

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA**

André Falcão de Araújo

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UM DISPOSITIVO
ELETROMECAÂNICO PARA MÓDULO DE RETENÇÃO
MECÂNICA PARA CONTADORES**

Florianópolis

2011

André Falcão de Araújo

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UM DISPOSITIVO
ELETROMECHANICO PARA MÓDULO DE RETENÇÃO
MECÂNICA PARA CONTADORES**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Ing. Carlos Alberto Martin

Florianópolis

2011

Catálogo na fonte elaborada pela biblioteca da
Universidade Federal de Santa Catarina

A663m Araújo, André Falcão de
Modelagem e simulação de um dispositivo eletromecânico
para módulo de retenção mecânica de contatores [dissertação]
/ André Falcão de Araújo ; orientador, Carlos Alberto Martin.
- Florianópolis, SC, 2011.
106 p.: il., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia mecânica. 2. Dispositivos eletromecânicos.
3. Contatores elétricos. 4. Peças de máquinas. 5. Simulação
dinâmica. 6. Simulação (Computadores). I. Martin, Carlos
Alberto. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU 621

André Falcão de Araújo

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UM DISPOSITIVO
ELETROMECAÂNICO PARA MÓDULO DE RETENÇÃO
MECÂNICA PARA CONTADORES**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 06 de junho de 2011.

Prof. Eduardo Alberto Fancello, D.Sc.
Coordenador do Curso

Prof. Carlos Alberto Martin, Dr.Ing.
Orientador

Banca Examinadora:

Prof. André Ogliari, Dr.Eng.
UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Hari Bruno Mohr, D.Sc.
UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Winderson Eugenio dos Santos, Dr.Eng.
UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Ao Henrique,
Bons ventos o trazem filho.

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos aos meus pais Juarez e Nilda pelo exemplo de dedicação, pois muitas vezes renunciaram aos próprios sonhos para que seus filhos pudessem realizar os deles; à tia Julieta que muito apoiou nos anos acadêmicos e principalmente à minha esposa Michele pelo incentivo, companhia, compreensão e amor sempre presentes.

Ao Professor Carlos Alberto Martin pelas orientações sem as quais este trabalho não seria possível e aos membros da banca pelas preciosas sugestões.

À empresa Weg, principalmente aos amigos Ivo Detlev Gunther, André de Barros Albuquerque e Fábio Decker de Souza pela oportunidade de realização deste trabalho e aos demais amigos da equipe de desenvolvimento de componentes, pelas produtivas discussões e sugestões.

*"Acredito muito na sorte e descubro que,
quanto mais trabalho, mais sorte tenho."*

Stephen Leacock

RESUMO

Os contadores são amplamente empregados na indústria para manobra dos mais diversos tipos de equipamentos elétricos, onde servem de interface entre o equipamento de controle e as cargas comandadas. Entretanto, durante eventos transientes na tensão de alimentação, os contadores são identificados como os pontos fracos em muitos processos industriais, chegando muitas vezes a causar a interrupção do sistema. Para prover um funcionamento seguro, um acessório de retenção é comumente acoplado ao contator. Através de um mecanismo de retenção mecânica, este dispositivo eletromecânico mantém o contator em sua posição “ligado” na ausência de tensão de comando e através de um atuador magnético, permite o comando de desarme à distância, liberando o contator que retorna à sua posição “desligado”.

O presente trabalho trata da modelagem e simulação dinâmica do funcionamento do dispositivo eletromecânico que compõe o acessório para contadores comercialmente chamado de Módulo de Retenção Mecânica, embasado pela apresentação das fases iniciais do processo de desenvolvimento. Apresentam-se o resumo do *benchmarking* de produtos da concorrência e os requisitos de projeto elencados, além de algumas considerações da fase do projeto informacional e preliminar. Apresentam-se a modelagem e a simulação da força eletromagnética do atuador de desarme empregado, que é validada através de medições. Empregando o resultado anterior, realiza-se também a simulação dinâmica do modelo desenvolvido para o mecanismo de retenção. São apresentados também os leiautes preliminares e o leiaute funcional desse mecanismo. A fim de melhor representar a situação real, um modelo simplificado de contator também desenvolvido no presente trabalho é acoplado ao modelo do mecanismo durante a simulação dinâmica.

Na etapa de desenvolvimento, alguns passos sistemáticos foram seguidos, conforme sugerido nas bibliografias de projeto integrado de produtos, e que resultaram na definição de requisitos de projeto mais completos. Na sequência, tais requisitos foram confrontados com os resultados da simulação, o que permite concluir que o acessório de retenção mecânica desenvolvido cumpre os requisitos de projeto elencados e atende os objetivos iniciais do trabalho.

Apesar desse relativo sucesso, identificam-se possibilidades de aperfeiçoamento através do emprego de métodos sistemáticos durante a etapa de geração de leiautes alternativos da concepção. Espera-se que tais métodos sistemáticos quando aplicados também na fase de projeto

preliminar, contribuam no processo e sejam efetivos, principalmente quando a complexidade e o número de peças do mecanismo desenvolvido sejam superiores em relação ao apresentado no presente trabalho.

As práticas adotadas no presente trabalho, principalmente relativas à parte de projeto informacional, contribuíram significativamente para a empresa, e foram prontamente absorvidas às práticas correntes de desenvolvimento. Atualmente elaboram-se as especificações de projeto e desenvolvem-se os produtos com base em decisões conjuntas de um grupo de apoio e atenta-se para a necessidade de aplicar a metodologia de projeto nas demais fases do processo de desenvolvimento de produtos.

Palavras-chave: Retenção mecânica, Contator, Atuador magnético, Modelagem, Simulação dinâmica, Simulação magnética.

ABSTRACT

Contactors are widely used in industry for switching of various types of electrical equipment, where they serve as an interface between control equipment and the loads to be switched. However, during transient events in the supply voltage, contactors are identified as the drawback in many industrial processes, often causing the system interruption. To provide reliable operation, a latching accessory is commonly used in combination with the contactor. Due to its mechanical latching mechanism, this electromechanical device keeps the contactor in its “on” position in the absence of control voltage and, due to a magnetic actuator, allows the remote control of the ensemble, switching the contactor that returns to its “off” position.

This text focus on a modeling and dynamic simulation work for the mechanical latch block for contactors, which is grounded by the presentation of the initial phases of the product development process. It presents the product benchmarking and the design requirements listed, in addition to present some considerations taken in the informational and embodiment phases. It presents the modeling and simulation of the electromagnetic force of the actuator and the measurements to validate the results. Using the previous result, the dynamic behavior of the model developed for the latch mechanism is simulated. It’s also presented the preliminary lay-outs that were done and helped to obtain the functional lay-out for this mechanism. In order to obtain a better representation, a simplified contactor model has also been developed and then coupled to the latch mechanism in the dynamic simulation.

In the development phase, some systematic steps were followed, as suggested in the references of methodology for process project, which resulted in the definition of more complete project requirements. These requirements were compared with simulation results, which showed that the mechanical latch accessory developed meets the design requirements listed, which means the initial targets were accomplished.

Besides of these accomplishments, it’s identified opportunities for improvement if more systematic methods were applied for the phase of generating alternative lay-outs for the concept. It is expected that such systematic project methods, when applied to the embodiment phase, can contribute in the process and can be effective, especially when the complexity and number of parts of the developed mechanism is larger than the one presented in this work.

The practices adopted in this work, mainly on the informational phase of the process project, have brought a significant contribution to

the company and were readily absorbed into the current development practicing. Currently, the company develops design specifications and develops products based on a common decision of a support group and identifies the need to implement the project methodology in other phases of product development.

Keywords: Mechanical latching, Contactor, Magnetic actuator, Modeling, Dynamic simulation, Magnetic simulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2-1: Principais funções internas de um relé/contator.....	7
Figura 2-2: Diagrama de blocos de um atuador magnético.....	8
Figura 2-3: Atuador de contator e atuador de êmbolo.....	10
Figura 2-4: Esquema da estrutura interna de um contator.....	11
Figura 2-5: Dados experimentais do deslocamento do cabeçote do contator....	14
Figura 2-6: Dados experimentais de fechamento do contator.....	15
Figura 2-7: Esquema elétrico do contator.....	17
Figura 2-8: Corrente da bobina e fluxos magnéticos no núcleo do contator.....	18
Figura 2-9: Fluxos magnéticos e forças do contator.....	20
Figura 2-10: Força magnética instantânea e média do contator.....	20
Figura 2-11: Variação da força magnética média no fechamento do contator.....	22
Figura 2-12: Esquema mecânico do contator.....	23
Figura 2-13: Esquema do modelo de Voigt para elementos viscoelásticos.....	25
Figura 2-14: Contator com MRM acoplado e detalhes do MRM.....	30
Figura 2-15: Vista esquemática explodida de um MRM.....	31
Figura 2-16: Detalhe superior do cabeçote e trava do MRM da GE.....	32
Figura 2-17: Detalhe lateral do cabeçote e trava do MRM da GE.....	32
Figura 2-18: Detalhes do atuador do MRM da GE.....	33
Figura 3-1: O processo de desenvolvimento de produtos e fases tratadas no trabalho.....	34
Figura 3-2: Contator + MRM dos cinco concorrentes e produto atual.....	38
Figura 3-3: Detalhes do atuador do produto “Bobina de Disparo”.....	44
Figura 3-4: Atuador nas posições aberto e fechado.....	44
Figura 3-5: Perfil qualitativo da característica de força magnética em função da abertura do entreferro para diferentes geometrias do atuador.....	45
Figura 4-1: Fluxograma da etapa de modelagem e simulação.....	47
Figura 4-2: Esquema da medição de força magnética do contator.....	51
Figura 4-3: Resultados experimentais de força magnética do contator.....	52
Figura 4-4: Esquema mecânico do contator no WM2D (A) e esquema do modelo mecânico teórico (B).....	53
Figura 4-5: Curva da força magnética do contator no WM2D.....	54
Figura 4-6: Medições do tempo de operação do contator.....	55
Figura 4-7: Medições da duração do ricochete dos contatos do contator.....	55
Figura 4-8: Resultados da simulação do contator.....	57
Figura 4-9: Etapas de atuação do modelo esquemático do contator.....	58
Figura 4-10: Simulação do ricochete dos contatos do contator.....	59
Figura 4-11: Esquema elétrico do retificador da PCI.....	61
Figura 4-12: Simulação das componentes: tensão da fonte e da carga na bobina do atuador.....	62
Figura 4-13: Simulação das componentes de tensão na bobina do atuador.....	62
Figura 4-14: Simulação das tensões e correntes na bobina do atuador.....	63
Figura 4-15: Esquema 2D e malha de elementos finitos do atuador.....	64

Figura 4-16: Simulação magnética das linhas de fluxo do atuador.....	65
Figura 4-17: Simulação da força resultante do atuador x posição do êmbolo....	66
Figura 4-18: Simulação da corrente na bobina do atuador.....	67
Figura 4-19: Simulação da força resultante do atuador e corrente na bobina x posição do êmbolo.	67
Figura 4-20: Simulação da região com maior densidade de linhas de fluxo.....	68
Figura 4-21: Variação das componentes do fluxo magnético.	69
Figura 4-22: Experimento de medição da força dos atuadores magnéticos.	70
Figura 4-23: PCI modificada para aumentar o tempo de condução.	70
Figura 4-24: Comparativo de simulação x medição da força do atuador.....	71
Figura 4-25: Simulação da corrente e força resultante do atuador para corrente inicial de 0,5 A.	72
Figura 4-26: Comparativo simulação x medição da força do atuador para corrente inicial de 0,5 A.....	72
Figura 4-27: Comparativo de simulação x polinômio de aproximação da força do atuador.	73
Figura 4-28: Apresentação da força resultante do atuador no WM2D.....	74
Figura 4-29: Potência dissipada na bobina do atuador.....	75
Figura 4-30: Desenho CAD do MRM acoplado ao contator de menor largura.	77
Figura 4-31: Esquema do mecanismo do MRM.	79
Figura 4-32: Esquema do mecanismo do MRM – etapa de operação.....	79
Figura 4-33: Esquema do mecanismo do MRM – etapa de retenção e desarme.	80
Figura 4-34: Força resultante na interface trava x catraca do MRM leiaute 1.	81
Figura 4-35: Decomposição da força resultante na trava do MRM, leiaute 1....	82
Figura 4-36: Decomposição da força resultante na trava do MRM leiaute 2....	83
Figura 4-37: Análise do mecanismo do MRM, leiaute 3.	84
Figura 4-38: Curso do êmbolo do atuador no leiaute 3 do MRM.	84
Figura 4-39: Leiaute funcional do mecanismo do MRM.....	85
Figura 4-40: Simulação da posição e das forças do MRM.	86
Figura 4-41: Simulação das etapas de operação do leiaute funcional do mecanismo do MRM acoplado ao contator.	87
Figura 4-42: Simulação da força de desarme e posição do êmbolo do MRM.	88
Figura 4-43: Simulação da força de contato entre os cabeçotes do contator e do MRM.	89
Figura 4-44: Simulação da folga de retrocesso durante a etapa de retenção.....	90

LISTA DE QUADROS

Quadro 3-1: Resumo do <i>benchmarking</i>	39
Quadro 3-2: Especificação de Projeto do MRM. Requisitos 1 a 3 (de 7).	41
Quadro 3-3: Especificação de Projeto do MRM. Requisitos 4 a 7 (de 7).	42
Quadro 5-1: Requisitos de projeto atendidos no decorrer do texto.	91
Quadro A-1: A matriz da casa da qualidade	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 4-1: Resultados da medição de força magnética média do contator.....	51
Tabela 4-2: Dados de entrada para simulação do modelo do contator.....	56
Tabela 4-3: Dados de entrada da simulação magnética do atuador.....	63
Tabela 4-4:: Detalhes da malha de elementos finitos empregada na simulação magnética do atuador.	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CA	Corrente Alternada
CAD	<i>Computer-Aided Design</i> (desenho assistido por computador)
CAE	<i>Computer-Aided Engineering</i> (eng. assistida por computador)
CC	Corrente Contínua
CLP	Controlador Lógico Programável
DXF	<i>Drawing Exchange Format</i> (arquivo de intercâmbio para CAD)
MRM	Módulo de Retenção Mecânica
PCI	Placa de Circuito Impresso
PCP	Planejamento e Controle da Produção
QFD	<i>Quality Function Deployment</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i> (valor eficaz)
SW	<i>Software CAD 3D SolidWorks</i>
WM2D	<i>Software CAE Working Model 2D</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo		Unidade
C_b	Coefficiente de viscosidade do modelo Voigt	[N.s/m]
f	Frequência da tensão da rede	[Hz]
F_a	Força de desarme do atuador	[N]
F_b	Forças no amortecedor do núcleo fixo	[N]
F_c	Força das molas de contato	[N]
F_d	Força da mola de retorno	[N]
F_e	Força da mola de conexão (do núcleo móvel)	[N]
F_{ini}	Força inicial da mola do atuador	[N]
F_{mag}	Força magnética do contator	[N]
F_r	Força resultante entre catraca e trava	[N]
F_{rc}	Força resultante do contator no MRM	[N]
F_x	Componente x de F_r , relativa ao eixo da trava	[N]
F_y	Componente y de F_r , relativa ao eixo da trava	[N]
F_1	Força magnética devido ao fluxo ϕ_1	[N]
F_2	Força magnética devido ao fluxo ϕ_2	[N]
i	Corrente da bobina	[A]
k_1	Constante de simplificação da força magnética	[A ² /N]
k_2	Constante de simplificação do fluxo magnético	[N/A ²]
k_b	Coefficiente de elasticidade do modelo Voigt	[N/m]
k_c	Coefficiente de elasticidade das molas de contato	[N/m]
k_d	Coefficiente de elasticidade da mola de retorno	[N/m]
k_e	Coefficiente de elasticidade da mola de conexão	[N/m]
k_{mola}	Coefficiente de elasticidade da mola do atuador	[N/m]
L	Indutância da bobina	[H]

l	Abertura do entreferro	[m]
l_0	Comprimento livre da mola	[mm]
l_{ini}	Comprimento da mola montada	[mm]
M_x	Momento devido à força F_x	[N.m]
M_a	Momento devido à força F_a	[N.m]
N	Número de espiras da bobina	[-]
R	Resistência da bobina do contator	[Ω]
R_{coil}	Resistência da bobina do atuador	[Ω]
S	Área da seção transversal ao fluxo	[m ²]
V	Tensão alternada da rede	[V]
V_C	Tensão na carga (bobina) na PCI	[V]
V_F	Tensão da fonte	[V]
V_L	Tensão na indutância da bobina	[V]
V_R	Tensão na resistência da bobina	[V]
x_a	Deslocamento do cabeçote do contator	[m]
x_{cm}	Deslocamento dos contatos móveis	[m]
x_f	Deslocamento do núcleo fixo	[m]
\dot{x}_f	Velocidade do núcleo fixo	[m/s]
x_m	Deslocamento do núcleo móvel	[m]
ϕ	Fluxo magnético	[Wb]
ϕ_1	Fluxo magnético da bobina do contator	[Wb]
ϕ_2	Fluxo magnético da espira de sombra	[Wb]
ϕ_z	Componente do fluxo na direção do eixo z	[Wb]
ϕ_x	Componente do fluxo na direção do eixo x	[Wb]
ω	Frequência angular	[rad/s]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVOS.....	4
1.1.1	Objetivo Geral.....	4
1.1.2	Objetivos Específicos.....	4
1.1.3	Justificativas.....	4
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1	OS ATUADORES MAGNÉTICOS.....	8
2.1.1	Atuadores de solenóide.....	9
2.1.1.1	Atuadores de contadores	9
2.1.1.2	Atuadores de êmbolo.....	10
2.2	OS CONTADORES	10
2.2.1	Estrutura construtiva dos contadores.....	10
2.1.1.3	O conjunto fixo do contator.....	11
2.1.1.4	O conjunto móvel do contator	12
2.1.1.5	A carcaça do contator	13
2.2.2	Funcionamento dos contadores.....	13
2.2.2.1	O movimento do cabeçote do contator.....	13
2.2.2.2	O movimento dos contatos e do núcleo móvel.....	15
2.2.3	Análise do comportamento dinâmico de contadores CA.....	16
2.2.3.1	Equacionamento da parte elétrica de contadores CA	16
2.2.3.2	Sistema magnético de contadores	17
2.2.3.3	Sistema mecânico de contadores.....	22
2.3	O ACESSÓRIO MRM	26
2.3.1	O emprego do MRM.....	26
2.3.1.1	Exemplos práticos de aplicação do MRM.....	27
2.3.2	O produto MRM existente	29
2.3.3	O funcionamento do MRM.....	30
2.3.3.1	Detalhes do MRM da GE	31

3	ETAPAS DE PROJETO DO MRM	34
3.1	PROJETO INFORMACIONAL DO MRM	37
3.1.1	A análise de produtos concorrentes.....	37
3.1.2	A realização do QFD.....	40
3.1.3	Especificação de Projeto do MRM.....	41
3.2	PROJETO PRELIMIAR DO MRM	43
3.2.1	Emprego de mecanismo com catraca	43
3.2.2	O atuador magnético do MRM.....	43
4	MODELAGEM E SIMULAÇÃO.....	46
4.1	ESTRUTURA DO CAPÍTULO DE MODELAGEM E SIMULAÇÃO.....	46
4.2	MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO CONTADOR.....	49
4.2.1	A força magnética no modelo do contator	50
4.2.2	O modelo mecânico do contator.....	52
4.2.3	Resultados da simulação dinâmica do contator.....	56
4.3	MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA FORÇA MAGNÉTICA DO ATUADOR.....	60
4.3.1	A PCI do atuador.....	60
4.3.1.1	Análise das curvas de tensão e corrente na PCI.....	61
4.3.2	Modelagem da força do atuador magnético	63
4.3.3	Resultados da simulação magnética do atuador	65
4.3.3.1	Análise da curva de força do atuador.....	66
4.3.3.2	Medição da força do atuador	69
4.3.3.3	Polinômio da força magnética do atuador	73
4.3.3.4	Análise de potência dissipada e corrente no atuador	74
4.4	O MECANISMO DO MRM ACOPLADO AO CONTADOR.....	75
4.4.1	Desenho CAD 3D do mecanismo do MRM.....	76
4.4.2	O modelo dinâmico do mecanismo do MRM	77
4.4.3	O funcionamento do mecanismo do MRM	79
4.5	SIMULAÇÃO DOS LEIAUTES PRELIMINARES DO MECANISMO DO MRM.....	80
4.5.1	Leiaute 1 do mecanismo do MRM: Não faz retenção	81
4.5.2	Leiaute 2 do mecanismo do MRM: Não desarma	82
4.5.3	Leiaute 3 do mecanismo do MRM: Curso muito grande	83

4.6	SIMULAÇÃO DO LEIAUTE FUNCIONAL DO MECANISMO DO MRM:.....	85
4.6.1	Análise do leiaute funcional do mecanismo do MRM.....	85
4.6.1.1	Análise do curso do êmbolo.....	88
4.6.1.2	Análise da força de fechamento do MRM.....	89
4.6.1.3	Análise da folga de retrocesso.....	89
4.6.1.4	Análise do tempo de desarme.....	90
5	DISCUSSÕES E CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS	91
5.1	CHECK-LIST DOS REQUISITOS DE PROJETO	91
5.2	PATENTES	91
5.3	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	92
6	CONCLUSÕES	94
6.1	CONCLUSÕES SOBRE A MODELAGEM E SIMULAÇÃO	95
6.2	IDENTIFICAÇÃO DE POSSIBILIDADES DE APERFEIÇOAMENTO.....	98
	REFERÊNCIAS.....	99
	ANEXOS.....	102
	ANEXO A: Ferramentas computacionais empregadas.....	102
	ANEXO B: A matriz da casa da qualidade realizada	105

1 INTRODUÇÃO

Embora sejam dispositivos de função básica relativamente simples, os contatores e seus acessórios são complexos e geralmente pouco compreendidos. Uma boa razão para isso é que as tecnologias envolvidas nesse componente não se restringem a uma única área de conhecimento como, por exemplo, a elétrica.

Este é um componente que, como quase nenhum outro, engloba muitas diferentes áreas da ciência e tecnologia e mostra em seu funcionamento um grande e complexo inter-relacionamento de importantes efeitos elétricos, magnéticos, mecânicos e térmicos.

Outra razão é sua operação ser fortemente não-linear, o que restringe seu completo entendimento a especialistas bem capacitados em sistemas dinâmicos.

Este trabalho trata da modelagem e simulação dinâmica do funcionamento do dispositivo eletromecânico que compõe o acessório para contatores comercialmente chamado de Módulo de Retenção Mecânica – “MRM” (do inglês *Mechanical Latch Block*).

Contatores e acessórios

Contatores são dispositivos amplamente utilizados na indústria e têm a função principal de estabelecer, conduzir e interromper correntes de um circuito elétrico. O contator é um dos principais componentes de sistemas de comando de máquinas e outros equipamentos elétricos, como motores, transformadores, bancos de capacitores, fornos resistivos, circuitos de iluminação, entre outros, onde serve de interface entre o equipamento de controle (um controlador lógico programável – CLP, por exemplo) e as cargas elétricas a serem comandadas.

A grande vantagem do contator é permitir o comando de cargas de grande potência a partir de uma pequena potência de entrada (da bobina do mesmo).

Embora contatores em estado sólido (semicondutores) ocupem uma significativa parcela do mercado, vantagens como a robustez, confiabilidade, isolamento galvânica, menores perdas e custo-benefício dos contatores eletromecânicos ainda são muito difíceis de serem superadas.

Uma linha completa de contatores sempre oferece uma série de acessórios que incluem blocos de contatos auxiliares, temporizadores, supressores de surto, módulos de intertravamento mecânico, módulos de retenção mecânica (MRM), entre outros.

Este último acessório, o MRM, quando acoplado ao contator faz com que o mesmo, a partir de um pulso de tensão de comando na bobina, permaneça ligado, pois ficará “retido mecanicamente” e será desligado apenas quando um novo pulso de tensão for aplicado, dessa vez no MRM.

Essa funcionalidade representa economia de energia em aplicações em que o contator manobre poucas vezes e também segurança em circuitos em que a tensão de comando apresente oscilações indesejadas que podem desenergizar o contator acidentalmente.

Contextualização

A empresa Weg foi fundada em 1961 e se tornou uma das líderes mundiais na produção de motores elétricos. Em 1980 a empresa decidiu diversificar o seu portfólio de produtos. Segundo Stuart Júnior (2005), a partir de um acordo de transferência de tecnologia com uma empresa alemã, a Weg começou a produzir componentes eletromecânicos para comando e proteção de motores de baixa tensão. Entretanto, nesse primeiro momento, ainda não se implementou um centro técnico de desenvolvimento para esses produtos.

Em 1996 foi estabelecida uma parceria com a universidade alemã TUD - *Technische Universität Dresden*, para desenvolver o projeto completo de um disjuntor para proteção de motores de até 25A a ser fabricado pela Weg. Além disso, a TUD treinou engenheiros da Weg, de forma que pudessem continuar desenvolvendo produtos dessa natureza na empresa.

Esse produto pioneiro, desenvolvido em parceria com a TUD, foi lançado ao mercado em 2001. Desde então, os engenheiros da Weg continuam se aperfeiçoando através de programas de mestrado na UFSC, na TUD e também através de consultorias com pesquisadores e cientistas de áreas relacionadas.

Em meados de 2006, a empresa lança um novo produto, totalmente desenvolvido internamente, um contator para manobras de motores de até 16A. A seguir, também foram lançados diversos outros produtos, como relés de sobrecarga, relés temporizadores, fusíveis, além de contadores e disjuntores de capacidades maiores que os dos primeiros lançamentos.

No decorrer do presente trabalho, uma nova linha de contadores para motores na faixa de 9 a 150A está em desenvolvimento.

O interesse da empresa

Com o desenvolvimento de uma nova linha de contatores em andamento, existe na empresa Weg, a necessidade de estudar e compreender mais profundamente o funcionamento dos diferentes acessórios módulos de retenção mecânica (MRM) existentes no mercado, visando desenvolver uma solução própria.

Na área industrial, devido à necessidade de se atender à grande demanda de produtos do mercado consumidor, muitas vezes existe urgência nas etapas de projeto, na forma de prazos extremamente exíguos. Tal situação é inerente ao processo produtivo, mas algumas vezes pode apresentar efeitos indesejáveis visto que a falta de amadurecimento do projeto pode fazer com que detalhes importantes (e possivelmente até defeitos) passem despercebidos.

Entretanto, cada vez mais a empresa se atenta para a necessidade de, na etapa de desenvolvimento, aprofundar o nível de entendimento do produto que se deseja lançar e para as necessidades dos clientes desse produto. Atualmente é sabido que qualidade e competitividade são conseguidas, principalmente, nas fases iniciais de projeto do produto, quando suportadas por modelos de desenvolvimento integrado de produtos.

O produto eleito para a realização desse trabalho é o módulo de retenção mecânica para contatores (doravante chamado apenas de MRM). Acredita-se que trabalhar parte do desenvolvimento do MRM em nível de mestrado significa cumprir diversas etapas que não seriam realizadas, ou realizadas sem a mesma profundidade, de modo quase empírico, em um trabalho convencional de engenharia. Acredita-se que estas ações tenham reflexo positivo na qualidade do produto.

Dessa forma, o núcleo principal do trabalho é a modelagem e a simulação, e para a empresa outras etapas serão realizadas, de forma que no final se apresentará proposta de uma solução funcional, seja inédita ou fruto de engenharia reversa, para um novo produto MRM a ser lançado em conjunto com a nova linha de contatores.

É importante ressaltar que, atualmente na empresa existe uma linha de contatores que empregou, por alguns anos, um MRM comprado da empresa *GE Power Controls*. Essa parceria comercial já não existe e a linha atual não dispõe mais desse acessório. Esse produto da GE será uma das referências durante o desenvolvimento.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Realizar a modelagem e simulação eletromagnética e mecânica (cinemática / dinâmica), do dispositivo eletromecânico que compõe o “módulo de retenção mecânica para contatores” em desenvolvimento, empregando os recursos disponíveis na empresa.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver uma lista de requisitos de projeto para o produto MRM;
- Desenvolver um modelo mecânico simplificado de contator e realizar simulação dinâmica do comportamento do mesmo;
- Desenvolver um modelo para o atuador que compõe o MRM e simular o comportamento da força eletromagnética do mesmo;
- Desenvolver um modelo para o mecanismo que compõe o MRM, de forma a atender os requisitos de projeto elencados e simular dinamicamente comportamento do mesmo, quando acoplado ao modelo do contator.

1.1.3 Justificativas

Verificou-se uma grande carência de bibliografia específica sobre o desenvolvimento de componentes dessa natureza. As empresas multinacionais que os desenvolvem divulgam muito pouco sobre os mesmos. Encontram-se apenas uns poucos trabalhos de universidades alemãs de *Dresden* e *Braunschweig*. No Brasil, encontram-se apenas algumas dissertações de mestrado, realizadas principalmente por outros projetistas da Weg, em assuntos similares.

Assim, há o desejo de que, através da realização deste trabalho, um exemplo mais formal e sistemático dos fundamentos básicos do processo de desenvolvimento de produtos se dissemine cada vez mais dentro da empresa contribuindo sempre para o amadurecimento da equipe. Convém lembrar neste contexto que a formação da maioria dos engenheiros brasileiros lotados em indústria não tem metodologia científica de projeto no currículo.

Finalmente, deseja-se estreitar os laços universidade-empresa através da realização desse trabalho que deverá conciliar o rigor e a crítica científica do meio acadêmico com a objetividade e as possibilidades do ambiente industrial/comercial. Devido a isso, o trabalho resultante também procura descrever o produto usando as duas linguagens pertinentes, a científica e a técnica, entrelaçando na medida do possível ambas.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho está estruturado segundo a distribuição dos capítulos:

Introdução (capítulo 1), que apresenta os objetivos e motivações do trabalho;

Revisão Bibliográfica (capítulo 2), que apresenta a teoria envolvida e que servirá para orientar/validar a etapa de modelagem e simulação;

Etapas de Projeto do MRM (capítulo 3), que apresenta de maneira resumida a análise dos produtos concorrentes, os requisitos que o produto deverá atender e as decisões tomadas quanto à concepção do novo MRM;

Modelagem e Simulação (capítulo 4), que apresenta: a) a modelagem e a simulação do comportamento dinâmico do contator; b) a modelagem e a simulação da força eletromagnética do atuador que se utilizou no MRM em desenvolvimento; c) a modelagem do mecanismo do MRM e a simulação do comportamento dinâmico (empregando os modelos/simulações do contator e da força eletromagnética apresentados nos tópicos anteriores), bem como os retrabalhos feitos nesse modelo até atingir a configuração funcional. Esse capítulo apresenta também a discussão dos resultados;

Discussões e Considerações Adicionais (capítulo 5), onde se confrontam os requisitos propostos no capítulo 3 com os resultados encontrados nas simulações do capítulo 4;

Conclusão (capítulo 6), onde é feita a avaliação dos resultados obtidos quando confrontados com os objetivos iniciais do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os contadores e relés apareceram há mais de 160 anos, e embora seu aspecto construtivo básico não tenha sofrido alterações nos últimos 50 anos, pesquisas realizadas em diversas áreas têm permitido aperfeiçoar estes componentes, sendo a mais óbvia destas, a redução de tamanho. Entre diversos avanços, o emprego de novas ligas metálicas nos contatos e o emprego de novos materiais plásticos, fez a capacidade de chaveamento de potência aumentar para uma capacidade de isolamento igual ou ampliada, ainda com redução de dimensões e custos.

Outros temas recorrentes em pesquisas relacionadas à contadores e relés referem-se à modelagem do comportamento dinâmico e a integração crescente de circuitos eletrônicos para comando destes dispositivos outrora puramente eletromecânicos.

Contadores e relés

Atualmente existem inúmeros tipos de relés dos quais se destacam os eletromecânicos, de estado sólido, bimetálicos, temporizadores, etc., porém todos têm os mesmos subsistemas e princípios de operação. O relé de interesse no presente trabalho é o eletromagnético (emprega um atuador magnético) e eletromecânico (que comuta contatos mecânicos) visto que do ponto de vista da indústria, os contadores são considerados tipos particulares desse tipo de relé, como se apresenta a seguir.

Classificação funcional dos contadores e relés

Do ponto de vista funcional, tanto os contadores quanto os relés eletromagnético-eletromecânicos são dispositivos idênticos, de comutação à distância. Na figura 2-1 a seguir, apresentam-se as principais funções internas dos mesmos.

O contador/relé recebe uma grandeza elétrica na entrada (corrente e tensão na bobina do atuador) do lado primário que é convertida para uma grandeza intermediária, não elétrica. Essa grandeza não elétrica entre primário e secundário é o campo magnético, que garante a isolamento galvânica entre entrada e saída.

Através do atuador magnético, o campo magnético é convertido em força mecânica de forma a operar os contatos mecânicos no lado secundário. Os contatos mecânicos comutam e conduzem correntes das cargas elétricas do secundário.

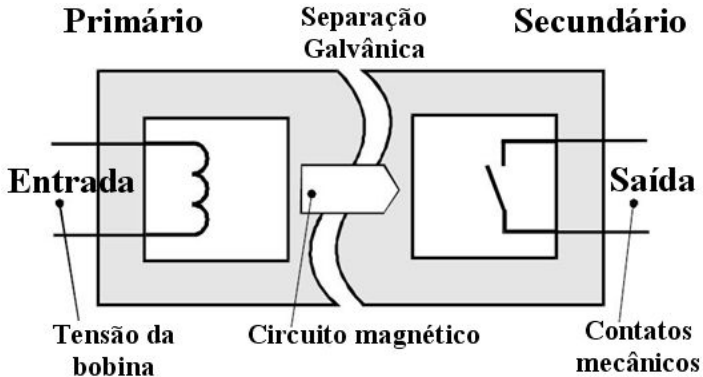


Figura 2-1: Principais funções internas de um relé/contator.

Fonte: Schrack (2007), p. 5.

Classificação dos contadores e relés na indústria

Como citado, do ponto de vista funcional, contadores e relés são dispositivos eletromagnético-eletromecânicos de comutação à distância idênticos. Porém, a indústria (principalmente os fabricantes de relés e contadores e seus clientes) e também alguns autores como Roters (1970), consideram esses produtos distintos, em função da diferença significativa entre as cargas elétricas que os mesmos acionam e de várias diferenças construtivas.

Os relés são em sua grande maioria monopolares (apesar de disponíveis com até 8 contatos) e desenvolvidos para manobrar apenas pequenas correntes em níveis de tensão moderados, designados para manobra de circuitos de iluminação, comunicação, sinalização, reguladores automáticos, solenóides e sistemas remotamente comandados em geral.

Contadores são capazes de comutar altas correntes em tensões de padrões industriais, empregados principalmente para acionamento de motores. Além disso, são em sua maioria tripolares, comutam e são acionados por tensões em padrões industriais (tensões de até 690V CA), e dimensionados para suportar correntes elevadas típicas de partida e reversão do sentido de giro de motores. A capacidade dos contadores de interromper correntes elevadas é conseguida graças às câmaras de extinção de arco elétrico que fazem parte dos mesmos.

Nos contadores também é possível acoplar um grande e variado conjunto de acessórios, que complementam suas funções básicas.

2.1 OS ATUADORES MAGNÉTICOS

Tanto o contator quanto o acessório MRM modelado e simulado no presente trabalho têm como um de seus componentes fundamentais o atuador magnético, que permite seu comando à distância.

Atuadores magnéticos permitem que se empregue tensão e corrente elétrica em sua entrada para produzir movimento em sua saída e são dessa forma dispositivos de conversão de energia (transdutores) eletromecânicos. Os atuadores magnéticos também são comumente chamados de atuadores, eletroímãs e, no contexto desse trabalho, “conjunto magnético” (bobina + núcleos) dos contatores.

No universo dos contatores e relés, o movimento desses atuadores magnéticos é translativo e limitado numa faixa de movimento, ao contrário dos motores elétricos e outras máquinas giratórias eletromagnéticas (também considerados atuadores), as quais têm um movimento amplo e ilimitado de revolução.

Na figura 2-2 apresenta-se um diagrama de blocos de um atuador magnético. A energia elétrica (na forma de tensão e corrente) aplicada na entrada é convertida para energia magnética (armazenada no campo magnético). A energia magnética é convertida para energia mecânica na forma de uma força (de origem magnética) que por sua vez produz um deslocamento na saída.

Os blocos de conversão “Elet/Mag” e “Mag/Mec” são freqüentemente não lineares. O bloco “Mag/Mec” normalmente produz uma força proporcional ao quadrado do campo magnético.

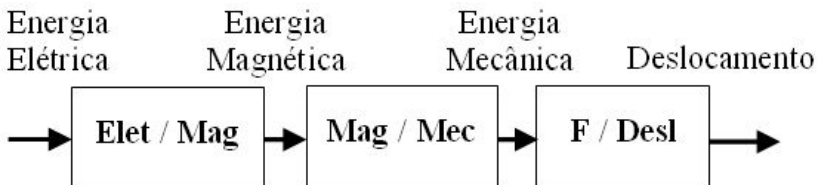


Figura 2-2: Diagrama de blocos de um atuador magnético.

Fonte: Adaptado de Brauer (2006), p. 4.

Exemplos de aplicação de atuadores magnéticos translativos:

- a) Contatores, disjuntores e relés para comando de motores elétricos e outros equipamentos;
- b) Chaves seccionadoras e relés para transmissão e distribuição de energia elétrica;

- c) Válvulas eletro-hidráulicas em aviões, tratores, robôs, automóveis e outros equipamentos;
- d) Injetores de combustível em motores de automóveis, caminhões e locomotivas;
- e) Próteses biomédicas para corações artificiais, membros, ouvidos e outros órgãos;
- f) Posicionadores do cabeçote leitor em drives de computadores;
- g) Alto-falantes.

2.1.1 Atuadores de solenóide

Atuadores de solenóide consistem basicamente numa bobina de fio enrolado (o solenóide), uma peça de aço chamada armadura ou núcleo móvel, que se move em direção à peça estacionária, também de aço, chamada estator ou núcleo fixo. No campo de atuação de contadores e relés, a armadura / núcleo móvel se desloca em linha reta produzindo movimento linear.

Os atuadores de solenóide de interesse no presente trabalho podem ser divididos em dois tipos:

2.1.1.1 Atuadores de contadores

Nos atuadores encontrados em contadores, o núcleo móvel pode ter diversos formatos, sendo o mais comum o formato de “E” (detalhe “A” na figura 2-3), mas também é encontrado no formato de “U” ou ainda, de chapa plana.

O estator é chamado de núcleo fixo e também pode ter diversos formatos. O núcleo fixo e móvel em conjunto com a bobina são normalmente chamados de atuador magnético do contador.

Nos atuadores de solenóide a força magnética é produzida nas superfícies em que o fluxo está na direção do movimento linear. Nos núcleos de contador, devido à sua geometria, essa força é produzida em todas as faces em que o fluxo entra e sai (setas 1,2 e 3), conforme detalhe “A” na figura 2-3.

Os núcleos podem ser feitos de aço laminado para minimizar o efeito das correntes parasitas induzidas (*eddy currents*) que reduzem a força e aumentam as perdas de energia.

A força magnética produzida varia consideravelmente em função do entreferro e da corrente na bobina.

2.1.1.2 Atuadores de êmbolo

Ao contrário do núcleo móvel do contator, a armadura do tipo êmbolo é comumente um cilindro ou um paralelepípedo reto.

Nos atuadores de êmbolo, a única superfície em que o fluxo está na direção do movimento linear, onde a força útil é produzida, é na extremidade do êmbolo, normalmente uma superfície plana, retangular, circular ou ainda cônica.

Conforme se apresenta no detalhe “B” da figura 2-3, o fluxo normalmente deixa o êmbolo através da superfície de sua extremidade, em direção ao estator (seta 1), e volta para o mesmo através das laterais (setas 2 e 3), onde pouca ou nenhuma força magnética útil é produzida.

Dessa forma o atuador de êmbolo pode ter menos força por unidade de volume que o atuador de contator.

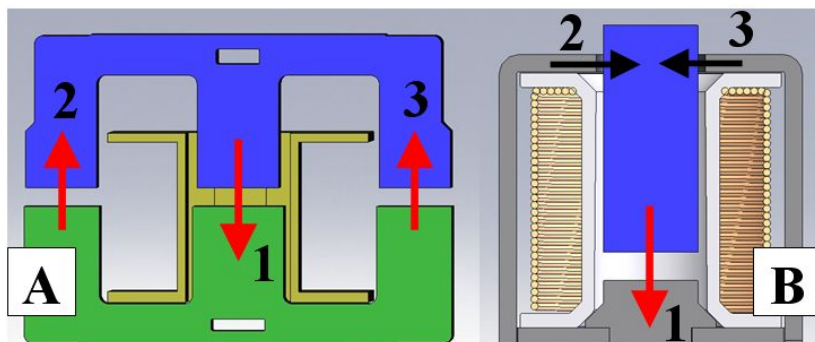


Figura 2-3: Atuador de contator e atuador de êmbolo.

2.2 OS CONTADORES

2.2.1 Estrutura construtiva dos contadores

A estrutura física de um contator é formada basicamente por três partes principais: a carcaça, que é a parte externa do contator, o conjunto fixo que fica engastado nessa carcaça e o conjunto móvel, capaz de movimentar-se em relação às duas outras partes.

As partes internas do contator são detalhadas na figura 2-4 a seguir. Nesta figura apresenta-se o esquema da estrutura interna de um contator CA para manobra de motores.

Segundo Wada; Yoshimoto; Kitaide, (2002), como contadores CA são mais baratos de se fabricar e podem ser comandados por tensões em padrões comerciais, estes respondem por mais de 80% dos contadores produzidos. Além disso, o funcionamento dos mesmos é normalmente mais crítico já que a força magnética resultante também varia em função do tempo.

Assim, quando se apresentam detalhes exclusivos de contadores CA, isso é mencionado. Nos demais casos, a teoria básica do fenômeno que se apresenta aplica-se tanto para contadores CA como para CC.

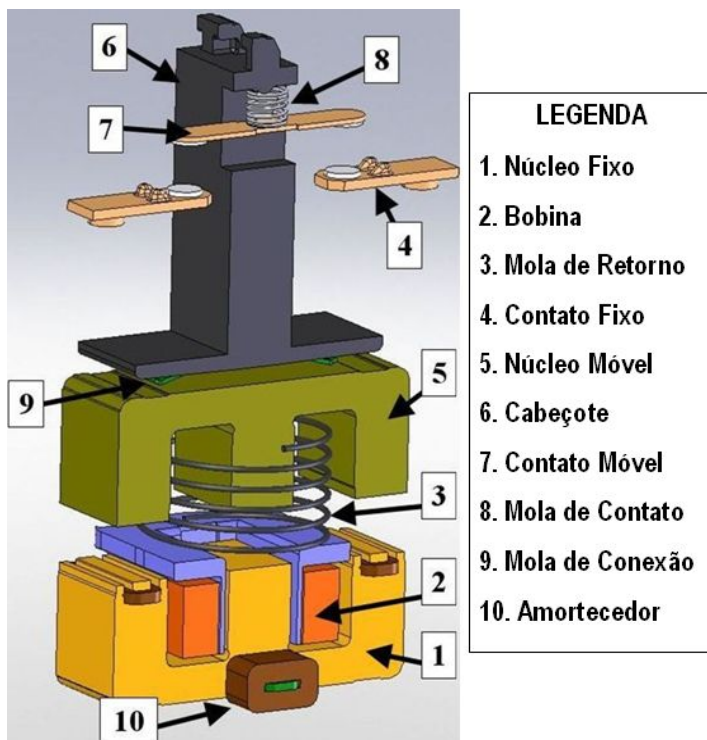


Figura 2-4: Esquema da estrutura interna de um contador.

2.1.1.3 O conjunto fixo do contador

Núcleo fixo (1): Feito em aço silício laminado, normalmente em formato de um “E”. Pertence ao circuito magnético do contador, por onde circula o fluxo magnético resultante da circulação de corrente na bobina.

No núcleo fixo de contatores com tensão de comando CA são encontrados ainda os anéis em curto-circuito, também chamados de *shading coils* (ROTTERS, 1970) ou ainda *shading rings* (BRAUER, 2006), comumente traduzidos como espiras de sombra (NAU; KONDLATSCH, 1991), que têm a função de evitar a vibração e ruído magnético que ocorrem em eletroímãs CA.

Bobina (2): Em corte na figura 2-4, é composta por uma peça plástica (o carretel da bobina), pelos terminais de alimentação (que não são apresentados na figura) e pelo enrolamento de fios de cobre esmaltados.

Mola de retorno (3): Fornece a força mecânica necessária para que o conjunto móvel do contator volte à posição inicial de repouso após a interrupção da alimentação da bobina.

Contatos fixos (4): Juntamente com os contatos móveis (7), realizam a principal função de um contator, que é estabelecer e interromper o circuito do equipamento elétrico energizado através do contator.

Amortecedor do núcleo fixo (10): Tem a função de amortecer o impacto entre os núcleos. É comumente formado por elementos viscoelásticos de amortecimento (borrachas) nos dois lados do núcleo, suportados por uma barra de aço. Esta estrutura poderá não estar presente em determinados contatores, dependendo do tamanho dos mesmos ou ainda do fabricante.

2.1.1.4 O conjunto móvel do contator

Núcleo móvel (5): É a parte atraída pelo núcleo fixo quando é aplicada tensão na bobina. Em seu movimento, carrega consigo o cabeçote e os contatos móveis.

Cabeçote (6): Solidário ao núcleo móvel, o cabeçote dá sustentação e desloca os contatos móveis e suas molas no momento em que a bobina é energizada (apresenta-se em corte na figura).

Contatos móveis (7): Análogo aos contatos fixos (4).

Molas de contato (8): Mantém a pressão que deve haver entre os contatos fixos e móveis quando o contator está energizado.

Mola de conexão (9): É uma mola plana de aço, posicionada entre o núcleo móvel e o cabeçote. Amortece o impacto do fechamento e mantém a pressão entre essas duas peças. Esta estrutura poderá não estar presente em determinados contatores, dependendo do tamanho dos mesmos ou ainda do fabricante.

2.1.1.5 A carcaça do contator

Um contator contém mais peças que compõem seu invólucro e que para simplificação, não se apresenta na figura 2-4. São elas:

Base: Dá sustentação ao conjunto fixo, protege conjunto magnético contra influências externas e protege os usuários contra choque elétrico.

Carcaça superior: Dá suporte aos contatos fixos e isola os mesmos entre si e em relação ao meio externo.

Capa frontal: Protege os terminais de potência dos contadores e posiciona os acessórios superiores junto ao contator.

Câmara de extinção de arco elétrico: Normalmente, em contadores para manobra de correntes superiores a 100A, existirá ainda um conjunto de placas de aço paralelas na região de abertura dos contatos, chamada câmara de extinção de arco elétrico. Esta é a estrutura de um dispositivo de manobra para a qual o arco é desviado para facilitar a sua extinção (SIEMENS, 1994). O esquema que se apresenta na figura 2-4 não tem câmara de extinção.

2.2.2 Funcionamento dos contadores

A operação de um contator consiste basicamente na aplicação de tensão de comando em sua bobina forçando a circulação de corrente. Essa corrente produz fluxo no circuito magnético e, conseqüentemente uma força magnética que faz com que o núcleo fixo atraia o núcleo móvel, obtendo deslocamento mecânico.

Por sua vez, o núcleo móvel está acoplado ao cabeçote que carrega os contatos móveis em direção aos contatos fixos, estabelecendo a corrente no circuito do equipamento elétrico, por exemplo, um motor.

A esse deslocamento se opõem: as forças das molas, o atrito do conjunto móvel com as paredes internas da carcaça do contator e também a inércia da massa do conjunto móvel. Todas estas forças atuam em sentido contrário ao da força magnética.

2.2.2.1 O movimento do cabeçote do contator

Apresenta-se na figura 2-5 uma ilustração com dados experimentais do movimento do cabeçote do contator. A partir do comando de operação aplicado no instante $t = 0$ ms, o cabeçote se move

junto com o núcleo móvel (para simplificação, desconsidera-se nessa análise a mola de conexão que pode existir entre eles).

Após a colisão dos núcleos, o cabeçote também apresenta vibração e se move além da posição final de fechamento, em direção ao fundo do contator, devido à compressão dos elementos viscoelásticos de amortecimento do núcleo fixo. O máximo deslocamento em relação à posição final de fechamento é definido como *overshoot*. Da mesma maneira, o máximo deslocamento na direção oposta é definido como *undershoot*. Ambos estão indicados na figura 2-5. Os deslocamentos são importantes visto que a pressão de contato dada pela compressão das molas é determinada pelo movimento relativo entre os contatos móveis e o topo do cabeçote.

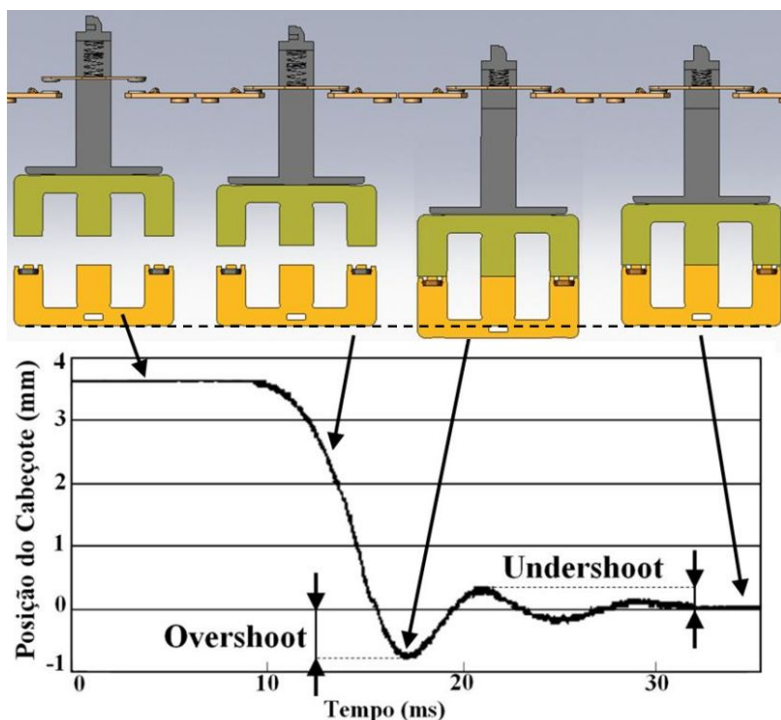


Figura 2-5: Dados experimentais do deslocamento do cabeçote do contator.
Fonte: Adaptado de Wada; Yoshimoto; Kitaide (2002).

2.2.2.2 O movimento dos contatos e do núcleo móvel

Complementado a análise do movimento do cabeçote, feita no item anterior, apresentam-se na figura 2-6 dados experimentais de Wada; Yoshimoto; Kitaide (2002) para um contator CA durante o fechamento de seus contatos. No experimento em questão, aplicou-se 10V (CC) em um dos contatos fixos para detectar a conexão elétrica durante o fechamento. Verifica-se no detalhe “A” da figura a tensão no contato fixo oposto ao lado onde se aplicou a tensão 10V. Dessa forma, os contatos estão abertos quando a tensão medida é nula, estando fechados quando a tensão medida é 10V.

O comando é aplicado no instante $t_0 = 0$ ms. Uma trepidação da tensão é percebida a partir do instante t_1 , indicando que os contatos repicam imediatamente após a colisão. Esse fenômeno é conhecido como ricochete (ou repique) de contatos (do inglês *bouncing*).

Os detalhes “B” e “C” apresentam as velocidades do contato móvel e do núcleo móvel respectivamente. Como a distância inicial entre os núcleos é maior que a distância inicial entre os contatos, os contatos colidem primeiro. Após a primeira colisão, os contatos móveis ricocheteiam por alguns milissegundos.

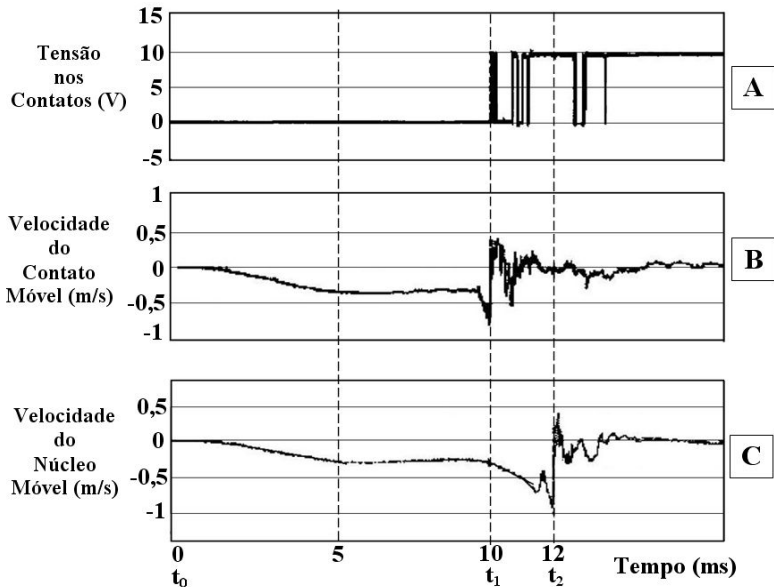


Figura 2-6: Dados experimentais de fechamento do contator.

Fonte: Wada; Yoshimoto; Kitaide (2002).

Depois de diversos milissegundos a partir do instante da colisão dos contatos, o núcleo móvel colide com o núcleo fixo, como indicado pelo instante t_2 . Depois dessa colisão, há uma pequena vibração e finalmente os núcleos se unem em uma posição final estável.

2.2.3 Análise do comportamento dinâmico de contadores CA

A modelagem dinâmica de contadores pode ser composta pelos modelos elétrico, magnético e mecânico. Tal modelagem é complexa, porém é assunto que já foi tratado com diferentes abordagens por vários autores como Koltermann; Assumpção (1990), Albuquerque (1998) ou Ruiz; Espinosa (2008), entre outros.

O presente trabalho, entretanto, tem como foco verificar o comportamento dinâmico do acessório eletromecânico MRM. Esse comportamento verifica-se a partir de um modelo dinâmico detalhado do MRM sujeito à ação de um modelo de contator durante o sua operação e desoperação.

Acredita-se que o modelo de contator nesse caso pode ser simplificado, ao menos em termos elétricos e magnéticos, e para tal, a força magnética do mesmo será obtida através de medições em um contator existente.

Da mesma forma, a análise do comportamento dinâmico dos contadores que se apresenta nesse capítulo trará as principais informações qualitativas da parte magnética (a fim de que se possa avaliar as medições feitas e empregadas no modelo), mas será superficial quanto à parte elétrica.

Finalmente, a análise do modelo mecânico será realizada com um maior detalhamento visto que um modelo similar será desenvolvido.

2.2.3.1 Equacionamento da parte elétrica de contadores CA

A partir do circuito elétrico do esquema que se apresenta na figura 2-7 a seguir, obtêm-se a equação que relaciona tensão e corrente do circuito de comando do contator em função dos parâmetros elétricos do mesmo. Pela lei das malhas, a soma das quedas de tensão no circuito é nula, conforme equação 2.1.

$$V_L + V_R + V_F = 0 \quad (2.1)$$

Descrevendo-se cada termo em mais detalhes, obtém-se a equação 2.2:

$$L \cdot \frac{d}{dt}i + R \cdot i + Vsen(\omega \cdot t) = 0 \quad (2.2)$$

Onde:

L - indutância da bobina [H]

R - resistência da bobina [Ω]

$Vsen(\omega.t)$ - tensão alternada da rede [V]

$\omega = 2\pi f$ - frequência angular [rad/s]

f - frequência da rede [Hz]

i - corrente da bobina [A]

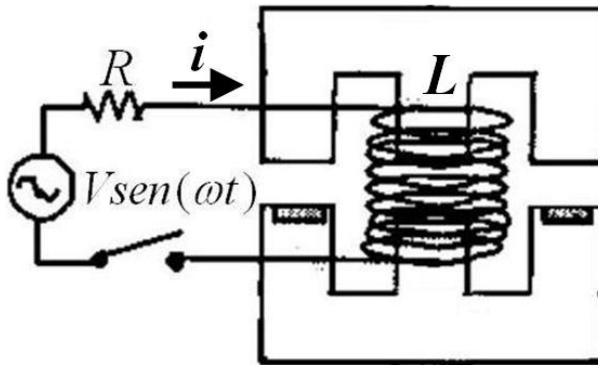


Figura 2-7: Esquema elétrico do contator.

Fonte: Adaptado de Wada; Yoshimoto; Kitaide (2002).

Nos demais trabalhos de modelagem de contadores, as tensões e correntes assim definidas em função dos parâmetros elétricos da bobina do contator são então empregadas na modelagem da parte magnética.

2.2.3.2 Sistema magnético CA de contadores

Como dito anteriormente, o objetivo nesse caso não será apresentar o desenrolar de um conjunto de equações de eletromagnetismo, mas sim empregar as principais conclusões dos trabalhos já realizados para apresentar os aspectos qualitativos da curva

de força magnética de um contator fechado e durante o transitório de fechamento.

A avaliação das forças magnéticas do contator tem como ponto de partida a corrente da bobina (que pode ser calculada como se apresenta na equação 2.2) e o fluxo total gerado pela mesma (conforme figura 2-8), que se relaciona com a corrente conforme se apresenta na equação 2.3:

$$L \cdot i = N \cdot \phi \quad (2.3)$$

Onde:

N - número de espiras da bobina [adimensional]

ϕ - fluxo magnético [Wb]

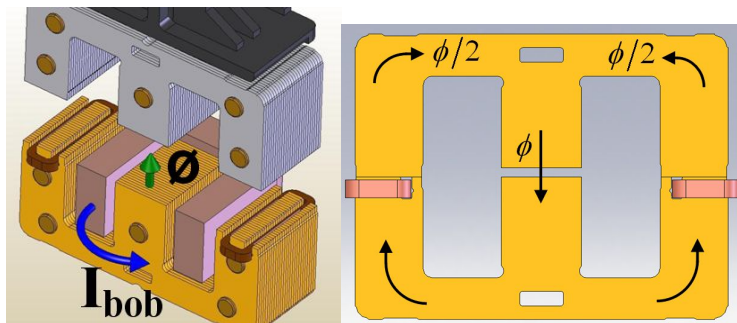


Figura 2-8: Corrente da bobina e fluxos magnéticos no núcleo do contator.

De maneira sucinta a força magnética F_{mag} é dada por:

$$F_{mag} = k_1 \cdot \frac{\phi^2}{S} \quad (2.4)$$

Onde:

k_1 - constante dependente do meio (ar) [A^2/N]

S - área da seção transversal ao fluxo [m^2]

Dessa forma, pela equação 2.4, sendo k_1 uma constante, a força é proporcional ao quadrado do fluxo magnético, que pode ser considerado senoidal.

Observa-se que a equação 2.3 relaciona as partes elétrica (corrente) e magnética (fluxo magnético) do contator. Por sua vez, a equação 2.4 relaciona a parte magnética (fluxo) com a parte mecânica, visto que a força F_{mag} , apesar de ter origem magnética, é a força responsável pelo deslocamento do núcleo móvel.

Apesar de não ter aparecido de maneira explícita, o deslocamento do núcleo influencia nas diversas grandezas das equações anteriores, corrente, fluxo, indutância da bobina e consequentemente, na força.

Dada a distribuição do fluxo magnético em cada um dos ramos do núcleo, outro ponto importante é a avaliação da influência da espira de sombra, que não será equacionada no presente trabalho.

Para contator fechado - em regime

Apresentam-se na figura 2-9 a seguir, o fluxo ϕ_1 da bobina e a força F_1 devida somente a esse fluxo. Observa-se que a força F_1 tem o dobro da frequência do fluxo e se anula temporariamente, no mesmo ponto em que o fluxo passa por zero.

Como a força é dependente do fluxo e o fluxo varia com a corrente (conforme equação 2.3), a força F_1 (devido ao fluxo ϕ_1 da bobina) é nula quando a corrente passa pelo zero. Para evitar os efeitos indesejados dessa força que se anula, uma espira de sombra é empregada nos eletroímãs CA.

“Sem outras forças magnéticas presentes e devido ao efeito das molas, um eletroímã CA irá abrir parcialmente durante a passagem da corrente por zero. Haverá então uma vibração com frequência que é o dobro da frequência da rede. Sem a espira de sombra, essa vibração poderia destruir rapidamente a superfície dos pólos dos núcleos” (KUSSY; WARREN, 1987, p. 341).

A espira de sombra produz um fluxo magnético adicional ϕ_2 defasado de um ângulo elétrico de α radianos em relação ao fluxo ϕ_1 da bobina, e da mesma forma, implica numa nova componente de força magnética F_2 que está presente no instante em que a força magnética F_1 da bobina é nula.

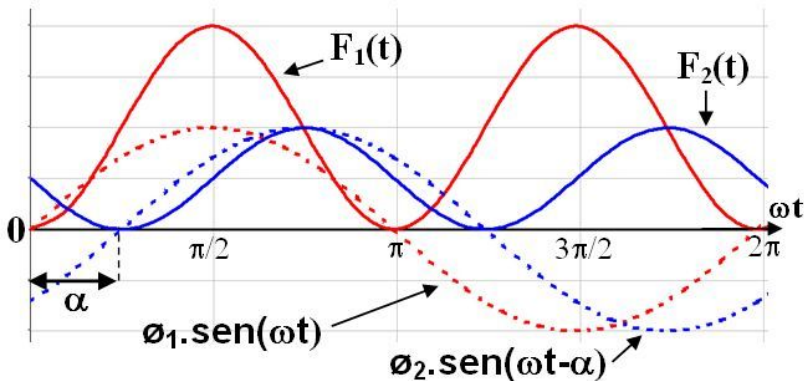


Figura 2-9: Fluxos magnéticos e forças do contator.

A força magnética total do contator é a soma das forças F_1 e F_2 , como se apresenta na figura 2-10, e assim como essas forças, tem o dobro da frequência da tensão de alimentação. Porém, diferentemente das forças F_1 e F_2 , essa força resultante não se anula.

Segundo Albuquerque (1998), essa força instantânea pode ser decomposta em duas componentes, onde a primeira é força média, também chamada de força útil, e que em regime permanente, pode ser medida por um sensor de força.

Quando da força instantânea se subtrai esse valor médio citado, obtém-se como resultado a outra componente de força que é puramente alternada, conforme figura 2-10.

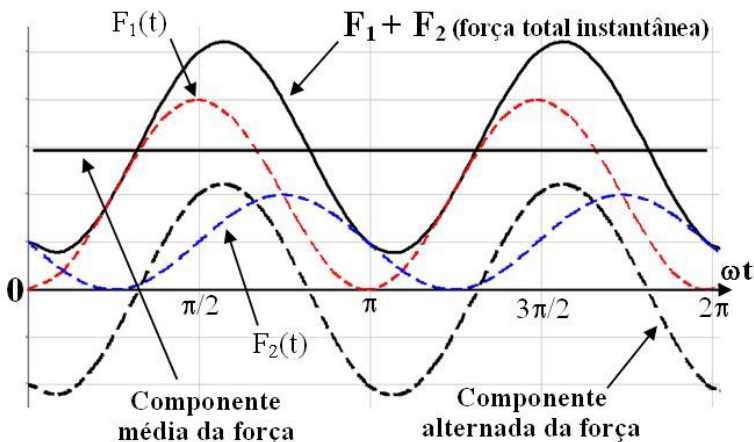


Figura 2-10: Força magnética instantânea e média do contator.

A força magnética média durante o fechamento do contator:

Nas figuras 2-9 e 2-10 apresentam-se as forças magnéticas para um contator fechado, em regime permanente. Durante o fechamento, entretanto, a força magnética irá variar com a posição relativa dos núcleos, pois quanto mais próximos estiverem, maior será a força magnética.

Numa verificação simples, esse fato pode ser comprovado analisando-se a equação para fluxo magnético, a seguir:

$$F = k_2 \cdot \frac{S \cdot N \cdot i}{l} \quad [\text{Wb}] \quad (2.5)$$

Onde:

k_2 - constante dependente do meio (ar) $[\text{N/A}^2]$

l - abertura do entreferro $[\text{m}]$

A força magnética que se apresenta na equação 2.4 varia com o quadrado do fluxo. Na equação 2.5, verifica-se que o fluxo é inversamente proporcional à abertura do entreferro (distância entre os núcleos móvel e fixo do contator). Quanto menor essa abertura, maior o fluxo magnético e consequentemente maior a força de atração entre eles.

Observa-se, no entanto, que as relações entre as variáveis da equação 2.5 não são lineares e que além de dependente da abertura do entreferro, o fluxo também depende do valor da corrente elétrica..

Dessa forma, assim como se apresenta na figura 2-10 a força média para o contator fechado em regime, na figura 2-11 apresenta-se a força magnética média onde, “contator aberto” representa a abertura máxima do entreferro e “contator fechado” representa os núcleos encostados.

Além disso, ainda na figura 2-11, compara-se qualitativamente a força magnética média com as forças das molas que deverão ser vencidas durante o fechamento do contator.

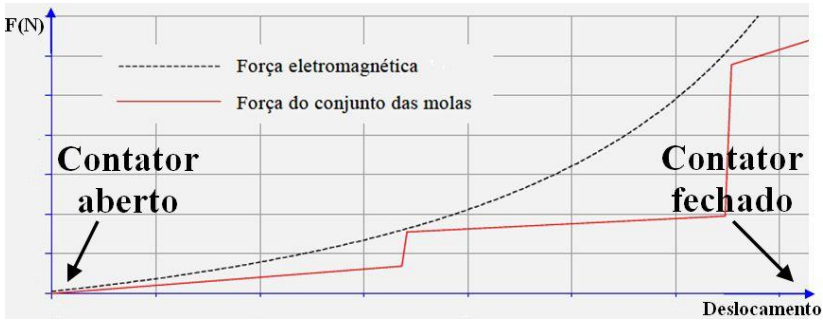


Figura 2-11: Variação da força magnética média no fechamento do contator.

Fonte: Albuquerque (1998), p. 49.

2.2.3.3 Sistema mecânico de contadores

No esquema que se apresenta na figura 2-12 a seguir, considerou-se a massa e a inércia de cada peça. No entanto, para simplificar o equacionamento, a força de impacto devido à colisão dos contatos e núcleos foi desconsiderada. Para descrever o comportamento dinâmico completo do contator, o mesmo foi descrito por Wada; Yoshimoto; Kitaide (2002), em forma de equações diferenciais.

Força da mola de retorno

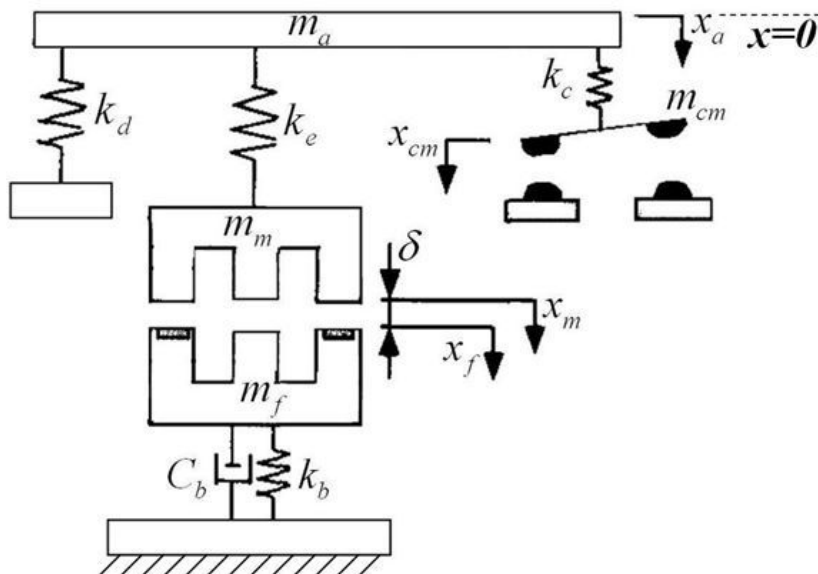
Independentemente da posição do núcleo móvel, a mola de retorno (representada por k_d no modelo) estará sempre atuando diretamente no sentido de separar os núcleos. A força F_d dessa mola é descrita como:

$$F_d = k_d \cdot x_a \quad [\text{N}] \quad (2.5)$$

Onde:

k_d – coeficiente de elasticidade de mola de retorno [N/m]

x_a – deslocamento do cabeçote [m]



LEGENDA:

C_b	coeficiente de viscosidade de Voigt	[N.s/m]
k_b	coeficiente de elasticidade de Voigt	[N/m]
k_c	coeficiente de elasticidade mola contato	[N/m]
k_d	coeficiente de elasticidade mola retorno	[N/m]
k_e	coeficiente de elasticidade mola conexão	[N/m]
m_a	massa do cabeçote	[kg]
m_f	massa do núcleo fixo	[kg]
m_{cm}	massa do contato móvel	[kg]
m_m	massa do núcleo móvel	[kg]
x_a	deslocamento do cabeçote	[m]
x_{cm}	deslocamento dos contatos móveis	[m]
x_f	deslocamento do núcleo fixo	[m]
x_m	deslocamento do núcleo móvel	[m]

Figura 2-12: Esquema mecânico do contator.

Fonte: Wada; Yoshimoto; Kitaide (2002).

Força da mola de conexão (do núcleo móvel)

A força F_e dessa mola (representadas por k_e no modelo) é descrita como:

$$F_e = k_e \cdot (x_a - x_m) \text{ [N]} \quad (2.7)$$

Onde:

k_e – coeficiente de elasticidade da mola de conexão [N/m]

x_m – deslocamento do núcleo móvel [m]

Forças no amortecedor do núcleo fixo

Tradicionalmente, o comportamento viscoelástico dos elementos de amortecimento tem sido descrito de diversas maneiras. A maneira mais simples é o modelo de Voigt, que pode ser representado por uma mola em paralelo com um elemento de amortecimento viscoso. Esse modelo assume que os dois elementos estão sujeitos à mesma deformação e o esforço total divide-se nos dois elementos.

Dessa forma, a força F_b desse amortecedor é descrita como:

$$F_b = C_b \cdot \dot{x}_f + k_b \cdot x_f \text{ [N]} \quad (2.8)$$

Onde:

C_b – coeficiente de viscosidade do modelo Voigt [N.s/m]

k_b – coeficiente de elasticidade da mola do modelo Voigt [N/m]

x_f – deslocamento do núcleo fixo [m]

\dot{x}_f – velocidade do núcleo fixo [m/s]

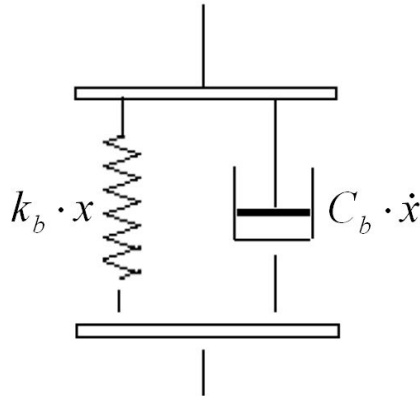


Figura 2-13: Esquema do modelo de Voigt para elementos viscoelásticos.
Fonte: Gent (2001), p. 75.

Apresentam-se a seguir as equações de movimento para cada um dos elementos do sistema mecânico:

Resultante no cabeçote:

$$m_a \cdot \ddot{x}_a = -k_d \cdot x_a - k_e \cdot (x_a - x_m) - k_c \cdot (x_a - x_{cm}) \quad (2.9)$$

Resultante no núcleo móvel:

$$m_m \cdot \ddot{x}_m = -k_e \cdot (x_m - x_a) + F_{mag} \quad (2.10)$$

Resultante no núcleo fixo:

$$m_f \cdot \ddot{x}_f = -k_b \cdot x_f - C_b \cdot \dot{x}_f - F_{mag} \quad (2.11)$$

Resultante nos contatos móveis:

$$m_{cm} \cdot \ddot{x}_{cm} = -k_c \cdot (x_{cm} - x_a) \quad (2.12)$$

Observa-se que os autores da referência citada não levaram em consideração as forças de atrito ao descreverem o comportamento dinâmico do contator. De fato, a experiência prática comprova que, em produtos convencionais, estas forças são de ordem de grandeza muito inferior se comparadas às demais forças magnéticas e forças de molas.

2.3 O ACESSÓRIO MRM

Conhecendo o comportamento dinâmico do contator pode-se também avaliar a influência dos demais acessórios (blocos de contatos auxiliares frontais, laterais, intertravamento mecânico, etc.) que, como o MRM foco deste trabalho, são acoplados e interferem no funcionamento do contator.

As influências desses acessórios podem ser descritas como mais um conjunto de forças mecânicas a serem computados à força resultante e pelo menos mais um elemento massa + mola interagindo no modelo mecânico da figura 2-12.

2.3.1 O emprego do MRM

Os contadores são dispositivos que atualmente vem sendo identificados como os pontos fracos em muitos processos industriais, durante eventos transientes na tensão de alimentação. Afundamentos de tensão (*voltage sags*) são eventos de natureza normalmente aleatória e são caracterizados como uma breve redução de amplitude. A duração desses eventos pode ser de frações a ciclos completos de frequência da rede. Em muitas situações, os afundamentos chegam a causar a interrupção do sistema (COLLINS; BRIDGWOOD, 1997).

Conforme se apresentou nos tópicos anteriores, o funcionamento correto de um contator depende de muitos fatores, dentre eles, da “qualidade” da tensão de alimentação do circuito de comando, ou seja, da tensão que chega à bobina do contator.

Quando essa tensão apresenta reduções excessivas em sua amplitude, poderá ocorrer uma trepidação dos contatos do contator, o que acabará por desligá-lo ou ainda pior, inutilizar o mesmo. Nessas situações podem-se empregar os chamados contadores com retenção, que são contadores com duas posições de repouso, formando um dispositivo biestável (o contator comum é monoestável).

Além de proverem um funcionamento seguro em redes com tensão de “baixa qualidade” (onde ocorrem afundamentos de tensão frequentemente), os contadores com retenção podem originar significativa economia de energia em aplicações de circuitos de distribuição ou de *by-pass*, onde os contadores permanecem ligados durante longos períodos sem manobrar (ABB, 2006).

Para se operar contadores convencionais, aplica-se uma tensão na bobina do mesmo, que deverá ser mantida estável (dentro de uma determinada faixa) durante todo o período em que se deseja que o contator permaneça no estado ligado. Assim que essa tensão for retirada o contator voltará para sua posição natural de repouso que é desligado.

Nos contadores com retenção, apenas um pulso de tensão de comando na bobina é necessário para energizar o mesmo. O contator permanecerá ligado mesmo sem tensão em sua bobina e será desligado apenas quando um novo pulso de tensão for aplicado.

Classificam-se os contadores com retenção como:

- a) Contadores com retenção magnética: quando o sistema que os mantém no estado ligado na ausência de alimentação da bobina, baseia-se na ação de um ímã permanente;
- b) Contadores com retenção mecânica: quando o contator é mantido no estado ligado pela ação de um mecanismo (trava ou engate mecânico).

O mais usual no mercado são contadores com retenção mecânica, obtidos a partir de um contator convencional ao qual se acopla, na parte externa frontal, um módulo de retenção mecânica. O funcionamento desse conjunto é o mesmo dos contadores com retenção. Para energizar é necessário um pulso de tensão na bobina do contator.

Devido à ação de uma trava mecânica do módulo de retenção, o contator permanece no estado “ligado” até que o próximo pulso de tensão é aplicado, dessa vez no módulo de retenção e assim sequencialmente. Este módulo contém um atuador magnético (eletroímã) que libera a trava mecânica, que permite o contator voltar para seu estado de repouso “desligado” por ação de suas molas.

A seguir, apresentam-se quatro exemplos práticos da aplicação que a empresa Weg faz do MRM.

2.3.1.1 Exemplos práticos de aplicação do MRM

Exemplo 1: Circuitos de iluminação em hospitais

Os contadores de comando do circuito de iluminação de algumas áreas hospitalares empregam o MRM para economia de energia (já que a iluminação fica ligada por longos períodos) e principalmente, por conveniência. Na situação de falhas ou falta de energia, o gerador demora certo tempo para entrar e, quando o mesmo assume o circuito,

ele encontra todos os contatores do circuito de iluminação já ligados. Dessa forma a iluminação volta direto, sem precisar chavear nenhum interruptor (como o que comanda os contatores da iluminação).

Exemplo 2: Montanha russa de parques de diversão

Quando o exemplo anterior, do hospital, foi citado em uma palestra comercial, o mesmo chamou a atenção de engenheiros de um famoso parque de diversões na região metropolitana de São Paulo, que identificaram nesse acessório, a solução de segurança para um problema ocorrido na inauguração do parque.

Uma bobina de contator do sistema de comando da montanha russa queimou, fazendo o contator desligar e o carro da montanha russa cheio de pessoas parar num ponto alto da rampa de subida. Todos tiveram o transtorno de descer por uma escada de emergência.

Supondo que o contator que comanda esse carro tivesse um MRM acoplado, o mesmo continuaria ligado (e o carro da montanha russa continuaria em movimento até o final do percurso), quando então o contator seria desligado através do desarme do MRM e a manutenção poderia ser feita.

Exemplo 3: Proteção contra manobras inadvertidas

Uma aplicação emprega inversores de frequência para controlar a velocidade de motores. Durante a partida, um conjunto de resistores de pré-carga é empregado para carregar capacitores do chamado “link CC” dos inversores. Quando a carga dos capacitores atinge um valor determinado, um contator entra no circuito em paralelo com os resistores, retirando os mesmos do circuito e assumindo toda a corrente.

Em situações normais de operação, o desligamento do sistema é feito pelos próprios inversores ou ainda por uma chave seccionadora. A alimentação é feita em níveis que variam de 600 a 970 V CC.

Uma particularidade dos contatores para manobra de motores CA (os contatores produzidos pela Weg) é que sua capacidade de estabelecimento de corrente é a mesma, tanto em CA quanto em CC.

Entretanto, devido aos aspectos construtivos do produto e a fenômenos físicos do arco elétrico, a capacidade de interrupção de corrente dos contatores, que em tensão CA é elevada, atinge apenas valores extremamente reduzidos quando em tensão CC.

O problema: em caso de falha no sistema citado, o contator correrá o risco de interromper correntes em 600V CC podendo sofrer

danos severos. A situação é resolvida empregando o MRM para garantir que, mesmo com falta de energia, o contator desligue somente depois da chave seccionadora.

Exemplo 4: Mineradora de níquel em Cuba

O sistema elétrico nas indústrias mineradoras cubanas é de baixíssima qualidade e oscilações e quedas de tensão são tão frequentes que passam a ser consideradas “normais” quando sua duração é inferior a um determinado intervalo de tempo. Nessas indústrias, toda vez que a tensão da rede cai e volta, é necessário partir todos os circuitos novamente (entende-se, acionar os contatores que comandam os motores diversos).

Emprega-se assim um sistema de partida automática (semelhante ao caso da iluminação em hospitais, citada no primeiro exemplo). Nesse sistema, todos os contatores possuem retenção mecânica. Quando a rede falha, os contatores permanecem ligados. Quando a tensão da rede volta, os motores são ligados automaticamente.

Se a tensão da rede demorar muito para ser restabelecida, um circuito temporizador à parte, alimentado por baterias, mandará um pulso para os MRMs de forma a desligar os contatores, desligando assim toda a planta da fábrica.

2.3.2 O produto MRM existente

Conforme já citado, existe na empresa uma linha de contatores que empregou, por alguns anos, um MRM comprado da empresa GE *Power Controls*. Essa parceria comercial já não existe e a linha atual não dispõe mais desse acessório. O nome comercial desse produto é BRMM.

Externamente o MRM da GE tem na sua parte frontal os terminais de comando, um contato auxiliar, o botão de desarme manual (vermelho) e um pino (preto) para regulagem do curso, permitindo assim o ajuste necessário para este acessório ser empregado em contatores de quatro tamanhos diferentes.

A tensão de comando (tensão do pulso de desarme) disponível dentre três opções: 110, 220 ou 380/440V (em CA ou CC).

Na figura 2-14 apresenta-se o MRM GE acoplado a um contator e detalhes do MRM.

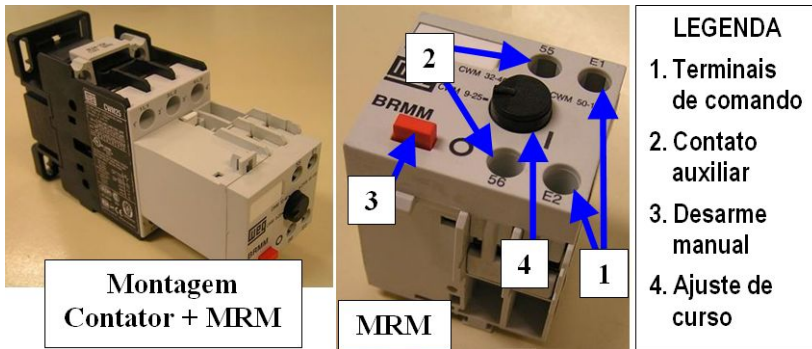


Figura 2-14: Contator com MRM acoplado e detalhes do MRM.

2.3.3 O funcionamento do MRM

Comparado ao contator, um MRM tem um aspecto construtivo e um funcionamento relativamente mais simples.

Avaliaram-se os produtos de vários fabricantes e identificou-se que apesar destes produtos serem significativamente diferentes em sua forma construtiva, número de peças, desempenho em ensaios, etc., como se apresenta nos quadros 3-1 e 3-2, do resumo do *benchmarking*, ainda assim, os mesmos têm uma função global comum e são formados basicamente pelos mesmos conjuntos de peças:

- Um cabeçote móvel que em uma de suas extremidades é engatado no cabeçote do contator e se desloca juntamente com este;
- Uma trava que é acionada (normalmente por uma mola) assim que o cabeçote do MRM se desloca de sua posição inicial de repouso, fazendo a retenção mecânica e impedindo seu retorno a essa posição;
- Um atuador magnético que ao receber um comando elétrico, aciona um ponto específico da trava, vencendo a mola que atua na mesma e liberando o cabeçote do MRM para que, sob ação das forças do contator, volte à sua posição inicial de repouso.

Nos diversos fabricantes, outros conjuntos de peças com finalidades específicas podem ser encontrados, mas os três conjuntos citados acima são os mais importantes no funcionamento desse tipo de componente que, de uma forma geral é formado por um mecanismo de retenção mecânica acionado por um atuador magnético de desarme.

2.3.3.1 Detalhes do MRM da GE

Para ilustrar mais facilmente o funcionamento desse acessório, apresentam-se detalhes do produto disponível na empresa, o MRM produzido e patenteado pela empresa GE *Power Controls*.

Conforme a figura 2-15, esse módulo de retenção mecânica é disposto em uma carcaça (1) e inclui um cabeçote (2) que atua numa trava (3) devido à ação de uma mola (que não se apresenta na figura). O desarme é feito pela interação do atuador (4) sobre a trava já citada.

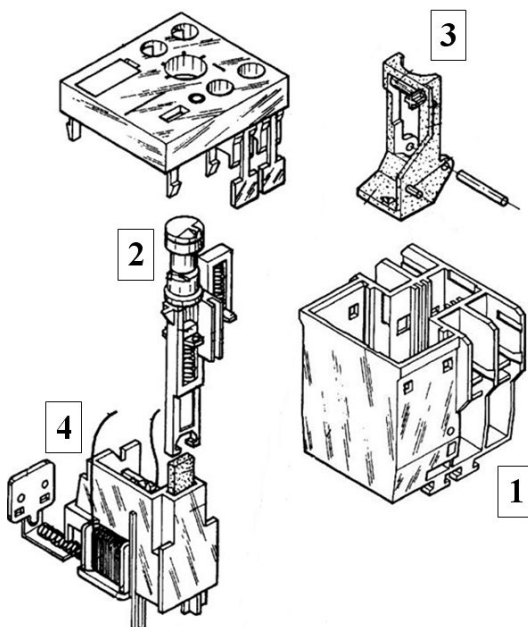


Figura 2-15: Vista esquemática explodida de um MRM.
Fonte: Adaptado de GE Power Controls, 1994.

A figura 2-16 apresenta uma vista superior do cabeçote do MRM (peça preta), da trava (peça vermelha) e da mola que atua na mesma.

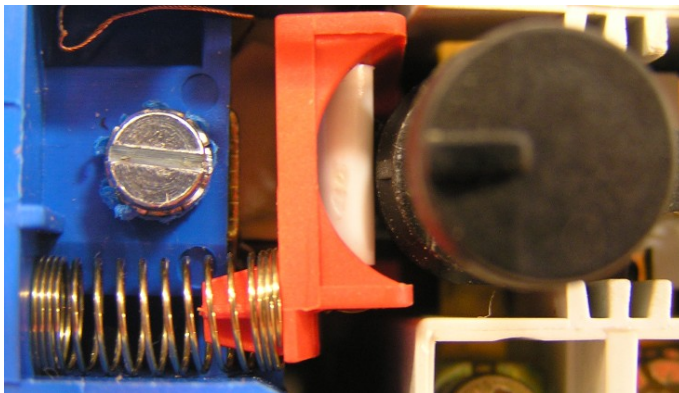


Figura 2-16: Detalhe superior do cabeçote e trava do MRM da GE.

Já a figura 2-17 apresenta uma vista lateral do mesmo conjunto cabeçote x trava. À medida que o cabeçote se desloca, a trava gira no sentido horário, engatando no mesmo, no ponto indicado pela seta, fazendo a retenção mecânica.

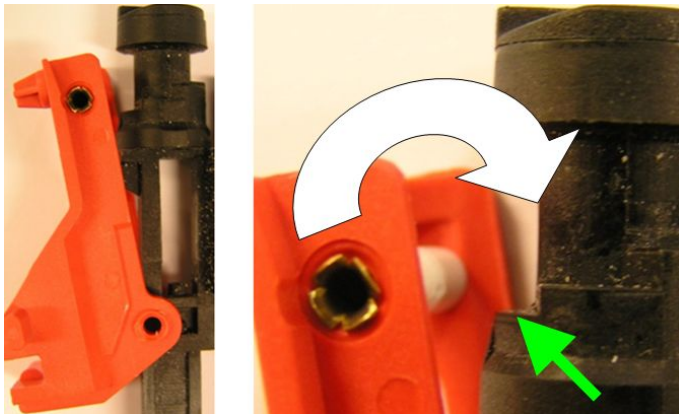


Figura 2-17: Detalhe lateral do cabeçote e trava do MRM da GE.

Finalmente, o desarme ocorre quando o atuador magnético é acionado remotamente através dos terminais de comando e sua armadura se desloca do ponto A para B (figura 2-18), fazendo a extremidade inferior da trava se deslocar conforme indicado pela seta.

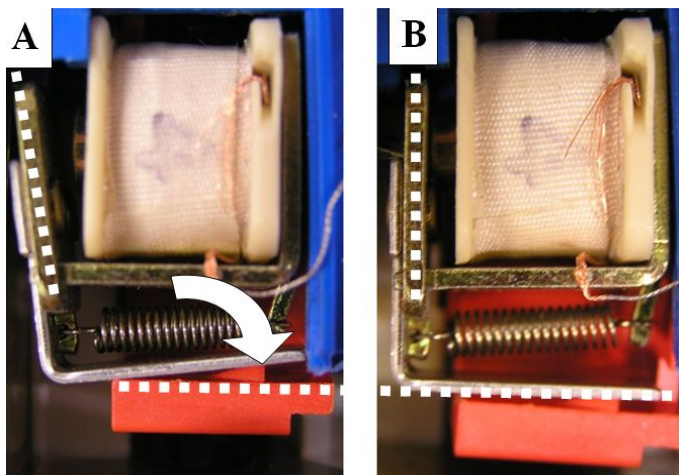


Figura 2-18: Detalhes do atuador do MRM da GE.

Com esse movimento de giro da parte inferior da trava, sua parte superior também gira, dessa vez no sentido anti-horário (figura 2-17), liberando o cabeçote do MRM para que, sob ação das forças do contator, volte à sua posição inicial de repouso.

3 ETAPAS DE PROJETO DO MRM

Cada vez mais as empresas se atentam para a necessidade de, na etapa de desenvolvimento, aprofundar o nível de entendimento dos produtos que desejam lançar e das necessidades dos clientes desses produtos.

Buscaram-se metodologias de projeto que contribuíssem para que o processo de desenvolvimento de produtos acontecesse de maneira mais formal e sistemática, acreditando que a sistematização leva a equipe de projeto a um estudo mais aprofundado e a um maior entendimento das necessidades de todos os envolvidos (usuários/clientes) no ciclo de vida do produto. As especificações de projeto obtidas a partir dessas metodologias reduzem custos e tempo de desenvolvimento.

Fases do Processo de Projeto de Produtos

Segundo o modelo de Romano (2003), conforme apresentado na figura 3-1, o processo de desenvolvimento de produtos pode ser subdividido em três macro fases: planejamento, projeto do produto e implementação.



Figura 3-1: O processo de desenvolvimento de produtos e fases tratadas no trabalho.

Fonte: Romano (2003).

Por sua vez a macro fase de projeto do produto pode ser subdividida em quatro fases:

- a) **Projeto informacional:** O propósito dessa primeira fase é o estabelecimento das especificações de projeto do produto a ser desenvolvido;
- b) **Projeto conceitual:** Fase na qual são desenvolvidas concepções alternativas que atendam ao problema a ser resolvido;
- c) **Projeto preliminar:** Nesta fase define-se a configuração (leiaute) final do produto;
- d) **Projeto detalhado:** Nesta fase é feito o detalhamento final do produto.

Os autores Pahl; Beitz (1996) e Back et al. (2008), apresentam as mesmas subdivisões para o processo de desenvolvimento de produtos e, de acordo com a classificação destes autores, o presente trabalho trata das fases de projeto informacional (que apresenta como resultado a especificação de projeto) e projeto preliminar (onde define-se o leiaute final do produto).

Complementando a definição de projeto preliminar, de acordo com Back et al. (2008), para estabelecer o leiaute final do produto (fase de projeto preliminar), as tarefas realizadas são:

- Identificação das especificações de projeto que relacionam os requisitos de forma (dimensões), leiaute (posição), etc.;
- Definição dos componentes e/ou unidades de grupos existentes a serem utilizados;
- Revisão das patentes; etc.

Além disso, ainda segundo os mesmos autores, para atender às suas funções o projeto preliminar faz uso de diferentes tipos de modelos, dentre eles os computacionais, e, portanto a etapa de modelagem e simulação apresentada no capítulo 4 do presente texto faz parte dessa fase do processo de projeto.

Além das fases de projeto informacional e projeto preliminar, tratadas no presente texto, para que ocorra posteriormente o lançamento do produto, as demais fases do processo de desenvolvimento serão executadas. Porém, estas não serão analisadas neste trabalho, por acreditar-se fugir do escopo do mesmo.

Método do desdobramento da função qualidade

A fase de projeto informacional tem como resultado um conjunto completo de informações sobre o produto a ser desenvolvido: as Especificações de Projeto do Produto. Estas especificações, além de orientarem a geração de soluções, fornecem a base sobre a qual serão montados os critérios de avaliação e de tomada de decisões nas fases posteriores do processo de desenvolvimento.

Back et al. (2008, p. 232), afirmam que requisitos ou especificações de projeto estabelecem algo que é necessário, verificável e atingível. Para ser verificável, a especificação deve declarar algo que pode ser aferido por exame, análise ou demonstração. Ainda, segundo estes autores, uma especificação de projeto não deve descrever formas de implementação preconcebidas, ou seja, “como fazer” o produto a ser desenvolvido. Uma especificação de projeto deve descrever “o que” se deve fazer.

Para se estabelecer as especificações de projeto do produto, são identificadas primeiramente as necessidades dos usuários ou clientes. Para tal, forma-se uma equipe multidisciplinar composta por membros, das mais diversas áreas como engenharia (desenvolvimento), suprimentos, PCP, assistência técnica, qualidade, marketing, vendas nacionais e internacionais, produção, etc., que listam segundo sua ótica, as necessidades dos clientes do produto.

A partir desta lista de necessidades do cliente, em geral expressa numa linguagem mais “livre” que a linguagem de engenharia, são definidos os requisitos de projeto do produto, expressos numa linguagem técnica e sempre que possível, na forma de parâmetros mensuráveis.

Dos requisitos de projeto derivam as especificações de projeto, ou seja, os objetivos a que o produto, a ser projetado, deve atender. O método empregado para migrar dos requisitos de projetos para a especificação de projeto é o QFD, *Quality Function Deployment*, traduzido como desdobramento da função qualidade por diversos autores incluindo Back et al. (2008).

O QFD é um método sistemático que auxilia os projetistas no trabalho em equipe através da busca pelo consenso nas diferentes definições sobre o produto. O método possibilita estabelecer relações entre as necessidades dos clientes e os requisitos de projeto, verificar conflitos entre os requisitos, documentar dados de *benchmarking*, culminando na especificação de projeto do produto. O método foi desenvolvido no Japão a partir do final dos anos 60, tendo sido

conhecido no ocidente, na forma que é hoje utilizado, no ano de 1972. O QFD foi introduzido nos EUA e Europa (mais especificamente na Itália) no início da década de 80.

“A história do QFD no Brasil é um pouco mais recente, com cerca de dez anos. Foi citado pela primeira vez no país, por um dos seus criadores, Yoji Akao, em uma conferência sobre Controle da Qualidade realizada no Rio de Janeiro. A partir de 1990 começou a ser utilizado por muitas empresas. Dentre as aplicações relatadas no país, podem ser citados casos de implantação na indústria automotiva, empresas siderúrgicas e setores de serviços, tais como em empresas do setor hoteleiro, academia de ginástica dentre outros. Desde as primeiras aplicações no Brasil, têm sido relatados casos de implantação bem sucedida em empresa do setor de alimentos, destacando-se também aplicação no desenvolvimento de embalagens.” (MIGUEL, 2003, p. 1).

O método QFD é também conhecido como método das matrizes. No método completo tem-se um desdobramento de quatro matrizes, mas no presente trabalho apresentar-se-á somente a primeira matriz, conhecida como a casa da qualidade.

3.1 PROJETO INFORMACIONAL DO MRM

No presente trabalho, a fase de projeto informacional é descrita a partir da análise dos produtos da concorrência, o *benchmarking*.

3.1.1 A análise de produtos concorrentes

“Na prática, é comum começar um desenvolvimento analisando produtos concorrentes antes de realizar uma pesquisa de mercado. Isso pode fazer com que a pesquisa de mercado subsequente tenha um foco muito mais claro e pode permitir questionamentos mais estruturados e significativos a serem feitos para os clientes em potencial” (BAXTER, 1995, p. 152).

São conhecidos através da voz de clientes e revendedores, de revistas técnicas relacionadas ao assunto, de bancos de patentes e

através de diversas outras fontes, quais são os principais concorrentes mundiais da Weg em contadores e acessórios.

Dessa forma selecionaram-se cinco desses fabricantes e compraram-se contadores e acessórios MRM para análise e testes. São eles ABB (A), Allen-Bradley (B), Lovato (C), Siemens (D) e Telemecanique (E), conforme apresentado na figura 3-2. Essa mesma figura também apresenta o MRM da GE, atual produto da empresa.

Avaliou-se toda a informação técnica disponível nos catálogos dos fabricantes mencionados. Realizaram-se diversas medições nos contadores e MRM acoplados e na sequência os produtos foram cuidadosamente desmontados, fotografados e avaliados.

Elaborou-se, a partir das informações obtidas, o relatório de *benchmarking* dos MRM de contadores. Acredita-se que este documento foge do escopo desse trabalho. O mesmo está cadastrado no banco de dados da empresa.

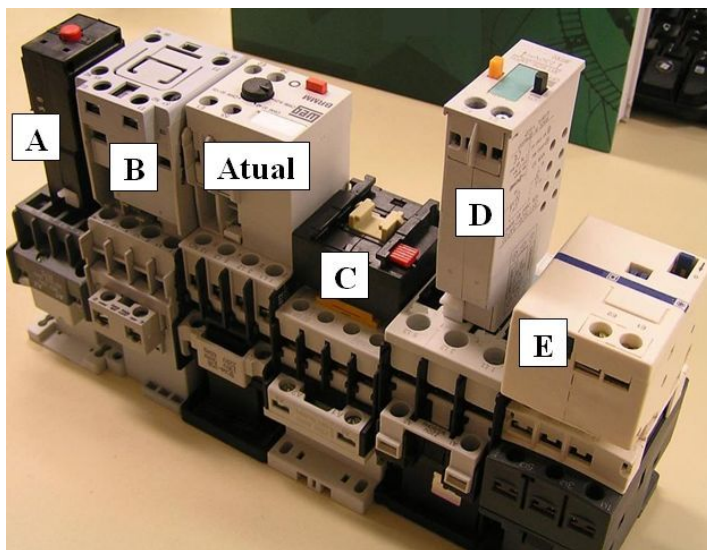


Figura 3-2: Contador + MRM dos cinco concorrentes e produto atual.

Fonte: Weg Automação S.A. Benchmarking (2010).

De acordo com casa da qualidade realizada e que se apresenta no Anexo B, quadro B-1, definem-se quais, dentre todos os itens avaliados no *benchmarking*, são os mais importantes para avaliação do produto MRM. Assim, apresenta-se aqui um resumo do *benchmarking* através do quadro 3-1 abaixo, contendo somente os sete itens mais relevantes.

Fabricante	Dimensional L x H x P (mm)	Total de peças	Folga de retrocesso (mm)	Força fecham. < 1,5 N	Secciona bobina	Pulso desarme (ms)	Consumo máx. (W)
A	44 x 32 x 73	24	1,0	0	não	50	-
B	45 x 51x 60	29	0,4	ok	sim	-	40
C	45 x 40 x 30	21	0,65	ok	não	10	70
D	23 x 48 x 94	24	0,3	ok	não	31	40
E	45 x 51 x 60	19	0,3	ok	não	-	30
Atual	44 x 47 x 58	47	0,9	ok	sim	10	130

Quadro 3-1: Resumo do *benchmarking*.

Fonte: Weg Automação S.A. Benchmarking (2010).

Apresentam-se no texto a seguir, detalhes sobre cada item avaliado no *benchmarking*.

- **Dimensional:** Dimensões externas do produto MRM, largura, altura e profundidade. Devem ser condizentes com a largura e altura do menor contator onde o mesmo será acoplado.
- **Total de peças:** Número de peças ou conjuntos que compõe o produto MRM. Quando há mais de uma peça/conjunto idêntica no produto (por exemplo, dois conjuntos parafusos + arruela dos terminais da bobina do atuador), no quadro 3-1 conta-se apenas uma única vez.
- **Folga de retrocesso:** Representa o deslocamento de retrocesso que o cabeçote de um contator acoplado ao MRM apresenta na etapa de retenção. Idealmente essa folga deve ser nula, mas na prática têm-se valores diversos dependendo das tolerâncias do produto e da concepção do sistema de retenção do MRM. Os valores apresentados no quadro foram medidos através de testes nas amostras disponíveis.
- **Força de fechamento:** Representa a força mecânica adicional que um contator acoplado ao MRM deve vencer durante o fechamento. Assim como a folga de retrocesso, na prática têm-se valores diversos dependendo da concepção do mecanismo de retenção do MRM que pode conter molas dificultando seu fechamento ou apresentar atritos diversos. Nesse caso, apenas verificou-se se essa força de fechamento é menor que o limite

de 1,5N, que é a força mínima encontrada em outro acessório (bloco de contato auxiliar frontal) comum para os contatores atuais. Com esse nível de força adicional, a variação no desempenho do contator não é perceptível.

- **Secciona bobina:** A maior parte dos fabricantes avaliados informa em seus catálogos que a bobina do MRM não deverá ser energizada permanentemente, sob risco de queima. Entretanto, apenas os fabricantes GE e A-B apresentam contatos auxiliares integrados ao MRM, que seccionam a alimentação de sua bobina, instantes após receberem o pulso de desarme, eliminando a possibilidade de queima.
- **Pulso desarme:** Duração mínima do pulso de tensão a ser aplicado na bobina do atuador do MRM para que o desarme do contator aconteça. Dado obtido do catálogo dos fabricantes. Obs.: A-B e Telemecanique nada informam em seus catálogos.
- **Consumo máximo:** Valor da potência em Watts do pulso de desarme citado no tópico anterior. Obs.: ABB nada informa em seu catálogo.

3.1.2 A realização do QFD

Formou-se na empresa uma equipe multidisciplinar com nove membros, composta por integrantes das áreas de engenharia, suprimentos, PCP, assistência técnica, qualidade, marketing, vendas e produção, que listaram segundo sua ótica, as necessidades dos clientes do produto.

É importante observar que a casa da qualidade tem critérios de pontuação cujos pesos variam de acordo com cada autor. No presente trabalho, os índices “grau de importância” e “fator de venda”, estão de acordo com o critério de pontuação de Back et al. (2008, p. 217). O índice “relação entre requisito de cliente e de projeto” está de acordo com o critério de pontuação apresentado no trabalho de Miguel (2003).

Na etapa final do QFD, a equipe utiliza os critérios citados para priorizar através da pontuação, os requisitos de clientes e a relação dos mesmos com os requisitos de projetos listados. Apresenta-se o resultado desse trabalho na matriz da casa da qualidade, no quadro A-1, Anexo B.

3.1.3 Especificação de Projeto do MRM

Como citado, após as etapas de *benchmarking* e da realização do QFD, obtém-se a lista de requisitos de projeto priorizados, a partir dos quais é redigida a especificação de projeto, que pode ser encarada como a lista de objetivos a que o produto, a ser projetado, deve atender.

De acordo com a pontuação indicada pelo casa da qualidade, se afirma, na ótica do grupo de trabalho, quais os requisitos que influenciam mais fortemente no custo do produto, na complexidade do projeto e na satisfação do cliente (verificar no quadro A-1, a linha destacada em verde, “Priorização dos requisitos”).

Assim, os requisitos de maior peso compõem uma Especificação de Projeto resumida, que será empregada para nortear e avaliar os resultados do presente trabalho. Apresenta-se essa especificação de projeto nos quadros seguintes, 3-2 e 3-3.

-	Item	Descrição
1	Req	Empregar simultaneamente MRM com blocos de contatos auxiliares laterais
	Alvo	Carga máxima para fechamento do MRM menor ou igual a 1,5 N
	Avaliar	Avaliação na simulação e medição com célula de carga
	Evitar	-
	Obs.	A solução ideal seria não conter molas
2	Req	Não reduzir performance do contator
	Alvo	Folga de retrocesso do cabeçote do contator com MRM acoplado de no máximo 0,5 mm
	Avaliar	Na etapa de simulação, em protótipos e no produto final para contadores com diferentes cursos
	Evitar	Solução patenteada.
	Obs.	-
3	Req	Atuador do MRM não queima
	Alvo	Seccionar bobina do atuador
	Avaliar	Aplicar e manter comando de desarme. Em seguida fazê-lo operar novamente
	Evitar	Solução cara, como contato auxiliar para seccionar alimentação do atuador
	Obs.	Realizar o ensaio em CA e CC caso o atuador seja especificado assim

Quadro 3-2: Especificação de Projeto do MRM. Requisitos 1 a 3 (de 7).
Fonte: Weg Automação S.A. Especificação de Projeto do MRM (2010).

-	Item	Descrição
4	Req	Pulso de tensão de desarme
	Alvo	Desarmar com pulso de tensão CA/CC de no máximo 30 ms de duração para tensão até 20% inferior à nominal
	Avaliar	Na etapa de simulação, em protótipos e no produto
	Evitar	-
	Obs.	Realizar ensaios em CA e CC
5	Req	Dimensões do MRM
	Alvo	Valores máximos LxAxP: 45 x 32 x 60 mm
	Avaliar	Verificação da documentação na etapa do projeto detalhado (desenhos 2D)
	Evitar	-
	Obs.	Dimensões que permitem montagem no contator de menor tamanho da linha. A profundidade não é dimensão “crítica”
6	Req	Número total de peças do acessório MRM
	Alvo	24 peças
	Avaliar	Número de peças do produto final
	Evitar	Peças complexas e/ou muitos itens terceirizados
	Obs.	Visando produto com baixo investimento e baixo custo
7	Req	Possibilidade de comando por CLP
	Alvo	Desarmar com pulso de no máximo 200 W / 8 A para tensão até 10% superior à nominal
	Avaliar	Na etapa de simulação, em protótipos e no produto
	Evitar	-
	Obs.	Valores que permitem o comando através de saída a relé de CLPs convencionais

Quadro 3-3: Especificação de Projeto do MRM. Requisitos 4 a 7 (de 7).

Fonte: Weg Automação S.A. Especificação de Projeto do MRM (2010).

Redigiu-se essa especificação de projeto “resumida” para fins didáticos, entretanto a especificação de projeto completa do MRM é composta por um total de 42 requisitos de projeto. Decidiu-se não publicá-la na íntegra, nem mesmo em anexos, por questão de sigilo comercial.

3.2 PROJETO PRELIMINAR DO MRM

Durante a fase de desenvolvimento projeto preliminar do MRM, para que o produto atenda da melhor maneira os requisitos de projeto, e levando-se em conta os demais critérios técnicos e econômicos, duas importantes decisões foram tomadas, conforme se apresenta a seguir.

3.2.1 Emprego de mecanismo com catraca

Durante a realização do *benchmarking* (cujo resumo se apresenta no quadro 3-1), verificou-se que as medições nos produtos da Siemens e Telemecanique apresentaram os menores valores de folga de retrocesso do cabeçote, item que foi considerado requisito importante segundo o QFD realizado.

Esse resultado é atribuído a uma solução que ambos os produtos têm em comum em seus mecanismos internos: uma trava que atua em uma catraca, permitindo que o sistema funcione com eficiência mesmo que o curso do contator, dadas as tolerâncias de fabricação, varie dentro de uma determinada faixa.

Dessa forma, decidiu-se empregar uma estrutura similar com trava e catraca, caracterizando a solução final um projeto de engenharia reversa, em especial a partir da solução Siemens (SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT, 1995). A partir dessa definição, apresenta-se no item 4.5 a análise e otimização de leiautes alternativos considerando-se as especificações de projeto.

3.2.2 O atuador magnético do MRM

Com intuito de reduzir investimentos em ferramental ou evitar a compra de itens terceirizados, uma prática comum na indústria é empregar nos projetos em andamento alguns componentes similares já existentes. Dessa forma, identificou-se um atuador magnético já existente e que poderá ser empregado no MRM em desenvolvimento. Esse componente faz parte de um produto cujo nome comercial é “Bobina de Disparo à Distância” para disjuntores. A seguir apresentam-se detalhes técnicos do mesmo.

Esse atuador, cuja estrutura construtiva é apresentada na figura 3-3, consta de uma armadura de aço, um carretel de plástico (da bobina) com o enrolamento de fio de cobre esmaltado, um núcleo fixo (em

formato de “copo” com fundo cônico), um êmbolo, além de uma guia para o êmbolo e uma mola de retorno. O êmbolo se desloca num curso de 2,2mm conforme se apresenta na figura 3-4.

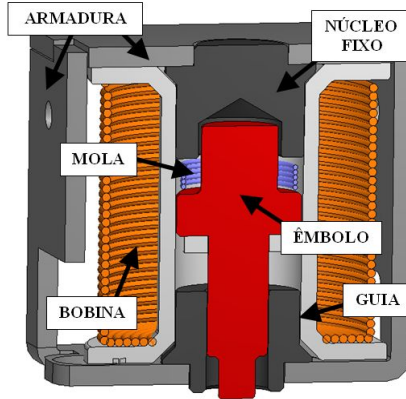


Figura 3-3: Detalhes do atuador do produto “Bobina de Disparo”.

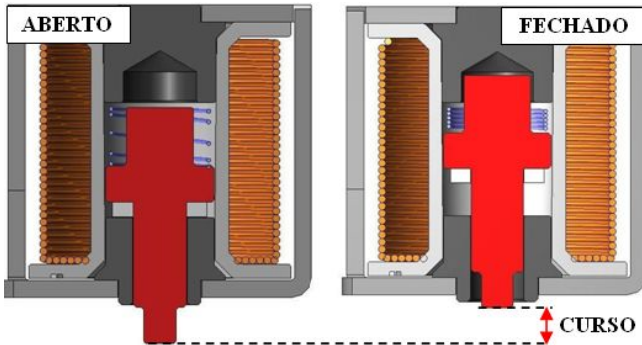


Figura 3-4: Atuador nas posições aberto e fechado.

O atuador magnético com estrutura construtiva de núcleo fixo e êmbolo mais semelhante encontrado na bibliografia disponível se apresenta no detalhe “c” da figura 3-5 a seguir. Observa-se, no entanto que, no atuador dessa figura, o núcleo fixo tem formato de um “copo com fundo cilíndrico” (e não “copo com fundo cônico” como o que será empregado).

Essa mesma figura apresenta, de maneira qualitativa, curvas do comportamento da força magnética do atuador em função da abertura do entreferro δ do êmbolo para diferentes geometrias da parte fixa. Pode-se identificar no detalhe “a)” que a força aumenta com a redução do

entreferro. No detalhe “b)”, há uma região do deslocamento do êmbolo no qual a força varia muito pouco e finalmente, no detalhe “c)”, o caso mais semelhante ao do atuador a ser empregado, verifica-se que há um ponto de força máxima numa posição intermediária do curso do atuador.

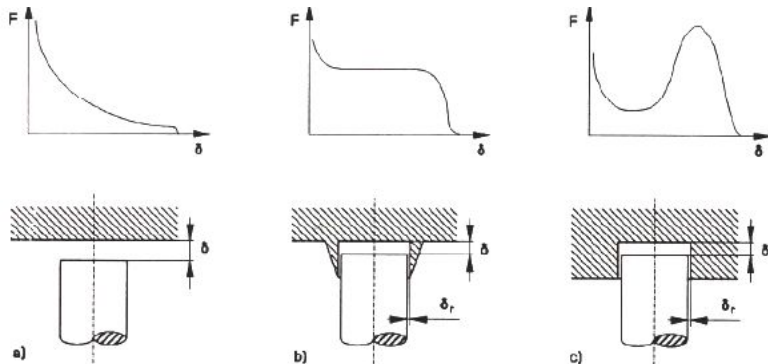


Figura 3-5: Perfil qualitativo da característica de força magnética em função da abertura do entreferro para diferentes geometrias do atuador.

Fonte: Kallenbach; Eick; Quendt (1994), p.127.

Para se obter um pico de força elevado a partir do pequeno volume desse atuador, a bobina do mesmo tem uma densidade de corrente consideravelmente alta: aproximadamente 75 A/mm^2 (como referência, em bobinas de contadores que são feitas para ficarem ligadas por tempo indeterminado, emprega-se uma densidade de corrente de apenas $4,5 \text{ A/mm}^2$ em média).

Devido a essa grande densidade de corrente, a bobina desse atuador não pode ficar energizada indeterminadamente, como as bobinas dos contadores. Por isso, neste acessório há uma placa de circuito impresso (PCI) que retifica a corrente de entrada que em seguida é aplicada na bobina do atuador. Após aproximadamente 100 ms essa PCI retira a tensão aplicada à bobina, protegendo-a de superaquecimento e destruição. Se não houver a proteção feita pela PCI, a bobina queima rapidamente. A temporização da PCI é obtida em função do tempo de carga de um capacitor num circuito RC.

No MRM em desenvolvimento serão empregados apenas a PCI e o atuador magnético do produto já existente.

4 MODELAGEM E SIMULAÇÃO

Quando um produto está sendo desenvolvido, as análises realizadas pela engenharia têm como principal objetivo prever o seu comportamento. Mesmo os produtos mais simples são extremamente complexos quando vistos em detalhe, por isso uma análise “exata” de qualquer produto nunca é possível. Dessa forma, hipóteses simplificadoras sobre as propriedades dos componentes do produto devem ser feitas, reduzindo o produto a uma versão idealizada cujo comportamento se aproxime significativamente do comportamento do produto real. A esse processo é dado o nome de modelagem.

Segundo Shearer; Murphy; Richardson, (1967; p. 151), “o melhor modelo para qualquer sistema é aquele que fornece, com o mínimo de complexidade, a informação necessária para a ação do engenheiro”.

De fato, a simplicidade empregada em algumas etapas do processo de modelagem é desejável visto que o custo (horas-homem, tempo computacional, etc.) cresce rapidamente, quando se aumenta o grau de complexidade do modelo, além disso, o emprego de modelos excessivamente complicados poderá mascarar os efeitos predominantes do sistema.

4.1 ESTRUTURA DO CAPÍTULO DE MODELAGEM E SIMULAÇÃO

O deseja-se modelar e simular dinamicamente o dispositivo eletromecânico do MRM. Entretanto, sendo o MRM um acessório do contator, a simulação é realizada com os modelos do MRM e do contator acoplados, avaliando-se o comportamento do conjunto desde o instante em que o contator é acionado até o instante em que o MRM desliga esse conjunto devido à ação da força de seu atuador magnético. Na figura 4.1 ilustra-se essa sequencia de ações.

Os trabalhos de modelagem e simulação foram realizados na seguinte sequencia:

- Primeiramente, a partir de medições em produto existente, realizaram-se a modelagem e a simulação do comportamento dinâmico do contator, conforme detalhe “A” da figura 4-1;

- Em seguida, a partir da decisão de se utilizar um atuador magnético existente, realizaram-se a modelagem e a simulação da força eletromagnética deste componente, conforme detalhe “B” da figura 4-1;
- Finalmente, a partir dos resultados das simulações do contator e do atuador magnético e de um conceito de mecanismo de retenção (leiaute preliminar) definido a partir de engenharia reversa, realizaram-se a modelagem do mecanismo do MRM e a simulação de seu comportamento dinâmico, conforme detalhe “C” da figura 4-1. A partir de considerações técnicas e econômicas (os requisitos de projeto), são feitas otimizações chegando ao leiaute funcional.

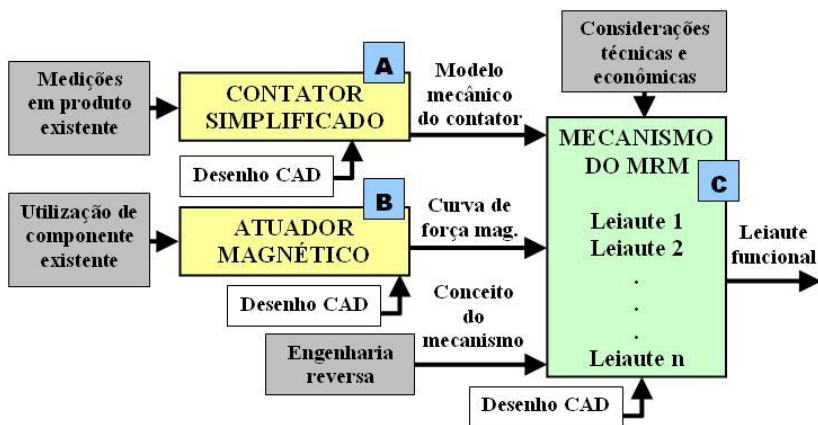


Figura 4-1: Fluxograma da etapa de modelagem e simulação.

Softwares empregados

Apresentou-se na figura 4-1 a sequência de ações durante a etapa de modelagem e simulação. Essas tarefas foram realizadas com apoio de algumas ferramentas computacionais:

SolidWorks (SW)

O SW é uma ferramenta CAD que auxilia no projeto e desenho técnico, fornecendo recursos para construção de entidades geométricas planas (como linhas, curvas, polígonos) ou mesmo objetos tridimensionais (cubos, esferas, etc.). Através da definição dos tipos de

materiais, obtém-se a massa das peças desenhadas, informação útil para a modelagem dinâmica. Fonte: SolidWorks Corp. (2011).

No presente trabalho, os desenhos tridimensionais do SW, quando num formato adequado (arquivo com extensão DXF), são empregados como dados de entrada em todas as etapas de modelagem e simulação (indicado pelos blocos “Desenho CAD” nos detalhes “A”, “B” e “C” na figura 4-1).

Maxwell

É uma ferramenta CAE que aplica o método dos elementos finitos na simulação de dispositivos eletromagnéticos e eletromecânicos como motores, atuadores, transformadores, etc. Nesse software os modelos são elaborados a partir de uma estrutura geométrica (o desenho das peças do produto simulado) e por parâmetros diversos, definidos pelo usuário. Fonte: Ansys - Ansoft Maxwell (2011).

No presente trabalho, conforme detalhe “B” da figura 4-1, através do software Maxwell emprega-se o arquivo oriundo do SolidWorks (o desenho do atuador) na realização de uma modelagem e simulação eletromagnética, cujo resultado (curva de força magnética do atuador x deslocamento do êmbolo) é empregado numa nova simulação, através de outro software, o WM2D, no detalhe “C” da mesma figura.

Working Model 2D (WM2D)

É uma ferramenta CAE que aplica as leis físicas na simulação e análise cinemática e dinâmica de movimento de sistemas mecânicos virtuais. Assim como no software Maxwell, no WM2D os modelos também são elaborados a partir de uma estrutura geométrica (o desenho das peças do produto simulado) e por parâmetros diversos, definidos pelo usuário. Fonte: Design Simulation Technologies (2011).

No presente trabalho, desenvolve-se um modelo de contator no WM2D (detalhe “A” da figura 4-1). A seguir, o modelo desenvolvido e o resultado obtido no software Maxwell, para curva de força magnética do atuador (detalhe “B” da figura 4-1) são empregados em conjunto na avaliação do comportamento dinâmico do mecanismo do MRM (detalhe “C” da figura 4-1), também no WM2D.

Durante a realização do presente trabalho, não se dispunha de nenhum software adicional que pudesse substituir os três citados, ou ainda, que pudesse servir para validar ou comparar os resultados obtidos através dos mesmos. Apresentam-se mais informações sobre os softwares no Apêndice 1.

4.2 MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO CONTATOR

Dada a complexidade em se desenvolver um modelo “completo” de contator e considerando que no presente trabalho não há necessidade de se representar todas as particularidades do comportamento do mesmo, desenvolve-se um modelo simplificado.

Tal decisão é justificada visto que, no presente trabalho, há interesse apenas nos efeitos predominantes que o contator causará no MRM, que são:

- A aceleração do cabeçote durante operação e desoperação;
- O tempo gasto para fechamento e abertura dos contatos;
- A duração do ricochete de contatos;
- O efeito das molas.

O modelo simplificado do contator é elaborado no WM2D a partir da teoria apresentada no capítulo 2, e também a partir de resultados de medições, de forma que os resultados da simulação de seu comportamento representem os valores obtidos em testes práticos.

O modelo desenvolvido apresenta:

- Curva de força que representa a força magnética durante o fechamento do contator;
- Valores de massas e cursos do contator;
- Molas com os mesmos coeficientes e mesmas dimensões do produto;
- Comportamento similar ao contator durante fechamento e abertura (tempo de fechamento e abertura e duração do ricochete de contatos);
- Geometria do engate do contator x MRM com dimensões reais, visto que as folgas dessa junção influenciam no comportamento do conjunto;
- Coeficientes de atrito definidos de maneira indireta, pois quando se define o material das peças (aço, cobre, plástico, etc.), o software atribui valores “padrão” de atrito estático e cinético;
- Aceleração da gravidade atuando nos elementos do modelo;
- Batentes que limitam o movimento do cabeçote do contator no sentido da abertura, e que representam a função da carcaça e demais partes do produto não contempladas no modelo.

Simplificações adotadas:

- As partes móveis têm apenas um único grau de liberdade, no sentido do movimento, devido a guias ideais não apresentadas (onde foi definido atrito nulo). Dessa forma, não existem folgas e nenhum movimento adicional em outras direções;
- Empregaram-se valores para massa, forças de mola e cursos de deslocamento reais, entretanto as peças foram desenhadas em escala reduzida para permitir melhor visualização do conjunto contator + MRM nas etapas seguintes;
- Os coeficientes elásticos das peças que sofrem colisão não são conhecidos. Determinaram-se, através de um processo de convergência, valores para os coeficientes elásticos de forma que a simulação do tempo de fechamento e do ricochete dos contatos tenha duração similar a dos resultados de medições realizadas;
- A força magnética média de fechamento é obtida através de ensaio como será descrito no tópico a seguir.

É importante ressaltar que as simulações serão feitas para um único tamanho de contator, a saber, no contator atual da Weg de 32 A. Esse contator é equivalente ao menor contator da nova linha em desenvolvimento e pode ser considerado o caso mais desfavorável, pois qualquer influência causada pelo MRM pode ser crítica no desempenho do mesmo.

4.2.1 A força magnética no modelo do contator

A curva de força magnética média empregada no modelo do contator é obtida a partir dos resultados de medições de duas amostras de um contator atual de 32A alimentado com 220V em 60Hz (tensão nominal).

Procedimento da medição:

- Monta-se o contator com sua base no plano horizontal;
- Define-se a referência zero do deslocamento para os núcleos encostados;
- Retira-se a mola de retorno do contator;
- Acopla-se o cabeçote do contator a uma célula de carga;

- Alimenta-se a bobina do contator com tensão nominal;
- Mede-se a força magnética de atração para diversas posições relativa dos núcleos;
- Subtrai-se dos valores medidos, a força peso da parte móvel, dado que em situações normais o contator trabalha com sua base no plano vertical e essa força não está presente.

A figura 4-2 a seguir ilustra o esquema preparado para a medição da força magnética média do contator. Por simplificação, nessa figura se apresentam somente as partes internas do contator.

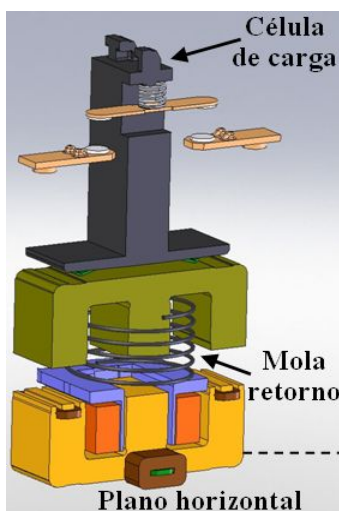


Figura 4-2: Esquema da medição de força magnética do contator.

Apresentam-se na tabela 4-1 a seguir os resultados das medições. O maior valor de posição (5,8 mm) equivale ao contator aberto. O contator tem 6 mm de curso total (distância total entre o núcleo móvel e fixo quando o contator está aberto). Para valores muito próximos de zero, a força magnética média aumenta rapidamente de forma que o arranjo experimental não permitiu a medição para posições inferiores a 0,5 mm.

Tabela 4-1: Resultados da medição de força magnética média do contator.

Posição (mm)	0,5	1,0	1,8	2,2	2,6	3,0	3,4	3,8	4,2	4,6	5,0	5,4	5,8
Medição 1 (N)	29,3	26,0	21,8	19,0	17,2	15,4	14,1	12,8	11,8	11,0	10,2	9,3	8,9
Medição 2 (N)	28,6	25,6	21,2	19,1	17,2	15,3	14,0	12,8	11,7	10,9	10,0	9,2	8,6

Na figura 4-3, apresenta-se o gráfico dos valores medidos para a força média do contator, similar ao que se apresenta na figura 2-11 da parte teórica.

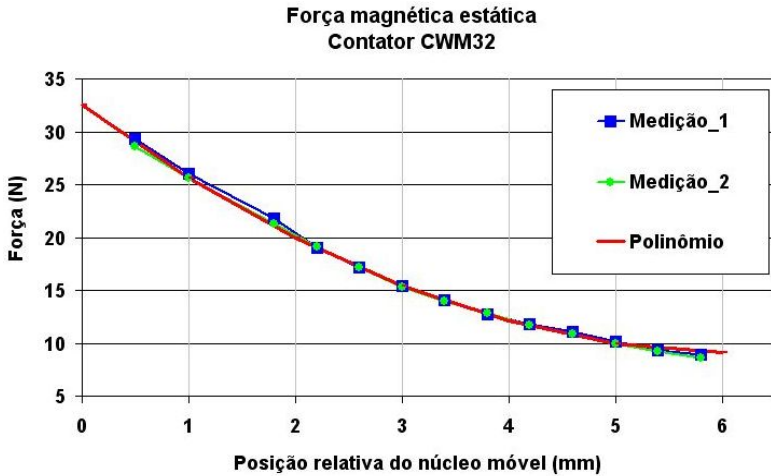


Figura 4-3: Resultados experimentais de força magnética do contator.

A partir dos resultados das medições obtém-se no Excel uma equação polinomial (de grau 2) que representa a força magnética média de atração em função da posição do núcleo móvel (também apresentada na figura 4-3). A seguir emprega-se essa equação de força magnética média no modelo do contator como será apresentado a seguir.

No capítulo 2, verificou-se que a análise dos contadores normalmente divide-se nos modelos elétrico, magnético e mecânico. Da maneira como se tratou o problema, realizando medições da força magnética, não é necessário equacionar a parte elétrica e magnética do contator.

4.2.2 O modelo mecânico do contator

A ferramenta computacional WM2D é um ambiente de modelagem e simulação em apenas duas dimensões, não comportando modelos geométricos (desenhos) em três dimensões como o software SolidWorks. Dessa forma, quando se emprega o WM2D, a primeira etapa é avaliar a necessidade de se “planificar” o modelo geométrico.

O software oferece recursos para que produtos virtuais tridimensionais modelados e simulados possam ser adaptados de forma

planar. Isso é feito definindo quais partes/peças do modelo colidem e quais não colidem entre si. Quando duas peças são definidas de forma que mesmo superpostas não colidam, representa-se que elas estão em planos diferentes, como se o modelo fosse tridimensional.

No modelo esquemático do contator há poucas peças superpostas. Praticamente só o contato móvel e o cabeçote são definidos como peças que estão em planos diferentes e não colidem uma com a outra.

Apresenta-se no detalhe “A” da figura 4-4 a seguir, o esquema empregado para o contator no software WM2D. O mesmo é equivalente ao detalhe “B” na mesma figura, que nada mais é que o modelo mecânico de Wada, Yoshimoto, Kitaide (2002) da figura 2-12, com duas simplificações adotadas:

- Núcleo fixo engastado. No produto real e na modelagem original há um elemento amortecedor;
- Núcleo móvel solidário ao cabeçote do contator, assim como no produto real. Na modelagem original havia uma mola.

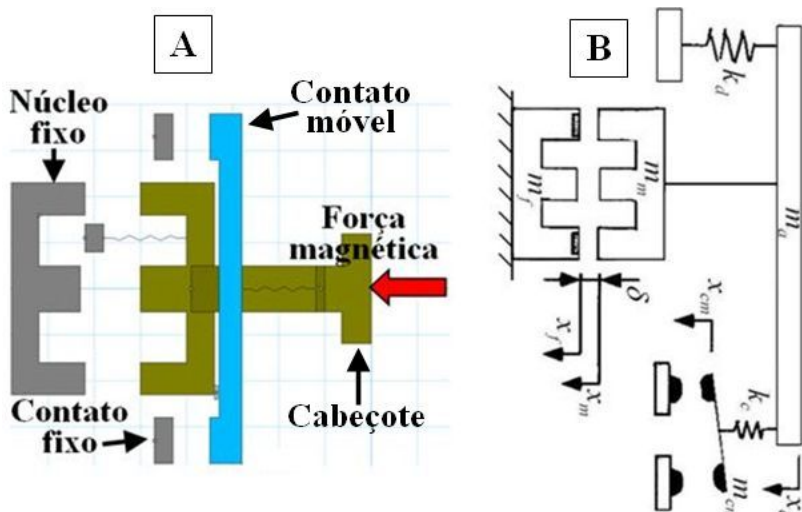


Figura 4-4: Esquema mecânico do contator no WM2D (A) e esquema do modelo mecânico teórico (B).

Observa-se que a equação polinomial que representa a força magnética média de atração em função da posição do núcleo móvel, obtida no item anterior é aplicada no vetor “Força magnética” indicado

na figura 4-4. Por conveniência ao modelo desenvolvido no software WM2D, ajustou-se o referencial de posição tornando a curva de força definitiva deslocada em relação à curva experimental que se apresenta na figura 4-3. Dessa forma, apresenta-se na figura 4-5 a curva de força final no software WM2D, onde a posição 0,0 mm representa o contator aberto e a posição negativa de 6,0 mm representa o contator fechado.

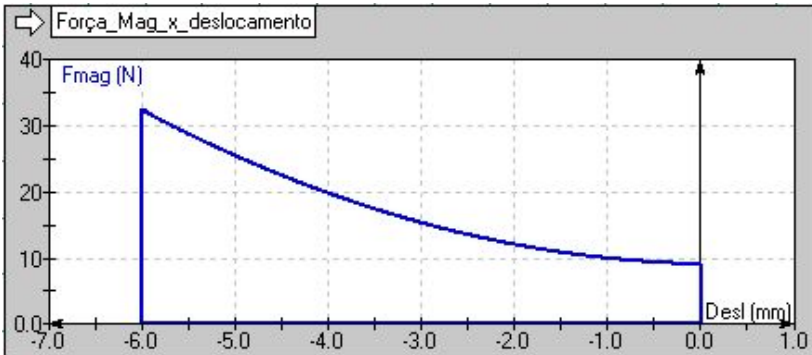


Figura 4-5: Curva da força magnética do contator no WM2D.

Apresentou-se na figura 2-6 o experimento de Wada; Yoshimoto; Kitaide (2002), onde se verificou o comportamento do contator durante o fechamento. De maneira análoga, nas figuras 4-6 e 4-7 apresentam-se resultados de medições feitas para tempo de operação e duração do ricochete dos contatos do contator. Estas medições são rotineiras e já há software e hardware preparados para esta tarefa.

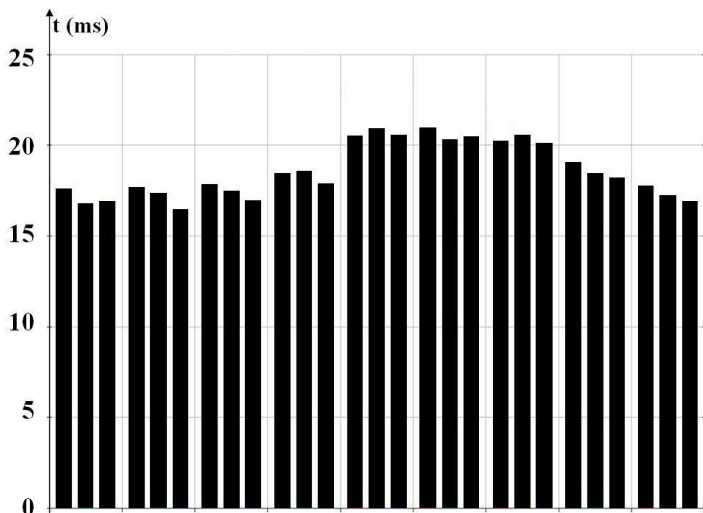


Figura 4-6: Medições do tempo de operação do contator.

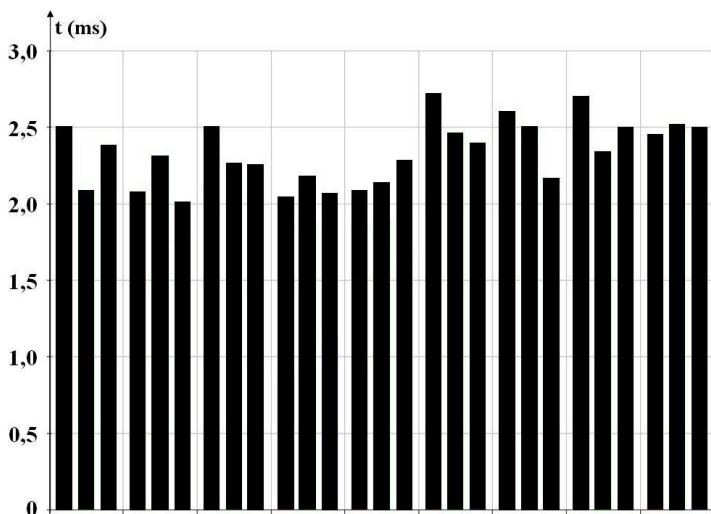


Figura 4-7: Medições da duração do ricochete dos contatos do contator.

Em posse dos resultados dessas duas figuras, foram escolhidos valores para os coeficientes de elasticidade das peças do contator que sofrem colisão (núcleos e contatos), de forma que a simulação do tempo de fechamento e do ricochete dos contatos tenha duração similar a dos resultados de medições do produto real. Essas medições são realizadas

com várias amostras de produtos e através da média de 150 manobras de operação de desoperação, portanto apresentam um grau de confiança mais que satisfatório.

As informações adicionais da tabela 4-2 a seguir, também foram empregadas na modelagem do contator.

Tabela 4-2: Dados de entrada para simulação do modelo do contator.

	Molas		Curso (mm)			Massa (g)	
	retorno	contato	total	livre	contato	parte móvel	contatos
k_* (N/mm)	0,2	2,7					
l_0 (mm)	40,0	9,3	6,0	4,0	2,0	110,0	2,0
l_{ini} (mm)	9,0	8,0					

Finalmente, apresenta-se no próximo tópico, nas figuras 4-8 a 4-9 o comportamento do modelo de contator simulado.

4.2.3 Resultados da simulação dinâmica do contator

Analisam-se os resultados da simulação do contator com auxílio das figuras 4-8 e 4-9. Esta análise é semelhante à que se apresenta na parte teórica, na figura 2-5.

A figura 4-8 está dividida em 2 partes (1 e 2) onde se apresentam as curvas da simulação de posição/deslocamento e forças em função do tempo, dos contatos e do núcleo do contator e que, confrontadas com as ilustrações da figura 4-9, ajudarão a compreender todas as etapas do fenômeno simulado.

A figura 4-9 está dividida em 3 partes (A, B e C) onde se apresentam as ilustrações obtidas do software WM2D, de etapas importantes da operação do contator.

Apresenta-se na figura 4-8 a curva de força magnética do contator em função do tempo para análise do resultado da simulação. Essa força é a mesma obtida pelo polinômio citado anteriormente e que se apresentou em função do deslocamento na figura 4-5.

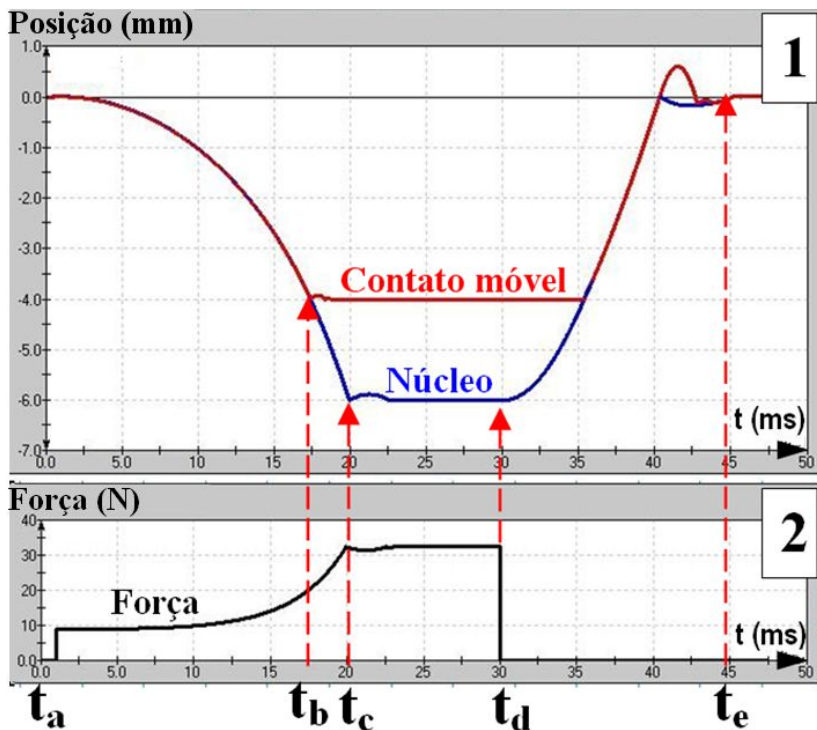


Figura 4-8: Resultados da simulação do contator.

- No detalhe A (figura 4-9), apresenta-se o contator aberto. A força magnética ainda não está atuando. Equivale ao instante $t_a = 0$ s;
- No detalhe B (figura 4-9), apresenta-se o contator fechando e os contatos colidem. Equivale ao instante t_b (aproximadamente 17,5 ms);
- No detalhe C (figura 4-9), apresenta-se o instante em que os núcleos do contator colidem. Equivale ao instante t_c (aproximadamente 20 ms);
- No instante t_d (30 ms) a força magnética é anulada. O contator começa a abrir.

- No instante t_c (45 ms) o contator voltou para sua posição inicial de repouso aberto.

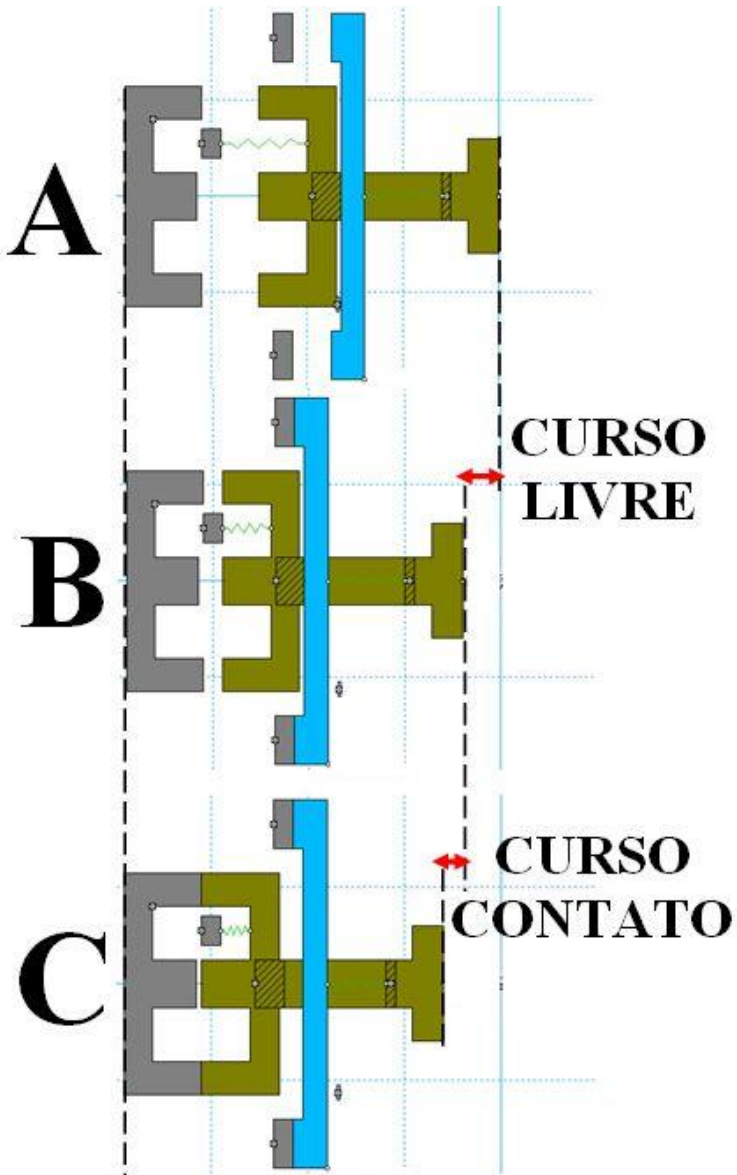


Figura 4-9: Etapas de atuação do modelo esquemático do contator.

Nos instantes imediatamente após as colisões de contatos e núcleos (instantes t_b e t_c), observa-se o ricochete dos mesmos. Esse fenômeno fica mais claro no detalhe da figura 4-10 a seguir

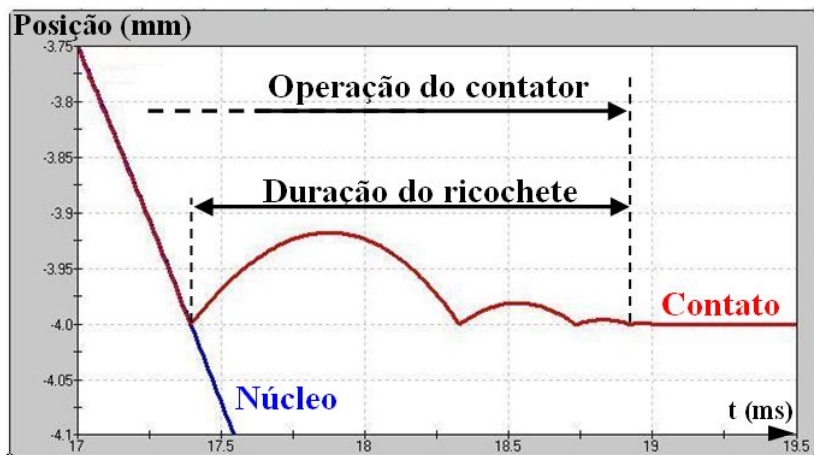


Figura 4-10: Simulação do ricochete dos contatos do contator.

Conforme a figura 4-10, a simulação do tempo de operação do contator apresentou duração de aproximadamente 18,8 ms (de 0 a 18,8 ms) e o ricochete dos contatos, aproximadamente 1,4 ms (de 17,4 a 18,8 ms). Observa-se que estes resultados, quando confrontados com os resultados das medições que se apresentam nas figuras 4-6 e 4-7, apresentam um nível de similaridade que satisfaz a necessidade num modelo simplificado.

Nos resultados não aparece o fenômeno de “overshoot” citado no capítulo 2, figura 2-5, visto que no modelo empregado não existe o elemento viscoelástico de amortecimento no núcleo fixo, nem a mola de conexão entre núcleo móvel e cabeçote.

A partir dos resultados apresentados nas figuras 4-8 e 4-10, pode-se afirmar que o modelo simplificado, desenvolvido para o contator, representa adequadamente os efeitos predominantes que este causa no MRM quando acoplado. Pequenas discrepâncias no comportamento do modelo são aceitáveis, dada a enorme simplificação obtida na modelagem e na análise dos resultados, graças a esse modelo simplificado.

4.3 MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA FORÇA MAGNÉTICA DO ATUADOR

A modelagem é iniciada a partir da geometria do atuador, que é importada do SW pelo software Maxwell para, através da simulação eletromagnética, determinar a força resultante. Para validação, os resultados são comparados com valores experimentais.

Apesar de ser um produto já existente, esse atuador foi desenvolvido na filial argentina da empresa e não se tem nenhuma informação técnica adicional sobre o mesmo, o que justifica a simulação magnética.

Através do software Maxwell, a força magnética de fechamento do atuador de desarme é simulada. A simulação considera o atuador inicialmente aberto, sem alimentação, e logo em seguida este recebe tensão em sua bobina e fecha por ação da força magnética.

Deseja-se nessa etapa obter uma curva de força resultante em função da posição do êmbolo do atuador, durante o fechamento. Juntamente com o modelo do contator do item anterior, emprega-se essa força simulada nos itens seguintes, na simulação do comportamento do MRM.

4.3.1 A PCI do atuador

A bobina do atuador disponível é alimentada por uma PCI onde a tensão de entrada é retificada e, através de um temporizador, interrompida após um determinado intervalo de tempo (aproximadamente 100 ms) evitando danos à bobina por dissipação excessiva de calor.

Com esse seccionamento da alimentação da bobina, atende-se o requisito 3 no quadro 3-2. Quando comparado à solução dos fabricantes GE e A-B, que empregam contatos auxiliares integrados para realizar o seccionamento, essa PCI pode ser obtida a um menor custo (os contatos auxiliares apresentam pastilhas com ligas de prata, de custo elevado). Além disso, a solução com contatos auxiliares dos MRMs concorrentes também implica em investimento adicional para ser produzida.

Dessa forma, é simulada também (conforme figura 4-11 a seguir) a função retificadora dessa PCI. A função de temporização não interfere no nível da tensão que alimenta a bobina do atuador, portanto não há necessidade de acrescentá-la ao modelo.

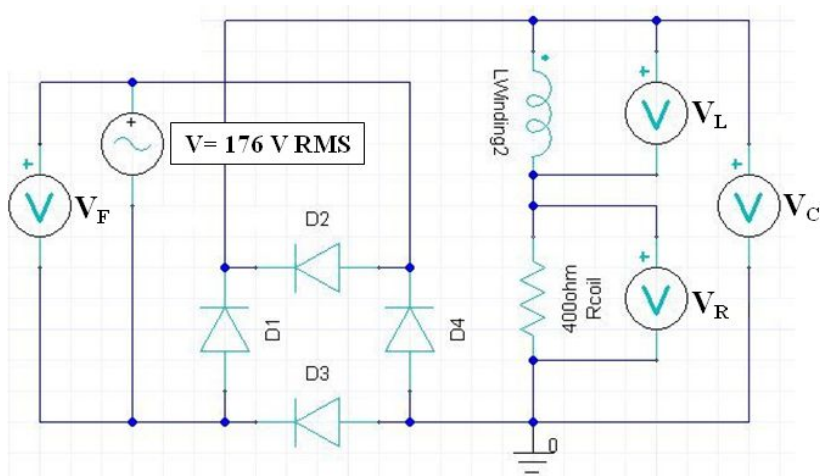


Figura 4-11: Esquema elétrico do retificador da PCI.

4.3.1.1 Análise das curvas de tensão e corrente na PCI

A tensão de alimentação do atuador é monofásica e senoidal com frequência de 60 Hz. O valor nominal dessa tensão é 220V RMS, e conforme o requisito de projeto 4 do quadro 3-3, o MRM deve operar (desarmar) mesmo com uma redução de 20% no valor nominal, ou seja, 176V RMS (situação mais desfavorável pois implica em redução da força magnética), sendo portanto esse o valor de tensão empregado nessa simulação.

Também a resistência da bobina, cujo valor nominal é 360 ohms com tolerância de +/- 10%, foi considerada no modelo com o valor máximo (400 ohms), que representa o caso mais desfavorável, visto que a maior resistência implica em menor corrente e força magnética.

Na figura 4-11 apresenta-se o esquema do retificador simulado onde a bobina do atuador é modelada através de dois componentes ideais em série, um indutor e um resistor. Os voltmetros usados no modelo monitoram os valores de tensão: V_F da fonte, V_C da carga (bobina), V_L da indutância ideal e V_R da resistência ideal.

A figura 4-12 apresenta a tensão da fonte V_F e a tensão da carga V_C . Observa-se que, como esperado para um retificador de onda completa em ponte, a tensão da carga V_C é pulsante e se sobrepõe à tensão da fonte V_F .

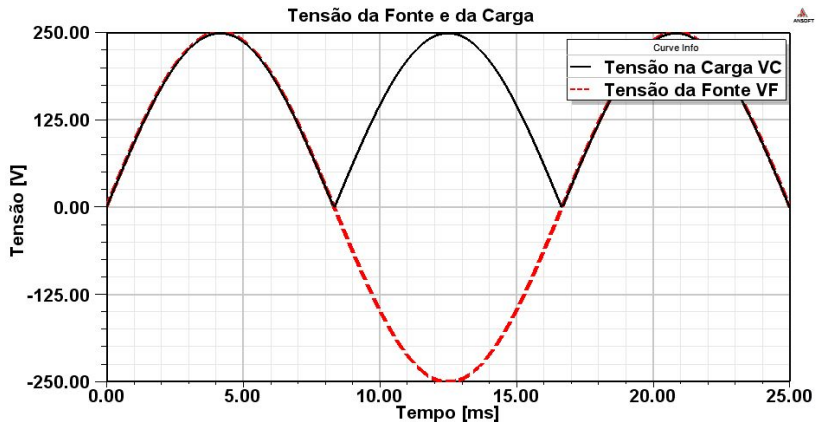


Figura 4-12: Simulação das componentes: tensão da fonte e da carga na bobina do atuador.

A figura 4-13 apresenta a tensão da carga V_C e suas duas componentes ideais, a tensão do indutor V_L e a tensão da resistência V_R . Como também se observa no circuito da figura 4-11, V_C é igual à soma das duas outras componentes V_L e V_R .

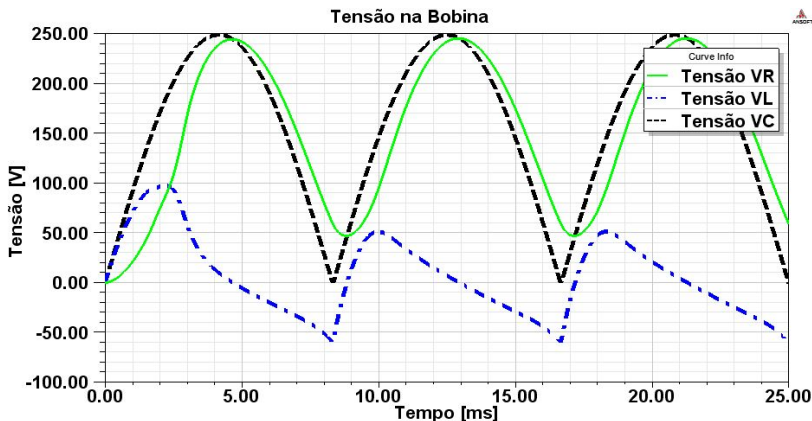


Figura 4-13: Simulação das componentes de tensão na bobina do atuador.

Na figura 4-14 apresentam-se novamente as componentes V_L e V_R juntamente com a corrente. Verifica-se que a corrente e a tensão V_R (do resistor) estão em fase e a corrente está atrasada em relação à tensão V_L , como previsto na teoria de circuitos.

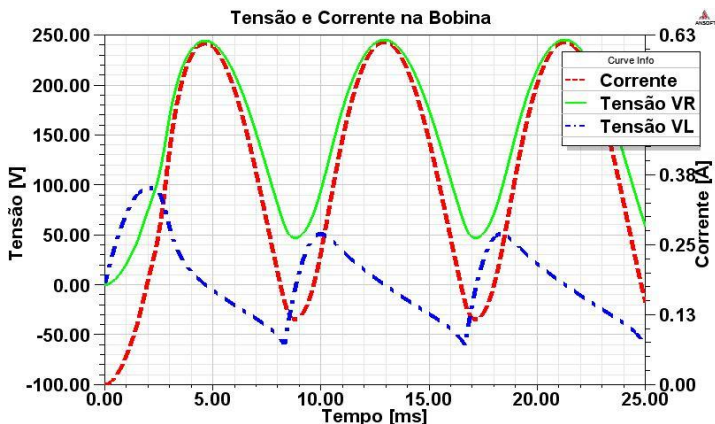


Figura 4-14: Simulação das tensões e correntes na bobina do atuador.

4.3.2 Modelagem da força do atuador magnético

Para a realização dessa simulação, a geometria, os parâmetros de massas e material das peças, a posição relativa entre elas e os cursos são definidos cuidadosamente, dada a grande influência que têm nos resultados. Apresentam-se os dados de entrada da simulação na tabela 4-3 a seguir.

Tabela 4-3: Dados de entrada da simulação magnética do atuador.

Nome	Descrição	Valor	Unidade
Curso	Curso do êmbolo	2,2	mm
N_{esp}	Número de espiras	4000	-
R_{coit}	Resistência da bobina	400	Ohm
Massa	Massa do êmbolo	2,5	g
F_{ini}	Força inicial da mola do atuador	0,2	N
k_{mola}	Constante da mola	0,05	N/mm
Tensão	Tensão RMS da bobina	176	V
f	Frequência da rede	60	Hz

Com o software Maxwell, importa-se do SW a geometria planificada do atuador divide-se esta geometria em seu eixo de simetria.

Apresenta-se na figura 4-15 a seguir a geometria resultante. O software interpreta essa geometria como um sólido cilíndrico de revolução no eixo “Z” de simetria. Esse procedimento é uma simplificação “mais grosseira” somente para a armadura do atuador que de fato não tem uma geometria cilíndrica e é rasgada nas laterais.

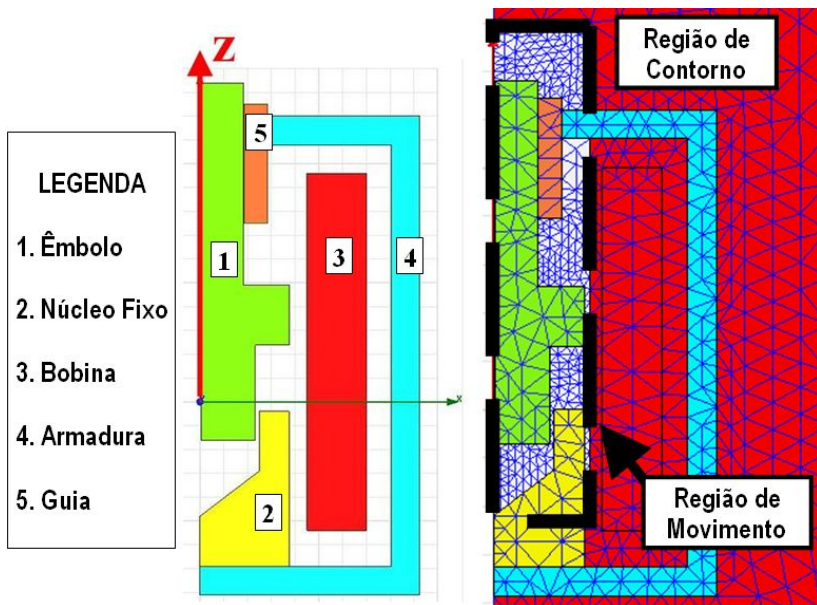


Figura 4-15: Esquema 2D e malha de elementos finitos do atuador.

Através de uma simulação prévia, avaliou-se a região com maior densidade de linhas de fluxo magnético (conforme figura 4-16 a seguir) e refinou-se a malha somente nessas regiões, chegando aos valores atuais da tabela 4-4 e da malha que se apresenta no detalhe da direita na figura 4-15. Dessa forma, o modelo com malha otimizada consome um tempo computacional aproximadamente 3 vezes menor, sendo que uma simulação nessas condições dura aproximadamente 8 horas.

Define-se que o êmbolo se desloca dentro dos limites da região chamada de “região de movimento”. Da mesma forma, define-se a partir da experiência em simulações similares, que as linhas de fluxo não ultrapassam a região chamada de “região de contorno”.

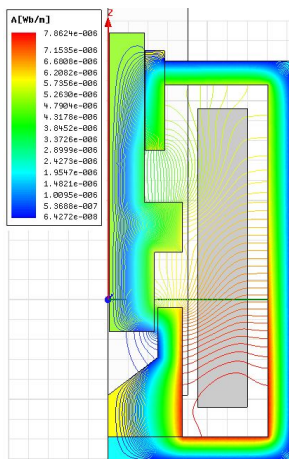


Figura 4-16: Simulação magnética das linhas de fluxo do atuador.

Tabela 4-4:: Detalhes da malha de elementos finitos empregada na simulação magnética do atuador.

Região	Tamanho dos Elementos
Região de contorno	2,0 mm
Peças	1,0 mm
Região de movimento	0,5 mm

4.3.3 Resultados da simulação magnética do atuador

Na simulação do MRM dos itens 4.4, 4.5 e 4.6 a seguir, o êmbolo do atuador acionará uma trava de desarme e, portanto haverá uma carga dificultando o deslocamento do mesmo. Dessa forma é preciso conhecer o valor da força do atuador em função da posição do êmbolo. O deslocamento do êmbolo deverá ocorrer numa faixa condizente com seu curso total.

A curva da força resultante em função da posição do êmbolo do atuador durante o fechamento foi simulada e se apresenta na figura 4-17 a seguir. Essa curva é obtida a partir da força magnética da qual se subtraiu a força da mola interna do atuador.

Observa-se que a referência empregada nesse software apresenta a posição 0,4 mm como atuador aberto e a posição negativa de 1,8mm para o atuador fechado.

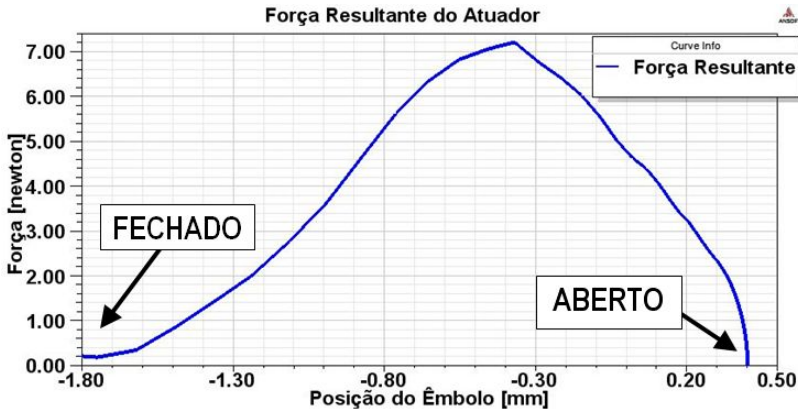


Figura 4-17: Simulação da força resultante do atuador x posição do êmbolo.

4.3.3.1 Análise da curva de força do atuador

Verifica-se que a curva de força obtida é coerente com o previsto na bibliografia, de acordo com a figura 3-5, que se apresenta anteriormente. Analisando ambas as curvas, verifica-se que a força do atuador apresenta um ponto de máximo em uma posição intermediária do deslocamento do êmbolo e tem valores muito pequenos quando o êmbolo está próximo do núcleo fixo (atuador fechado).

Entretanto, ao contrário da curva teórica, na curva simulada, a força parte do zero nos instantes iniciais do deslocamento (atuador aberto).

Para entender essa diferença, foi verificada também a corrente na bobina, conforme figura 4-18. Observa-se nos instantes iniciais um transitório na corrente que parte de zero, mas logo entra em regime com uma frequência igual a 120 Hz, o dobro da frequência da alimentação, devido ao retificador de onda completa da PCI da figura 4-11.

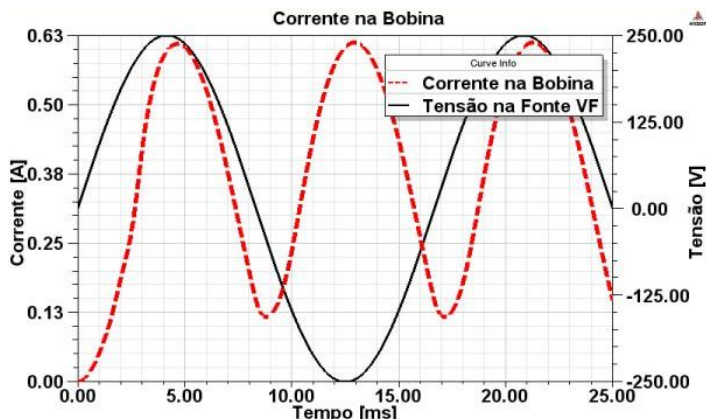


Figura 4-18: Simulação da corrente na bobina do atuador.

Apresenta-se na figura 4-19 a simulação conjunta dos valores de corrente e da força em função da posição do êmbolo. Como no instante inicial (posição de 0,4 mm) a corrente da bobina é nula, a força magnética também parte de um valor nulo. O aumento da corrente ocorre gradualmente e o aumento da força também ocorrerá, esta porém, dependente da corrente e da posição do êmbolo.

Já para a posição de -1,8mm o atuador está fechado e a corrente atinge o regime variando senoidalmente na faixa de 0,12 a 0,61 A como também se pode verificar pela linha vertical da corrente nessa posição.

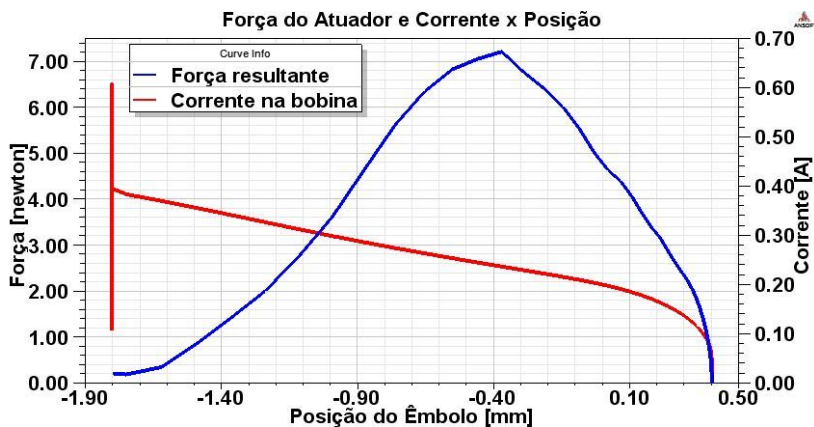


Figura 4-19: Simulação da força resultante do atuador e corrente na bobina x posição do êmbolo.

Curva de força do contator x força do atuador

Ainda analisando a curva de força obtida, conforme figura 4-17, observa-se que a mesma difere significativamente da curva de força do contator que se apresenta na figura 2-11 onde, quanto menor a abertura dos núcleos, maior a força magnética.

Nesse caso tem-se o oposto, a força do atuador apresenta valores muito pequenos quando o êmbolo está próximo do núcleo fixo. A razão dessa diferença no comportamento da força magnética do contator em relação à desse atuador é principalmente devido à geometria de seu núcleo fixo em formato de “copo com fundo cônico”.

As linhas de fluxo magnético têm densidade máxima na região entre a extremidade do êmbolo e o núcleo fixo, como destacado na figura 4-20. Avaliando o comportamento do fluxo nessa região durante o deslocamento do êmbolo, desde sua posição aberto até a posição final, pode-se identificar o motivo da redução da força.

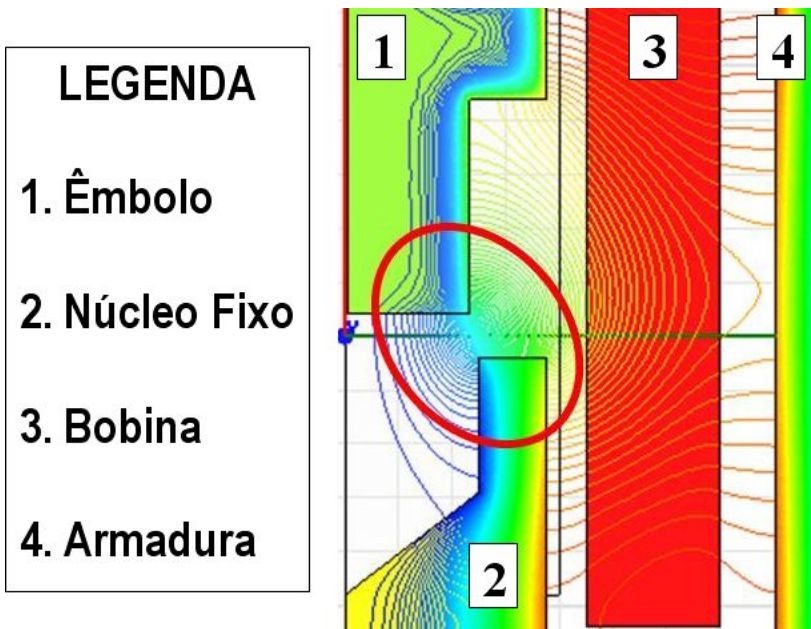


Figura 4-20: Simulação da região com maior densidade de linhas de fluxo.

Na figura 4-21, apresentam-se as linhas de fluxo magnético ϕ em duas situações, para o atuador aberto e fechado. Sabendo que a força útil é produzida nas regiões em que o fluxo está na direção do movimento linear, conclui-se que a componente ϕ_z do fluxo é a única que contribui para o movimento.

Na situação do detalhe à esquerda na figura 4-21, quando o atuador está aberto, essa componente ϕ_z do fluxo tem magnitude próxima a do fluxo total, gerando também uma força de atração com grande magnitude.

Na situação do detalhe à direita da mesma figura, para o atuador fechado, a maior parte do fluxo está na direção do eixo x, e a componente ϕ_z nesse caso é nula explicando a redução de força nessa posição.

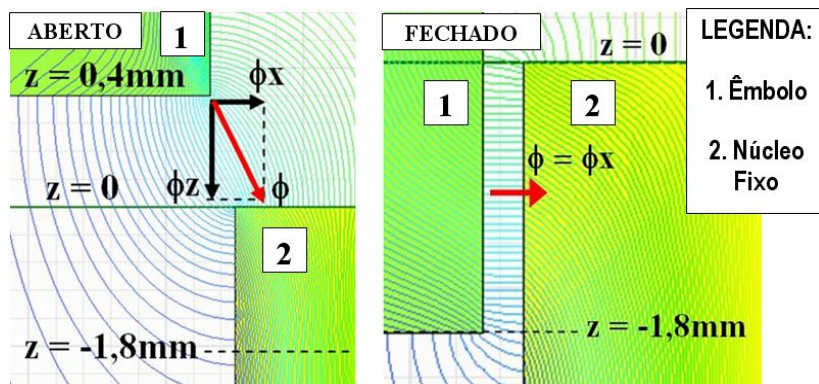


Figura 4-21: Variação das componentes do fluxo magnético.

4.3.3.2 Medição da força do atuador

Deseja-se validar os resultados da simulação através de medições de força x posição do êmbolo do atuador. Apresenta-se na figura 4-22 a seguir o esquema preparado para a medição.

Para tal medição empregou-se três amostras do atuador, com êmbolo acoplado a uma célula de carga. No detalhe à direita nessa mesma figura, apresenta-se o gancho improvisado que acopla o êmbolo do atuador na célula de carga.

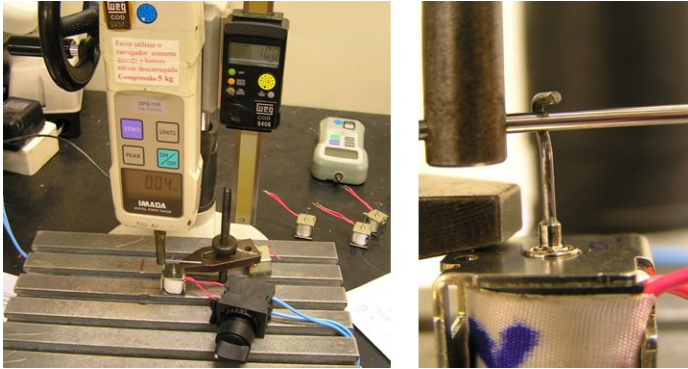


Figura 4-22: Experimento de medição da força dos atuadores magnéticos.

Alteração na PCI do atuador

Para a realização do experimento, substituiu-se o capacitor de temporização da PCI por outro de capacitância superior (figura 4-23). Dessa forma a alimentação da bobina do atuador, antes seccionada em 100 ms, passou a ficar ligada durante um intervalo de tempo suficiente para se realizar a medição da força (aproximadamente 1,5 s).

Durante a medição o atuador permanece ligado por um tempo maior que o convencional, o que causa um súbito aquecimento e aumento de resistência de sua bobina. Isso implica em redução da corrente e da força magnética medida no mesmo. O artifício empregado foi realizar a medição de poucos pontos por vez, deixando a bobina do atuador esfriar (dissipando calor para o ambiente e para as peças adjacentes) antes de prosseguir com novas medições.

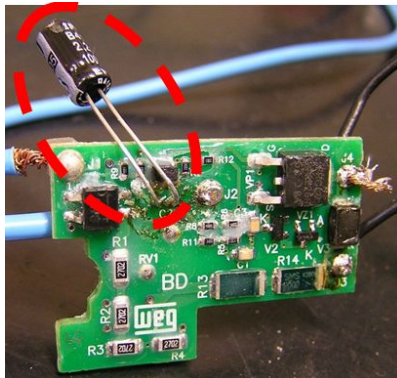


Figura 4-23: PCI modificada para aumentar o tempo de condução.

Devido a esse decréscimo na força durante a medição, acredita-se que os valores apresentados são em geral inferiores ao valor que o atuador realmente fornece. A dispersão dos valores medidos foi grande e optou-se por fazer uma média dos valores das três amostras para comparar com resultado da simulação, como se apresenta na figura 4-24.

Observa-se que, assim como na figura 4-17, a referência adotada apresenta a posição 0,4 mm como êmbolo totalmente aberto e os valores negativos para quando o êmbolo se desloca no sentido do fechamento. Assim, a posição -1,8mm representa o êmbolo totalmente fechado.

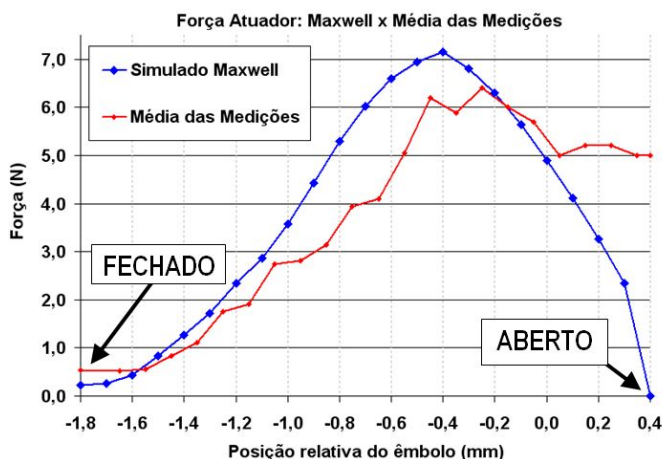


Figura 4-24: Comparativo de simulação x medição da força do atuador.

Verifica-se que os valores medidos são razoavelmente semelhantes ao simulado nas posições próximas do final do deslocamento (êmbolo fechado). Entretanto, a principal diferença verificada na curva simulada em relação aos valores medidos encontra-se justamente nas posições próximas a posição do êmbolo aberto, ou seja, no início do movimento do mesmo.

Essa diferença ocorre porque a medição não permite registrar o fenômeno do transitório da corrente, e em cada medição de força por posição, a corrente da bobina já estabilizou e a força para as posições iniciais do movimento não é nula (portanto, diferentemente do resultado da simulação que se apresentou na figura 4-19).

Decidiu-se então em fazer uma nova simulação na qual foi definido que o valor inicial da corrente não é nulo. Dessa forma, acredita-se que a simulação irá representar melhor o fenômeno da

medição. As curvas de corrente da bobina e força do atuador simulados nessa situação encontram-se na figura 4-25 a seguir.

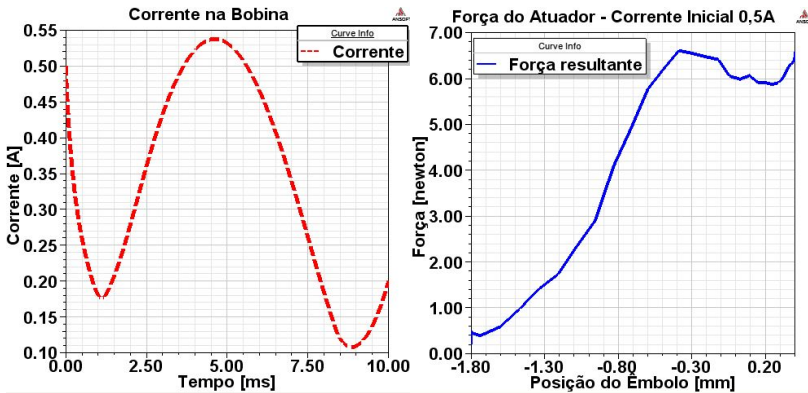


Figura 4-25: Simulação da corrente e força resultante do atuador para corrente inicial de 0,5 A.

Dessa vez, quando se faz a comparação entre a curva de força resultante simulada e a curva da média das medições, a principal diferença que havia, devido ao transitório da corrente deixa de existir. Agora, as curvas de simulação e medição são muito mais semelhantes, conforme figura 4-26.

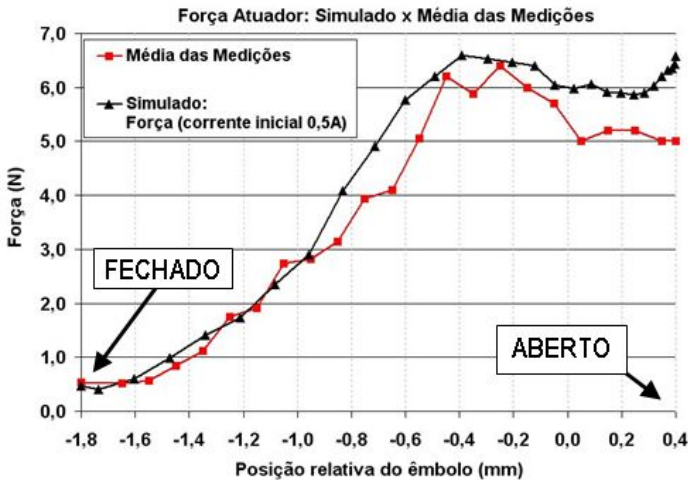


Figura 4-26: Comparativo simulação x medição da força do atuador para corrente inicial de 0,5 A.

Em função das dificuldades encontradas durante a medição, e analisando a curva da figura 4-26 onde a situação mais próxima da realidade foi simulada, afirma-se que o fenômeno real foi representado satisfatoriamente e a simulação é considerada validada.

4.3.3.3 Polinômio da força magnética do atuador

Para ser empregada no software WM2D na etapa seguinte, foi escolhida a curva de força simulada do atuador, como na figura 4-17, pois, devido aos valores reduzidos de força no começo do deslocamento do êmbolo, torna-se a situação mais desfavorável.

Essa curva de força é aproximada no Excel por um polinômio de grau 4. Apresenta-se na figura 4-27 a seguir o comparativo da curva simulada e do polinômio empregado.

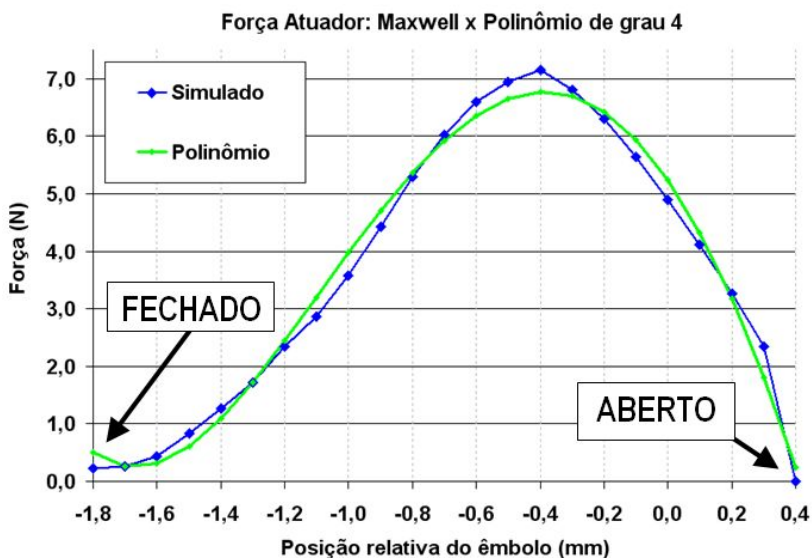


Figura 4-27: Comparativo de simulação x polinômio de aproximação da força do atuador.

Além disso, por conveniência ao modelo do mecanismo do MRM que posteriormente será desenvolvido no software WM2D, ajustou-se o referencial de posição tornando a curva definitiva deslocada para a posição absoluta de 3,6 mm além de espelhada em relação à original que se apresenta acima. Assim, nessa curva de força da figura 4-28, a

posição 3,6 mm representa o atuador aberto e a posição de 5,6 mm o atuador fechado.

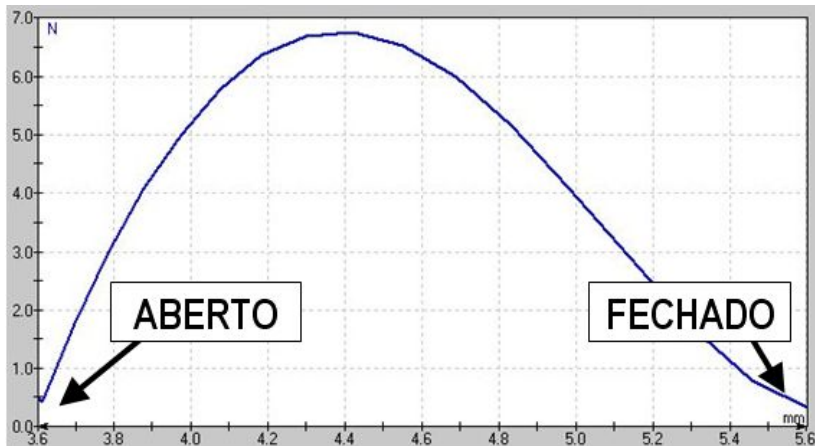


Figura 4-28: Apresentação da força resultante do atuador no WM2D.

4.3.3.4 Análise de potência dissipada e corrente no atuador

Nos tópicos anteriores, onde se avaliou o comportamento das curvas de tensão e corrente na PCI do atuador e principalmente, onde se avaliou o comportamento da força resultante do atuador em função da posição do êmbolo, as simulações foram realizadas considerando-se o valor de tensão como 176V RMS (20% de redução em relação ao valor nominal), que nestes casos, representa a situação mais desfavorável.

Por outro lado, de acordo com o requisito 7 do quadro 3-3, quando se avaliam os níveis máximos de potência dissipada e consumo de corrente na bobina do atuador, a situação mais desfavorável, pois implica em aumento dessas grandezas, é quando a tensão de alimentação apresenta valor 10% acima da nominal, ou seja, 242V RMS.

Dessa forma, para avaliação de potência e corrente na bobina do atuador, as simulações são realizadas no mesmo circuito elétrico apresentado na figura 4-11, porém considerando-se o valor de tensão de entrada de 242V RMS.

Obtém-se a curva de potência instantânea na bobina apresentada na figura 4-29, através do produto da curva da corrente pela curva da tensão na carga V_C , e cujo valor médio representa a potência dissipada na bobina, a grandeza de interesse.

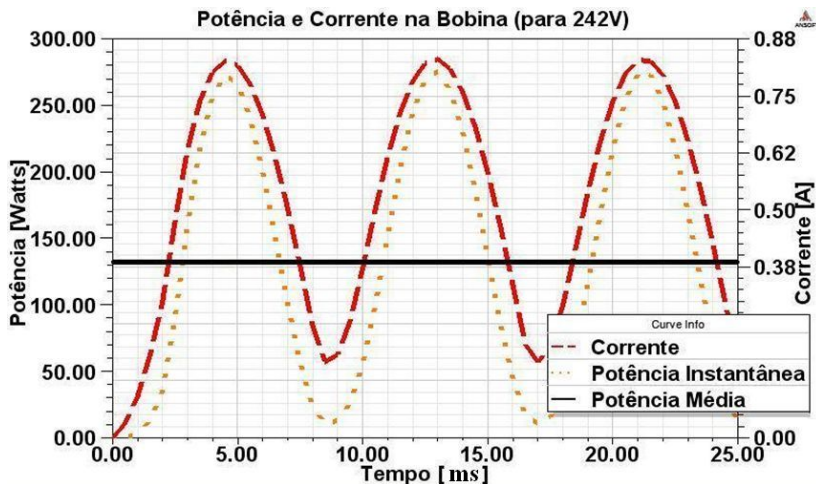


Figura 4-29: Potência dissipada na bobina do atuador.

Verifica-se que a corrente na bobina tem valor de pico de aproximadamente 0,82A e a potência média tem valor de 131W. Com esses valores, atende-se o requisito 7 no quadro 3-3, (desligar com pulso de no máximo 200W / 8A).

4.4 O MECANISMO DO MRM ACOPLADO AO CONTATOR

Após a realização das etapas apresentadas nos dois itens anteriores (4.2 e 4.3), ou seja, a simulação do modelo simplificado do contator e a simulação da força magnética do atuador, nos próximos itens se apresentam a modelagem e a simulação dinâmica do mecanismo do MRM acoplado ao modelo do contator e se verifica seu comportamento nas etapas:

a) Etapa de operação

Durante a operação, quando a força magnética do contator atua, deseja-se que o mecanismo do MRM não dificulte ou impeça o fechamento do mesmo.

b) Etapa de retenção

É a etapa mais importante. Quando o contator é desligado, ou seja, sua força magnética deixa de atuar, deseja-se que o MRM faça a retenção, impedindo que o contator desarme.

Devido às folgas entre peças e às forças de mola do contator, todo o conjunto cabeçote do contator + cabeçote do MRM se desloca um pouco no sentido da abertura. Essa folga, que no item 3.1.1 foi chamada de folga de retorno, deve ser avaliada e seu valor máximo não deve ultrapassar o que se estipula nos requisitos de projeto.

c) Etapa de desarme

Quando o atuador magnético envia pulso de desarme, deseja-se que esta força seja suficiente para liberar a trava e permitir que, por ação das molas do contator, todo o conjunto retorne a sua posição inicial.

Os resultados desta simulação, quando comparados com os requisitos de projeto elencados durante a etapa de projeto informacional conforme quadros 3-2 e 3-3 do capítulo 3, permitem avaliar o desempenho do mecanismo desenvolvido.

4.4.1 Desenho CAD 3D do mecanismo do MRM

Empregando o software SW, foi feito o desenho 3D esquemático da solução proposta. Essa versão não contempla ainda todos os requisitos de forma, leiaute, materiais, detalhes de manufatura, etc., que serão desenvolvidos em etapa posterior não apresentada no texto.

Nesse esboço já se contempla o requisito 5 da especificação de projeto, que dita os valores dimensionais externos máximos (largura x altura x profundidade) do acessório, listados no quadro 3-3. Além disso, o número de máximo de peças também é um requisito considerado.

Conforme se apresenta na figura 4-30, desenvolveu-se este desenho 3D do MRM em concordância com o desenho do contator e também em conjunto com o atuador de desarme (já existentes).

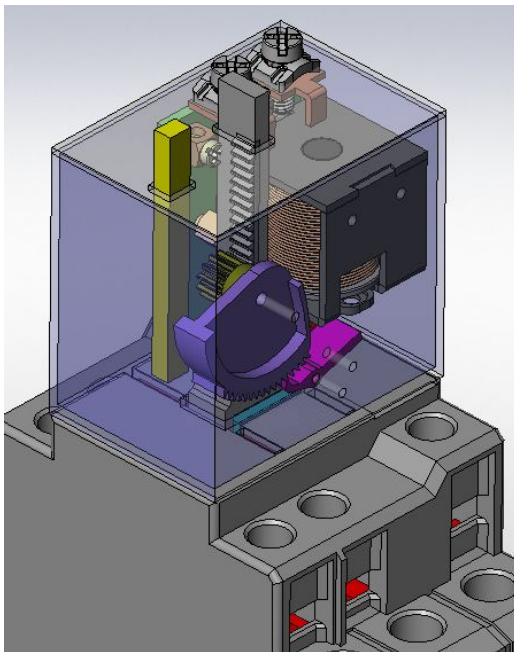


Figura 4-30: Desenho CAD do MRM acoplado ao contator de menor largura.

4.4.2 O modelo dinâmico do mecanismo do MRM

Com o objetivo de verificar funcionamento do MRM desenvolvido, importaram-se do SW a geometria das peças que compõem de seu mecanismo de retenção desenvolvendo um modelo do mesmo no WM2D. O modelo foi desenvolvido considerando que:

- Acopla-se este modelo do mecanismo ao modelo simplificado do contator, simulado no item 4.2;
- Aciona-se a trava do mecanismo do MRM através de uma força de desarme na forma de uma equação polinomial, definida no item 4.3 (mais precisamente em 4.3.3.3);
- Define-se com precisão a geometria, a massas das peças, a posição relativa das mesmas e os cursos, visto que isso influencia fortemente no funcionamento do modelo;

- Define-se que a geometria do engate do cabeçote do MRM com o cabeçote do contator tem as mesmas dimensões de um acessório similar existente também de engate frontal, porém com suas tolerâncias dimensionais máximas, que representam o caso mais desfavorável;
- Definem-se as molas com constantes elásticas e mesmas dimensões do produto;
- Definem-se os coeficientes de atrito indiretamente, no instante em que, no software se definem os tipos de materiais de cada peça (aço, cobre, plástico, etc.);
- Definem-se os eixos da catraca e da trava como ideais (sem atritos e sem folgas), por simplificação;
- Define-se que o cabeçote do MRM se desloca entre duas guias com folgas para representar a situação real;
- Define-se a aceleração da gravidade atuando nos elementos do modelo;
- Definem-se batentes que limitam o movimento do cabeçote do MRM no sentido da abertura, e que representam a função da carcaça e demais partes do produto não contempladas no modelo.

Apresenta-se a na figura 4-31 a seguir, o primeiro leiaute da concepção do mecanismo do MRM que se desenvolveu. Os leiautes posteriores diferem pouco deste, pois os retrabalhos se concentraram basicamente na geometria da trava e na posição relativa entre esta e a catraca. Algumas peças que compõem o MRM, como a PCI e a carcaça, não interferem na simulação e por isso não fazem parte do modelo citado.

A seguir, descrevem-se cada uma das partes do modelo do mecanismo do MRM desenvolvido e seu papel em cada uma das três etapas do funcionamento anteriormente citadas: operação, retenção e desarme.

4.4.3 O funcionamento do mecanismo do MRM

Conforme figura 4-31, o modelo do mecanismo do MRM é formado pelas seguintes partes: 1) Cabeçote do MRM; 2) Catraca; 3) Trava; 4) Guias; 5) Batente da trava e 6) Mola da trava.

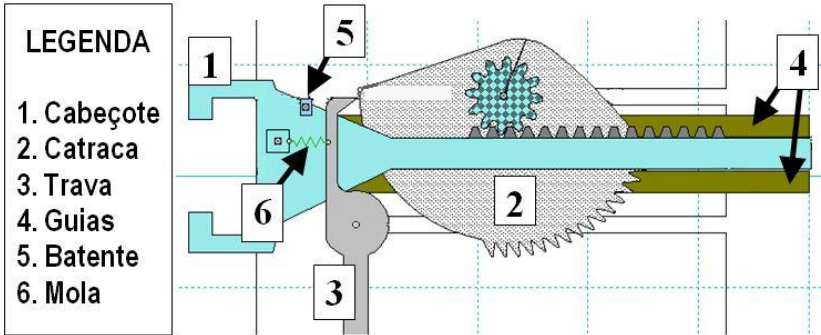


Figura 4-31: Esquema do mecanismo do MRM.

Etapa de operação: Durante esta etapa, a força magnética do contator atua e representa-se a força resultante que este aplica no MRM através do vetor-força F_{rc} com direção e sentido que se apresenta na figura 4-32. Esta força desloca o cabeçote do MRM girando a catraca no sentido horário e esta, por sua vez comprime a trava em direção a sua mola.

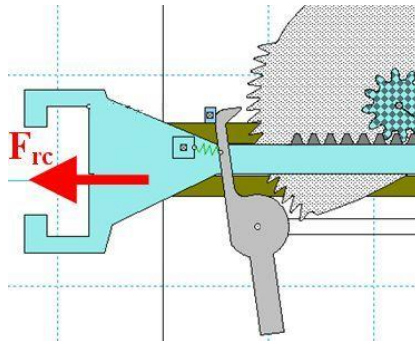


Figura 4-32: Esquema do mecanismo do MRM – etapa de operação.

Etapa de retenção: Nesta etapa a força magnética do contator deixa de atuar e a resultante do mesmo, F_{rc} , passa ser a força das molas. O sentido dessa força se inverte, como se apresenta na figura 4-33, forçando o cabeçote do MRM de volta à posição original.

O papel do MRM nessa etapa é fazer com que a trava impeça que a catraca gire de volta, mantendo o contator fechado.

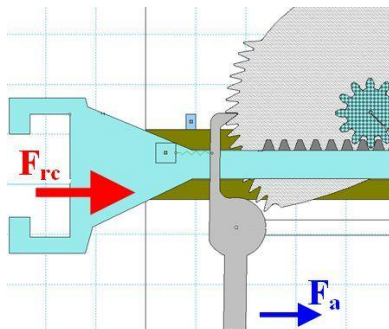


Figura 4-33: Esquema do mecanismo do MRM – etapa de retenção e desarme.

Etapa de desarme: A força das molas do contator continua atuando no cabeçote do MRM e também passa a atuar em uma extremidade da trava a força de desarme do atuador F_a , conforme se indica na figura 4-33. Essa força causa o giro da trava até a mesma tocar o batente, liberando a catraca que por sua vez gira no sentido anti-horário, permitindo o contator voltar à sua posição de repouso, aberto.

4.5 SIMULAÇÃO DOS LEIAUTES PRELIMINARES DO MECANISMO DO MRM

O desenvolvimento da concepção do mecanismo do MRM ocorreu de maneira interativa com as simulações. Os leiautes preliminares falharam e serviram para aprofundar a análise do funcionamento do mecanismo, avaliar a sensibilidade de alguns parâmetros e gerar novas idéias.

Tendo em mente que a concepção (sua estrutura funcional) é fruto de engenharia reversa como citado anteriormente, a partir do leiaute inicial, é feita através da simulação a análise de como a mudança de alguns parâmetros melhora ou piora o desempenho do mecanismo.

Informações adicionais sobre o software WM2D

Nesse ponto, chama-se a atenção para as funcionalidades do software empregado, o Working Model 2D. Este software é uma ferramenta que aplica as leis físicas na simulação e análise cinemática e

dinâmica de movimento de sistemas mecânicos virtuais. Ele simula as interações entre as formas geométricas do modelo detectando colisões e respondendo a elas. Entretanto, o WM2D não faz nenhum tipo de otimização. Ele apenas expressa os valores simulados permitindo a análise do modelo através de medição de força, torque, aceleração, expressando os resultados como vetores, gráficos, etc.

Dessa forma, é responsabilidade do projetista identificar as possibilidades de melhoria a partir da análise dos leiautes simulados e propor alterações. Apresentam-se a seguir as principais análises feitas a partir desses leiautes preliminares do MRM.

4.5.1 Leiaute 1 do mecanismo do MRM: Não faz retenção

Este leiaute funciona na etapa de operação, mas falha na etapa de retenção, como se apresenta a seguir. A figura 4-34 apresenta em detalhe o resultado obtido do WM2D para a força resultante na trava, durante a etapa de retenção.

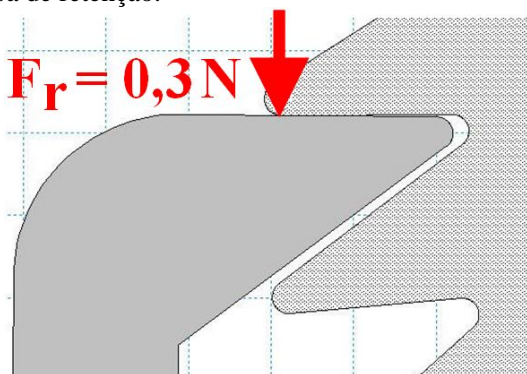


Figura 4-34: Força resultante na interface trava x catraca do MRM leiaute 1.

Para facilitar a análise, na figura 4-35 apresenta-se um vetor força F_r em escala aumentada, no mesmo sentido e direção dessa força resultante. Esta força F_r é decomposta em suas componentes relativas ao eixo da trava.

A componente F_y é posicionada no eixo de movimento e, portanto esta não causa momento. Da mesma forma, posiciona-se a componente F_x perpendicularmente ao vetor F_y e a uma distância “a” do eixo de giro de forma que esta será responsável por um momento M_x no sentido anti-horário, e que causa o desarme da trava.

Esse resultado indica que um ponto fundamental para o correto funcionamento desse mecanismo de retenção é a posição relativa entre o eixo de giro da trava e o ponto de aplicação da força resultante.

Com a escolha conveniente da geometria e posicionamento dessa trava, surgirá na etapa de retenção, um momento de giro no sentido oposto e o sistema tenderá a ficar cada vez mais travado, quanto maior for a força resultante que a catraca aplica na trava. Em inglês o termo que se emprega para tal tipo de trava é “*positive locking*”.

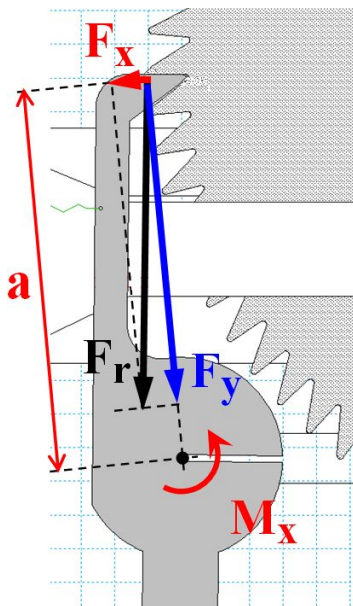


Figura 4-35: Decomposição da força resultante na trava do MRM, leiaute 1.

4.5.2 Leiaute 2 do mecanismo do MRM: Não desarma

Este leiaute funciona na etapa de operação e de retenção, mas falha na etapa de desarme, como se apresenta a seguir.

Modifica-se a posição relativa do eixo da trava em relação à catraca. Nesse leiaute, a força resultante que a catraca aplica na trava apresenta a direção indicada pelo vetor F_r na figura 4-36. Decompondo-se esta força em suas componentes como no item anterior, verifica-se que a direção do momento resultante M_x é no sentido horário. Dessa forma a retenção funciona nesse leiaute do mecanismo do MRM.

Na etapa de desarme, o atuador aplica a força F_a que causará o momento M_a conforme se apresenta na figura 4-36 e para haver o desarme, esse momento deverá ser superior ao momento M_x que causa a retenção. Entretanto, nesse leiaute isso não ocorre. O MRM permanece retido mesmo com a aplicação da força F_a .

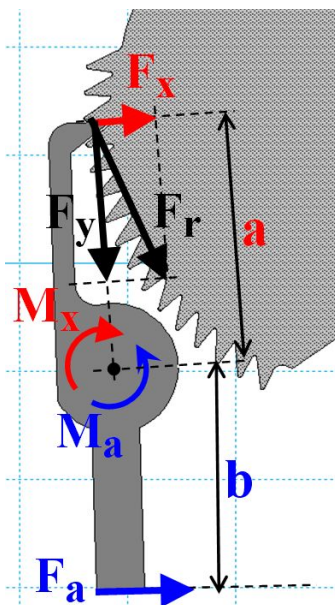


Figura 4-36: Decomposição da força resultante na trava do MRM leiaute 2.

A geometria da trava e a posição relativa entre esta e a catraca deve ser determinada, levando-se em consideração não apenas a etapa de retenção, mas também sua influência na etapa de desarme.

4.5.3 Leiaute 3 do mecanismo do MRM: Curso muito grande

Este leiaute supostamente funciona em todas as três etapas, mas como se apresenta a seguir, é inviável.

Sabendo que a força de desarme do atuador F_a tem seu valor definido (uma vez que se decidiu empregar um atuador já existente), aumentou-se o corpo da trava, aumentando-se assim o braço de alavanca “b” (conforme figura 4-37) de forma que o momento M_a se torna maior que o momento M_x e o desarme ocorre.

Durante o desarme a trava gira em seu eixo até sua cabeça tocar o batente. Da mesma forma, sua haste gira um determinado ângulo, como indica a linha tracejada da figura 4-37. Dado que, no produto MRM, o ponto de aplicação da força F_a é o ponto onde a haste da trava acopla-se ao êmbolo do atuador magnético, o deslocamento desse ponto é equivalente ao curso do êmbolo.

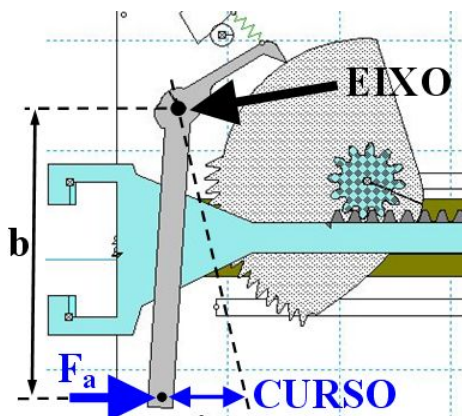


Figura 4-37: Análise do mecanismo do MRM, leiaute 3.

Como nesse leiaute do mecanismo do MRM a haste da trava foi aumentada excessivamente, o curso do êmbolo ultrapassou os 2,2 mm disponíveis, como se apresenta na tabela 4-3.

Verificou-se no WM2D o deslocamento do ponto de aplicação da força F_a , durante todas as etapas do funcionamento do MRM e se apresenta o resultado na curva da figura 4-38. Observa-se que para este leiaute ser viável, o êmbolo do atuador precisaria ter um curso superior a 5,5mm.

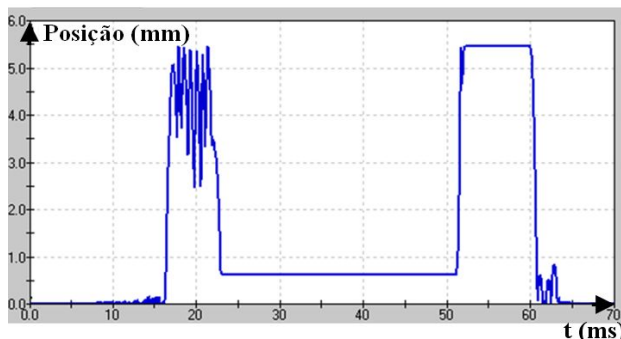


Figura 4-38: Curso do êmbolo do atuador no leiaute 3 do MRM.

4.6 SIMULAÇÃO DO LEIAUTE FUNCIONAL DO MECANISMO DO MRM:

Definido a concepção do produto (a partir de engenharia reversa da solução de trava e catraca), os resultados da simulação dos leiautes alternativos apresentados contribuíram significativamente para o entendimento do funcionamento do mecanismo em desenvolvimento, permitindo chegar ao leiaute funcional apresentado na figura 4-39, e que será analisado a seguir.

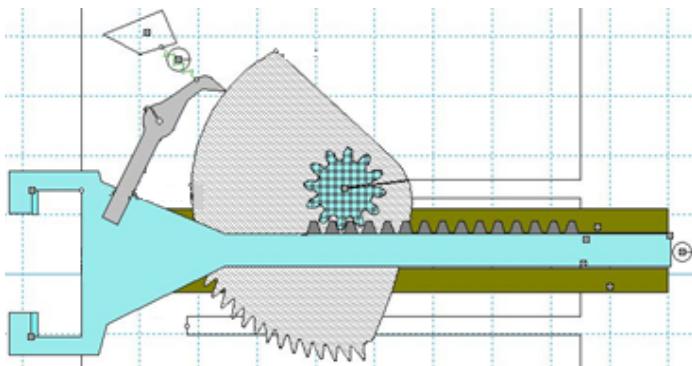


Figura 4-39: Leiaute funcional do mecanismo do MRM.

4.6.1 Análise do leiaute funcional do mecanismo do MRM

A explicação a seguir é toda baseada nas figuras 4-40 e 4-41. A figura 4-40 está dividida em 2 partes (1 e 2) onde se apresentam as curvas da simulação da posição/deslocamento e das forças em função do tempo, de partes importantes do conjunto MRM + contator e que, juntamente com as ilustrações da figura 4-41, ajudarão a compreender todas as etapas do fenômeno simulado.

A figura 4-41 está dividida em 5 partes (de A a E) onde se apresentam as ilustrações obtidas com o software WM2D de etapas importantes da operação do conjunto MRM + contator.

- O detalhe A, apresenta o conjunto MRM + contator aberto e em repouso (estado inicial). No instante t_a começa a etapa de operação: a força magnética do contator começa a atuar e a parte móvel do conjunto se desloca no sentido do fechamento;

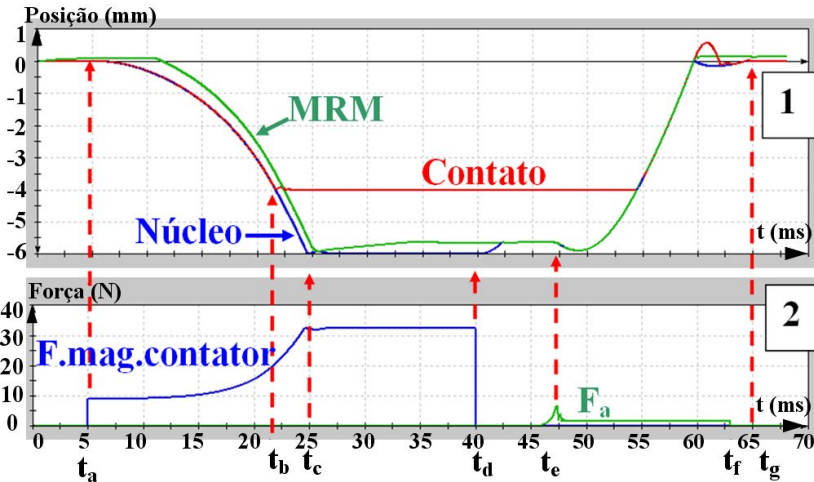


Figura 4-40: Simulação da posição e das forças do MRM.

- No instante t_b os contatos do contator colidem como se apresenta no detalhe B;
- No instante t_c os núcleos do contator colidem como se apresenta no detalhe C. A força magnética do contator continua atuando;
- No instante t_d começa a etapa de retenção: a força magnética deixa de atuar e o contator tenta abrir devido à ação das forças de suas molas. Observar no detalhe D, que os núcleos se afastam um pouco, devido às folgas mecânicas existentes no mecanismo do MRM. Esse deslocamento do núcleo móvel se verifica também na curva 1, logo após t_d ;
- No instante t_e começa a etapa de desarme: aplica-se o pulso de desarme (surge a força F_a na curva 2). A trava libera a catraca e os contatos começam a se afastar como se apresenta no detalhe E;
- No instante t_f , a força de desarme deixa de atuar. Todo o conjunto, que desde o instante t_e está voltando à posição original, atinge o repouso no instante t_g .

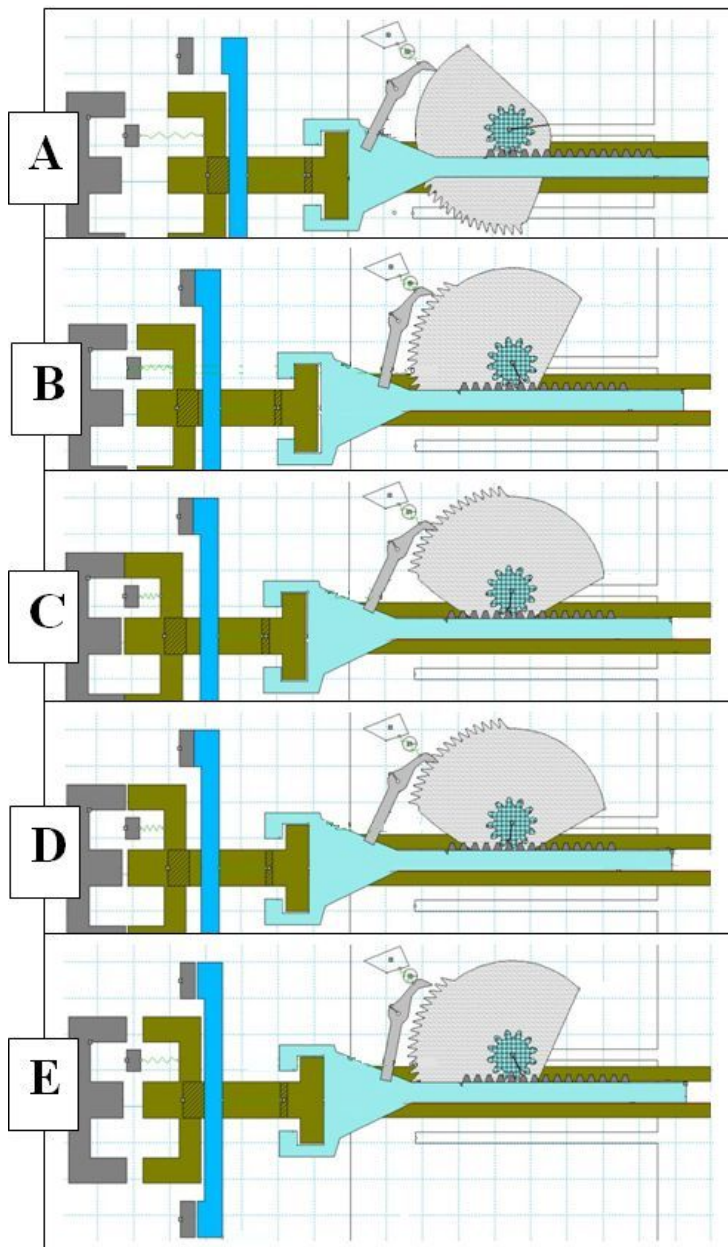


Figura 4-41: Simulação das etapas de operação do leiaute funcional do mecanismo do MRM acoplado ao contador.

4.6.1.1 Análise do curso do êmbolo

A figura 4-42 apresenta o detalhe do comportamento da força de desarme e da posição da extremidade do êmbolo (seu curso) na etapa de desarme, para o leiaute funcional do MRM.

A equação da força magnética do êmbolo empregada nesse software foi definida em função da posição conforme se apresentou na figura 4-27. Na figura a seguir se apresenta esta mesma curva, porém em função do tempo por ser mais conveniente para uma análise comparativa com a curva de deslocamento do êmbolo do atuador.

A força de desarme F_a começa a atuar a partir do instante $t_e = 46$ ms e o êmbolo começa a se deslocar. Essa força atinge seu pico poucos milissegundos depois e volta a decrescer. A partir de certo momento, o êmbolo permanece numa posição constante (a cabeça da trava está fixa, encostada no batente), então a força também permanece constante.

No instante $t_f = 63$ ms, a força de desarme deixa de atuar e o êmbolo volta para sua posição inicial de repouso. Todo o conjunto está aberto.

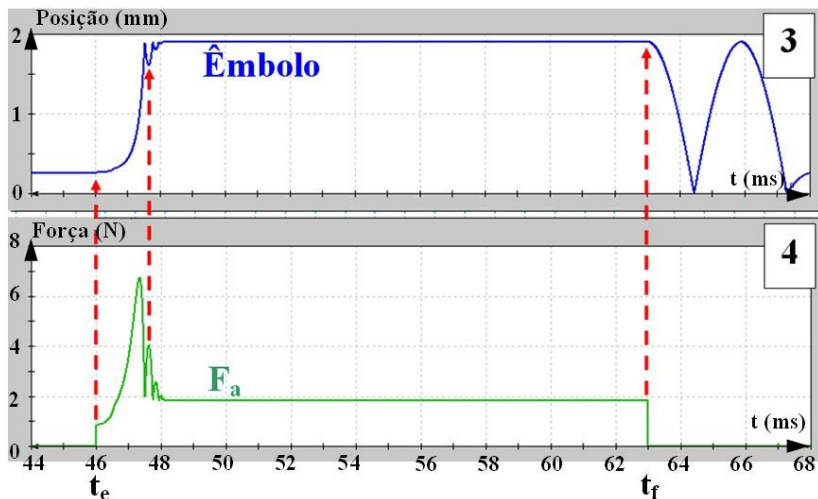


Figura 4-42: Simulação da força de desarme e posição do êmbolo do MRM.

O valor do curso do êmbolo obtido na simulação é inferior a 2,0 mm, permitindo o emprego do atuador escolhido.

4.6.1.2 Análise da força de fechamento do MRM

A seguir, com auxílio da figura 4-43, avalia-se a força de contato entre o cabeçote do contator e o cabeçote do leiaute funcional do MRM durante toda a etapa de fechamento. Faz-se essa avaliação visto que um importante requisito de projeto é a força máxima para fechamento do MRM menor ou igual a 1,5 N (no quadro 3-2, requisito 1).

Na figura 4-43 está representado o instante em que a força de contato entre os cabeçotes atinge seu máximo. Nesse instante essa força de contato resultante atinge um valor inferior a 0,2 N, atendendo o requisito citado.

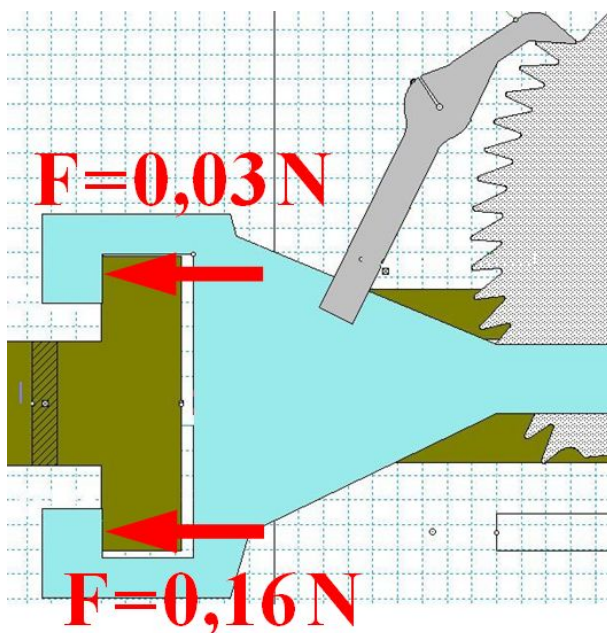


Figura 4-43: Simulação da força de contato entre os cabeçotes do contator e do MRM.

4.6.1.3 Análise da folga de retrocesso

A seguir, com auxílio da figura 4-44, obtida a partir de um detalhe da figura 4-40, avalia-se a folga de retrocesso do cabeçote do contator, importante requisito de projeto (no quadro 3-2, requisito 2).

Como dito anteriormente, em $t_d = 40$ ms, a força magnética do contator deixa de atuar e este tenta abrir devido à ação de suas forças de molas. Os núcleos se afastam um pouco, devido às folgas mecânicas existentes no mecanismo do MRM.

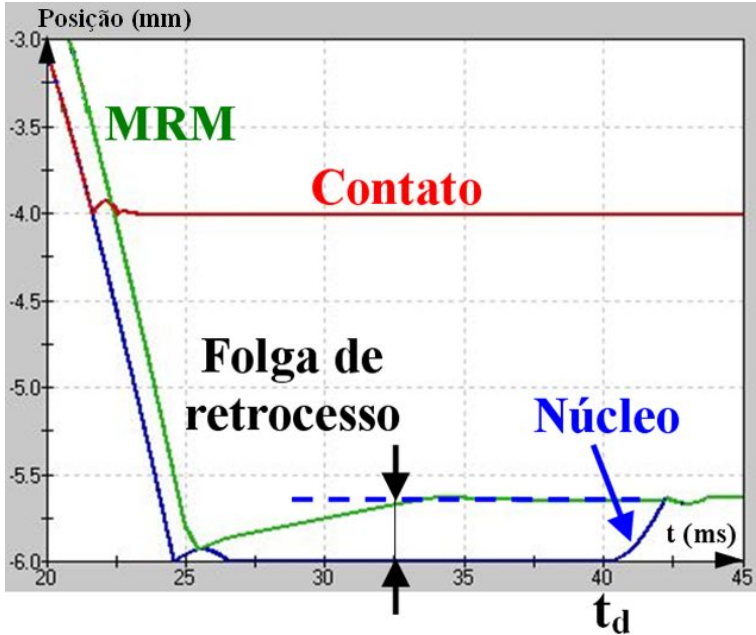


Figura 4-44: Simulação da folga de retrocesso durante a etapa de retenção.

Esse deslocamento não ocorre nos contatos, entretanto a pressão entre eles diminui visto que, pelo deslocamento do cabeçote do contator, as molas de contato são menos pressionadas.

O valor da folga de retrocesso obtido na simulação é inferior a 0,5m, atendendo o requisito de projeto.

4.6.1.4 Análise do tempo de desarme

Analisando a figura 4-40, verifica-se que o desarme ocorreu entre os instantes $t_c = 45$ ms, quando a força F_a do atuador foi aplicada, até o instante $t_g = 65$ ms, quando o cabeçote do MRM e contator voltaram às suas posições iniciais. Assim, pela simulação, o tempo total de desarme foi de aproximadamente 20 ms, atendendo mais um requisito de projeto (requisito 4 do quadro 3-3).

5 DISCUSSÕES E CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS

5.1 CHECK-LIST DOS REQUISITOS DE PROJETO

Como se apresentou no capítulo 3, os requisitos de projeto estabelecem algo que é necessário, verificável e atingível. Para ser verificável, a especificação declara algo que pode ser aferido. No presente trabalho as aferições ocorrem ao longo do texto, no capítulo 4. Para facilitar essa análise, apresenta-se na tabela seguinte, o resumo dos requisitos de projeto e o tópico do texto onde são avaliados.

	Requisito de Projeto	Resultado da simulação / desenvolvimento	Tópico do texto	Figura
1	Força de fechamento máx: 1,5N	Menor que 0,2 N	4.6.1.2	4-43
2	Folga retrocesso máx: 0,5mm	Menor que 0,5mm	4.6.1.3	4-44
3	Seccionar bobina	ok	4.3.1	4-11
4	Pulso de desarme 30 ms (p/ 176V RMS)	Menor que 20 ms	4.6.1.4	4-40
5	Dimensões (L x H x P) máx: 45 x 32 x 60 mm	ok	4.4.1	4-30
6	Número de peças máximo: 24	ok	4.4.1	4-30
7	Consumo máx: 200W (8A) (p/ 242V RMS)	Menor que 135W (1A)	4.3.3.4	4-29

Quadro 5-1: Requisitos de projeto atendidos no decorrer do texto.

5.2 PATENTES

No capítulo 3 apresentou-se a decisão de empregar uma estrutura funcional (uma concepção) similar à do produto da Siemens,

caracterizando a solução final como um projeto de engenharia reversa. Nesse contexto, antes mesmo de tomar essa decisão, realizou-se previamente uma pesquisa de patentes onde se verificou que o produto da Siemens é patenteado (US Patent n. 5,379,015, Jan, 3, 1995).

Nos sites do *Europe's Network of Patent Database* (onde foi depositada a patente original) e do *United States Patent and Trademark Office*, identificou-se que a patente do produto da Siemens está na verdade registrada como um modelo de utilidade. De acordo com o site do *World Intellectual Property Organization*, um modelo de utilidade é um direito de propriedade intelectual muito similar ao da patente, porém com vigência de no máximo 15 anos contados a partir da data do depósito.

Como a patente da Siemens é de 1995, não há nenhum tipo de restrição ao emprego das soluções técnicas deste produto desde o ano de 2010.

5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Validação da simulação do modelo do MRM

No capítulo 4, foram apresentadas as validações dos resultados das simulações do contator e da força magnética do atuador. Entretanto, não houve nenhuma validação para a simulação do modelo do mecanismo do MRM.

Com a continuidade do desenvolvimento, essa etapa será realizada, através da fabricação de um protótipo do produto em desenvolvimento. A maior parte das peças plásticas e até mesmo algumas peças metálicas, podem ser obtidas através da tecnologia de prototipagem rápida que, em conjunto com o atuador magnético que é um produto já existente, irão compor o MRM protótipo.

Esse protótipo do MRM, quando testado em conjunto com o contator, permitirá avaliar através de medições, o atendimento dos requisitos listados no capítulo 3, além de uma série de outros que não foram citados no presente trabalho. Será possível identificar possibilidades de melhoria que implicarão em mais etapas de simulação.

Essa sequência de trabalho composta pelas simulações, testes de validação, novas alterações e simulações, etc., é intrínseca do processo de desenvolvimento de produtos e quando estruturada corretamente, tende a reduzir muito a possibilidade de falhas no produto final.

MRM para diferentes tamanhos de contator

O presente trabalho tratou da modelagem e simulação do mecanismo do MRM acoplado a um único tamanho de contator, a saber, o menor contator da linha, que se acredita seja o mais desfavorável como já se justificou no texto, entretanto há o desejo de que o mesmo possa posteriormente, ser empregado em contadores de tamanhos maiores. Essa avaliação também deve ser realizada na sequência desse trabalho o que levará a mais etapas de simulação.

Verificações adicionais que podem ser feitas na simulação

Pode-se listar uma série de verificações adicionais que podem ser feitas a partir da simulação e que contribuem para o nível de entendimento do produto em desenvolvimento. A seguir, estão listadas algumas verificações adicionais de maior relevância:

- Verificação da redução da compressão da mola de contato do contator (e conseqüentemente, da redução da pressão dos contatos) devido à folga de retrocesso simulada no tópico 4.6.1.3. Verificação do aquecimento adicional causado nos contatos e avaliação dos limites aceitáveis;
- Verificação da largura de pulso de desarme (força magnética) mínima do atuador;
- Verificação do comportamento do MRM simulado supondo que este seja acoplado a um contator montado num ambiente onde haja impacto e/ou vibração;
- Verificação do comportamento do MRM na simulação, quando posicionado com seu eixo de movimento não mais na horizontal (como foi simulado), mas posicionado de forma que este eixo fique na vertical ou oblíquo, representando situações possíveis de uma aplicação real.

6 CONCLUSÕES

Nos trabalhos convencionais de engenharia, no dia-a-dia das empresas, comumente a objetividade e urgência norteiam as ações, fazendo com que muitas vezes, durante a etapa de desenvolvimento de produtos, as análises sejam realizadas de maneira superficial. Tendo isso em mente, afirma-se que a realização do presente trabalho em nível de mestrado trouxe diversas contribuições, dado o cumprimento de etapas que não ocorrem rotineiramente. Destacam-se principalmente as seguintes contribuições:

- O fato de se formular textualmente o problema de projeto e elaborar uma especificação nos padrões apresentados amplia o nível de entendimento sobre o mesmo, já que o problema é abordado nos aspectos funcional, quantitativo e qualitativo. Além disso, dessa forma é possível transferir mais facilmente o conhecimento do projeto a outros;
- O fato de se fazer uma revisão bibliográfica dos assuntos relacionados ao problema de projeto força o projetista a ampliar o nível de conhecimento dos fenômenos físicos envolvidos e conseqüentemente o discernimento na etapa de modelagem, a possibilidade de geração de idéias e também a capacidade de interpretação dos resultados. Além disso, a revisão bibliográfica formaliza (citando referências) um assunto de interesse comum para toda a equipe de desenvolvimento;
- O fato de se justificar as ações tomadas e embasá-las cientificamente sempre que possível, também amplia significativamente o nível de entendimento do problema de projeto;
- Algumas das ferramentas empregadas, principalmente as relativas à parte de projeto informacional, foram prontamente absorvidas às práticas correntes de desenvolvimento. Atualmente a empresa elabora as especificações de projeto baseadas em decisões conjuntas de um grupo de apoio, que também acompanha as demais fases do processo de desenvolvimento do produto.

Por outro lado, conciliar um desenvolvimento da empresa com o trabalho de mestrado também trouxe alguns conflitos, pois há o desejo de se embasar as decisões tomadas no decorrer do texto, mas deseja-se evitar detalhamentos desnecessários (como aspectos construtivos e funcionais dos produtos) que poderiam fazer o leitor desviar-se do foco principal do trabalho.

Da mesma forma, cita-se como um conflito, o fato de nas indústrias se empregar uma terminologia com muitos jargões, não aceitos em textos científicos. Entretanto, a dissertação está voltada não apenas para os leitores dos meios acadêmicos, mas também para os da indústria, habituados a tais jargões.

Além disso, há também o desejo conflitante de se apresentar de maneira clara as etapas realizadas e resultados obtidos e ainda assim proteger as informações consideradas estratégicas e não expor desnecessariamente a avaliação feita com o produto dos concorrentes. Acredita-se que esse conflito foi razoavelmente solucionado apresentando-se no texto apenas resumos do *Benchmarking*, do QFD e da Especificação de Projeto, de forma a abordar nesses três resumos, os tópicos mais relacionados à simulação, foco do trabalho.

6.1 CONCLUSÕES SOBRE A MODELAGEM E SIMULAÇÃO

Tão importante quanto analisar os resultados de uma simulação é conhecer quais hipóteses foram usadas durante a modelagem. Além disso, com o propósito de reduzir o grau de incerteza da simulação, os modelos devem ser validados. A validação significa determinar o grau de correspondência entre o original e o modelo em relação aos objetivos pretendidos com a aplicação.

Modelagem e simulação do contator

Durante a etapa de modelagem do contator, a parte mais complexa, que seria implementar no modelo o sistema composto pelas quatro equações de movimento (2.9 a 2.12) apresentadas no tópico 2.2.3.3 da revisão bibliográfica não foi realizada, sendo essa análise substituída por resultados de medição da força magnética média durante a operação do contator. Essa curva de força magnética foi representada por um polinômio de segundo grau aplicado ao modelo na forma de um vetor-força.

Além disso, não houve uma modelagem do fenômeno da colisão dos contatos e dos núcleos do contator durante a operação. Os valores de coeficiente elástico das peças foram escolhidos arbitrariamente de forma que na simulação, os resultados de tempo de operação e duração do ricochete convergissem para valores obtidos em medições realizadas num produto real.

Dadas estas duas ações, o modelo desenvolvido para o contator pode ser considerado praticamente “didático” em virtude de tamanhas simplificações. O ponto positivo disso é que, apesar das simplificações significativas, os efeitos predominantes do contator no MRM foram corretamente representados e as pequenas discrepâncias são aceitáveis, dada a grande simplicidade e rapidez obtida nessa etapa da modelagem.

Finalmente, o modelo desenvolvido para o contator incorpora valores de forças de molas, geometria, dimensões e material das peças, e como foi apresentado acima, resultados de medições de força magnética e de tempo de fechamento e de ricochete de contatos de um produto existente. Dessa forma conclui-se que este modelo pode ser considerado validado por já ser definido com base em resultados de medições de um produto existente.

Modelagem e simulação do atuador magnético

Na etapa de validação realizaram-se medições de força do atuador, mas os valores obtidos apresentaram muita variação de forma que se empregou o valor médio das medidas de várias amostras para se obter uma curva experimental condizente com o resultado da simulação. Além das deficiências dessa parte experimental, nessa validação comparou-se um fenômeno dinâmico e transiente (o resultado da simulação) com um resultado estático (o resultado da medição). Conclui-se que esse procedimento não é o ideal, mas não se vislumbrou na ocasião nenhum outro procedimento alternativo de se realizar essa validação.

Para complementar, na etapa de simulação da PCI do atuador, poderia ter sido feita uma validação dos resultados obtidos através de medições de tensão e corrente na mesma, monitorando estas grandezas através de um osciloscópio.

Apesar disso, conclusões ainda mais relevantes sobre o comportamento do atuador magnético simulado pode ser feitas a partir dos resultados da simulação do mecanismo do MRM, onde a força do atuador é empregada na etapa de desarme, como apresentado a seguir.

Modelagem e simulação do mecanismo do MRM

Como apresentado no capítulo anterior, no item “sugestões para trabalhos futuros”, deve-se produzir um protótipo do mecanismo desenvolvido e simulado, a fim de se realizar a validação do mesmo.

A simulação do mecanismo do MRM foi realizada conjuntamente com modelo do contator e também com o resultado da simulação do atuador magnético e dessa forma, permite tirar conclusões sobre os resultados das três simulações realizadas.

Por exemplo, conclui-se que o leiaute funcional do mecanismo desenvolvido, acoplado ao contator de menor tamanho da linha, desarma adequadamente empregando a curva de força simulada para o atuador existente. Isso permite concluir que os objetivos iniciais do trabalho (modelar e simular um MRM que atenda os requisitos elencados), foram atingidos satisfatoriamente.

Entretanto, observa-se que existem outros dois tamanhos maiores de contatores na linha em desenvolvimento e estes possuem maiores forças de molas, que são um fator de grande influência no comportamento do MRM durante a etapa de desarme. O emprego do MRM desenvolvido (com o atuador existente) pode tornar-se inviável, pois foi identificado na simulação que a curva característica de força do atuador apresenta um valor reduzido (de aproximadamente 0,3N) quando o êmbolo está num dos extremos do seu curso, na posição fechado, que é a posição que o mesmo ocupa durante o desarme.

Finalmente, conclui-se que a simulação não possibilita prever o comportamento do MRM quando acoplado aos outros dois tamanhos maiores de contatores.

Dada essa possível limitação técnica, pode-se posteriormente avaliar um leiaute funcional novo, que funcione para tamanhos maiores de contatores empregando esse mesmo atuador ou ainda, se isso não for possível, avaliar a possibilidade de se desenvolver um novo atuador magnético.

É importante ressaltar que as conclusões com base em simulações partem da perspectiva de que a similaridade entre o original e o modelo inclui os efeitos e os fenômenos de interesse. Mesmo com resultados de simulação satisfatórios, o produto poderá ter em si um comportamento ligeiramente diferente do encontrado no modelo. Dessa forma, o êxito da simulação será realmente demonstrado posteriormente, através da comparação dos testes finais do produto com os resultados advindos da simulação anterior no modelo.

6.2 IDENTIFICAÇÃO DE POSSIBILIDADES DE APERFEIÇOAMENTO

Durante a etapa de simulação dos leiautes preliminares do mecanismo do MRM, na qual se propôs mudanças de parâmetros na proposta inicial até se chegar ao leiaute funcional, houve um processo iterativo, aplicando fundamentos teóricos embasados nos resultados da simulação, e identifica-se assim que o relativo sucesso obtido tem uma parcela fortemente dependente da “tentativa e erro”.

Ressalta-se que o mecanismo apresentado é relativamente simples quanto ao número de peças, complexidade e interação entre elas, sendo que para mecanismos mais complexos, sem o emprego de uma sistemática específica, o número de retrabalhos para atingir um leiaute funcional tende a aumentar consideravelmente, podendo possivelmente nem mesmo ser encontrado um leiaute funcional.

Observa-se que, de certa forma, o projetista acaba aplicando empiricamente uma sistemática de geração, avaliação e seleção de leiautes, que apesar dos resultados positivos, como ocorre no presente trabalho, tem a deficiência de não documentar detalhadamente as decisões tomadas.

Esse registro das decisões é extremamente importante, principalmente quando o desenvolvimento do produto é feito não por apenas um, mas por uma equipe de projetistas. É igualmente importante também quando o projeto, mesmo que desenvolvido por um único projetista, será posteriormente atualizado, modificado ou servirá de referência em desenvolvimentos similares, por outros membros da equipe de desenvolvimento.

Conclui-se que, da mesma forma como se empregaram metodologias de projeto que contribuíram durante as fases iniciais do processo de desenvolvimento do produto, devem-se buscar maneiras mais formais e sistemáticas, que contribuam nas situações de geração de leiautes alternativos. Não se espera encontrar em tais métodos uma solução “milagrosa” e que dispense quaisquer outros recursos, afinal acredita-se que a experiência prática, intuição e criatividade do projetista sempre terão papel fundamental no resultado final do projeto. Espera-se, no entanto, que tais métodos sistemáticos quando aplicados também na fase de projeto preliminar, contribuam no processo auxiliando a documentação das decisões, reduzindo custos e tempo de desenvolvimento e aumentando a confiabilidade dos produtos lançados.

Finalmente, devem-se buscar práticas formais e sistemáticas para todas as fases do processo de desenvolvimento de produtos.

REFERÊNCIAS

- ABB. **ABB Magnetically Latched Contactors**. 2006. Disponível em: <http://www.abb-newsletters.com/printables/0606_AM110_and_AM185.pdf>. Acesso: Fevereiro, 2010.
- ALBUQUERQUE, A. B. **Projeto e simulação de contatores CA**. UFSC - Florianópolis, 1998. 99 f. Dissertação (Mestrado)
- BACK, N. et al. **Projeto Integrado de Produtos: Planejamento, Concepção e Modelagem**. Barueri, SP: Manole, 2008.
- BAXTER, M. R. **Product Design**. London: Chapman & Hall, 1995.
- BRAUER, J. R. **Magnetic Actuators and Sensors** – Wiley-IEEE Press, 2006.
- COLLINS, E. R.; BRIDGWOOD, M. A. **The Impact of Power System Disturbances on AC-Coil Contactors**. Department of Electrical and Computer Engineering, Clemson University. USA, 1997.
- GE POWER CONTROLS IBÉRICA S.A., Barcelona, Espanha. Gimenez, Miguel Ortiz. **Dispositivo Mecánico Selector y de Retención de un Contactor para mantener su posición de cierre**. ES Patent n. 2,109,860 A1, Dez, 15, 1994.
- GENT, A. N. **Engineering with Rubber** – How to Design Rubber Components – 2nd ed. Munich: Hanser, 2001.
- KALLENBACH, E.; EICK, R.; QUENDT, P. **Elektromagnete: Grundlagen, Berechnung, Konstruktion** – Stuttgart: Teubner, 1994.
- KOLTERMANN, P. I. B.; ASSUMPCÃO, J. P. **Uma modelagem para análise dinâmica de contatores CC e CA**. UFSC - Florianópolis, 1990. 136f. Dissertação (Mestrado)
- KUSSY, F. W; WARREN, J. L. **Design Fundamentals for Low-Voltage Distribution and Control**. New York: Marcel Dekker, 1987.

MIGUEL, P. A. C.; **Desdobramento da Qualidade no Desenvolvimento de Filmes Flexíveis para Embalagens** - Faculdade de Engenharia Mecânica e de Produção, UNIMEP. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 13, nº 2, p. 87-94, 2003.

NAU, S. L.; KONDLATSCH, A. L. **Marcha de Cálculo e Análise de Contatores CA**. 1991, 121p. Trabalho de Tecnologia WEG – WEG, Jaraguá do Sul, 1991.

PAHL, G.; BEITZ, W. **Engineering Design: A Systematic Approach**. 2.ed. London, Springer Verlag, 1996.

ROMANO, L. N. **Modelo de Referência para o Processo de Desenvolvimento de Máquinas Agrícolas**. Florianópolis, 2003, 266p. Tese (doutorado). PPGEM - UFSC.

ROTTERS, H. C. **Electromagnetic Devices**. New York: John Wiley & Sons, 1970. 11th printing.

RUIZ, J. R. R. R.; ESPINOSA, A.G. **A Novel Parametric Model for AC Contactors**. EUEII, Electr. Eng. Dept., Univ. Politec. de Catalunya, Igualada - Espanha, 2008.

SCHRACK. **Relay Know-How**. General Information on Power Relays and Application Hints. 2007. p. 1-10. Disponível em: <http://relays.tycoelectronics.com/schrack/techn/relbook.asp>. Acesso: Março, 2011.

SHEARER, J. L.; MURPHY, A. T.; RICHARDSON, H. H. **Introduction to System Dynamics**. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing, 1967.

SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT, Munich, Germany. Johann Lehmeier, Lauterhofen et al. **Latching Block for Electromagnetic Switching Devices**. US Patent n. 5,379,015, Jan, 3, 1995.

SIEMENS S.A. **Switching, Protection and Distribution in Low-Voltage Networks**. Handbook with selection criteria and planning guidelines for switchgear, switchboard and distribution systems. 2. ed. Munich (Germany): Publicis, 1994. 659p.

STUART JÚNIOR, R. **Dispositivo de Proteção Contra Sobrecargas para Motores Trifásicos Operando em Regime Contínuo**. UFSC - Florianópolis, 2005. 159 f. Dissertação (Mestrado)

WADA, M.; YOSHIMOTO, H.; KITAIDE, Y. **Dynamic Analysis and Simulation of Electromagnetic Contactors with AC Solenoids**. Fuji Electric Corporate Research and Development, Ltd. Japan: IEEE, 2002.

WEG AUTOMAÇÃO S.A. **Benchmarking: MRM (Módulo de Retenção Mecânica para Contatores)**. Jaraguá do Sul, 2010.

WEG AUTOMAÇÃO S.A. **Especificação de Projeto: Acessório MRM**. Jaraguá do Sul, 2010.

WEG AUTOMAÇÃO S.A. **QFD - Relatório da Aplicação do Método QFD para o Acessório MRM**. Jaraguá do Sul, 2010.

Sites da internet:

ANSYS - ANSOFT MAXWELL

<http://www.ansoft.com/products/em/maxwell/>

Acesso: 28/02/2011

DESIGN SIMULATION TECHNOLOGIES – Working Models 2D

<http://www.design-simulation.com/wm2d/> Acesso: 28/02/2011

EUROPE'S NETWORK OF PATENT DATABASE

<http://www.espacenet.com/>. Acesso: 28/02/2011.

SOLIDWORKS CORP.

<http://www.solidworks.com/sw/products/cad-software-3d-design.htm>

Acesso: 28/02/2011

UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

<http://portal.uspto.gov/external/portal/home>. Acesso 28/02/2011.

WORLD INTELLECTUAL PROPERTY ORGANIZATION

<http://www.wipo.int/portal/index.html.en>. Acesso: 28/02/2011.

ANEXOS

ANEXO A: Ferramentas computacionais empregadas

1. Software CAD para desenho 3D

Empregou-se o CAD 3D: **SolidWorks Premium 2009** da SolidWorks Corp.

<http://www.solidworks.com/sw/products/cad-software-3d-design.htm>

O SolidWorks é uma ferramenta CAD 3D. É um sistema computacional para facilitar o projeto e desenho técnico. Este sistema fornece uma série de ferramentas para construção de entidades geométricas planas (como linhas, curvas, polígonos) ou mesmo objetos tridimensionais (cubos, esferas, etc.).

Softwares CAD mais comuns:

SolidWorks, AutoCAD, SolidEdge, Catia, Unigraphics NX, Pro-Engineer, Inventor e o Microstation, além de softwares específicos para mecânica, móveis, engenharia elétrica, etc. Pode-se ainda citar o Rhinoceros e o Autodesk 3D Studio, para modelagens tridimensionais, bastante difundidos entre os designers brasileiros.

2. Software CAE para análise eletromagnética

Empregou-se o CAE 2D/3D: **Maxwell 13** da Ansoft - Empresa do grupo Ansys.

<http://www.ansoft.com/products/em/maxwell/>

<http://www.ansys.com/>

O Maxwell é um software específico para simulação eletromagnética. Voltado para projeto e análise 3D e 2D de dispositivos eletromagnéticos e eletromecânicos como motores, atuadores, transformadores, sensores e bobinas. O Maxwell emprega o método de elementos finitos (FEM) para resolver campos elétricos e eletromagnéticos estáticos, variantes no tempo ou no domínio da frequência.

O Maxwell tem um processo automatizado de solução onde os usuários precisam especificar somente a geometria, as propriedades do material e a saída desejada. A partir disso, ele irá gerar uma malha adequada para resolver o problema com a precisão solicitada. Esse processo de malha adaptativa elimina a complexidade no processo de análise e beneficia os engenheiros com uma ferramenta de projeto simples e eficiente.

Outra grande vantagem do Maxwell é sua capacidade de gerar modelos que podem ser usados no ANSYS, um software de simulação multi-domínios. Essa funcionalidade permite ao usuário simular sistemas eletromecânicos, mecatrônicos ou de eletrônica de potência combinando circuitos complexos com componentes modelados no Maxwell.

Sobre o ANSYS: ANSYS é um software de simulação CAE desenvolvido pela ANSYS, Inc. empresa americana fundada em 1970, originalmente chamada Swanson Analysis Systems, Inc.

A ANSYS, Inc. vem adquirindo diversas companhias desde 2000, incluindo, ICFE CFD Engineering, CADOE, CFX, Century Dynamics, Harvard Thermal, Fluent Inc. (2006) e recentemente a Ansoft Corporation em 2008.

3. Software CAE para análise cinemática e dinâmica

Empregou-se o CAE 2D: **Working Model 2D 2005 ver. 8** da Design Simulation Technologies, Inc.

<http://www.design-simulation.com/wm2d/>

O Working Model é uma ferramenta CAE que aplica as leis físicas na simulação e análise cinemática e dinâmica de movimento de sistemas mecânicos virtuais. O Working Model simula automaticamente as interações entre as formas geométricas complexas do modelo detectando colisões e respondendo a elas. Por exemplo, simula os diferentes tipos de colisões que ocorrem em cames, engrenagens, rolamentos, etc.

Principais funcionalidades do Working Model, muitas delas empregadas no presente trabalho:

- Permite analisar o modelo através de medição de força, torque, aceleração, etc.;
- Os resultados podem ser expressos como vetores, gráficos ou valores absolutos, nas unidades desejadas;
- Permite importar a geometria dos modelos através de desenhos CAD 2D no formato DXF
- Permite especificar as propriedades de massa, velocidade inicial, carga eletrostática, etc. dos corpos desenhados ou importados.
- Permite acoplar os diversos corpos através de pinos, guias, molas, amortecedores, etc.;
- Permite inserir valores através de equações.
- Simula eventos não lineares;
- Simula contato entre corpos, colisões e atrito;
- Analisa estruturas compostas por barras flexíveis e momentos cisalhantes ou de torção.

ANEXO B: A matriz da casa da qualidade realizada

Requisitos de Projeto Requisitos de clientes		Folga retrocesso máx: 0,5mm.	LxAxP máx: 45 x 32 x 60 mm	Máx 24 peças	Seccionar bobina	Consumo máx: 200W (8A)	Pulso de 30 ms (p/ 0,8xUc)	Força fecham. máx: 1,5 N
		Peso relativo (%)	Grau importânc.	Fator de venda	Peso absoluto			
Não causar redução da performance do contator		9						3
Baixo custo				3				
Não queimar bobina com sinal de desarme					9			
Permitir simultaneamente emprego do acessório			1					9
Não causar intermitência do contator								3
Desligar com pulso de tensão							9	
Desligar com tensão CA/CC (Ex. 24-28V CA/CC)					3			
Baixo investimento em ferramental				3				
Não causar aumento excessivo do volume no			9					
Possibilidade de comando por CLP						9		
Peso absoluto do requisito de projeto - RP		137	56	61	110	44	32	186
Peso absoluto relativo do requisito de projeto - RP (%)		20,0%	8,2%	8,9%	16,0%	6,4%	13,3%	27,1%
Priorização dos requisitos de projeto		2	5	6	3	7	4	1
Análise de mercado	A	1,0	44x32x73	24	não	-	50	0
	B	0,4	45x51x60	29	sim	40	-	ok
	C	0,3	23x48x94	24	não	40	31	ok
	D	0,65	45x40x30	21	não	70	10	ok
	E	0,3	45x51x60	19	não	30	-	ok
	Atual	0,9	44x47x58	47	sim	130	10	ok
Qualidade projetada		0,5	45x32x60	24	sim	100	30	1,5
Unidade		mm	mm	pç	-	W	ms	N

Peso relativo (%)	Grau importânc.	Fator de venda	Peso absoluto
15,3%	5	1,5	7,5
12,2%	4	1,5	6
12,2%	5	1,2	6
12,2%	5	1,2	6
10,2%	5	1	5
10,2%	5	1	5
9,8%	4	1,2	4,8
8,1%	4	1	4
4,9%	2	1,2	2,4
4,9%	2	1,2	2,4
100%			49,7

LEGENDA**Grau de importância:**

- 5 - Muito importante
- 4 - Importante
- 3 - Alguma importância
- 2 - Pouco importante
- 1 - Não tem importância

Fator de venda:

- 1,5 - É forte argumento de venda
- 1,2 - É argumento de venda
- 1,0 - Não é argumento de venda

Relação requisito de cliente x projeto

- 9 - Forte
- 3 - Média
- 1 - Fraca
- 0 - Não há relação

Quadro A-1: A matriz da casa da qualidade realizada.

Fonte: Weg Automação S.A. QFD (2010)