo a equação (26) na equação (24) e resolvendo para $d\phi_1/dt$ obtendo assim a equação (34). A segunda equação é obtida substituindo a equação (27) na equação (25) e resolvendo para $d\phi_2/dt$ obtendo a equação (35). A terceira equação de estado é obtida isolando a derivada na equação (33), definida anteriormente, obtendo-se a equação (36). A quarta equação é dada pela equação (37) onde a taxa de variação do entreferro resulta em uma velocidade para a parte móvel.

$$\frac{d\phi_1}{dt} = \frac{V}{N_1} - \frac{\phi_1 \cdot R_1}{N_1^2} \cdot \left(\mathfrak{R} + \frac{\mathfrak{R}_f}{2} + \frac{\mathfrak{R}_u}{2} \right) + \frac{\phi_2 \cdot R_1}{N_1^2} \cdot \left(\frac{\mathfrak{R}_u}{2} \right) \quad 34$$

$$\frac{d\phi_2}{dt} = \frac{\phi_1 \cdot 2 \cdot R_2}{N_2^2} \cdot \left(\frac{\mathcal{R}_u}{2}\right) - \frac{2 \cdot R_2 \cdot \phi_2}{N_2^2} \cdot \left(\frac{\mathcal{R}_s}{2} + \frac{\mathcal{R}_u}{2}\right) \quad 35$$

$$\frac{dVel}{dt} = \left(\frac{1}{m}\right) \cdot (F_{mag} + F_{peso} - F_{mola}) \quad 36$$

$$\frac{dX}{dt} = Vel \quad 37$$

Com as quatro equações de estado definidas, é possível realizar através de um programa computacional a simulação do comportamento dinâmico do contator em análise, na seção seguinte serão apresentadas os resultados das simulações realizadas. Mas antes de simular é necessário obter os valores de algumas variáveis do contator que ainda são desconhecidas, como por exemplo:

- Dimensões e massa do núcleo ferromagnético do contator;
- Indutância e Número de espiras da bobina principal (N_1);
- Resistência da bobina principal (N_1) e do anel CC;
- Comprimento da mola de retorno (X_{mp}) e das molas de contato (X_{mni} e X_{mna});
- Coeficiente de elasticidade das molas (k_1 , k_2 e k_3);

A massa da parte móvel do contator foi medida utilizando uma balança digital com precisão de $\pm 0,001$ gramas, obtendo uma massa de 0,150 gramas. Para realizar as medidas das dimensões do contator utilizou-se um paquímetro digital com precisão de $\pm 0,01$ milímetros. Os resultados das medições são apresentados na Figura 20.

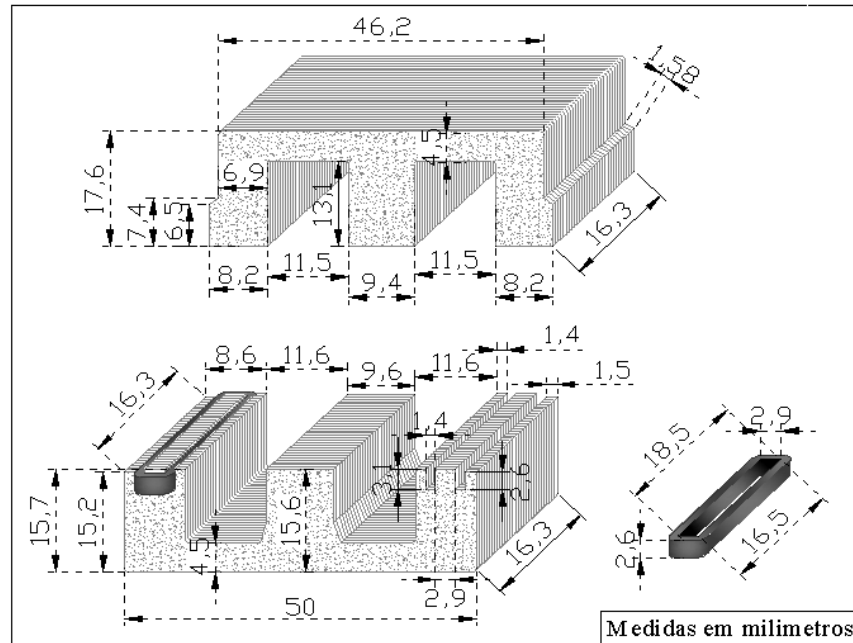


Figura 20: Esquema detalhado das medidas do núcleo ferromagnético e do anel de curto circuito do contator, medidas em milímetros.

Com o auxílio de uma ponte LCR mediu-se a indutância da bobina principal (N_1) apresentada na Figura 15, a qual apresentou 1,17H para um entreferro de 5mm. A resistência elétrica da bobina foi medida com a ajuda de um multímetro digital, obtendo uma resistência de 535 Ω . Para determinar a resistência do anel CC (R_a) utilizou-se uma equação aproximada dada por:

$$R_a = \frac{l_a}{\sigma \cdot S_a} \quad 38$$

Onde: R_a é a resistência do anel CC; " l_a " é o perímetro externo do anel; " σ " é a condutividade do cobre e equivale a $5,8 \times 10^7$; " S_a " é a seção transversal do anel CC.

Utilizando os dados apresentado na Figura 20, se obteve uma resistência de 0,000208 Ω para o anel CC, conforme demonstra a equação a seguir.

$$R_a = \frac{0,044}{5,8 \times 10^7 \cdot (1,4 \times 10^{-3} \cdot 2,6 \times 10^{-3})} = 0,000208$$

Para determinar o número de espiras (N_1) da bobina principal do contator, realizou-se um experimento baseado no funcionamento de um transformador. Os passos para realização do experimento é apresentado na Figura 21. Onde, o primeiro passo mostra a isolamento que é colocada sobre a bobina principal utilizando uma fita crepe (pode ser utilizado um papel ou algum outro material que possua propriedades isolantes).

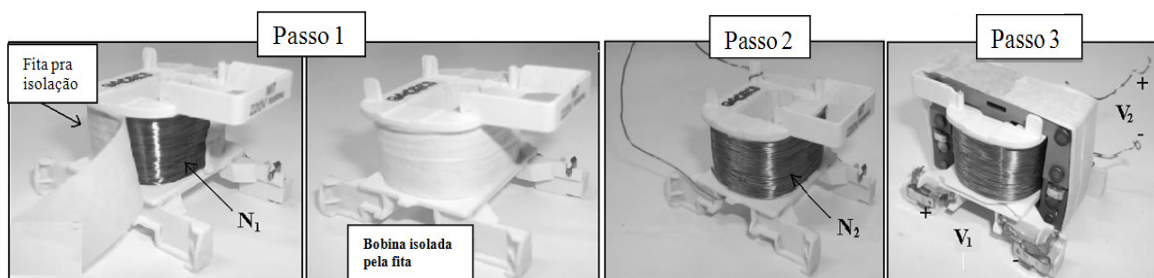


Figura 21: Passo a passo da montagem para determinação do número de espiras da bobina principal N_1 .

No segundo passo, é feita uma segunda bobina (N_2) utilizando um fio de cobre esmaltado, o qual é enrolado sobre a bobina N_1 até cobrir todo o espaço que possuía a fita. Ao todo foram 28 espiras, ou seja, $N_2 = 28$ espiras. E por fim, coloca-se o núcleo ferromagnético do contator, esse núcleo deve estar com as suas duas partes (parte móvel e parte fixa) bem presas uma na outra para aproveitar ao máximo o fluxo magnético gerado e assim diminuem-se as perdas e aumenta-se a precisão dos resultados.

Com as duas bobinas montadas, colocou-se uma tensão conhecida no terminal V_1 utilizando um gerador de função, o qual fornece uma tensão de 0 á 7 V_{rms} . E no terminal de saída V_2 mede-se a tensão com um multímetro, o esquema de ligação é apresentado na Figura 22.

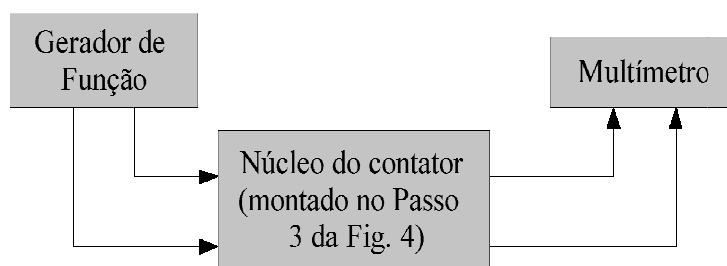


Figura 22: Esquema para ligação do gerador de função e do multímetro, no núcleo do contator.

O cálculo do número de espiras da bobina N_1 é dado por:

$$\frac{V_1}{N_1} = \frac{V_2}{N_2}$$

$$N_1 = \frac{V_1}{V_2} \cdot N_2$$

39

3. O resultado das medições e do cálculo de N_1 apresenta-se na Tabela

Tabela 3: Dados das medições realizadas no experimento da Figura 21.

Nº de medições	Tensão em V_1 (V_{rms})	Tensão em V_2 (mV_{rms})	Nº de espiras de N_1
1	7,02	40,5	4853,3
2	6,46	37,4	4836,4
3	5,97	34,5	4845,2
4	5,47	31,6	4846,8
5	4,98	28,7	4858,5
6	4,47	25,8	4851,2
7	3,49	20,1	4861,7
8	2,48	14,2	4890,1
9	1,5	8,4	5000,0
10	0,88	5,0	4828,0
11	126,4	734	4821,8
Média			4863

Os resultados obtidos na Tabela 3 mostram que, apesar da fonte de alimentação utilizada para fornecer V_1 possuir no máximo uma variação de 0 á 7 V_{rms} , os valores calculados para N_1 através da equação (39), foram muito próximos. O mesmo ocorreu quando se aplicou uma tensão de 126,4 V muito maior do que as utilizadas anteriormente (ver medição número 11, Tabela 3). Analisando as medições 9 e 11 da Tabela 3, que são os casos em que o valor de N_1 é máximo e mínimo, respectivamente, verifica-se que a variação de 1,5V para 126,4V resultou numa variação de apenas 3,54% no valor calculado para N_1 .

De acordo com a Figura 15 o contator possui uma mola de retorno e três molas de contato (sendo duas molas para os contatos normalmente aberto (NA) e uma para o contato normalmente fechado (NF)). Para a determinação do comprimento de cada mola presente no contator utilizou-se o paquímetro digital com precisão de $\pm 0,01$ mm, e mediu-se as molas em seu estado de repouso,

com isso a mola de retorno apresentou um comprimento igual a 24 mm, enquanto que as molas de contato apresentaram 10mm de comprimento cada uma.

Outra variável que é importante conhecer o valor é a constante elástica tanto da mola de contato como da mola de retorno. Para determinar essa constante de elasticidade das molas, utilizou-se um dinamômetro, uma régua, um suporte fixo, uma mola e um suporte para a mola. Montou-se um esquema conforme ilustra a Figura 23.

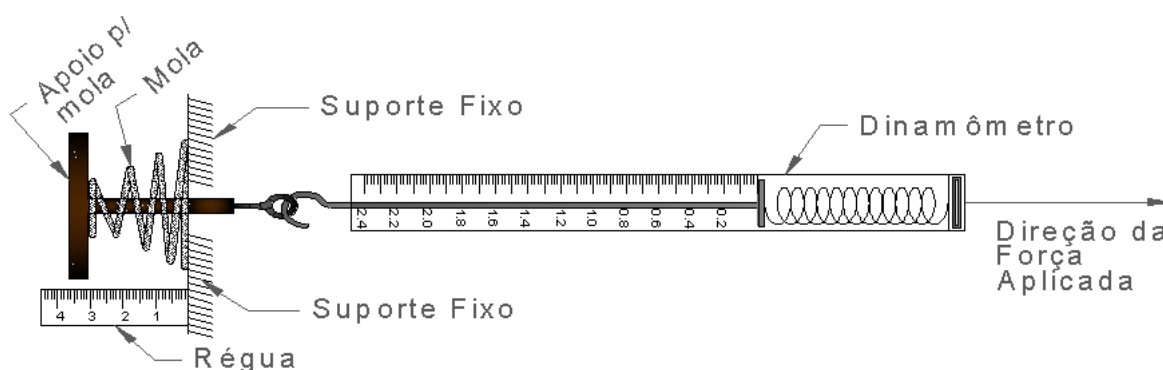


Figura 23: Esquema montado para determinar a constante elástica da mola de retorno e das molas de contato NA e NF.

Após montado o esquema da Figura 23, aplica-se uma força no dinamômetro, fazendo com que o suporte da mola se mova e conseqüentemente comprima a mola. Com a utilização de uma régua é possível determinar a compressão sofrida pela mola para uma dada força cuja magnitude é indicada pelo dinamômetro. Realizou-se esse experimento para a mola de retorno e para as molas de contato NA e NF. Com os dados de deslocamento de compressão “x” e de força, calculou-se a constante de elasticidade “K” das molas através da Lei de Hooke, onde $F = K \cdot x$. Tais dados apresentam-se na Tabela 4.

Tabela 4: Constante de elasticidade K da mola de retorno e das molas de contato.

Mola de Retorno (24mm)			Molas de Contato NA (10mm)			Mola de Contato NF (10mm)		
Força (N)	Desl. “x” (mm)	$K_1 = F/x$ (N/m)	Força (N)	Desl. “x” (mm)	$K_2 = F/x$ (N/m)	Força (N)	Desl. “x” (mm)	$K_3 = F/x$ (N/m)
0,2	0,5	400,0	0,5	1	500	0,5	1	500,0
0,5	3	166,7	0,75	4	187,5	0,75	4	187,5
0,75	6	125,0	1	7	142,9	1	8	125,0
1	9	111,1	1,5	9	166,7	1,5	10	150,0
1,5	12	125,0	K ₂ médio		124,6	K ₃ médio		120,3
2	15	133,3						
2,5	18	138,9						
4	22	181,8						
K ₁ médio		172,7						

Como as molas de contato são muito pequenas e os aparelhos utilizados para medição não são muito adequados para este caso, encontrou-se certa dificuldade na determinação da constante de elasticidade das molas de contato, por isso, obteve-se poucas medições, conforme apresenta a Tabela 4. Para cada mola calculou-se uma constante de elasticidade média através da equação (15), a fim de simplificar os cálculos posteriores, pois, de acordo com a Tabela 4, cada mola apresenta grande variação nos valores do K calculado, o que indica a não linearidade das molas durante a sua deformação.

5. SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DO CONTATOR CA

Esta seção tem por objetivo demonstrar os resultados obtidos da simulação das linhas de campo magnético utilizando o programa EFCAD, e através do uso do programa Matlab será simulado o comportamento de um contator CA durante a ocorrência do fenômeno conhecido por afundamento de tensão. Será apresentada também nesta seção uma breve análise dos resultados das simulações que incluem o comportamento da tensão de alimentação do contator, assim como dos fluxos, correntes, forças magnéticas e mecânicas que atuam no contator.

5.1 SIMULAÇÃO DO CONTATOR CA NO PROGRAMA EFCAD

Utilizou-se o programa EFCAD para que através de uma simulação utilizando o método de elementos finitos possa se conhecer o comportamento das linhas de campo magnéticas que interagem no núcleo ferromagnético do contator quando o mesmo é alimentado por uma determinada tensão nos terminais primários.

A Figura 24 apresenta o comportamento das linhas de campo magnético que interagem no núcleo do contator CA quando é aplicada uma tensão não nula na bobina principal. Na Figura 24 considerou-se que os anéis de curto circuito ainda não sofreram nenhuma indutância devido ao fluxo magnético criado pela bobina principal, portanto, os anéis não geram nenhum fluxo magnético. O fluxo magnético gerado pela bobina principal pode ser visualizado na Figura 24.

Tanto para a simulação da Figura 24 como para as simulações posteriores, desconsideraram-se os efeitos de histerese, espriamento, efeito de borda e fator de empilhamento que ocorrem no núcleo ferromagnético e nos entreferros do contator.

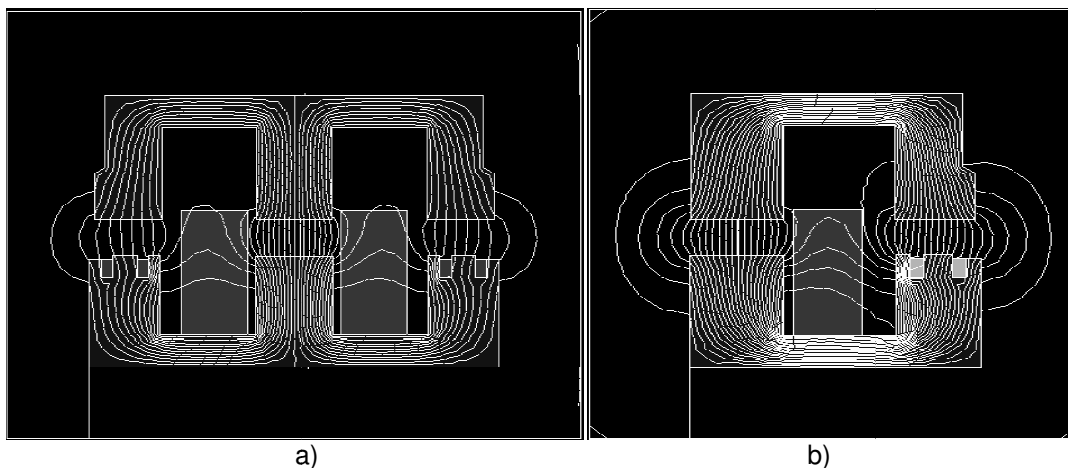


Figura 24: Linhas de campo magnéticas traçadas pelo programa EFCAD, em a) linhas de campo magnético traçadas para o núcleo inteiro do contator e b) para apenas metade do núcleo.

5.2 SIMULAÇÃO DO CONTATOR CA NO PROGRAMA MATLAB

Na seção anterior foram definidas quatro equações de estado que regem o comportamento dinâmico de um contator CA, com isso, realizaram-se simulações com o auxílio do programa computacional Matlab. No programa desenvolvido foram descritas as informações referentes às dimensões físicas do contator e as características de suas partes constituintes (como massa da parte móvel, comprimento das molas de retorno e de contatos, número de espiras da bobina principal e anel de curto-circuito, etc). Introduziram-se também as quatro equações de estado que descrevem o comportamento dinâmico do contator, para resolvê-las utilizou-se o método de Runge-Kutta de quarta e quinta ordem (comando ode45 no matlab).

A primeira simulação realizada denominada de “liga-desliga” consistiu em simular o contator no momento em que ele é ligado e desligado, ou seja, quando o contator está operando conforme o padrão de fabricação. Para isso, a simulação “liga-desliga” irá submeter o contator a uma variação de tensão de 0V para 127 V e depois de 127V para 0V.

O resultado do comportamento da posição da parte móvel do contator é apresentado na Figura 25. Onde é possível observar que no momento em que o contator está desligado o mesmo possui um entreferro de 5mm e quando é aplicada uma tensão em seus terminais, em $t = 0.2$ s, a parte móvel do contator

começa a fechar e quando a posição do entreferro passa a ser de 0mm, isso indica que o contator está totalmente fechado. Em $t = 1.2$ s o contator é desligado, provocando o processo de abertura dos contatos NA do contator.

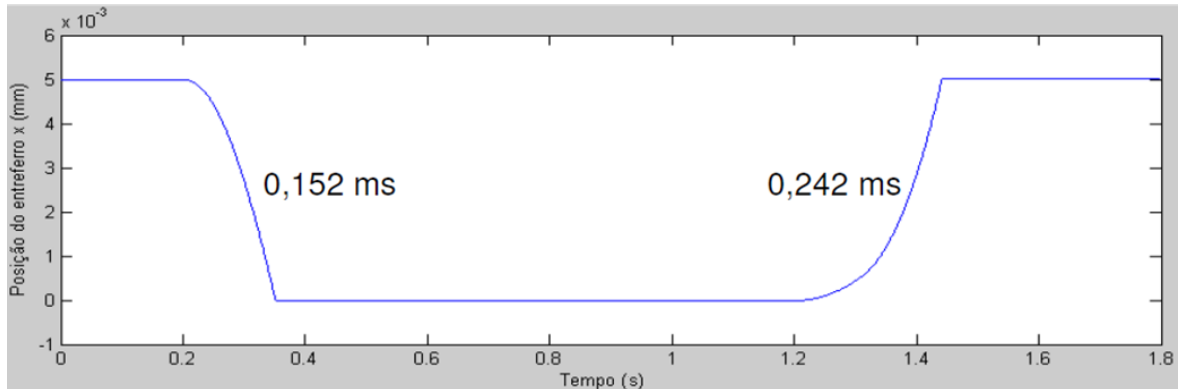


Figura 25: Comportamento do entreferro do contator CA.

A Figura 25 ainda mostra que o tempo de fechamento dos contatos do contator é de 0,152 s, enquanto que seu tempo de abertura é maior e equivale a 0,242 s. Isso ocorre devido ao fato do contator possuir os anéis de curto circuito que mantêm um pequeno fluxo magnético circulando pelo núcleo do contator mantendo os contatos do contator fechados por alguns instantes, fazendo com que o tempo de abertura seja diferente do tempo de fechamento.

O comportamento dos fluxos magnéticos gerados pela bobina principal e pelo anel CC é apresentado na Figura 26, onde é possível notar que a magnitude do fluxo magnético diminui conforme o entreferro diminui, pois durante o período de fechamento dos contatos NA do contator, a relutância magnética diminui de forma proporcional a diminuição do entreferro assim como o fluxo magnético, com isso, tem-se uma magnitude máxima de $46,7 \times 10^{-6}$ Wb para o fluxo magnético gerado pela bobina principal e $9,84 \times 10^{-6}$ Wb para o fluxo magnético gerado pelo anel CC.

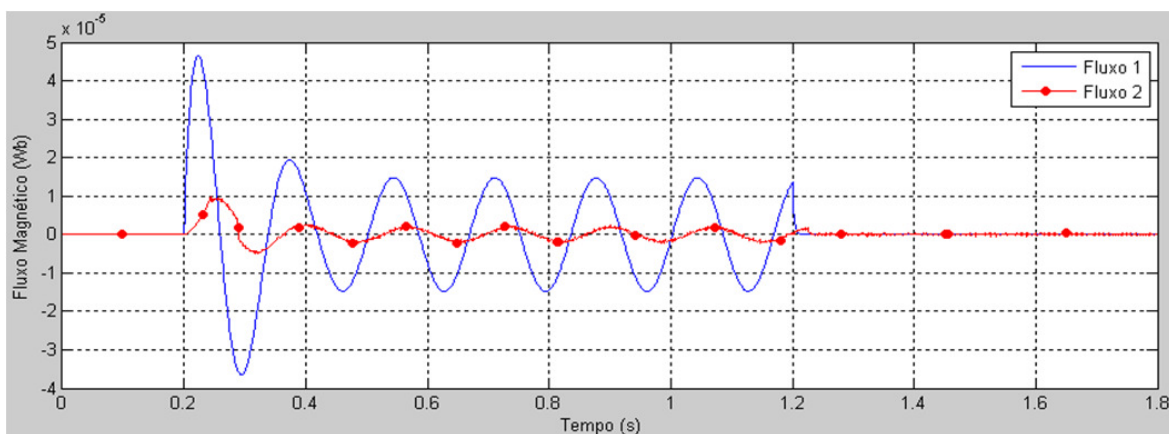


Figura 26: Comportamento do fluxo magnético gerado pela bobina principal (Fluxo 1) e pelo anel CC (Fluxo 2).

No momento em que o contator é desligado, nota-se que as formas de onda do fluxo magnético, apresentadas na Figura 26, sofrem uma mudança abrupta de comportamento, fazendo com que a onda decresça quase instantaneamente até valores próximos de zero.

A Figura 27 apresenta o comportamento da corrente (I_1) que circula pela bobina principal durante a simulação “liga-desliga”. Onde a corrente (I_1) apresentou magnitude de 0,31 A nos instantes iniciais do fechamento e nos instantes em que o contator permanece fechado a corrente mantém uma magnitude de 0,29 A.

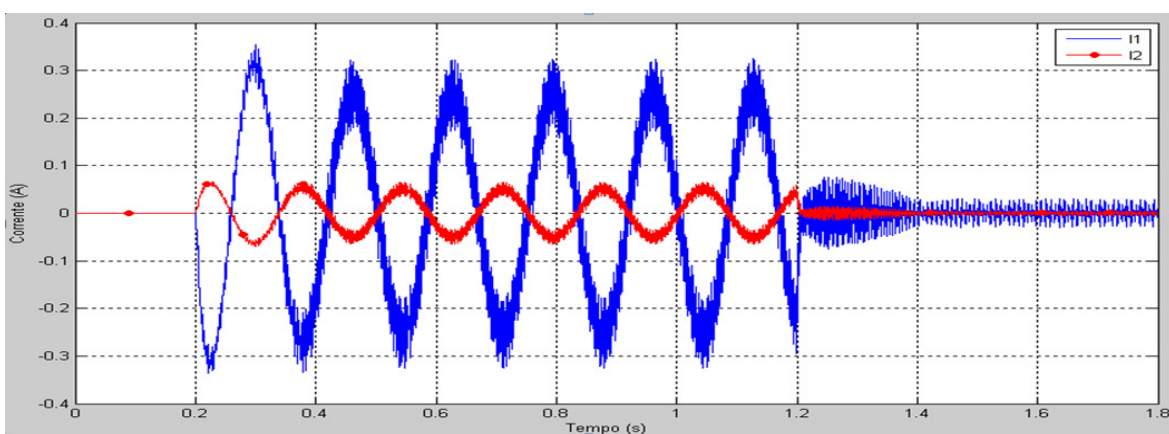


Figura 27: Comportamento da corrente que circula pela bobina principal (I_1) e da corrente induzida no anel CC (I_2).

De acordo com equação (29) a força magnética (F_{mag}) depende exclusivamente do fluxo magnético gerado pela bobina e pelo anel CC, isso explica o comportamento da F_{mag} na Figura 28, onde a maior magnitude da força

está nos instantes iniciais quando o contator é ligado, assim como o fluxo magnético (ver Figura 26).

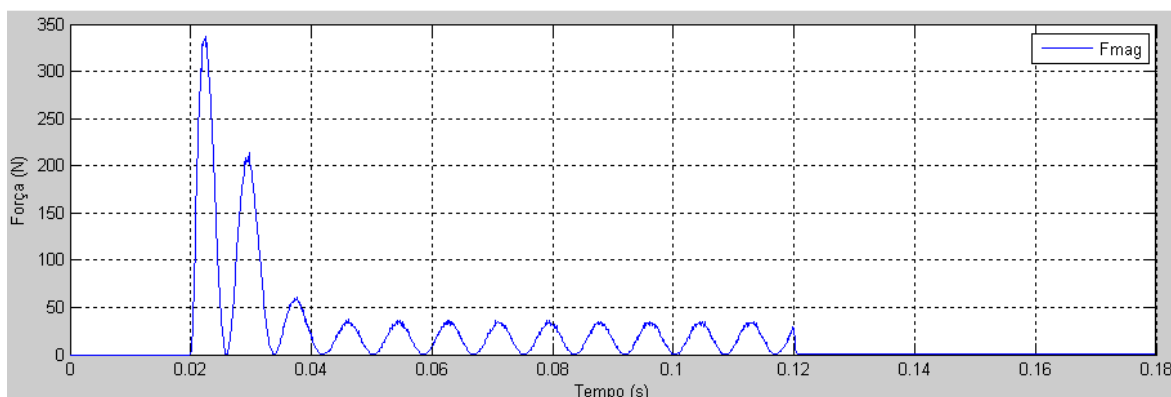


Figura 28: Comportamento da Força Magnética (F_{mag}) e da Força das Molas (F_{mola}).

A Figura 29 mostra o comportamento da força da mola (F_{mola}), descrita pela equação (31), cuja intensidade aumenta no momento em que o contator se fecha, pois nesse momento a mola de retorno (que possui uma constante elástica (k_1) maior) está sendo comprimida.

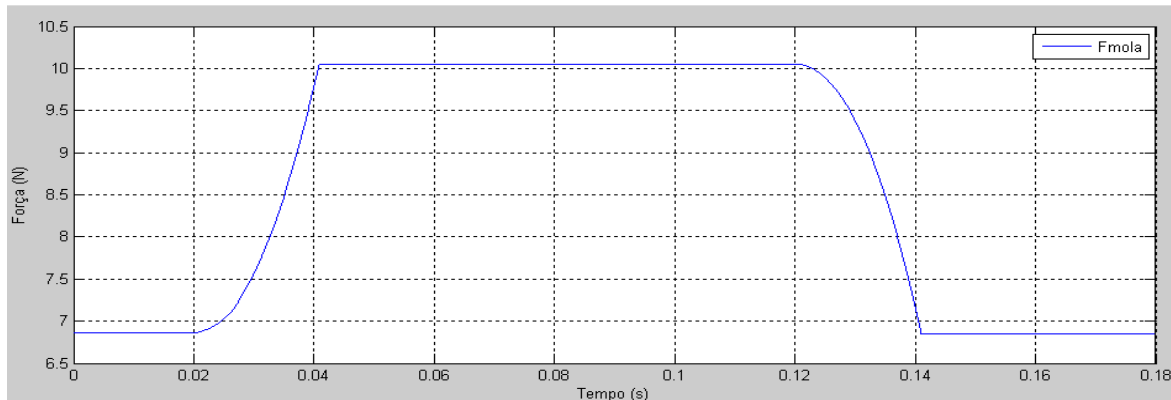


Figura 29: Comportamento da Força das Molas (F_{mola}).

5.3 SIMULAÇÃO DO AFUNDAMENTO DE TENSÃO

Como explicado em capítulos anteriores, um afundamento de tensão é uma redução na magnitude da tensão ou por um aumento na magnitude da corrente, ambas as formas são geralmente de curta duração, onde podem se estender de alguns ciclos da frequência de energia para alguns segundos. O

afundamento de tensão tem grande impacto principalmente no usuário final, causando defeitos ou paradas em diversos processos industriais trazendo perdas financeiras consideráveis (EM, 2012).

As simulações anteriores mostraram o comportamento de operação normal do contator CA, nesta seção, o contator será submetido a diferentes níveis de afundamentos de tensão, conforme a classificação criada na Tabela 5.

Tabela 5: Classificação dos níveis de afundamento de tensão.

Nível	Porcentagem da Queda de Tensão
I	10%
II	20%
III	30%
IV	40%
V	≥ 45%

As figuras a seguir mostram o comportamento da tensão (V_1), fluxo magnético (Φ) e corrente (I_1) geradas pela bobina central, será apresentada também a força magnética (F_{mag}) nos entreferros. Todas as simulações referentes à Tabela 5 tiveram um afundamento de tensão com duração de 0,2 segundos.

A Figura 30 apresenta o comportamento de algumas variáveis do contator para um afundamento de tensão de 10% da tensão nominal, ou seja, por alguns instantes de tempo a tensão sofreu uma queda na sua magnitude de 127 V para 114,3 V. Apesar da queda de tensão, as variáveis mostradas na Figura 30 não sofreram praticamente nenhuma alteração significativa, exceto pela força magnética que caiu de 42 N para 34 N, uma redução de aproximadamente 20% na força magnética.

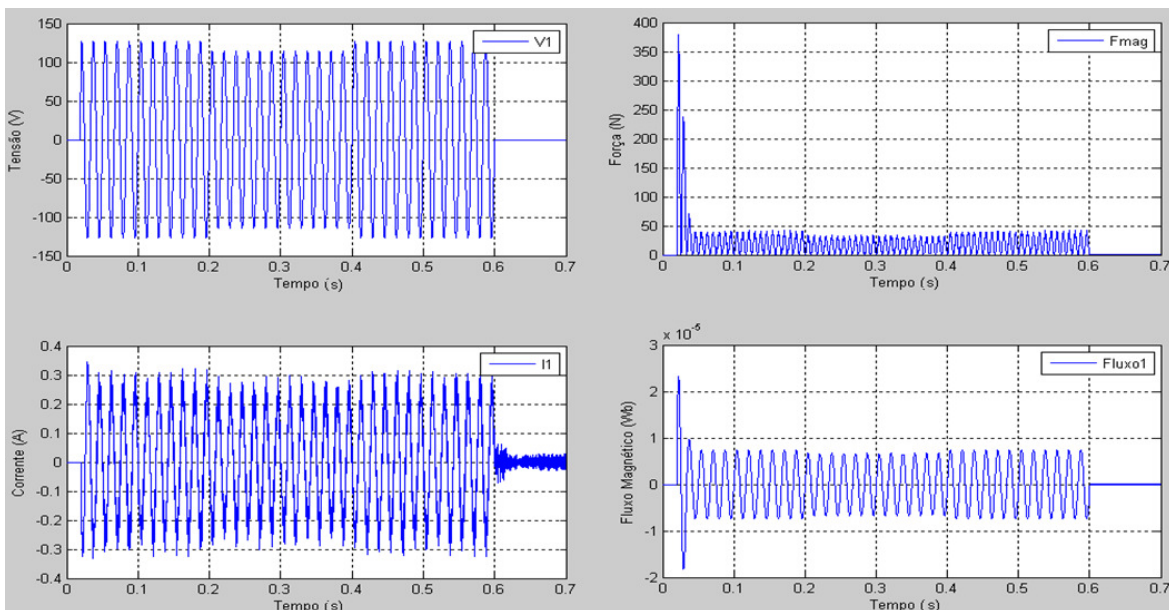


Figura 30: Afundamento de tensão Nível I.

Para um afundamento de tensão de 20%, conforme ilustra a Figura 31, onde a corrente tem uma queda em sua magnitude assim como o fluxo magnético, tais diminuições nos valores das magnitudes são mais visíveis que na situação apresentada na Figura 30. No afundamento de tensão Nível I a F_{mag} diminuiu $\approx 19\%$ em relação a F_{mag} de operação normal, mas essa diminuição praticamente dobrou durante um afundamento de tensão Nível II, onde obteve-se uma queda de $\approx 36\%$.

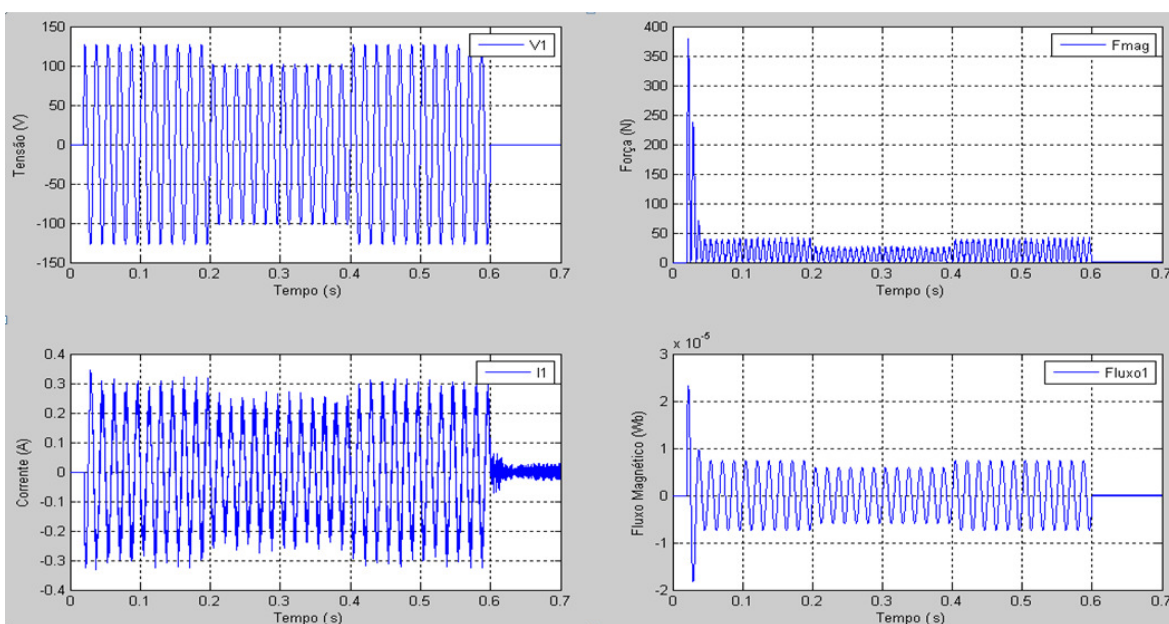


Figura 31: Afundamento de tensão Nível II.

A Figura 32 apresenta os resultados da simulação do contator para um afundamento de tensão Nivel III, onde a F_{mag} sofre redução de $\approx 50\%$ durante o afundamento de tensão, mas a F_{mag} permanece superior a F_{mola} fazendo com que o contator permaneça fechado.

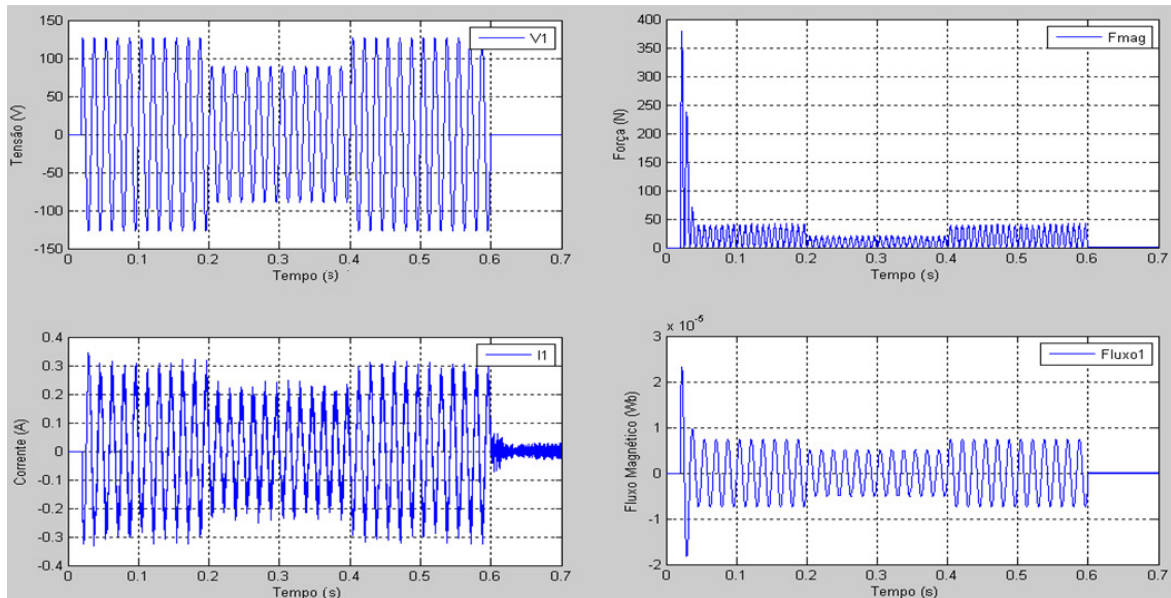


Figura 32: Afundamento de tensão Nivel III.

Para a simulação Nivel IV a situação se torna um pouco crítica para a operação do contator, pois a F_{mag} reduz de 42 N para apenas 12 N, o que corresponde a $\approx 72\%$ da F_{mag} máxima.

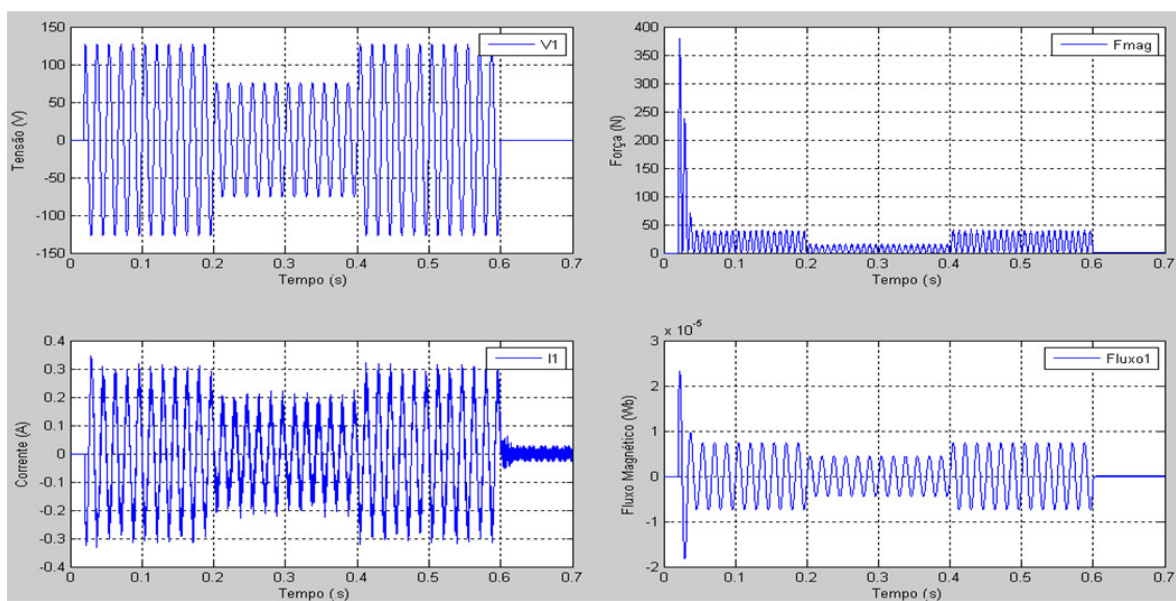


Figura 33: Afundamento de tensão Nivel IV.

Para quedas de tensão acima de aproximadamente 45% da tensão nominal de operação, o contator já não possui força magnética suficientemente maior que a F_{molas} para manter o contator fechado, com isso, o contator se abre ainda nos primeiros ciclos após a queda de tensão e torna a fechar-se quando a tensão de alimentação é restaurada, conforme ilustra a Figura 34.

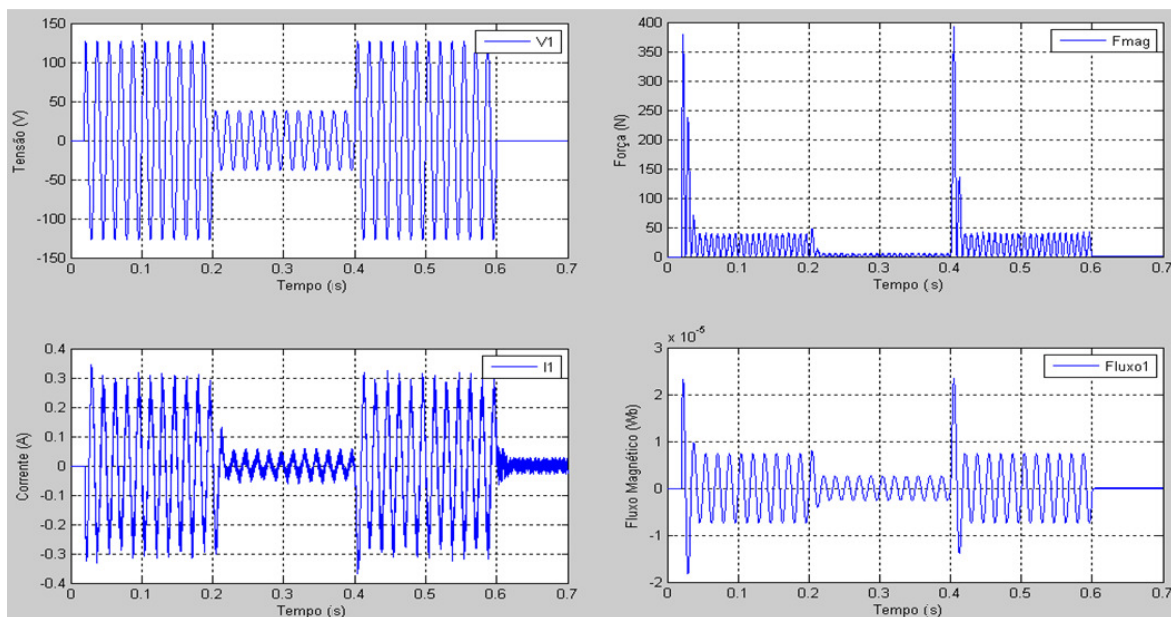


Figura 34: Afundamento de tensão Nível V.

Realizou-se uma simulação considerando-se um afundamento de tensão de 70% da tensão nominal, porém, com tempo de duração de apenas 0,02 segundos ao invés de 0,2 segundos. O resultado é apresentado na Figura 35.

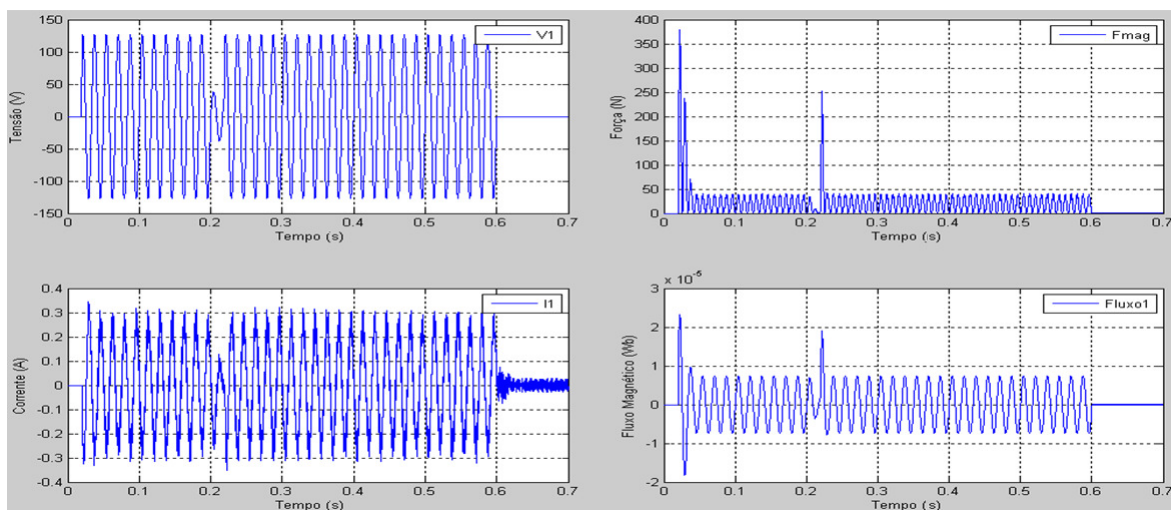


Figura 35: Afundamento de tensão de 70% da tensão nominal com duração de 0,02 s.

Repetiu-se a simulação anterior mantendo a queda de tensão de 70%, mas agora com duração de apenas 0,01 ms. O resultado é apresentado na Figura 36.

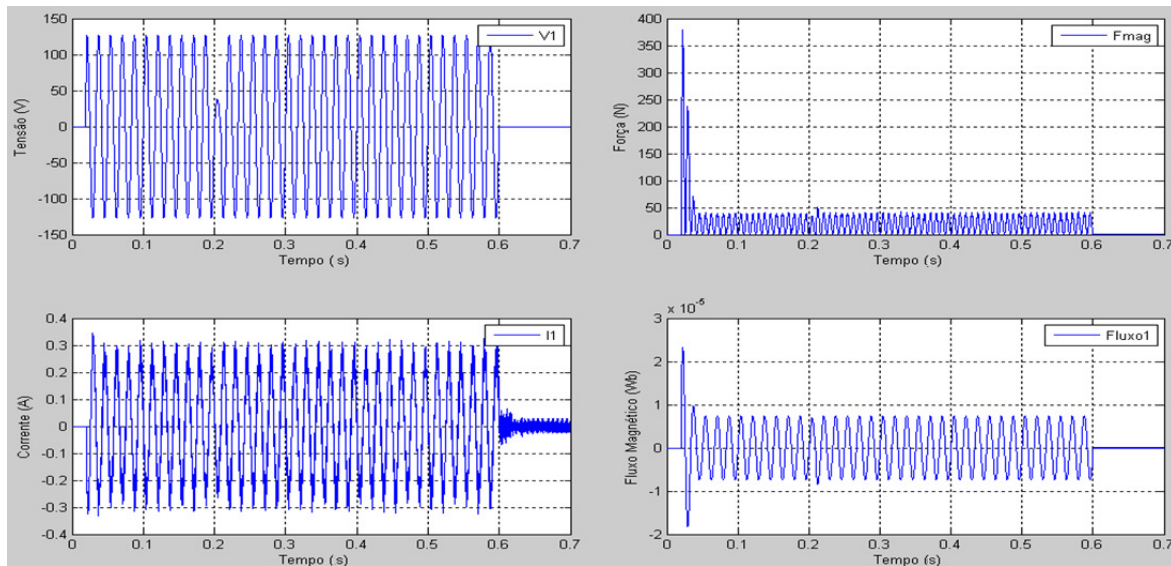


Figura 36: Afundamento de tensão de 70% da tensão nominal com duração de 0,01 ms.

As diferenças entre as simulações apresentadas na Figura 35 e Figura 36 ficam claras quando se analisa o afundamento de tensão na curva de tensão de alimentação do contator (V1), nota-se que, na Figura 35 a queda de tensão dura um ciclo completo da curva de tensão, enquanto que, na Figura 36 a queda de tensão dura apenas meio ciclo. Isso faz com que o entreferro se comporte conforme ilustra a Figura 37.

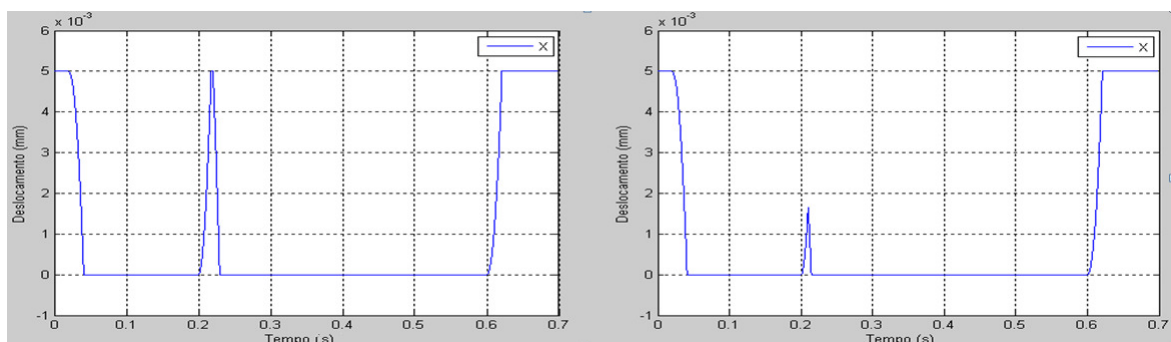


Figura 37: Comparação do comportamento do entreferro para a simulação da Figura 35 e Figura 36, respectivamente.

A Figura 37 ilustra claramente que o contator abre totalmente para um afundamento de tensão com duração de um ciclo da curva de tensão, porém, para meio ciclo o contator não chega a abrir totalmente. Ou seja, se a duração do afundamento de tensão for menor que o tempo de abertura dos contatos do contator, o mesmo não abrirá totalmente, podendo assim evitar que danos mais graves sejam transferidos a carga a qual está ligada ao contator.

A Figura 38 apresenta dois fluxogramas do programa realizado no Matlab para simulação do comportamento dinâmico do contator. No fluxograma A são definidas as variáveis como tensão de alimentação do contator, corrente, dimensões do contator, constante elástica das molas, etc. Nesse fluxograma são definidas também as condições iniciais e tempo de simulação (t_d), seguida de uma condição que determina o fim da simulação caso o tempo simulado (t_s) seja menor que t_d . Caso t_s seja menor que t_d o programa chama uma rotina de cálculo exigida pelo comando ODE45 do matlab, essa rotina é representado pelo fluxograma B, na Figura 38.

Na rotina de cálculo inicialmente é feita a leitura das variáveis definidas no fluxograma A, em seguida, são definidas as condições de limite (como por exemplo: quando o contator está fechado, a velocidade da parte móvel é nula). Em sequência, calculam-se as relutâncias, força das molas, força peso e força magnética, e por fim, as EDOs.

Após o cálculo das EDOs o programa incrementa o valor do tempo e repete-se a rotina de cálculo até completar-se o tempo de simulação t_d , para então plotar os resultados das variáveis calculadas.

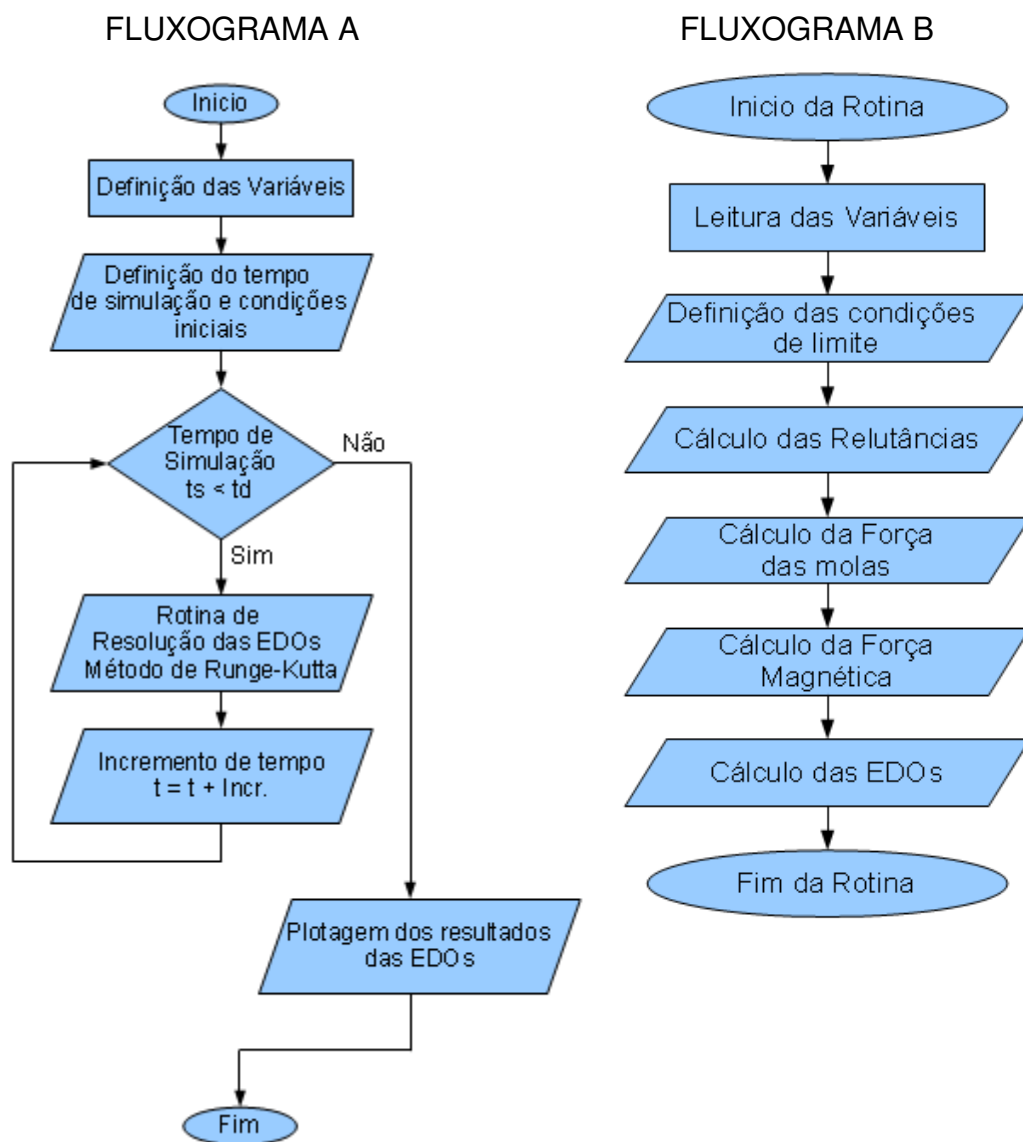


Figura 38: Fluxograma do programa feito no Matlab para resolução das EDOs (Equações (34), (35), (36) e (37)).

O programa feito no Matlab para simulação do contator é apresentado no ANEXO A e sua rotina de cálculo é apresentada no ANEXO B.

6. EXPERIMENTO PRÁTICO

Na seção anterior simulou-se o comportamento dinâmico do contator CA no programa Matlab, onde a simulação baseava-se em aplicar uma queda de tensão na alimentação do contator e verificar como suas variáveis se manifestam com essa variação de tensão.

A fim de verificar na prática o que foi simulado anteriormente realizou-se um experimento com o contator CA, apresentado na Figura 13. Como não se dispunha de equipamentos adequados que simulassem um curto circuito ou uma queda de tensão, montou-se um equipamento simples conforme ilustra a Figura 39. Uma foto do experimento realizado pode ser observado no ANEXO C.

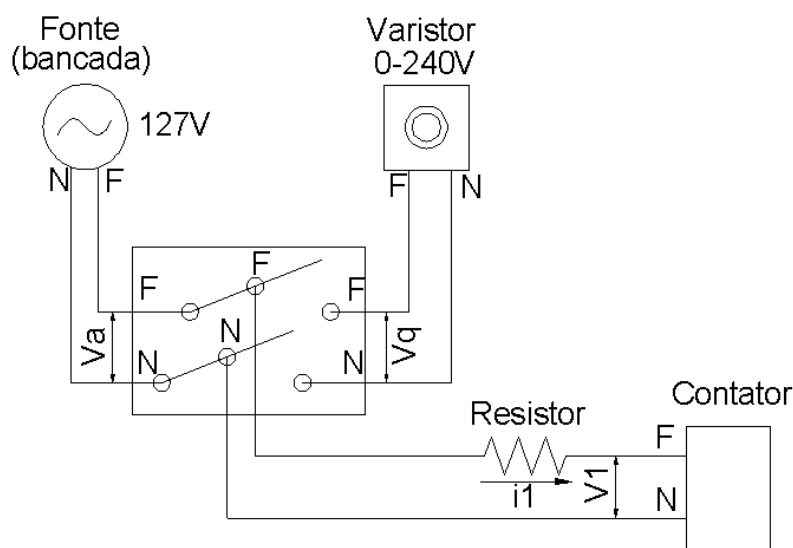


Figura 39: Esquema de montagem do experimento prático.

O experimento mostrado na Figura 39 foi montado utilizando uma bancada com uma tomada que fornece tensão de 127 V, um varistor de 0-240V, um resistor de potência (2,1 k Ω) para limitar a corrente (i_1), um interruptor paralelo de 02 teclas para alternar a alimentação de V_a para V_q , cabos para conexão, multímetros e um osciloscópio.

Tal experimento consiste em alimentar o contator com tensão (V_a) de 127V direto da tomada da bancada e utilizando o varistor para regular a tensão (V_q) para qual o contator passará a ser alimentado quando acionado o interruptor, ou seja, a alimentação do contator irá alternar entre V_a e V_q simulando uma queda de tensão.

As tensões V_a , V_q e V_1 foram medidas com o auxílio de três multímetros, utilizou-se ainda um quarto multímetro para medição da corrente i_1 que circula pelo resistor. Tais medidas apresentam-se na Tabela 6, onde se tem a medição da tensão V_1 para quando o contator está alimentado pela tensão V_a e para quando está alimentado pela tensão V_q . Já a corrente i_1 é medida apenas para quando o contator está alimentado por V_q , pois sua corrente permanece 0,0095 A para tensão V_a . Os gráficos citados na Tabela 6 e apresentados na Figura 40 foram obtidos com a utilização de um osciloscópio cujos pontos de aferição foram feitos sobre o resistor que está em série com o contator.

Tabela 6: Resultado das medições do experimento prático.

Tensão V_a (V)	Tensão V_q (V)	Tensão V_1 (V)		Corrente i_1 (mA)	Gráfico*
		$V_a \rightarrow V_q$	%Q**		
127	100	105 \rightarrow 88	16,2	9,5	A
127	80	105 \rightarrow 70	33,3	7,4	B
127	70	106 \rightarrow 61	42,4	6,5	C
127	65	104 \rightarrow 57	45,2	6,0	D
127	60	103 \rightarrow 51	50,5	5,5	E
127	55	102 \rightarrow 48	52,9	5,1	F
127	50	104 \rightarrow 44	57,6	4,6	G
127	45	103 \rightarrow 39	62,1	4,1	H

*Gráfico da tensão V_1 registrando o momento em que ocorre a transição da tensão de alimentação de V_a para V_q (Ver Figura 40).

**Porcentagem de queda de tensão ($V_q \cdot 100 / V_a$)

Analisando a Tabela 6 nota-se que quando o contator está alimentado por $V_a = 127V$, a tensão medida no terminal V_1 é de $\approx 105V$, mostrando que o circuito ao qual o contator está ligado oferece uma grande resistência causando essa queda na tensão de alimentação. Tal resistência é imposta pelo resistor colocado em série com o contator, para limitar a corrente de alimentação do contator protegendo assim a sua bobina principal.

A Figura 40 apresenta os gráficos citados na Tabela 6, tais gráficos apresentam o comportamento da tensão V_1 que alimenta o contator. Nota-se que do gráfico A ao gráfico F, a queda da tensão aplicada não é suficiente para que o contator abra seus contatos, ou seja, a força magnética nos entreferros do contator ainda é superior a força exercida pelas molas de retorno e de contato.

Já o Gráfico G mostra que após a transição da tensão de V_a para V_q , o contator permanece fechado por alguns instantes, mas abre em seguida, pois a

força das molas se torna suficiente maior que a força magnética neste instante. Nota-se que a onda da tensão V1 permanece com uma magnitude de 10-12V, neste momento o contator estava a sofrer intensas vibrações na tentativa de fechar seus contatos, tal fenômeno ocorre devido ao fato da força magnética possuir magnitude praticamente igual a força das molas, mas não o suficiente para fechar os contatos do contator.

O gráfico H mostra que para quedas de tensão superiores a 41% da tensão nominal, o contator abre totalmente e mantém ainda algumas vibrações como no caso do Gráfico G, porém, essas vibrações possuem intensidades insignificantes o que mostra que a força magnética é muito baixa nesse momento.

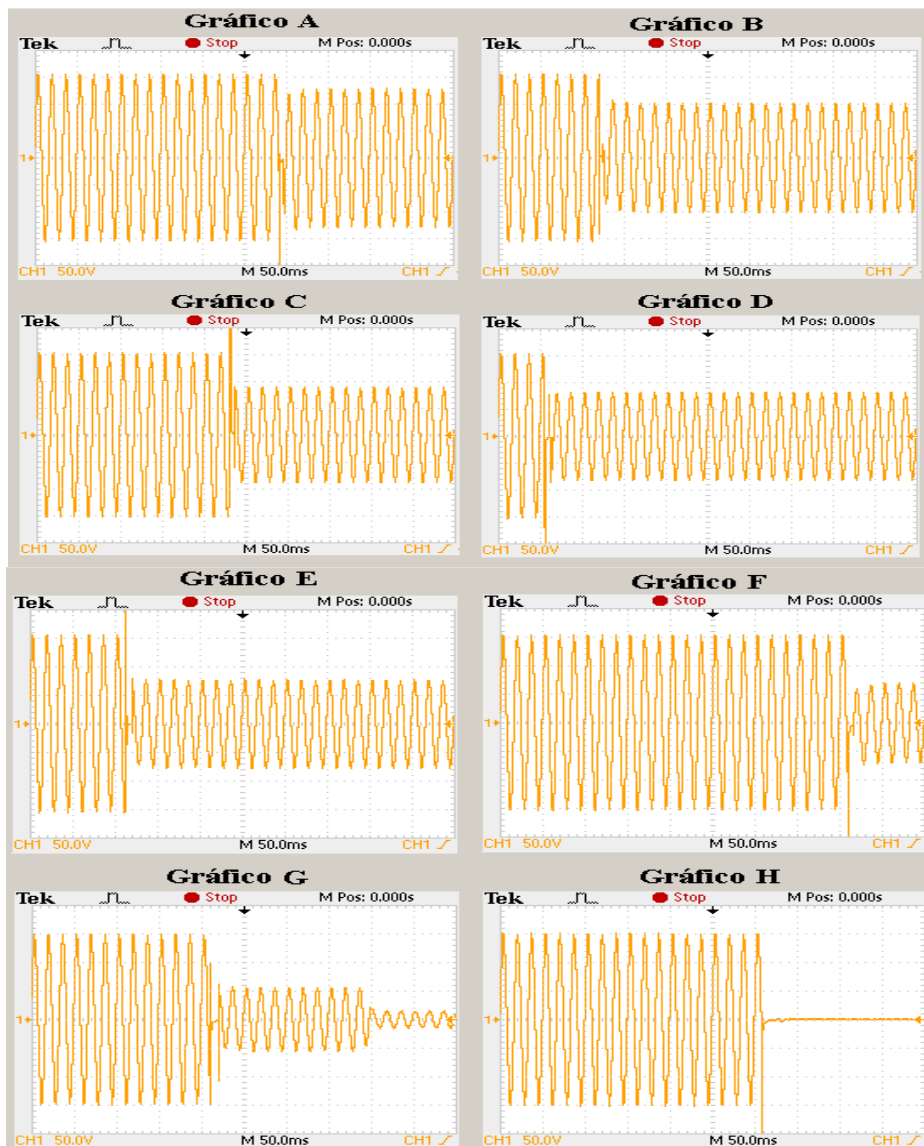


Figura 40: Gráficos A á H mostrando o comportamento da tensão V1.

Um dos problemas do esquema da Figura 39 é que no momento em que se alternam as fontes de V_a para V_q , a mudança do interruptor deve ser praticamente instantânea, caso contrário, o contator deixará de ser alimentado por um determinado instante de tempo como ilustra a Figura 41.

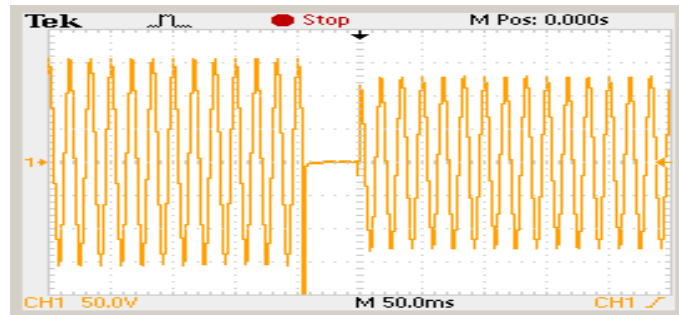


Figura 41: Problema causado durante a comutação entre V_a e V_q .

CONCLUSÃO

A realização deste trabalho foi motivada pelo fato de que um contator pode ser afetado por afundamentos de tensão leves ou críticos, reagindo quase que instantaneamente aos seus efeitos, ou seja, abrindo e fechando em momentos inadequados ao processo de operação normal do sistema. E devido a esse comportamento impróprio do contator CA durante esse período de instabilidade do sistema de alimentação, ele transmite o problema da queda de tensão para os equipamentos que estão ligados no mesmo sistema que o contator, produzindo um aumento no consumo, o desgaste e o risco de danos em equipamentos de consumidores industriais.

Tal motivação levou ao estudo do comportamento dinâmico do contator. Para isso foi feita a modelagem matemática deste comportamento, resultando num sistema de equações diferenciais, resolvida através de um programa de simulação utilizando o método de Runge-Kutta. As simulações realizadas mostraram que o contator CA permanece em operação normal se a queda de tensão for de 0,01s, com isso, o equipamento que está ligado no mesmo circuito que o contator não sofrerá os efeitos desta avaria no sistema de alimentação. Porém, para um afundamento de tensão elevada (70%), mas com tempo suficiente para que o contator sinta seus efeitos e opere de forma diferente da qual deveria para o sistema a qual está ligado, isso fará com que os problemas do afundamento de tensão sejam transmitidos aos equipamentos ligados em conjunto com o contator.

Durante a simulação computacional, verificou-se que o contator em análise suportou aproximadamente 45% de queda de tensão. Na implementação prática os resultados mostraram que uma redução de 41% do valor da tensão nominal produziu o fechamento do contator. Porém, os contatores comerciais são fabricados para suportarem em torno de 30-35% de queda de tensão durante operação com carga, mas o contator foi simulado para uma situação sem carga o que leva a números aceitáveis de simulação.

Uma implementação prática foi realizada para validar os resultados obtidos da simulação. Os resultados obtidos das simulações e dos ensaios no laboratório mostram que a modelagem computacional do comportamento do

contator é correta, apesar do experimento prático ser simples e não dispor de equipamentos necessários para realizar as mesmas medições de fluxo e força magnética que o programa computacional dispõe.

No experimento prático o contator, também operando a vazio como na simulação, resistiu a uma queda de tensão de aproximadamente 58%, se comparada com os 45% da simulação, verifica-se que a simulação está correta. Ou seja, conseguiu-se analisar o comportamento do contator por meio de uma simulação computacional utilizando a modelagem matemática da dinâmica do contator e também verificar a simulação através de um experimento simples.

Apesar das dificuldades encontradas durante a realização deste trabalho, conclui-se que os objetivos propostos no início deste trabalho foram concluídos com êxito e obtendo resultados melhores do que o esperado. E como sugestões para continuação deste trabalho podem se citar:

- Sistema microcontrolado para medição da força no contator;
- Análise dos harmônicos produzidos pelo contator no afundamento de tensão;
- Método de elementos finitos para a análise das forças de um contator;
- Modelagem da não linearidade do material no núcleo do contator.
- Estudo do efeito da histerese do material magnético no funcionamento do contator

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, André de Barros. Projeto e Simulação de Contatores CA. 1998. PP. 11-106. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Março de 1998.

ARANA, Edgar. Capítulo II: Circuitos Magnéticos. Disponível em: <http://www.adjutojunior.com.br/maquinas_eletricas/cap_ii_circuitos_magneticos.pdf>. Acesso em: 7 de set. 2011.

BASTOS, João P. A. **Eletromagnetismo e Cálculos de Campos**. 3. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1996.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, v. 1, 1986.

Djokic´, S. ˇ., Milanovic´, J. V., & Kirschen, D. S. (2004). Sensitivity of AC Coil Contactors to Voltage Sags, Short Interruptions, and Undervoltage Transients. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, VOL. 19, NO. 3, p. 9.

EM, Eletricidade Moderna. Revista Brasileira de Eletricidade e Eletrônica, Aranda Editora, Nº465. PP. 104-111. Dezembro 2012.

FERNANDES, Délio Eduardo Barroso. **Uma metodologia de gerenciamento da qualidade da energia elétrica**. 1999. 124f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1999.

FRANK D. BANNON, John R. C. C. T.-C. N. High- HF Microelectromechanical Filters. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol 35, n. 4, April 2000, pp. 512-526. Disponível em: <<http://www.ieee.org/index.html>>. Acesso em: 09 de Out. 2011.

IEC, International Electrotechnical Commission. **60947-1 Low-voltage switchgear and control gear - Part 1: General rules**. 2001. 3.2, [s.n.], Geneva, 2001.

MAIA, Reinaldo Moreira. Estudo de caso de afundamento de tensão nos componentes do sistema elétrico industrial da Moinhos Vera Cruz. 2008. 45f. Monografia de final de curso - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

NASAR, Syed A. **Máquinas Elétricas**. São Paulo: McGraw-Hill, 1984.

PROVENZA, Francesco. **Molas**. 2. ed. São Paulo: F. Provenza, v. 1, 1984.

ROLDÁN, José. **Manual de Automación por Contactores**. Barcelona: Hemus, 1982.

RUIZ, Jordi-Roger R.; ESPINOSA, Antonio G.; ROMERAL, Luis. **A Computer Model for Teaching the Dynamic Behavior of AC Contactors**. IEEE Transactions on Education, Vol. 53, Nº. 2, Mai 2010. Acesso em: 20 de out. 2011.

SANTANA, Lindinei Santiago. Análise da influencia dos afundamentos de tensão e harmônicas na operação de contadores de corrente alternada. 2007. 102f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2007.

SANTOS, P. M. (2004). *Controle Eletrônico de Corrente da Bobina de Contadores Eletromagnéticos*. Universidade Federal de Santa Catarina.

MORAES, Paulo Mário dos Santos Dias de. Controle Eletrônico de Corrente da Bobina de Contadores Eletromagnéticos. pp. 1-120. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

SADIKU, Matthew N. O. Elementos de Eletromagnetismo. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

TAKAKURA, Flávio I. Instituto de Ciências Exatas: Grupo de Teoria Quântica de Campos. Universidade Federal de Juiz de Fora - MG, 21 set. 2008. Disponível em: <<http://www.fisica.ufjf.br/~takakura/lab-fis1/aula6.pdf>>. Acesso em: 30 de ago. 2011.

TOWE, Bruce C. Investigation of a Lorentz Force Biomagnetometer. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol 44, n. 6, June 1997, pp. 445-461. Disponível em: <<http://www.ieee.org/index.html>>. Acesso em: 09 de set. 2011.

ANEXO A – FLUXOGRAMA A

%DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS

$f = 60$; %frequência
 $R1 = 535$; % resistência da bobina central
 $Ra = 2.1675 \cdot 10^{-4}$; %resistência do anel cc
 $N1 = 4863$; % número de espiras da bobina central
 $N2 = 1$; % número de espiras do anel cc
 $L1 = 1.17$; %indutância da bobina central
 $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$; %permeabilidade magnética no vácuo
 $\mu_M = \mu_0 \cdot 2000$; %permeabilidade magnética do material
 $Aa = 47.27 \cdot 10^{-6}$; %área dentro do anel
 $Adb = 156.48 \cdot 10^{-6}$; %área dentro da bobina
 $w = 2 \cdot \pi \cdot 60$; %velocidade angular
 $x = 0.005$; %entreferro
 $e = 0.0001$; %diferença entre entreferro central e lateral
 $g = 9.8$; %aceleração da gravidade
 $mass = 0.150$; %massa da parte móvel

% Comprimento médio

$les = (17.6 - 4.5/2) \cdot 10^{-3}$; % Braço esquerdo superior
 $lms = (24 - 4.7/2 - 8.2/2) \cdot 10^{-3}$; % Meio superior
 $lds = (17.6 - 4.5/2) \cdot 10^{-3}$; % Braço direito superior
 $lei = (15.6 - 4.5/2) \cdot 10^{-3}$; % Braço esquerdo inferior
 $lmi = (25 - 4.8/2 - 8.6/2) \cdot 10^{-3}$; % Meio inferior
 $ldi = (15.7 - 4.5/2 - 3.1) \cdot 10^{-3}$; % Braço direito inferior
 $lx = 3.1 \cdot 10^{-3}$;

% Profundidade

$PP = 16.3 \cdot 10^{-3}$;

% Áreas

$Aes = PP \cdot (4.7 \cdot 10^{-3})$;
 $Ams = PP \cdot (4.5 \cdot 10^{-3})$;
 $Ads = PP \cdot (8.2 \cdot 10^{-3})$;
 $Aei = PP \cdot (4.8 \cdot 10^{-3})$;
 $Ami = PP \cdot (4.5 \cdot 10^{-3})$;
 $Adi = PP \cdot (8.6 \cdot 10^{-3})$;
 $Adda = PP \cdot (2.9 \cdot 10^{-3})$;
 $Adfa = PP \cdot (2.9 \cdot 10^{-3})$;

%Dados das molas

%Constante elástica das molas

$k1 = 175$; %Em N/m
 $k2 = 125$;
 $k3 = 125$;

%Comprimento das molas

$Xmp = 0.024$; %m
 $Xmnf = 0.010$;

```
Xmna = 0.010;
```

```
%Tempo de simulação e condições iniciais
```

```
t = 0:0.0001:0.2;
```

```
ti = 0.02; % Tempo de inicio da simulação
```

```
tf = 0.12; % Tempo de fim da simulação
```

```
tq = 0; % Tempo de inicio da queda de tensão
```

```
tqf = 0; % Tempo de fim da queda de tensão
```

```
%Condição inicial
```

```
V = 127;
```

```
V1 = V*sin(w*t);
```

```
Fs = 0;
```

```
Fmag = 0;
```

```
vel = 0;
```

```
%Método Runge-Kutta
```

```
[t,num_u] = ode45('xiz',t,[0 0 0 x],[],[R1 Ra N1 N2 L1 u0 V x w mass k1 k2 k3 Xmp  
Xmnf Xmna Aes Ads ti tf tq tqf]);
```

ANEXO B – FLUXOGRAMA B

```

function du = xiz(t,u,flag,par)

du = zeros(4,1);

%Leitura das Variáveis
R1 = par(1); Ra = par(2); N1 = par(3); N2 = par(4); L1 = par(5); u0 = par(6); V =
par(7); x = par(8); w = par(9); mass = par(10); k1 = par(11); k2 = par(12); k3 =
par(13); Xmp = par(14); Xmnf = par(15); Xmna = par(16); Aes = par(17); Ads =
par(18); ti = par(19); tf = par(20); tq = par(21); tqf = par(22);

tc = ti + 0.025; %tempo de atuação das condições de velocidade para que o
contator abra e feche
tc2 = tq + 0.025;
tc3 = tqf + 0.025;
Vc = V*Pc; %Tensão de condição

if t <= ti || t >= tf
    V2 = 0;
else
    V2 = V;
    if t > tq && t < tqf
        V2 = V*Porc;
    end
end

%% Condição de velocidade CV
CV = 1; CV2 = 0;
%% Condição de Deslocamento CD
CD = 1; CD2 = 0;

%% Condição para quando o contator está desligado
if V2 <= Vc || u(4) <= 0
    CV = 0;
    CD = 0;
else
    CV = 1;
end

%% Condição para quando o contator é ligado
if u(4) <= 0 && V2 >= Vc
    CD = 0;    CV = 0;
end

%% Refechamento do contator (fecha -> abre -> fecha )
if tq + 0.025 < t < tqf
    if u(4) >= 0.005 && V2 >= Vc
        CV = 0; CV2 = 1; CD = 0;
    end
end

```

```

end
if u(4) >= 0.005 && V2 <= Vc
    CV = -1; CV2 = 0; CD = -1;
end
if u(4) >= 0 && V2 <= Vc
    CV = 0; CV2 = -1; CD = 0;
end
if u(4) >= 0 && V2 >= Vc
    CV = 1; CV2 = 0; CD = 1;
end
end
end

%% Cálculo da relutância
d = x - u(4);
R = 1.1647*10^6 + d*1.0278*10^10;
Rf = 0.26074*10^6;
Rs = 5.2187e+007 + d*1.6835e+010;
Ru = 5.2187e+007 + d*1.6835e+010;

%% Cálculo da Força da Mola
if u(4) >= x
    Fs = k1*(Xmp - d) - k2*(Xmnf - u(4));
end
if u(4) < x
    Fs = k1*(Xmp - d) + 2*k3*(Xmna - d);
end

% Cálculo da Força Peso
Fpeso = mass*g;

%% Cálculo da Força eletromagnética
Fmagg =
((u(1)^2)/(2*Aes*u0)+(u(2)^2)/(2*Ads*u0)+(u(1)*u(2))*(1/((Aes+Ads)*2*u0)));

%% Equações de estado
du(1) = (V2*sin(w*t)/N1) - (((u(1)*R1)/(N1^2))*(R+Rf/2+Ru/2) +
((u(2)*R1)/(N1^2))*(Ru/2));
du(2) = (((2*u(1)*Ra)/(N2^2))*(Ru/2) - ((2*Ra*u(2))/(N2^2))*(Rs/2+Ru/2));
du(3) = (CV/mass)*(Fpeso + Fmagg - Fs) + CV2*46.0333;
du(4) = CD*u(3);

end

```

ANEXO C – FOTO DO EXPERIMENTO PRÁTICO