

**ITAMAR FERNANDES SOARES**

**DESENVOLVIMENTO DE UM CONTROLE  
ELETRÔNICO DE TENSÃO PARA CONTADORES  
ELETROMAGNÉTICOS**

FLORIANÓPOLIS  
2007

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM CONTROLE  
ELETRÔNICO DE TENSÃO PARA CONTADORES  
ELETROMAGNÉTICOS**

Dissertação submetida à  
Universidade Federal de Santa Catarina  
como parte dos requisitos para a  
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

**ITAMAR FERNANDES SOARES**

Florianópolis, março de 2007.

# **DESENVOLVIMENTO DE UM CONTROLE ELETRÔNICO DE TENSÃO PARA CONTADORES ELETROMAGNÉTICOS**

Itamar Fernandes Soares

‘Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Eletromagnetismo e Dispositivos Eletromagnéticos, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina’

---

Nelson Jhoe Batistela, Dr.  
Orientador

---

Mauricio Valencia Ferreira da Luz, Dr.  
Co-orientador

---

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

---

Nelson Jhoe Batistela, Dr.  
Presidente

---

Mauricio Valencia Ferreira da Luz, Dr.

---

Jaqueline Gisele Rolim, Dra.

---

Walter Pereira Carpes Junior, Dr.

---

Orlando José Antunes, Dr.

---

Alexandre José da Silva, M.Sc.

Dedico esta dissertação ao Prof. Thomas Roschke, Dr. Ing.  
Pela paciência e gentileza em discutir sobre este assunto em que tem vasto conhecimento  
Ao Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.  
Pela orientação, discussões e sugestões durante a realização desta Dissertação  
Ao Prof. Mauricio Valencia Ferreira da Luz, Dr.  
Pelas valiosas contribuições no trabalho.

Gostaria de expressar minha gratidão a DEUS,  
pela dádiva com a sua criatura  
e a seu filho JESUS, por nos ter dado vida novamente  
E a minha Esposa Adriana, pelo seu amor  
Ao meu filho Matheus que um dia vai entender  
porque o papai não podia “montar nossos castelos” com ele  
a WEG pela oportunidade.

Resumo da Dissertação apresentado à UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

## **DESENVOLVIMENTO DE UM CONTROLE ELETRÔNICO DE TENSÃO PARA CONTADORES ELETROMAGNÉTICOS**

**Itamar Fernandes Soares**

03/2007

Orientador: Nelson Jhoe Batistela, Dr.

Co-orientador: Mauricio Valencia Ferreira da Luz, Dr.

Área de Concentração: Eletromagnetismo e Dispositivos Eletromagnéticos.

Palavras Chave: contator eletromagnético, simulação simultânea, controle eletrônico, controle em um ciclo, controle de tensão, controle não linear.

Numero de Páginas: 120.

**RESUMO:** O presente trabalho aborda o desenvolvimento, a simulação e a validação de um controle eletrônico de tensão para contadores eletromagnéticos em fabricação para melhorar o desempenho em uma faixa ampla de tensão de alimentação em tensão contínua ou alternada. O trabalho abrange a tecnologia atual dos contadores e a descrição sucinta dos parâmetros que influenciam na dinâmica de fechamento dos contatos e na vida útil. A modelagem matemática é utilizada para evidenciar as não linearidades envolvidas no processo de fechamento do contator. Uma metodologia para controle do fechamento é desenvolvida através da simulação simultânea de um modelo de contator eletromagnético utilizando elementos duais em PSpice junto com a eletrônica para o controle de tensão. O controle de tensão é baseado na teoria de que se mantendo a tensão aplicada na bobina constante, suas características dinâmicas não se alteram. O contator eletromagnético sem controle de tensão não atende às características de desempenho desejadas para uma faixa de tensão ampla. Com a aplicação da metodologia de controle não linear, conhecido como controle em um ciclo, conseguiu-se manter a tensão equivalente na bobina do contator independente da variação da tensão de alimentação. Os resultados obtidos nas simulações foram validados através de ensaios práticos.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for degree of Master in Electrical Engineering.

## **DEVELOPMENT OF AN ELECTRONIC VOLTAGE CONTROL FOR ELECTROMAGNETIC CONTACTORS**

**Itamar Fernandes Soares**

03/2007

Advisor: Nelson Jhoe Batistela, Dr.

Co-advisor: Mauricio Valencia Ferreira da Luz, Dr.

Area of Concentration: Electromagnetism and Electromagnetic devices.

Keywords: electromagnetic contactor, mixed simulation, electronic control, one cycle control, voltage control, non-linear control.

Number of Pages: 120.

**ABSTRACT:** This work deals with the development, simulation, and validation of an electronic voltage control for manufactured electromagnetic contactors, in order to obtain a performance improvement on an extended voltage range both for direct and alternated voltage. This work covers the technology of actual contactor and the succinct description of the parameters that influence on the dynamic behaviors and on the contactor's lifespan. Mathematical modeling is used to show the non-linearity on the closing process. Methodology for the closing control is developed through mixed simulation of a PSpice model for electromagnetic contactor using dual elements together with electronics. The voltage control is based on the theory that the voltage fed to coil is constant; all dynamic characteristics will be too. Without voltage control, the electromagnetic contactor do not fill the desired performance on an extended voltage range. Applying the non-linear control methodology, called as one cycle control, the equivalent voltage applied to the coil contactor is independent of the voltage variation from the input. The validity of the proposed methodology is confirmed by experiment.

## Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Tecnologia dos Contatores Eletromagnéticos .....</b>	<b>17</b>
2.1	<b>Considerações gerais sobre contatores eletromagnéticos.....</b>	<b>17</b>
2.1.1	Descrição dos componentes principais de um contator eletromagnético.....	19
2.1.1.1	Contatos principais e auxiliares .....	20
2.1.1.2	Contatos auxiliares.....	21
2.1.1.3	Núcleo fixo e móvel.....	21
2.1.1.4	Bobina.....	22
2.1.1.5	Sistema de molas .....	23
2.1.1.5.1	Mola de abertura.....	23
2.1.1.5.2	Molas de contato .....	23
2.1.2	Forças mecânicas estáticas no processo de fechamento .....	24
2.1.3	Forças eletromagnéticas no processo de fechamento .....	26
2.1.4	Considerações.....	28
<b>3</b>	<b>Modelagem Matemática do Contator Eletromagnético .....</b>	<b>29</b>
3.1	<b>Introdução .....</b>	<b>29</b>
3.1.1	Modelo matemático do sistema eletromagnético.....	29
3.1.2	Modelo matemático do sistema mecânico .....	32
<b>4</b>	<b>Simulação Simultânea do Contator Eletromagnético com Eletrônica em PSpice.....</b>	<b>35</b>
4.1	<b>Introdução .....</b>	<b>35</b>
4.2	<b>Modelo em PSpice.....</b>	<b>37</b>
4.2.1	Modelo do contator eletromagnético em PSpice .....	37
4.2.2	Funções e equações diferenciais no PSpice .....	38
4.2.3	Descrição matemática .....	38
4.3	<b>Simulação do contator eletromagnético em tensão contínua .....</b>	<b>40</b>
4.3.1	Resultados.....	41
4.4	<b>Simulação do contator eletromagnético em tensão alternada .....</b>	<b>45</b>
4.4.1	Resultados.....	46
4.5	<b>O controle em um ciclo.....</b>	<b>51</b>
4.5.1	Introdução.....	51
4.5.2	Teoria geral do controle em um ciclo .....	51
4.6	<b>Simulação do contator eletromagnético em tensão contínua com controle eletrônico de tensão .....</b>	<b>55</b>
4.6.1	Resultados.....	56
4.7	<b>Simulação do contator eletromagnético em tensão alternada com controle eletrônico de tensão .....</b>	<b>61</b>
4.7.1	Simulações com tensão alternada sem filtro capacitivo.....	61
4.7.1.1	Resultados.....	62
4.7.2	Simulação em tensão alternada com filtro capacitivo.....	66
4.7.2.1	Escolha do capacitor do filtro capacitivo .....	67
4.7.2.2	Resultados.....	69
4.7.3	Simulação em tensão alternada pela aproximação do valor médio quadrático.....	75
4.7.3.1	Resultados.....	76
4.8	<b>Análise das simulações .....</b>	<b>81</b>
<b>5</b>	<b>Validação e resultados de ensaios práticos .....</b>	<b>84</b>
5.1	<b>Introdução .....</b>	<b>84</b>
5.2	<b>Projeto do circuito de controle .....</b>	<b>84</b>
5.2.1	Circuito da fonte de alimentação e da tensão de referência .....	86
5.2.2	Circuito do oscilador .....	88

5.2.3	Circuito de atenuação em tensão contínua.....	90
5.2.4	Circuito de atenuação em tensão alternada.....	92
5.2.5	Circuito de controle em um ciclo.....	94
<b>5.3</b>	<b>Ensaio com contator eletromagnético sem controle de tensão .....</b>	<b>96</b>
5.3.1	Resultados dos ensaios .....	96
<b>5.4</b>	<b>Ensaio com contator eletromagnético com controle eletrônico de tensão em corrente contínua .....</b>	<b>98</b>
5.4.1	Resultados dos ensaios em corrente contínua.....	98
<b>5.5</b>	<b>Ensaio com contator eletromagnético com controle eletrônico de tensão em corrente alternada .....</b>	<b>99</b>
5.5.1	Resultados dos ensaios em corrente alternada.....	99
<b>6</b>	<b>Conclusão .....</b>	<b>101</b>
<b>7</b>	<b>Referências .....</b>	<b>103</b>

## Índice de figuras

Figura 1 – Sistema de acionamento elétrico básico. ....	1
Figura 2 – Ciclo de razões para a erosão dos contatos em AC-3, adaptado da referência [6]. ....	6
Figura 3 – Controle eletrônico da energia de fechamento do contator eletromagnético publicado na patente US4,893,102 Westinghouse [16]. ....	10
Figura 4 – Controle biestável para controle da energia cinética no fechamento do contator [3]. ....	11
Figura 5 – Controle eletrônico patente US 5,914,850 ABB [17]. ....	12
Figura 6 – Integração do controle em um ciclo. ....	15
Figura 7 – Contator eletromagnético WEG. ....	19
Figura 8 – Vista explodida do contator eletromagnético WEG, composta por: (01) Carcaça inferior; (02) Núcleo fixo; (03) Anel de curto-circuito; (04) Bobina; (05) Mola de abertura; (06) Núcleo móvel; (07) Cabeçote dos contatos móveis; (08) Contatos principais móveis; (09) Contatos auxiliares móveis; (10) Mola de contato; (11) Contatos principais fixos; (12) Contato auxiliar fixo; (13) Parafuso; (14) Carcaça superior e (15) Tampa. ....	20
Figura 9 - Característica de esforço da conexão de um contator eletromagnético. ....	25
Figura 10 - Características de funcionamento do sistema eletromagnético do contator eletromagnético. ....	27
Figura 11 - Interligação entre os sistemas eletromagnético e mecânico. ....	29
Figura 12 – Regiões de deslocamento do núcleo móvel ....	33
Figura 13 – Modelo do contator eletromagnético [1]. ....	39
Figura 14 - Modelo em PSpice do contator WEG [1]. ....	40
Figura 15 – Diagrama de blocos do circuito para simulação e a definição das tensões. ....	41
Figura 16 – Circuito de simulação do modelo em PSpice do contator eletromagnético WEG. ....	41
Figura 17 – Simulação do contator eletromagnético com tensão contínua em 85 V. ....	42
Figura 18 - Simulação do contator eletromagnético com tensão contínua em 275 V. ....	43
Figura 19 – Corrente de pico na bobina em função da tensão de alimentação contínua. ....	44
Figura 20 – Tempo de fechamento em função da tensão de alimentação contínua. ....	44
Figura 21 – Velocidade no momento do toque dos núcleos em função da tensão de alimentação contínua. ....	45
Figura 22 – Simulação do contator eletromagnético com tensão alternada em 85 V iniciando a simulação na passagem por zero. ....	46
Figura 23 - Simulação do contator eletromagnético com tensão alternada em 275 V iniciando a simulação na passagem por zero. ....	47
Figura 24 - Simulação do contator eletromagnético com tensão alternada em 85 V iniciando a simulação no pico. ....	48
Figura 25 - Simulação do contator eletromagnético com tensão alternada em 275 V iniciando a simulação no pico. ....	48
Figura 26 – Corrente de pico na bobina em função da tensão de alimentação alternada iniciando a simulação na passagem por zero e também no pico. ....	49
Figura 27 – Tempo de fechamento em função da tensão de alimentação alternada iniciando a simulação na passagem por zero e também no pico. ....	49
Figura 28 – Velocidade no momento do fechamento dos núcleos em função da tensão de alimentação alternada iniciando a simulação na passagem por zero e também no pico. ....	50
Figura 29 – Representação gráfica da função do interruptor. ....	52
Figura 30 – Curva do tempo de condução em função da tensão de controle. ....	54
Figura 31 - Curva parametrizada do cálculo da razão cíclica em função da tensão de controle. ....	55
Figura 32 - Diagrama de blocos do circuito para simulação com controle de tensão. ....	56
Figura 33 – Circuito para simulação do controle de tensão com alimentação em tensão contínua. ....	56
Figura 34 - Simulação do contator eletromagnético com controle de tensão para 85 V em tensão contínua. ....	58

Figura 35 - Simulação do contator eletromagnético com controle de tensão para 275 V em tensão contínua.....	58
Figura 36 – Comparação das correntes de pico na bobina em função da tensão de alimentação contínua com e sem controle de tensão.....	59
Figura 37 – Comparação dos tempos de fechamento em função da tensão de alimentação contínua com e sem controle de tensão. ....	60
Figura 38 – Comparação das velocidades de fechamento no momento do toque dos núcleos em função da tensão de alimentação contínua com e sem controle de tensão.....	60
Figura 39 - Simulação do contator eletromagnético com controle de tensão para 85 V em tensão alternada com início da simulação na passagem por zero.....	63
Figura 40 - Simulação do contator eletromagnético com controle de tensão para 85 V em tensão alternada com início da simulação no pico. ....	63
Figura 41 - Simulação do contator eletromagnético com controle de tensão para 275 V em tensão alternada com início da simulação na passagem por zero.....	64
Figura 42 – Comparação das correntes de pico na bobina com controle de tensão com alimentação em tensão contínua e tensão alternada com início da simulação na passagem por zero e no pico.....	64
Figura 43 – Comparação dos tempos de fechamento com controle de tensão com alimentação em tensão contínua e tensão alternada com início da simulação na passagem por zero e no pico. ....	65
Figura 44 - Comparação das velocidades de fechamento com controle de tensão com alimentação em tensão contínua e tensão alternada com início da simulação na passagem por zero e no pico.....	65
Figura 45 – Capacitância $C_{filtro}$ necessária para manter uma tensão mínima $V_{C_{filtro}min}$ , com uma corrente na bobina de 5 A em tensão contínua. ....	67
Figura 46 – Variação do tempo de fechamento em função do valor da capacitância $C_{filtro}$ . ....	68
Figura 47 - Variação da velocidade de toque dos núcleos no fechamento em função do valor da capacitância $C_{filtro}$ .....	69
Figura 48 - Circuito para simulação do controle de tensão com capacitor de filtragem de 470 $\mu$ F. ....	70
Figura 49 - Simulação do contator eletromagnético com controle de tensão para 85 V em tensão alternada com início da simulação na passagem por zero e filtro capacitivo de 470 $\mu$ F. ....	71
Figura 50 - Simulação do contator eletromagnético com controle de tensão para 275 V em tensão alternada com início da simulação na passagem por zero e filtro capacitivo de 470 $\mu$ F. ....	72
Figura 51 - Comparação das correntes de pico na bobina com controle de tensão com alimentação em tensão contínua e tensão alternada com início da simulação na passagem por zero e no pico e filtro capacitivo de 470 $\mu$ F. ....	73
Figura 52 - Comparação dos tempos de fechamento com controle de tensão com alimentação em tensão contínua e tensão alternada com início da simulação na passagem por zero e no pico e filtro capacitivo de 470 $\mu$ F.....	73
Figura 53 - Comparação das velocidades de fechamento com controle de tensão com alimentação em tensão contínua e tensão alternada com início da simulação na passagem por zero e no pico e filtro capacitivo de 470 $\mu$ F. ....	74
Figura 54 – Circuito para simulação com alimentação em tensão alternada com razão cíclica controlada pelo pico da tensão retificada.....	76
Figura 55 - Simulação do contator eletromagnético com controle de tensão para 85 V em tensão alternada e razão cíclica controlada pelo pico da tensão alternada retificada com início da simulação na passagem por zero.....	77
Figura 56 - Simulação do contator eletromagnético com controle de tensão para 275 V em tensão alternada e razão cíclica controlada pelo pico da tensão alternada retificada com início da simulação na passagem por zero.....	78
Figura 57 - Simulação do contator eletromagnético com controle de tensão para 85 V em tensão alternada e razão cíclica controlada pelo pico da tensão alternada retificada com início da simulação no pico da tensão de alimentação. ....	79

Figura 58 - Comparação das correntes de pico na bobina com controle de tensão com alimentação em tensão contínua e tensão alternada com início da simulação na passagem por zero e no pico e razão cíclica controlada pelo pico da tensão retificada. ....	80
Figura 59 - Comparação dos tempos de fechamento com controle de tensão com alimentação em tensão contínua e tensão alternada com início da simulação na passagem por zero e no pico e razão cíclica controlada pelo pico da tensão retificada. ....	80
Figura 60 - Comparação das velocidades de fechamento com controle de tensão com alimentação em tensão contínua e tensão alternada com início da simulação na passagem por zero e no pico e razão cíclica controlada pelo pico da tensão retificada. ....	81
Figura 61 – Diagrama de blocos do circuito completo do controle de tensão. ....	85
Figura 62 - Circuito completo para controle de tensão do contator eletromagnético para alimentação em tensão contínua. ....	85
Figura 63 - Circuito completo para controle de tensão do contator eletromagnético para alimentação em tensão alternada.....	86
Figura 64 – Circuito da fonte de tensão e tensão de referência.....	87
Figura 65 – Circuito do oscilador.....	88
Figura 66 – Tensões limite para funcionamento do circuito oscilador. ....	89
Figura 67 – Circuito de atenuação para alimentação em tensão contínua.....	90
Figura 68 - Circuito de atenuação para alimentação em tensão alternada. ....	93
Figura 69 – Circuito de controle de um ciclo.....	94
Figura 70 – Princípio de funcionamento do controle de tensão com $V_{control}$ em 100 V em tensão contínua.....	96
Figura 71 – Tempos de fechamento em função da tensão de controle obtidos em ensaio.....	97
Figura 72 – Comparação dos valores parametrizados em relação ao maior tempo obtido para os ensaios e simulações. ....	98
Figura 73 - Tempos de fechamento em função da tensão de controle obtidos em ensaio.....	99
Figura 74 - Tempos de fechamento em função da tensão de controle obtidos em ensaio.....	100

## Índice de tabelas

Tabela 1 - Principais categorias de emprego de contatores em tensão alternada conforme IEC 60947-4-1.....	4
Tabela 2 – Soluções para diminuir o ricochete no fechamento de contatores eletromagnéticos em fabricação, adaptado da referência [1]. .....	7
Tabela 3 – Resultados de simulação do contator eletromagnético variando a tensão de alimentação. ....	42
Tabela 4 – Resultados de simulação do contator eletromagnético variando a tensão de alimentação alternada iniciando na passagem por zero.....	46
Tabela 5 – Resultados de simulação do contator eletromagnético variando a tensão de alimentação alternada iniciando no pico. ....	47
Tabela 6 - Resultados de simulação do contator eletromagnético com controle de tensão, variando a tensão de alimentação em tensão contínua. ....	57
Tabela 7 – Metas para comparação do controle de tensão. ....	57
Tabela 8 - Resultados de simulação do contator eletromagnético com controle de tensão, variando a tensão de alimentação em tensão alternada com início das simulações na passagem por zero. ....	62
Tabela 9 - Resultados de simulação do contator eletromagnético com controle de tensão, variando a tensão de alimentação em tensão alternada com início das simulações no pico.....	62
Tabela 10 - Médias dos resultados com controle de tensão para alimentação em tensão alternada. ....	66
Tabela 11 – Resumo das simulações para a escolha do capacitor de filtragem $C_{\text{filtro}}$ .....	68
Tabela 12 - Resultados de simulação do contator eletromagnético com controle de tensão, variando a tensão de alimentação em tensão alternada com início das simulações na passagem por zero e filtro capacitivo de 470 $\mu\text{F}$ .....	70
Tabela 13 - Resultados de simulação do contator eletromagnético com controle de tensão, variando a tensão de alimentação em tensão alternada com início das simulações no pico e filtro capacitivo de 470 $\mu\text{F}$ .....	71
Tabela 14 - Médias dos resultados para alimentação em tensão alternada com filtro capacitivo de 470 $\mu\text{F}$ .....	72
Tabela 15 - Resultados de simulação com razão cíclica controlada pelo pico da tensão retificada com início da simulação na passagem por zero. ....	77
Tabela 16 - Resultados de simulação com razão cíclica controlada pelo pico da tensão retificada com início da simulação no pico da tensão. ....	78
Tabela 17 - Médias dos resultados com razão cíclica controlada pelo pico da tensão alternada retificada com início da simulação na passagem por zero e no pico da tensão de alimentação. ....	79
Tabela 18 – Média dos resultados obtidos em simulação. ....	82
Tabela 19 – Tabela de combinações Latch RS.....	95
Tabela 20 - Resultados dos ensaios com do contator eletromagnético sem controle, variando a tensão de alimentação em tensão contínua. ....	96
Tabela 21 – Parametrização dos dados obtidos em simulações e ensaios para comparação.....	97
Tabela 22 - Resultados dos ensaios do contator eletromagnético com controle de tensão, variando a tensão de alimentação em tensão contínua. ....	99
Tabela 23 - Resultados dos ensaios do contator eletromagnético com controle de tensão, variando a tensão de alimentação em tensão alternada.....	100

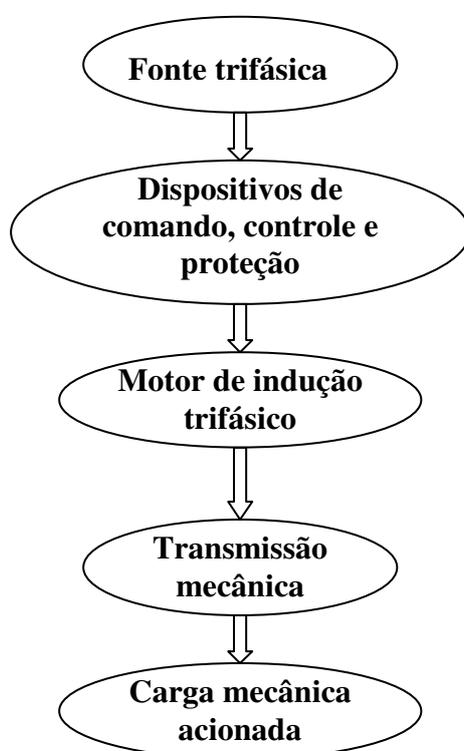
## Lista de símbolos

$t_{on}$	Tempo de condução do interruptor	$\mu\text{s}$
$t_{off}$	Tempo do interruptor desligado	$\mu\text{s}$
$V_{ref}$	Tensão de referência para controle de um ciclo	V
$V_{control}$	Tensão no barramento em tensão contínua após o retificador	V
$T_{ciclo}$	Período de oscilação do controle em um ciclo	$\mu\text{s}$
$D$	Razão cíclica	-
$V_{control}(0)$	Tensão no barramento em tensão contínua em um tempo $t_0$	V
$C_{ton}(0)$	Constante relacionando $V_{ref}$ e $V_{control}(0)$	-
$v_{control}(t)$	Tensão no barramento em tensão contínua em função do tempo	V
$F_{eletromagnética}$	Força eletromagnética gerada pela bobina	N
$F_{mecânicas}$	Forças mecânicas atuando no contator eletromagnético	N
$F_{aceleração}$	Força de aceleração das partes móveis do contator eletromagnético	N
$F_{peso}$	Força devido ao peso do sistema móvel	N
$F_{molas abertura}$	Força relativa a mola de abertura	N
$F_{contato NF}$	Força relativa a mola e massa do contato auxiliar normalmente fechado	N
$F_{contato NA}$	Força relativa a mola e massa do contato auxiliar normalmente aberto	N
$\Phi_{contator}(t)$	Fluxo magnético no núcleo magnético	
$L_{bobina}$	Indutância da bobina	H
$i_{bobina}(t)$	Corrente na bobina em função do tempo	A
$e_{bobina}(t)$	Tensão gerada pela bobina	V
$L_{bobina}(t)$	Indutância da bobina em função do tempo	H
$\frac{di_{bobina}(t)}{dt}$	Variação da corrente na bobina em função do tempo	A/s
$\frac{dL_{bobina}(t)}{dt}$	Variação da indutância da bobina em função do tempo	H/s
$x$	Entreferro	mm
$\frac{dL_{bobina}(x)}{dx}$	Variação da indutância da bobina em função do entreferro	H/mm
$L_{bobina}(x)$	Indutância da bobina em função do entreferro	H
$P_1, P_2$ e $P_3$	Coefficientes da curva ajustada do polinômio de segunda ordem	-
$v_{alimentação}(t)$	Tensão de alimentação em função do tempo	V
$\mu_0$	Permeabilidade magnética do ar	
$A$		$\text{m}^2$
$x_{inicial \text{ núcleo móvel}}$	Posição relativa ao entreferro totalmente aberto	mm
$x_{toque contatos}$	Posição relativa ao entreferro no toque dos contatos	mm
$x_{final \text{ núcleo móvel}}$	Posição relativa ao entreferro totalmente fechado	mm
$x_{contatos}$	Posição dos contatos	mm
$m_{núcleo móvel}$	Massa do núcleo móvel	kg

$m_{contato}$	Massa do contato móvel	kg
$F_{eletromagnética}(x)$	Força eletromagnética gerada pela bobina em função do tempo	N
$k_{mola\ abertura}$	Constante da mola de abertura	kg/mm
$k_{mola\ contatos}$	Constante da mola de contato	kg/mm
$d$	Coefficiente de amortecimento	
$d_{núcleo\ móvel}$	Coefficiente de amortecimento do núcleo móvel devido a fricção	
$d_{contatos\ principais}$	Coefficiente de amortecimento dos contatos principais devido ao movimento dos contatos	
$v_{núcleo\ móvel}(x)$	Velocidade do núcleo móvel	m/s
$F_{eletromagnética}(x,t)$	Força eletromagnética gerada pela bobina em função do entreferro e do tempo	N
$m_{total}$	Massa total das partes em movimento	kg
$E_c(x)$	Energia cinética das partes em movimento	J
$E_c(x_{toque\ contatos})$	Energia cinética das partes em movimento no toque dos contatos principais	J
$f_s$	Frequência de comutação	Hz
$k(t)$	Função de operação do interruptor	-
$v_{control}(t)$	Tensão no barramento em tensão contínua após o retificador em função do tempo	V
$v_{bobina}(t)$	Tensão na bobina do contator eletromagnético em função do tempo	V
$v_{ref}(t)$	Tensão de referência para controle em um ciclo	V
$d(t)$	Operador modulador	-
$C_{filtro}$	Capacitância do filtro capacitivo	$\mu$ F
$I_{bobina\ max}$	Corrente máxima na bobina durante o fechamento do contator	A
$V_{C_{filtro}\ min}$	Tensão mínima no capacitor de filtragem	V
$V_{control\ pico\ min}$	Tensão pico mínima no barramento em tensão contínua após o retificador	V
$f_{rede}$	Frequência de oscilação da tensão de alimentação	Hz

## 1 Introdução

Nas aplicações da indústria, em que seja necessária uma fonte de potência mecânica rotativa, o motor de indução trifásico tem sido a força motora mais utilizada. Para realizar esta função o motor de indução deve fazer parte de um acionamento elétrico. O acionamento elétrico é um sistema capaz de converter energia elétrica em mecânica, produzindo trabalho e mantendo o controle sobre tal processo de conversão. Um sistema de acionamento elétrico trifásico básico compreende os elementos apresentados na Figura 1.



**Figura 1** – Sistema de acionamento elétrico básico.

O subsistema referente aos dispositivos de comando, controle e proteção, o qual também pode ser chamado de chave de partida, é composto basicamente de dispositivos de comando e manobra (botão pulsante, contator eletromagnético etc.) e dispositivos de proteção (fusíveis, relês de sobrecarga, disjuntores etc.), os quais são os responsáveis pela proteção contra sobrecarga e/ou curto-circuito, respectivamente. Este tipo de combinação tem sido utilizado há várias décadas, desde que substituíram as chaves operadas manualmente.

Todos os dispositivos utilizados na montagem de uma chave de partida não sofreram grandes modificações na sua concepção básica e no modo de operação desde que surgiram. Entretanto, sempre há características que podem ser aprimoradas para melhorar o seu desempenho.

O ponto crítico nas chaves de partida, considerando-se a sua operação normal, é o contator eletromagnético. É o dispositivo mais solicitado durante a partida do motor de indução, abrindo e fechando o circuito de alimentação do motor de indução.

O principal item de manutenção no contator eletromagnético são os contatos principais. Esses contatos têm sua espessura diminuída devido ao desgaste causado, principalmente, pela ação do arco elétrico.

Para a minimização do desgaste foram desenvolvidos vários estudos das influências dos parâmetros físicos, levando também em consideração as categorias de emprego, no qual a quantidade de desgaste por operação do contato depende de vários parâmetros [7,10]:

- Corrente do circuito principal;
- Tempo de arco;
- Material de contato;
- Tamanho e formato do contato;
- Velocidade de abertura dos contatos;
- Ricochete dos contatos durante o fechamento;
- Distância entre os contatos, quando abertos;
- Movimento do arco nos contatos;
- Projeto da câmara de extinção de arco (fluxo de gases, material de isolamento usado etc.);
- Sincronização [6].

Dos parâmetros citados acima, optou-se por analisar com mais detalhes o ricochete dos contatos durante o seu fechamento e na sincronização.

Quando um contator apresenta baixo desgaste dos contatos demonstra que foram realizados estudos para a otimização do produto de forma global, levando em consideração a interação dos parâmetros envolvidos no desgaste.

A conexão entre os parâmetros é determinada principalmente por investigações experimentais, uma vez que a modelagem e simulação destes podem ser complexas, pois são envolvidos vários fenômenos físicos conectando diversos subsistemas físicos do contator eletromagnético, muitas vezes não-lineares. Por exemplo, os efeitos do arco elétrico no desgaste são devidos aos efeitos do processo de plasma (termodinâmico, fluidodinâmico e eletromagnético) no espaço limitado da câmara de extinção e principalmente, também, devido à contaminação pelos materiais evaporados na câmara de extinção, além de sua complexa composição química. Todos estes fatores por si só já dificultam a construção de modelos matemáticos, acrescentando ainda que as simulações precisam ser estocásticas.

O fenômeno da erosão dos contatos devido ao impacto do seu fechamento é também de difícil análise. Estes esforços mecânicos causados pelo acionamento eletromagnético irão afetar o material de contato em diferentes modos.

A seleção do material de contato e a otimização do movimento do arco elétrico sobre o contato são os métodos clássicos para a redução do desgaste dos contatos e, conseqüentemente, do aumento da confiabilidade do contator eletromagnético. A liga de prata-óxido de estanho ( $\text{AgSnO}_2$ ) tem sido a mais utilizada em contadores eletromagnéticos. Ela pode ser melhorada para cada caso, através de diferentes proporções dos componentes da liga, como também dos processos de manufatura. Um compromisso entre as diferentes categorias de emprego (AC1, AC2, AC3 e AC4, ver Tabela 1) deve ser encontrado para diminuir o custo do produto. As categorias de emprego de contadores são descritas na norma IEC 60947-4-1 [7], a qual determina as condições para a manobra (ligação e interrupção) da corrente.

A categoria típica de aplicação de contadores é a AC3, utilizada na partida de motores de indução. Uma especial atenção é dada a esta categoria por ser a mais utilizada. Em AC3, o desgaste ocorre principalmente durante o fechamento do contator porque, nesta condição e devido ao ricochete dos contatos, os contatos realizam vários fechamentos e aberturas em um espaço curto de tempo e submetidos à corrente de partida do motor de indução. Já a abertura do contator ocorre com a corrente próxima ao valor nominal do motor.

Para AC1 e AC4, a vida dos contatos é determinada pela operação de abertura, pois o contato está sempre manobrando à mesma corrente, tanto na abertura quanto no fechamento, com seu valor próximo do valor nominal.

Durante a operação de fechamento do contator, devido à velocidade de toque dos contatos, um arco elétrico é formado por aberturas e fechamentos momentâneos que ocorrem. Este processo dinâmico acontece até que haja a acomodação dos contatos e a transferência suficiente de energia do movimento para que não aconteça uma nova abertura. O desgaste dos contatos em AC3 é quase todo causado na operação de fechamento do contator eletromagnético, devido à alta energia do arco elétrico produzido no fechamento em comparação com a abertura do contator. Esta diferença é atribuída à distribuição temporal e espacial do arco elétrico nestas duas condições, influenciando na quantidade de material que é derretido e/ou evaporado.

**Tabela 1** - Principais categorias de emprego de contadores em tensão alternada conforme IEC 60947-4-1.

Tipo de corrente	Categoria de emprego	Aplicações típicas
CA	AC1	Manobras leves; carga ôhmica ou pouco indutiva (aquecedores, lâmpadas incandescentes e fluorescentes compensadas).
	AC2	Manobras leves; comando de motores de anéis coletores (guinchos, bombas, compressores). Desligamento em regime.
	AC3	Serviço normal de manobras de motores com rotor de gaiola (bombas, ventiladores, compressores). Desligamento em regime.
	AC4	Manobras pesadas. Acionar motores com carga plena; comando intermitente (pulsatório); reversão a plena marcha e paradas por contra-corrente (pontes rolantes, tornos etc.).

Contadores eletromagnéticos convencionais utilizam toda a força eletromagnética disponível para fechar o contator e mantê-lo fechado. A bobina e os núcleos fixo e móvel são projetados conforme a norma IEC60947-4-1 [7], devendo fechar com uma tensão de alimentação de 85% da nominal e considerando a maior temperatura de trabalho (no qual a bobina terá sua maior resistência) e devem funcionar corretamente sem a danificação do isolamento da bobina até 110% do valor nominal da tensão.

Para condições de alimentação com tensão acima de 85% haverá um aumento da força eletromagnética, causando um aumento da velocidade de toque dos contatos principais, aumentando a repulsão mecânica dos contatos. A repulsão mecânica dos contatos é conhecida na literatura como ricochete (tradução livre da palavra inglesa "bounce"). Quanto maior a tensão de alimentação, maior a velocidade e, possivelmente, o ricochete dos contatos. Assim, para aumentar a vida útil do contator eletromagnético deve-se reduzir o fenômeno do ricochete durante o fechamento. O tempo de ricochete dos contatos está na faixa de milissegundos a dezenas de milissegundos, dependendo do tamanho do contator eletromagnético, do seu projeto e do valor da tensão aplicada.

A velocidade no momento do toque dos contatos principais (um fixo e outro em movimento), os quais obedecem à lei da conservação da energia e da quantidade de movimento, dá a severidade do ricochete, que dependerá também do coeficiente de restituição (o coeficiente de restituição é a razão entre a velocidade depois do choque e a velocidade antes do choque).

Sob o ponto de vista prático, este fenômeno de ricochete no fechamento do contator ocorre no pior momento do acionamento do motor. É neste momento que a corrente de partida do motor de indução pode atingir de 6 até 8 vezes a corrente nominal. Esta corrente alta proporciona o aumento da intensidade do arco elétrico, aumentando a perda do material dos contatos, causando a erosão e a diminuição da sua vida útil. Para o propósito de análise durante o fechamento do contator, devem ser considerados os efeitos do arco no ricochete mecânico. Podem ser consideradas três fases distintas [10]:

- Evento de pré-impacto;
- Primeiro ricochete com arco;
- Os ricochetes depois do primeiro ricochete.

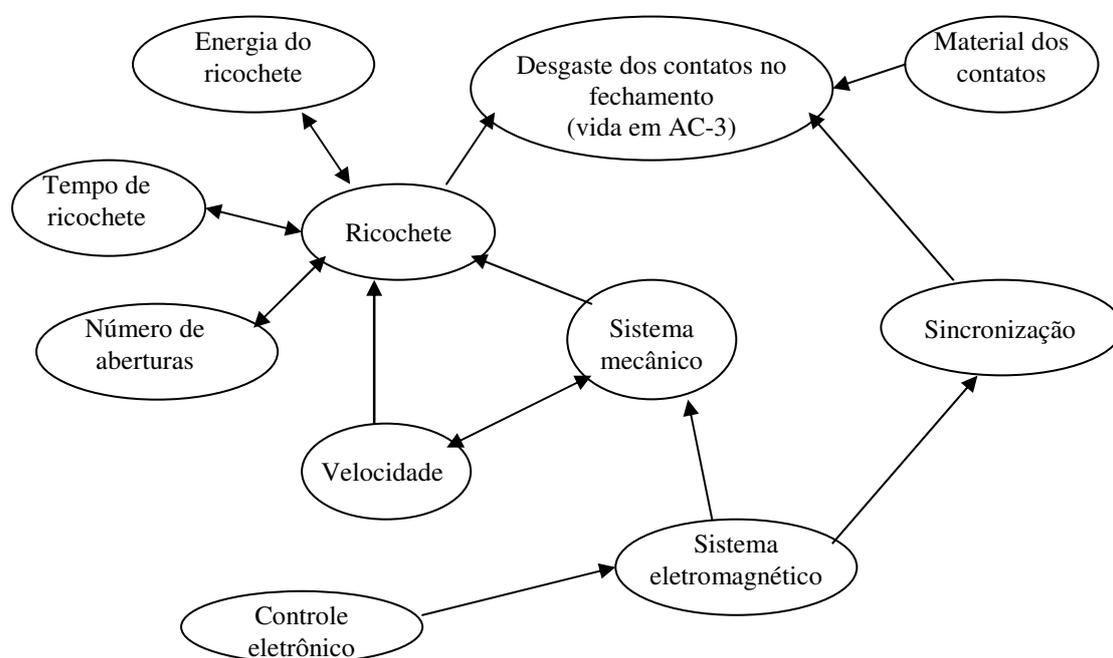
Quando os contatos abrem durante um ricochete, um arco pode ser iniciado se as condições do circuito permitirem. O arco muda as características mecânicas do ricochete, como resultado do aquecimento da superfície do contato.

Quando os contatos fecham, um arco de pré-impacto é algumas vezes formado por um tempo bastante curto, tendo uma pequena influência devido ao primeiro contato ser essencialmente mecânico. Após o primeiro impacto, os contatos começam a se separar e o primeiro ricochete ocorre. O primeiro ricochete produz um arco se as condições do circuito permitirem.

Uma comparação entre os dois casos mostra que a duração do primeiro ricochete é semelhante em ambos os casos. Após o primeiro ricochete com arco elétrico, a superfície dos contatos é aquecida. Quando os contatos são fechados para o segundo ricochete, eles irão fechar em uma superfície de metal derretido. Isto influencia significativamente o impacto mecânico e possibilita que mais energia seja absorvida pela superfície.

O resultado deste processo é que o ricochete, ocorrendo após o primeiro ricochete, terá uma duração reduzida e todo o processo é finalizado antes do que seria observado sem arco elétrico.

A Figura 2 mostra o ciclo de razões para o desgaste dos contatos, mostrando a influência da velocidade e do sistema mecânico no ricochete. Este foi adaptado da referência [6], que considerava a velocidade como uma função direta do sistema eletromagnético. Entretanto, a velocidade é função do balanço de forças do sistema eletromagnético e mecânico, isto é,  $F_{\text{eletromagnética}} \setminus F_{\text{mecânica}}$  causará o fechamento e  $F_{\text{eletromagnética}} \setminus F_{\text{mecânica}}$  causará a abertura do contator. Este trabalho tem como objetivo a redução do ricochete por meio de um controle eletrônico que atue no sistema magnético ajustado para o sistema mecânico e obter o menor tempo de ricochete.



**Figura 2** – Ciclo de razões para a erosão dos contatos em AC-3, adaptado da referência [6].

Na referência [1], várias soluções para a diminuição do ricochete foram exploradas. Nesta dissertação as soluções foram adaptadas para o caso em que o contator eletromagnético está ainda em fabricação e se pretende melhorar as características de ricochete dos contatos. A Tabela 2 apresenta várias soluções para a diminuição do ricochete dos contatos, desde soluções bastante simples, como o aumento da força dos contatos, até a utilização de estruturas adaptativas. Neste trabalho, o foco é estudar as soluções que possam ser aplicadas em um contator eletromagnético em fabricação, descartando as soluções que necessitem mudar a concepção de projeto.

Aumentar as forças das molas de contato também requer que o subsistema eletromagnético tenha uma curva de força maior que a curva das forças resistentes ao fechamento, limitando a eficiência da solução. A força acrescida no início do movimento do núcleo móvel leva a aumentar a velocidade de impacto dos contatos. Apesar da diminuição do ricochete, pode haver uma piora na vida mecânica devido à vibração e à deformação de algumas partes do contator eletromagnético.

**Tabela 2** – Soluções para diminuir o ricochete no fechamento de contatores eletromagnéticos em fabricação, adaptado da referência [1].

Direcionamento	Solução	Observações
Otimização das características mecânicas dos contator, transferência de energia e sistema de acionamento.	Aumento da força da mola de contato.	O aumento da força de contato sempre reduz o ricochete, entretanto aumenta a não linearidade do sistema de molas e potência do sistema de acionamento eletromagnético.
	Dispositivo de chaveamento em paralelo com os contatos.	O efeito do arco elétrico nos contatos durante o fechamento é minimizado, mas pode causar problemas de oxidação.
	Casamento das características mecânicas do contator.	Somente é possível otimizar com excitação constante ou com uma pequena faixa de variação da tensão aplicada à bobina.
	Estrutura mecânica com características mola-amortecedor adaptativas.	Requer a determinação das características adaptativas otimizadas $F=f(x,y)$ através de simulação inversa.
Otimização do movimento.	Controle eletrônico não-linear do movimento.	Otimiza o movimento do contato. Entretanto, devido à necessidade de ajustes em conjunto da eletrônica e contator eletromagnético não é uma solução viável economicamente.

A utilização de dispositivos de comutação (tiristores) em paralelo com os contatos é uma solução atraente, pois durante o ricochete dos contatos o interruptor irá conduzir a corrente, limitando o tempo de arco elétrico nos contatos [15]. Dois tiristores em anti-paralelo são conectados em paralelo com o contato, o qual pode conduzir a corrente com uma baixa dissipação de energia. Dependendo dos parâmetros do tiristor, da indutância de comutação, do material de contato e da corrente, o tempo de comutação e o tempo de arco para uma montagem pode ser da ordem de dezenas de microssegundos. As manobras são realizadas pelos semicondutores e o aparecimento de arco elétrico é bastante reduzido, fazendo com que a erosão e o desgaste dos contatos sejam relativamente bem menores. Em comparação com contatores eletromagnéticos convencionais, a perda de material é de 50 até 500 vezes menor.

Apesar das vantagens do baixo desgaste, a solução não é comercialmente aplicada a contatores eletromagnéticos. Entretanto, esta solução está sendo utilizada em chaves de partida suave (“softstarter”) para motores de indução. Com perdas menores em condução, os contatores são utilizados para a operação em regime, proporcionando uma redução no

tamanho das mesmas das chaves de partida suave, uma vez que os tiristores conduzem somente na operação fechamento e abertura.

O casamento das características mecânicas é o procedimento normal de projeto para a otimização do desempenho de um contator eletromagnético. Entretanto, vários distúrbios que devem ser superados pelo contator eletromagnético para completar com sucesso a operação de fechamento dificultam o casamento ideal das características dinâmicas para se obter um baixo ricochete.

Considerando um contator eletromagnético em fabricação que foi otimizado para operação em um valor de tensão, seja em tensão contínua ou alternada, os vários parâmetros elétricos e mecânicos são influenciados pelos seguintes fatores [1]:

- Tensão de alimentação com uma faixa admissível por norma entre 85% e 110% da tensão de alimentação nominal;
- Variação da temperatura ambiente;
- Ângulo da tensão no fechamento quando alimentado em corrente alternada;
- Variação da resistência da bobina com a temperatura;
- Tolerâncias do entreferro devido à montagem;
- Tolerâncias devido às características magnéticas das chapas;
- Tolerâncias das molas devido ao método de fabricação e a forma construtiva das molas.

Adicionalmente, o subsistema de contatos está sujeito a determinadas modificações durante a vida útil, tais como:

- As tolerâncias de forças de molas, adição de contatos auxiliares, fricção, diminuição da compressão da mola de contato devido ao desgaste do contato;
- As posições dos contatos são modificadas para uma nova condição após cada manobra.

Estes distúrbios estão presentes na operação de qualquer contator eletromagnético, alguns em maior ou menor grau, mas agindo na degradação da operação de fechamento, operação e abertura. Não é possível isolar em um contator eletromagnético convencional um dos distúrbios, pois eles ocorrem simultaneamente e interagem entre si.

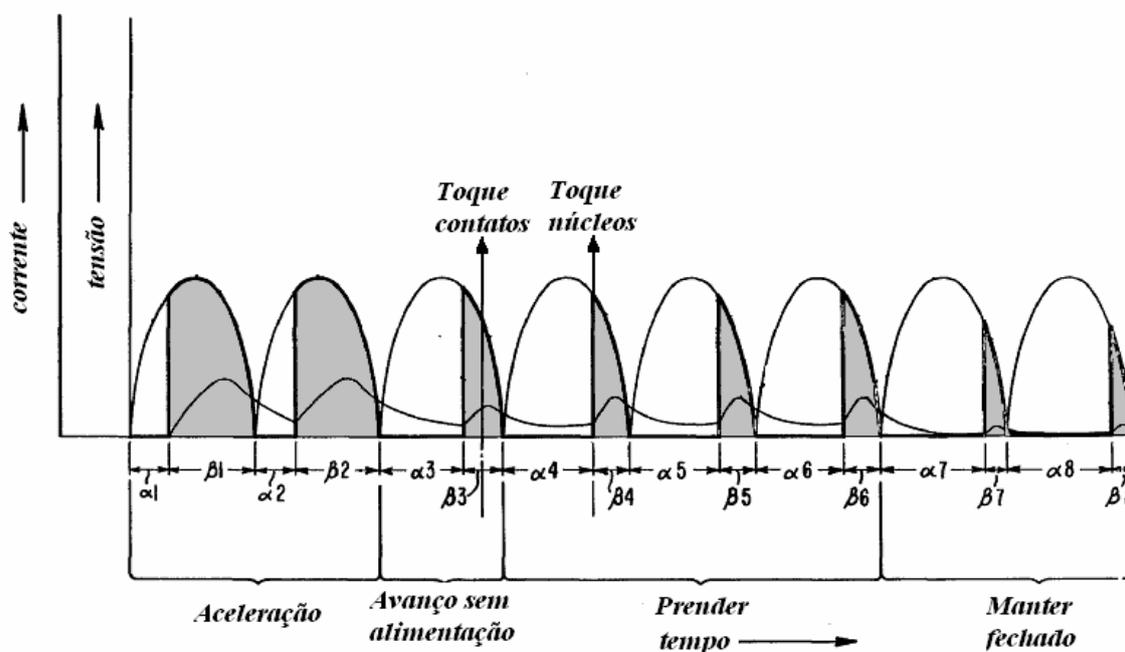
Nas últimas duas décadas foram iniciadas as pesquisas para a utilização de circuitos eletrônicos para melhorar o desempenho de contatores eletromagnéticos através do controle eletrônico, especialmente para contatores eletromagnéticos grandes. As forças eletromagnéticas entre o contator aberto e fechado são mais desfavoráveis ao acionamento quando comparados com contatores menores. O custo relativo da eletrônica em contatores grandes no valor final do produto é menor, possibilitando comercialmente a aplicação deste tipo de controle.

Em 1986, a empresa americana Westinghouse iniciou as pesquisas para a obtenção de um contator eletromagnético com baixo ricochete [5]. Foi comprovado que utilizando um circuito eletrônico para controlar a energia entregue à bobina, diminui-se a velocidade no momento do toque dos contatos, diminuindo a energia cinética e, conseqüentemente, o ricochete. Como resultados destas pesquisas, foram realizados até 1991 22 pedidos de patentes [5].

A patente US 4,893,102 [16], depositada em 1988, descreve com mais detalhes todo o procedimento tecnológico para a implementação do controle. O fechamento do contator eletromagnético é dividido em 4 fases: aceleração, avanço sem alimentação, prender e manter fechado. Em cada fase é fornecida à bobina do contator eletromagnético uma parcela da onda de tensão. Na aceleração é fornecida energia suficiente para vencer a inércia e acelerar o núcleo móvel até a posição em que a energia entregue é reduzida, mas com o núcleo móvel continuando o movimento apenas com a energia cinética obtida na aceleração, tocando os contatos com uma baixa velocidade e, conseqüentemente, baixo ricochete. Na fase de prender é fornecida uma quantidade de energia suficiente para vencer as forças de mola e garantir o fechamento dos núcleos. Na última fase, uma pequena corrente é fornecida à bobina apenas para manter o contator fechado. Em 1991 foi lançada a linha Advantage da Westinghouse, o primeiro contator eletromagnético com baixo ricochete fabricado em série com controle eletrônico com tempo de ricochete em torno de 2 ms e velocidades no momento do fechamento do contato em torno de 0,1 a 0,15 m/s. Nesta aplicação, um microcontrolador ASIC foi utilizado para implementação do controle. A Figura 3 mostra o controle eletrônico da energia de fechamento do contator eletromagnético publicado na patente da Westinghouse [16].

Em 1996 foi publicado um artigo que utilizava um controle biestável para diminuir o ricochete dos contatos de um contator eletromagnético [3]. A proposta para diminuir o ricochete é semelhante à anterior, com a diminuição da velocidade dos contatos no

momento do toque. O circuito de comando do contator é composto por dois temporizadores obtidos com o circuito integrado HC221, conforme mostrado na Figura 4. O temporizador  $T_1$ , após a energização, assume o nível alto e o transistor bipolar TR2 permanece conduzindo por um tempo  $t_1$  para a aceleração do núcleo móvel, colocando toda a energia disponível para o movimento. Ao mesmo tempo, o temporizador  $T_2$  inicia no nível baixo por um tempo  $t_2$ . Como  $t_2$  é maior que  $t_1$ , a bobina fica desenergizada por um tempo  $t_2 - t_1$  e o núcleo móvel permanece em movimento até o fechamento dos contatos. Após o temporizador  $t_2$  finalizar a contagem do tempo, a bobina do contator eletromagnético é novamente energizada para garantir o fechamento do contator. Os tempos  $t_1$  e  $t_2$  são ajustados experimentalmente para obter o menor tempo de ricochete.



**Figura 3** – Controle eletrônico da energia de fechamento do contator eletromagnético publicado na patente US4,893,102 Westinghouse [16].

Segundo o artigo, foi obtido um tempo médio de ricochete de 5 ms, para 1.000 operações. A vantagem deste método é que o controle é bastante simples e a eletrônica realiza o controle do fechamento pela seleção dos tempos  $t_1$  e  $t_2$ . Entretanto, somente pode ser utilizado em uma pequena faixa de tensão de alimentação para garantir o baixo ricochete.

Em 1996 a ABB solicitou o registro de uma patente [17] para a o controle da tensão aplicada à bobina durante o fechamento utilizando modulação PWM. A Figura 5 mostra a representação do circuito eletrônico utilizado para o controle do contator.

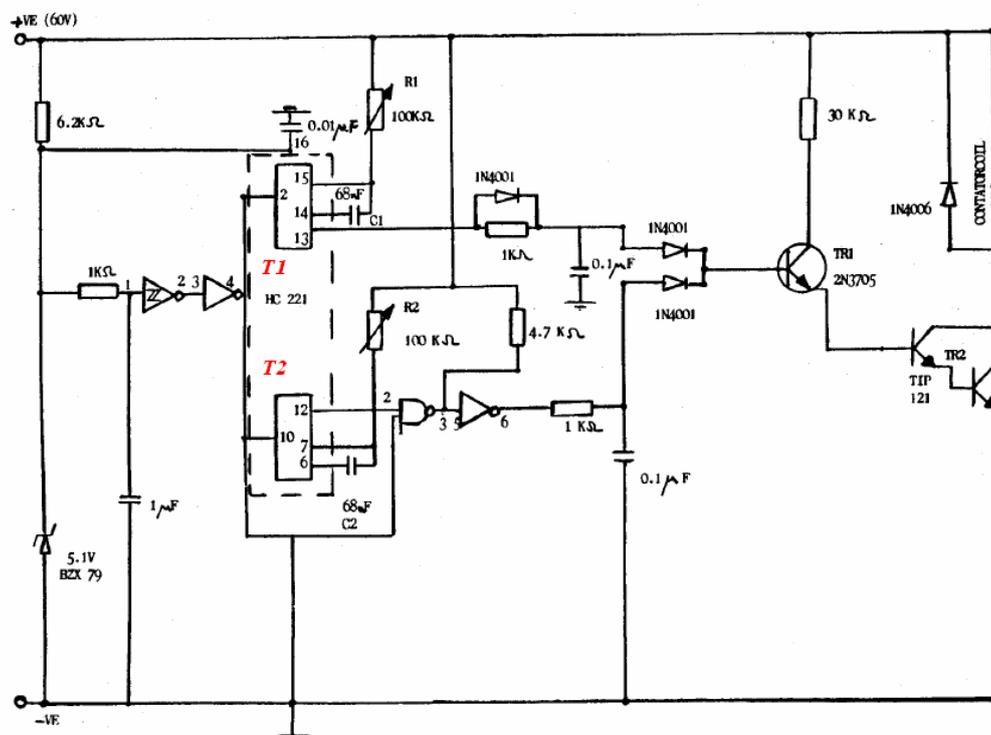
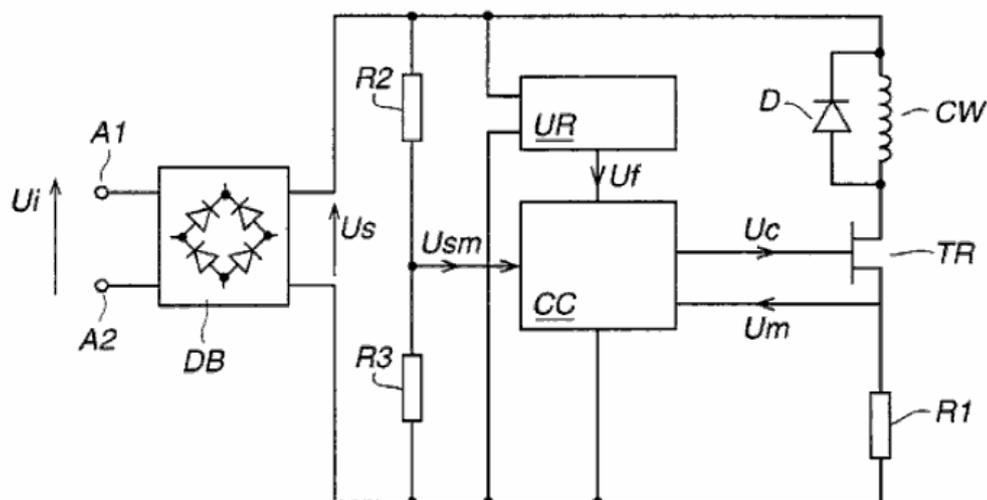


Figura 4 – Controle biestável para controle da energia cinética no fechamento do contator [3].

A eletrônica de controle é alimentada por uma tensão  $U_i$  através dos terminais A1 e A2.  $U_s$  é a tensão retificada através de um retificador de onda completa  $DB$ , cuja forma de onda pode ser contínua se a tensão  $U_i$  for uma tensão contínua ou pode ser tensão contínua pulsante se a tensão  $U_i$  for uma tensão alternada senoidal. Esta tensão é aplicada na bobina do contator representada por  $CW$ , conectado em série com o transistor  $TR$  e uma resistência  $R_1$  para a medida de corrente. Em paralelo com a bobina é conectado um diodo de roda livre  $D$ . O circuito de controle  $CC$  mede a tensão  $U_{sm}$ , a qual é uma tensão proporcional à tensão  $U_s$  dada pelo divisor de tensão composto por  $R_2$  e  $R_3$  e fornece um sinal de controle  $U_c$  com uma frequência constante com período  $T_{ciclo}$  e variando a largura de pulso inversamente com a tensão  $U_i$ . Com a finalidade de uniformizar a nomenclatura das variáveis e facilitar a compreensão no decorrer do trabalho, será considerado que a tensão retificada  $U_s$  será chamada de  $V_{control}$ .

A idéia consiste em fornecer uma tensão constante na bobina do contator. Durante o fechamento, a corrente diminui devido ao efeito da variação da indutância (a qual aumenta com o movimento do núcleo móvel em direção ao núcleo fixo, reduzindo o entreferro).



**Figura 5** – Controle eletrônico patente US 5,914,850 ABB [17].

Com o fornecimento de uma tensão constante, o efeito da diminuição da corrente reduz conseqüentemente a aceleração, influencia a velocidade final do núcleo móvel e dos contatos, reduzindo o ricochete dos contatos. A equação (1) é aplicada para definir o tempo  $t_{on}$  em que o interruptor permanecerá fechado, assim:

$$t_{on} = \frac{V_{ref}}{V_{control}} T_{ciclo} \quad (1)$$

onde  $V_{control}$  é a tensão disponível após o retificador,  $V_{ref}$  é a tensão escolhida para ser aplicada na bobina, geralmente igual à tensão mínima de fechamento do contator eletromagnético, e  $T_{ciclo}$  é o período de oscilação. Para a determinação da tensão aplicada à bobina  $V_{bobina}$ , é utilizada a equação (2).

$$V_{bobina} = DV_{control} = \frac{t_{on}}{T_{ciclo}} V_{control} = \frac{V_{ref}}{V_{control}} V_{control} = V_{ref} \quad (2)$$

A tensão de controle  $V_{control}$  é obtida medindo-se a tensão disponível no barramento em tensão alternada e tomando seu valor eficaz. Calcula-se o tempo em que o interruptor permanecerá fechado  $t_{on}$  para suprir a tensão  $V_{ref}$ , o qual é uma fração do período de oscilação  $T_{ciclo}$ .

O valor do tempo de condução  $t_{on}$  é utilizado durante toda a operação de fechamento do contator, independente da ocorrência de uma variação da tensão  $V_{control}$  durante o processo de fechamento. Sendo assim, define-se a constante  $C_{ton(0)}$  em função da tensão de controle conforme (3).

$$C_{ton(0)} = \frac{V_{ref}}{V_{control(0)}} \quad (3)$$

A tensão de controle  $V_{control(0)}$  é obtida no início do fechamento, durante o tempo  $t_{on}$ , pela equação (1). Nota-se que a operação de fechamento torna-se independente da variação que possa ocorrer na tensão de controle  $V_{control}$ . Assim é calculado o intervalo de tempo em que o interruptor permanecerá fechado por (4).

$$t_{on} = C_{ton(0)} T_{ciclo} \quad (4)$$

O controle da tensão não é realizado de forma dinâmica. Em caso de variação da tensão, o controle não corrige o valor de  $t_{on}$  durante o fechamento. O controle no fechamento trabalha com frequência e tempo de condução constante.

O estudo da patente US 5,914,850 permitiu o entendimento de como pode ser controlada a tensão aplicada na bobina do contator eletromagnético através da equação (1), bem como do artifício utilizado para controlar o fechamento do contator com uma tensão contínua pulsante, proveniente da retificação de uma tensão alternada senoidal, o qual consiste em manter o valor constante de  $t_{on}$  durante todo o fechamento, alimentando a bobina com um valor médio quadrático constante igual à tensão  $V_{ref}$  para a bobina.

As referências [13, 17] mostram um método de controle não linear que realiza a mesma função descrita acima, mas de forma dinâmica, a qual poderia também ser aplicada ao acionamento de contadores eletromagnéticos com vantagens em relação à patente da

ABB. A técnica foi chamada de controle em um ciclo (tradução de “one cycle control”). A técnica de controle em um ciclo foi apresentada na literatura em dois artigos publicados em 1995 [13, 17]. Foi desenvolvida por Keyeu Smedley e Slobodan Cuk como um novo método para controle de fontes chaveadas. O artigo [13] apresenta uma comparação entre o controle convencional com realimentação linear e o novo método não linear, aplicado em uma fonte chaveada na topologia Buck. Este método provou melhorar a resposta dinâmica do sistema.

O conceito é controlar o tempo  $t_{on}$  de um interruptor em tempo real, através da integração da tensão de controle  $V_{control}$  de maneira que, a cada ciclo, o valor médio da tensão durante a condução do interruptor é igual à tensão de referência de controle  $V_{ref}$ , conforme a equação (5).

$$\frac{1}{T_{ciclo}} \int_0^{t_{on}} v_{control}(t) dt = V_{ref} \quad (5)$$

A Figura 6 mostra a integração do controle em um ciclo.

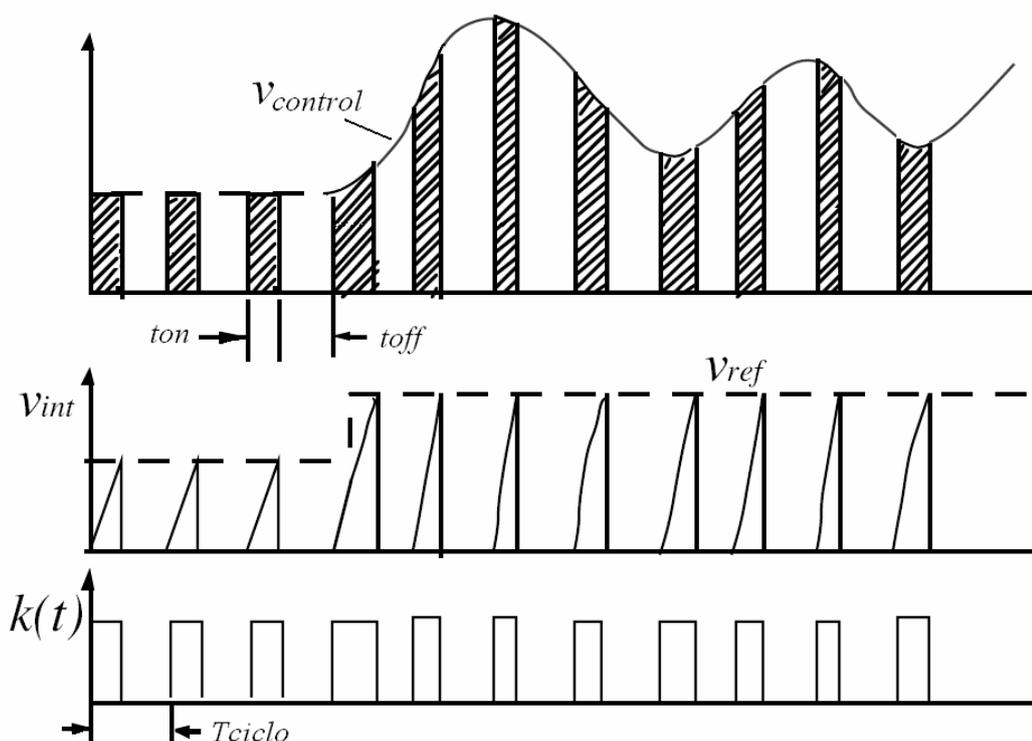
Considerando-se que o tempo  $T_{ciclo}$  é bastante pequeno para considerar  $v_{control}(t)$  constante, pode-se escrever a equação (6).

$$t_{on} = \frac{V_{ref}}{V_{control}} T_{ciclo} \quad (6)$$

Esta equação é igual à equação (1), exceto pelo modo como o circuito eletrônico processa os valores. Se a tensão de alimentação variar, a razão cíclica muda rapidamente no próximo ciclo. Isto é particularmente importante no caso de alimentação em tensão contínua provida por um retificador e um filtro capacitivo, no qual, devido à corrente alta durante o fechamento, a ondulação da tensão pode ser bastante grande se o capacitor não é dimensionado para esta condição. Neste caso o valor médio quadrático da tensão decai e pode comprometer o processo de fechamento do contator eletromagnético.

A proposta deste trabalho é apresentar um sistema de controle eletrônico que possa ser aplicado a contadores eletromagnéticos em fabricação para obter condições dinâmicas constantes (tempo de fechamento, velocidade e força) com alimentação em tensão contínua

ou alternada através da aproximação do valor médio quadrático da tensão de controle para possibilitar o casamento mecânico dos subsistemas mecânico (massa-mola-amortecedor) e eletromagnético (bobina, núcleo fixo e móvel) para a obtenção de um contator eletromagnético com baixo ricochete.



**Figura 6** – Integração do controle em um ciclo.

Os contatores eletromagnéticos se comportam como um sistema não linear durante o fechamento, uma vez que a indutância, fluxo magnético, força magnética e força mecânica são dependentes do movimento do núcleo móvel. Esta dependência tem efeito nas características dinâmicas do contator. A análise das características dinâmicas do sistema eletromagnético se torna difícil por causa dos domínios acoplados elétrico, magnético, térmico e mecânico. Entretanto, a modelagem e a simulação são usadas para a análise dos contatores e projeto dos circuitos de controle.

Nesta introdução, apresentaram-se os parâmetros que influenciam os desgastes dos contatos principais de contatores eletromagnéticos. Dentro desses parâmetros, optou-se pela análise dos ricochetes destes contatos. Além disso, apresentaram-se também algumas topologias de controle encontradas na literatura científica.

No capítulo 2 será apresentada a tecnologia de contatores eletromagnéticos, descrevendo os elementos constituintes principais, suas funções e a análise do balanço de forças no fechamento.

No capítulo 3 serão apresentados os modelos matemáticos do sistema eletromagnético e mecânico do contator a fim de dar subsídios para o entendimento dos fenômenos físicos envolvidos no fechamento, as não-linearidades no sistema eletromagnético e mecânico. É importante ressaltar que o objetivo deste trabalho não é desenvolver um modelo matemático do contator eletromagnético, mas sim um controle eletrônico de tensão. O modelo eletromagnético e mecânico utilizado foi o do Prof. Thomas Roschke [1], pois pode ser implementado no PSpice e sendo assim torna-se possível simular simultaneamente o modelo desenvolvido em [1] e o seu controle eletrônico de tensão.

No capítulo 4 serão apresentados o modelo do contator eletromagnético em PSpice e os resultados das simulações simultâneas do contator eletromagnético e de sua eletrônica de controle utilizando controle de um ciclo.

No capítulo 5 serão mostrados os ensaios para a validação das simulações simultâneas através de ensaios em um contator eletromagnético para a comprovação do método para obtenção de uma condição dinâmica constante no fechamento.

## 2 Tecnologia dos Contatores Eletromagnéticos

Neste capítulo serão apresentadas as tecnologias para o acionamento de contatores em geral e serão descritos os vários componentes para a construção de um contator eletromagnético bem como as suas funções. O princípio de operação dos contatores, abordando os problemas relativos ao processo de fechamento e abertura sob enfoque da tecnologia atualmente utilizada, também será apresentado.

### 2.1 Considerações gerais sobre contatores eletromagnéticos

A norma internacional IEC 60947-1 [7] define o contator como um interruptor de operação não manual, que tem uma única posição de repouso e é capaz de estabelecer, conduzir e interromper correntes s em condições normais e em sobrecarga.

Os contatores podem ser classificados segundo os seguintes critérios:

a) Quanto ao tipo de acionamento:

- **Contator eletromagnético** – contator no qual a força para o fechamento é provida por um eletroímã;
- **Contator eletromecânico** – contator no qual o acionamento é realizado por meios mecânicos;
- **Contator pneumático** – contator no qual a força para o fechamento é provida por um dispositivo usando ar comprimido, sem a utilização de meios elétricos para o acionamento;
- **Contatores eletro-pneumáticos** – contator no qual a força para o fechamento é provida por um dispositivo usando ar comprimido sob o controle de eletro-válvulas;
- **Contator a semicondutor ou em estado sólido** – contator no qual o acionamento é realizado por meio de sinais elétricos comandando dispositivos semicondutores;
- **Contator híbrido** – contator no qual o acionamento é realizado por meio de dispositivos semicondutores em conjunto com contatos elétricos.

b) Quanto à disposição dos contatos:

- **Contatores a ar** – quando a extinção do arco elétrico ocorre no ar;
- **Contatores a óleo** – quando a interrupção do arco elétrico ocorre em um reservatório de óleo (limitado a casos especiais).

c) Quanto ao tipo de tensão de acionamento:

- **Contatores acionados em tensão contínua;**
- **Contatores acionados em tensão alternada.**

d) Quanto aos limites de tensão:

- **Contatores de baixa tensão (até 1.000 V);**
- **Contatores de alta tensão (a partir de 1.000 V).**

Os contatores pneumáticos são essencialmente êmbolos pneumáticos utilizados para produzir um movimento linear. A abertura é realizada através da decompressão do ar comprimido e pela liberação da energia das molas de abertura. Devido à necessidade de ar comprimido, deve ser previsto um sistema pneumático (compressor, reservatório de ar comprimido, canalização, regulação de pressão, etc.), o que pode resultar em instalações caras e volumosas.

No que se refere a contatores eletromecânicos, estes dispõem de um motor que carrega uma mola e descarrega para o fechamento, do mesmo modo que na abertura, a mola é recarregada e descarregada. Estes não possuem tantos inconvenientes quanto o contator pneumático ou o hidráulico, mas o volume e o mecanismo complicado diminuem a confiabilidade.

Os contatores eletromagnéticos têm apenas uma bobina para acionamento. Geralmente ela é projetada junto com o dispositivo, permitindo obter o movimento linear sem a necessidade de mecanismos complexos. A utilização da energia para o acionamento facilita o controle e a instalação. A Figura 7 mostra um contator eletromagnético comercial.

As soluções de projeto de contatores mostradas anteriormente são mais complexas e limitadas a aplicações especiais. O contator eletromagnético leva grande vantagem, considerando-se a simplicidade de aplicação, o menor volume e a construção simples,

sendo os mais utilizados na maioria das aplicações. Nesta dissertação será considerado o contator eletromagnético a ar, genericamente denotado por contator eletromagnético.



**Figura 7** – Contator eletromagnético WEG.

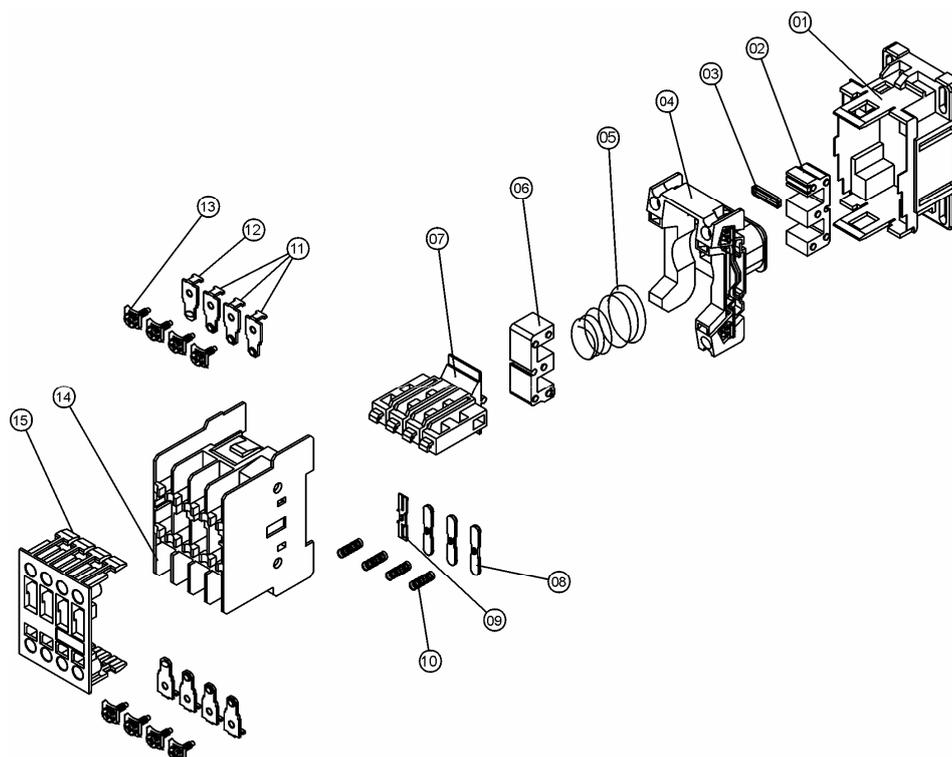
Atualmente, para um projeto de contadores eletromagnéticos, levam-se em consideração as seguintes características [1]:

- Redução do desgaste dos contatos;
- Redução da energia consumida (bobina e perdas do ferro);
- Redução do volume e do peso;
- Alta confiabilidade durante a operação em subtensão e sobretensão;
- Controle por sinal externo de baixa tensão;
- Interface de comunicação para monitoramento;
- Monitoramento do desgaste dos contatos.

### **2.1.1 Descrição dos componentes principais de um contator eletromagnético**

A Figura 8 mostra o contator eletromagnético WEG em uma vista explodida, mostrando todos os componentes necessários à função de estabelecer e interromper a corrente. Os principais componentes de um contator eletromagnético são:

- Contatos elétricos (principal e auxiliar);
- Núcleo (fixo e móvel);
- Bobina;
- Molas (contatos, abertura);
- Carcaça.



**Figura 8** – Vista explodida do contator eletromagnético WEG, composta por: (01) Carcaça inferior; (02) Núcleo fixo; (03) Anel de curto-circuito; (04) Bobina; (05) Mola de abertura; (06) Núcleo móvel; (07) Cabeçote dos contatos móveis; (08) Contatos principais móveis; (09) Contatos auxiliares móveis; (10) Mola de contato; (11) Contatos principais fixos; (12) Contato auxiliar fixo; (13) Parafuso; (14) Carcaça superior e (15) Tampa.

### 2.1.1.1 Contatos principais e auxiliares

Os contatos são dimensionados com o objetivo principal de conduzir e interromper a corrente de diversos tipos de cargas, tais como motores elétricos, cargas resistivas ou capacitivas.

Disposto no núcleo móvel está um ou vários pares de contatos móveis, no qual o complemento ou os complementos destes contatos estão fixados na carcaça. A carga e a fonte de tensão são interconectadas através de contatos fixos e tornam-se conectados entre si através dos contatos em ponte.

Os contatos principais têm por finalidade realizar o fechamento ou abertura do circuito principal através de peças de metal, geralmente ligas metálicas de prata, que se juntam para conduzir a corrente do circuito ao qual se pretende acionar.

Cada contator eletromagnético possui pelo menos um par de contatos principais (fixo e móvel) e pode ser unipolar, bipolar, tripolar ou tetrapolar. Em se tratando de um contator eletromagnético para acionar cargas trifásicas é utilizado o contator eletromagnético tripolar, com três pares de contatos, um para cada fase.

Para cada tamanho ou potência de contator eletromagnético são utilizados tipos diferentes de contatos principais, bem como a utilização de câmaras de extinção de arco, contatos de sacrifício, diferentes sistemas de molas, etc.

#### **2.1.1.2 Contatos auxiliares**

Os contatos auxiliares são utilizados principalmente para comando, sinalização e intertravamento elétrico. Em geral, estes contatos conduzem valores de corrente menores em relação ao contato principal, e por isso têm tamanhos menores que os contatos principais. A denominação dos contatos considerando o estado de repouso é normalmente aberto (NA) ou normalmente fechado (NF). Quanto à velocidade de atuação, podem ser adiantados ou retardados. Esta característica é conseguida mecanicamente através da alteração da distância entre os contatos. Dependendo da configuração, um ou mais contatos auxiliares são acrescentados ao contator eletromagnético para a função desejada pelo usuário.

#### **2.1.1.3 Núcleo fixo e móvel**

Os núcleos fixo e móvel são construídos com chapas de aço isoladas, com a finalidade de diminuir as perdas por correntes de Foucault. Para contadores alimentados em tensão alternada é necessária a utilização de anéis de curto-circuito (também conhecidos como espira de sombra, espira “shunt”) para evitar o ruído devido à passagem por zero da corrente. Sem os anéis de curto-circuito, o núcleo móvel se separa do núcleo fixo duas vezes por ciclo, já que o fluxo magnético passa duas vezes por zero. Como o tempo é curto (1/120 segundos), não é suficiente para a abertura, mas é suficiente para gerar ruído e queima da bobina devido à variação da corrente. O anel de curto-circuito gera um fluxo

magnético defasado do fluxo magnético gerado pela bobina, fazendo com que seja mantido um fluxo magnético no núcleo, mesmo quando a corrente na bobina passa por zero.

A remanência magnética é evitada pelo entreferro que, após a interrupção da tensão de comando, evita que o núcleo permaneça com uma força de atração residual. Após a desenergização da bobina, o retorno à posição de repouso e a abertura dos contatos são garantidos pelas molas de contato e abertura.

As dimensões do circuito magnético são determinadas pelas forças de contato que são necessárias para conduzir a corrente e ter a capacidade de condução, interrupção e tempo de ricochete.

#### **2.1.1.4 Bobina**

O acionamento de contatores eletromagnéticos é realizado através de uma bobina eletromagnética que, em conjunto com o núcleo móvel e fixo, realiza a operação de fechamento. Analisando de forma simplificada os vários fenômenos físicos que ocorrem durante o acionamento do contator eletromagnético, pode-se entender o conjunto de transformações de energia. A bobina é utilizada para transformar a corrente resultante da tensão aplicada em um fluxo magnético. O núcleo, que é constituído de chapas de material ferromagnético, concentra o fluxo magnético, gerando uma força de atração, a qual deve superar as forças do sistema de molas para acelerar o núcleo móvel em direção ao núcleo fixo. Devido a esta força de atração e à separação física dos núcleos, ocorre um deslocamento no sentido do núcleo móvel em direção do núcleo fixo. Durante o deslocamento, os contatos principais e auxiliares mudam seu estado e o entreferro é reduzido ao seu valor mínimo, completando a operação de fechamento do contator.

A bobina deve ser dimensionada, para que manobre com segurança, mesmo quando alimentada com 85% da tensão nominal, conforme norma. A reserva de energia para a condição de subtensão significa um aumento da energia de impacto para as condições de tensão nominal e sobretensão, aumentando a velocidade no impacto. Como consequência disto, pode ser que as faces dos contatos se separem várias vezes e também pode ocorrer a fadiga mecânica dos materiais.

### **2.1.1.5 Sistema de molas**

O sistema de molas em conjunto com o sistema magnético determina a resposta dinâmica e as características elétricas do contator eletromagnético.

Nos contatores, a quantidade de força magnética gerada pela bobina e circuito magnético é maior que a necessária para superar as forças das molas. A força magnética extra é utilizada para movimentar o núcleo móvel e superar as variações da curva da força do sistema de molas, como consequência da adição de molas com constantes de molas diferentes durante o fechamento. Esse excesso de energia cinética é usualmente transformado em calor, ruído e vibração e em um indesejável ricochete dos contatos, o qual determina sua vida útil.

#### **2.1.1.5.1 Mola de abertura**

A primeira força de mola é feita através da mola de abertura, a qual também é utilizada para abertura dos contatos, movendo o núcleo móvel em direção contrária quando a fonte de alimentação da bobina é desconectada.

A mola de abertura determina a força eletromagnética inicial para o fechamento do contator. Com isso, determina a mínima tensão de fechamento e também, junto com as molas de contato, a tensão de abertura do contator, no qual a força das molas supera a força de atração magnética.

#### **2.1.1.5.2 Molas de contato**

A segunda força de mola é feita através da mola de contato, a qual inicia comprimindo os contatos móveis contra os contatos fixos, mas continua aumentando a compressão até que o núcleo móvel toque o núcleo fixo, reduzindo o entreferro a zero.

Para aumentar a capacidade de condução de corrente dos contatos, diminuir o ricochete dos contatos no fechamento e aumentar a capacidade de adaptação para o desgaste dos contatos é desejável que para as forças de mola de contato sejam as maiores possíveis. Entretanto, esta força deve ser menor que a força eletromagnética gerada pela bobina e circuito magnético durante a operação de fechamento, a fim de não causar a instabilidade no fechamento.

A força de mola de contato é um dos fatores que determinam a quantidade de corrente que pode ser conduzida pelos contatos e, também, a quantidade de desgaste de contatos que pode ser tolerada em repetidas operações do contator. A avaliação da capacidade de condução de corrente é realizada por um ensaio de elevação de temperatura do conjunto de terminais e de contatos na corrente térmica do contato.

### 2.1.2 Forças mecânicas estáticas no processo de fechamento

Para a compreensão da operação de fechamento do contator eletromagnético é necessário entender a interação entre as forças eletromagnética e mecânicas (molas, massa e fricção) para que possam ser previstas as influências da variação destes parâmetros sobre o projeto e escolha de parâmetros de controle. Utilizando a terceira lei do movimento de Newton, o equilíbrio das forças em um contator eletromagnético pode ser descrito como (7).

$$F_{\text{eletromagnética}} = \sum F_{\text{mecânicas}} \quad (7)$$

Se a força eletromagnética é maior que o somatório das forças mecânicas, pela segunda lei do movimento de Newton, haverá uma força de aceleração do núcleo móvel dada por (8):

$$F_{\text{aceleração}} = F_{\text{eletromagnética}} - \sum F_{\text{mecânicas}} \quad (8)$$

Com estas equações (7) e (8) é possível explicar o processo de fechamento do contator eletromagnético e analisar as forças que influenciam no movimento. Primeiro será feito a análise da curva de força mecânica como se uma força mecânica externa fosse aplicada no núcleo móvel para avaliar as forças estáticas. Em uma segunda etapa será analisada as forças dinâmicas durante o fechamento.

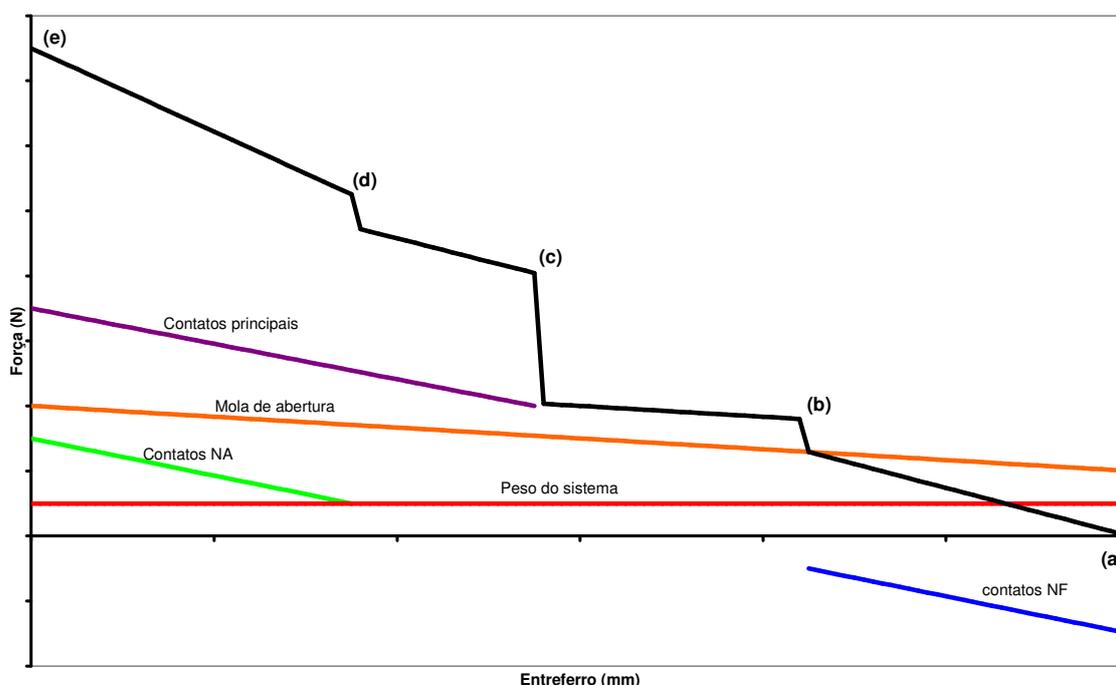
Na Figura 9 está representada, de forma orientativa, estes valores. Este contator dispõe de um contato NF, um contato NA, três contatos principais para cada uma das fases e uma mola de abertura.

Estando o contator eletromagnético aberto (ponto (a) da Figura 9), as forças que atuam são o peso do núcleo móvel e seus acessórios, assim como as forças de fricção é representada em vermelho e paralela ao eixo das abscissas. Esta força mecânica tem um valor constante durante todo o fechamento. Para os alojamentos dos contatos auxiliares

NF, as forças atuam no mesmo sentido que da bobina, sendo assim são consideradas *positivas as forças que ajudam na abertura e negativas as forças que ajudam no fechamento*. Estando o contator eletromagnético aberto, como mostrado na marcação (a), a força mecânica estática que atuará no sistema até o ponto (b) é dada por (9).

$$F_{mecânica}(a-b) = F_{peso} + F_{molas\ abertura} - F_{contato\ NF} \quad (9)$$

Aumentando-se a força mecânica externa a partir do ponto (c), no qual as molas de abertura, que se encontram pré-comprimidas devido ao peso do núcleo, como mostrado na reta em laranja, continuam a ser comprimidas até os contatos auxiliares NF não influenciarem na curva, mostrado no ponto (c).



**Figura 9** - Característica de esforço da conexão de um contator eletromagnético.

Neste ponto ocorre a primeira não linearidade na força do sistema, cuja força mecânica para o equilíbrio é dada por (10).

$$F_{mecânica}(b-c) = F_{peso} + F_{molas\ abertura} \quad (10)$$

Em seguida, aumenta-se a força até o ponto (d), onde o núcleo móvel encontrará os contatos principais, com uma força prévia devido ao alojamento dos contatos. A força necessária para o deslocamento aumenta bastante devido à constante da mola de contato,

causando a segunda e mais significativa mudança de força do sistema, variando linearmente até o ponto (d) conforma a equação (11).

$$F_{mecânica}(c-d) = F_{peso} + F_{molas\ abertura} + F_{contato\ principais} \quad (11)$$

No ponto (d) será adicionada a força devido a ação dos contatos auxiliares NA, cuja representação gráfica é dada pela curva em verde, chegando ao último incremento da força. A equação que rege a força mecânica externa é dada por (12).

$$F_{mecânica}(d-e) = F_{peso} + F_{molas\ abertura} + F_{contato\ principais} + F_{contato\ NA} \quad (12)$$

Analisando cada trecho da curva de força do sistema mecânico, percebe-se que as variações de força são lineares. Entretanto, devido à sobreposição de molas com constantes de mola diferentes ocorrem aumentos bruscos da força, os quais o sistema eletromagnético deve vencer para realizar o fechamento do contator eletromagnético com segurança.

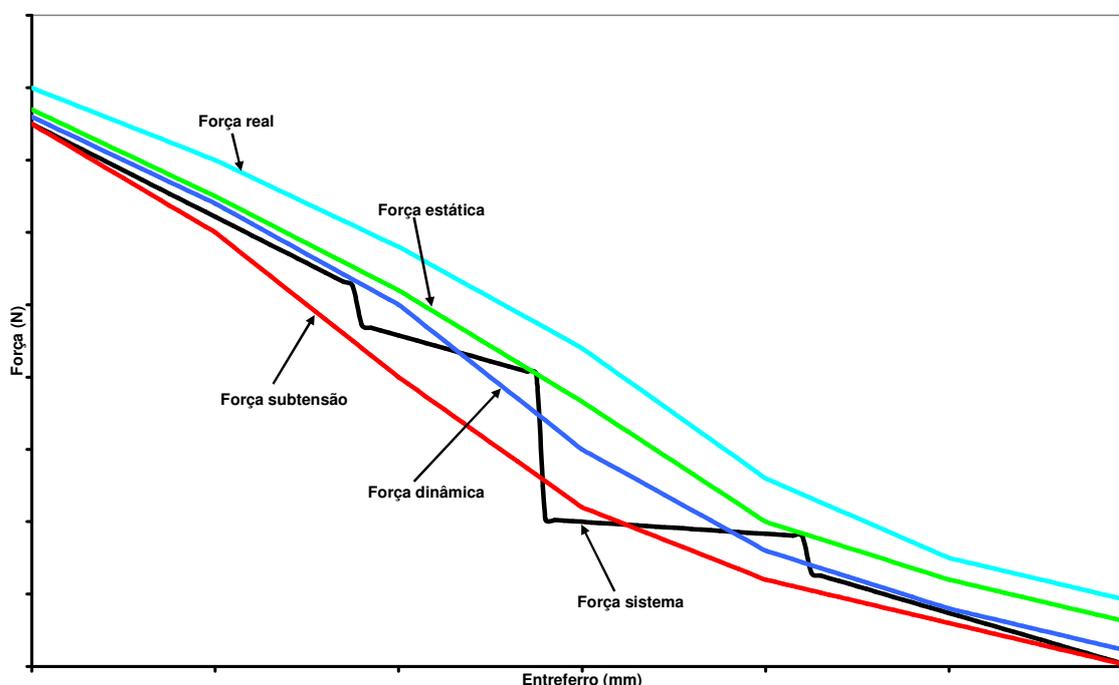
### 2.1.3 Forças eletromagnéticas no processo de fechamento

As forças de aceleração do núcleo móvel em um contator eletromagnético são dadas pela diferença entre a força eletromagnética e as forças mecânicas em função da posição do núcleo móvel. A força eletromagnética disponível depende principalmente da temperatura da bobina e do valor da tensão de controle [1]. Forças mecânicas variam de acordo com as molas e as tolerâncias de montagem. A partir da representação da curva de força do sistema mecânico que influencia no fechamento do contator eletromagnético, é possível determinar as características necessárias para a escolha do sistema magnético, como representado na Figura 10.

A *curva de força eletromagnética estática*, que contorna a curva de força do sistema mecânico sem cortar nenhum ponto, tem todos os valores instantâneos superiores aos valores de força do sistema mecânico e representam as condições ideais de trabalho. A curva de força eletromagnética estática deve ser obtida em diversas posições de abertura do entreferro.

O resultado é uma curva de força eletromagnética útil em função da posição. Devido à não linearidade da ação do sistema de molas, que gera variações abruptas da curva de força do sistema mecânico, a força eletromagnética gerada pelo sistema eletromagnético deve satisfazer às condições críticas para não ocorrer situações instáveis no funcionamento quando a tensão de alimentação for abaixo da nominal.

A *curva de força dinâmica* se diferencia da anterior por seus valores instantâneos serem menores, de tal forma que corta as características de esforços, quando a força de fechamento é incrementada pela adição dos contatos auxiliares. Como este tipo de curva é traçada, obtendo-se a força média em condições estáticas, pode ocorrer a situação em que a força eletromagnética magnética seja menor que a força mecânica em alguma abertura do entreferro, e mesmo assim, em regime de funcionamento dinâmico, pode não ocorrer a instabilidade no fechamento do contator eletromagnético devida à aceleração do núcleo móvel. Nesta condição, uma força adicional está presente devido à energia cinética que se soma à força eletromagnética, superando a força do conjunto das molas.



**Figura 10** - Características de funcionamento do sistema eletromagnético do contator eletromagnético.

A *curva de força em subtensão* não é recomendada para trabalhar por motivos práticos. Uma tensão baixa, em um momento determinado, ocasionará um decréscimo do fluxo magnético. Nestas condições, haverá cortes na característica de esforço, antes que a velocidade alcance um valor mínimo para garantir o fechamento, caindo para valores que levariam a uma posição intermediária provocando uma condição instável, conhecida como segundo estágio.

Na prática realiza-se sempre a *curva de força real*. Como podem ser observados, todos os pontos desta característica são superiores ao da característica estática, sendo o seu limite prático, o aquecimento dos sistemas elétrico e magnético.

#### **2.1.4 Considerações**

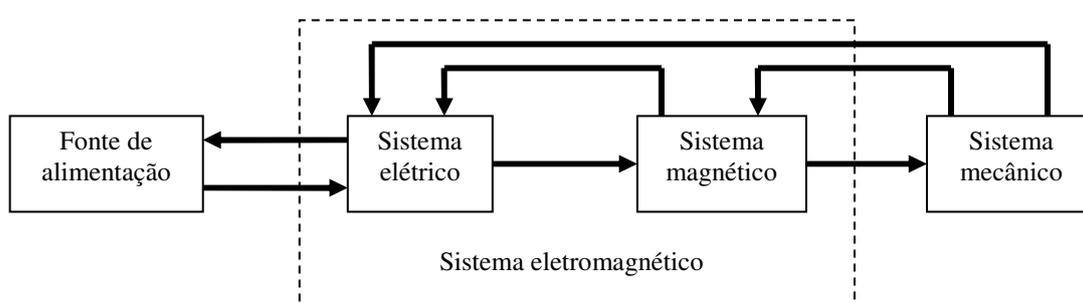
O processo de fechamento do contator eletromagnético com os fenômenos físicos não-lineares envolvidos no fechamento e abertura é complexo, uma vez que todo o processo envolve a interação destes.

Procurou-se, neste capítulo, fornecer ao leitor as principais dificuldades e questões relacionadas aos contatores eletromagnéticos, bem como dar subsídios para construir uma base de conhecimento para o entendimento dos outros capítulos.

### 3 Modelagem Matemática do Contator Eletromagnético

#### 3.1 Introdução

A modelagem matemática é um meio pelo qual, através de modelos, pode-se descrever e/ou prever o comportamento de um sistema qualquer. Em relação aos contadores eletromagnéticos, a modelagem matemática pode ser dividida em três sistemas, conforme Figura 11. Nesta estruturação os sistemas elétrico (bobina) e magnético (núcleos fixo e móvel) podem ser combinados como um sistema.



**Figura 11** - Interligação entre os sistemas eletromagnético e mecânico.

A modelagem do contator eletromagnético será realizada de forma a dar subsídios para o entendimento dos fenômenos que ocorrem durante o fechamento. Não se pretende com esta modelagem matemática chegar a equações de projeto ou mesmo de otimização do sistema eletromecânico, uma vez que se considera que este trabalho será realizado pelo projetista do contator eletromagnético.

#### 3.1.1 Modelo matemático do sistema eletromagnético

O fato de que as características dinâmicas da operação eletromagnética afetam a vida útil e o consumo de energia do contator tem atraído alguns pesquisadores nesta área. Em [19], o autor aumenta a vida útil dos contatos acionados eletromagneticamente impedindo a auto-sincronização. Em [6], os autores melhoraram a vida útil de um contator AC3 com um sistema magnético controlado eletronicamente e, além disso, o texto ilustra a teoria de controle holístico. Os trabalhos [3] e [4] controlam os ricochetes dos contatos controlando a intensidade de fluxo magnético pela regulagem dos períodos de energização

da bobinas. Em [12], o autor pesquisou os mais importantes fatores e seus efeitos na velocidade de contato e no tempo de ricochete. No aspecto da simulação dinâmica, estudos anteriores [20 – 24] introduziram diferentes abordagens para determinar o comportamento dinâmico de eletroímãs de corrente contínua e corrente alternada. Em [25], o autor realizou uma análise simultânea da estrutura eletromagnética conectada ao seu circuito de alimentação. O contator foi modelado pelo método de elementos finitos bidimensionais e o circuito foi representado por variáveis de estado.

Como o objetivo deste trabalho é o desenvolvimento do controle eletrônico de tensão do contator, tornou-se necessário utilizar um modelo de contator que se baseasse em circuito elétrico equivalente. Assim, o circuito eletrônico de controle pode ser analisado juntamente com o circuito elétrico equivalente do contator eletromagnético.

O modelo matemático para a descrição do funcionamento dos contadores eletromagnéticos foi baseado em [11], o qual descreve o contator eletromagnético como um conjunto de equações diferenciais. Este modelo está sendo apresentado apenas para o entendimento matemático dos fenômenos não lineares do controle de contadores durante o fechamento.

Ao se percorrer uma bobina com uma corrente  $i(t)$ , gera-se um fluxo magnético definido por (13):

$$\Phi_{contator}(t) = L_{bobina} i_{bobina}(t) \quad (13)$$

No caso do contator eletromagnético, a indutância da bobina  $L_{bobina}$  também varia durante o fechamento, até que os núcleos móvel e fixo se toquem. Pela Lei de Faraday, uma f.e.m será gerada na bobina, dada por (14):

$$e_{bobina}(t) = \frac{d}{dt} [L_{bobina}(t) i_{bobina}(t)] \quad (14)$$

Ou separando-se pela regra da derivada do produto de duas funções, obtêm-se (15).

$$e_{bobina}(t) = L_{bobina}(t) \frac{di_{bobina}(t)}{dt} + i_{bobina}(t) \frac{dL_{bobina}(t)}{dt} \quad (15)$$

Como a indutância da bobina é uma função do deslocamento da parte móvel, em relação ao entreferro  $x$ , a equação (15) pode ser rearranjada como (16), onde  $x$  é a posição da parte móvel do núcleo e  $dx(t)/dt$  é a velocidade da parte móvel.

$$e_{bobina}(t) = L_{bobina}(t) \frac{di_{bobina}(t)}{dt} + i_{bobina}(t) \left[ \frac{dL_{bobina}(t)}{dx} \frac{dx(t)}{dt} \right] \quad (16)$$

A indutância da bobina  $L_{bobina}(x)$  é uma função da posição do núcleo móvel  $x$  e da corrente  $i$  (devido à saturação do circuito magnético).

Quando a bobina é energizada, a relutância maior do caminho magnético é dada pelo entreferro. Como o núcleo móvel se move para a posição fechada, o entreferro reduz-se a praticamente a zero, diminuindo a relutância relativa do entreferro, facilitando a saturação do núcleo.

A variação de indutância da bobina  $L_{bobina}(x)$  no modelo deve ser estimada com dados experimentais. Um polinômio de segunda ordem dado por (17) para  $L_{bobina}(x)$ , onde  $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$  são os coeficientes da curva ajustada:

$$L_{bobina}(x) = P_1 x^2 + P_2 x + P_3 \quad (17)$$

Definindo experimentalmente a variação da indutância da bobina  $L_{bobina}$  e sua resistência  $R_{bobina}$ , aplicando uma fonte de tensão  $v_{alimentação}(t)$  e usando as Leis de Kirchhoff, encontram-se as equações (18) e (19):

$$v_{alimentação}(t) = i_{bobina}(t) R_{bobina} + L_{bobina}(x) \frac{di_{bobina}(t)}{dt} + i_{bobina}(t) \frac{dL_{bobina}(x)}{dx} \frac{dx}{dt} \quad (18)$$

ou

$$\frac{di_{bobina}(t)}{dt} = \frac{\left[ v_{alimentação}(t) - i_{bobina}(t) R_{bobina} \right] - \left( i_{bobina}(t) \frac{dL_{bobina}(x)}{dx} \frac{dx}{dt} \right)}{L_{bobina}(x)} \quad (19)$$

Como pode ser observado na equação (19), considerando-se que a tensão aplicada na bobina seja constante, a corrente será dependente da posição do entreferro durante o fechamento do contator.

O acoplamento entre os sistemas eletromagnético e mecânico é determinado pelo fluxo magnético  $\Phi_{contator}(t)$  através do entreferro. A força magnética  $F_{eletromagnética}(t)$  no núcleo móvel pode ser obtida pela integração do tensor de Maxwell, dado pela equação (20), onde  $A_{núcleo}$  é a área da seção transversal do núcleo.

$$F_{eletromagnética}(t) = \frac{\Phi_{contator}^2(t)}{2 \mu_0 A_{núcleo}} \quad (20)$$

Se a força eletromagnética é maior que a força mecânica contrária ao deslocamento, o núcleo móvel (junto com o sistema de contatos) será deslocado para a posição de fechamento.

### 3.1.2 Modelo matemático do sistema mecânico

A parte mecânica compreende todas as partes que constituem a parte móvel, que formam parte do circuito magnético, associado com as molas de abertura e as molas de contato. Inicialmente, quando a bobina é energizada a força gerada é insuficiente para mover o núcleo móvel. A corrente cresce exponencialmente. A indutância é praticamente constante, e o segundo termo da equação (16) é zero, pois não ocorre deslocamento.

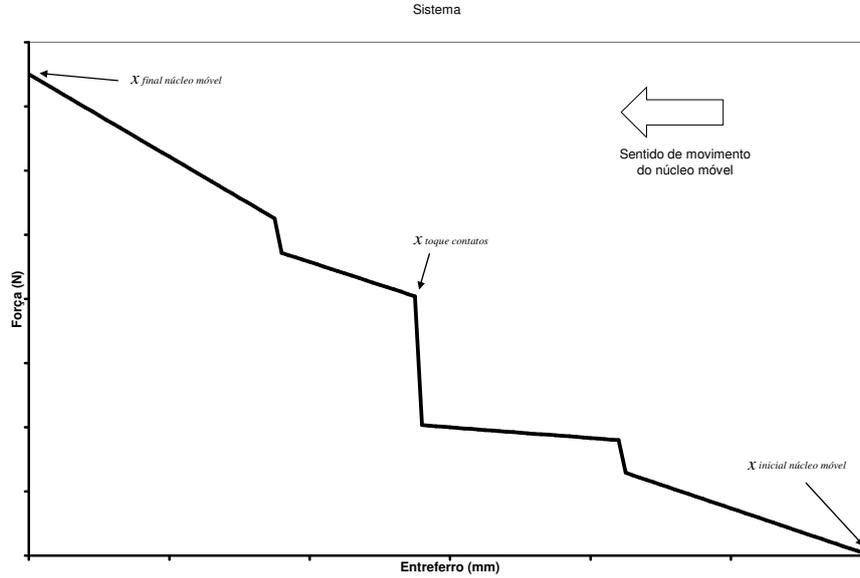
Quando uma corrente suficiente para vencer as forças que mantém o contator eletromagnético na posição de repouso está fluindo na bobina, o núcleo móvel começa a se mover. O contator eletromagnético opera de maneira que, para a primeira parte do caminho e enquanto os contatos estão juntos, a massa da parte móvel e os contatos são somados. Para o restante do caminho só se considera o núcleo móvel. Os mecanismos deste sistema massa-mola-amortecedor podem ser descritos simplesmente como equações diferenciais de segunda ordem, contendo parâmetros concentrados. As equações de movimento representam os limites dinâmicos dos mecanismos entre si, os quais são definidos por região de deslocamento do núcleo móvel como  $x_{inicial\ núcleo\ móvel}$ ,  $x_{toque\ contatos}$  e  $x_{final\ núcleo\ móvel}$  e são mostradas na Figura 12.

Assim para o deslocamento entre  $x_{inicial\ núcleo\ móvel}$  para  $x_{toque\ contatos}$  a força magnética é dada por (21), onde  $m_{núcleo\ móvel}$  é a massa do núcleo móvel,  $m_{contato}$  a massa do contato principal móvel, sendo que em um contator trifásico são necessários 3 e  $d$  é o coeficiente de amortecimento.

$$F_{eletromagnética}(x) = \frac{d^2x}{dt^2}(m_{núcleo\ móvel} + 3m_{contato}) + d \frac{dx}{dt} + k_{mola\ abertura} x \quad (21)$$

Após os contatos se tocarem, o núcleo móvel continua a se mover sobre a influência da força magnética, enquanto o movimento é determinado pela equação (21). Então, de  $x_{toque\ contatos}$  até  $x_{final\ núcleo\ móvel}$  para o núcleo móvel, a equação do deslocamento será dada por (22):

$$F_{\text{eletromagnética}}(x) = \frac{d^2x}{dt^2} m_{\text{núcleo móvel}} + d_{\text{núcleo móvel}} \frac{dx}{dt} + k_{\text{mola abertura}} x - k_{\text{mola contatos}} (x - x_{\text{toque contatos}}) \quad (22)$$



**Figura 12** – Regiões de deslocamento do núcleo móvel

Para os contatos móveis,

$$0 = \frac{d^2x_{\text{contatos}}}{dt^2} m_{\text{contato}} + d_{\text{contatos principais}} \frac{dx_{\text{contatos}}}{dt} + k_{\text{mola contatos}} (x_{\text{toque contatos}} - x_{\text{contatos}}) \quad (23)$$

A velocidade das partes móveis durante o fechamento pode ser calculada pela equação (24).

$$v_{\text{núcleo móvel}}(x) = \int \frac{F_{\text{eletromagnética}}(x,t) - F_{\text{sistema}}(x)}{m_{\text{total}}} dt \quad (24)$$

A energia cinética do sistema mecânico em movimento pode ser calculada por (25).

$$E_c(x) = \frac{m_{\text{total}} v_{\text{núcleo móvel}}^2(x)}{2} \quad (25)$$

No momento do toque dos contatos principais, a energia cinética será dada por (26).

$$E_c(x_{\text{toque contatos}}) = \frac{m_{\text{total}} v^2(x_{\text{toque contatos}})}{2} \quad (26)$$

O impacto da parte móvel dos contatos e da parte fixa, dependendo da energia cinética, causará uma deformação plástica e elástica nos contatos, bem como uma

separação entre eles. Se a energia cinética não for absorvida, causará uma ou mais repulsões dos contatos, conhecido como ricochete. O ricochete dos contatos é simulado com a elasticidade da colisão, ajustado como um parâmetro do modelo. O ricochete é produzido quando as posições dos contatos no tempo atendem às seguintes condições:

$$x_{inicial\ núcleo\ móvel} < x_{toque\ contatos} \quad (27)$$

$$x_{final\ núcleo\ móvel} \geq x_{toque\ contatos} \quad (28)$$

Devido à não-linearidade das forças do sistema de molas, o modelo deve calcular a resposta antes do toque dos contatos principais e, após o toque dos contatos, para a resposta completa do sistema de equações.

O modelo utilizado para o contator eletromagnético é mostrado na Figura 13 e será apresentando no item 4.2.1 do capítulo 4.

## 4 Simulação Simultânea do Contator Eletromagnético com Eletrônica em PSpice

### 4.1 Introdução

No capítulo 3 foi apresentada a modelagem matemática do contator eletromagnético com a finalidade de, através das equações matemáticas, apresentarem as não linearidades que ocorrem no processo de fechamento, tais como variação da indutância da bobina, a variação da força do sistema mecânico (molas e energia cinética). Devido à evolução tecnológica estão sendo utilizados circuitos eletrônicos para melhorar o desempenho de contadores eletromagnéticos, e por esta razão são necessárias novas ferramentas para o desenvolvimento dos circuitos eletrônicos. Se possível, deve ser realizada a simulação com um modelo matemático aproximado do contator eletromagnético para um projeto o mais próximo possível do real.

Neste capítulo será apresentado o modelo do contator em PSpice desenvolvido pelo Prof. Thomas Roschke em sua tese de doutorado [1], o qual permite a simulação em tensão contínua para validar o modelo matemático dual dos sistemas mecânico, elétrico e magnético, incluindo inclusive as suas não linearidades. Durante a pesquisa bibliográfica, a tese e os artigos publicados pelo Prof. Thomas Roschke foram os únicos trabalhos cujo modelo do contator foi realizado em PSpice.

A utilização do PSpice na simulação de sistemas mecânicos, magnéticos e não lineares, utilizando modelos equivalentes de sistemas, tornou possível a simulação de sistemas multi-físicos, onde as influências do modelo mecânico, magnético e elétrico podem ser avaliados em uma única simulação.

Em 1999, a WEG Acionamentos, solicitou ao Prof. Thomas Roschke que realizasse uma consultoria de pesquisa e desenvolvimento de um modelo no PSpice que possibilitasse a simulação do contator junto com circuitos eletrônicos. O modelo foi ajustado para os parâmetros do contator WEG em 2000. Por motivo de sigilo tecnológico, entre a WEG e o Prof. Thomas, o circuito não pode ser descrito em detalhes.

Com esse modelo foi possível simular os circuitos eletrônicos e verificar simultaneamente a resposta do contator eletromagnético em outros domínios físicos. Este tipo de simulação foi chamado de simulação simultânea. Nesta dissertação este modelo será utilizado como um componente do PSpice. Este tipo de simulação permite avaliar, de

forma global, tanto o comportamento do contator eletromagnético quanto do controle eletrônico em várias situações. Na pesquisa bibliográfica realizada, não se encontraram publicações adicionais ao do Prof. Roschke, abordando a simulação simultânea do contator eletromagnético e de sua eletrônica de controle usando o PSpice.

Com a simulação simultânea tornou-se possível a avaliação de controles eletrônicos e a sua eficácia, os quais foram simulados e testados em protótipos desde então. Para este trabalho foi selecionado o controle de tensão e como estratégia de controle, o controle em um ciclo. A utilização do controle em um ciclo é outro diferencial, pois também não foram encontrados outros trabalhos na literatura científica utilizando este método para o controle de contadores eletromagnéticos.

O objetivo é simular o contator eletromagnético e o circuito de controle em uma faixa de tensão ampla de 85 V a 275 V, verificando os problemas relacionados ao controle dinâmico durante o fechamento do contator.

Também se tem interesse que os parâmetros medidos sejam independentes da tensão de alimentação dentro da faixa estipulada, isto é, tenham o mesmo tempo de fechamento, a mesma velocidade de toque dos núcleos e a mesma corrente de pico no fechamento. Nas simulações foi utilizado um circuito de potência simples composto de dois interruptores, um transistor MOSFET como interruptor ativo e um diodo como interruptor passivo (roda livre). O circuito de controle foi desenvolvido neste trabalho e o modelo do contator eletromagnético da WEG em PSpice foi desenvolvido pelo Prof. Thomas Roschke [1].

A intenção das simulações é apresentar as possibilidades de desenvolvimento do controle e simulação simultânea de vários subsistemas juntamente com o circuito eletrônico. Foram excluídos alguns circuitos eletrônicos, tais como o de monitoração de tensão, responsável por gerar a faixa de tensão de funcionamento do contator. Outros circuitos foram simplificados, devido à sua função simples, como por exemplo, a fonte de alimentação e oscilador.

As primeiras simulações foram realizadas sem o controle de tensão para mostrar a necessidade do controle no fechamento do contator eletromagnético, tanto para alimentação em tensão contínua como em tensão alternada, as quais demonstraram que somente em uma pequena faixa de tensão poderão ser garantidas as condições para um baixo ricochete. A seguir foram realizadas as simulações com controle de tensão para alimentação em tensão contínua, demonstrando que pode ser utilizado como uma solução

para resolver o problema de variação da dinâmica de funcionamento do contator. Com estes resultados foram definidos os valores meta dos parâmetros para comparação.

A seguir foram realizadas as simulações com tensão alternada com controle de tensão para várias condições, pois devido à ondulação da tensão, foi necessário realizar várias simulações considerando duas hipóteses: primeiro a inclusão de um filtro capacitivo para diminuir a ondulação da tensão retificada, o qual, devido à alta corrente necessária para a carga inicial do capacitor e a manutenção da tensão, tornaram a solução pouco prática. A segunda foi realizar a aproximação do valor rms da tensão de alimentação para a geração do sinal de controle da chave proporcionalmente ao valor rms. Para a comprovação do método foram realizadas simulações com um valor constante de razão cíclica proporcional à tensão de alimentação imposta por uma fonte de tensão. Em seguida, realizaram-se simulações com o sinal fornecido por uma fonte de corrente contínua externa para a geração do valor rms e, por último, a aproximação pelo pico da tensão retificada.

## 4.2 Modelo em PSpice

SPICE é uma abreviação de **S**imulation **P**rogram with **I**ntegrated **C**ircuit **E**mphasis. É um tipo de programa de computador que permite ao usuário realizar a simulação de circuitos eletrônicos. Em 1984, a Microsim Corporation, na Califórnia, desenvolveu uma versão do SPICE para computadores pessoais chamada **PSpice**. PSpice é derivado do original SPICE que pode ser executado em computadores pessoais. Nos anos subsequentes, o PSpice se popularizou devido a sua disponibilidade para os PC's, tornando-se um padrão industrial sem a necessidade de normalização, comitês ou burocracia.

### 4.2.1 Modelo do contator eletromagnético em PSpice

Uma abordagem comum para a análise de contadores eletromagnéticos é o uso de sistemas análogos, desde que exista uma boa base teórica e de métodos numéricos para a solução destes sistemas, junto com a integração de equações diferenciais não-lineares usando fontes dependentes. A simulação deste tipo de modelo é feita por simuladores de circuitos baseados na linguagem Spice, na qual é possível a simulação simultânea de subsistemas elétricos, eletrônicos, magnéticos e mecânicos.

## 4.2.2 Funções e equações diferenciais no PSpice

O comportamento da maioria dos sistemas pode ser descrito por equações algébricas e diferenciais. Equações diferenciais de alta ordem podem ser transformadas em várias equações de primeira ordem, através do processo de integração das derivadas chega-se a solução destes sistemas de equações diferenciais. Um dispositivo integrador pode ser realizado usando uma fonte de corrente controlada, na qual é conectada a um capacitor. Em muitos casos, um resistor de alta resistência em paralelo pode ser necessário para dar estabilidade numérica ao simulador.

## 4.2.3 Descrição matemática

O modelo apresentado a seguir está relacionado com os subsistemas do contator eletromagnético da Figura 13 [1], onde  $m, r, c$  são a massa, o coeficiente de atrito viscoso e a compliância da parte móvel do contator. A lei de Faraday fornece o acoplamento entre os subsistemas elétrico e magnético, representado pela equação (29).

$$V_{bobina} = \frac{d\Psi}{dt} = N \frac{d\Phi}{dt} \quad (29)$$

onde  $V_{bobina}$  é a tensão na bobina,  $\Psi$  é o fluxo magnético concatenado,  $\Phi$  é o fluxo magnético e  $N$  é o número de espiras. A força magnetomotriz  $\Theta$  é obtida pela Lei de Ampère, desconsiderando a corrente de deslocamento, e é expressa pela equação (30) onde  $H$  é o campo magnético.

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{s} = N i_{bobina} = \Theta \quad (30)$$

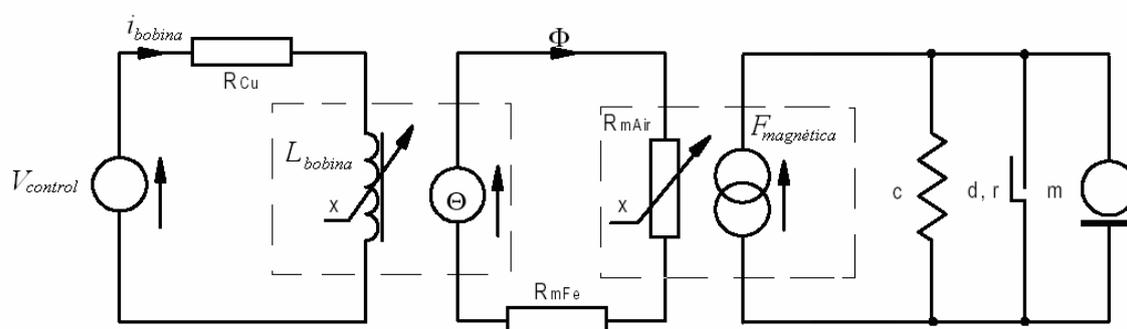
O sistema elétrico consiste de um circuito incluindo a resistência do enrolamento  $R_{bobina}$  e a indutância não-linear  $L_{bobina}(i_{bobina}(t), x(t))$  do enrolamento. Empregando a lei de tensões de Kirchoff no circuito elétrico:

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{1}{N} (V_{control} - i_{bobina} R_{bobina}) \quad (31)$$

E através do circuito magnético a corrente através da bobina é dada por:

$$i_{bobina} = \frac{1}{N} \sigma \Phi (R_{mAir} + R_{mFe}) \quad (32)$$

Devido às não-linearidades do circuito magnético, a modelagem do subsistema magnético é difícil. Nos casos simples, o circuito magnético é representado por duas relutâncias em série: uma para o núcleo laminado, o qual depende da indução magnética,  $R_{mFe}$ , e, a outra relutância que representa o entreferro e que depende diretamente do tamanho do entreferro,  $R_{mAir}$ .



**Figura 13** – Modelo do contator eletromagnético [1].

O circuito magnético descrito é uma simplificação que é somente válida durante o processo de fechamento e não pode ser aplicado para analisar o contator eletromagnético fechado. A indutância de dispersão e o campo magnético espreado são simplificados para uma constante  $\sigma$  na equação (32), a qual diminui o fluxo magnético. As relutâncias magnéticas são determinadas por parâmetros obtidos através de medições especiais e podem ser aproximadas por polinômios.

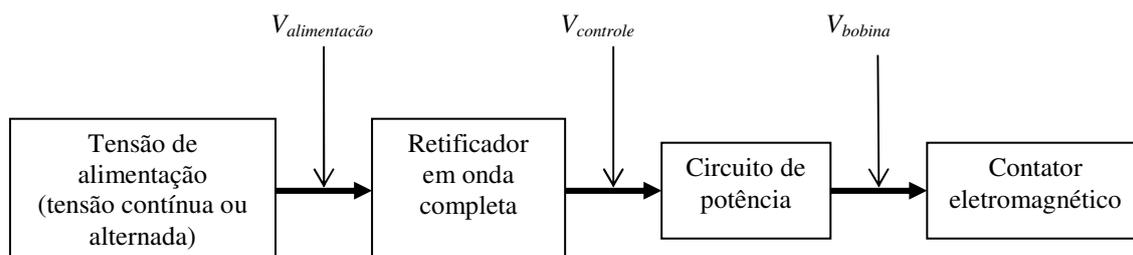
O acoplamento entre os sistemas magnético e mecânico é determinado pelo fluxo magnético  $\Phi$  através do entreferro. A força magnética  $F_{magnética}$  no núcleo móvel é dada pela integração do tensor de Maxwell:

$$F_{magnética} = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 A} \quad (33)$$



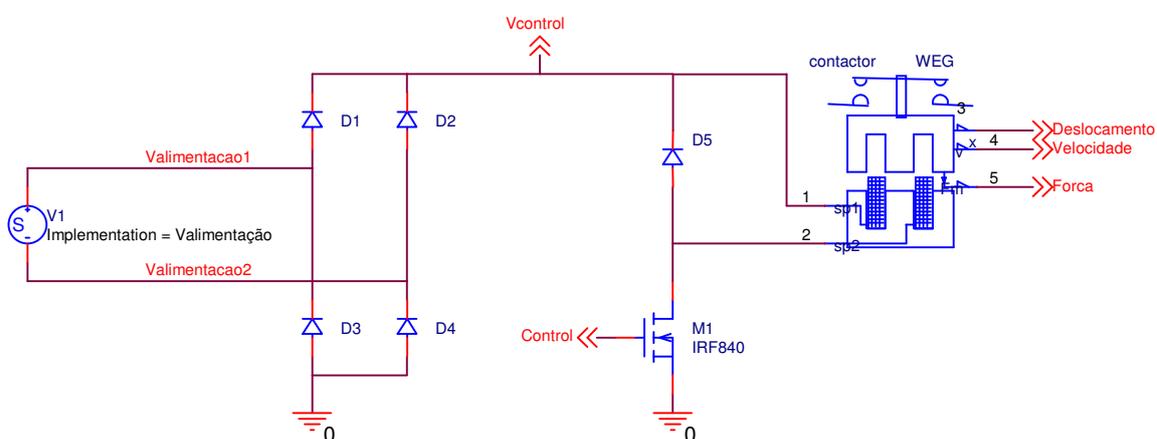
podendo ser uma tensão contínua sem ondulação ou uma tensão contínua pulsante com ou sem filtro capacitivo. A tensão na bobina  $V_{bobina}$  é a tensão aplicada na bobina ou a tensão equivalente resultante do controle eletrônico do circuito de potência.

Para as simulações do contator eletromagnético em tensão contínua ou tensão contínua pulsante será considerado que  $V_{control} = V_{bobina}$ , uma vez que o circuito de potência estará com o interruptor ligado durante todo o fechamento.



**Figura 15** – Diagrama de blocos do circuito para simulação e a definição das tensões.

A Figura 16 mostra o circuito de potência utilizado nas simulações com PSpice, onde é mostrada a fonte de alimentação, os retificadores e os interruptores utilizados para o controle do modelo do contator eletromagnético.



**Figura 16** – Circuito de simulação do modelo em PSpice do contator eletromagnético WEG.

### 4.3.1 Resultados

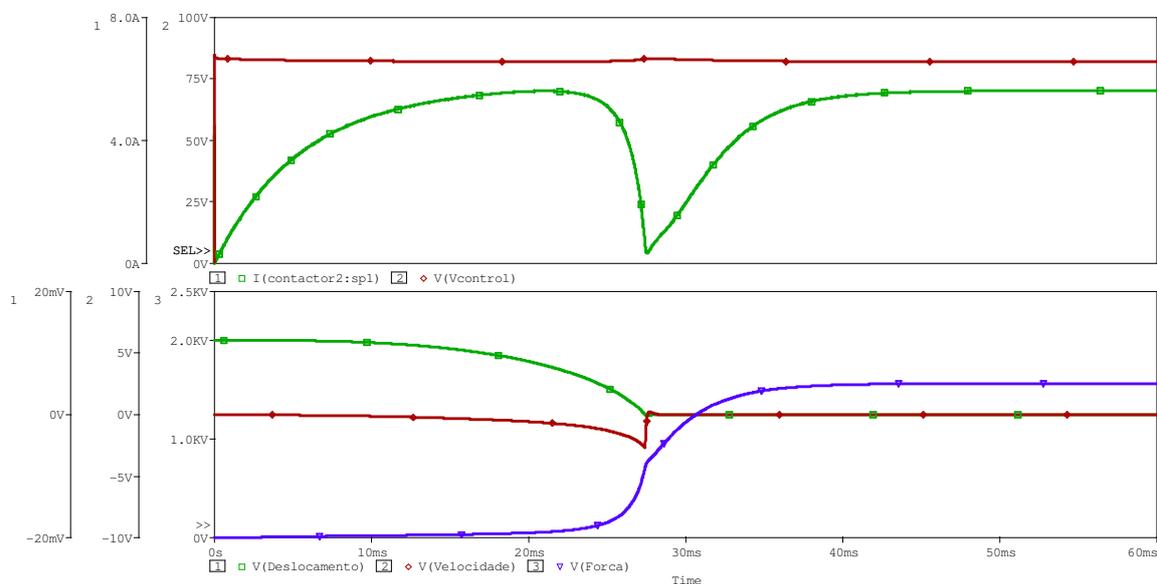
As simulações foram realizadas para alguns valores de tensão significantes na faixa de 85 a 275 V em tensão contínua, nos seguintes passos 85 V, 100 V, 150 V, 200 V, 250 V e 275 V. O objetivo destas simulações é analisar a variação da corrente de fechamento, do tempo de fechamento e da velocidade no momento do toque dos núcleos.

A Tabela 3 apresenta os resultados dos parâmetros obtidos nas simulações com alimentação em tensão contínua. A corrente de fechamento é o valor de pico da corrente na bobina durante a operação de fechamento. O tempo de fechamento é obtido do tempo decorrido entre a alimentação do contator e o ponto onde ocorre a rápida variação da velocidade de fechamento. A velocidade no momento do toque dos núcleos é obtida pelo pico da velocidade, ocasionada pela restrição do movimento do núcleo móvel. A velocidade no momento do toque dos contatos fixos não está disponível no modelo em PSpice.

**Tabela 3** – Resultados de simulação do contator eletromagnético variando a tensão de alimentação.

Tensão de alimentação (V)	Corrente de pico (A)	Tempo de fechamento (ms)	Velocidade de impacto (m/s)
85	5,61	27,36	2,67
100	6,55	23,39	3,12
150	9,43	16,66	4,42
200	12,01	13,43	5,04
250	14,42	11,57	6,10
275	15,72	10,86	6,41

O primeiro gráfico da Figura 17 mostra na curva em vermelho a tensão de controle e na curva em verde a corrente na bobina.

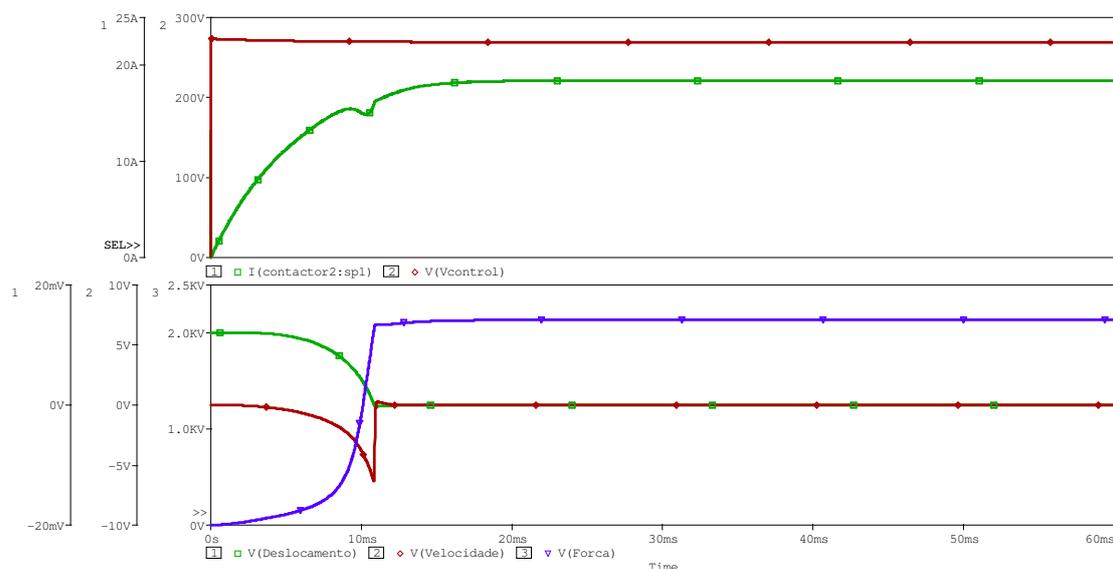


**Figura 17** – Simulação do contator eletromagnético com tensão contínua em 85 V.

No segundo gráfico, também na Figura 17, a curva em **vermelho** representa a **velocidade** do núcleo móvel, a curva em **verde** o **deslocamento** ou a variação do entreferro e a curva em **azul** a **força eletromagnética** gerada pela bobina do contator

eletromagnético. Como se analisa os parâmetros físicos duais do sistema mecânico original, as unidades nos gráficos são parâmetros elétricos, sendo assim considerou-se:  $\text{mm} \Rightarrow \text{mV}$ ,  $\text{V} \Rightarrow \text{m/s}$  e  $\text{kV} \Rightarrow \text{kN}$ . Em todas as curvas, o modelo em PSpice do contator eletromagnético foi simulado com uma tensão contínua de 85 V.

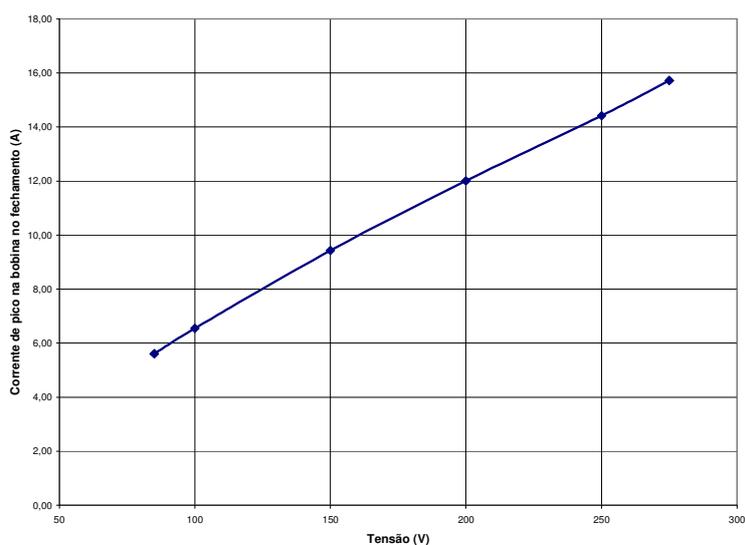
A Figura 18 mostra a simulação para uma tensão contínua de 275 V, onde se percebe claramente que a velocidade aumenta e o tempo de fechamento diminui, fato que conforme exposto, aumenta o ricochete.



**Figura 18** - Simulação do contator eletromagnético com tensão contínua em 275 V.

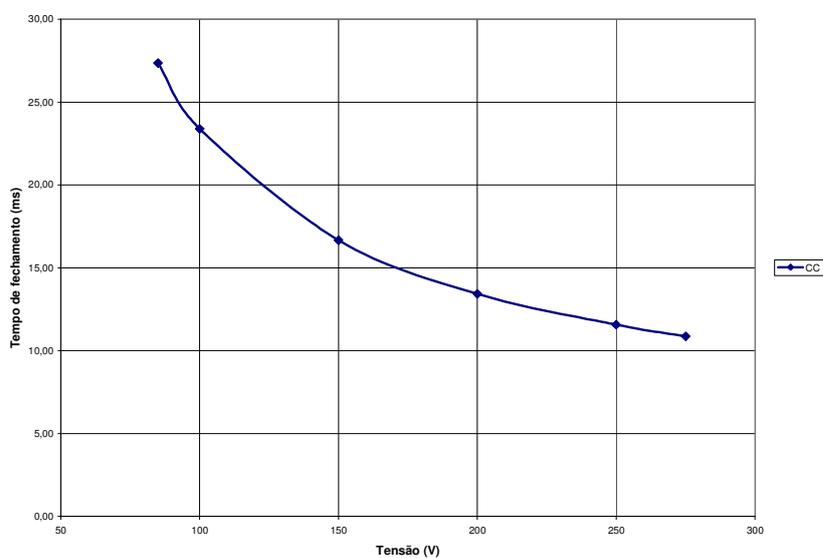
Para mostrar de forma gráfica a variação dos valores de corrente, tempo e velocidade, foram gerados vários gráficos para mostrar a resposta do contator eletromagnético quando a tensão de alimentação é variada.

A Figura 18 mostra que a corrente de pico durante o fechamento aumenta linearmente com a tensão de alimentação, fato que em um contator eletromagnético real levaria a uma perda por efeito joule bastante acentuada. Considerando como nominal a perda por efeito joule na tensão de 85 V, o valor obtido para o caso da alimentação em 275 V de perda seria 7,85 vezes maior.



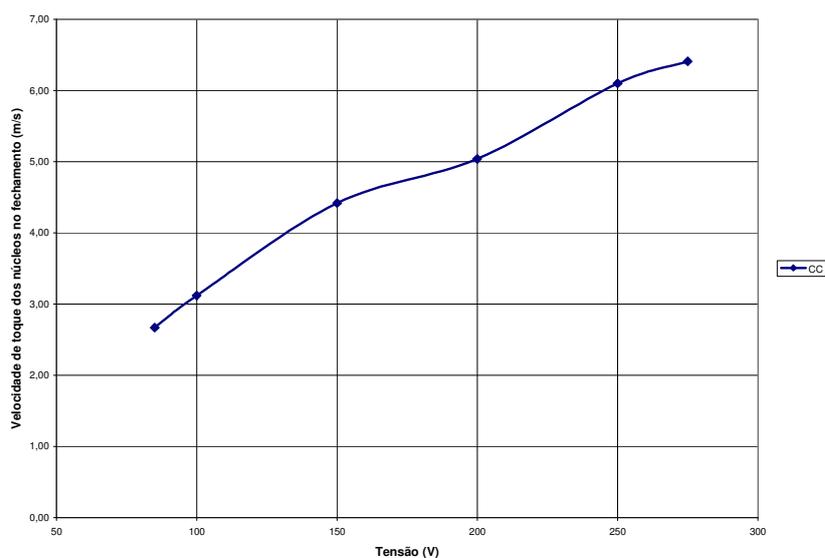
**Figura 19** – Corrente de pico na bobina em função da tensão de alimentação contínua.

A Figura 20 mostra a variação do tempo de fechamento do contator eletromagnético, diminuindo com o aumento da tensão. O tempo cai de 27,36 ms para 10,86 ms, ou seja, 2,51 vezes menor.



**Figura 20** – Tempo de fechamento em função da tensão de alimentação contínua.

Na Figura 21, observa-se que a velocidade no momento do toque dos núcleos aumenta, de forma aproximadamente linear, conforme a tensão aumenta.



**Figura 21** – Velocidade no momento do toque dos núcleos em função da tensão de alimentação contínua.

Com isso, o ricochete dos contatos principais do contator eletromagnético tende a aumentar com a tensão de alimentação, pois é uma função da velocidade dos contatos, e conseqüentemente, da velocidade do núcleo móvel. Em um contator eletromagnético real, a velocidade de toque dos contatos é menor que a velocidade do núcleo, pois os contatos se tocam antes de ocorrer o fechamento total do contator eletromagnético. Porém, este fato não invalida as conclusões anteriores.

#### 4.4 Simulação do contator eletromagnético em tensão alternada

Nestas simulações verifica-se também o funcionamento para uma onda de tensão contínua pulsante proveniente da retificação da tensão alternada, tal como mostrado na Figura 16. As simulações do contator eletromagnético com alimentação em tensão contínua pulsante também têm o mesmo objetivo das simulações em tensão contínua, demonstrar que os parâmetros variam conforme o aumento da tensão.

Os valores de tensão alternada utilizados são valores médios quadráticos equivalentes aos valores aplicados na alimentação em tensão contínua. As respostas dinâmicas são diferentes devido à forma de onda e ao ponto onde a tensão alternada inicia a simulação (pico ou passagem por zero).

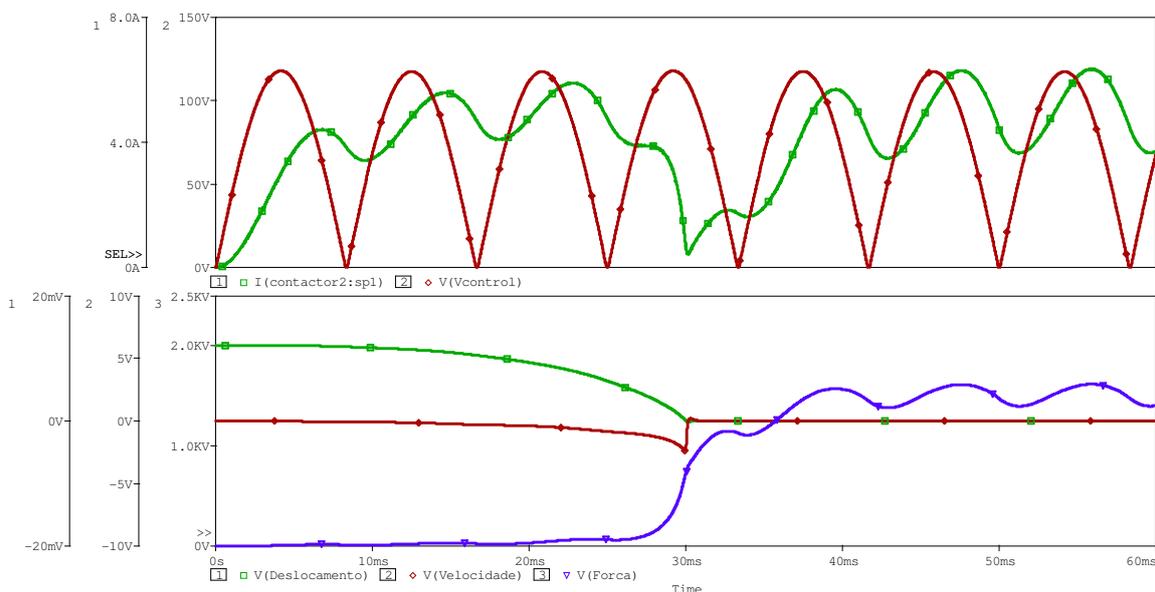
#### 4.4.1 Resultados

Da mesma forma que nas simulações em corrente contínua, variando-se os valores na faixa de 85 a 275 V, assim também foi feito nas simulações com tensão alternada. A Tabela 4 mostra os resultados de todas as simulações realizadas para a alimentação em tensão alternada iniciando na passagem por zero, na qual se observam as mesmas tendências das simulações em corrente contínua.

**Tabela 4** – Resultados de simulação do contator eletromagnético variando a tensão de alimentação alternada iniciando na passagem por zero.

Tensão de alimentação (V)	Corrente de pico (A)	Tempo de fechamento (ms)	Velocidade de impacto (m/s)
85	5,90	30,06	2,33
100	6,64	25,15	2,91
150	10,05	17,61	3,94
200	11,41	14,05	5,34
250	13,33	11,09	5,40
275	14,73	10,22	5,49

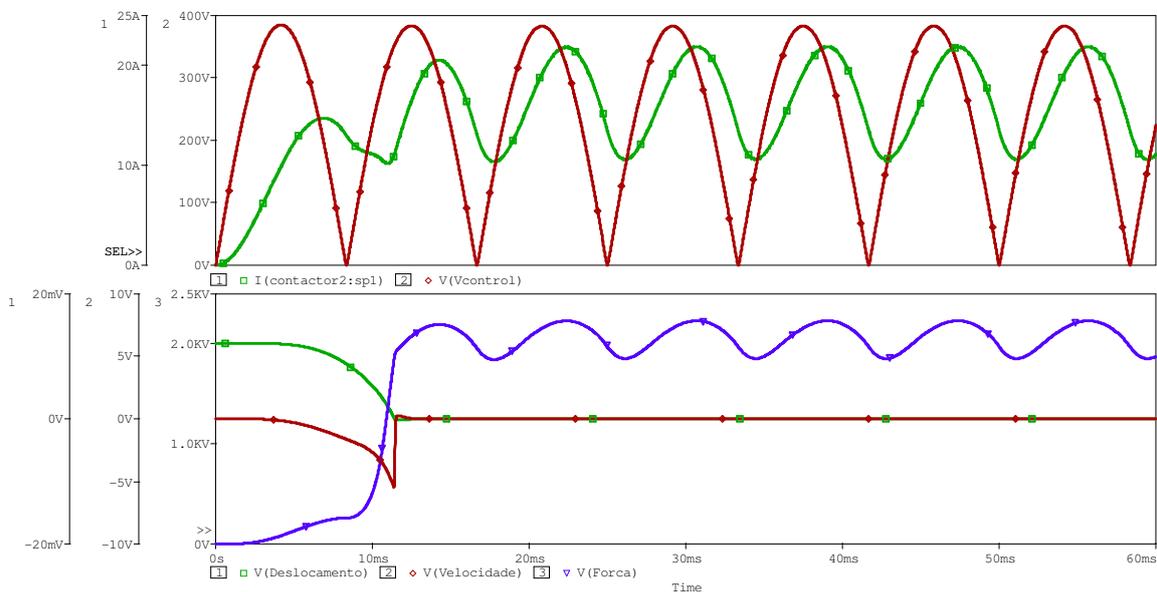
A Figura 22 mostra os resultados para a alimentação em tensão alternada com 85 V. Apesar da alimentação em tensão alternada, a tensão e corrente na bobina são contínuas, resultado da utilização do retificador de onda completa.



**Figura 22** – Simulação do contator eletromagnético com tensão alternada em 85 V iniciando a simulação na passagem por zero.

A Figura 23 mostra os resultados para a simulação em 275 V. Pode-se perceber claramente que, assim como obtido para tensão contínua, a corrente de pico no fechamento

aumenta, o tempo de fechamento diminui e a velocidade de fechamento no momento do toque dos núcleos aumenta.



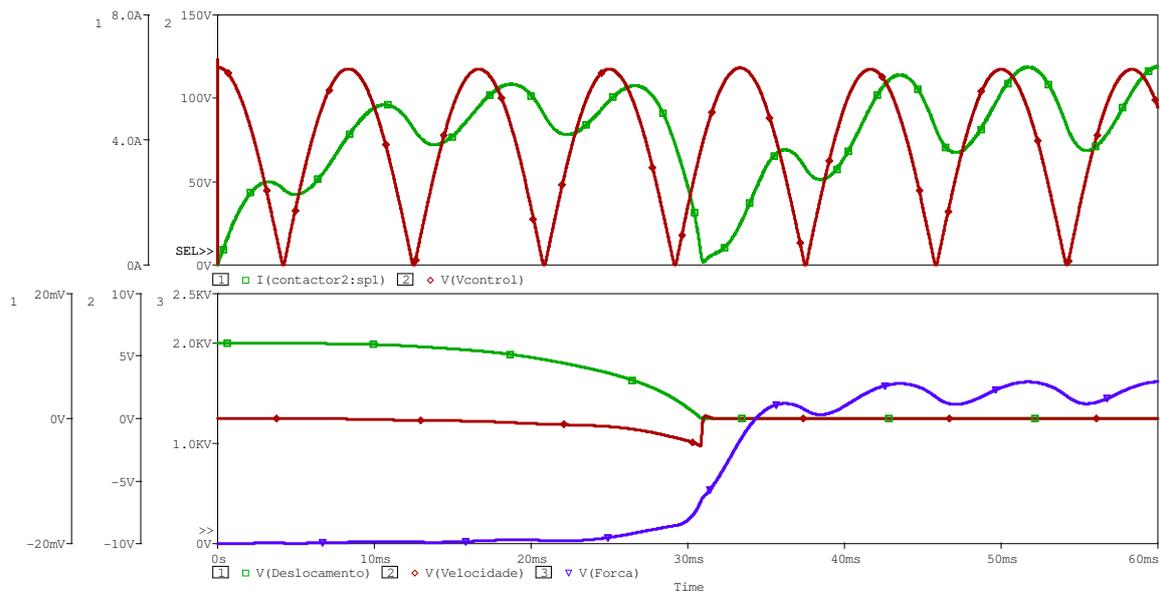
**Figura 23** - Simulação do contator eletromagnético com tensão alternada em 275 V iniciando a simulação na passagem por zero.

A Tabela 5 mostra os valores de todas as simulações realizadas para a avaliação da alimentação em tensão alternada com início das simulações no pico da tensão.

**Tabela 5** – Resultados de simulação do contator eletromagnético variando a tensão de alimentação alternada iniciando no pico.

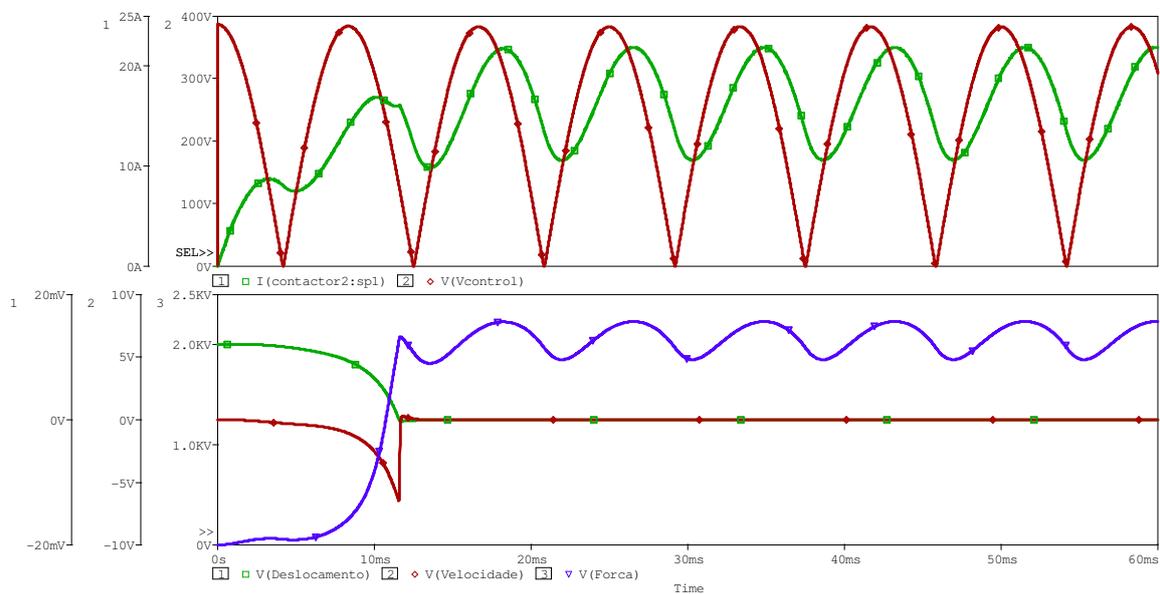
Tensão de alimentação (V)	Corrente de pico (A)	Tempo de fechamento (ms)	Velocidade de impacto (m/s)
85	5,79	30,88	2,20
100	6,88	26,26	2,92
150	9,25	18,35	4,35
200	10,68	14,62	4,50
250	15,62	12,85	6,05
275	16,91	11,52	6,56

A Figura 24 mostra os resultados para a simulação do contator eletromagnético na tensão de 85 V com simulação iniciada no pico. Estes resultados são diferentes dos obtidos para os iniciados na passagem por zero devido à defasagem no início da alimentação do contator eletromagnético.



**Figura 24** - Simulação do contator eletromagnético com tensão alternada em 85 V iniciando a simulação no pico.

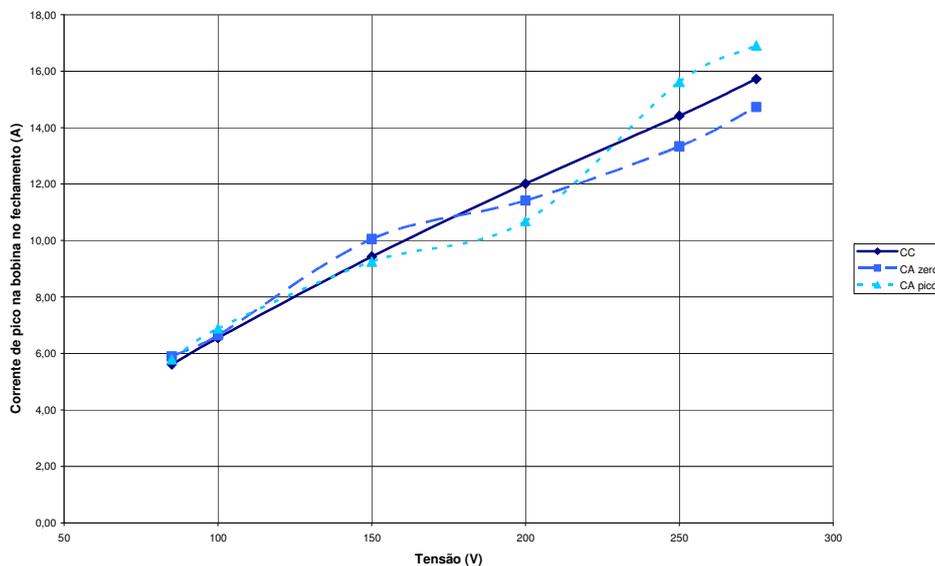
A Figura 25 mostra os resultados para a simulação do contator eletromagnético na tensão de 275 V, nos quais, tiveram as mesmas variações para o caso com início da simulação na passagem por zero.



**Figura 25** - Simulação do contator eletromagnético com tensão alternada em 275 V iniciando a simulação no pico.

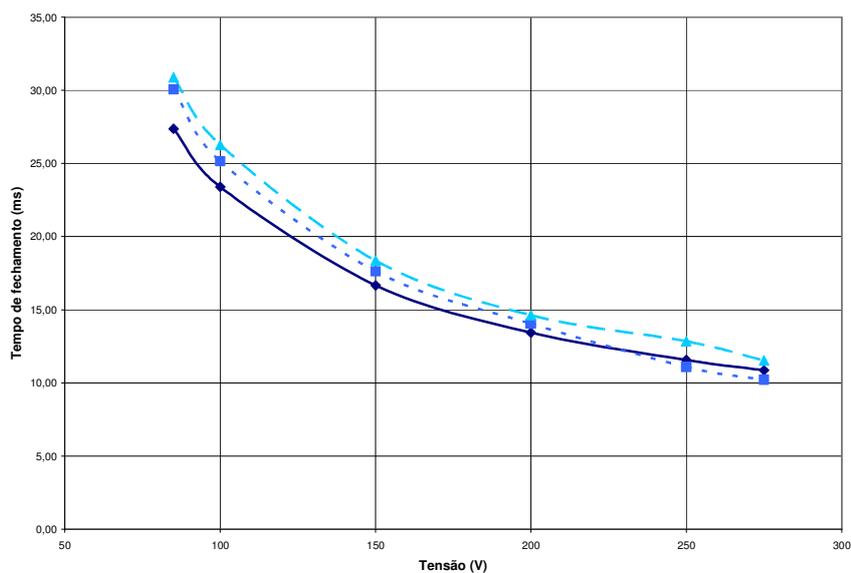
A Figura 26 mostra as curvas de variação da corrente de pico para a variação da tensão contínua, tensão alternada com início da simulação na passagem por zero e também

no pico da tensão. Nos três casos, observa-se a mesma tendência de que a corrente aumenta com a tensão.



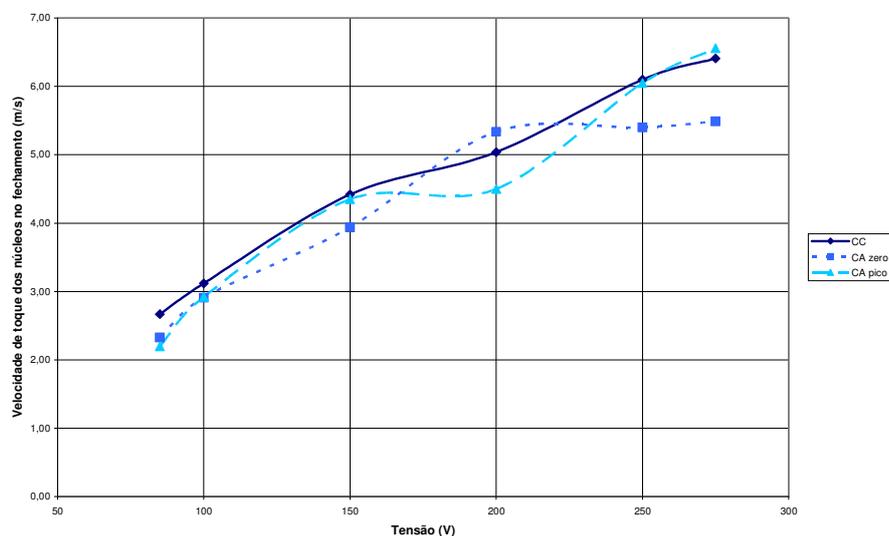
**Figura 26** – Corrente de pico na bobina em função da tensão de alimentação alternada iniciando a simulação na passagem por zero e também no pico.

Com o aumento da corrente, aumenta o fluxo magnético e conseqüentemente a força de atração do circuito magnético, ocasionando tempos de fechamento menores e velocidades maiores, conforme a Figura 27 e Figura 28.



**Figura 27** – Tempo de fechamento em função da tensão de alimentação alternada iniciando a simulação na passagem por zero e também no pico.

A velocidade no momento do fechamento dos núcleos tem o mesmo perfil de variação que o apresentado em corrente contínua, reforçando as mesmas conclusões para corrente contínua, isto é, aumento do ricochete dos contatos.



**Figura 28** – Velocidade no momento do fechamento dos núcleos em função da tensão de alimentação alternada iniciando a simulação na passagem por zero e também no pico.

As simulações, tanto em tensão contínua como alternada, mostraram que um contator eletromagnético sem qualquer tipo de controle eletrônico não pode ser utilizado em uma faixa ampla de tensão de alimentação. Primeiro, a corrente elevada na bobina levaria a um aquecimento excessivo, ocasionando menor número de manobras por hora, diminuição da vida útil e possível queima da bobina. Segundo, com a grande variação da velocidade de fechamento, não seria possível fazer o casamento mecânico para ter um baixo ricochete, aumentando o desgaste dos contatos. Por último, a grande força eletromagnética gerada poderia levar à diminuição significativa da vida mecânica do contator eletromagnético. Por esta razão, contadores eletromagnéticos sem controle geralmente são projetados para uma faixa de tensão adequada para garantir uma vida útil global do contator eletromagnético.

## 4.5 O controle em um ciclo

### 4.5.1 Introdução

O controle em um ciclo é um método de controle não linear, o qual permite controlar a razão cíclica em tempo real, uma vez que a cada ciclo o valor médio da tensão que alimenta o contator é igual à referência.

A técnica de controle em um ciclo foi apresentada na literatura em dois artigos publicados em 1995 [13, 17]. Foi desenvolvida por Keyeu Smedley e Slobodan Cuk como um novo método para controle de fontes chaveadas. Assim como o controle do fechamento de um contator eletromagnético, as fontes chaveadas são sistemas dinâmicos não lineares.

Não há na literatura um caminho padrão para modelar e controlar sistemas não lineares. A técnica usual é linearizar o sistema e aplicar um sinal de realimentação linear, sendo que este tipo de estratégia de controle pode não será adequada para muitos sistemas não lineares, podendo comprometer a robustez. Uma outra razão para se utilizarem técnicas não lineares é que sistemas não lineares pulsantes são mais robustos, possuindo uma resposta dinâmica mais rápida e melhor rejeição das perturbações na entrada.

A técnica de controle em um ciclo torna-se bastante interessante para controle da tensão aplicada à bobina do contator eletromagnético devido à rápida resposta dinâmica, fundamental para a obtenção de um bom casamento dos sistemas eletromagnético e mecânico do contator eletromagnético.

### 4.5.2 Teoria geral do controle em um ciclo

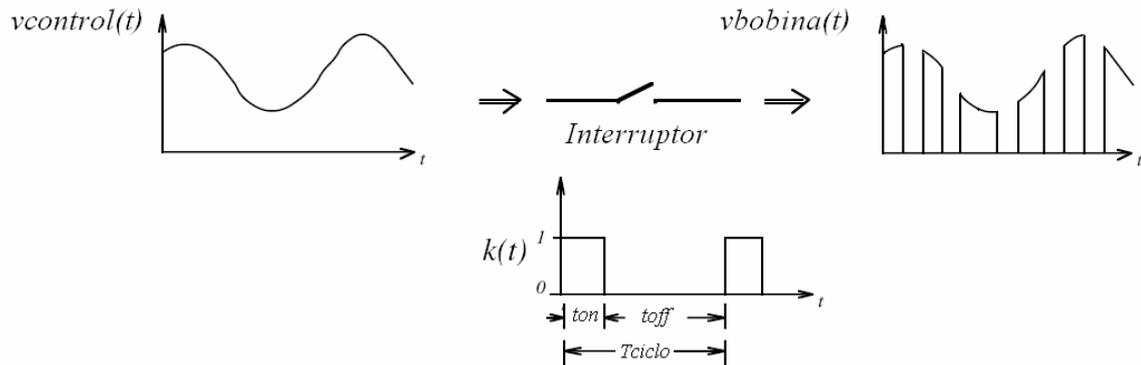
Considera-se um interruptor que opera de acordo com uma função  $k(t)$  dada por (34), operando em uma frequência de comutação  $f_s = 1/T_{ciclo}$  [13, 17]. Em cada período  $T_{ciclo}$ , o interruptor está habilitado para conduzir em um intervalo de tempo  $t_{on}$  e está desabilitado por um intervalo de tempo  $t_{off}$ , conforme (35).

$$k(t) = \begin{cases} 1 & 0 < t < t_{on} \\ 0 & t_{on} < t < T_{ciclo} \end{cases} \quad (34)$$

$$t_{on} + t_{off} = T_{ciclo} \quad (35)$$

A razão cíclica, definida por  $D = t_{on} / T_{ciclo}$ , modula o sinal de entrada  $v_{control}(t)$  por um sinal de controle analógico dado por  $v_{ref}(t)$  [13, 17]. A frequência e a largura de pulso do sinal de saída  $v_{bobina}(t)$  são os mesmos da função do interruptor  $k(t)$ , enquanto o envelope da tensão  $v_{bobina}(t)$  é  $v_{control}(t)$ , conforme mostrado na Figura 29 e na equação (36).

$$v_{bobina}(t) = k(t) v_{control}(t) \quad (36)$$



**Figura 29** – Representação gráfica da função do interruptor.

Como a frequência de comutação  $f_s$  é muito maior que a banda de frequência do sinal de entrada  $v_{control}(t)$ , ou do sinal de controle  $v_{ref}(t)$ , então o sinal  $v_{bobina}(t)$  que efetivamente passa pelo interruptor é dado por (37).

$$v_{bobina}(t) = \frac{1}{T_{ciclo}} \int_0^{t_{on}} v_{control}(t) dt \approx v_{control}(t) \frac{1}{T_{ciclo}} \int_0^{t_{on}} dt \quad (37)$$

Definindo-se  $d(t)$  como (38), pode-se escrever (37) como (39).

$$\frac{1}{T_{ciclo}} \int_0^{t_{on}} dt = d(t) \quad (38)$$

$$v_{bobina}(t) = v_{control}(t) d(t) \quad (39)$$

Faz-se o sinal de referência igual a  $d(t)$ , a equação (39) pode ser escrita como (40), isto é, o sinal de referência  $v_{ref}(t)$  é o modulador.

$$d(t) = v_{ref}(t) \quad (40)$$

Substituindo-se (40) em (39), obtém-se (41):

$$v_{bobina}(t) = v_{control}(t) v_{ref}(t) \quad (41)$$

O sinal de saída  $v_{bobina}(t)$  do interruptor é um produto do sinal de entrada  $v_{control}(t)$  e do sinal de controle  $v_{ref}(t)$ , e é caracterizado por ser não-linear. Se o sinal de controle  $v_{ref}(t)$  é constante, por exemplo,  $v_{ref}(t) = D$ , o sinal de saída da chave é  $D v_{control}(t)$ . Entretanto, perturbações existem no sinal  $v_{control}(t)$ , e por isso, o sinal de saída  $v_{bobina}(t)$  contém os mesmos distúrbios.

Se a razão cíclica do interruptor é alterada de tal maneira que a integração do sinal recortado pela ação do interruptor for igual à integração do sinal de controle em cada ciclo, tem-se a equação (42).

$$\int_0^{t_{on}} v_{control}(t) dt = \int_0^{T_{ciclo}} v_{ref}(t) dt \quad (42)$$

Desta maneira o valor médio do sinal recortado pelo interruptor é igual ao valor médio do sinal de controle, dado pela equação (43).

$$\frac{1}{T_{ciclo}} \int_0^{t_{on}} v_{control}(t) dt = \frac{1}{T_{ciclo}} \int_0^{T_{ciclo}} v_{ref}(t) dt \quad (43)$$

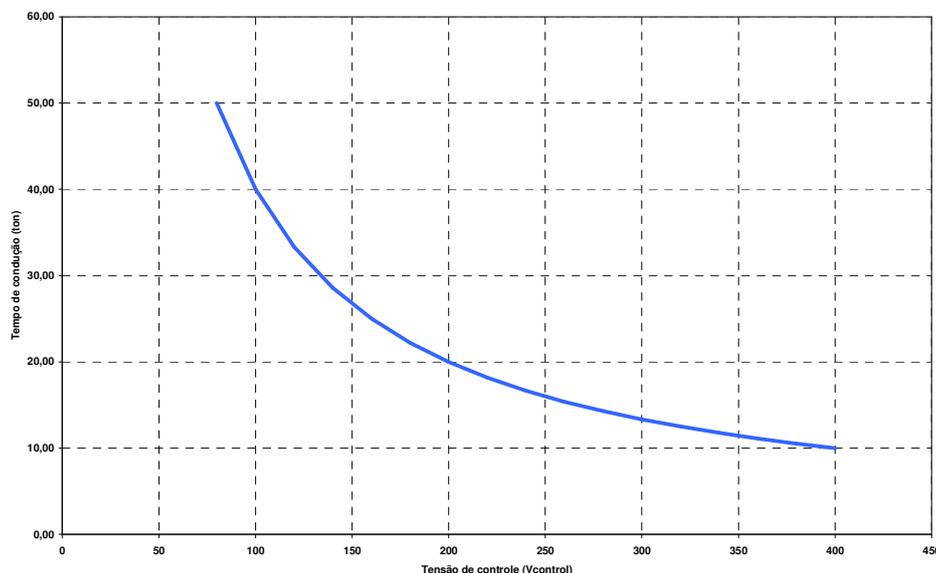
Por esta razão, o sinal de saída é instantaneamente controlado dentro de um ciclo de comutação do interruptor de modo que, com a ação do sistema de controle, o sinal de saída  $v_{bobina}(t)$  seguiu a referência  $v_{ref}(t)$ , conforme a equação (44).

$$v_{bobina}(t) = \frac{1}{T_{ciclo}} \int_0^{t_{on}} v_{control}(t) dt = \frac{1}{T_{ciclo}} \int_0^{T_{ciclo}} v_{ref}(t) dt = v_{ref}(t) \quad (44)$$

A técnica que realiza o controle segundo este conceito é chamada de controle em um ciclo, sendo o sinal efetivo de saída o sinal de referência. O interruptor rejeita totalmente o sinal de entrada e deixa passar todo o sinal  $v_{ref}(t)$ . Conseqüentemente, a técnica de controle de um ciclo transforma a ação de um interruptor não linear em um sistema linearizado.

Fazendo a integração na equação (44), obtém-se a equação (1), aqui representada pela equação (45).

$$t_{on} = \frac{v_{ref}(t)}{v_{control}(t)} T_{ciclo} \quad (45)$$

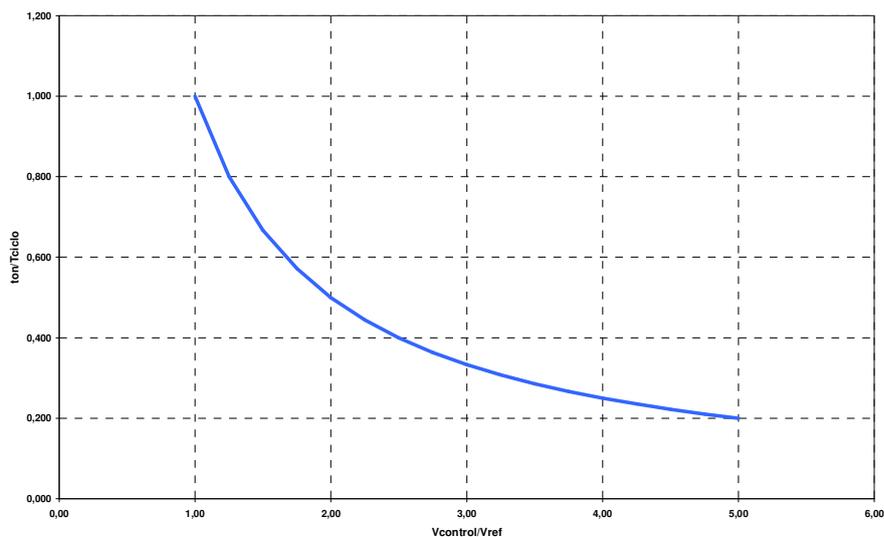


**Figura 30** – Curva do tempo de condução em função da tensão de controle.

Com isso, demonstra-se que o controle de um ciclo pode ser usado para manter a mesma tensão na bobina controlando o tempo de condução do interruptor pela equação (45). Considera-se agora a faixa de tensão de alimentação pretendida de 85 V a 275 V em tensão contínua (a qual será aproximadamente a mesma faixa da tensão de controle). Considerando-se  $v_{ref}(t) = 80\text{ V} = V_{ref}$ ,  $T_{ciclo} = 50\ \mu\text{s}$ , pode-se representar graficamente a variação do tempo de condução  $t_{on}$ , em função da tensão de controle  $v_{control}(t)$ , como mostrado na Figura 29.

Para melhor entender a equação (45) é realizada uma parametrização através da equação (46), sendo que  $t_{on}$  é função de  $v_{control}(t)$ ,  $V_{ref}$  e  $T_{ciclo}$ , no qual os dois últimos são constantes.

$$\frac{V_{ref}}{v_{control}(t)} = \frac{t_{on}}{T_{ciclo}} \quad (46)$$



**Figura 31** - Curva parametrizada do cálculo da razão cíclica em função da tensão de controle.

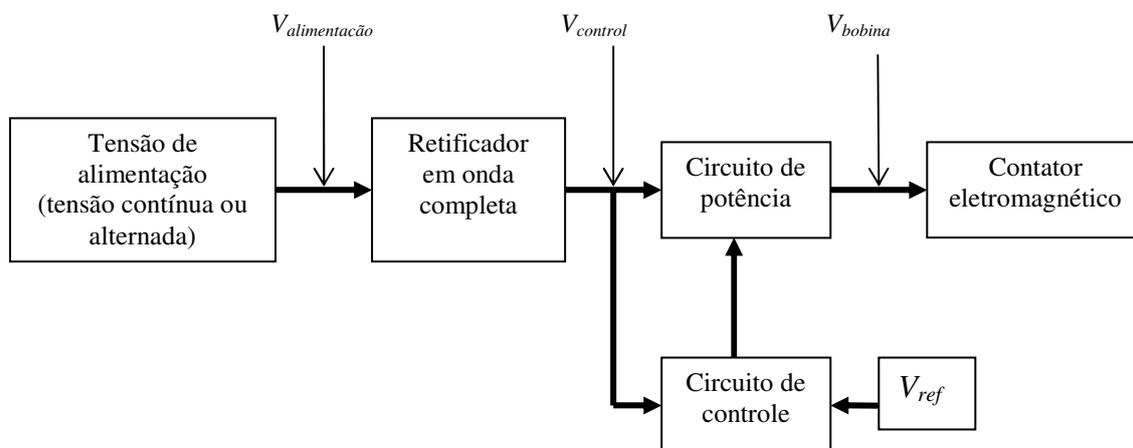
#### 4.6 Simulação do contator eletromagnético em tensão contínua com controle eletrônico de tensão

A força e a velocidade de fechamento são dependentes do fluxo magnético produzido pela bobina em interação com o circuito magnético. O fluxo magnético depende da corrente e do número de espiras. A corrente depende da tensão aplicada. Assim mantendo-se a tensão constante, será obtida a mesma corrente e, conseqüentemente, as respostas em relação ao tempo de fechamento e a velocidade de fechamento serão as mesmas. Se isto for aplicável, permite-se obter um casamento mecânico e baixo ricochete.

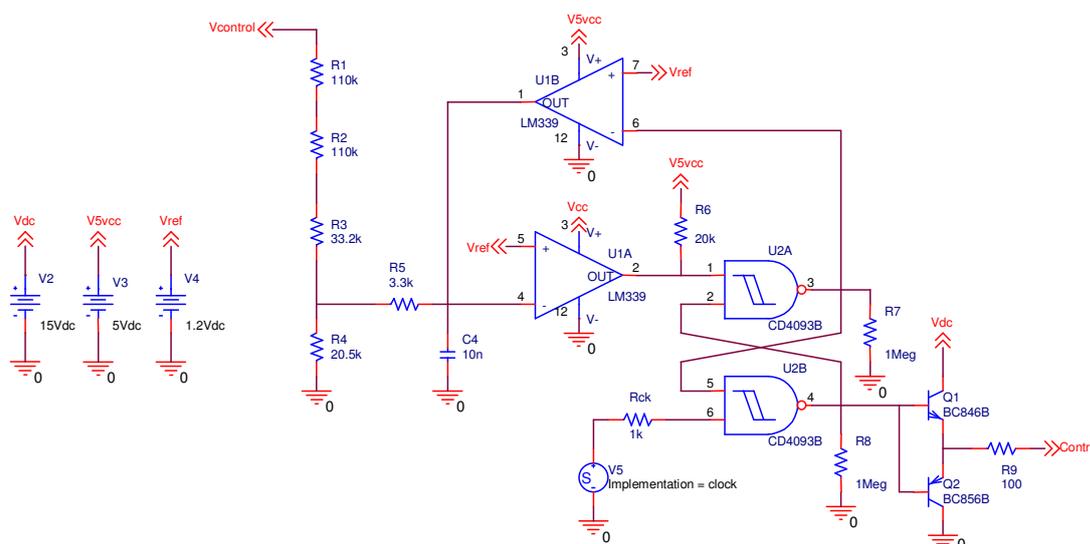
Para se obter tempos e as velocidades de fechamento iguais, para toda a faixa de tensão de alimentação, durante o fechamento não é necessário manter a corrente constante, mas sim manter sempre a mesma curva de corrente. Com isso, o ricochete será somente dependente do casamento mecânico do contator (sistema massa, mola e amortecedor). Assim, o controle de tensão é aplicado para garantir as mesmas condições de corrente, tempo de fechamento e principalmente velocidade de fechamento para o contator eletromagnético quando a tensão aplicada varia entre 85 e 275 V.

O controle de tensão utiliza a própria tensão de controle  $V_{control}$  do contator eletromagnético para gerar os sinais de controle com uma razão cíclica inversamente proporcional a tensão de referência  $V_{ref}$ . Assim, a partir da definição da tensão de referência é possível controlar a corrente e a velocidade de impacto indiretamente. A

Figura 32 mostra o diagrama de blocos do acionamento completo do contator eletromagnético com controle de tensão.



**Figura 32** - Diagrama de blocos do circuito para simulação com controle de tensão.



**Figura 33** – Circuito para simulação do controle de tensão com alimentação em tensão contínua.

A Figura 33 mostra o circuito de controle eletrônico utilizado para a simulação simultânea com o modelo do contator eletromagnético em PSpice. Não foram incluídos vários circuitos utilizados para garantir a operação segura do contator eletromagnético real, tais como circuito habilitador da faixa de tensão de trabalho, temporização do tempo de fechamento máximo, controle da corrente de manutenção etc.

#### 4.6.1 Resultados

Na simulação em 85 V com tensão contínua utilizando o controle de tensão, obteve-se um tempo de fechamento de 30,89 ms. Em comparação com o tempo obtido na

simulação com contator eletromagnético sem controle nesta condição de 85 V, foi um pouco mais lento (27,36 ms), em torno de 12,9% maior. A velocidade de fechamento no momento do toque dos núcleos foi de 2,37 m/s, 11,2% menor que os 2,67 m/s obtidos para 85 V sem controle de tensão. A Tabela 6 resume os principais valores obtidos nas simulações do contator eletromagnético com controle de tensão quando alimentado em tensão contínua.

**Tabela 6** - Resultados de simulação do contator eletromagnético com controle de tensão, variando a tensão de alimentação em tensão contínua.

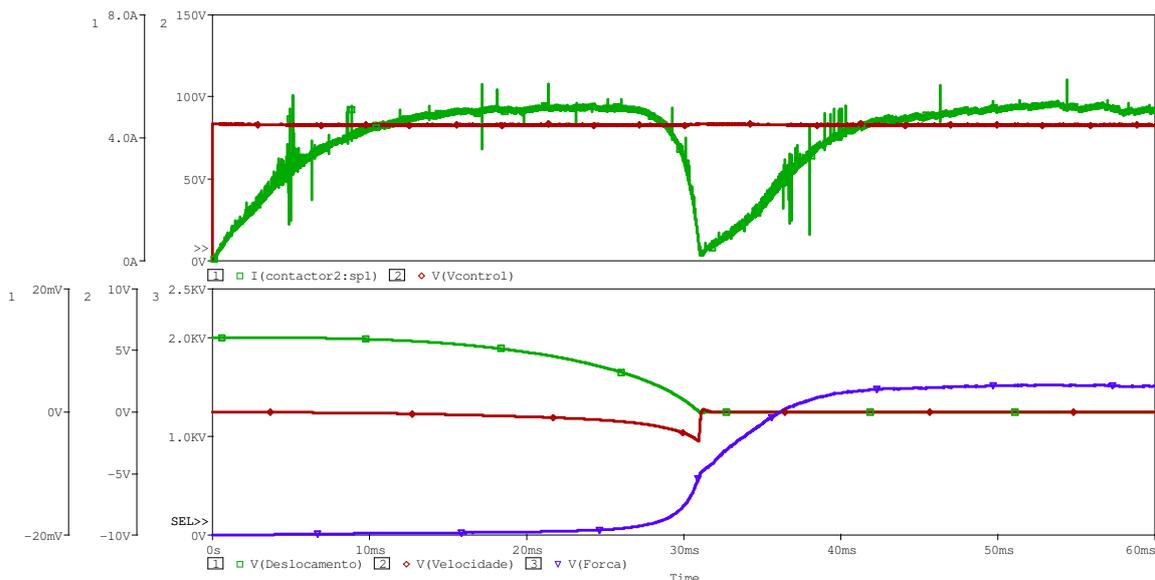
Tensão de controle (V)	Corrente de pico (A)	Tempo de fechamento (ms)	Velocidade de impacto (m/s)
85	5,08	30,89	2,37
100	5,12	30,46	2,36
150	5,21	29,75	2,34
200	5,15	29,98	2,34
250	5,11	30,22	2,36
275	5,08	30,24	2,36
<b>Média</b>	<b>5,13</b>	<b>30,26</b>	<b>2,36</b>

Com a finalidade de comparar o controle de tensão nas diversas opções de tensão de alimentação, estabeleceram-se metas para a corrente de pico durante o fechamento, tempo e velocidade de fechamento no momento do toque dos núcleos. As metas são baseadas na média dos valores obtidos para a simulação com tensão contínua com controle de tensão. A Tabela 7 apresenta os valores meta. Assim, pode-se comparar a eficiência do controle quando a tensão de entrada varia.

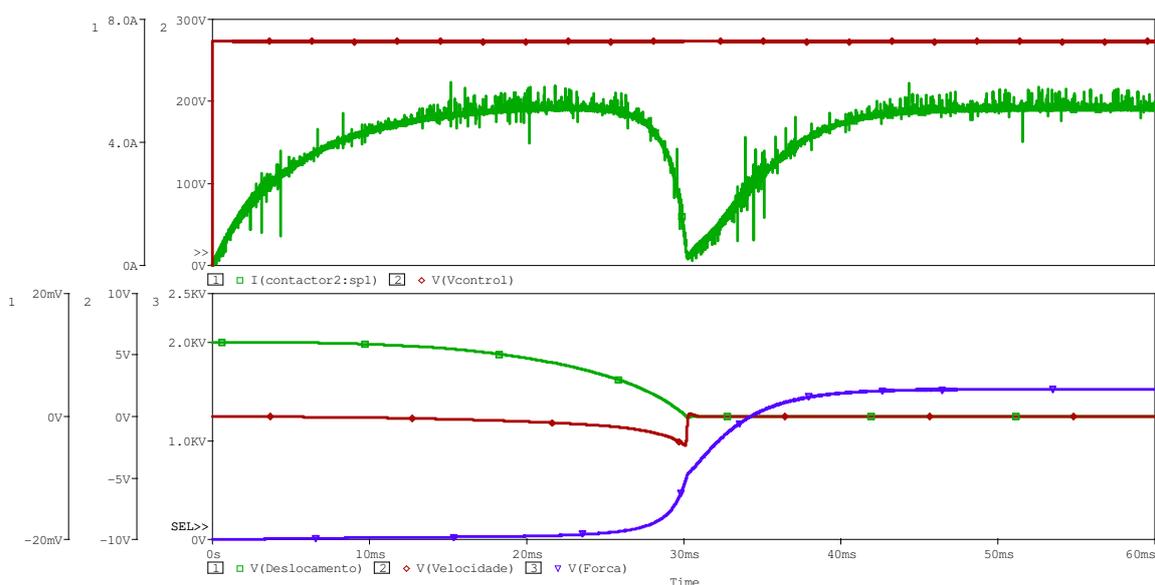
**Tabela 7** – Metas para comparação do controle de tensão.

Tipo de alimentação e controle	Corrente de pico (Acc)		Tempo de fechamento (ms)		Velocidade de impacto (m/s)	
<b>Metas com controle</b>	<b>5,00</b>	5,25 4,75	<b>30,00</b>	31,50 28,50	<b>2,30</b>	2,41 2,18

Assim como nas simulações no PSpice para tensão contínua sem controle de tensão, adotaram-se as mesmas curvas e informações para a comparação. A Figura 34 mostra a simulação para a tensão de 85 V em tensão contínua; a curva em vermelho representa a tensão de controle  $V_{control}$  e a curva em verde a corrente na bobina. No segundo gráfico; a curva em vermelho representa a velocidade do núcleo móvel, a curva em verde o deslocamento ou entreferro e a curva em azul a força eletromagnética gerada pelo contator eletromagnético.



**Figura 34** - Simulação do contator eletromagnético com controle de tensão para 85 V em tensão contínua.

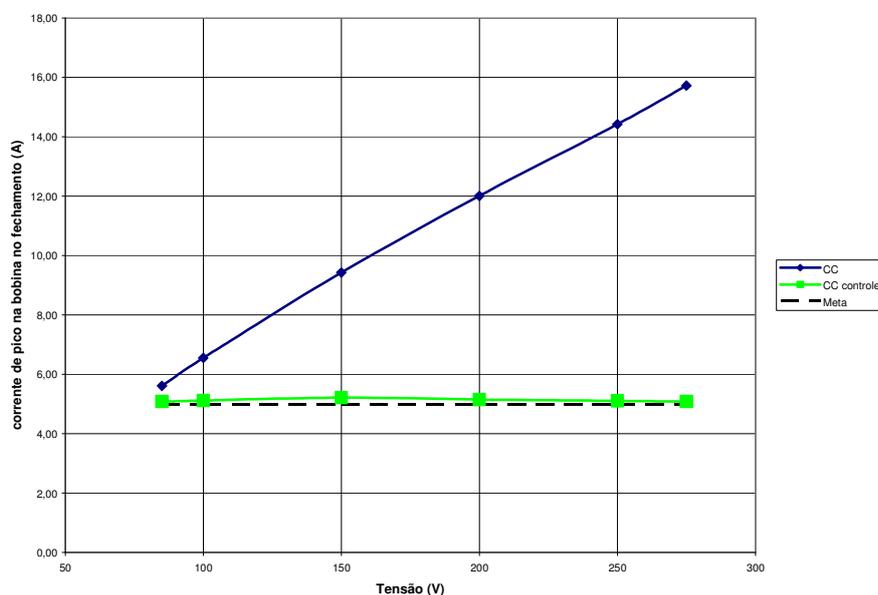


**Figura 35** - Simulação do contator eletromagnético com controle de tensão para 275 V em tensão contínua.

A Figura 35 mostra a simulação para a tensão de alimentação de 275 V em tensão contínua. Exceto pela curva em vermelho na parte superior, todas as outras curvas são bastante próximas das curvas obtidas para a tensão de alimentação de 85 V em tensão contínua.

A partir dos valores obtidos nas simulações apresentados na Tabela 6, pode-se dispor as curvas de corrente de pico durante o fechamento, tempo de fechamento e velocidade de fechamento no momento do toque dos núcleos as suas respectivas metas para comparação visual. A Figura 36 mostra os resultados da corrente de pico no

fechamento em comparação com a simulação em tensão contínua sem controle, com a respectiva meta.

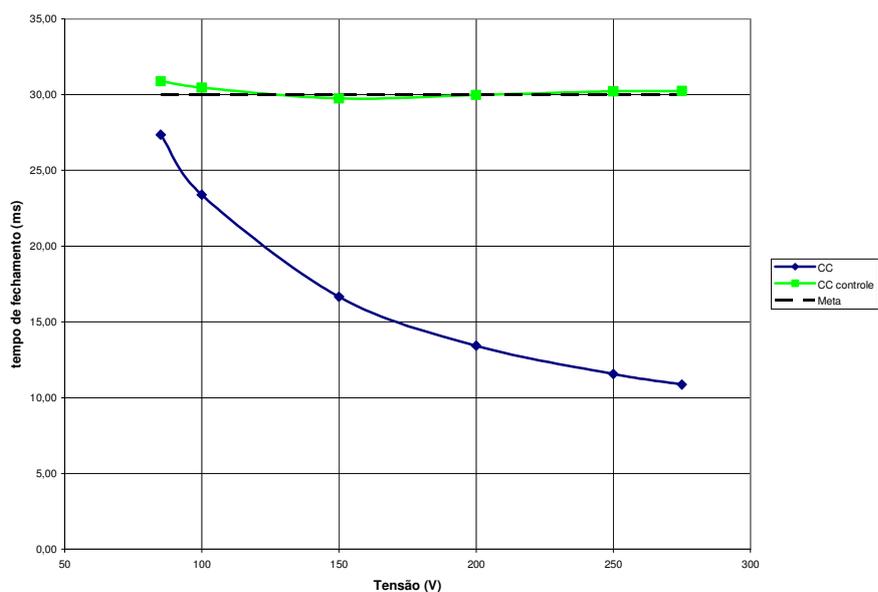


**Figura 36** – Comparação das correntes de pico na bobina em função da tensão de alimentação contínua com e sem controle de tensão.

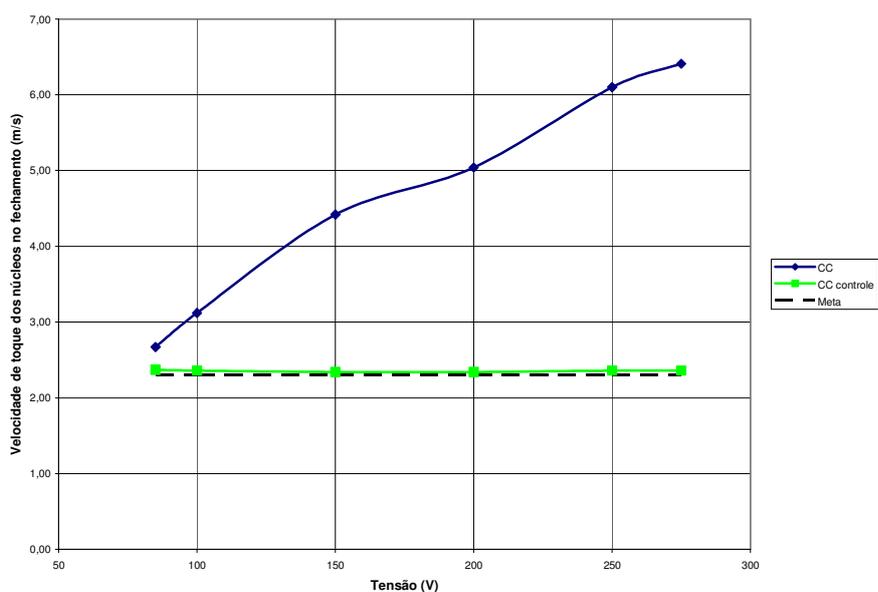
A Figura 37 mostra a curva de tempo de fechamento. Comparando-se com a simulação com controle de tensão, nota-se que o tempo de fechamento é uniforme em toda a faixa de simulação.

A Figura 38 mostra os resultados da velocidade de fechamento no momento do toque. Percebe-se que a velocidade permanece praticamente constante, confirmando o propósito do controle de tensão em manter as mesmas condições de fechamento.

Em relação aos resultados das simulações com contator eletromagnético em tensão contínua, o controle de tensão aplicado a contatores eletromagnéticos obteve uma resposta dinâmica na faixa de simulação de 85 a 275 V com menor variação de corrente na bobina, tempo de fechamento e velocidade de fechamento no momento do toque dos núcleos.



**Figura 37** – Comparação dos tempos de fechamento em função da tensão de alimentação contínua com e sem controle de tensão.



**Figura 38** – Comparação das velocidades de fechamento no momento do toque dos núcleos em função da tensão de alimentação contínua com e sem controle de tensão.

Analisando os valores para a corrente de pico no fechamento, a variação entre o máximo e o mínimo foi de apenas 0,13 A. Proporcionalmente, o valor máximo obtido foi 1,03 vezes maior que o mínimo. Para o tempo de fechamento, a variação foi de apenas 1,14 ms; proporcionalmente, o valor máximo obtido foi 1,04 vezes o valor mínimo. Na velocidade (a qual é o principal causador do ricochete), a variação de velocidade de toque

dos núcleos foi de apenas 0,03 m/s, cujo valor máximo foi apenas 1,01 vezes o valor mínimo.

Com estes números pode-se concluir que, o controle de tensão pode ser usado para permitir que o contator eletromagnético funcione em uma faixa de tensão estendida sem o aumento do ricochete, e também permitindo otimizar o tempo médio de ricochete em uma faixa suficiente para aumentar a vida útil dos contatos principais através do casamento mecânico.

#### **4.7 Simulação do contator eletromagnético em tensão alternada com controle eletrônico de tensão**

Nas simulações com alimentação em tensão alternada pode-se verificar a influência da forma de onda da tensão de alimentação no fechamento do contator eletromagnético com controle de tensão. Neste item será utilizado o mesmo circuito de controle apresentado na Figura 33 para o controle de tensão com alimentação com forma de onda alternada.

Conforme a Figura 32, a tensão de alimentação  $V_{alimentação}$  é retificada e transformada em uma tensão contínua pulsante, chamada de tensão de controle  $V_{control}$ . Inicialmente serão realizadas simulações para observar o efeito da ondulação de tensão contínua pulsante proveniente de retificador monofásico de onda completa, sem a utilização de filtro capacitivo no controle e na dinâmica do fechamento do contator. Em seguida, serão realizadas as simulações utilizando um filtro capacitivo para diminuir a ondulação da tensão de controle, realizando o cálculo teórico e a simulação para a escolha do valor da capacitância a ser utilizada. E por último será estudada a aproximação do valor médio quadrático da tensão alternada através do pico da tensão retificada.

##### **4.7.1 Simulações com tensão alternada sem filtro capacitivo**

Para a simulação do controle eletrônico de tensão com alimentação em tensão alternada foi mantido o mesmo circuito de controle apresentado na Figura 33. Foram realizadas simulações nas tensões de 85 V a 275 V, com início da simulação na passagem por zero ou no pico da tensão de alimentação sem a utilização de filtro capacitivo. Com isso a tensão de controle será uma tensão contínua pulsante em 120 Hz com todo o conteúdo harmônico decorrente da retificação. Sabendo-se que o controle em um ciclo, realiza a integração da tensão de controle para gerar o sinal de controle do interruptor, nos

valores da tensão de controle menores que 80 V o tempo de condução terá de aumentar para compensar a área tensão-tempo.

#### 4.7.1.1 Resultados

A Tabela 8 apresenta os resultados das simulações para a alimentação em corrente alternada com início da simulação na passagem por zero e a Tabela 9 resume os resultados das simulações para a alimentação em corrente alternada com início no pico da tensão alternada.

**Tabela 8** - Resultados de simulação do contator eletromagnético com controle de tensão, variando a tensão de alimentação em tensão alternada com início das simulações na passagem por zero.

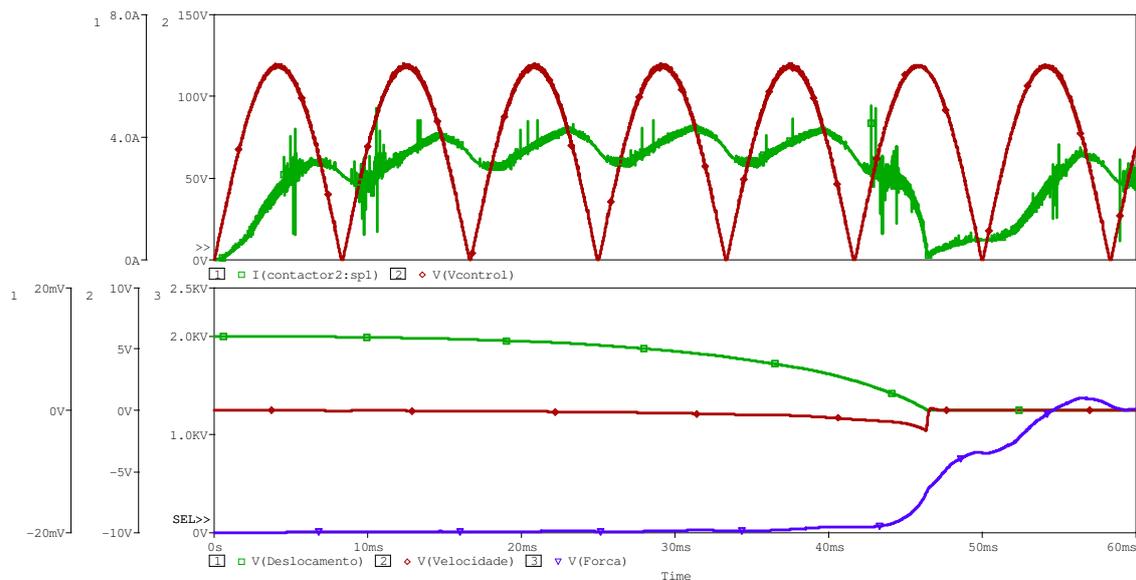
Tensão de controle (V)	Corrente de pico (A)	Tempo de fechamento (ms)	Velocidade de impacto (m/s)
85	4,36	45,74	1,60
100	4,56	41,43	1,98
150	4,80	36,23	1,94
200	4,87	34,56	2,06
250	4,89	33,64	2,20
275	4,89	33,39	2,21
<b>Média</b>	<b>4,73</b>	<b>37,50</b>	<b>2,00</b>

**Tabela 9** - Resultados de simulação do contator eletromagnético com controle de tensão, variando a tensão de alimentação em tensão alternada com início das simulações no pico.

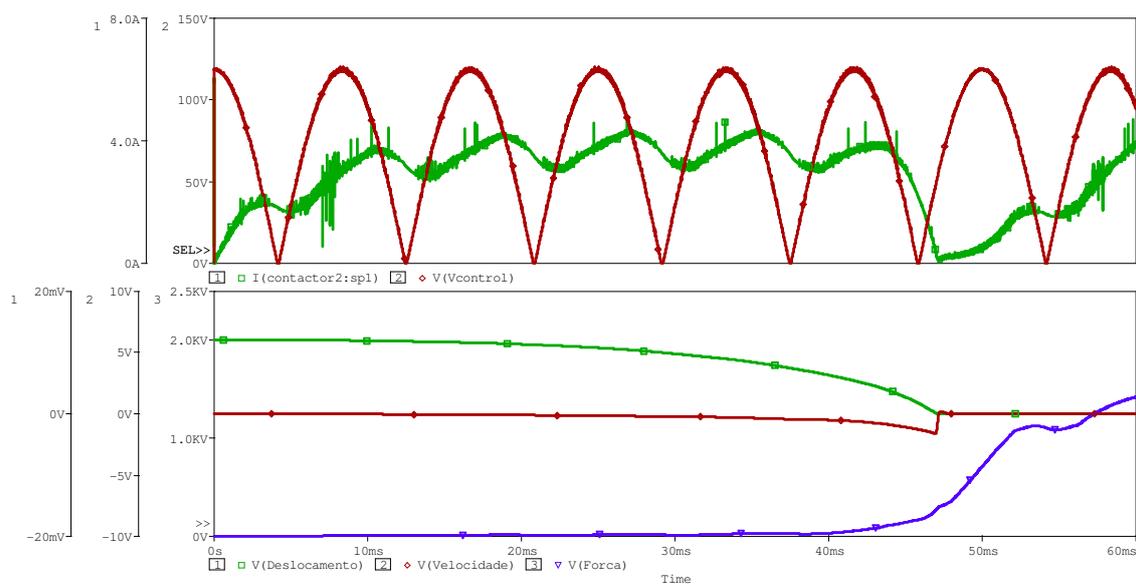
Tensão de controle (V)	Corrente de pico (A)	Tempo de fechamento (ms)	Velocidade de impacto (m/s)
85	4,36	46,24	1,76
100	4,56	41,97	1,71
150	4,82	36,60	2,13
200	4,83	34,88	2,09
250	4,83	34,03	2,17
275	4,82	33,89	2,16
<b>Média</b>	<b>4,70</b>	<b>37,94</b>	<b>2,00</b>

A Figura 39 mostra a simulação para a tensão de alimentação em 85 V em tensão alternada com início da simulação na passagem por zero, sendo o pico da tensão de controle em 120,21 V, na qual nota-se um aumento no tempo de fechamento do contator para 45,74 ms, ou seja, 15,74 ms maior que a meta do tempo de fechamento.

A Figura 40 mostra a simulação para 85 V em tensão alternada, na qual os resultados para o tempo de fechamento aumentaram para 46,24 ms, ou seja, 16,24 ms maior que a meta.

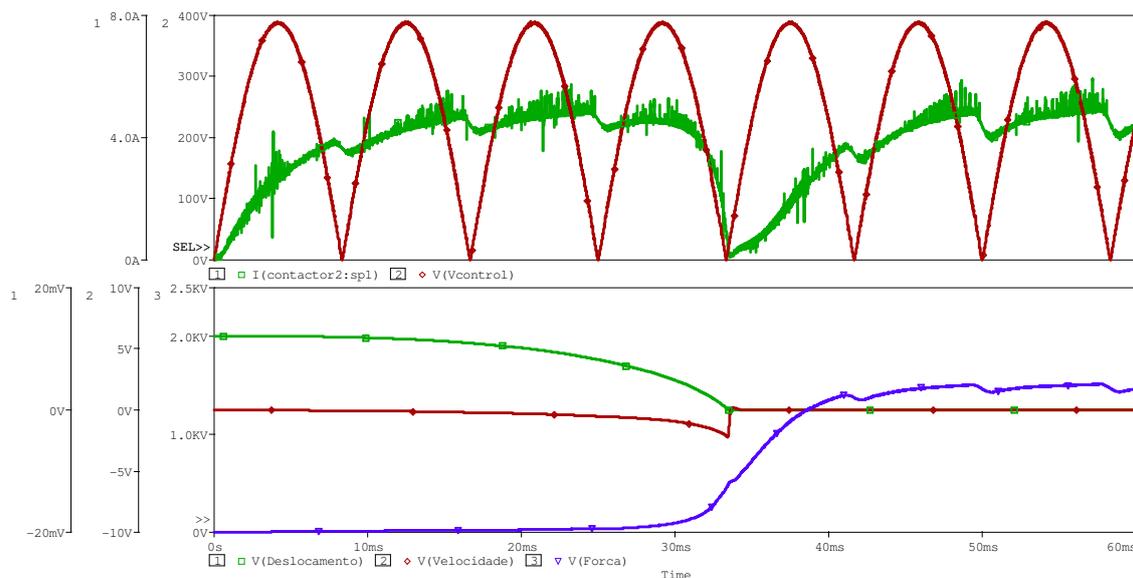


**Figura 39** - Simulação do contator eletromagnético com controle de tensão para 85 V em tensão alternada com início da simulação na passagem por zero.



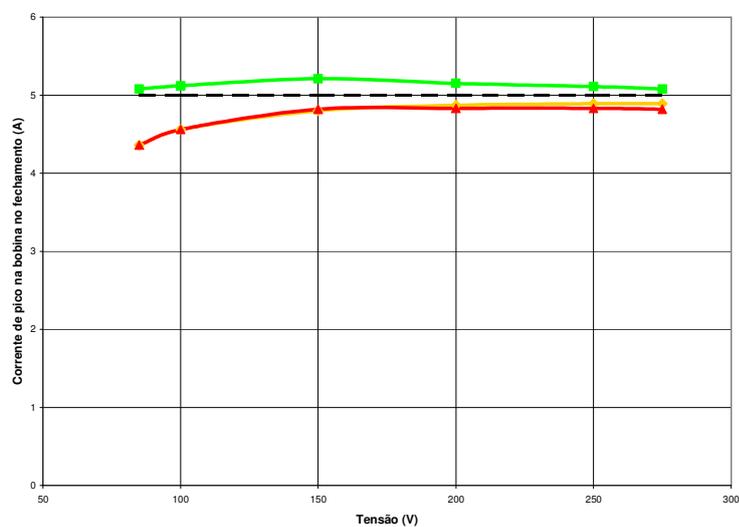
**Figura 40** - Simulação do contator eletromagnético com controle de tensão para 85 V em tensão alternada com início da simulação no pico.

A Figura 41 mostra a simulação para 275 V em tensão alternada com início da simulação na passagem por zero. O pico da tensão de controle será de 388,91 V, no qual o tempo de fechamento diminui para 33,39 ms. Para a tensão de alimentação de 275 V em tensão alternada com início da simulação no pico da tensão apenas apresentou pequenas variações nos resultados.



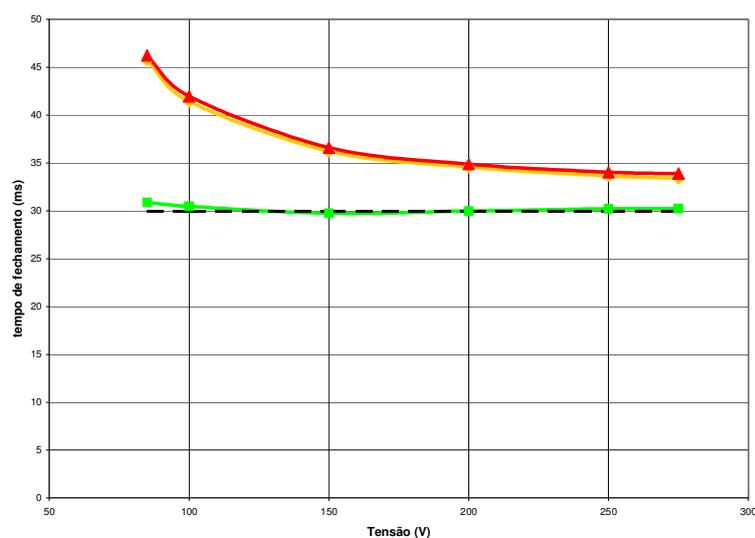
**Figura 41** - Simulação do contator eletromagnético com controle de tensão para 275 V em tensão alternada com início da simulação na passagem por zero.

A Figura 42 mostra as curvas de variação da corrente para alimentação em tensão contínua e tensão alternada, na qual as correntes de pico na bobina são menores.



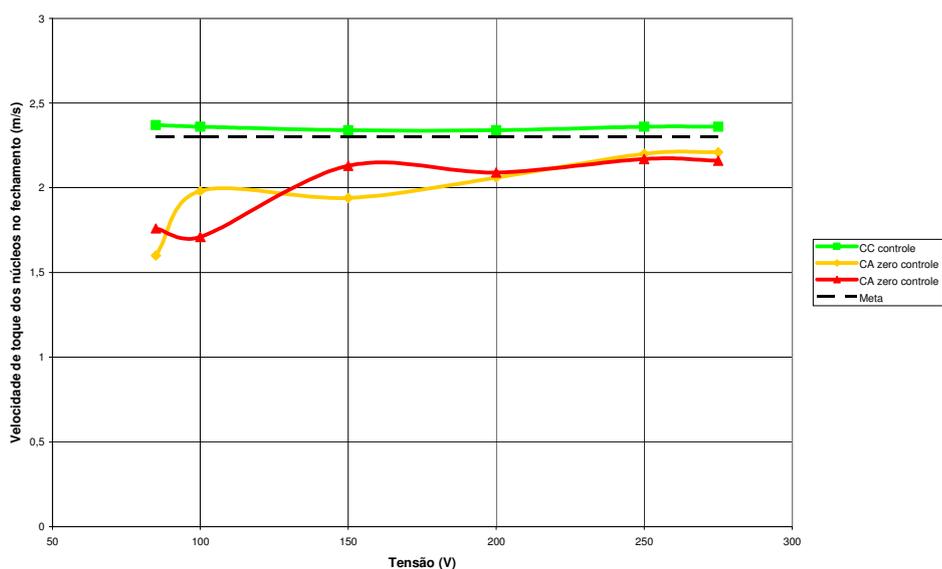
**Figura 42** – Comparação das correntes de pico na bobina com controle de tensão com alimentação em tensão contínua e tensão alternada com início da simulação na passagem por zero e no pico.

Na Figura 43, pode-se perceber que o fechamento é mais lento do que em tensão contínua para ambos os casos considerando-se em tensão alternada, com simulação iniciando na passagem por zero ou no pico da tensão.



**Figura 43** – Comparação dos tempos de fechamento com controle de tensão com alimentação em tensão contínua e tensão alternada com início da simulação na passagem por zero e no pico.

A Figura 44 mostra a comparação dos valores obtidos para a velocidade de fechamento no momento do toque dos núcleos. Os valores obtidos para a alimentação em tensão contínua, são menores e com variação percentual média de -13,12% e -12,90%, para as simulações iniciando na passagem por zero e no pico, respectivamente. Esses valores são bem maiores que os  $\pm 5\%$  estipulados como limites para variação em relação à meta.



**Figura 44** - Comparação das velocidades de fechamento com controle de tensão com alimentação em tensão contínua e tensão alternada com início da simulação na passagem por zero e no pico.

Ao se comparar os resultados obtidos nas simulações apresentados na Tabela 6, pode-se verificar que a corrente de pico é menor que em tensão contínua, bem como sua variação. Os tempos de fechamento aumentam e a sua variação também. Em relação à velocidade de fechamento, o momento do toque dos núcleos apresentou uma variação de 26,9% em relação ao valor mínimo.

A Tabela 10 mostra as médias obtidas nas simulações e comparadas com a meta. Neste caso, quanto mais próximo da meta, melhor será a condição de controle. Em comparação com os valores meta e considerando uma variação de  $\pm 5\%$  nos valores, todos os valores obtidos ficaram fora da faixa de variação.

**Tabela 10** - Médias dos resultados com controle de tensão para alimentação em tensão alternada.

<b>Tipo de alimentação e controle</b>	<b>Corrente de pico (Acc)</b>		<b>Tempo de fechamento (ms)</b>		<b>Velocidade de impacto (m/s)</b>	
<b>Meta</b>	<b>5,00</b>	5,25 4,75	<b>30,00</b>	31,50 28,50	<b>2,30</b>	2,41 2,18
Tensão alternada, passagem por zero	4,73		37,50		2,00	
Tensão alternada, pico	4,70		37,94		2,00	

Proporcionalmente, os resultados das simulações em relação aos mínimos obtidos são 1,12 e 1,11 vezes maior para a corrente de pico, 1,37 e 1,36 vezes maior para o tempo de fechamento e 1,38 e 1,27 vezes maior para a velocidade de fechamento no momento do toque dos núcleos.

Analisando-se as curvas, nota-se que a utilização de uma tensão de corrente contínua pulsante proveniente de uma ponte retificadora de onda completa não conseguiu se aproximar da meta. Portanto, deve-se realizar a simulação com filtro capacitivo com a finalidade de diminuir a ondulação de tensão e corrente e possibilitar condições mais favoráveis ao controle de tensão.

#### **4.7.2 Simulação em tensão alternada com filtro capacitivo**

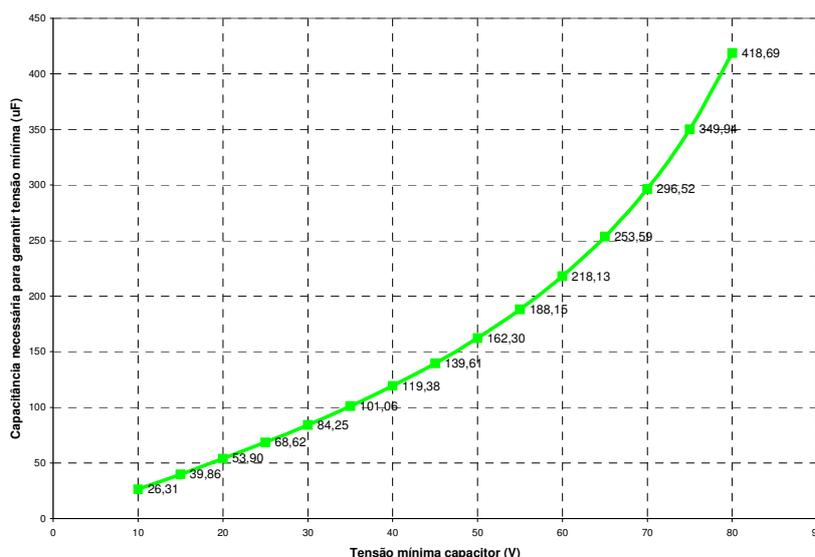
Os resultados com o controle eletrônico de tensão não foram satisfatórios para a alimentação em tensão alternada sem a utilização de filtro capacitivo. Com a finalidade de diminuir a ondulação de tensão e corrente e possibilitar condições mais favoráveis ao controle de tensão, realizaram-se simulações com a utilização de um capacitor colocado logo após a ponte retificadora para diminuir a ondulação da tensão de controle. Primeiramente foi escolhido o valor teórico do capacitor e depois escolhido o menor valor que proporcionasse uma resposta dinâmica próxima à meta.

#### 4.7.2.1 Escolha do capacitor do filtro capacitivo

A referência [14] fornece uma equação para o cálculo do capacitor de filtragem  $C_{filtro}$ , mostrado na Figura 48, a qual foi adaptada por (47) para se obter a capacitância em função da corrente da bobina:

$$C_{filtro} = \frac{I_{bobina\ max} V_{C_{filtro\ min}}}{f_{rede} (V_{control\ pico\ min}^2 - V_{C_{filtro\ min}}^2)} \quad (47)$$

De acordo com as simulações em tensão contínua, considerando a corrente máxima passando pela bobina  $I_{bobina\ max}$  de 5 A,  $V_{C_{filtro\ min}}$  de 85 V e  $V_{control\ pico\ min}$  de 113 V, o capacitor de filtragem  $C_{filtro}$  escolhido seria de 1230  $\mu\text{F}$ , sendo inviável economicamente a utilização de um capacitor de filtragem neste valor de capacitância. A utilização do capacitor tem a intenção de conseguir que a tensão após o retificador tenha um valor instantâneo da tensão de controle próximo de 80 V, a partir do qual o controle de tensão funciona em condições mais favoráveis. Entretanto, como mostrado no exemplo acima, o resultado não seria prático. Assim, serão calculados os valores do capacitor de filtragem a partir da variação dos valores de  $V_{C_{filtro\ min}}$ , considerando uma corrente de 5 A em tensão contínua passando pela bobina, sem ter a preocupação neste momento com o tamanho e as especificações técnicas do capacitor a ser utilizado.



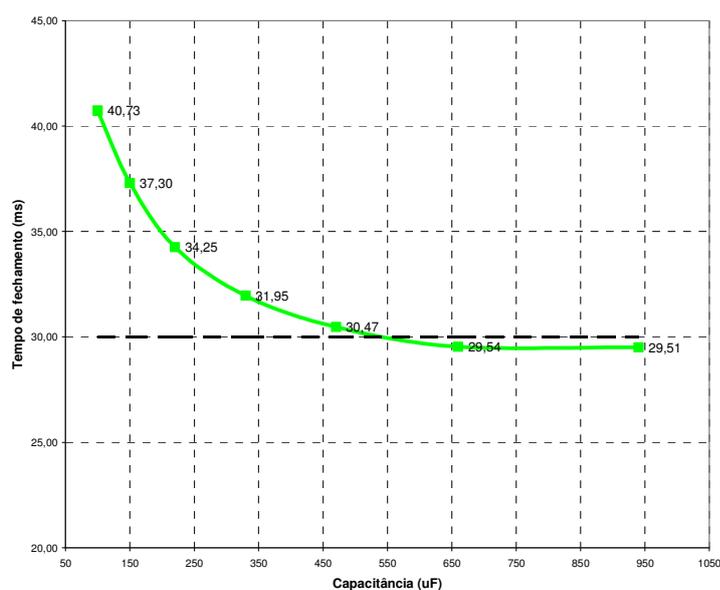
**Figura 45** – Capacitância  $C_{filtro}$  necessária para manter uma tensão mínima  $V_{C_{filtro\ min}}$ , com uma corrente na bobina de 5 A em tensão contínua.

A Figura 45 mostra a curva do valor da capacitância de  $C_{filtro}$  necessária para manter uma tensão mínima  $V_{C_{filtro} min}$  com variação de 10 V a 80 V e calculados os valores de capacitância necessários para atender a condição de tensão mínima. Foram realizadas as simulações com o capacitor tendo os seguintes valores: 100  $\mu$ F, 150  $\mu$ F, 220  $\mu$ F, 330  $\mu$ F, 470  $\mu$ F, 660  $\mu$ F (2x330  $\mu$ F) e 940  $\mu$ F (2x470  $\mu$ F). O objetivo foi definir uma capacitância para conseguir um tempo de fechamento próximo a 30 ms. A Tabela 11 mostra os resultados das simulações para 85 V em tensão alternada, variando-se a capacitância.

**Tabela 11** – Resumo das simulações para a escolha do capacitor de filtragem  $C_{filtro}$ .

Tensão de controle (V)	Capacitância ( $\mu$ F)	Corrente de pico (A)	Tempo de fechamento (ms)	Velocidade de impacto (m/s)
85	100	4,46	40,73	1,62
85	150	4,53	37,30	1,96
85	220	4,75	34,25	1,96
85	330	4,94	31,95	2,03
85	470	5,16	30,47	2,36
85	660	5,30	29,54	2,46
85	940	5,30	29,51	2,47

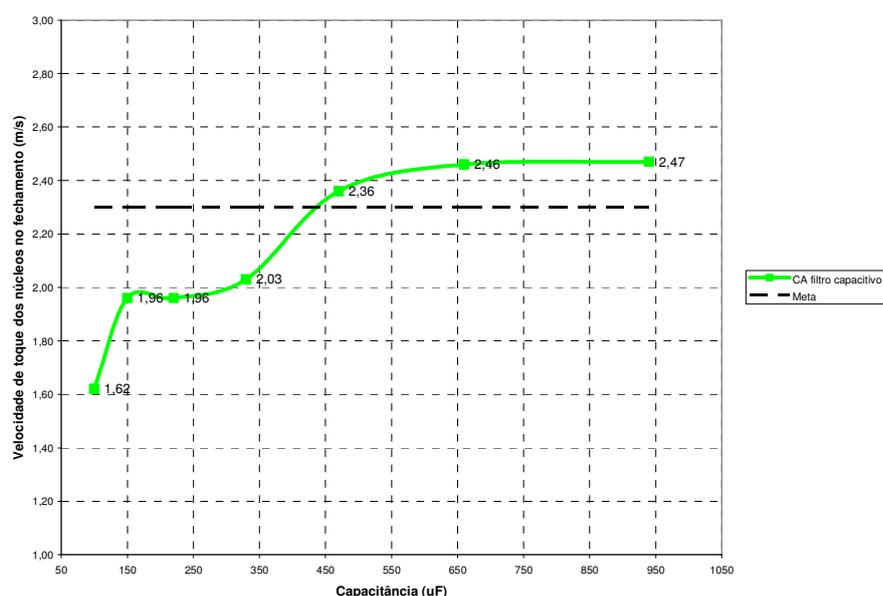
A Figura 46 mostra a variação do tempo de fechamento em função dos valores de capacitância. Os valores obtidos para o tempo de fechamento são comparados com a meta de tempo de fechamento. Nota-se que para o capacitor de 470  $\mu$ F, o tempo de fechamento é 1,56 % maior que a meta, sendo tal variação desprezível. Além disso, aumentando-se o valor da capacitância, o tempo de fechamento praticamente não se altera.



**Figura 46** – Variação do tempo de fechamento em função do valor da capacitância  $C_{filtro}$ .

A Figura 47 mostra a variação da velocidade de fechamento no momento do toque dos núcleos e a comparação com o valor da meta de velocidade. Para a capacitância de 470  $\mu\text{F}$ , tem-se um valor superior em 2,61 %.

Baseado nos resultados das simulações da Tabela 11, escolheu-se o capacitor  $C_5$  com a capacitância de 470  $\mu\text{F}$ , visto que este capacitor apresentou os melhores resultados. O capacitor teórico para a condição ideal seria de pelo menos 1046  $\mu\text{F}$ .



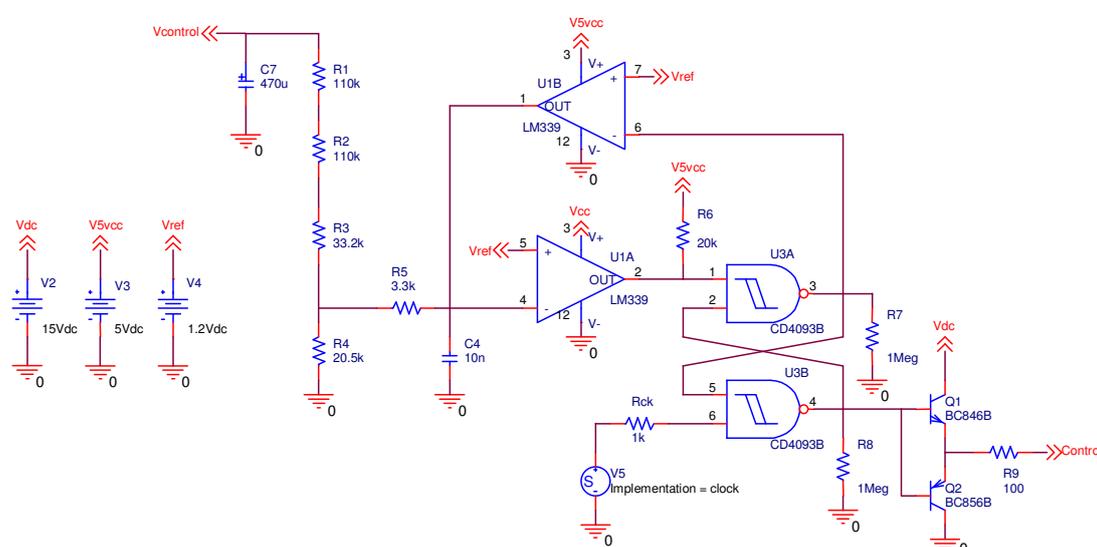
**Figura 47** - Variação da velocidade de toque dos núcleos no fechamento em função do valor da capacitância  $C_{\text{filtro}}$ .

#### 4.7.2.2 Resultados

Na simulação com alimentação em tensão alternada foi utilizado um filtro capacitivo com 470  $\mu\text{F}$ , representado pelo capacitor  $C_7$ , conforme Figura 48, uma vez que as simulações realizadas para encontrar o valor adequado do filtro capacitivo, demonstraram que as características dinâmicas do contator eletromagnético no fechamento com controle eletrônico de tensão, melhoraram devido à diminuição da ondulação de tensão (o valor de tensão se aproxima ao valor de referência de 80 V).

Teoricamente, para o tempo de fechamento do contator eletromagnético, a simulação com início na passagem por zero, seria o pior caso, pois, a onda de tensão de alimentação está começando a crescer e não existe tensão no início do processo de

fechamento para carregar o capacitor e iniciar a condução de corrente na bobina. Para o caso da simulação iniciando no pico da tensão, a maioria das condições é favorável para uma carga prévia do filtro capacitivo. Isto é, quando a tensão de alimentação está no seu pico, inicia-se a condução de corrente para a bobina com um atraso, fazendo com que a tensão de controle se estabilize rapidamente. Nas simulações, verificou-se que esta condição gera um atraso de alguns milissegundos no tempo de fechamento. Mas em termos de velocidade final no momento do toque dos núcleos, foram obtidas velocidades muito próximas à meta, não afetando de forma significativa a dinâmica de fechamento do contator eletromagnético com controle eletrônico de tensão.



**Figura 48** - Circuito para simulação do controle de tensão com capacitor de filtragem de 470  $\mu\text{F}$ .

A Tabela 12 apresenta os resultados para as simulações do contator eletromagnético com controle de tensão quando alimentado em tensão alternada com as simulações iniciando na passagem por zero com filtro capacitivo de 470  $\mu\text{F}$ .

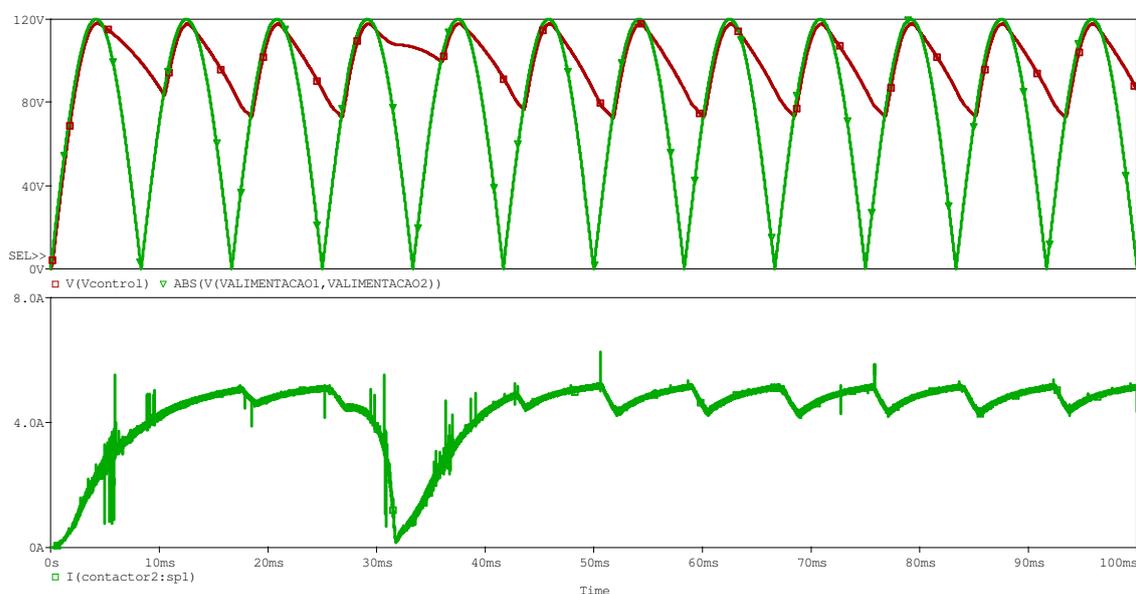
**Tabela 12** - Resultados de simulação do contator eletromagnético com controle de tensão, variando a tensão de alimentação em tensão alternada com início das simulações na passagem por zero e filtro capacitivo de 470  $\mu\text{F}$ .

Tensão de controle (V)	Corrente de pico (A)	Tempo de fechamento (ms)	Velocidade de impacto (m/s)
85	5,14	31,60	2,29
100	5,25	30,87	2,47
150	5,16	30,99	2,40
200	5,08	31,18	2,36
250	4,97	31,42	2,23
275	4,97	31,54	2,32
<b>Média</b>	<b>5,10</b>	<b>31,27</b>	<b>2,35</b>

A Tabela 13 apresenta os resultados das simulações com início no pico da tensão. Atenção especial deve ser dada à corrente de pico nos diodos, a qual permaneceu com seu valor de pico constante para toda a faixa de simulação. Em um controle de tensão a ser utilizado em um produto, este tempo será no máximo de 100 ms, depois a corrente é reduzida a um valor bastante pequeno para manter o contator eletromagnético fechado e os picos de corrente serão muito menores. Esta corrente é conhecida como corrente de manutenção.

**Tabela 13** - Resultados de simulação do contator eletromagnético com controle de tensão, variando a tensão de alimentação em tensão alternada com início das simulações no pico e filtro capacitivo de 470  $\mu\text{F}$ .

Tensão de controle (V)	Corrente de pico (A)	Tempo de fechamento (ms)	Velocidade de impacto (m/s)
85	5,16	30,45	2,36
100	5,26	29,69	2,46
150	5,16	30,25	2,40
200	5,08	30,54	2,37
250	4,99	30,90	2,32
275	4,96	31,02	2,31
<b>Média</b>	<b>5,10</b>	<b>30,48</b>	<b>2,37</b>

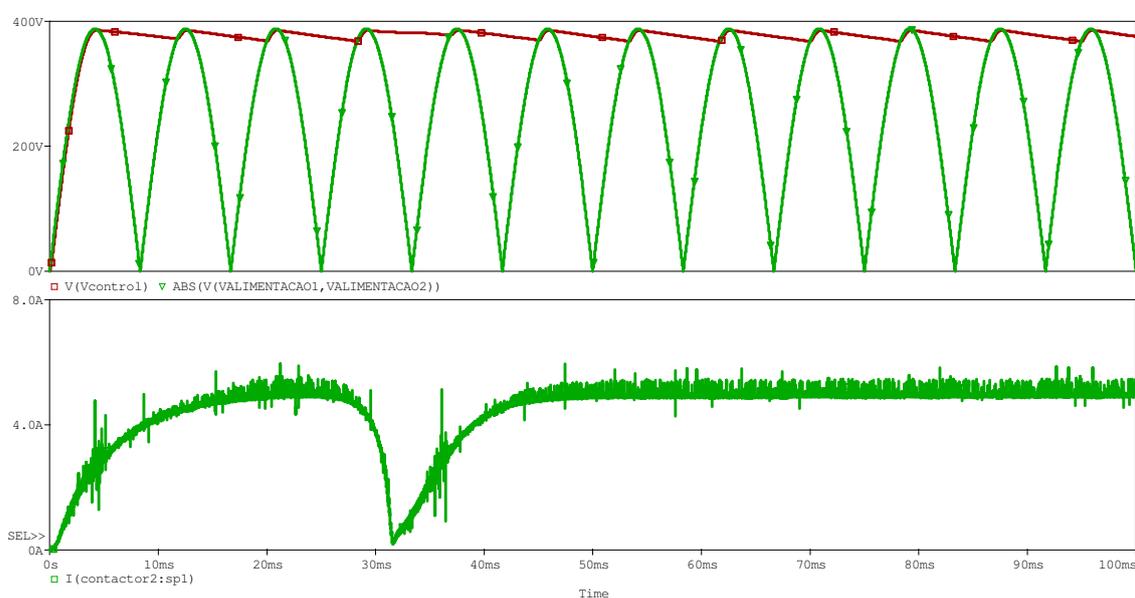


**Figura 49** - Simulação do contator eletromagnético com controle de tensão para 85 V em tensão alternada com início da simulação na passagem por zero e filtro capacitivo de 470  $\mu\text{F}$ .

A Figura 49 apresenta as curvas da simulação para a tensão de alimentação  $V_{alimentação}$  em 85 V em tensão alternada. A curva em verde mostra o valor absoluto da tensão de alimentação sem filtro capacitivo para melhor representar o efeito na ondulação de tensão da adição de um capacitor de 470  $\mu\text{F}$  na tensão de controle  $V_{control}$ , a qual é

representada pela curva em vermelho. Na mesma figura é mostrada também a curva de corrente na bobina.

Na Figura 50 é mostrada a simulação para 275 V em tensão alternada mostrando as mesmas informações da Figura 49. Percebe-se que as ondulações, tanto da tensão de controle e por conseqüência da corrente na bobina diminuem, como conseqüência da tensão maior e da corrente na bobina ser a mesma da simulação em 85 V em tensão alternada. Em ambos os casos, a análise visual mostra a mesma resposta em relação ao tempo de fechamento.



**Figura 50** - Simulação do contator eletromagnético com controle de tensão para 275 V em tensão alternada com início da simulação na passagem por zero e filtro capacitivo de 470  $\mu$ F.

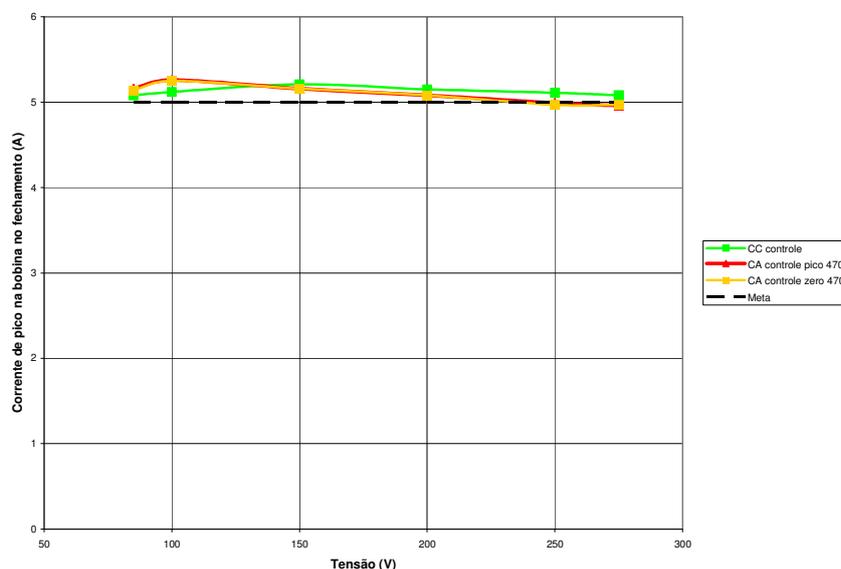
A Tabela 14 mostra as médias obtidas nas simulações e comparadas com a meta, no qual todos os valores obtidos ficaram na faixa de variação do valor da meta para cada resultado.

**Tabela 14** - Médias dos resultados para alimentação em tensão alternada com filtro capacitivo de 470  $\mu$ F.

Tipo de alimentação e controle	Corrente de pico		Tempo de fechamento		Velocidade de impacto	
<b>Meta</b>	<b>5,00</b>	<b>5,25</b> <b>4,75</b>	<b>30,00</b>	<b>31,50</b> <b>28,50</b>	<b>2,30</b>	<b>2,41</b> <b>2,18</b>
Tensão alternada, passagem por zero, filtro.	5,10		31,27		2,35	
Tensão alternada, pico, filtro.	5,10		30,48		2,37	

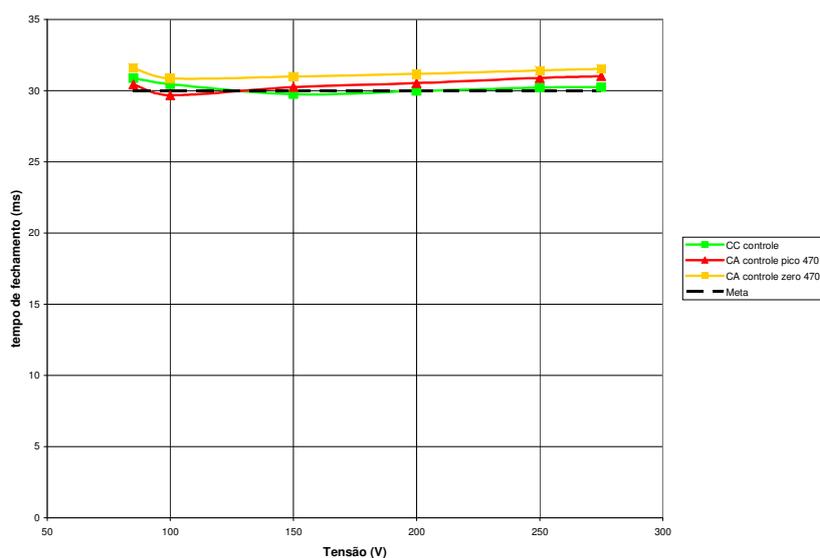
A partir dos resultados mostrados na Tabela 12 para as simulações com início na passagem por zero e na Tabela 13 para os resultados para as simulações com início no pico da tensão foram gerados gráficos para a comparação. A Figura 51 mostra a curva para a

comparação da corrente de pico na bobina no fechamento com a meta e a simulação em tensão contínua com controle.



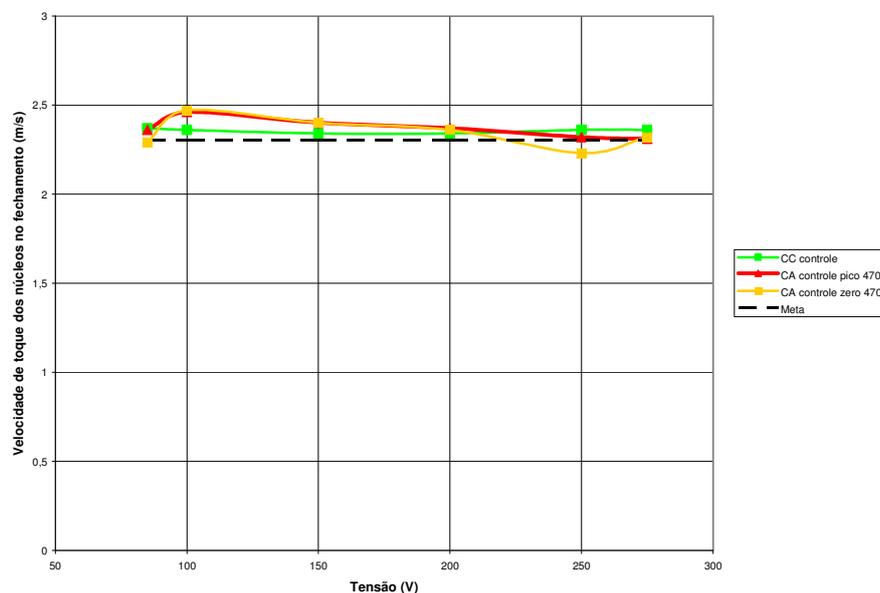
**Figura 51** - Comparação das correntes de pico na bobina com controle de tensão com alimentação em tensão contínua e tensão alternada com início da simulação na passagem por zero e no pico e filtro capacitivo de 470  $\mu\text{F}$ .

A Figura 52 mostra a comparação entre os resultados do tempo de fechamento do contator. Os resultados foram semelhantes aos obtidos para a simulação em tensão contínua, aproximando-se da meta estabelecida.



**Figura 52** - Comparação dos tempos de fechamento com controle de tensão com alimentação em tensão contínua e tensão alternada com início da simulação na passagem por zero e no pico e filtro capacitivo de 470  $\mu\text{F}$ .

A Figura 53 mostra a comparação entre as velocidades de fechamento, apresentando valores próximos à velocidade meta para a comparação do controle.



**Figura 53** - Comparação das velocidades de fechamento com controle de tensão com alimentação em tensão contínua e tensão alternada com início da simulação na passagem por zero e no pico e filtro capacitivo de 470  $\mu$ F.

Na média (5,10 A) e na proporcionalidade (1,06) foram obtidos os mesmos valores de corrente de pico, somente uma variação bastante pequena entre o máximo e mínimo, no qual foi obtido 0,28 A para simulação iniciando na passagem por zero e 0,30 A para a simulação iniciando no pico da tensão. Com estes resultados pode-se considerar que o comportamento da corrente de pico no fechamento é independente do ponto onde a simulação inicia.

Para o tempo de fechamento houve uma pequena diferença, pois na média foi obtido para a simulação iniciada em zero o tempo médio de 31,27 ms e para a iniciada no pico 30,48 ms. A variação de velocidade foi de 0,73 ms para a simulação iniciada em zero e 1,04 ms para a simulação iniciada no pico.

A velocidade de toque dos núcleos foi praticamente igual, 2,35 m/s e 2,37 m/s, para as simulações iniciadas em zero e no pico, indicando que o ricochete se comportará na mesma faixa para os dois casos.

Apesar do método utilizado para a escolha do valor da capacitância ter demonstrado que a sua utilização melhora a resposta dinâmica, o mesmo valor de capacitância não poderá garantir a mesma condição com um outro contator eletromagnético com diferentes parâmetros. Outra desvantagem é que quando é inserido um filtro capacitivo, o pico de

corrente gerado para carregar o capacitor aumenta com o tamanho do capacitor, fazendo com que os componentes na entrada do circuito eletrônico, sejam dimensionados para atender as necessidades do circuito com capacitor, e não para a operação normal do circuito. Apesar de não ser levado em consideração nas simulações, a capacitância também causará um atraso na abertura do contator, uma vez que toda a energia armazenada será entregue a bobina para dissipação, podendo afetar o número de manobras por hora que o contator poderá realizar.

### 4.7.3 Simulação em tensão alternada pela aproximação do valor médio quadrático

Nas simulações foi demonstrado que se a tensão de controle instantânea tivesse com um valor mínimo de aproximadamente 80 V, o controle eletrônico de tensão com alimentação em tensão alternada, teria o mesmo desempenho que o controle com alimentação em tensão contínua. Apesar do controle eletrônico de tensão apresentar os resultados esperados também em tensão alternada, a simulação do circuito mostrou que a corrente de carga inicial do capacitor de filtragem é relativamente alta. Esta condição não é satisfatória para aplicação prática, uma vez que os componentes devem ser dimensionados para esta condição. Uma alternativa, a qual é apresentada nesta seção, é aproximar o valor da tensão que será integrada pelo mesmo valor rms da alimentação em tensão alternada. Com isto, o valor do capacitor de filtragem terá seu valor bastante reduzido e o controle eletrônico de tensão terá o mesmo desempenho que tem em tensão contínua.

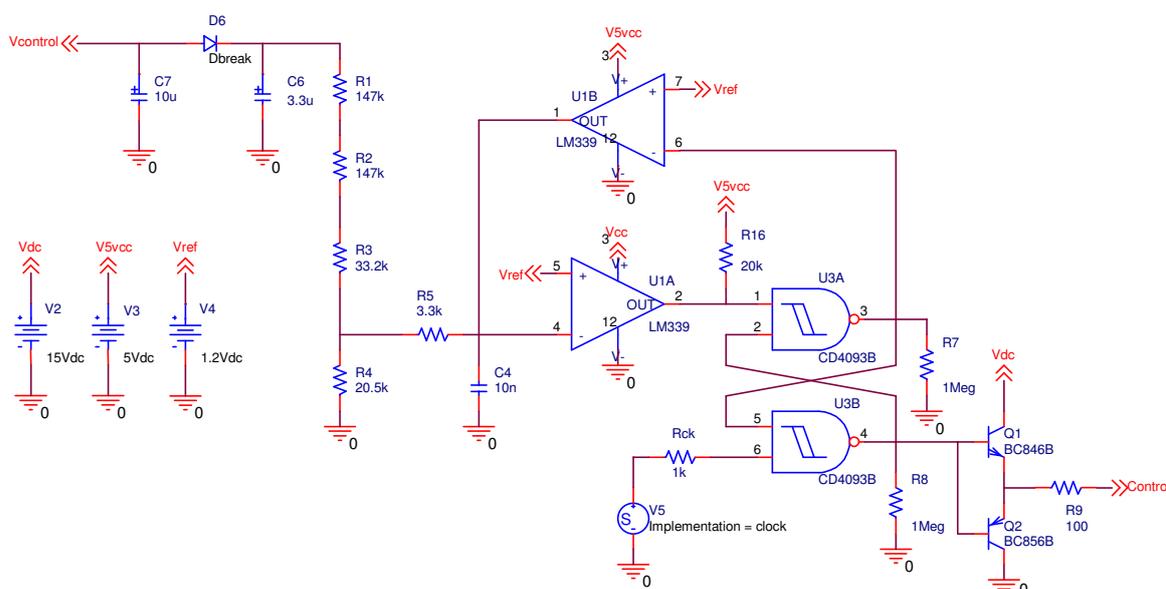
Segundo [17], conhecendo-se o valor rms da tensão de entrada, podem-se controlar as características dinâmicas do contator eletromagnético mantendo-se constante a razão cíclica que controla o interruptor, conforme a equação (1) e (44), aqui representada como (46) será obtida a mesma resposta dinâmica.

$$t_{on} = \frac{V_{ref}}{V_{control}} T_{ciclo} \quad (48)$$

Nesta seção será simulado o contator eletromagnético nestas condições para a análise da dinâmica de funcionamento.

### 4.7.3.1 Resultados

Nesta seção o circuito de controle em um ciclo mostrado na Figura 54, foi ajustado para seguir a tensão de pico como uma aproximação do valor médio quadrático da tensão alternada retificada e obter um meio bastante simples de manter o sinal proporcional ao pico da tensão. Foram modificados os valores dos resistores  $R_1$  e  $R_2$  para atender à nova tensão de referência de 113,13 Vcc, ou seja, o valor da tensão de pico da tensão de alimentação de 80 Vca. A inclusão do capacitor  $C_6$  e do diodo retificador  $D_6$  foi utilizada para manter o pico da tensão de controle  $V_{control\ pico}$  praticamente constante, mas ainda permitir que seja possível seguir a variação da tensão de controle  $V_{control}$ .  $C_6$  foi ajustado para manter a tensão com um valor mínimo de 0,99 do pico da tensão de controle. O diodo retificador garante que a descarga do capacitor seja somente nos resistores responsáveis pela carga do capacitor  $C_4$ .



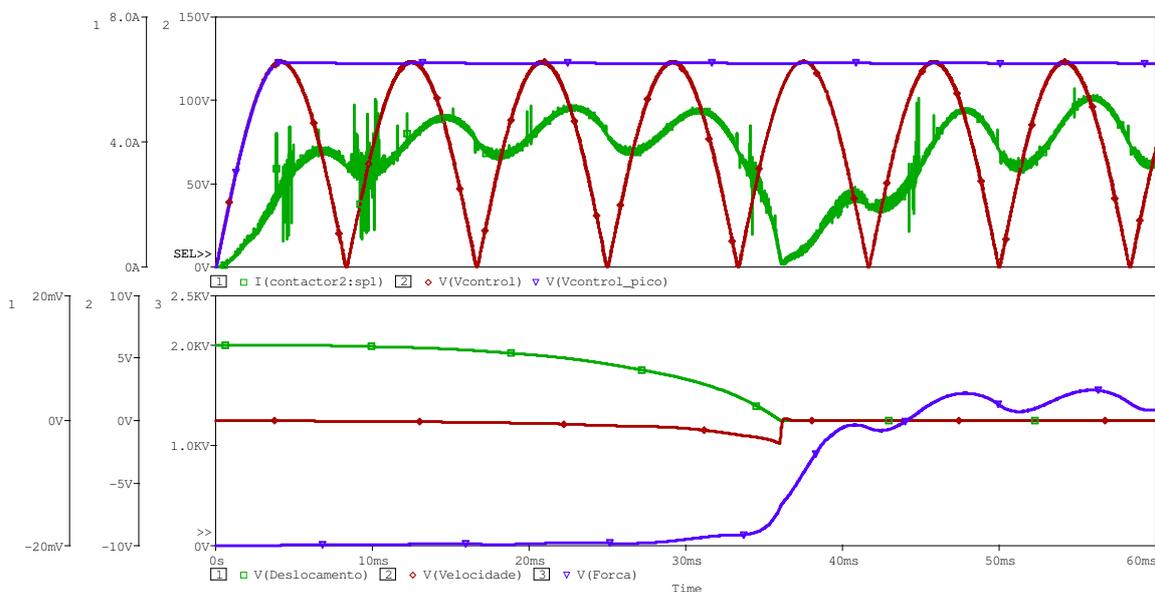
**Figura 54** – Circuito para simulação com alimentação em tensão alternada com razão cíclica controlada pelo pico da tensão retificada.

Realizando-se as simulações para as tensões de alimentação de 85 V a 275 V em tensão alternada utilizando o circuito da Figura 54, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 15, ambos iniciando a simulação na passagem por zero.

**Tabela 15** - Resultados de simulação com razão cíclica controlada pelo pico da tensão retificada com início da simulação na passagem por zero.

Tensão de controle (V)	Corrente de pico bobina (A)	Tempo de fechamento (ms)	Velocidade de impacto (m/s)
85	5,34	35,75	2,16
100	5,27	34,05	2,20
150	5,20	33,07	2,29
200	5,15	32,70	2,29
250	5,12	32,57	2,29
275	5,10	32,51	2,29
<b>Média</b>	<b>5,20</b>	<b>33,44</b>	<b>2,25</b>

Os resultados mostram que se consegue praticamente a mesma resposta dinâmica sem a necessidade de um filtro capacitivo com uma capacitância elevada, fato este que diminui significativamente o pico de corrente no início do fechamento, bem como o tempo que a corrente permanece com seu valor elevado. Por esta razão a ponte retificadora e a fonte de tensão não precisam ser sobredimensionadas para atender esta particularidade. A resposta dinâmica obtida variou pouco. Por esta razão, pode-se afirmar que a solução para a resposta dinâmica com alimentação em tensão alternada foi encontrada.

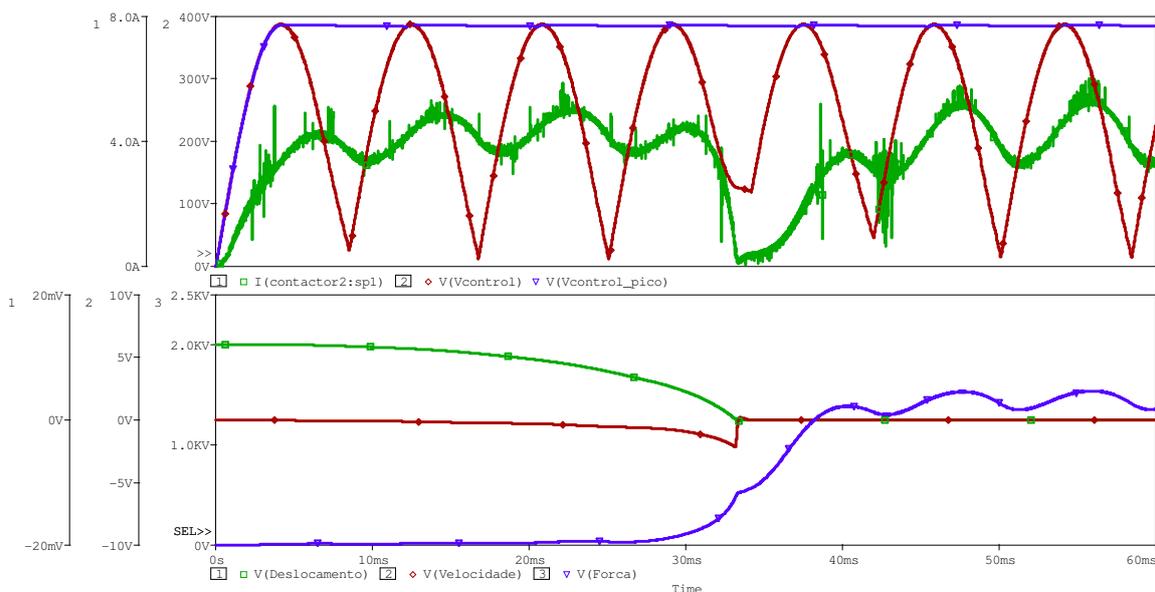


**Figura 55** - Simulação do contator eletromagnético com controle de tensão para 85 V em tensão alternada e razão cíclica controlada pelo pico da tensão alternada retificada com início da simulação na passagem por zero.

A Figura 55 mostra a simulação do contator eletromagnético com controle de tensão utilizando a tensão de pico da onda retificada para o controle da razão cíclica com início da simulação na passagem por zero. O tempo de fechamento ficou em 35,75 ms, o pico de corrente ficou em 5,34 A e a velocidade final ficou em 2,16 m/s. Como era

esperado com uma onda pulsante, para manter o mesmo tempo de fechamento é necessário aumentar o pico de corrente.

A Figura 56 mostra a simulação do contator eletromagnético com controle de tensão para 275 V, no qual o tempo de fechamento obtido foi de 32,51 ms, a corrente de pico de 5,10 A e velocidade de impacto de 2,29 m/s.



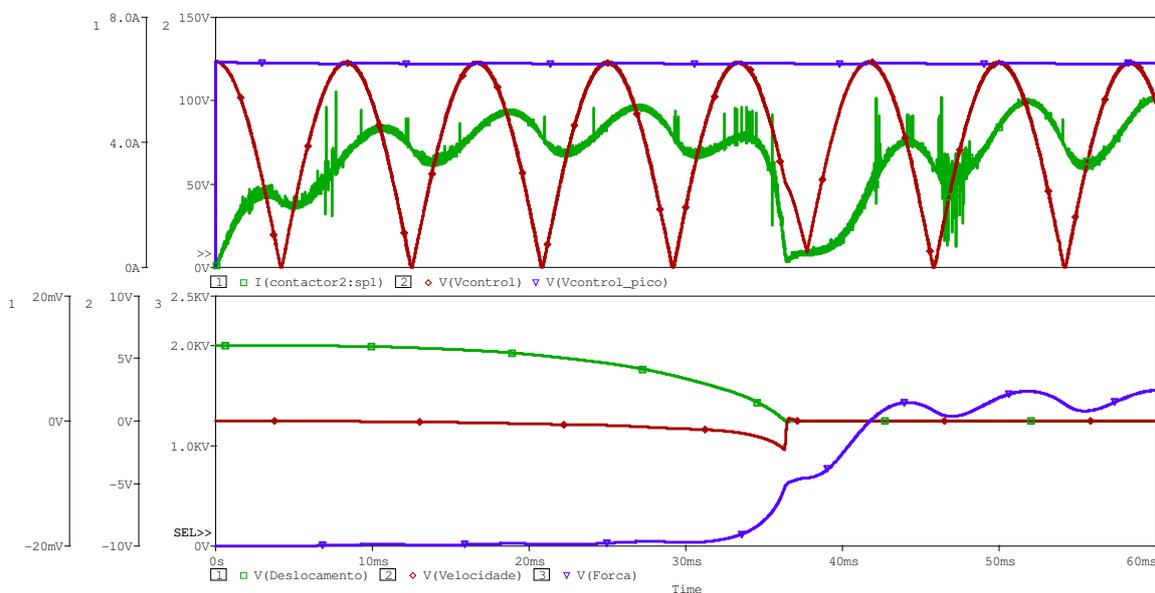
**Figura 56** - Simulação do contator eletromagnético com controle de tensão para 275 V em tensão alternada e razão cíclica controlada pelo pico da tensão alternada retificada com início da simulação na passagem por zero.

Para completar a análise foram realizadas as simulações com início no pico da tensão alternada retificada para avaliar a influência da tensão no início da simulação. Os resultados são apresentados na Tabela 16.

**Tabela 16** - Resultados de simulação com razão cíclica controlada pelo pico da tensão retificada com início da simulação no pico da tensão.

Tensão de controle (V)	Corrente de pico bobina (A)	Tempo de fechamento (ms)	Velocidade de impacto (m/s)
85	5,35	35,82	2,15
100	5,29	35,28	2,26
150	5,22	35,82	2,29
200	5,17	35,89	2,29
250	5,11	34,82	2,29
275	5,08	34,21	2,28
<b>Média</b>	<b>5,20</b>	<b>35,31</b>	<b>2,26</b>

A Figura 57 mostra os resultados para a tensão de 85 V apenas para mostrar que o capacitor  $C_6$  carrega-se desde o início da simulação e mantém-se neste valor durante toda a simulação.



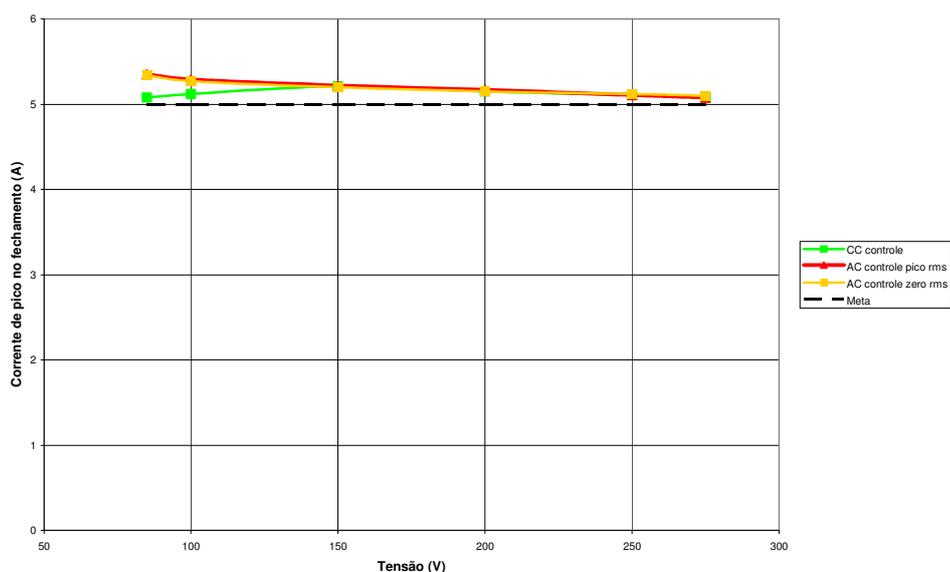
**Figura 57** - Simulação do contator eletromagnético com controle de tensão para 85 V em tensão alternada e razão cíclica controlada pelo pico da tensão alternada retificada com início da simulação no pico da tensão de alimentação.

A Tabela 17 mostra as médias dos resultados obtidos para corrente, tempo e velocidade. Por inspeção, os valores do tempo de fechamento ficaram fora da meta estipulada no início deste capítulo. Entretanto, estes valores não influenciaram os outros resultados. A razão deste atraso é devido ao carregamento do capacitor e a ondulação da tensão de controle.

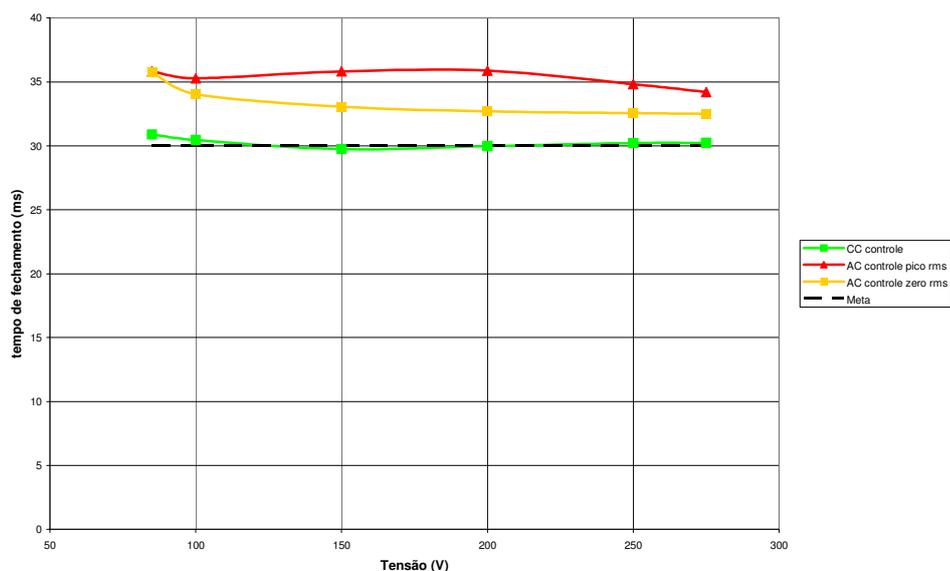
**Tabela 17** - Médias dos resultados com razão cíclica controlada pelo pico da tensão alternada retificada com início da simulação na passagem por zero e no pico da tensão de alimentação.

Tipo de alimentação e controle	Corrente de pico (Acc)		Tempo de fechamento (ms)		Velocidade de impacto (m/s)	
<b>Meta</b>	<b>5,00</b>	<b>5,25</b> <b>4,75</b>	<b>30,00</b>	<b>31,50</b> <b>28,50</b>	<b>2,30</b>	<b>2,41</b> <b>2,18</b>
Tensão alternada, passagem por zero, aproximação	5,20		<b>33,44</b>		2,25	
Tensão alternada, pico, aproximação	5,20		<b>35,31</b>		2,26	

A Figura 58 apresenta a comparação das correntes de pico, a qual não teve grandes variações das obtidas para tensão contínua, em que a variação foi de apenas 0,24 A. Proporcionalmente, a máxima corrente obtida na simulação foi 1,05 vezes maior que o valor mínimo.



**Figura 58** - Comparação das correntes de pico na bobina com controle de tensão com alimentação em tensão contínua e tensão alternada com início da simulação na passagem por zero e no pico e razão cíclica controlada pelo pico da tensão retificada.

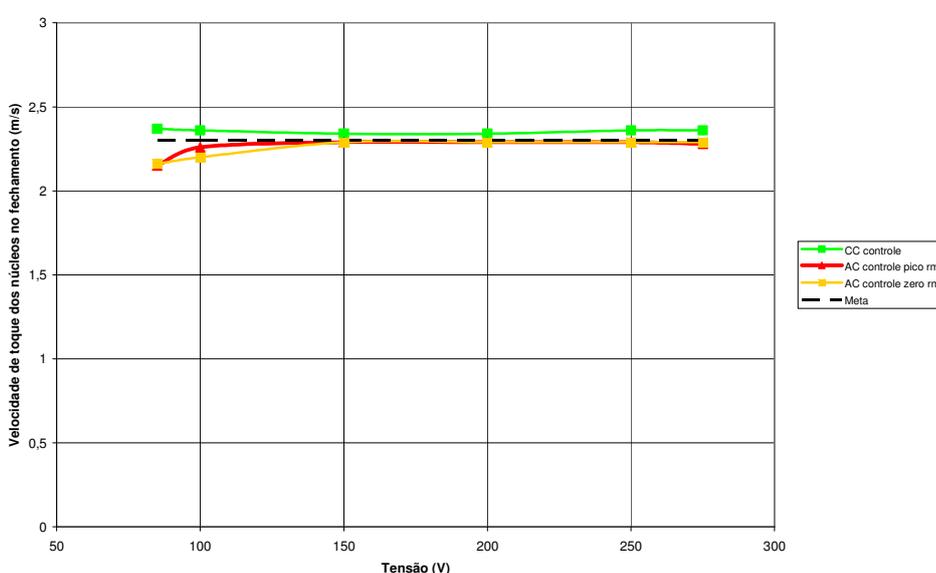


**Figura 59** - Comparação dos tempos de fechamento com controle de tensão com alimentação em tensão contínua e tensão alternada com início da simulação na passagem por zero e no pico e razão cíclica controlada pelo pico da tensão retificada.

A Figura 59 apresenta a comparação dos resultados dos tempos de fechamento em comparação com os obtidos para tensão contínua. Todos os tempos obtidos para tensão alternada foram maiores que os obtidos para simulação em tensão contínua. A variação da velocidade foi de 3,24 ms para as simulações que iniciaram na passagem por zero e de 1,68 ms para as simulações iniciadas no pico da tensão alternada. As proporcionalidades foram

pequenas, 1,10 e 1,05, para as simulações iniciadas na passagem por zero e pico da tensão. Conforme a Tabela 17, eles ficaram fora da faixa de variação estipulada.

A Figura 60 mostra a comparação dos resultados obtidos para a velocidade de fechamento no momento do toque dos núcleos. Na Tabela 17 estes valores ficaram dentro da faixa de variação da meta. A média das velocidades foi praticamente igual (2,25 m/s e 2,26 m/s), com uma variação de 0,13 m/s e 0,14 m/s, para as simulações iniciadas na passagem por zero e pico da tensão. Tais variações correspondem a 5,77% e 6,19% da média das velocidades.



**Figura 60** - Comparação das velocidades de fechamento com controle de tensão com alimentação em tensão contínua e tensão alternada com início da simulação na passagem por zero e no pico e razão cíclica controlada pelo pico da tensão retificada.

#### 4.8 Análise das simulações

A Tabela 18 mostra os resultados das simulações para cada tipo de tensão de alimentação, aplicação do controle e estratégias para melhorar o desempenho do controle. Nas células marcadas em cinza são os valores que ficaram dentro da meta estabelecida na simulação em tensão contínua com controle.

Nas simulações em tensão contínua e alternada mostrou-se que o contator sem o controle de tensão não permite a utilização em uma faixa ampla de tensão de alimentação. Os resultados em relação à velocidade de fechamento e corrente aumentam com a tensão, com isso a tendência é o aumento do tempo de ricochete, bem como da potência dissipada na bobina, a qual é uma função do produto entre tensão e corrente.

**Tabela 18** – Média dos resultados obtidos em simulação.

Tensão de alimentação	Corrente de pico (A)		Tempo de fechamento (ms)		Velocidade de impacto (m/s)	
<b>Meta</b>	<b>5,00</b>	5,25 4,75	<b>30,00</b>	31,50 28,50	<b>2,30</b>	2,41 2,18
Tensão contínua	10,62		16,50		3,74	
Tensão alternada, zero	10,34		18,03		4,24	
Tensão alternada, pico	10,86		19,08		4,43	
<b>Tensão contínua, controle</b>	<b>5,07</b>		<b>30,72</b>		<b>2,38</b>	
Tensão alternada, zero, controle	4,73		37,50		2,00	
Tensão alternada, pico, controle	4,70		37,94		2,00	
<b>Tensão alternada, zero, controle, filtro</b>	<b>5,10</b>		<b>31,27</b>		<b>2,35</b>	
<b>Tensão alternada, pico, controle, filtro</b>	<b>5,10</b>		<b>30,48</b>		<b>2,37</b>	
<b>Tensão alternada, zero, controle, aproximação</b>	<b>5,20</b>		33,44		<b>2,20</b>	
<b>Tensão alternada, pico, controle, aproximação</b>	<b>5,20</b>		35,31		<b>2,22</b>	

Para resolver estes problemas, foi introduzido o controle de tensão utilizando a técnica de controle em um ciclo, o qual permite o controle da razão cíclica de tal forma que a tensão equivalente na bobina seja constante. Utilizando o controle de tensão para a simulação em tensão contínua, foram obtidos resultados que comprovaram que é possível aumentar a faixa de tensão de alimentação sem que se comprometam os resultados da corrente, tempo e velocidade de fechamento. Estes resultados são independentes da variação da tensão de alimentação em tensão contínua. Com estes resultados, foram estabelecidas metas para a comparação dos resultados de simulação para as outras condições de alimentação.

Aplicando-se o mesmo controle utilizado para simulação em tensão contínua, foram realizadas simulações em tensão alternada para verificar a influência da forma de onda no desempenho do contator eletromagnético. Na primeira simulação em tensão alternada, não foi utilizado nenhum componente adicional. Apenas foi aplicado o controle. Os resultados não foram satisfatórios e mostraram que seria necessário melhorar os resultados.

Para melhorar os resultados das simulações do controle, seguiram-se duas estratégias para atacar o problema: *Redução da ondulação e aproximação do valor rms*. No primeiro caso foi utilizado um filtro capacitivo, o qual permitiu a utilização do mesmo circuito utilizado em tensão contínua. No segundo caso foi utilizado o artifício de apresentar um sinal de controle que fosse proporcional ao valor médio quadrático da tensão de alimentação durante todo o período de fechamento do contator eletromagnético.

Na simulação em tensão alternada com filtro capacitivo foram obtidos os mesmos resultados obtidos para a simulação em tensão contínua. A única desvantagem é que com a utilização do filtro capacitivo, o valor da capacitância necessitará de altos valores de

corrente para manter a tensão com baixa ondulação. Outra desvantagem é que uma solução para um determinado contator não poderá ser utilizada em outro com a mesma faixa de tensão.

Para simulação em tensão alternada com aproximação do valor médio quadrático pelo pico da tensão alternada senoidal foi possível obter os mesmos resultados obtidos em tensão contínua, sem a necessidade de um filtro capacitivo. O pico da tensão é obtido por um circuito resistor-capacitor com um diodo a jusante, permitindo a carga rápida do capacitor e que sua descarga seja realizada somente nos resistores de atenuação. A consequência desta estratégia é que são necessárias modificações no circuito de atenuação, no qual o circuito de controle para tensão alternada é diferente do circuito de controle para tensão contínua. Entretanto, este inconveniente pode ser resolvido com a utilização de um microcontrolador.

O mesmo modelo de contator eletromagnético descrito em [1] foi utilizado em todas as simulações. Não foram feitas alterações nos seus parâmetros para adaptá-lo a um acionamento controlado a fim de melhorar a resposta e desempenho dinâmico.

Os resultados do tempo de fechamento e velocidades de toque dos núcleos no fechamento mostram que, na faixa de tensão de alimentação utilizada nas simulações, a variação da velocidade é muito menor que a do contator eletromagnético sem controle. Esta característica permite que o ricochete dos contatos principais seja previsto e otimizado para esta velocidade, podendo-se afirmar que o ricochete estará constante para toda a faixa de tensão. A corrente na bobina com controle de tensão tem seu valor praticamente constante para toda a faixa de tensão de alimentação. Como consequência, a perda ôhmica na bobina é constante e independente da tensão, permitindo que o número de manobras possa ser aumentado e as características de transferência de calor possam melhorar, uma vez que a potência dissipada é constante.

Pela análise das simulações pode-se concluir que o contator eletromagnético com controle de tensão tem uma variação menor dos resultados obtidos de corrente, tempo e velocidade de fechamento. Assim, esse modelo permite ao projetista de contadores eletromagnéticos fazer o estudo dinâmico para a obtenção do melhor casamento do sistema massa-mola-amortecedor para uma determinada tensão de operação.

## 5 Validação e resultados de ensaios práticos

### 5.1 Introdução

No capítulo 4 foram realizadas várias simulações do contator eletromagnético modelado em PSpice considerando tensão de alimentação contínua e alternada, bem como as respostas sem controle e com controle de tensão. Foi demonstrado por simulação que, para se obter as mesmas características no fechamento do contator eletromagnético, quando a amplitude da tensão de alimentação varia, é necessário aplicar o controle de tensão. Controlando-se a tensão entregue a bobina, o tempo de fechamento, velocidade e pico de corrente se mantiveram constantes para uma faixa de tensão de alimentação de 85 V a 275 V em tensão contínua ou alternada.

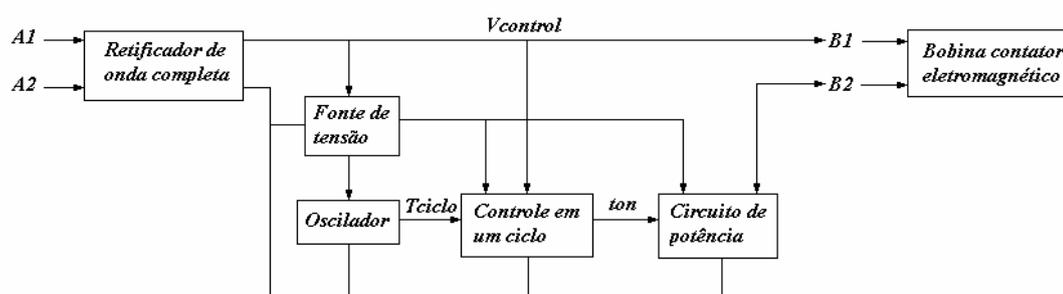
Neste capítulo serão realizados ensaios práticos com um contator eletromagnético para validar o estudo. Com um contator eletromagnético real, a bobina foi ajustada para a tensão de alimentação mínima, a fim de garantir o fechamento para toda a faixa de tensão. Entretanto, este contator é diferente daquele do modelo utilizado no capítulo 4. Assim, a validação experimental, será qualitativa, evidenciando a atuação do controle e também a sua viabilidade de implementação. Para o estudo via simulação não há um modelo deste contator utilizado no estudo prático. É importante ressaltar que o objetivo desta dissertação não foi a modelagem do contator, mas sim o desenvolvimento de técnicas de controle de tensão aplicadas ao controle do fechamento de contadores eletromagnéticos. O modelo utilizado na simulação foi importante para o desenvolvimento das técnicas de controle. Assim neste capítulo, mostrar-se-á a viabilidade da implementação do controle de tensão.

### 5.2 Projeto do circuito de controle

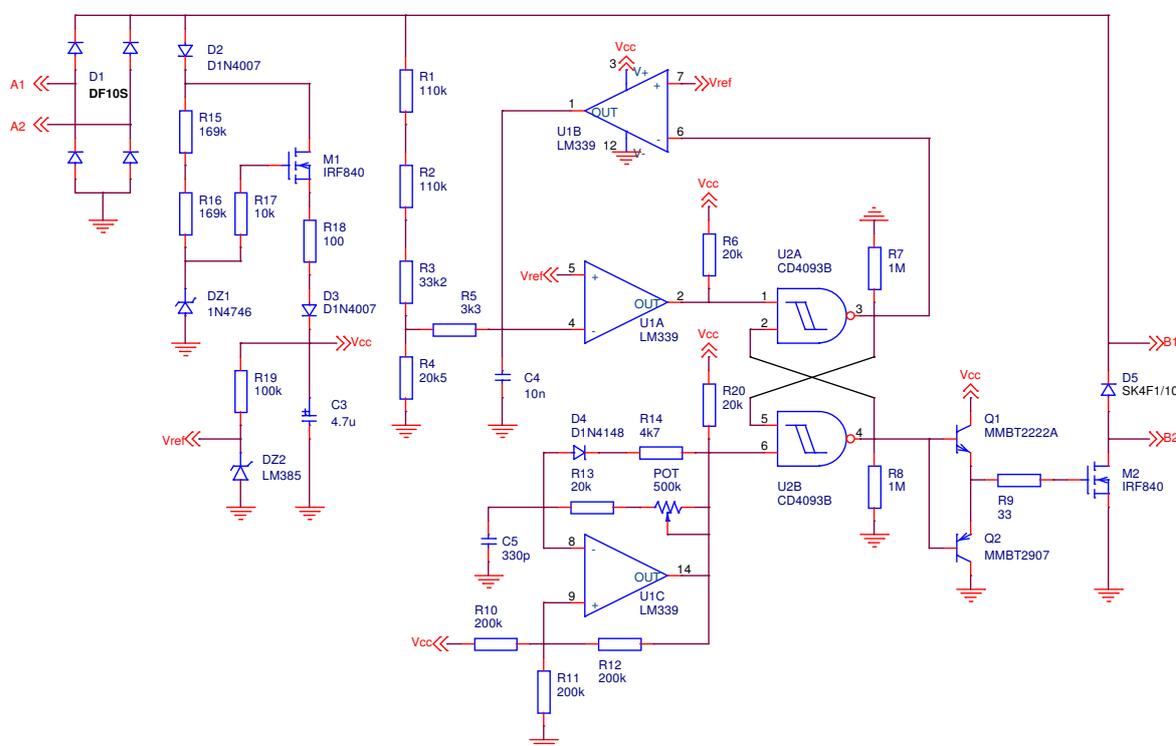
No projeto do circuito de controle devem ser conhecidos ou determinados os seguintes dados:  $V_{control\_min}$ ,  $V_{control\_max}$ ,  $V_{ref}$  e  $f_{osc}$ . A tensão de referência  $V_{ref}$  e a frequência de oscilação  $f_{osc}$  serão geradas por subcircuitos do circuito de controle.

A Figura 61 mostra os blocos responsáveis pela alimentação pelos terminais de entrada A1 e A2 e os terminais B1 e B2 são utilizados para ligar a bobina do contator eletromagnético. A tensão de alimentação disponível em A1 e A2 é retificada, alimentando a fonte de tensão fazendo com que o oscilador comece a funcionar e o controle em um

ciclo, inicie a avaliação da tensão retificada e gere um sinal de controle para o circuito de potência. Os sinais  $V_{control}$  e  $T_{ciclo}$  são fornecidos pelo retificador e oscilador, respectivamente. A tensão  $V_{ref}$  é fornecida pela parametrização do circuito de controle. Com estes sinais o circuito de controle, em um ciclo, gera o sinal  $t_{on}$  para controlar o circuito de potência e conseqüentemente a tensão equivalente na bobina do contator eletromagnético.

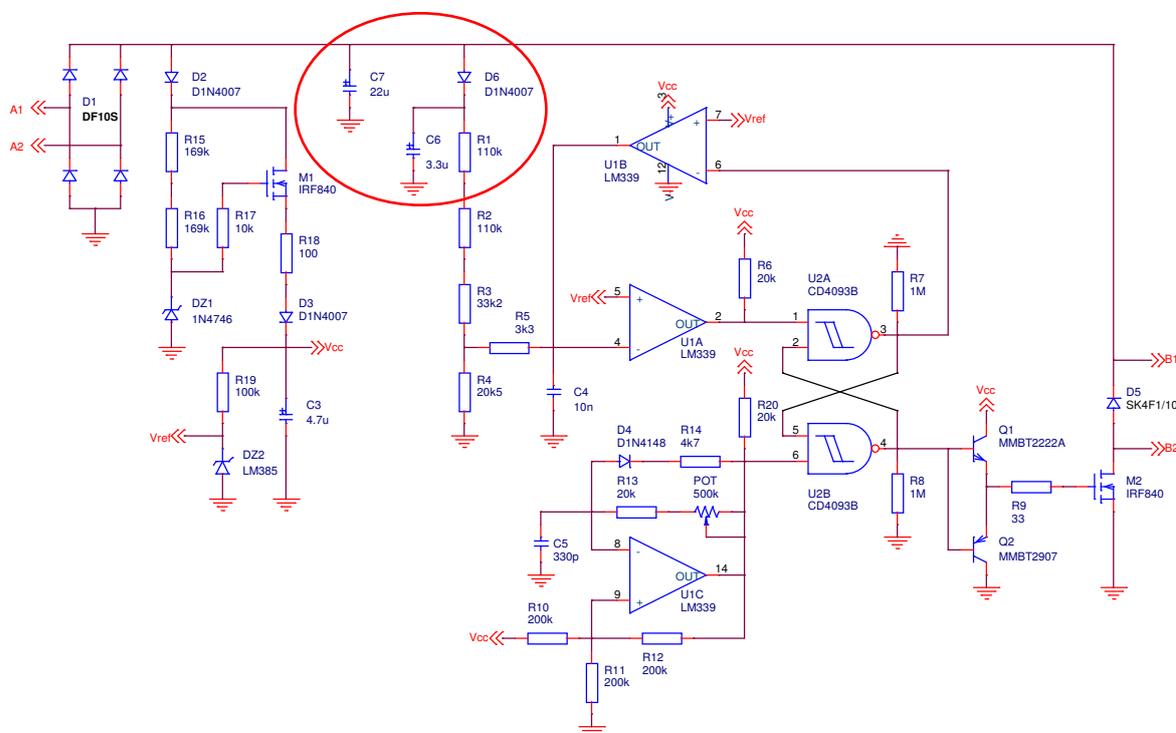


**Figura 61** – Diagrama de blocos do circuito completo do controle de tensão.



**Figura 62** - Circuito completo para controle de tensão do contator eletromagnético para alimentação em tensão contínua.

A Figura 62 mostra o circuito para o controle de tensão para alimentação em tensão contínua e a Figura 63 mostra o circuito para o controle de tensão para alimentação em tensão alternada.



**Figura 63** - Circuito completo para controle de tensão do contator eletromagnético para alimentação em tensão alternada.

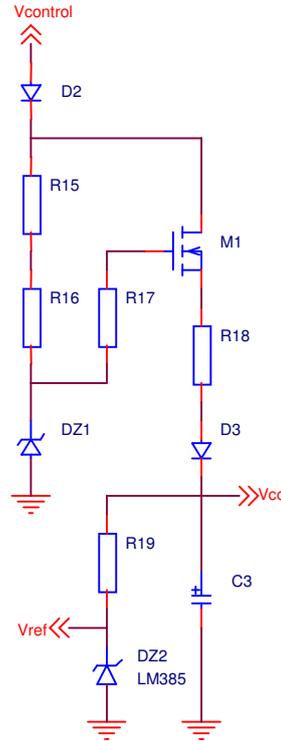
A diferença entre os dois circuitos está evidenciada na Figura 63 pelo círculo em vermelho. Os circuitos foram projetados para exigir o mínimo de equipamentos para o seu funcionamento durante os ensaios, sendo necessário apenas 4 cabos para o funcionamento do circuito (2 cabos para a tensão de alimentação e 2 cabos para a alimentação do contator eletromagnético). Com estes circuitos foi possível fazer os ensaios com o contator eletromagnético. A seguir são deduzidas as equações para os circuitos.

### 5.2.1 Circuito da fonte de alimentação e da tensão de referência

A fonte de tensão é uma fonte linear série para a geração da tensão contínua de alimentação  $V_{cc}$  para todo o circuito, incluindo a tensão de referência  $V_{ref}$ . Analisando as duas malhas e isolando a tensão sobre o capacitor  $C_3$  da Figura 64, pode-se escrever (49) e (50).

$$V_{cc} = V_{C3} = V_{DZ1} - V_{R17} - V_{GSM1} - V_{R18} - V_{D3} \quad (49)$$

$$V_{cc} = V_{control} - V_{D2} - V_{DSM1} - V_{R18} - V_{D3} \quad (50)$$



**Figura 64** – Circuito da fonte de tensão e tensão de referência.

onde  $V_{C3}$  é a tensão no capacitor  $C_3$  utilizado como filtro de tensão, e é a tensão de alimentação  $V_{cc}$ ;  $V_{R17}$  e  $V_{R18}$  são as quedas de tensão nos resistores  $R_{17}$  e  $R_{18}$ , respectivamente;  $V_{D2}$  e  $V_{D3}$  são as quedas de tensão em condução direta dos diodos retificadores  $D_2$  e  $D_3$ ;  $V_{DZ1}$  é a tensão no diodo  $D_{Z1}$ ;  $V_{GSM1}$  é a tensão porta-fonte e  $V_{DSM1}$  é a tensão dreno-fonte do MOSFET  $M_1$ .

As tensões  $V_{DZ1}$  e  $V_{GSM1}$  podem ser consideradas constantes e devido à baixa corrente e as baixas resistências pode-se considerar que  $V_{D3}$ ,  $V_{R17}$  e  $V_{R18} \approx 0$ . Assim, a tensão no capacitor  $C_3$  terá um valor constante. A grande vantagem desta fonte é a rápida carga do capacitor  $C_3$  e sua simplicidade. Assim, a tensão  $V_{cc}$  pode ser reescrita como (51) e (52).

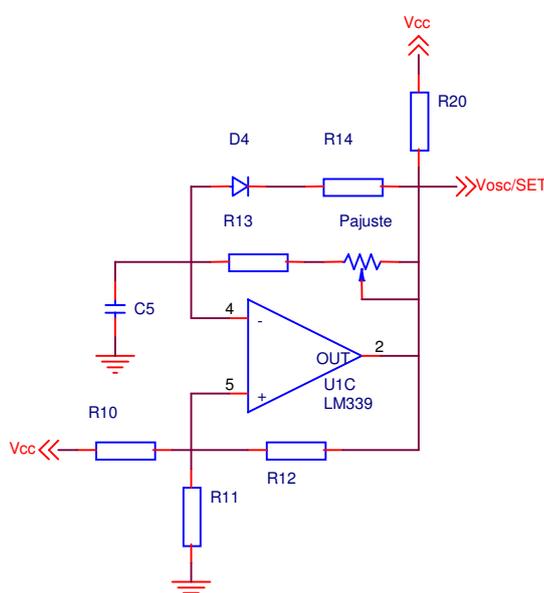
$$V_{cc} \approx V_{DZ1} - V_{GSM1} \quad (51)$$

$$V_{cc} \approx V_{control} - V_{DSM1} \quad (52)$$

A tensão de referência será obtida através do circuito integrado LM385-1,2, o qual fornece uma referência de tensão  $V_{ref}$  de 1,2 V. O resistor  $R_{19}$  é utilizado para limitar a corrente, garantindo a faixa de operação linear do circuito integrado.

## 5.2.2 Circuito do oscilador

O oscilador utilizando o comparador LM339 utiliza a tensão de carga e descarga do capacitor  $C_5$  para obter a frequência de oscilação  $f_{osc}$ , conforme a configuração mostrada na Figura 65.



**Figura 65** – Circuito do oscilador.

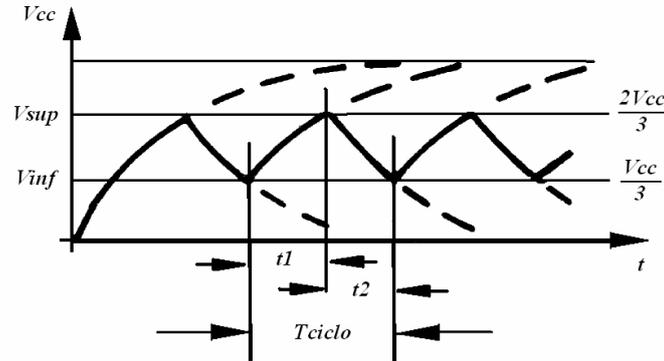
O comparador LM339 foi utilizado na configuração comparador com histerese, na qual a tensão do capacitor oscila entre as tensões limite  $V_{sup}$  e  $V_{inf}$ . Onde  $V_{sup}$  é a tensão de comparação superior e  $V_{inf}$  é a tensão de comparação inferior conforme mostrado na Figura 66.

A tensão de comparação superior para a carga do capacitor é dada por (53).

$$V_{sup} = V_{cc} \frac{R_{11}}{R_{11} + R_{10} // R_{12}} \quad (53)$$

Escolhe-se a relação entre os resistores da equação  $R_{10}$ ,  $R_{11}$  e  $R_{12}$  que definem a histerese, como (54).

$$R_{10} = R_{11} = R_{12} \quad (54)$$



**Figura 66** – Tensões limite para funcionamento do circuito oscilador.

Assim a tensão de comparação superior dada por (53) pode ser simplificada para (55).

$$V_{\text{sup}} = \frac{2V_{cc}}{3} \quad (55)$$

Da mesma forma, a tensão de comparação para a descarga do capacitor  $V_{\text{inf}}$  é dada por (56) e utilizando (54) pode-se simplificar (56) por (57):

$$V_{\text{inf}} = V_{cc} \frac{R_{11} // R_{12}}{R_{10} + R_{11} // R_{12}} \quad (56)$$

$$V_{\text{inf}} = \frac{V_{cc}}{3} \quad (57)$$

As equações de carga e descarga do capacitor são dadas pelas equações (58) e (59):

$$V_{\text{sup}} = V_{cc} \left( 1 - e^{\frac{-t_1}{(P_{ajuste} + R_{13})C_5}} \right) \quad (58)$$

$$V_{\text{inf}} = V_{\text{sup}} e^{\frac{-t_2}{R_{14}C_1}} \quad (59)$$

O tempo para chegar às condições de  $V_{\text{sup}}$  e  $V_{\text{inf}}$  é obtido, respectivamente, pelas equações (60) e (61).

$$t_1 = -(P_{ajuste} + R_{13}) C_5 \ln \left( 1 - \frac{V_{\text{sup}}}{V_{cc}} \right) \quad (60)$$

$$t_2 = -R_{14} C_5 \ln \left( \frac{V_{\text{inf}}}{V_{\text{sup}}} \right) \quad (61)$$

O tempo  $t_1$  é ajustável pelo potenciômetro  $P_{\text{ajuste}}$  para a frequência de oscilação  $f_{\text{osc}}$  desejada. O tempo  $t_1$  é fixo, então o período do oscilador  $T_{\text{ciclo}}$  é dado por (62) e a frequência de oscilação por (63).

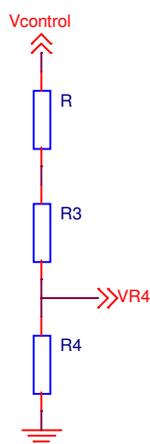
$$T_{\text{ciclo}} = t_1 + t_2 \quad (62)$$

$$f_{\text{osc}} = \frac{1}{T_{\text{ciclo}}} = \frac{1}{t_1 + t_2} \quad (63)$$

### 5.2.3 Circuito de atenuação em tensão contínua

O circuito da Figura 67 mostra dos resistores utilizados para adequar a tensão de controle  $V_{\text{control}}$  para valores de tensão adequados para serem utilizados pelo controle em um ciclo. O cálculo dos resistores é feito para a alimentação em tensão contínua.

Considerando-se que a tensão de controle  $V_{\text{control}}$  é igual a  $V_{\text{control\_min}}$  e definindo uma corrente de projeto  $I_{\text{projeto}}$  que passará pelos resistores  $R$ ,  $R_3$  e  $R_4$  nesta condição. Considerando-se que a corrente de projeto  $I_{\text{projeto}}$  que passa pelos resistores é a mesma, pois  $V_{R4}$  é a entrada do amplificador operacional possui alta impedância, como mostrado na Figura 69.  $V_{\text{control\_min}}$  é a tensão mínima de funcionamento do circuito completo de controle de um ciclo.



**Figura 67** – Circuito de atenuação para alimentação em tensão contínua.

O resistor  $R_4$  pode se calculado por (64).

$$R_4 = \frac{V_{R4}}{I_{projeto}} \quad (64)$$

Pode-se considerar que a tensão  $V_{R4}$  é 2,5 vezes maior que a tensão de referência  $V_{ref}$ . Assim, para garantir a linearidade do sinal de comparação, pode-se calcular a resistência  $R_4$  por (65).

$$R_4 = \frac{2,5V_{ref}}{I_{projeto}} \quad (65)$$

E o resistor  $R_3$  pode ser calculado de forma análoga ao cálculo de  $R_4$ , dado por (66).

$$R_3 = \frac{V_{R3}}{I_{projeto}} \quad (66)$$

Escolhendo uma tensão  $V_{R3}$  como sendo 10 vezes maior que a tensão de referência  $V_{ref}$ . Assim, pode-se calcular  $R_3$  por (67).

$$R_3 = \frac{10V_{ref}}{I_{projeto}} \quad (67)$$

Os resistores  $R_3$  e  $R_4$  devem ser fixos para qualquer faixa de tensão, uma vez determinados serão constantes para qualquer faixa de tensão de controle pretendida para o circuito. A resistência  $R$  é calculada para adequar a faixa de tensão que o controle deverá atuar, assim pode-se calcular a resistência  $R$  por (68).

$$R = \frac{V_{control\_min} - V_{R3} - V_{R4}}{I_{projeto}} \quad (68)$$

Uma vez que a resistência  $R$  foi determinada, seu valor pode ter uma dissipação de potência superior a sua capacidade. Portanto, deve-se dividir a resistência obtida por  $n$  vezes, conforme (69), de tal forma que atenda aos dois critérios: potência dissipada e máxima tensão de trabalho.

$$R_{01} = \frac{R}{n} = R_{02} \dots R_{0n} \quad (69)$$

Fazendo-se com que a tensão máxima de trabalho do resistor é dada na condição de ser 1,6 vezes a tensão máxima de controle, então:

$$V_{control\_max\_projeto} = 1.6 V_{control\_max} \quad (70)$$

A corrente máxima de projeto  $I_{projeto\_max}$  que passa nos resistores de atenuação pode ser calculada, então, por (71).

$$I_{projeto\_max} = \frac{V_{control\_max\_projeto}}{R + R_3 + R_4} \quad (71)$$

Com estes valores, pode-se calcular a tensão e potência do resistor de projeto  $R$  e escolher o valor de  $n$  que atenda os dois critérios. Assim a tensão máxima no resistor  $R$  será dada por (72). E a potência dissipada para esta tensão da será dada por (73).

$$V_R = R I_{projeto\_max} \quad (72)$$

$$P_R = V_R I_{projeto\_max} \quad (73)$$

Escolhendo o valor de  $n$  que atenda estes dois critérios os resistores estão calculados.

#### 5.2.4 Circuito de atenuação em tensão alternada

De acordo com as simulações para tensão alternada com controle de tensão mostrado na seção 4.7.3, o qual foi utilizado um circuito com diodo retificador  $D_2$  e capacitor  $C_6$  para tomar o valor de pico da tensão senoidal retificada para a geração dos sinais do controle de tensão. Para o circuito de atenuação em tensão contínua a faixa de tensão de alimentação foi de 85 a 275 V, sendo que para alimentação em tensão alternada será utilizada a mesma faixa. Entretanto, como será feito o controle pela tensão de pico como uma aproximação do valor médio quadrático da tensão de alimentação, o circuito de atenuação deve ser ajustado para uma nova faixa de tensão de controle, sendo calculado pela multiplicação por  $\sqrt{2}$  dada por 120,21 V a 388,91 V.

Para esta nova faixa de tensão de controle deve ser ajustado o resistor  $R$  dado pela equação (68), no qual se mantém o valor da corrente de projeto  $I_{projeto}$  e alterando o valor da tensão de controle mínima  $V_{control\_min}$  de 85 V para 120,21 V.

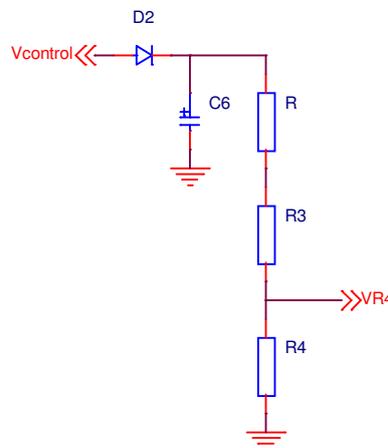
O capacitor  $C_6$  deve ser calculado para manter o valor da tensão de pico da tensão retificada de alimentação alternada, para cada valor de pico, dentro de uma faixa de variação bastante pequena, dado por (74).

$$C_6 = \frac{I_{projeto} V_{C1min}}{f_{rede}(V_{control\_pico}^2 - V_{C1min}^2)} \quad (74)$$

Sabendo-se que a corrente de projeto  $I_{projeto}$  pode ser calculada por (75) e limitando-se a ondulação máxima da tensão de controle como dado por (76), tem-se:

$$I_{projeto} = \frac{V_{control\_pico}}{R + R_3 + R_4} \quad (75)$$

$$V_{C1min} = 0,99 V_{control\_pico} \quad (76)$$



**Figura 68** - Circuito de atenuação para alimentação em tensão alternada.

Substituindo-se (75) e (76) na equação (74) e simplificando obtém-se uma equação dependente apenas dos parâmetros do circuito de atenuação dado por (77).

$$C_6 = \frac{49,75}{f_{rede}(R + R_3 + R_4)} \quad (77)$$

### 5.2.5 Circuito de controle em um ciclo

A Figura 69 mostra o circuito de controle em um ciclo baseado na referência [13]. O sinal de tensão proporcional ao sinal  $V_{control\_min}$  é obtido através do resistor  $R_4$ , pela sua queda de tensão  $V_{R4min}$ , o qual é calculado por (78). Este sinal deverá ser integrado pelo circuito composto pelo resistor  $R_5$  e pelo capacitor  $C_4$  para gerar uma rampa de tensão para comparar com  $V_{ref}$ .

$$V_{R4min} = V_{control\_min} \frac{R_4}{R + R_3 + R_4} \quad (78)$$

A partir do cálculo do período da frequência de oscilação  $f_{osc}$  dado por (79), a constante de tempo deve ser calculada para a tensão de controle mínima  $V_{control\_min}$ . Na condição deste valor de tensão, o tempo de condução  $t_{on}$  é igual ao período  $T_{ciclo}$ . A equação (80) calcula a constante de tempo para a determinação do capacitor  $C_4$  e do resistor  $R_5$ .

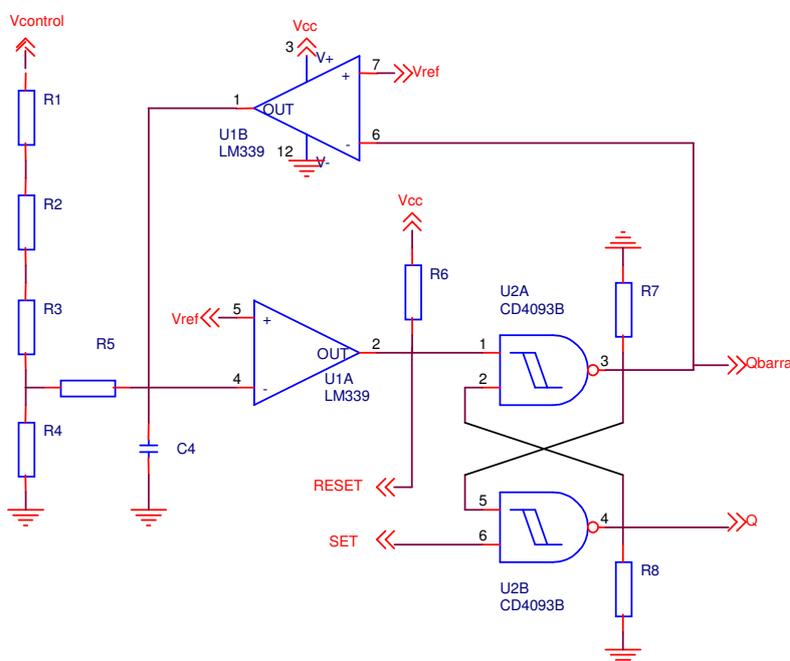


Figura 69 – Circuito de controle de um ciclo.

Escolhendo-se um valor para o capacitor  $C_4$ , calcula-se o resistor  $R_5$  pela equação (81).

$$T_{ciclo} = \frac{1}{f_{osc}} \quad (79)$$

$$\tau_{ciclo} = \frac{-T_{ciclo}}{\ln\left(\frac{V_{R4min} - V_{ref}}{V_{R4min}}\right)} \quad (80)$$

$$R_5 = \frac{\tau_{ciclo}}{C_4} - \left(\frac{R + R_3}{R + R_3 + R_4}\right) \quad (81)$$

A partir do cálculo dos valores de  $C_4$  e  $R_5$ , o controle em um ciclo deverá variar o tempo de condução do interruptor principal para impor a tensão adequada na bobina do contator eletromagnético.

O intervalo de tempo  $t_{on}$  do período  $T_{ciclo}$  em que o interruptor principal está fechado é dado por (83), onde a tensão  $V_{R4}$  é dada por (82). O tempo  $t_{on}$  é função da tensão de controle  $V_{control}$  durante o período de integração para igualar o valor de  $V_{ref}$ , para atingir as mesmas características de fechamento do contator eletromagnético.

$$V_{R4}(V_{control}) = V_{control} \frac{R_4}{R + R_3 + R_4} \quad (82)$$

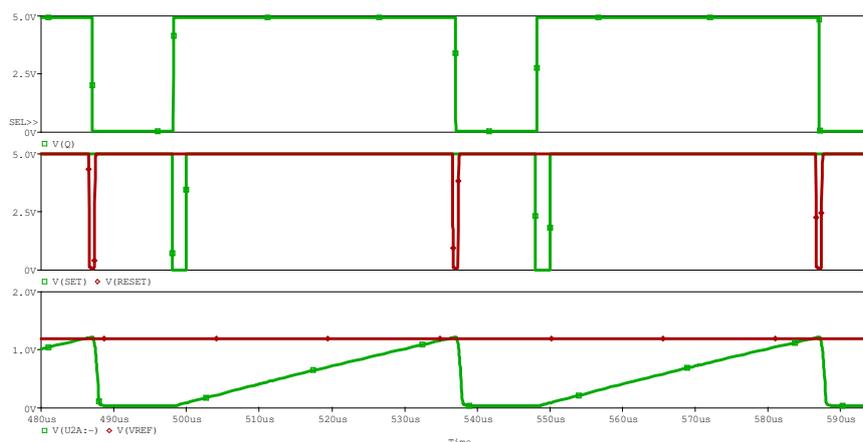
$$t_{on}(V_{R4}(V_{control})) = -\tau_{ciclo} \ln\left[\frac{V_{R4}(V_{control}) - V_{ref}}{V_{R4}(V_{control})}\right] \quad (83)$$

Esta equação satisfaz a condição para o controle de um ciclo descrito em 4.5, no qual a razão cíclica decresce com o aumento de  $V_{control}$ .

Completando a análise do circuito da Figura 69 é preciso analisar o funcionamento e a influência do circuito seqüencial assíncrono ou “latch RS”. Quando a tensão  $V_{C4}$  supera a tensão de referência  $V_{ref}$ , a saída do comparador U1A passa do estado lógico 1 para 0, reinicializando o circuito seqüencial assíncrono, isto é,  $Q$  passa do estado lógico 0 para 1 e  $Qbarra$  do estado lógico 1 para o estado lógico 0, sendo esta lógica de funcionamento descrita na Tabela 19. A Figura 19 mostra o princípio de funcionamento do controle de tensão com  $V_{control}$  em 100 V em tensão contínua.

**Tabela 19** – Tabela de combinações Latch RS

Entradas		Saídas	
“RESET”,	“SET”,	Q	Qbarra
1→0	1	0	1
1	1→0	1	0
1	1	Não muda	



**Figura 70** – Princípio de funcionamento do controle de tensão com  $V_{control}$  em 100 V em tensão contínua.

### 5.3 Ensaios com contator eletromagnético sem controle de tensão

O objetivo deste ensaio é validar o comportamento do contator eletromagnético com alimentação em tensão contínua sem a utilização do controle de tensão e evidenciar a variação dos *tempos de fechamento*.

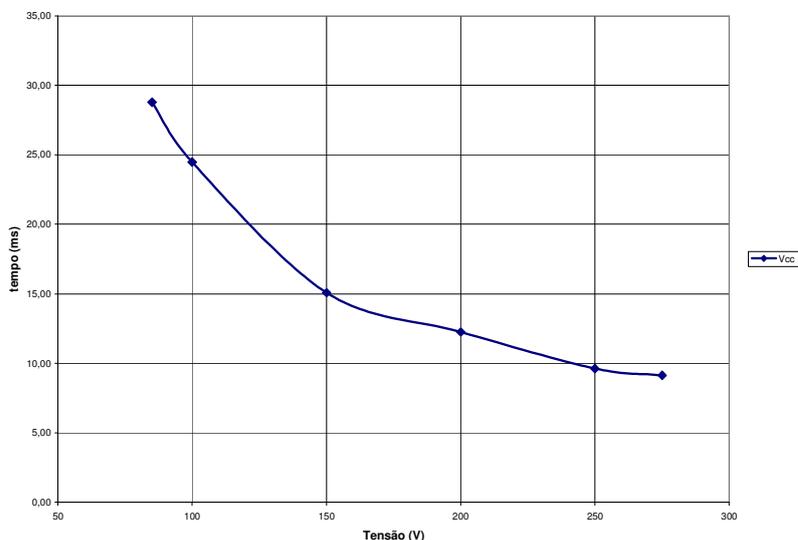
#### 5.3.1 Resultados dos ensaios

Foram medidas a tensão de controle  $V_{control}$  e o sinal que representa o fechamento do contato principal para a medida do tempo de fechamento. O método para a medida do tempo de fechamento é diferente do método utilizado nas simulações, no qual foi tomado o tempo desde a alimentação do contator eletromagnético na queda abrupta da corrente na bobina. O tempo médio de fechamento do contator eletromagnético variou de um mínimo de 9,14 ms e um máximo de 28,78 ms, os quais foram obtidos para as tensões de 275 V e 85 V em tensão contínua, respectivamente. Foram tomados 5 tempos de fechamento para cada tensão para gerar um valor médio com a finalidade de eliminar possíveis erros de medição. A Tabela 20 mostra os valores de tempo de fechamento obtidos nos ensaios.

**Tabela 20** - Resultados dos ensaios com do contator eletromagnético sem controle, variando a tensão de alimentação em tensão contínua.

Tensão de controle	Tempo de fechamento					
	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5	Média
85	29,10	28,60	28,50	28,80	28,90	<b>28,78</b>
100	24,30	25,00	24,20	24,10	24,80	<b>24,48</b>
150	15,40	15,20	14,00	15,40	15,40	<b>15,08</b>
200	12,10	12,30	12,50	11,80	12,60	<b>12,26</b>
250	9,50	9,60	9,80	9,80	9,40	<b>9,62</b>
275	9,10	9,20	9,10	9,30	9,00	<b>9,14</b>
					<b>Média</b>	<b>16,56</b>

A Figura 71 mostra a curva da variação do tempo de fechamento em função da tensão de controle  $V_{control}$ .



**Figura 71** – Tempos de fechamento em função da tensão de controle obtidos em ensaio.

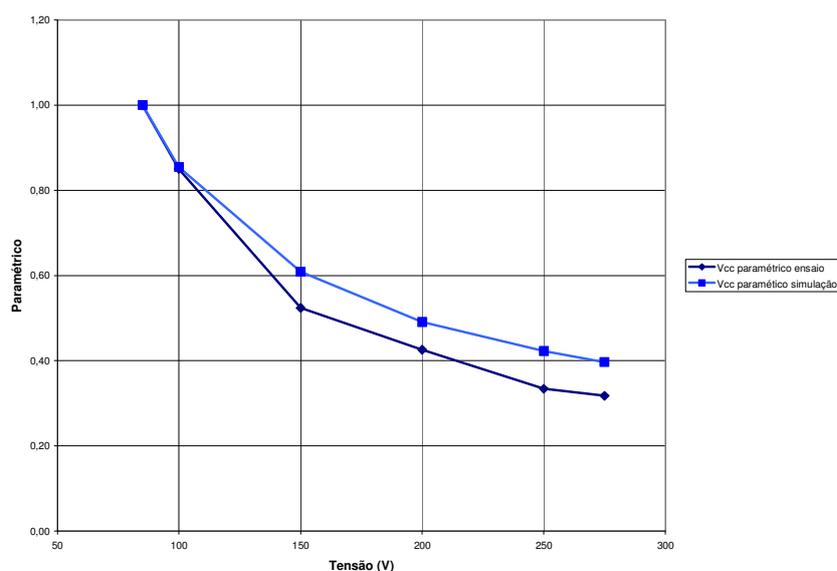
Assim como nas simulações, os resultados obtidos nos ensaios de fechamento do contator eletromagnético comprovam que o contator eletromagnético sem nenhum tipo de controle não apresenta as características necessárias para funcionar em uma faixa de tensão estendida.

A Tabela 21 apresenta a parametrização dos dados obtidos em simulações e ensaios para comparação.

A Figura 72 mostra a comparação das curvas parametrizadas pelo maior tempo obtido nas simulações e nos ensaios. As curvas têm a mesma característica de variação, comprovando que a simulação é uma boa aproximação do contator eletromagnético no fechamento.

**Tabela 21** – Parametrização dos dados obtidos em simulações e ensaios para comparação.

Tensão de controle	Tempo de fechamento		Parametrização	
	Simulação	Ensaio	Simulação	Ensaio
85	27,36	28,78	1,00	1,00
100	23,39	24,48	0,85	0,85
150	16,66	15,08	0,61	0,52
200	13,43	12,26	0,49	0,43
250	11,57	9,62	0,42	0,33
275	10,86	9,14	0,40	0,32
<b>Média</b>	<b>17,21</b>	<b>16,56</b>	<b>0,63</b>	<b>0,58</b>



**Figura 72** – Comparação dos valores parametrizados em relação ao maior tempo obtido para os ensaios e simulações.

#### 5.4 Ensaios com contator eletromagnético com controle eletrônico de tensão em corrente contínua

Para a validação do controle eletrônico de tensão com alimentação em tensão contínua foram realizados ensaios para verificar os tempos de fechamento. Assim como nas simulações, serão comparados os tempos de fechamento obtidos para a condição com alimentação em tensão contínua sem controle e com controle. Será definido um valor meta baseado na média dos tempos de fechamento obtidos para os ensaios com controle de tensão para a comparação das condições de alimentação em tensão contínua e alternada.

##### 5.4.1 Resultados dos ensaios em corrente contínua

Foram realizados ensaios com o contator eletromagnético utilizado nos ensaios em tensão contínua e aplicando o controle de tensão para validação. Os resultados obtidos estão mostrados na Tabela 22.

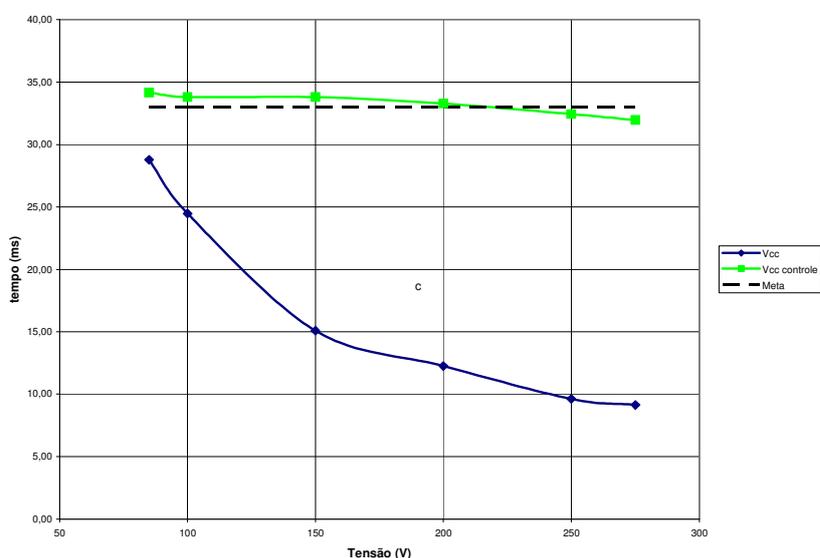
Assim como feito em 4.6, a partir da média dos valores obtidos nos ensaios foi definido um valor meta para a comparação com os ensaios em tensão alternada. O tempo de fechamento meta é de 33 ms.

A Figura 73 mostra as curvas dos valores médios dos tempos de fechamento mostrados na Tabela 22, nos quais assim como nas simulações, foram obtidos tempos de fechamento do contator eletromagnético com uma variação de apenas 2,20 ms.

Proporcionalmente o valor máximo de tempo de fechamento foi 1,06 vezes maior que o mínimo valor. Em comparação com os resultados obtidos em simulação, a variação ficou em 1,14 ms e a proporcionalidade ficou em 1,04 vezes o valor mínimo obtido.

**Tabela 22** - Resultados dos ensaios do contator eletromagnético com controle de tensão, variando a tensão de alimentação em tensão contínua.

Tensão de controle	Tempo de fechamento					
	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5	Média
85	34,60	33,80	33,00	34,40	35,00	<b>34,16</b>
100	34,00	34,00	33,80	33,20	34,00	<b>33,80</b>
150	34,00	33,20	33,40	33,80	34,60	<b>33,80</b>
200	33,60	33,20	33,60	32,80	33,20	<b>33,28</b>
250	32,60	32,80	32,00	32,20	32,60	<b>32,44</b>
275	32,00	32,00	31,60	32,00	32,20	<b>31,96</b>
					<b>Média</b>	<b>33,24</b>



**Figura 73** - Tempos de fechamento em função da tensão de controle obtidos em ensaio.

## 5.5 Ensaios com contator eletromagnético com controle eletrônico de tensão em corrente alternada

Para a validação do controle de tensão com alimentação em tensão alternada foi utilizado o controle de tensão mostrado na Figura 68. O sinal para o controle da razão cíclica é realizado pelo valor de pico da tensão retificada.

### 5.5.1 Resultados dos ensaios em corrente alternada

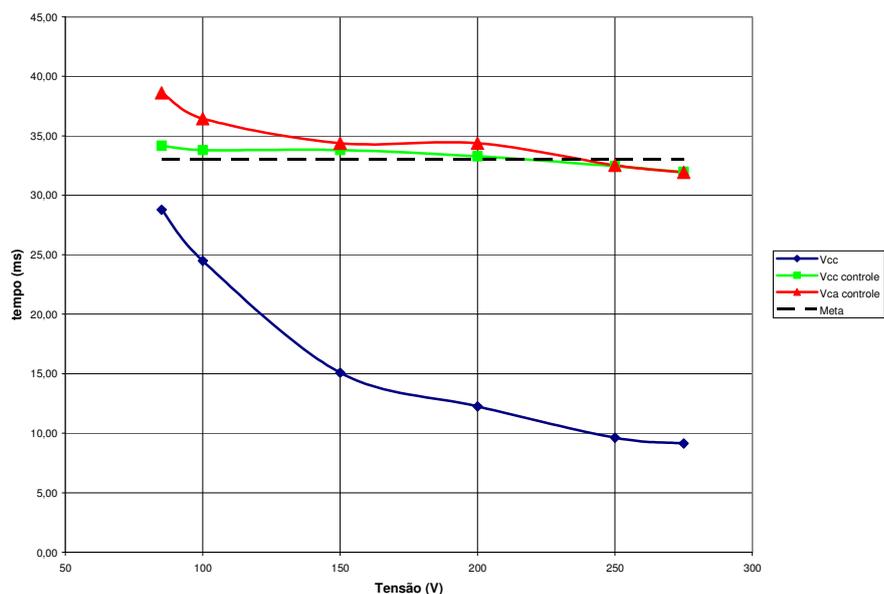
Foram realizados os ensaios com o controle eletrônico para tensão alternada e os resultados dos tempos de fechamento mostrados na Tabela 22.

**Tabela 23** - Resultados dos ensaios do contator eletromagnético com controle de tensão, variando a tensão de alimentação em tensão alternada.

Tensão de controle	Tempo de fechamento					
	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5	Média
85	38,30	38,60	38,80	38,80	38,60	<b>38,62</b>
100	36,00	35,40	37,20	36,00	37,60	<b>36,44</b>
150	35,00	33,60	34,20	34,60	34,50	<b>34,38</b>
200	35,00	34,20	34,20	34,20	34,30	<b>34,38</b>
250	32,40	32,80	32,70	32,50	32,20	<b>32,52</b>
275	31,60	32,80	31,60	31,60	32,00	<b>31,92</b>
					<b>Média</b>	<b>34,71</b>

Para os ensaios com tensão alternada foi obtida uma variação do tempo de fechamento de 6,70 ms e a proporcionalidade de 1,21. Na simulação, obteve-se 3,24 ms para a variação do tempo de fechamento e proporcionalidade de 1,10 vezes o menor valor obtido para as simulações iniciadas na passagem por zero. Para as simulações iniciadas no pico da tensão, foi obtida uma variação de 1,68 ms e proporcionalidade de 1,05.

A Figura 73 mostra os tempos de fechamento em função da tensão de controle obtidos em ensaio com tensão alternada.



**Figura 74** - Tempos de fechamento em função da tensão de controle obtidos em ensaio.

## 6 Conclusão

O presente trabalho abordou o desenvolvimento, a simulação e a validação de um controle eletrônico de tensão para contatores eletromagnéticos em fabricação. O trabalho abrangeu a tecnologia atual dos contatores e a descrição sucinta dos parâmetros que influenciam na dinâmica de fechamento dos contatos e na vida útil.

A modelagem matemática foi utilizada para evidenciar as não linearidades envolvidas no processo de fechamento do contator. Uma metodologia para controle do fechamento foi desenvolvida através da simulação simultânea de um modelo de contator eletromagnético utilizando elementos duais em PSpice junto com a eletrônica para o controle de tensão. O controle de tensão foi baseado na teoria de que se mantendo a tensão aplicada na bobina constante, as características dinâmicas não se alteram.

Uma das principais características da modelagem apresentada neste trabalho é a utilização da simulação simultânea de um sistema não linear multi-físico juntamente com o controle eletrônico. O contator eletromagnético e sua eletrônica foram analisados por um único simulador. Em geral, este tipo de desenvolvimento é realizado em simuladores separados e os resultados são utilizados para melhorar o desempenho dos dois sistemas separadamente.

O contator eletromagnético sem controle de tensão não atendeu as características de desempenho desejadas para uma faixa de tensão ampla. Com a aplicação da metodologia de controle não linear, conhecido como controle em um ciclo, conseguiu-se manter a tensão equivalente na bobina do contator independente da variação da tensão de alimentação.

A simulação simultânea permitiu o desenvolvimento do controle eletrônico sem a necessidade da construção de um protótipo para realizar ensaios práticos. O circuito eletrônico foi desenvolvido de acordo com os resultados obtidos nas simulações, permitindo variar o tipo de tensão de alimentação e verificar a sua influência diretamente em poucos minutos. A transição da simulação para o circuito eletrônico ocorreu de forma bastante tranqüila, pois a maioria dos resultados já era conhecida e foi necessário apenas realizar a verificação dos resultados qualitativamente.

Nas simulações foi utilizado um modelo de contator diferente do usado para os ensaios de validação, de modo que não foi possível realizar a comparação quantitativa

entre os resultados da simulação e dos ensaios. Entretanto, o estudo por simulação propiciou o desenvolvimento do controle de tensão, além de minimizar o tempo e os custos que seriam necessários para um estudo experimental por meio de protótipos.

A técnica de controle de tensão tem vantagens quando utilizadas para o controle do fechamento do contator, devido ao ajuste automático das condições nominais de trabalho. Entretanto, devem-se realizar mais testes para a avaliação da influência da variação da resistência da bobina com a temperatura, a qual irá influenciar na curva de corrente e na dinâmica do contator.

Como trabalhos futuros são recomendados o estudo do casamento mecânico do contator eletromagnético em condições de tensão constante e a aplicação do controle de tensão neste estudo para verificar se os resultados são mantidos.

Além disso, a utilização de um microcontrolador dará maior liberdade para o projetista do controle eletrônico, tal como frequência de chaveamento, tolerância dos componentes, adaptação à variação da resistência da bobina, funcionamento em afundamento de tensão, entre outras possibilidades.

O objetivo de verificar o funcionamento do controle foi atingido tanto na simulação quanto nos ensaios, validando a proposta do controle eletrônico de tensão. É importante ressaltar que este trabalho é apenas o início do caminho para um melhor entendimento do controle eletrônico de contadores eletromagnéticos. A literatura técnica nesta área é escassa e quase restrita as patentes e aos próprios desenvolvedores do produto, restringindo o acesso e a pesquisa nesta área.

## 7 Referências

- [1] T. Roschke, **“Entwurf geregelter elektromagnetischer Antriebe für Luftschtütze”**; Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 21, Nr. 293. Düsseldorf, VDI Verlag, 2000.
- [2] J. McBride and S. Sharkh, **“Electrical contact phenomena during impact”**, Proceedings of the Holm Conference, pp. 132-140, 1991.
- [3] T. S. Davies, N. Nouri and F. W. Britton, **“Towards the control of contact bounce”**; IEEE Transactions on Magnetics, vol. 19, no. 3, pp. 353-359, September, 1996.
- [4] J. H. Kiely, H. Nouri, F. Kalvelage and T. S. Davies, **“Development of an application specific integrated circuit for reduction of contact bounce in three phase contactors”**, Proc. 46<sup>th</sup> IEEE Holm Conference, pp. 120-129, 2000.
- [5] M. Baab, **“A new advantage for motor starter”**, Control Engineering, September pp. 50-52, 1991.
- [6] D. I. S. Jorgens and K. M. GmbH, **“Optimization of AC3-lifespan with electronic controlled magnet system using an example of contactors for normal currents between 185 A and 820 A”**; Proc. 19<sup>th</sup> International Conference on Electrical Contact Phenomena, pp. 335-341, Germany, 1998.
- [7] International Electrotechnical Commission – IEC. *Low-voltage switchgear and controlgear; Part 4: Contactor and motor-starters; Section one: Electromechanical contactors and motor-starters*, IEC60947-4-1. Geneva, Suíça, 2000.
- [8] International Electrotechnical Commission – IEC. *Low-voltage switchgear and controlgear; Part 5: Control circuit devices and switching elements; Section one: Electromechanical control circuit devices*, IEC60947-5-1, Geneva, Suíça, 2000.
- [9] P. G. Slade, editor. *Electrical contacts – Principles and Applications.*, 1 ed. Inc, New York, NY, Marcel Dekker, 1999.
- [10] T. Roschke, **“SPICE equivalent circuit models of electromagnetic contactors for electronic control”**, Advice Report, Dresden University of Technology, 2001.
- [11] H. Nouri, N. Larsen and T. S. Davies, **“Contact bounce simulation using MATLAB”**; IEEE 1997, pp. 284-288, 1997.

- [12] S. Jorgens, **“A quantitative comparison of contactor characteristics for electronic controlled and conventional drives”**, Proc. 20<sup>th</sup> International Conference on Electrical Contacts, pp. 221-227, Sweden, 2000.
- [13] K. M. Smedley and S. Cuk, **“One-cycle control of switching converters”**, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 10, n<sup>o</sup> 6, pp. 625-633, November 1995.
- [14] I. Barbi, **“Projeto de fontes chaveadas”**, Edição do autor; 2001.
- [15] S. Greitzke and M. Lindmayer, **“Commutation and erosion in hybrid contactor systems”**, IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology; vol. CHMT-8; no 1, pp. 34-39, March 1985.
- [16] J. A. Bauer, **“Electromagnetic contactor with energy balanced closing systems”**, US Patent 4,893,102; Westinghouse Electric Corp., Pittsburgh, Pennsylvania; filed August 8<sup>th</sup>, 1988, publication January 9<sup>th</sup>, 1990.
- [17] J. Gunnar, **“Contactor equipment”**, European Patent Application EP 0789378, Asea Brown Boveri AB; Västerås, Sweden; filed December 23<sup>th</sup>, 1996, publication August 13<sup>th</sup>, 1997.
- [18] K. M. Smedley and S. Cuk, **“Dynamics of one-cycle controlled Cuk converters”**, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 10, no 6, pp. 634-639, November 1995.
- [19] G. Gerd, K. Frank, E. Norbert and M. Norbert, **“Increase of life-time of electromagnetically actuated contactors by avoiding self-synchronization”**, Proc. 50<sup>th</sup> IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, pp. 408-415, 2004.
- [20] Y. Kawase, O. Miyatani and T. Yamaguchi, **“Numerical analysis of dynamic characteristics of electromagnets using finite element method with edge elements”**, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 30, no. 5, pp. 3248-3251, September, 1994.
- [21] Y. Kawase, S. Tatsuoka and T. Yamaguchi, **“3-D finite element analysis of operating characteristics of AC electromagnetic contactors”**, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 30, no. 5, pp. 3244-3247, September 2004.
- [22] A. Rahaman, A. Arkadan and J. Vander, **“The coupled problem in electromagnetic AC contactors”**, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 33, no. 3, pp. 1630-1633, September 1997.

- [23] N. Sadowski, J. P. A. Bastos, A. B. Albuquerque, A. C. Pinho and P. Kuo-Peng, **“A voltage feed AC contactor modeling using 3D edge element”**; IEEE Transactions on Magnetics, vol. 34, no. 5, pp. 3170-3173, September 1998.
- [24] X. Li, D. Chen, Z. Li and W. Tong, **“Numerical analysis and investigation of dynamic behavior and contact bounce of AC contactor”**; IEICE Transactions Electronics, vol. E87-C, no. 8, pp. 1318-1323, August 2004.
- [25] P. Kuo-Peng, N. Sadowski, N. J. Batistela and J. P. A. Bastos, **“Coupled field and circuit analysis considering the electromagnetic device motion”**, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 36, no. 4, pp. 1458-1461, July 2000.