

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

Marcio Evaristo da Cruz Brito



**Dispositivos de Compensação de Energia Reativa
e Controle da Tensão para Redução de Perdas
Técnicas em Sistemas de Distribuição**

Recife

2015

Marcio Evaristo da Cruz Brito

**Dispositivos de Compensação de Energia Reativa
e Controle da Tensão para Redução de Perdas
Técnicas em Sistemas de Distribuição**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento de Energia

ORIENTADOR: Marcelo Cabral Cavalcanti, D.Sc.

COORIENTADOR: Francisco de Assis dos Santos Neves, D.Sc.

Recife

2015

Catálogo na fonte
Bibliotecária Valdicéa Alves, CRB-4 / 1260

- B862d Brito. Marcio Evaristo da Cruz.
Dispositivos de Compensação de Energia Reativa e Controle da Tensão para Redução de Perdas Técnicas em Sistemas de Distribuição / Marcio Evaristo da Cruz Brito - Recife: O Autor, 2015.
178folhas, Il.; Abr.; e Simb.; e Tabs.
- Orientador: Prof. D.Sc. Marcelo Cabral Cavalcanti.
Coorientador: Prof. D.Sc. Francisco de Assis dos Santos Neves.
- Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2015.
Inclui Referências e Anexo..
1. Engenharia Elétrica. 2. Qualidade da energia. 3. Redução de perdas. 4. Compensação de energia reativa. 5. Controle do nível da tensão. I. Cavalcanti, Marcelo Cabral (Orientador). II. Neves, Francisco de Assis dos Santos. (Coorientador). III. Título.
- UFPE
- 621.3 CDD (22. ed.) BCTG/2015 - 232



Universidade Federal de Pernambuco
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE
TESE DE DOUTORADO DE

MÁRCIO EVARISTO DA CRUZ BRITO

TÍTULO

**“DISPOSITIVOS DE COMPENSAÇÃO DE ENERGIA REATIVA E CONTROLE
DA TENSÃO PARA REDUÇÃO DE PERDAS TÉCNICAS
EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO”**

A comissão examinadora composta pelos professores: MARCELO CABRAL CAVALCANTI, DEE/UFPE; FRANCISCO DE ASSIS DOS SANTOS NEVES, DEE/UFPE; LEONARDO RODRIGUES LIMONGI, DEE/UFPE; ZANONI DUEIRE LINS, DEE/UFPE; EDISON ROBERTO CABRAL DA SILVA, DEE/UFPE e MARCELLO MEZAROBA, DEE/UDESC sob a presidência do primeiro, consideram o candidato **MÁRCIO EVARISTO DA CRUZ BRITO APROVADO.**

Recife, 04 de agosto de 2015.

CECILIO JOSÉ LINS PIMENTEL
Coordenador do PPGEE

MARCELO CABRAL CAVALCANTI
Orientador e Membro Titular Interno

EDISON ROBERTO CABRAL DA SILVA
Membro Titular Externo

FRANCISCO DE ASSIS DOS SANTOS NEVES
Coorientador e Membro Titular Interno

MARCELLO MEZAROBA
Membro Titular Externo

LEONARDO RODRIGUES LIMONGI
Membro Titular Interno

ZANONI DUEIRE LINS
Membro Titular Interno

Dedico este trabalho
a minha mãe, esposa e filhos.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer inicialmente a minha família, pela paciência e compreensão durante a elaboração deste trabalho, aos meus orientadores Dr. Marcelo Cabral Cavalcanti e Dr. Francisco de Assis dos Santos Neves sem os quais este trabalho não seria possível, aos membros da banca examinadora pela análise e sugestões valiosas para a melhoria da qualidade do trabalho, aos membros do GEPAE, aos amigos da CELPE em especial os amigos Sandro Felinto, Sandro Machado e Wider Santos pelo apoio e ajuda inestimável. Aos amigos Dr. Heldermarcio Leite Ferreira e Dr. Zaroni Dueire, pelo o apoio e confiança no início desta jornada sem os quais este trabalho não existiria e finalmente a todos aqueles que me auxiliaram durante o doutorado. A todos um muito obrigado.

RESUMO

Apesar da grande quantidade de propostas publicadas de dispositivos para compensação de energia reativa em sistemas de distribuição, há uma carência de soluções em topologias para a compensação de reativo com ênfase na redução de custos, volume, peso e perdas. Foram estas as motivações que levaram às novas contribuições desta tese. Este trabalho apresenta um conjunto de dispositivos para compensação de energia reativa e controle da tensão em sistemas de distribuição. Os dispositivos propostos possuem várias características interessantes, tais como a ausência de harmônicos durante a operação em regime permanente, redução das perdas por chaveamento, dispensa do uso de grandes capacitores, não utilização de etapa em corrente contínua e não exigem um controle sofisticado. Adicionalmente, os dispositivos propostos podem ser dimensionados de acordo com as exigências do projeto onde serão utilizados, proporcionando uma adequação entre os recursos utilizados e os requisitos de custo e desempenho exigidos pela aplicação. Durante o desenvolvimento deste trabalho, os dispositivos propostos foram modelados digitalmente utilizando-se o *software* MATLAB/Simulink, para avaliação de desempenho em relação aos dispositivos tradicionais. O desempenho dos dispositivos propostos, observados nas simulações, foi bastante satisfatório, atendendo o objetivo de redução de perdas técnicas em sistemas de distribuição.

Palavras-chave: Qualidade da Energia. Redução de Perdas. Compensação de Energia Reativa. Controle do Nível da Tensão.

ABSTRACT

Despite the large number of proposals for reactive power compensation in distribution systems, there is a lack of solutions with emphasis on cost reduction, volume, weight and losses. These were the reasons which led to new contributions of this thesis proposal. This work presents a set of devices for reactive power compensation and voltage control in distribution systems. The proposed devices have several interesting features such as the absence of harmonics during steady-state operation, reducing switching losses, eliminating large capacitors and direct current stage and does not require a sophisticated control. In addition, the proposed devices can be sized according to the design requirements which will be used, providing coupling between the resources and the cost and performance requirements of the application. During the development of this work, the proposed devices have been digitally modeled using MATLAB / Simulink software for performance evaluation compared to traditional devices. The performance of the proposed devices was quite satisfactory, achieving the goal of reducing technical losses in distribution systems.

Keywords: Power conditioning. Power quality. Power System Efficiency. Techniques Loss Reduction.

Lista de Ilustrações

Figura 1.1 – Percentual de perdas nas empresas distribuidoras de energia.....	20
Figura 1.2 – Distribuição topográfica de um alimentador.....	21
Figura 1.3 – Representação elétrica simplificada de uma rede de distribuição.....	22
Figura 1.4 - Distribuição percentual por classe de clientes.	24
Figura 1.5 – Variação do fator de potência e fluxo de potência reativa no tempo.	25
Figura 1.6 - Configurações típicas de bancos de capacitores.	26
Figura 1.7 – Comportamento da tensão na barra durante o chaveamento.....	27
Figura 1.8 – Comportamento da corrente de <i>inrush</i>	28
Figura 1.9 – Comportamento da corrente durante a ocorrência de <i>back-to-back</i>	28
Figura 1.10 – Comportamento da corrente durante uma reenergização rápida.....	28
Figura 2.1 – Banco de capacitores com múltiplas células.	32
Figura 2.2 – Diagrama fasorial do motor (a) sobre-excitado e (b) subexcitado.....	32
Figura 2.3 – Banco de capacitores chaveado a tiristor.	33
Figura 2.4 – Banco na configuração binária chaveada tiristor/diodo.....	34
Figura 2.5 – Corrente reativa injetada em função dos estados das chaves.	34
Figura 2.6 – Compensador estático a tiristores.....	35
Figura 2.7 – Forma de onda da corrente que circula pelo reator.....	36
Figura 2.8 – Compensador estático com TCR ligado em delta.	37
Figura 2.9 – Topologia de 12 pulsos.	37
Figura 2.10 – Curva característica tensão versus potência reativa.	38
Figura 2.11 – Topologia do compensador estático TSC+TCR.	38
Figura 2.12 – Compensador série controlado a tiristor.	39
Figura 2.13 – Topologia do STATCOM.	40
Figura 2.14 – Curvas tensão versus corrente do STATCOM e SVC.	40
Figura 2.15 – Topologia do SSSC.	41
Figura 2.16 – Topologia do UPFC.	42
Figura 2.17 - Arranjo de um IPFC.....	43
Figura 2.18 – Unidade compensadora de tensão.	44
Figura 2.19 – Unidade reguladora de impedância e tensão.	44
Figura 3.1 – Controlador de banco de capacitores ajustável (topologia 1).	46
Figura 3.2 – Diagrama exemplo.	48

Figura 3.3 - Diagrama esquemático do modelo de sistema com o dispositivo proposto.	52
Figura 3.4 – Simbologia utilizada nos modelos de simulação.	52
Figura 3.5 – Modelo do sistema de controle.	54
Figura 3.6 – <i>Inrush</i> com comutação normal.	55
Figura 3.7 – <i>Inrush</i> com comutação em rampa.	55
Figura 3.8 – Perdas no dispositivo proposto.	56
Figura 3.9 – Perdas versus potência reativa fornecida a rede.	57
Figura 3.10 – Corrente drenada da fonte pelo conjunto dispositivo / banco.	57
Figura 3.11 – Circuito equivalente.	60
Figura 3.12 – Leituras de M_{var} amostradas a cada 5 minutos (caso A).	61
Figura 3.13 – Leituras de M_{var} amostradas a cada 5 minutos (caso B).	61
Figura 3.14 – Diagrama esquemático do modelo do alimentador do caso A.	62
Figura 3.15 – Curva de demanda discretizada.	62
Figura 3.16 – Diagrama esquemático do modelo da carga reativa.	63
Figura 3.17 – Diagrama esquemático do modelo da carga ativa.	64
Figura 3.18 – Corrente e potências drenadas da rede, sem compensação.	64
Figura 3.19 – Corrente e potências drenadas da rede, com compensação.	64
Figura 3.20 – Perfil da tensão sobre a carga com o compensador desligado.	66
Figura 3.21 – Perfil da tensão sobre a carga com o compensador ligado.	66
Figura 3.22 – Potência reativa, tensão no banco e potência reativa na carga.	66
Figura 3.23 – Corrente no banco de capacitores.	67
Figura 3.24 – Diagrama esquemático do modelo numérico para análise das perdas.	67
Figura 3.25 – Modelo dos bancos com controle por nível de tensão.	70
Figura 3.26 – Sistema de controle por nível de tensão.	70
Figura 3.27 – Tensão na carga e estado dos disjuntores.	71
Figura 3.28 – Circuitos para a comparação de desempenho dos casos 1 e 2.	72
Figura 3.29 – Desempenho da solução convencional (caso 1).	73
Figura 3.30 – Desempenho da solução alternativa (caso 2).	74
Figura 3.31 – Sistema de controle modificado com controle por tensão.	77
Figura 3.32 – Desempenho do controle por tensão.	78
Figura 3.33 – Sistema de controle com modo de operação automático.	80
Figura 3.34 – Desempenho do controle no modo de operação automático.	81

Figura 3.35– Perfil de carga de alimentador na região litorânea: fator de potência (verde), potência reativa (azul) e potência ativa (vermelho).	83
Figura 3.36 – Compensador no modo de operação automático e carga e leve.....	83
Figura 3.37 - Resultado da simulação com carga linear e sem compensador.	85
Figura 3.38 - Resultado da simulação com carga linear e compensador.....	85
Figura 3.39 - Forma de onda da corrente drenada pela carga não linear.....	86
Figura 3.40 - Resultado da simulação com carga não linear e sem compensação.	86
Figura 3.41 - Resultado da simulação com carga não linear e com compensação.....	87
Figura 3.42 - Configuração dupla estrela isolada.	88
Figura 3.43 - Circuito exemplo para avaliação de desvio angular.	89
Figura 3.44 - Desvio angular da tensão na carga.....	90
Figura 4.1 – Compensador estático de reativo proposto (topologia 2).....	92
Figura 4.2 – Diagrama esquemático do modelo do compensador estático proposto.	93
Figura 4.3 – Banco chaveado por tensão com excedente capacitivo: valor eficaz da tensão, potência reativa drenada da rede pela carga e potência reativa do dispositivo. .	93
Figura 4.4 – Compensador estático proposto com excedente capacitivo: valor eficaz da tensão, potência reativa drenada da rede pela carga e potência reativa do dispositivo. .	94
Figura 4.5 – Compensador estático de reativo duplo proposto (topologia 3).....	94
Figura 4.6 – Compensador estático com dois dispositivos de controle.....	95
Figura 4.7 – Sistema de controle para fonte de reativo capacitivo ou indutivo.	95
Figura 4.8 – Compensador estático duplo proposto com excedente capacitivo: valor eficaz da tensão, potência reativa drenada da rede e potência reativa do dispositivo. ...	96
Figura 4.9 – Compensador estático série proposto (topologia 4).....	98
Figura 4.10 - Diagrama esquemático do modelo numérico do sistema completo.....	98
Figura 4.11 – Sistema em carga leve com bancos de capacitores chaveados: valor eficaz da tensão, potência reativa drenada da rede e potência reativa do dispositivo.....	98
Figura 4.12 – Sistema em carga leve com compensador série e bancos chaveados: valor eficaz da tensão, potência reativa drenada da rede e potência reativa do dispositivo. ...	99
Figura 4.13 – Sistema em carga pesada com bancos de capacitores chaveados: valor eficaz da tensão, potência reativa drenada da rede e potência reativa do dispositivo. .	100
Figura 4.14 – Sistema em carga pesada com comp. série e bancos chaveados: valor eficaz da tensão, potência reativa drenada da rede e potência reativa do dispositivo. .	100
Figura 4.15 – Sistema em carga pesada, compensador série, estático e banco fixo: valor eficaz da tensão, potência reativa drenada da rede e potência reativa do dispositivo. .	100

Figura 4.16 - Compensador Q/V desacoplado (topologia 5).....	103
Figura 4.17 - Diagrama esquemático do modelo numérico do compensador Q/V.	103
Figura 4.18 – Tensões com carga leve e compensador Q/V desligado.	103
Figura 4.19 - Potência reativa com carga leve e compensador Q/V desligado.	104
Figura 4.20 - Tensões com carga leve e compensador Q/V ligado.	104
Figura 4.21- Potência reativa com carga leve e compensador Q/V ligado.....	105
Figura 4.22 - Tensões com carga pesada e compensador Q/V desligado.....	105
Figura 4.23 - Potência reativa com carga pesada e compensador Q/V desligado.	106
Figura 4.24 - Tensões com carga pesada e compensador Q/V ligado.	106
Figura 4.25 - Potência reativa com carga pesada e compensador Q/V ligado.	107
Figura 4.26 - Sistema com duas barras acopladas.	108
Figura 4.27 - Controlador de fluxo de potência entre linhas (topologia 6).	109
Figura 4.28 - Controlador de fluxo de potência entre linhas (fase “C”).....	110
Figura 4.29 - Diagrama unifilar do sistema de duas barras e o dispositivo proposto...	110
Figura 4.30 - Diagrama fasorial do sistema trifásico.....	112
Figura 4.31 - Diagrama unifilar do sistema simulado.	113
Figura 4.32 - Diagrama esquemático do modelo com duas barras e controlador de fluxo.	114
Figura 4.33 - Fluxo nas Barras desacopladas e sem controlador de fluxo.	115
Figura 4.34 - Fluxo com barras acopladas e sem controlador de fluxo.....	115
Figura 4.35 - Fluxo com barras acopladas através do controlador de fluxo.....	116
Figura 5.1 - Bloco de potência ativa da carga emulada.	120
Figura 5.2 - Bloco de potência reativa da carga emulada.....	120
Figura 5.3 - Carga emulada.	122
Figura 5.4 - Transformador de alimentação.	122
Figura 5.5 - Dispositivo controlador de carga.	123
Figura 5.6 - Diagrama de blocos do PIC16F648A (MICROCHIP TECHNOLOGY INC., 2003).	123
Figura 5.7 - Modelo 3D do controlador de carga.	124
Figura 5.8 - Dispositivo controlador de carga montado.	124
Figura 5.9 - Diagrama esquemático do módulo de medição e controle parte 1.	127
Figura 5.10 - Diagrama esquemático do módulo de medição e controle parte 2.	128
Figura 5.11 - Tela principal do <i>software</i> de simulação ISIS.	129
Figura 5.12 - Tela principal do <i>software</i> de projeto de PCI ARES.	129

Figura 5.13 - Modelo 3D do módulo de medição e controle.....	130
Figura 5.14 - Módulo de medição e controle.....	130
Figura 5.15 - Telas de informação do módulo de medição e controle.	131
Figura 5.16 - TP e TC utilizados pelo módulo de medição e controle.	131
Figura 5.17- Garra de corrente conectada e saídas do módulo de medição e controle.	132
Figura 5.18 - Diagrama esquemático do modulo de compensação.	132
Figura 5.19 - Módulo compensador.	133
Figura 5.20 - Diagrama esquemático da placa de acionamento.	134
Figura 5.21 - Modelo 3D da placa de acionamento do módulo compensador.	134
Figura 5.22 - Placa de acionamento do módulo compensador.	134
Figura 5.23 - Elementos passivos utilizados como impedância da linha de transmissão.	135
Figura 5.24 - Tela principal do compilador Delphi.	136
Figura 5.25 - Tela do <i>software</i> de aquisição e controle.....	137
Figura 5.26 - Diagrama esquemático do experimento.....	137
Figura 5.27 - Dados do fluxo de potências ativa e reativa obtidas do experimento.....	138
Figura 5.28 - Perfil da tensão na fonte e na carga.	139
Figura 5.29 - Perfil de corrente drenada da rede com e sem compensação.....	139
Figura 6.1 - Perfil da tensão na carga sem compensação.	144
Figura 6.2 - Tensão na carga com banco de capacitores fixo.....	145
Figura 6.3 - Tensão na carga com banco de capacitores chaveado.	145
Figura 6.4 - Tensão na carga com o compensador com banco de capacitores ajustável.	146
Figura 0.1 – Modelo do sistema de potência com dispositivo proposto.....	161
Figura 0.2 – Modelo do sistema de controle.	162
Figura 0.3 – Modelo do <i>hardware</i> do dispositivo.	163
Figura 0.4 – Modelo do alimentador do caso 1.	164
Figura 0.5 – Modelo da carga reativa.	165
Figura 0.6 – Modelo da carga ativa.	166
Figura 0.7 – Modelo para análise das perdas.....	167
Figura 0.8 – Modelo dos bancos com controle por nível de tensão.	168
Figura 0.9 – Sistema de controle por nível de tensão.....	169
Figura 0.10 – Sistema de controle modificado com controle por tensão.	170
Figura 0.11 – Sistema de controle com modo de operação automático.	171

Figura 0.12 – Modelo numérico do compensador estático proposto.....	172
Figura 0.13 – Compensador estático com dois dispositivos de controle.....	173
Figura 0.14 – Sistema de controle para fonte de reativo capacitivo ou indutivo.	174
Figura 0.15 - Modelo numérico do sistema completo.	175
Figura 0.16 - Modelo numérico do compensador Q/V.....	176
Figura 0.17 - Modelo numérico do subsistema compensador	177

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 – Perdas técnicas por segmento da rede de distribuição.....	21
Tabela 3.1– Sumário das variáveis de entrada do controle.	52
Tabela 3.2 – Resultado das simulações para análise das perdas (kWh).....	69
Tabela 3.3 – Perdas (kWh) para banco com controle por tensão.	69
Tabela 3.4 – Comparativo entre as perdas (kWh) dos casos 1 e 2.	74
Tabela 3.5 – Sumário de entradas do controle com dois modos de operação.	78
Tabela 3.6 – Perdas (kWh) para o compensador com controle por tensão.	79
Tabela 3.7 - Sumário de entradas do controle com modo automático.	79
Tabela 3.8 – Análise de perdas com o controle em modo automático.	83
Tabela 3.9 – Comparativo entre os esquemas de compensação.	84
Tabela 4.1 - Sumário de entradas do controle com modo automático.	96
Tabela 6.1 - Casos abordados na análise de viabilidade e retorno de investimento.....	141
Tabela 6.2 - Custo estimado do controlador de banco de capacitores.....	147
Tabela 6.3 - Comparativo de custos, benefícios e tempo de retorno de investimento.	148
Tabela 7.1 - Comparativo entre as topologias propostas <i>versus</i> tradicionais.....	152

Lista de Símbolos e Abreviaturas

A/D	Analógico para Digital
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CI	Circuito Integrado
IHM	Interface Homem Máquina
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PCI	Placa de Circuito Impresso
PU	Por Unidade
SE	Subestação
LD	Linha de Distribuição
VTCD	Varição de Tensão de Curta Duração
<i>inrush</i>	Sobre Corrente Transitória
<i>back-to-back</i>	Interação Transitória Entre Dois Banco de Capacitores
TSC	<i>Thyristor-Switched Capacitors</i>
TCR	<i>Thyristor-Controlled Reactor</i>
SVC	<i>Static Var Compensator</i>
FC	<i>Fixed Capacitor</i>
Q_{Cmax}	<i>Potência Reativa Máxima</i>
Q_{Lmax}	<i>Potência Reativa Mínima</i>
TCSC	<i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i>
STATCOM	<i>Static Synchronous Compensator</i>
SSSC	<i>Static Synchronous Series Compensator</i>
UPFC	<i>Unified Power Flow Controller</i>
IGBT	<i>Insulated-Gate Bipolar Transistor</i>
IPFC	<i>Interline Power Flow Controller</i>
<i>tap</i>	Derivação
SEP	Sistema elétrico de potência
TR _S	Transformador de Alimentação
TR _n	Transformador de Decremento
CH _n	Chave de Alimentação
CHC _n	Chave de Curto-circuito
<i>Ec</i>	Tensão no Capacitor

E_f	Tensão da Rede
E_{2trX}	Tensão Secundária do Transformador de Decremento
E_{2trs}	Tensão Secundária do Transformador de Alimentação
Rtr_X	Relação de Transformação do Transformador de Decremento
CHe_X	Estado da Chave do Transformador de Decremento
ω	Velocidade Angular
C	Capacitância
Q	Potência Reativa
K_{trs}	Relação de Transformação do Transformador de Alimentação
I_c	Corrente que circula pelo banco de capacitores
R_{Tr1}	Relação de transformação do transformador de menor degrau de tensão
E_{1trs}	Tensão primária do transformador de alimentação
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
W_p	Perdas por correntes parasitas
W_h	Perdas por histerese
ρ	Resistividade do material das lâminas
B_M	Valor máximo da indução magnética das lâminas
P_p	Coeficiente que depende do material das lâminas
P_h	Coeficiente que depende do material das lâminas
f	Frequência da variação do fluxo magnético no núcleo
W_{Fe}	Perdas totais no ferro
θ_M	Valor máximo do fluxo magnético nas lâminas
F_D	Fator de desequilíbrio
V_+	Magnitude da tensão eficaz de sequência positiva
V_-	Magnitude da tensão eficaz de sequência negativa
TD	Transformador defasador
V_s	Tensão na barra transmissora
V_r	Tensão na barra receptora
X_{sr}	Impedância da linha que conecta as barras
δ_r	Ângulo da tensão na barra receptora
δ_s	Ângulo da tensão na barra transmissora

V_{xy}	Tensão composta das fases adjacentes na barra transmissora
V_{θ}	Tensão na saída do controlador com ângulo e módulo desejado
<i>buffers</i>	Amplificador de Ganho Unitário com Baixa Impedância de Saída
<i>firmware</i>	Software Embarcado em um Microcontrolador
<i>FP</i>	Fator de potência
<i>assembly</i>	Linguagem de Baixo Nível e Alto Desempenho
PCI	Placa de circuito impresso
TP	Transformador de Potencial
TC	Transformador de Corrente
Triacs	Triode for Alternating Current
RS232	Padrão de Comunicação Serial
C_0	Montante a ser aplicado na data zero
C_i	Fluxo de caixa na data i
r	Taxa de juros
VPL	Valor presente líquido
SELIC	Sistema Especial de Liquidação e Custódia
Tr	Tempo de retorno simples
CI	Custo de investimento
B	Benefício
DRP	Índice de duração relativa da transgressão para tensão precária
DRC	Índice de duração relativa da transgressão para tensão crítica
n_{lc}	Maior valor entre as fases do número de leituras situadas na faixa crítica
n_{lp}	Maior valor entre as fases do número de leituras situadas na faixa precária

SUMÁRIO

1	Introdução	20
1.1	Redução de Perdas na Subestação e nas Linhas de Distribuição.....	22
1.2	Contribuições da Tese.....	29
1.3	Organização Textual	30
2	Equipamentos para Compensação de Potência Reativa	31
2.1	Banco de Capacitores Fixo ou com Chaveamento Mecânico.....	31
2.2	Compensador Síncrono.....	32
2.3	Banco de Capacitores Chaveado a Tiristor.....	33
2.4	Reator Controlado a Tiristor.....	35
2.5	Compensador Estático de Reativos.....	37
2.6	Compensador Série Controlado a Tiristor	39
2.7	Compensador Estático Síncrono.....	39
2.8	Compensador Série Síncrono Estático.....	41
2.9	Controlador Unificado de Fluxo de Potência	42
2.10	Controlador de Fluxo de Potência Interlinhas	43
2.11	Transformador SEN.....	43
2.12	Conclusão.....	45
3	Proposta de Dispositivo para Compensação de Potência Reativa.....	46
3.1	Controlador de Banco de Capacitores Ajustável	46
3.1.1	Descrição do funcionamento	47
3.1.2	Modelo de Simulação	51
3.2	Aplicações com Banco de Capacitores Ajustável.....	61
3.3	Análise do comportamento do banco de capacitores ajustável com cargas não lineares.....	84
3.4	Considerações sobre a utilização do banco de capacitores ajustável em sistemas trifásicos.....	87
3.5	Conclusões	90
4	Proposta de Dispositivos para Compensação de Potência Reativa e Controle da Tensão.....	92
4.1	Compensador estático de reativo	92
4.2	Compensador série.....	97
4.3	Compensador estático de potência reativa e de tensão desacopladas.....	101

4.4	Controlador de fluxo de potência entre linhas	107
4.4.1	Descrição do funcionamento	108
4.5	Conclusões	116
5	Protótipo do Banco de Capacitores Ajustável.....	118
5.1	Metodologia	119
5.2	Módulo de carga emulada.....	119
5.3	Módulo de medição e controle.....	124
5.4	Módulo de compensação	132
5.5	Módulo de impedância de linha.....	135
5.6	<i>Software</i> de controle e armazenamento	135
5.7	Montagem do experimento e resultados	137
5.8	Conclusões	139
6	Estudo de Viabilidade Econômica e Retorno de Investimento.....	141
6.1	Análise de retorno de investimento para o banco fixo.....	142
6.2	Análise de retorno de investimento para o banco chaveado	145
6.3	Análise de retorno de investimento para o compensador com banco de capacitores ajustável	146
6.4	Conclusões	148
7	Conclusões	150
7.1	Sugestões de trabalhos futuros.....	153
	Referências	155
	Anexos.....	161

1 Introdução

Segundo dados do Ministério de Minas e Energia as perdas totais no setor elétrico em 2012 corresponderam a 17,8% da produção nacional de energia elétrica (EMPRESA DE PESQUISA ENÉRGICA, 2013).

As perdas totais são divididas em dois grupos: técnicas e não técnicas. As perdas técnicas estão associadas aos fenômenos físicos inerentes ao processo de transmissão, transformação, distribuição e medição. Já as perdas não técnicas, também conhecidas como perdas comerciais, estão associadas principalmente aos processos de gestão, tais como fraudes, falhas na medição de energia e inadimplência (QUEIROZ, 2010).

A proporção entre as perdas técnicas e comerciais varia muito e depende de diversos fatores, tais como perfil de consumo, topologia dos sistemas elétricos, características geográficas, características regionais e tipo de cliente.

De acordo com (QUEIROZ, 2010), aproximadamente 25% das perdas totais encontram-se no sistema de transmissão, onde as perdas técnicas são preponderantes, visto que existe um forte controle por parte das operadoras, praticamente eliminando fraudes e erros de medição. Já no sistema de distribuição, aproximadamente 51% das perdas são técnicas e atingiram o patamar de 28.000 GWh no ano de 2009 (QUEIROZ, 2010). A Figura 1.1 mostra o percentual entre as perdas técnicas e não técnicas nas empresas brasileiras distribuidoras de energia no ano de 2010.

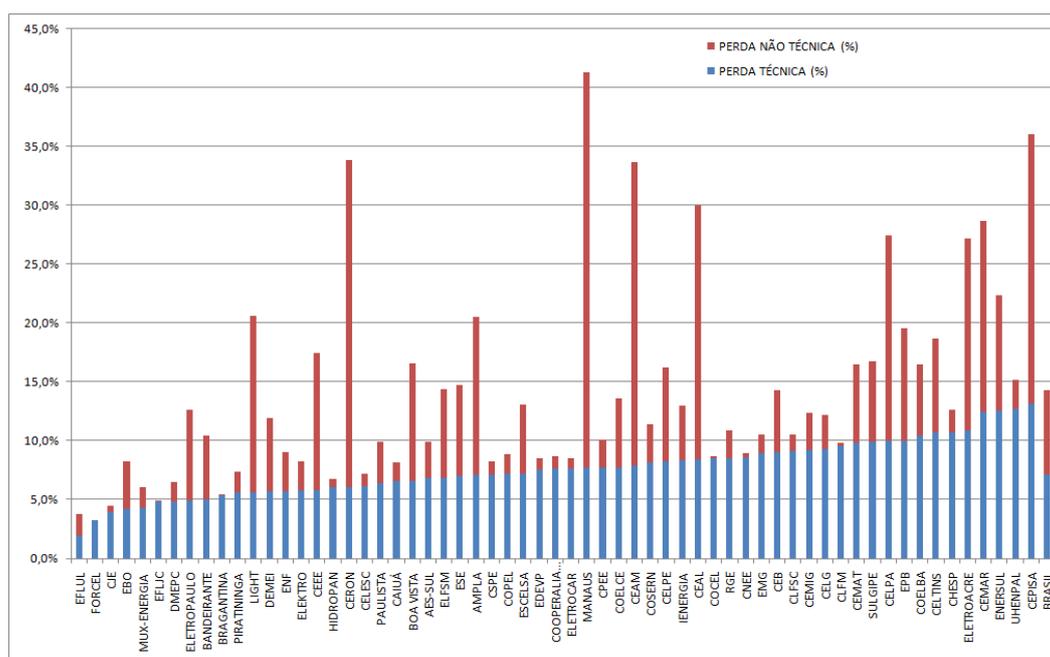


Figura 1.1 – Percentual de perdas nas empresas distribuidoras de energia.

Uma análise da Figura 1.1 (QUEIROZ, 2010) explicita a grande variação entre o percentual das perdas técnicas e comerciais. Um aspecto de grande relevância para as perdas técnicas no sistema de distribuição é sua topologia que é predominantemente radial e a locação da subestação (SE) que geralmente não é ditada pelo critério de maior eficiência, mas por questões de segurança e custo de instalação.

A Figura 1.2 mostra uma configuração topográfica típica de um alimentador e a Figura 1.3 mostra uma representação simplificada de uma rede de distribuição. As perdas técnicas no sistema de distribuição podem ser estratificadas conforme mostrado na Tabela 1.1 (STRAUCH, 2002).

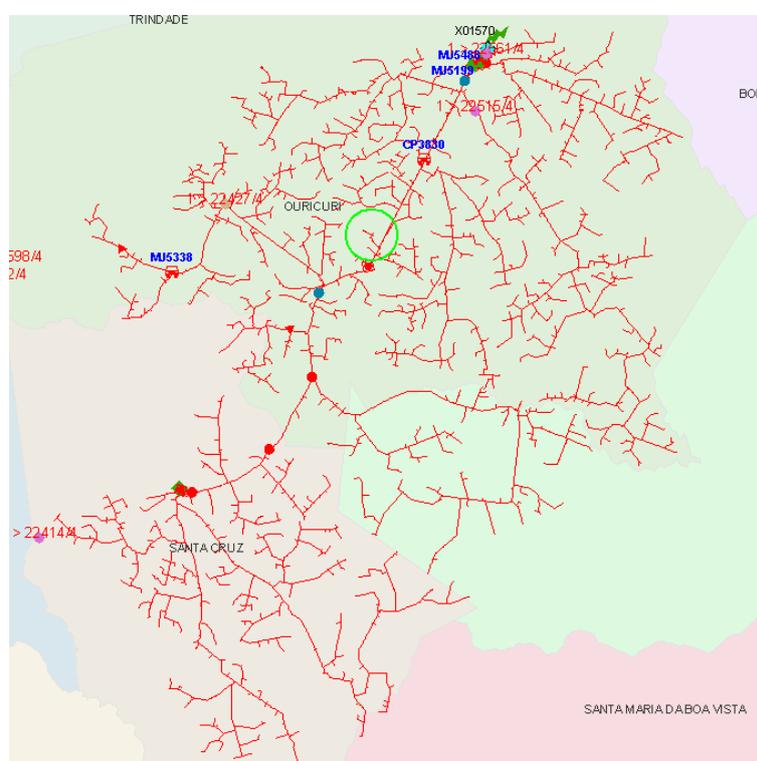


Figura 1.2 – Distribuição topográfica de um alimentador.

Tabela 1.1 – Perdas técnicas por segmento da rede de distribuição.

NÍVEL MÉDIO DE PERDAS DE ENERGIA EM RELAÇÃO AO TOTAL DE PERDAS TÉCNICAS	
Segmento	Faixa Esperada (%)
Transformadores de Subestações	9-15
Rede Primária	15-28
Transformadores de Distribuição	15-26
Rede Secundária	9-20
Ramais de Ligação	1-4
Medidores de Energia	2-5

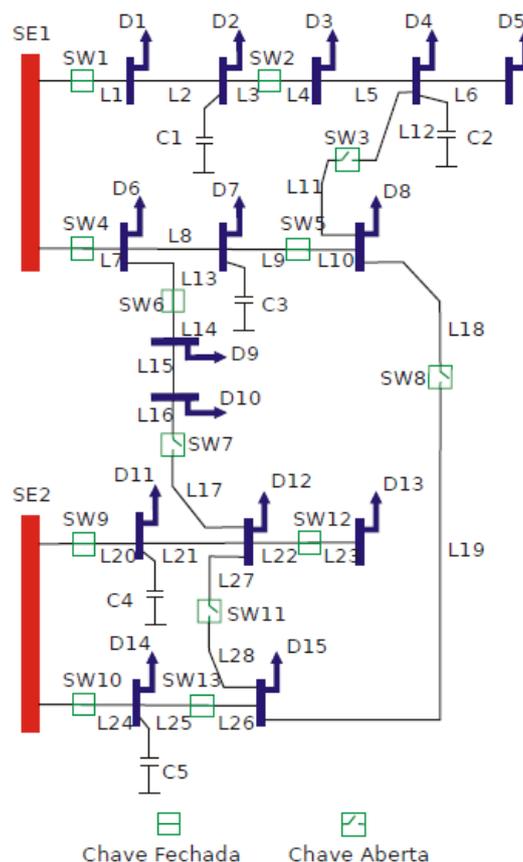


Figura 1.3 – Representação elétrica simplificada de uma rede de distribuição.

A Tabela 1.1 possibilita identificar que a maior parte das perdas técnicas do sistema de distribuição encontra-se no transformador da SE, nas linhas de distribuição (LD), nos transformadores de distribuição e na rede secundária. Portanto, é natural que uma estratégia de redução de perdas foque inicialmente nestes elementos.

1.1 Redução de Perdas na Subestação e nas Linhas de Distribuição

As perdas técnicas no segmento SE-LD estão associadas principalmente às perdas por efeito Joule nos cabos das LDs e no cobre do transformador da SE. Outra parcela significativa está associada às perdas no ferro do transformador da SE.

Diversas propostas são encontradas na literatura com técnicas para redução dessas perdas e elas estão relacionadas principalmente à redução da resistência elétrica dos cabos das LDs, normalmente obtida através do aumento da bitola dos condutores (GONZÁLEZ, 2011) ou da reconfiguração do sistema (MERLIN e BACK, 1975) (BUENO, LYRA e CAVELLUCCI, 2004) (QUEIROZ e LYRA, 2009) de forma a reduzir a distância entre o centro de carga e o transformador da SE. Outra abordagem é a redução da corrente nas LDs através do balanceamento de cargas e da instalação de

bancos de capacitores ou reatores (GONZÁLEZ, 2003), que servem como fontes de potência reativa próximas ao centro de carga evitando que a corrente reativa circule pela LD, reduzindo assim as perdas a montante do ponto de instalação.

A abordagem do aumento da bitola do condutor na LD apesar de eficaz tem um custo elevado e normalmente necessita da substituição de estruturas, visto que um cabo mais grosso também é mais pesado. Por outro lado, não são obtidos benefícios a montante da linha e esta abordagem normalmente é empregada quando nenhuma outra é viável.

A reconfiguração do sistema de distribuição possui uma aplicação limitada, devido ao custo ou à necessidade de atender a um determinado cliente em uma localização elétrica desfavorável. Outro aspecto importante é que o sistema de distribuição normalmente é radial e isto limita significativamente os casos onde a estratégia é eficaz (SILVA, FRANÇA e SILVEIRA, 1996) (COSTA, FRANÇA e LYRA, 2010) (QUEIROZ, CAVELLUCCI, *et al.*, 2007).

A abordagem do balanceamento de cargas normalmente não é possível ou possui um benefício limitado visto que há um esforço constante por parte das distribuidoras no sentido de manter o sistema equilibrado, com a corrente de sequência zero sendo a menor possível. Isto permite que a proteção de neutro tenha a sensibilidade necessária para faltas à terra e reduz a temperatura do transformador da SE.

A utilização de bancos de capacitores como fonte de reativo próxima aos centros de carga é uma estratégia cuja eficácia depende do perfil de carga, ou seja, caso o perfil de determinado bloco de carga seja predominantemente residencial existe a necessidade constante de potência reativa e a instalação de capacitores é bastante eficaz (LEE e GRAINGER, 1981). Já no caso de cargas industriais isto não ocorre, pois esta classe de clientes possui compensação própria, interna à sua planta, visto que a legislação imputa penalidades pecuniárias ao consumo de energia reativa. A Figura 1.4 mostra a distribuição percentual por classe de clientes atendidos pelas distribuidoras. Este gráfico foi obtido através dos dados divulgados pela Associação Brasileira de Distribuidoras de Energia Elétrica (ABRADEE) no ano de 2010 (ABRADEE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORAS DE ENERGIA ELÉTRICA). Analisando a Figura 1.4 observa-se que mais de 70% dos clientes das distribuidoras geralmente não possuem em suas instalações compensação própria de reativos. Assim, a instalação de bancos de capacitores traz benefícios significativos ao sistema, tais como melhoria do nível de tensão, diminuição da corrente nos alimentadores, aumento na capacidade de

fornecimento de energia, melhoria da sensibilidade da proteção e redução das perdas a montante do ponto de instalação.

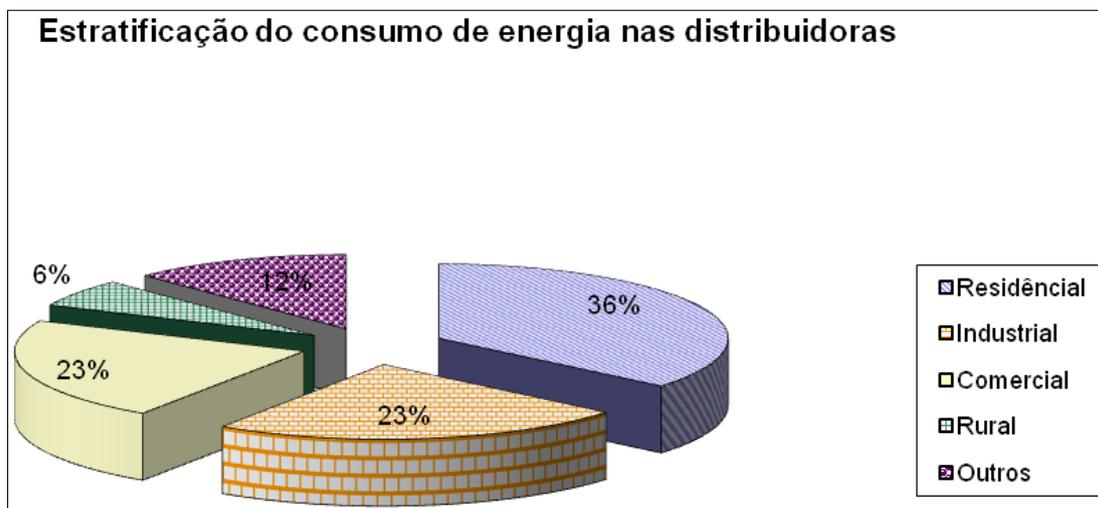


Figura 1.4 - Distribuição percentual por classe de clientes.

Apesar dos diversos benefícios, a utilização mais usual foca na melhoria do nível de tensão, devido à forte pressão regulatória advinda da resolução normativa número 505 (26 de novembro de 2001) da ANEEL (ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2001), atualizada pela resolução normativa 469/2011 denominada Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) (ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2010), que estabelece limites para a variação da tensão fornecida aos clientes e prevê penalidades no caso de transgressão desses limites. Além da tensão, o fator de potência também é regulamentado sendo limitado a um mínimo de 0,92, indutivo ou capacitivo. As distribuidoras geralmente utilizam dois tipos de bancos de capacitores, os fixos e os chaveados. Os fixos operam permanentemente conectados ao sistema, independentemente do nível de tensão ou do fluxo de potência reativa no ponto de conexão. Já os chaveados utilizam equipamentos de chaveamento, tais como chaves a óleo ou disjuntores, para conectar ou desconectar o banco do sistema em função de parâmetros de controle, tais como nível de tensão, fluxo de potência reativa, fator de potência, demanda e tempo.

Para determinar as características dos bancos de capacitores a serem empregados no sistema utiliza-se a ferramenta denominada estudo de fluxo de carga, onde são definidos: o tipo, a potência e a quantidade de bancos a ser instalada. Este estudo

normalmente prioriza o nível da tensão, e como aspecto secundário, as perdas. Por outro lado, é muito comum locar bancos de capacitores nas SEs, devido aos menores investimentos na instalação, nos sistemas de controle e automação e nos custos de manutenção, além de permitir o controle da tensão ou do fator de potência na barra principal da SE. Usualmente, utiliza-se mais de um banco chaveado, tendo um controle grosseiro sobre a quantidade de potência reativa que está sendo injetada na barra, visto que a necessidade de potência reativa varia no decorrer do dia. A Figura 1.5 mostra a variação do fator de potência e do fluxo de potência reativa no período de uma semana em um alimentador real onde há predominância de clientes residenciais. Neste gráfico foram utilizadas medições amostradas a cada cinco minutos. Observa-se que o fluxo de potência reativa apresenta uma grande variação durante o dia e entre os dias da semana, mas o fator de potência varia menos. Isto se deve ao fato de que o fator de potência é uma relação entre potência ativa e aparente. No caso em questão quando o fluxo de potência reativa aumentou os fluxos de potência ativa e aparente também aumentaram, e consequentemente, o fator de potência permaneceu quase constante.

Sob o ponto de vista da redução de perdas, concentrar o controle de reativo na SE não é uma estratégia eficaz, uma vez que as perdas nas LDs não serão reduzidas. A Figura 1.6 mostra as configurações típicas de bancos de capacitores utilizadas no sistema de distribuição. A determinação da melhor locação para bancos de capacitores é um problema complexo e objeto de inúmeros estudos acadêmicos que focam em vários aspectos, tais como melhoria do perfil de tensão, redução das perdas e melhoria da estabilidade (BEÊ, 2007) (SZUVOVIVSKI, 2008) (BRANDINI, 2007).

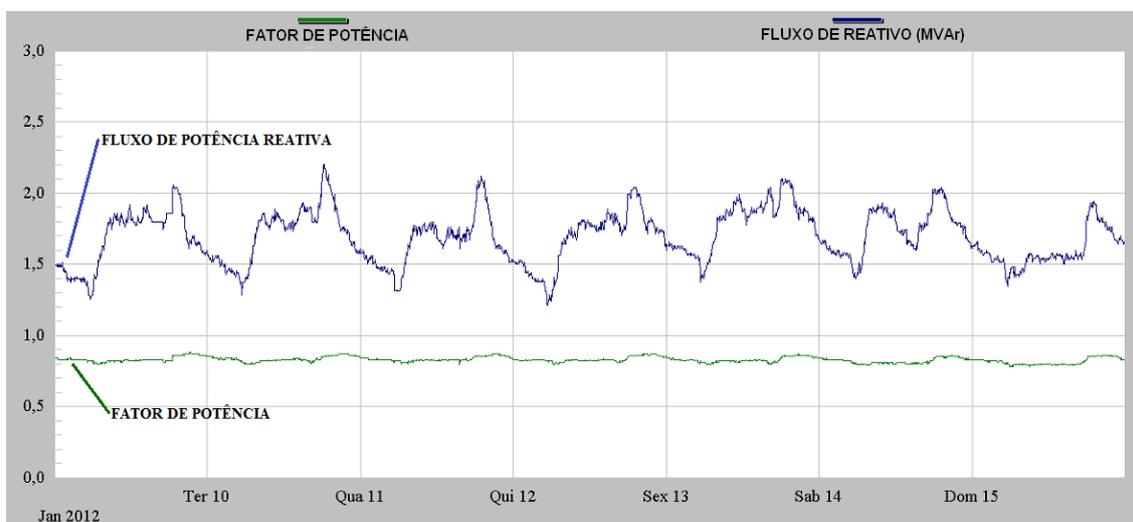


Figura 1.5 – Variação do fator de potência e fluxo de potência reativa no tempo.

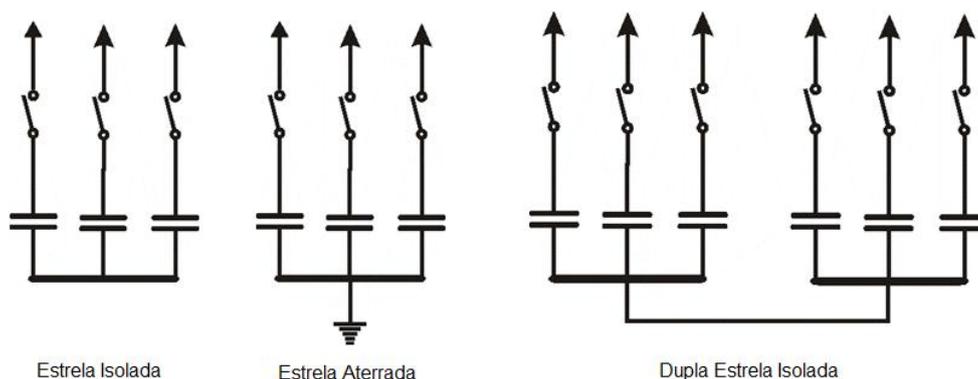


Figura 1.6 - Configurações típicas de bancos de capacitores.

A utilização de bancos de capacitores nas LDs é desejável uma vez que reduz a necessidade de potência reativa na SE e as perdas ao longo da linha, além de melhorar o nível de tensão nos centros de carga e não apenas na barra da SE. Normalmente, as distribuidoras utilizam bancos fixos nas LDs em virtude dos preços das chaves e disjuntores (que são várias vezes maiores que o custo das células capacitivas), da dificuldade de manutenção e dos elevados custos de controle e automação. Por outro lado, como a utilização mais usual dos bancos de capacitores é no controle da tensão, não há preocupação quanto ao sistema tornar-se capacitivo durante alguns períodos do dia. Entretanto, isso não é interessante sob o ponto de vista da redução de perdas. Outro aspecto importante é a possibilidade da ocorrência de sobretensões nos períodos de carga leve. Em muitos casos a utilização de bancos de capacitores chaveados é necessária, porém surgem problemas relacionados ao comportamento transitório, que pode ocasionar sérios problemas a cargas sensíveis, notadamente àquelas localizadas em clientes industriais que podem sofrer paradas no processo produtivo.

Os principais fenômenos transitórios ocasionados por bancos de capacitores são as variações de tensão de curta duração (VTCD) que surgem durante as operações de chaveamento, a corrente transitória (*inrush*) que surge quando o banco é conectado ao sistema, a interação entre um banco que entra em operação com um ou mais bancos já acoplados à rede (*back-to-back*) e a sobrecorrente de reenergização que ocorre quando um banco é recolocado em operação antes que tenha tempo de descarregar (DAS, 2005) (PATCHAROEN, NGAOPITAKKULA e POTHISARN, 2013). A Figura 1.7 mostra o comportamento da tensão em uma barra quando um banco de capacitores é conectado ou desconectado ao sistema. No instante "A" ocorre a desconexão do banco de capacitores do sistema, o que acarreta um afundamento da tensão na barra de conexão.

No instante "B" ocorre a conexão de dois bancos de capacitores com potências diferentes, isto ocasiona uma elevação na tensão na barra de conexão. No instante "C" ocorre a desconexão de um dos bancos acoplados durante o instante "B" e mais uma vez ocorre um afundamento na tensão da barra de conexão. Estes tipos de eventos são um problema para plantas industriais quando as mesmas possuem cargas sensíveis a VTCD's.

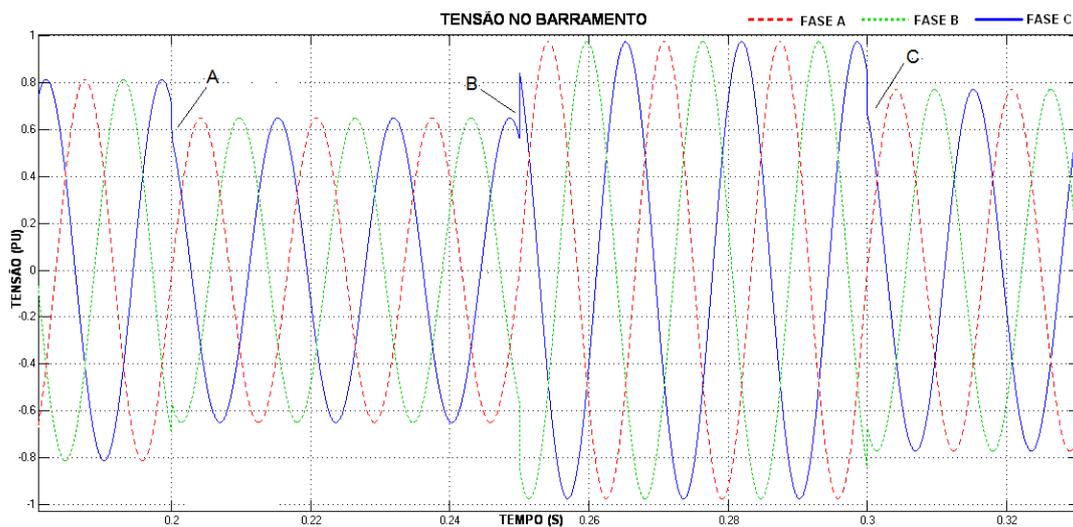


Figura 1.7 – Comportamento da tensão na barra durante o chaveamento.

As VTCD's provocadas por manobras de conexão ou desconexão de bancos de capacitores serão tão maiores quanto maiores forem as potências dos bancos e menor for a potência de curto-circuito do sistema no ponto de acoplamento. Já a corrente de *inrush* será tão maior quanto maior a potência do banco, menor a impedância do reator associado e maior a potência de curto-circuito no ponto de acoplamento. A Figura 1.8 mostra o comportamento da corrente de *inrush*. Analisando a Figura 1.8 observa-se que até o instante 500 ms o banco de capacitores estava desconectado e no momento em que foi conectado ao sistema surgiu uma corrente de *inrush*, cuja amplitude e duração dependem das características do banco e do sistema no ponto de acoplamento. A Figura 1.9 mostra as correntes dos bancos durante o fenômeno *back-to-back*.

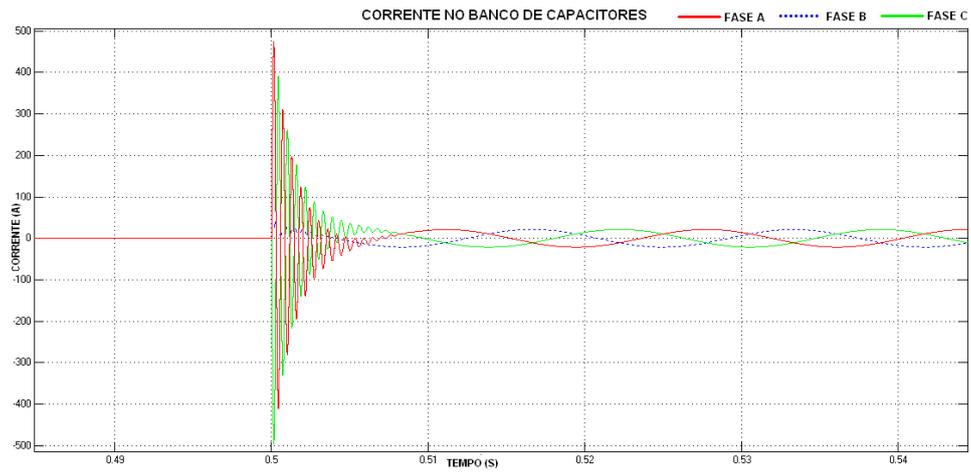


Figura 1.8 – Comportamento da corrente de *inrush*.

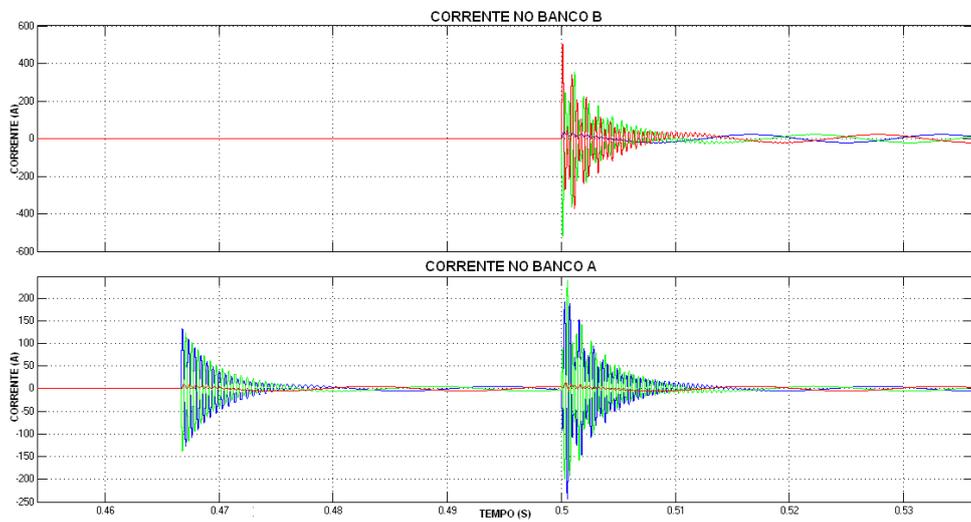


Figura 1.9 – Comportamento da corrente durante a ocorrência de *back-to-back*.

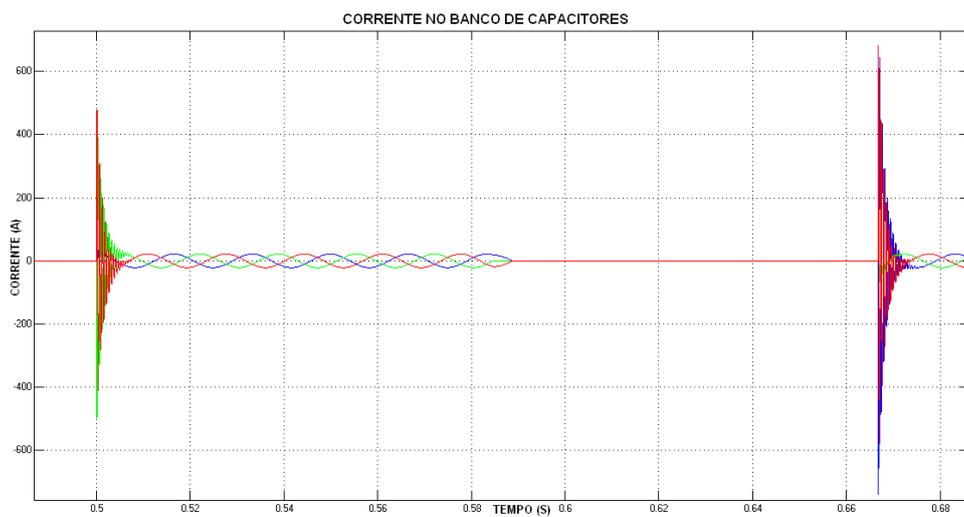


Figura 1.10 – Comportamento da corrente durante uma reenergização rápida.

Note que devido à presença de outro banco já em operação a corrente de *inrush* do banco que entra é aumentada uma vez que a potência dos bancos é a mesma. Além disso, surge uma nova corrente de *inrush* no banco que já está em operação que pode ser maior que a ocorrida durante sua energização. A Figura 1.10 mostra a corrente no banco quando ocorre uma reenergização rápida. Analisando a Figura 1.10 observa-se que caso o banco seja reenergizado rapidamente, ou seja, sem que se aguarde tempo suficiente para que o mesmo descarregue (o que geralmente ocorre após um período de dez minutos) surge uma corrente de *inrush* bem maior que a observada quando o banco está completamente descarregado. A corrente de *inrush* pode provocar danos aos bancos de capacitores, às conexões elétricas e provocar atuações indevidas do sistema de proteção. Geralmente a corrente de *inrush* desaparece em menos de três ciclos, assim uma forma de evitar atuações indevidas da proteção é ajustar as unidades de proteção de sobre corrente instantânea (50) para um tempo de atuação maior que 50ms, ou seja, três ciclos. Para mitigar ou eliminar os fenômenos transitórios associados aos bancos de capacitores, vários dispositivos e estratégias de controle foram desenvolvidos, atuando principalmente no controle do momento de energização.

Neste capítulo são abordadas a importância, caracterização e distribuição das perdas e as formas mais usuais utilizadas pelas distribuidoras de energia para reduzi-las, evidenciando as principais vantagens e desvantagens de cada método com foco na compensação de reativos por ser barata e eficaz. Também são abordados os principais fenômenos associados à utilização de bancos de capacitores e suas consequências.

1.2 Contribuições da Tese

Apesar da grande quantidade de propostas publicadas, há uma carência de soluções em topologias para a compensação de reativo com ênfase na redução de custos, volume, peso, e perdas. São estas as motivações que levam às contribuições desta tese, listadas a seguir:

1. Revisão dos equipamentos existentes para a compensação de potência reativa;
2. Proposta de uma nova topologia para a compensação de potência reativa e controle da tensão, com ênfase na redução de perdas do sistema elétrico;
3. Proposta de duas novas topologias de compensadores estáticos para o controle do fluxo de potência reativa, com ênfase na redução de perdas do sistema elétrico;

4. Proposta de uma nova topologia para compensador série com o objetivo de melhorar a regulação e o perfil da tensão na carga;
5. Proposta de uma nova topologia para o controle do fluxo de potência reativa entre linhas, com ênfase na redução de perdas do sistema elétrico.

1.3 Organização Textual

Este trabalho é organizado nos seguintes capítulos:

- **Capítulo 2** – São abordados diversos dispositivos utilizados para compensação de potência reativa, enfatizando suas principais características, vantagens e desvantagens;
- **Capítulo 3** – A nova topologia para a compensação de reativo é discutida detalhadamente, apresentando suas vantagens em relação às soluções atuais. A nova topologia também é usada para o controle de tensão. Resultados de simulação comprovam a eficácia da solução proposta;
- **Capítulo 4** – São apresentadas outras topologias para compensação do fluxo de potência reativa e controle da tensão;
- **Capítulo 5** – São detalhados os experimentos realizados, cujos resultados corroboram os resultados das simulações, atestando a eficácia da proposta do capacitor ajustável;
- **Capítulo 6** – São apresentadas as conclusões deste trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 Equipamentos para Compensação de Potência

Reativa

Como abordado no capítulo anterior, a compensação da potência reativa traz vários benefícios ao sistema de potência, contribuindo para redução das perdas, ampliando a capacidade de condução de uma linha pela diminuição da corrente aparente e melhorando o nível de tensão em um barramento. A utilização de bancos de capacitores (fixos ou chaveados) é o método mais empregado pelas distribuidoras em virtude do baixo custo. Porém é o método que apresenta mais desvantagens e que provoca mais perturbações ao sistema, além de permitir apenas uma compensação grosseira, ou seja, não permite um ajuste fino da potência reativa necessária. Isto se reflete no controle do nível de tensão, pois a potência reativa fornecida pelo banco depende do nível da tensão a que o banco está submetido. Por outro lado, o controle do nível de tensão só pode ser obtido caso a tensão no barramento esteja abaixo da desejada, caso contrário o banco de capacitores aumentaria a tensão do barramento agravando o problema e aumentando as perdas.

Neste capítulo, são analisados os principais dispositivos destinados à compensação de potência reativa, focando nas suas principais vantagens e desvantagens.

2.1 Banco de Capacitores Fixo ou com Chaveamento Mecânico

O primeiro registro da utilização de banco de capacitores para compensação de potência reativa remonta ao ano de 1914 (IVNER e FRANK, 1981). Atualmente, estes dispositivos são largamente utilizados em sistemas de distribuição, devido principalmente ao baixo custo. Os bancos de capacitores são classificados em três grandes grupos: bancos fixos (não possuem qualquer tipo de controle), bancos semiautomáticos (controlados por tempo, tensão ou corrente) e bancos automáticos (controlados por fluxo de reativo ou fator de potência). As principais desvantagens dos bancos de capacitores são os transitórios que surgem durante o chaveamento e a compensação descontínua de potência reativa. Para mitigar a variação descontínua de reativo são utilizados vários bancos de capacitores. A Figura 2.1 mostra um banco de capacitores com múltiplas células. Observe que podem ser utilizadas células com potências diferentes e a menor potência que pode ser fornecida é a potência da menor célula na menor tensão de trabalho, já que a potência reativa fornecida pelo banco

depende da tensão nos terminais do banco e a maior potência é o somatório de todas as células na maior tensão de trabalho.

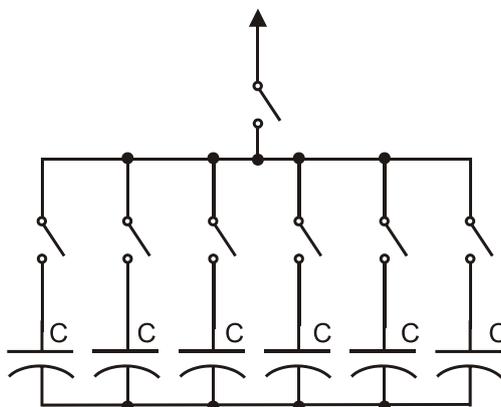


Figura 2.1 – Banco de capacitores com múltiplas células.

2.2 Compensador Síncrono

O compensador síncrono é uma máquina síncrona funcionando como motor e operando em vazio que, através do controle da corrente de excitação possibilita injetar ou absorver energia reativa do sistema. A Figura 2.2 mostra o diagrama fasorial do motor síncrono sobre-excitado e subexcitado. O motor síncrono sobre-excitado solicita uma corrente adiantada em relação à tensão V_t e se comporta como um capacitor fornecendo potência reativa. Já o motor subexcitado solicita corrente em atraso, absorvendo potência reativa e comportando-se como um reator. As principais vantagens do compensador síncrono são o controle contínuo da potência reativa, a melhoria da estabilidade do sistema e o controle preciso do nível de tensão sob as mais diversas condições de carga e contingência (MILLER, 1982).

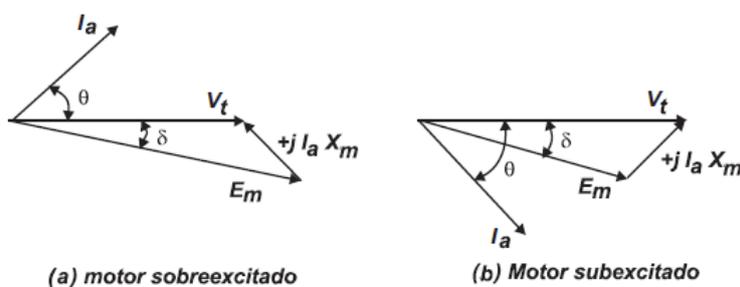


Figura 2.2 – Diagrama fasorial do motor (a) sobre-excitado e (b) subexcitado.

Já as principais desvantagens são a necessidade de uma infraestrutura significativa (fundações, equipamentos de partida e proteções), contribuição com a corrente de falta, tempo de resposta elevado quando comparado com o compensador estático, perdas elevadas e alto custo (MATHUR e VARMA, 2002). Atualmente os compensadores síncronos ainda são utilizados e existem vários fabricantes tais como a WEG.

2.3 Banco de Capacitores Chaveado a Tiristor

Em 1971 a Asea Brown Boveri (IVNER e FRANK, 1981) introduziu o banco de capacitores chaveado a tiristor - TSC (*Thyristor-Switched Capacitors*), que permite chaveamento com o menor transiente possível, simplesmente controlando o momento do chaveamento para que este ocorra quando a tensão instantânea do banco for igual à da rede. A Figura 2.3 mostra a configuração monofásica de um TSC (IVNER e FRANK, 1981). Analisando a Figura 2.3, nota-se a presença do indutor L cuja finalidade é reduzir a corrente de *inrush* e evitar ressonância do banco com o sistema elétrico. Com a supressão dos transientes de chaveamento, uma das principais desvantagens do uso de bancos de capacitores chaveados é eliminada. Entretanto, o problema da variação descontínua da potência reativa não é afetado. Para mitigar este problema pode-se utilizar a técnica do banco de capacitores com células múltiplas. Porém, a utilização de tiristores possibilita a utilização de outra técnica, que utiliza uma configuração binária. Com esta técnica é possível obter mais níveis de discretização com a utilização de um menor número de chaves e células capacitivas (DIXON, VALLE, *et al.*, 2003). A Figura 2.4 mostra um banco monofásico na configuração binária chaveada a tiristor/diodo.

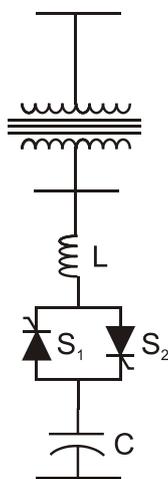


Figura 2.3 – Banco de capacitores chaveado a tiristor.

A Figura 2.5 mostra como pode ser obtida uma variação aparentemente contínua da quantidade de energia reativa fornecida pelo arranjo. É importante notar que a variação é discreta e possui estados que são definidos pelos estados das chaves eletrônicas.

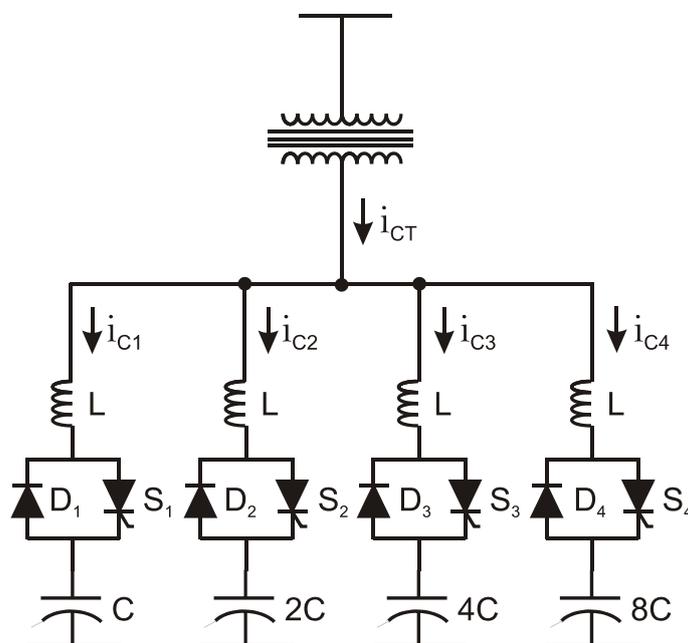


Figura 2.4 – Banco na configuração binária chaveada tiristor/diodo.

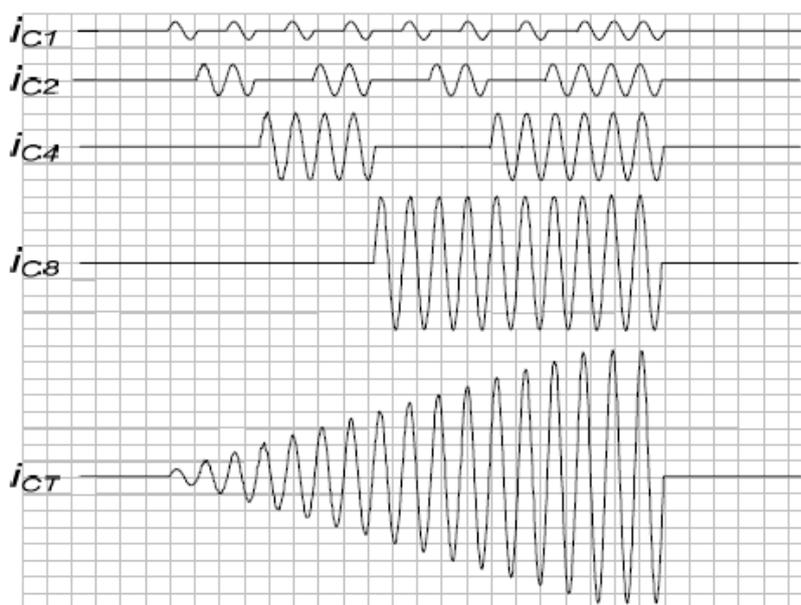


Figura 2.5 – Corrente reativa injetada em função dos estados das chaves.

A principal desvantagem deste dispositivo é a necessidade de se utilizar células capacitivas com diversos valores ou múltiplas células com o mesmo valor, o que

dificulta a manutenção e torna o dispositivo volumoso. Por outro lado, cada conjunto tiristor/diodo deve suportar toda a corrente que circula em cada célula capacitiva, e o diodo deve suportar uma tensão reversa de pelo menos duas vezes a tensão de pico da rede. Além disso, quando os tiristores estão na condição de bloqueio, as células capacitivas estão submetidas à tensão de pico da rede.

2.4 Reator Controlado a Tiristor

Este tipo de compensador utiliza um gradador a tiristores para controlar a tensão aplicada a um reator, desta forma controlando a quantidade de energia reativa absorvida pelo equipamento da rede (JIN, GOÓS e LOPES, 1994). Este equipamento permite uma variação contínua na quantidade de energia reativa que pode ser absorvida, sem poder, no entanto, fornecer energia reativa (HINGORANI e GYUGYI, 2000). Porém, associando-se um banco de capacitores elimina-se a limitação. O equipamento formado pela associação do banco de capacitores com o reator controlado a tiristor - TCR (*Thyristor-Controlled Reactor*) é denominado compensador estático, que pode fornecer tanto energia reativa indutiva quanto capacitiva de forma contínua e sem a ocorrência de transitórios (TORSING, 1981). A Figura 2.6 mostra a configuração básica de um compensador estático que utiliza um TCR e um banco de capacitores fixo. O controle da quantidade de energia reativa fornecida é definido pelo ângulo de disparo aplicado aos tiristores que formam as chaves.

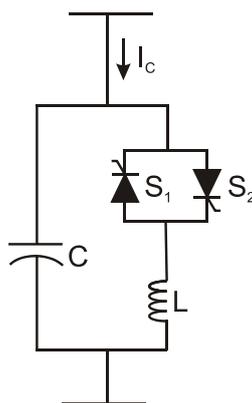


Figura 2.6 – Compensador estático a tiristores.

Por outro lado, o TCR produz uma grande quantidade de harmônicos na corrente, o que demanda a utilização de filtros para os harmônicos de baixa ordem. A forma de onda da corrente que circula pelo reator é mostrada na Figura 2.7.

A relação entre a componente fundamental da corrente no reator e o ângulo de deslocamento de fase α é dada por (TORSING, 1981)

$$I_1 = \frac{V_{rms}}{\pi \cdot \omega \cdot L (2\pi - 2\alpha + \text{sen}(2\alpha))} , \quad (2.1)$$

em que:

V_{rms} - Valor eficaz da tensão aplicada ao conjunto reator chave;

α - Ângulo de fase em relação à tensão, aplicado no disparo das chaves.

Analisando a equação (2.1) é possível observar que, quanto menor a corrente desejada no reator maior será o ângulo α e maior será a quantidade de harmônicos produzidos. A equação que permite calcular a amplitude de cada componente harmônica produzida é (TORSING, 1981):

$$I_k = \frac{4V_{rms}}{\pi X_L} \left[\frac{\text{sen}(k+1)\alpha}{2(k+1)} + \frac{\text{sen}(k-1)\alpha}{2(k-1)} - \frac{\cos(\alpha) \cdot \text{sen}(k\alpha)}{k} \right] , \quad (2.2)$$

em que:

k - Ordem do harmônico cuja amplitude deseja ser calculada;

X_L - Reatância do reator na frequência fundamental.

A partir da análise de (2.2) é possível concluir que os harmônicos preponderantes são 3º, 5º e 7º. Levando em conta o sistema trifásico, algumas considerações podem ser feitas. O 3º harmônico pode ser eliminado através da utilização da ligação em delta, conforme mostrado na Figura 2.8. Neste caso, é necessário utilizar filtros para os outros harmônicos. Utilizando-se uma configuração de doze pulsos que emprega um transformador de três enrolamentos (Y-Y-D) é possível eliminar o 5º e 7º harmônicos sem a necessidade de filtros. A Figura 2.9 mostra esta configuração.

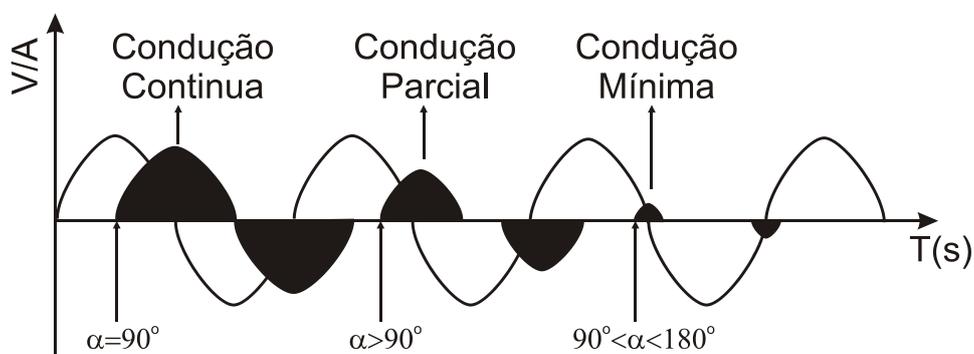


Figura 2.7 – Forma de onda da corrente que circula pelo reator.

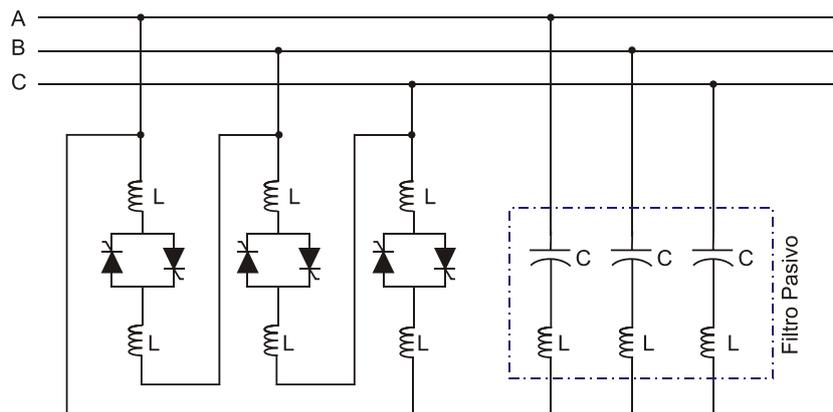


Figura 2.8 – Compensador estático com TCR ligado em delta.

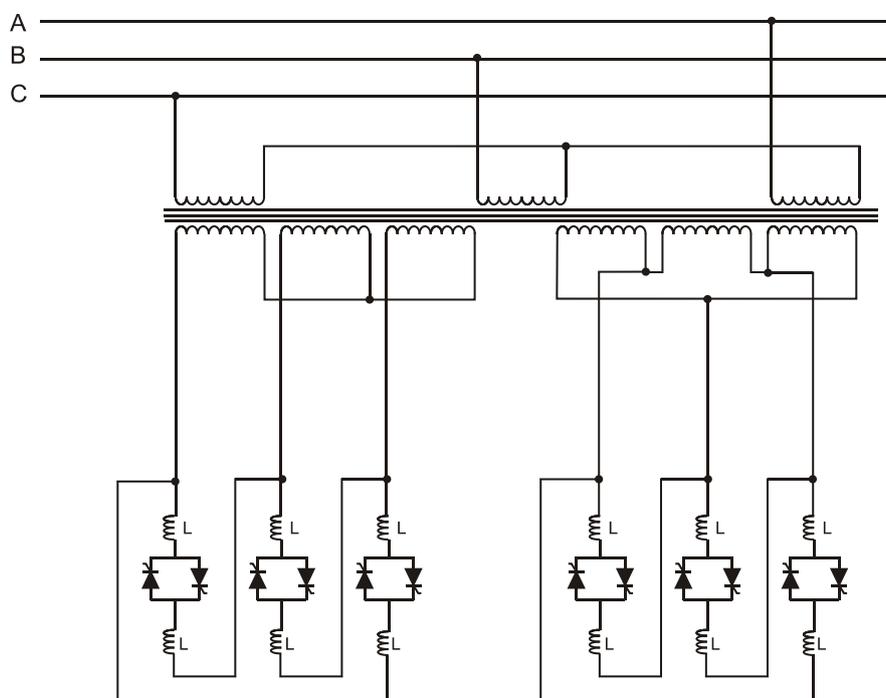


Figura 2.9 – Topologia de 12 pulsos.

2.5 Compensador Estático de Reativos

O compensador estático de reativos - SVC (*Static Var Compensator*) pode apresentar duas topologias básicas: a primeira associa um capacitor fixo – FC (*Fixed Capacitor*) a um TCR e a segunda associa um TSC a um TCR. Assim é possível fornecer à rede tanto energia reativa capacitiva como indutiva. Uma das principais características do compensador TCR+FC é que o montante de energia reativa que pode ser injetada na rede depende da tensão aplicada ao compensador, conforme pode ser observado na Figura 2.10 (MILLER, 1982).

Analisando a Figura 2.10 observa-se que existem dois limites de operação Q_{Cmax} e Q_{Lmax} que são definidos pela tensão máxima suportada pelo capacitor e pelo reator, respectivamente. Dentro destes limites o compensador apresenta uma característica praticamente linear.

A topologia TSC+TCR é mostrada na Figura 2.11. Neste caso, é possível desconectar o banco de capacitores o que permite a utilização de um reator menor que no caso anterior para a mesma capacidade de absorção de reativo. Com o uso de um banco de capacitores com vários estágios e um controle coordenado entre o reator e o banco é possível obter um fluxo de reativo contínuo (IVNER e FRANK, 1981). As principais vantagens deste tipo de compensador são a ausência de transientes, baixa distorção harmônica e a flexibilidade de controle e operação. Já suas maiores desvantagens são o alto custo e um controle complexo quando comparados com o TCR, TSC ou TCR+FC.

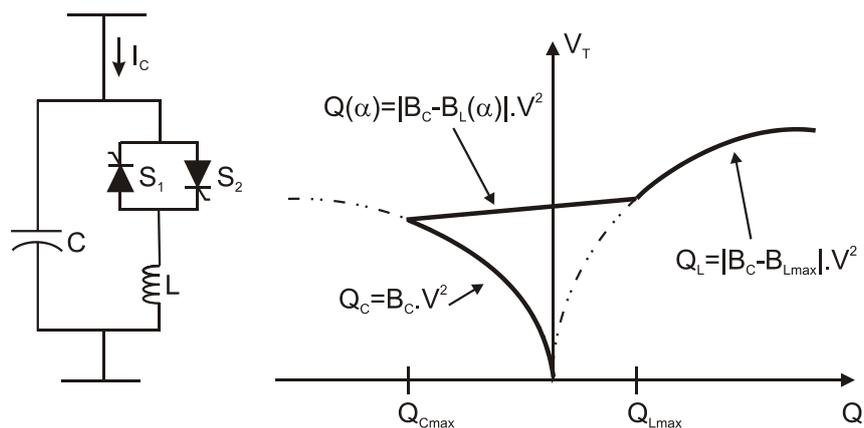


Figura 2.10 – Curva característica tensão versus potência reativa.

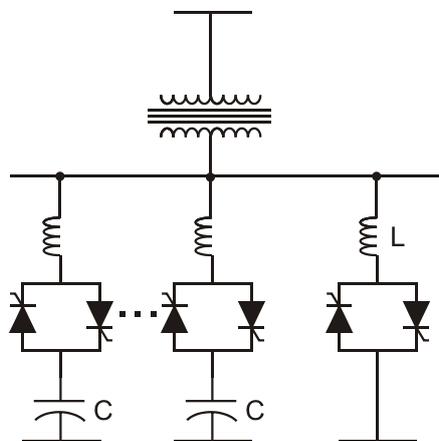


Figura 2.11 – Topologia do compensador estático TSC+TCR.

2.6 Compensador Série Controlado a Tiristor

O compensador série controlado a tiristor - TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*) utiliza um TCR+FC para realizar uma compensação série em linhas de transmissão com duas finalidades principais: prover um amortecimento quando da interligação de dois grandes sistemas de potência e reduzir a impedância de uma linha de transmissão reduzindo a queda de tensão e as perdas (KHEDERZADEH, 2007). A Figura 2.12 mostra o esquema deste compensador. Observe que controlando o indutor o conjunto se comporta como um capacitor variável na frequência fundamental e um indutor nas frequências subsíncronas, eliminando a possibilidade de ferro-ressonância. Para amortecer oscilações de potência o TCSC provê uma modulação da reatância efetiva no corredor de transmissão de energia. Já para reduzir a impedância da linha de transmissão, o TCSC é ajustado para compensar a indutância da linha reduzindo assim sua impedância.

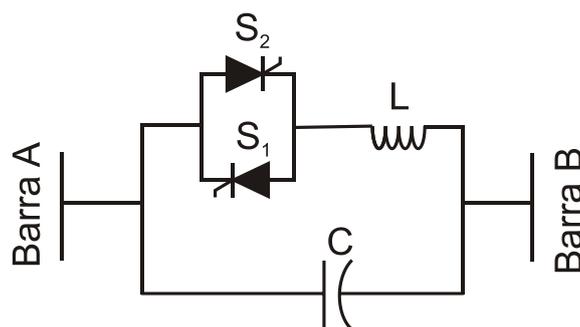


Figura 2.12 – Compensador série controlado a tiristor.

As principais vantagens deste dispositivo são a ausência de transientes, baixa distorção harmônica e a flexibilidade de controle e operação. Já suas principais desvantagens são a necessidade de significativa intervenção no sistema elétrico para a instalação do dispositivo, já que este opera em série com a rede, e os tiristores utilizados devem suportar sobrecorrentes elevadas, principalmente quando houver a ocorrência de faltas no sistema o que implica em tiristores mais caros do que aquele que seriam necessário para a operação normal em regime permanente.

2.7 Compensador Estático Síncrono

O primeiro compensador estático síncrono - STATCOM (*Static Synchronous Compensator*) foi desenvolvido em 1976 no Japão por um grupo de pesquisadores ligado à *Mitsubishi Electric Corporation* e a *Kansay Electric Co. Ltda.* (SUMI,

HARUMOTO, *et al.*, 1981). O STATCOM é um dispositivo que se comporta como uma fonte de tensão, formada por um inversor acoplado ao sistema através de reatores, fornecendo tensões trifásicas balanceadas na frequência fundamental com amplitude e fase controladas. A Figura 2.13 mostra a topologia de um STATCOM. O STATCOM provê potência reativa indutiva ou capacitiva e possui baixa tolerância a sobrecargas (GRÜNBAUM, NOROOZIAN e THORVALDSSON, 1999). Outro aspecto importante é a possibilidade de controle do nível de tensão em uma determinada barra, mas esta capacidade depende do nível de curto-circuito na mesma. A Figura 2.14 mostra uma comparação entre as curvas características tensão versus corrente de um STATCOM e um SVC. Observe que a potência reativa fornecida pelo SVC depende da tensão nos terminais do mesmo. Assim, caso a tensão no ponto de conexão esteja baixa, a máxima potência reativa que pode ser fornecida pelo SVC também diminui, o que limita o uso do SVC para controle da tensão na barra de acoplamento. No caso do STATCOM, a partir de uma determinada tensão a capacidade de fornecimento de corrente reativa é constante e independente da tensão nos terminais do dispositivo. Desta forma, o STATCOM apresenta um desempenho melhor que o SVC tanto para fornecer potência reativa como para o controle da tensão na barra de acoplamento.

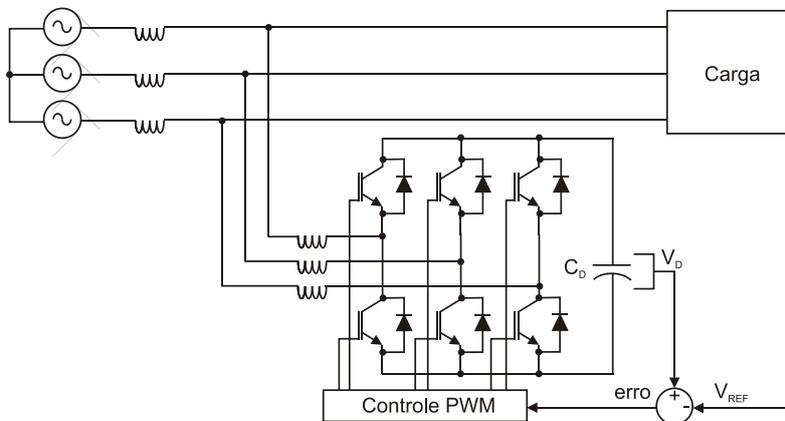


Figura 2.13 – Topologia do STATCOM.

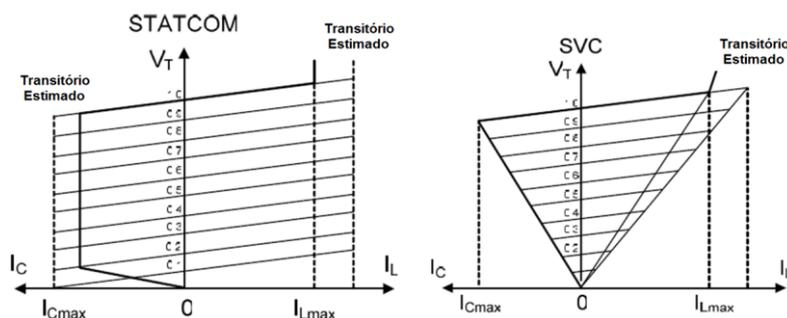


Figura 2.14 – Curvas tensão versus corrente do STATCOM e SVC.

Este é comparável ao SVC e tem como principais vantagens, a capacidade de fornecer potência reativa constante em uma faixa de tensão de trabalho maior, é mais versátil podendo agregar outras funcionalidades, e é mais eficaz no controle da tensão no barramento. Suas principais desvantagens são, o custo mais elevado, baixa tolerância a sobrecargas e limitações na potência e tensão de trabalho.

2.8 Compensador Série Síncrono Estático

O compensador série síncrono estático - SSSC (*Static Synchronous Series Compensator*) nada mais é do que uma topologia de STATCOM acoplada ao sistema através de transformadores conectados em série, aplicando na linha tensões atrasadas de 90° em relação à corrente de carga (GRÜNBAUM, NOROOZIAN e THORVALDSSON, 1999), o que resulta no comportamento similar ao de um capacitor ajustável série. Porém, neste caso a tensão injetada não está relacionada com a corrente da carga como no caso do capacitor série, mas pode ser controlada independentemente. A Figura 2.15 mostra a topologia do SSSC.

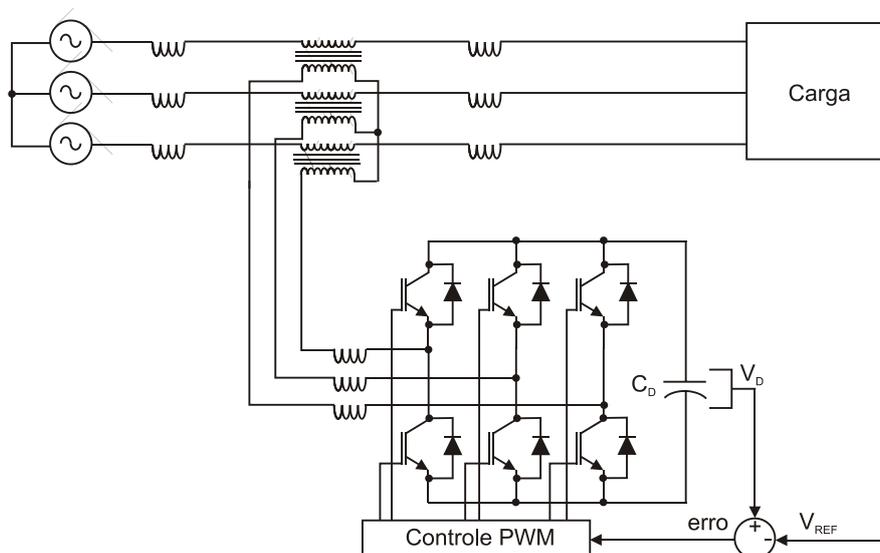


Figura 2.15 – Topologia do SSSC.

Este dispositivo é comparável ao TCSC e apresenta como principais vantagens uma resposta dinâmica melhor, não necessita de um capacitor série que deve suportar toda a corrente da linha e a tensão injetada na linha é independente da corrente de carga. Suas

principais desvantagens são baixa tolerância a sobre cargas oriundas principalmente da ocorrência de faltas, custo elevado e limitações na potência e tensão de trabalho.

2.9 Controlador Unificado de Fluxo de Potência

O controlador unificado de fluxo de potência - UPFC (*Unified Power Flow Controller*) comporta-se como uma fonte CA (corrente alternada) ideal bidirecional, podendo compensar todos os distúrbios e realizar todas as compensações necessárias em um sistema de potência (GRÜNBAUM, NOROOZIAN e THORVALDSSON, 1999). É composto de dois conversores chaveados, um em série e outro em paralelo interligados através de um barramento em CC (corrente contínua) (WEI, CHOW, *et al.*, 2004). A Figura 2.16 mostra a topologia do dispositivo. No UPFC cada inversor pode absorver ou fornecer independentemente energia reativa.

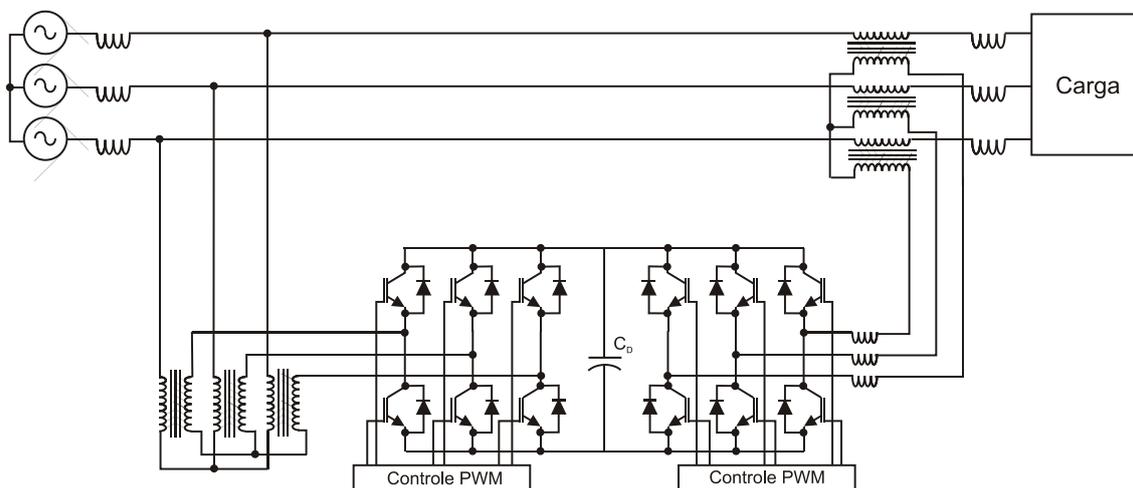


Figura 2.16 – Topologia do UPFC.

O conversor série injeta através do transformador uma tensão cuja amplitude e fase podem ser controladas, já o conversor paralelo fornece ou absorve a potência demandada pelo conversor série através do barramento CC. O conversor série possui a função principal de compensador de reativo enquanto o conversor paralelo apresenta fator de potência unitário e fornece a energia necessária através do barramento CC. No entanto, o conversor paralelo também pode funcionar como compensador de reativo independente do conversor série. Outras funções adicionais podem ser executadas pelo dispositivo, como por exemplo, filtro ativo, eliminando as distorções harmônicas provocadas por cargas não lineares. O UPFC é muito versátil, mas é um equipamento caro e que demanda um sistema de controle complexo e sofisticado, necessitando de muito esforço computacional. Portanto, é necessário o uso de hardware e software bem

mais poderosos do que os utilizados por outros compensadores. Além disso, a necessidade de chaves totalmente controladas, como por exemplo, IGBT (*Insulated-Gate Bipolar Transistor*), impõe limitações acerca do nível máximo de tensão e potência onde o compensador pode ser utilizado (MIRZAEI, BHATTACHARYA, *et al.*, 2014).

2.10 Controlador de Fluxo de Potência Interlinhas

O controlador de fluxo de potência interlinhas - IPFC (*Interline Power Flow Controller*) utiliza dois conversores acoplados através de transformadores em série com duas linhas de alimentação distintas e interligados através de um barramento CC. Este arranjo permite um livre fluxo de potência ativa entre as duas linhas enquanto a potência reativa é controlada independentemente (WEI, CHOW, *et al.*, 2004). Como no caso do UPFC este equipamento é caro e demanda um sistema de controle complexo e sofisticado, necessitando de muito esforço computacional. Além disso, apresenta limitações quanto a tensão e potência de trabalho devido as características das chaves. A Figura 2.17 mostra a topologia do IPFC.

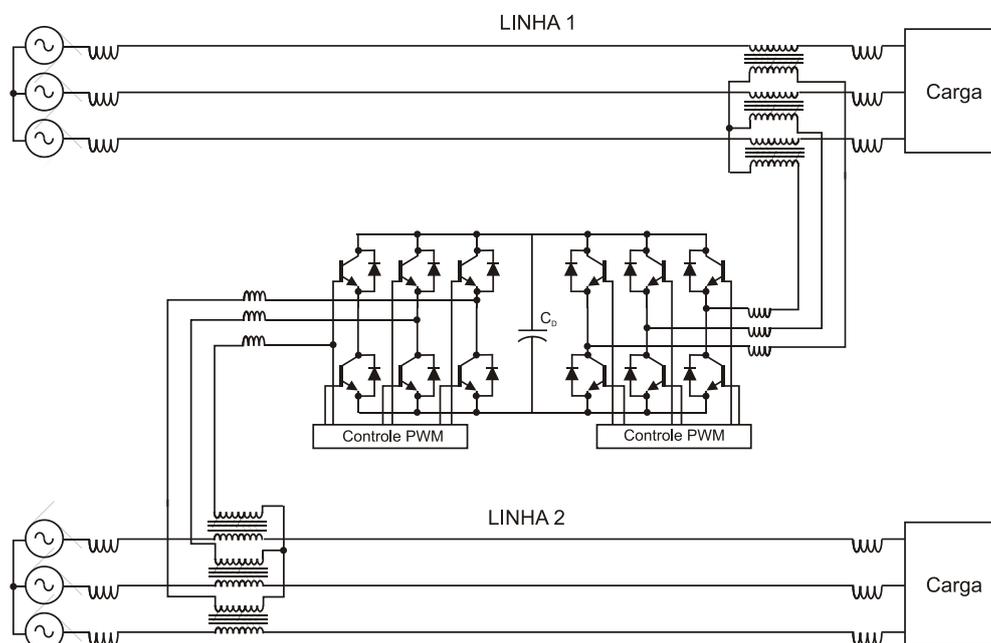


Figura 2.17 - Arranjo de um IPFC.

2.11 Transformador SEN

O transformador proposto por (SEN e SEN, 2003) utiliza a tecnologia de transformadores para permitir um controle independente do fluxo de potência ativa e

reativa em uma linha de alimentação. Ele controla independentemente o nível da tensão e o defasamento angular de cada fase através do uso de comutadores de *tap*, como em um regulador de tensão convencional.

As figuras 2.18 e 2.19 mostram os arranjos da unidade compensadora de tensão e da unidade reguladora de impedância e tensão, e seus respectivos diagramas fasoriais. Observe que o transformador SEN funciona como um autotransformador quando atuando como regulador de tensão e combina tensão de outras fases quando atuando como regulador de impedância. A maior vantagem do transformador SEN é seu baixo custo e sua maior desvantagem é a lenta resposta dinâmica.

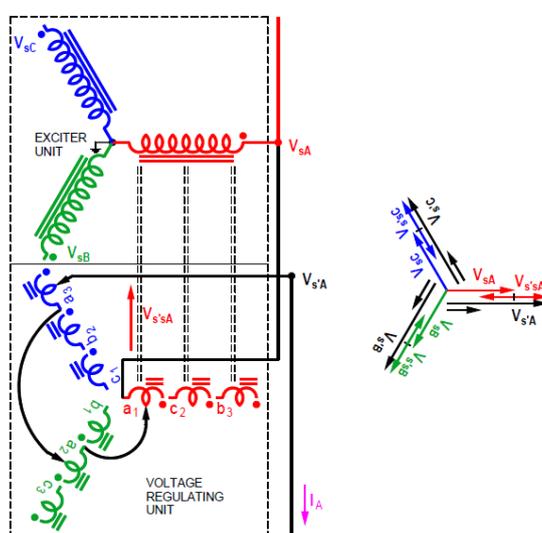


Figura 2.18 – Unidade compensadora de tensão.

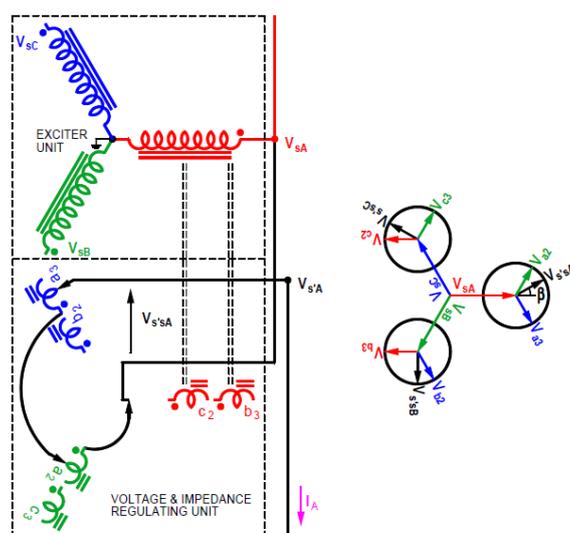


Figura 2.19 – Unidade reguladora de impedância e tensão.

2.12 Conclusão

Neste capítulo foram relacionados os principais compensadores de reativos existentes, com foco em suas principais vantagens e desvantagens. Observou-se que sob o ponto de vista do desempenho os compensadores autocomutados tais como o STATCOM, SSSC, UPFC e IPFC, com destaque para o UPFC, são superiores aos dispositivos que utilizam chaves de comutação natural ou mecânica como o SVC, TCSC, TCR+FC, TCR, TSC e o transformador SEN. No entanto, devido ao elevado custo e limitações de tensão e potência de aplicação são pouco utilizados. Sob o ponto de vista da utilização, os bancos de capacitores (fixos ou chaveados) dominam o sistema, seguidos pelos SVC's que hoje possuem mais de 100.000 MVar instalados (TYLL e SCHETTLER, 2009). Por outro lado, o transformador SEN está em desenvolvimento e requer a construção de um dispositivo específico, que não permite a utilização de componentes do sistema já existentes. No próximo capítulo é apresentado um dispositivo barato, flexível e com bom desempenho para a compensação de reativos, que permite utilizar componentes do sistema já existentes, com foco na redução de perdas. O objetivo do dispositivo proposto é compensar de forma mais eficaz do que utilizando bancos de capacitores fixos ou chaveados, o fluxo de potência reativa no sistema, melhorando o rendimento através da redução da perdas. Além disso, o custo/benefício do dispositivo proposto deve ser melhor do que o dos compensadores autocomutados, para que seja viável sua utilização na maioria dos sistemas de distribuição.

3 Proposta de Dispositivo para Compensação de Potência Reativa

Nas redes de distribuição é frequente a necessidade de energia reativa capacitiva visto que há uma predominância de cargas indutivas, o que promove uma diminuição da tensão da rede principalmente nos finais de linha. Os bancos de capacitores são utilizados predominantemente para elevar o nível de tensão sem qualquer preocupação com a potência reativa injetada. Sendo assim, é rara a utilização de reatores no sistema, limitando-se o controle a colocação ou retirada de bancos de capacitores.

Neste capítulo é apresentado inicialmente um dispositivo para compensação de reativos que utiliza os bancos de capacitores já existentes no sistema, agregando a possibilidade de um ajuste fino da quantidade de energia reativa capacitiva injetada. Trata-se de uma proposta cuja principal característica é o baixo custo e elevada velocidade de compensação quando comparada com as topologias convencionais que utilizam bancos de capacitores.

3.1 Controlador de Banco de Capacitores Ajustável

Este dispositivo é composto por transformadores e chaves dispostas como mostrado na Figura 3.1.

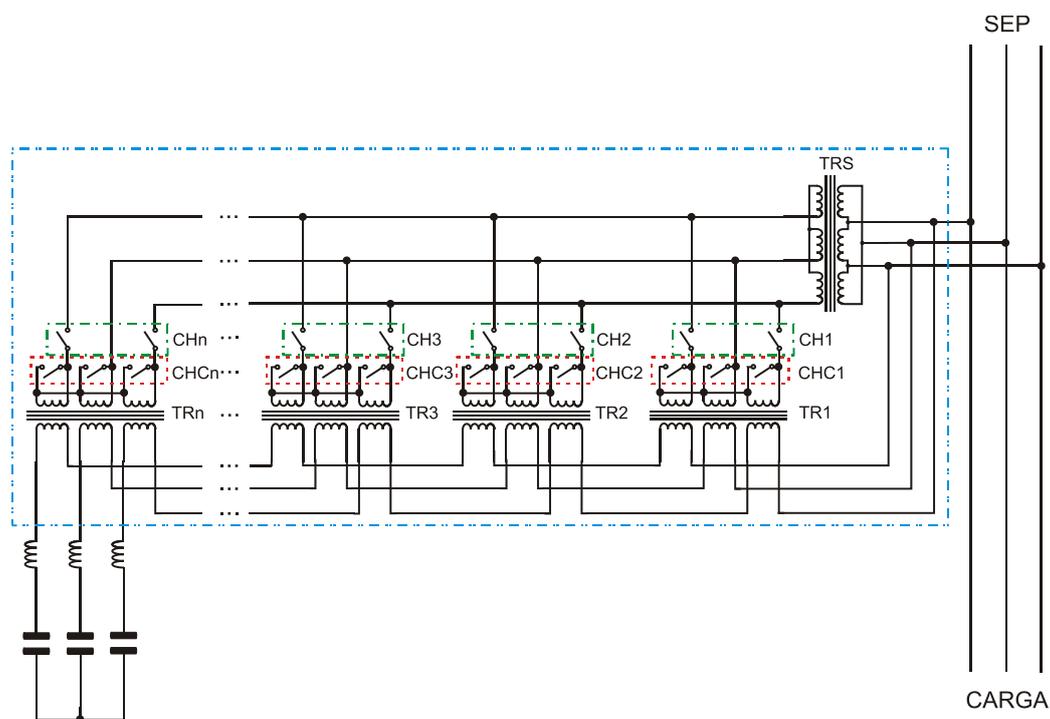


Figura 3.1 – Controlador de banco de capacitores ajustável (topologia 1).

A estrutura básica é uma adaptação do dispositivo desenvolvido por (BRITO, 2011) para a compensação de VTCD's, adaptado para controlar a tensão sobre o banco de capacitores, em regime permanente. Uma característica importante é a possibilidade da utilização de bancos de capacitores existentes no sistema, já que este não faz parte da topologia do dispositivo. O dispositivo é instalado entre o sistema elétrico de potência (SEP) e o banco de capacitores, controlando a tensão em seus terminais e desta forma permitindo o controle da energia reativa injetada.

3.1.1 Descrição do funcionamento

Observando a Figura 3.1 verifica-se a existência de $n + 1$ transformadores: TRS e TR1 a TRn. Os transformadores TR1 a TRn possuem seus enrolamentos secundários ligados em série com o banco de capacitores. Estes enrolamentos são designados como enrolamentos do lado do banco e têm como finalidade, prover um degrau de tensão que é somado com a tensão da rede produzindo um decremento na tensão que é aplicada ao banco de capacitores. Os enrolamentos primários são designados como enrolamentos do lado da fonte e estão ligados aos conjuntos de chaves CH1 a CHn, CHC1 a CHCn e ao transformador TR_S, designado transformador de alimentação. Os conjuntos de chaves CH_i são denominados de acoplamento e os conjuntos CHC_i são denominados de curto-circuito e funcionam em estados complementares, ou seja, quando o conjunto de chaves CH_i está fechado o conjunto de chaves CHC_i está aberto e vice-versa. Podem ser utilizadas qualquer tipo de chave, já que não há a necessidade de comutação constante nem de tempos de resposta muito baixos.

As relações de transformação de TR1 a TRn são potências de dois de um em relação ao outro, ou seja, um para dois, um para quatro, um para oito e assim sucessivamente. Isto tem por objetivo exprimir uma relação binária, o que resulta em um número de estados permitidos calculado pela expressão 2^n obtidos através da escolha dos estados dos conjuntos de chaves CH1 a CHn. Outro aspecto interessante é que, por se tratar de uma relação exponencial, um pequeno aumento no número de transformadores resulta em um grande aumento no número de estados possíveis. É importante salientar que não há qualquer restrição quanto ao número de transformadores a serem utilizados, considerando-se como critério de escolha o número de estados desejados. Outra observação importante é que o transformador TRS é único e responsável pela alimentação dos transformadores de decremento (TR1 a TRn).

Com a finalidade de propiciar maior clareza e simplicidade à descrição do funcionamento, é utilizado como exemplo um dispositivo com quatro transformadores monofásicos, o que resulta em 16 estados possíveis e a conformação mostrada na Figura 3.2, em que:

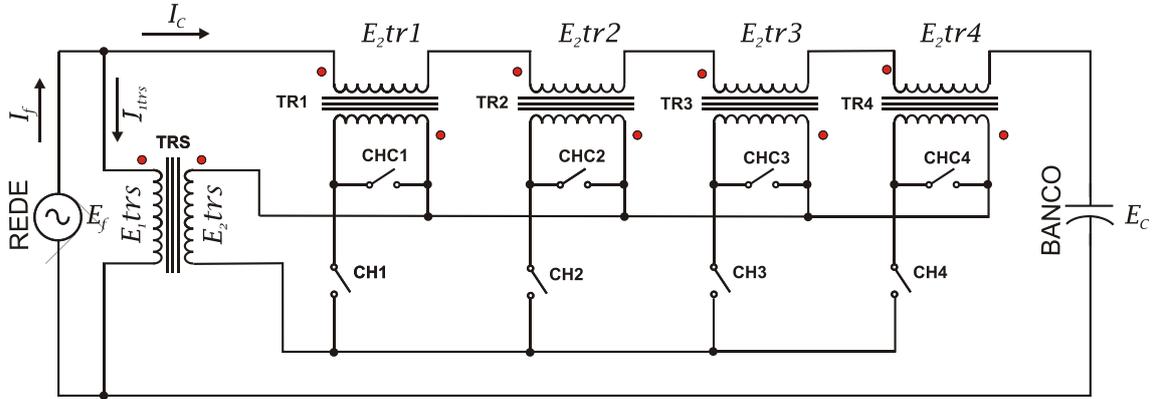


Figura 3.2 – Diagrama exemplo.

E_c – Tensão no banco de capacitores;

E_f – Tensão na fonte;

E_{2tr1} – Tensão no lado do banco do transformador 1;

E_{2tr2} – Tensão no lado do banco do transformador 2;

E_{2tr3} – Tensão no lado do banco do transformador 3;

E_{2tr4} – Tensão no lado do banco do transformador 4.

E_{2trs} – Tensão secundária do transformador de alimentação.

Considerando-se que todos os transformadores e chaves são ideais, a tensão no banco de capacitores pode ser calculada por:

$$E_c = E_f - (E_{2tr1} + E_{2tr2} + E_{2tr3} + E_{2tr4}). \quad (3.1)$$

Na Equação (3.1), as tensões dos transformadores no lado do banco são dadas por:

$$E_{2tr1} = \frac{E_f}{2^{n-1}}, \quad (3.2)$$

$$E_{2tr1} = E_{2trs} \times Ntr_1 \times Che_1, \quad (3.3)$$

$$E_{2tr2} = E_{2trs} \times Ntr_2 \times Che_2, \quad (3.4)$$

$$E_{2tr3} = E_{2trs} \times Ntr_3 \times Che_3, \quad (3.5)$$

$$E_{2tr4} = E_{2trs} \times Ntr_4 \times CHE_4, \quad (3.6)$$

em que:

Ntr_1 – Relação de espiras do transformador 1;

Ntr_2 – Relação de espiras do transformador 2;

Ntr_3 – Relação de espiras do transformador 3;

Ntr_4 – Relação de espiras do transformador 4;

CHe_1 – Estado da Chave CH1 (0-aberta,1-fechada);

CHe_2 – Estado da Chave CH2 (0-aberta,1-fechada);

CHe_3 – Estado da Chave CH3 (0-aberta,1-fechada);

CHe_4 – Estado da Chave CH4 (0-aberta,1-fechada).

Nas equações (3.2)-(3.5), as relações de espiras são dadas por:

$$Ntr_2 = 2 \times Ntr_1, \quad (3.7)$$

$$Ntr_3 = 4 \times Ntr_1, \quad (3.8)$$

$$Ntr_4 = 8 \times Ntr_1. \quad (3.9)$$

Logo:

$$E_c = E_f - E_{2trs}(Ntr_1 \times CHE_1 + Ntr_2 \times CHE_2 + Ntr_3 \times CHE_3 + Ntr_4 \times CHE_4),$$

$$E_c = E_f - E_{2trs} \times Ntr_1(CHE_1 + 2 \times CHE_2 + 4 \times CHE_3 + 8 \times CHE_4). \quad (3.10)$$

Definindo a constante de decréscimo como

$$K_a = E_{2trs} \times Ntr_1, \quad (3.11)$$

tem-se

$$E_c = E_f - K_a(CHE_1 + 2 \times CHE_2 + 4 \times CHE_3 + 8 \times CHE_4). \quad (3.12)$$

Analisando a Equação (3.12), conclui-se que a tensão que será subtraída da fonte depende apenas dos estados das chaves CH1 a CH4, obedecendo ao sistema binário, o que torna o funcionamento do dispositivo muito simples. Outra característica importante é que o dispositivo tem um comportamento discreto, ou seja, não linear e possui um número de estados finito e bem definidos cuja a quantidade depende do número de transformadores e chaves. É interessante observar que a constante K_a é igual à tensão secundária do transformador que impõe o menor decremento possível a tensão da rede. Desta forma generalizando a equação (3.12), tem-se:

$$E_c = E_f - K_a(CHe_1 + 2 \times CHe_2 + \dots + 2^{n-1} \times CHe_n). \quad (3.13)$$

Como a potência fornecida pelo banco de capacitores pode ser calculada por

$$Q = E_c^2 \times \omega \times C, \quad (3.14)$$

em que

E_c – Tensão nos terminais do banco de capacitores;

ω – Velocidade angular da tensão;

C – Valor da capacitância total do banco;

Q – Potência reativa fornecida pelo banco,

tem-se:

$$Q = [E_f - K_a(CHe_1 + 2 \times CHe_2 + \dots + 2^{n-1} \times CHe_n)]^2 \times \omega \times C. \quad (3.15)$$

Já a corrente primária que circula pelo transformador de alimentação será:

$$I_{1trs} = \frac{1}{K_{trs}} \times I_c \times N_{Tr1} \times (CHe_1 + 2 \times CHe_2 + \dots + 2^{n-1} \times CHe_n), \quad (3.16)$$

em que:

$$K_{trs} = \frac{E_{1trs}}{E_{2trs}},$$

I_c - Corrente que circula pelo banco de capacitores;

N_{Tr1} - Relação de transformação do transformador de menor degrau de tensão;

E_{1trs} - Tensão primária do transformador de alimentação.

Como:

$$I_c = j \times \omega \times C \times E_c,$$

$$K_a = \frac{E_{1trs}}{K_{trs}} \times N_{tr1},$$

$$A = \frac{N_{tr1}}{K_{trs}} \cdot (CHe_1 + 2 \times CHe_2 + \dots + 2^{n-1} \times CHe_n),$$

$$E_c = E_f(1 - A),$$

a potência reativa total entregue à rede será:

$$Q_t = -E_f \times I_f,$$

$$Q_t = -E_f(-j \times \omega \times C \times E_c - j \times \omega \times C \times A \times E_c),$$

$$Q_t = j \times \omega \times C \times E_f^2(1 - A^2). \quad (3.17)$$

A máxima potência fornecida pelo banco de capacitores é a potência nominal do banco, visto que a máxima tensão aplicada é a tensão da fonte, pois o dispositivo proposto pode apenas diminuir a tensão aplicada. Este aspecto construtivo tem dois objetivos principais: o primeiro é evitar sobretensões, já que as células capacitivas são sensíveis a este fenômeno com substancial perda de vida útil e aumento do risco de falhas, e o segundo é reduzir a potência nominal do dispositivo proposto em relação a potência nominal do banco de capacitores o que resulta na diminuição do custo.

3.1.2 Modelo de Simulação

Para uma análise mais apurada do funcionamento, foi elaborado um modelo no MATLAB/Simulink, cujo diagrama esquemático é mostrado na Figura 3.3. Adotou-se um modelo monofásico para simplificar o entendimento uma vez que todas as características observadas podem ser aplicadas a um modelo trifásico. A Figura 3.4 mostra a simbologia utilizada em todos os modelos de simulação apresentados neste trabalho. São utilizados voltímetros, amperímetros, medidores de energia, varímetros, módulos de tensão, módulos de controle da tensão, módulos de reativo, módulos defasadores, linhas de transmissão e fontes CA. É importante salientar a diferença entre o módulo de controle da tensão e o módulo de tensão. O módulo de controle da tensão é responsável por ajustar o nível da tensão aplicada aos terminais de um banco de capacitores, controlando assim sua potência e compondo com mesmo o denominado compensador, que é acoplado a rede como um elemento *shunt*. Já o módulo de tensão é um elemento série responsável por manter o nível da tensão nos terminais da carga constante, a despeito de variações no nível da tensão da rede. O indutor mostrado na Figura 3.3 é frequentemente utilizado nos bancos de capacitores chaveados utilizados pelas distribuidoras e tem por objetivo limitar o valor da corrente de *inrush*.

Os dados produzidos pelos medidores, são utilizados na elaboração de gráficos, e como parâmetros para o sistema de controle. A interação entre medidores e sistema de controle é representada por linhas pontilhadas. A Figura 3.5 mostra o fluxograma do sistema de controle utilizado em conjunto com o modelo da Figura 3.3, observe que apenas três parâmetro de entrada são utilizados, a potência reativa drenada da rede (Qmed), a potência nominal do banco de capacitores (Pto_BCO) e o percentual máximo de violação do fluxo de potência reativa em relação a potência nominal do banco (Vio%). O valor de "Vio%" deve ser escolhido maior que, a menor variação percentual

da potência reativa fornecida pelo compensador, e depende do número de transformadores de decremento utilizados no módulo de controle da tensão.

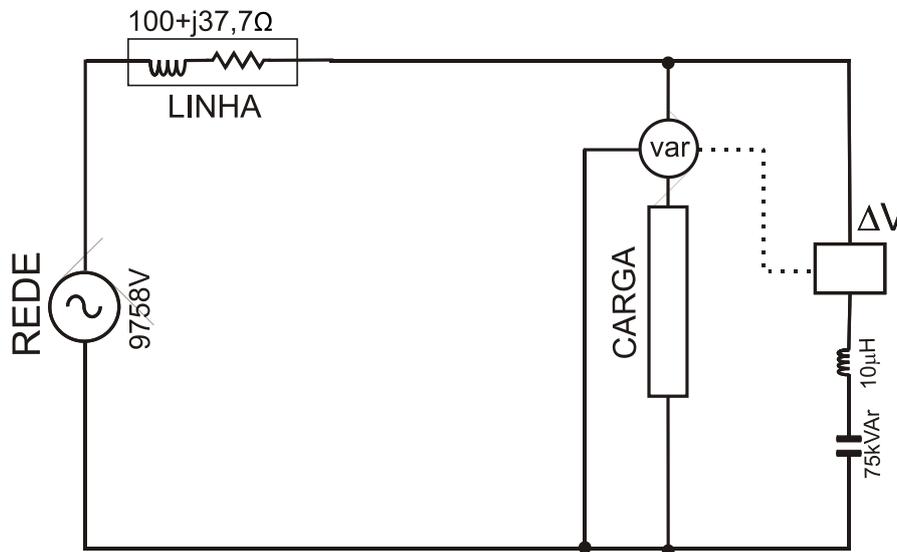


Figura 3.3 - Diagrama esquemático do modelo de sistema com o dispositivo proposto.

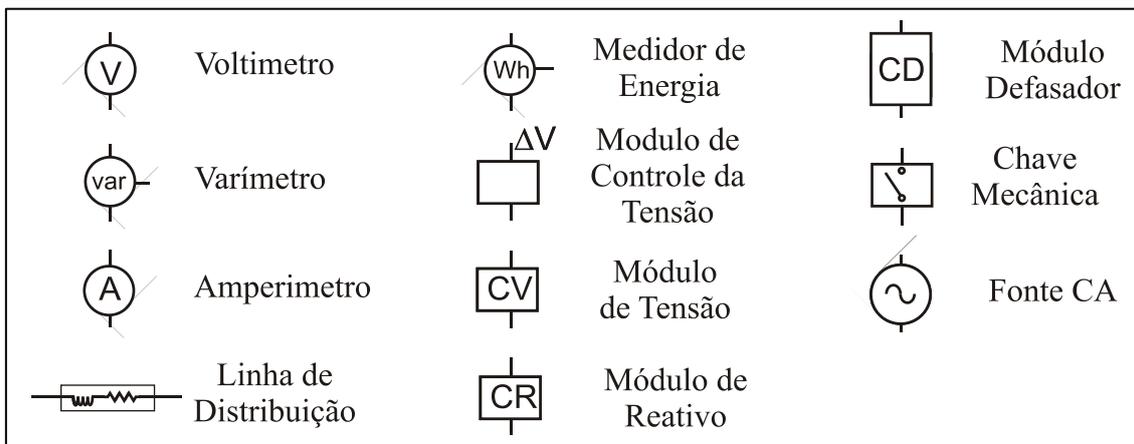


Figura 3.4 –Simbologia utilizada nos modelos de simulação.

Tabela 3.1– Sumário das variáveis de entrada do controle.

Entrada	Descrição
Qmed	Potência reativa medida na rede
Pot_BCO	Potência nominal do banco de capacitores associado ao dispositivo.
Vio%	Percentual máximo de variação da potência reativa em relação à potência do banco sem atuação do controle.

3.2 - Tabela de estados da chave do módulo de controle da tensão.

Est	Binário	CH1	CH2	CH3	CH4	CHC1	CHC2	CHC3	CHC4	E_f
0	0000	Aberta	Aberta	Aberta	Aberta	Fechada	Fechada	Fechada	Fechada	100,0%
1	0001	Aberta	Aberta	Aberta	Fechada	Fechada	Fechada	Fechada	Aberta	93,3%
2	0010	Aberta	Aberta	Fechada	Aberta	Fechada	Fechada	Aberta	Fechada	86,7%
3	0011	Aberta	Aberta	Fechada	Fechada	Fechada	Fechada	Aberta	Aberta	80,0%
4	0100	Aberta	Fechada	Aberta	Aberta	Fechada	Aberta	Fechada	Fechada	73,3%
5	0101	Aberta	Fechada	Aberta	Fechada	Fechada	Aberta	Fechada	Aberta	66,7%
6	0110	Aberta	Fechada	Fechada	Aberta	Fechada	Aberta	Aberta	Fechada	60,0%
7	0111	Aberta	Fechada	Fechada	Fechada	Fechada	Aberta	Aberta	Aberta	53,3%
8	1000	Fechada	Aberta	Aberta	Aberta	Aberta	Fechada	Fechada	Fechada	46,7%
9	1001	Fechada	Aberta	Aberta	Fechada	Aberta	Fechada	Fechada	Aberta	40,0%
10	1010	Fechada	Aberta	Fechada	Aberta	Aberta	Fechada	Aberta	Fechada	33,3%
11	1011	Fechada	Aberta	Fechada	Fechada	Aberta	Fechada	Aberta	Aberta	26,7%
12	1100	Fechada	Fechada	Aberta	Aberta	Aberta	Aberta	Fechada	Fechada	20,0%
13	1101	Fechada	Fechada	Aberta	Fechada	Aberta	Aberta	Fechada	Aberta	13,3%
14	1110	Fechada	Fechada	Fechada	Aberta	Aberta	Aberta	Aberta	Fechada	6,7%
15	1111	Fechada	Fechada	Fechada	Fechada	Aberta	Aberta	Aberta	Aberta	0,0%

Inicialmente, o sistema de controle compara o valor absoluto de "Qmed" com o valor de uma variável denominada "Tol", que é calculada multiplicando-se "Vio%" por "Pot_BCO". Caso "Tol" seja maior que "Qmed", nenhuma ação de controle é tomada, mas se "Tol" for menor, verifica-se o sinal de "Qmed". Valores positivos de "Qmed" correspondem a potência reativa indutiva e negativos a potência reativa capacitiva. Caso "Qmed" seja positivo decrementa-se o valor de uma variável denominada "Est" que corresponde ao estado das chaves do módulo de controle da tensão, "Est" assume valores entre zero e 15, totalizando 16 estados. Esta quantidade de estado é definida pelo número de transformadores de decremento utilizado no módulo de controle da tensão. O valor de "Est" é convertido então para binário, onde cada bit corresponde ao estado de um conjunto de chaves de um determinado transformador de decremento, na Tabela 3.2 mostram-se todos os estados possíveis e o percentual da tensão da rede aplicada ao banco de capacitores. Diminuir o valor de "Est" corresponde a aumentar a tensão sobre o banco de capacitores e conseqüentemente aumentar a potência reativa fornecida pelo compensador. Após esta etapa o processo retorna ao início e uma nova medição de potência reativa é realizada e comparada com "Tol", todos os passos são repetidos até que "Tol" seja maior que "Qmed" ou "Est" seja igual a zero. Caso "Qmed" seja negativo o valor de "Est" é incrementado o que corresponde a diminuir o valor da tensão sobre o banco de capacitores, diminuindo assim a potência reativa fornecida pelo

compensador. Mais uma vez o processo se repete até que "Tol" seja maior que "Qmed" ou "Est" seja igual a 15.

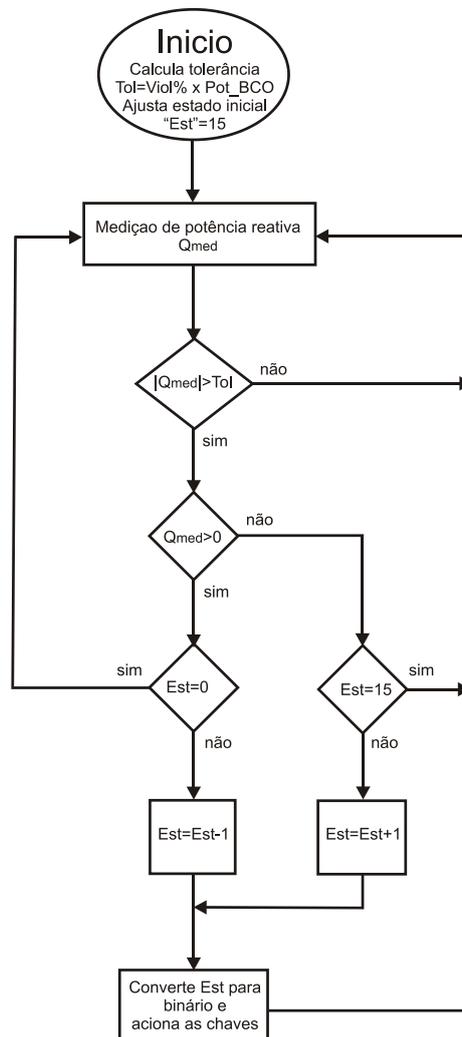


Figura 3.5 – Modelo do sistema de controle.

A estratégia de controle descrita corresponde a chamada comutação em rampa, ou seja, para se atingir um determinado valor de degrau de tensão, a comutação dos estados é feita em incrementos ou decrementos equivalentes ao menor degrau disponível. Desta forma os transitórios são fortemente atenuados e podem ser desprezados. As figuras 3.6 e 3.7 mostram os transitórios produzidos durante a comutação normal e em rampa, respectivamente.

Como será visto mais adiante neste capítulo, em virtude da configuração abaixadora de tensão do dispositivo proposto a maior corrente que circula pelo transformador de alimentação ocorre quando metade da tensão da rede é aplicada ao banco de capacitores, e as menores perdas no dispositivo são obtidas quando a potência máxima é fornecida

pelo banco, pois neste caso não há qualquer degrau de tensão aplicado. Portanto, os transformadores de decremento não estão sendo alimentados e todas as chaves de curto-circuito estão fechadas. Assim, as perdas do dispositivo dependem da potência fornecida pelo banco.

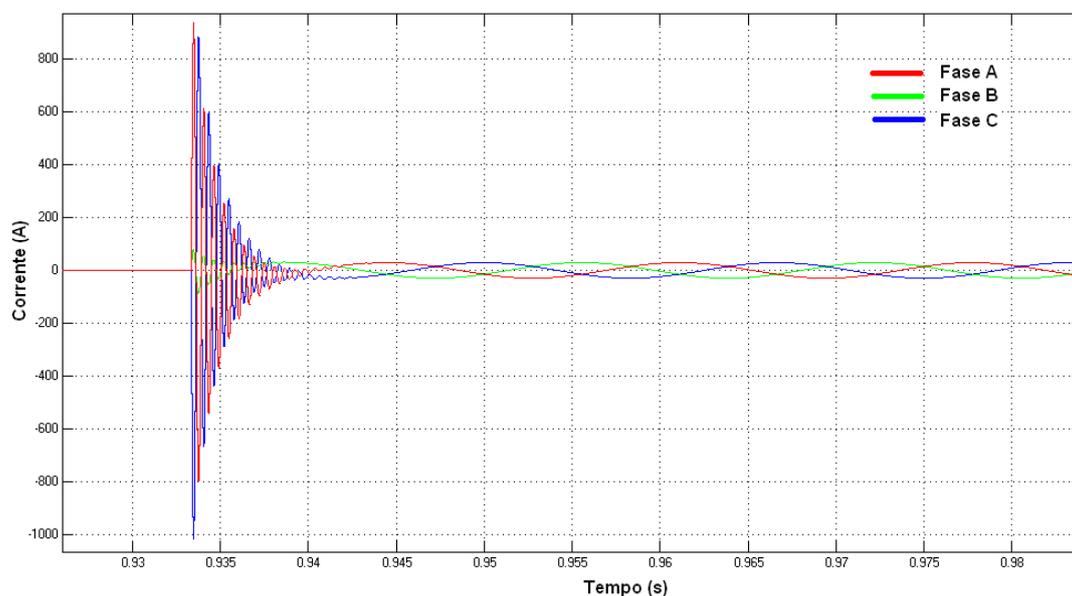


Figura 3.6 – *Inrush* com comutação normal.

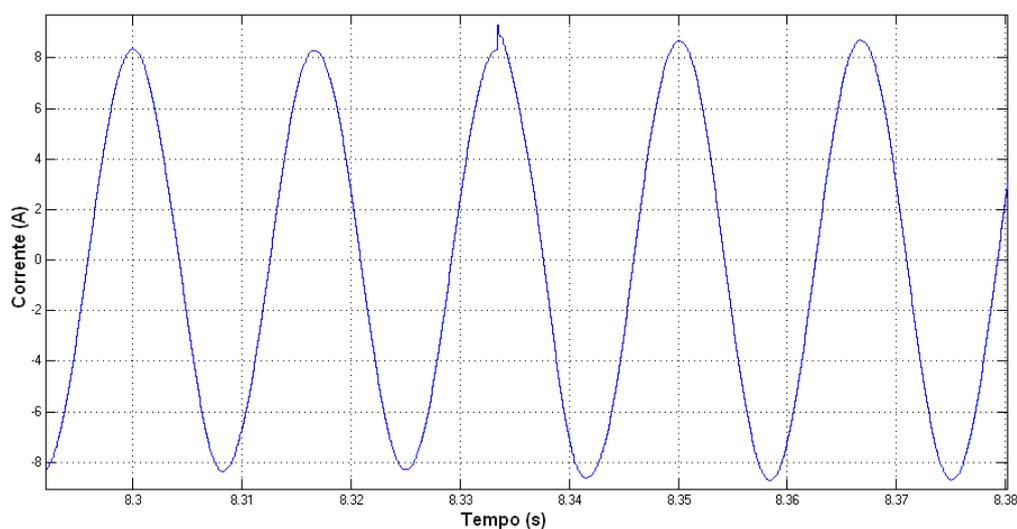


Figura 3.7 – *Inrush* com comutação em rampa.

O gráfico da Figura 3.8, mostra o comportamento das perdas e foi obtido a partir do cálculo das perdas por condução, perdas por chaveamento, perdas no ferro e perdas no cobre. As perdas por condução e chaveamento dependem do tipo da chave utilizada, como o dispositivo proposto pode utilizar qualquer tipo de chave, para efeito de

comparação foram utilizado transistores IGBT. O pico inicial é devido à energização do banco, aplicando-se o degrau de tensão correspondente a 100% da tensão da rede. A partir daí a comutação ocorre em rampa a cada meio segundo até atingir oito segundos, quando ocorre um novo degrau de energização. Os picos de corrente observados durante a comutação em rampa produzem uma componente de perdas substancialmente menor que no caso da comutação normal e as perdas em regime permanente são bem pequenas considerando-se que a potência reativa fornecida pelo conjunto (70 kvar) é praticamente constante. A Figura 3.9 resalta este aspecto. O aumento da potência reativa fornecida pelo dispositivo compensa a potência reativa fornecida pelo banco de capacitores, e se reflete num aumento significativo da corrente que circula pelo transformador de alimentação e transformadores de decremento, visto que são aplicados degraus de tensão que se opõem à tensão da rede. No entanto, isso não significa um aumento da corrente drenada da rede. De fato, haverá uma diminuição desta corrente visto que a potência reativa líquida diminui. A Figura 3.10 mostra este comportamento.

Devido à topologia do dispositivo, a corrente que circula pelo primário de cada transformador e chave não é a mesma já que as relações de transformação são diferentes. Essa afirmação pode ser vista de outra forma: como a tensão que alimenta os enrolamentos primários dos transformadores de decremento é a mesma e as potências fornecidas por cada transformador são diferentes, as correntes que circulam pelos mesmos também são diferentes, sendo uma fração da corrente total.

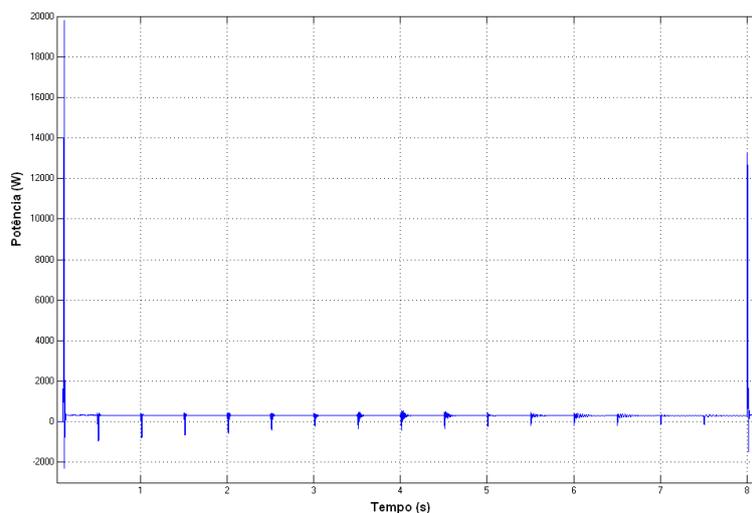


Figura 3.8 – Perdas no dispositivo proposto.

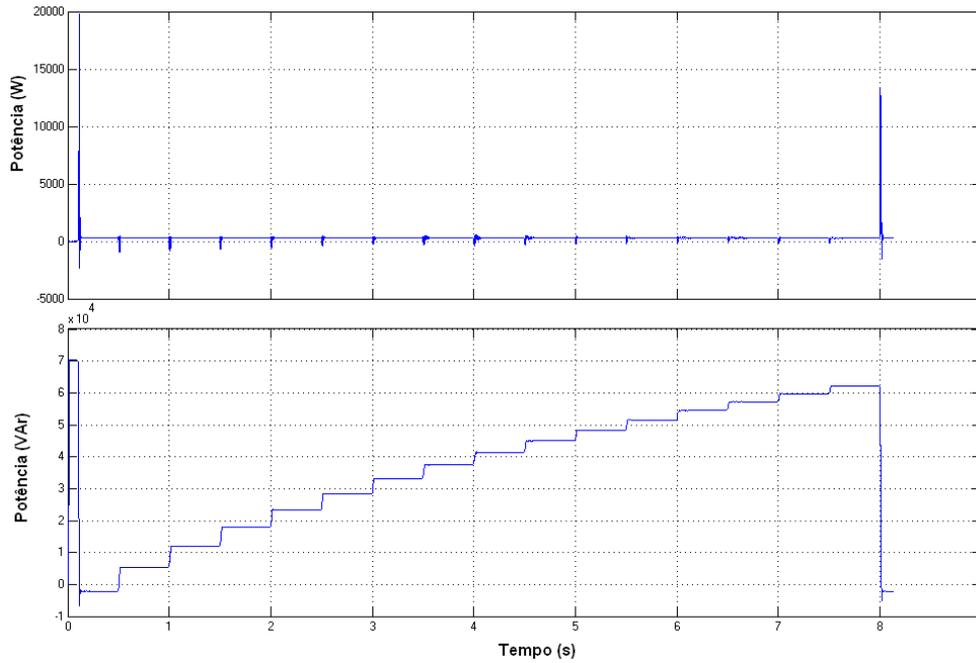


Figura 3.9 – Perdas versus potência reativa fornecida a rede.

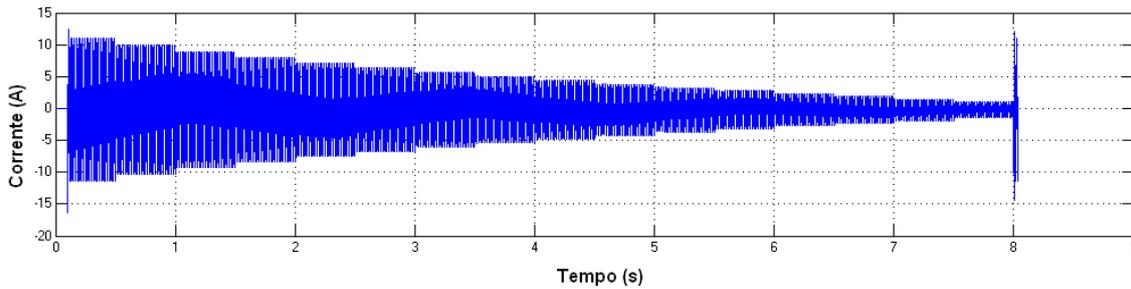


Figura 3.10 – Corrente drenada da fonte pelo conjunto dispositivo / banco.

O cálculo da corrente de cada chave e da potência de cada transformador pode ser efetuado utilizando-se a equação (3.14), donde se obtém a potência fornecida pelo banco de capacitores:

$$K_a = \frac{E_f - \sqrt{\frac{Q_{min}}{\omega C}}}{(CH_1 + 2CH_2 + \dots + 2^{n-1}CH_n)}, \quad (3.18)$$

em que Q_{min} é a potência reativa mínima fornecida à rede.

Para Q_{min} , $CH_i = 1 \forall i$. Logo:

$$K_a = \frac{E_f - \sqrt{\frac{Q_{min}}{\omega C}}}{2^n - 1} \quad (3.19)$$

Como a corrente secundária dos transformadores de decremento é a mesma, e a potência em cada transformador depende do seu valor de tensão secundária e da corrente que circula no banco, tem-se:

$$S_i = K_a \times 2^{i-1} \times I_c, \quad (3.20)$$

em que:

S_i – Potência aparente do i ésimo transformador;

i – Índice que varia de 1 a n ;

I_c – Corrente que circula pelo banco de capacitores.

A corrente I_c depende da tensão nos terminais do banco e pode ser calculada pela equação (3.14). Logo:

$$I_c = \left(E_f - K_a (CHe_1 + 2CHe_2 + \dots + 2^{n-1}CHe_n) \right) \times \omega \times C. \quad (3.21)$$

Observe que o valor de I_c depende da condição das chaves (CH1 a CHn). Assim, a máxima potência fornecida por cada transformador ocorre com combinações diferentes das chaves. Como cada chave está associada a um transformador, calculando-se a máxima corrente em cada chave, pode-se calcular a potência máxima em cada transformador. Logo:

$$I_i = \left(E_f - K_a (CHe_1 + 2CHe_2 + \dots + 2^{n-1}CHe_n) \right) \times \omega \times C \times a_i \times CHe_i \quad (3.22)$$

$$a_i = \frac{2^{i-1} \times K_a}{E_s},$$

em que:

a_i – Relação de transformação de cada transformador de decremento;

I_i – Corrente do lado da fonte de cada transformador de decremento;

E_s – Tensão de saída do transformador de alimentação.

Portanto,

$$I_i = \left(E_f - K_a (CHe_1 + 2CHe_2 + \dots + 2^{n-1}CHe_n) \right) \times \omega \times C \times \frac{K_a}{E_s} \times 2^{i-1} \times CHe_i.$$

Fazendo $\omega \times C / E_s = K_c$ tem-se:

$$I_i = 2^{i-1} \left(E_f \times K_c \times K_a - K_c K_a^2 (CHe_1 + 2CHe_2 + \dots + 2^{n-1}CHe_n) \right) CHe_i. \quad (3.23)$$

A máxima corrente que circula em um conjunto de chaves de acoplamento ocorre quando apenas aquele conjunto de chaves está fechado, pois nessa condição ocorre a máxima tensão que pode ser aplicada ao banco de capacitores, envolvendo aquele conjunto de chaves. Uma vez que, se qualquer outro conjunto de chaves de acoplamento for fechado a tensão resultante sobre o banco de capacitores será menor. Logo:

$$I_{iMax} = 2^{i-1}(E_f \times K_c \times K_a - K_c \times K_a^2 \times 2^{i-1}) \quad (3.24)$$

$$S_{iMax} = E_s \times I_{iMax}. \quad (3.25)$$

Analisando a equação (3.15) observam-se dois parâmetros de projeto importantes: o número de transformadores de decremento (determinado pelo número desejado de estados) e a potência reativa mínima desejada. Considerando-se o pior caso, ou seja, a potência reativa mínima igual a zero e o caso exemplo, onde são utilizados quatro transformadores de decremento, tem-se:

$$K_a = \frac{E_f}{2^4 - 1} = \frac{E_f}{15},$$

Aplicando a Equação 3.24 temos,

$$I_4 = \frac{0,249 \times Q}{E_s}, \quad (3.26)$$

Aplicando a Equação 3.25 temos,

$$S_4 = 0,249 \times Q. \quad (3.27)$$

Note que a potência do maior transformador de decremento utilizado no dispositivo proposto é um pouco menor que um quarto da potência do banco de capacitores. Observe que as equações (3.24) e (3.25) podem ser reescritas em função de Q Logo:

$$I_{iMax} = \frac{2^{i-1} \times (2^n - 2^{i-1} - 1) \times (Q - Q_{min})}{(2^n - 1)^2 \times E_s}, \quad (3.28)$$

$$S_{iMax} = \frac{2^{i-1} \times (2^n - 2^{i-1} - 1) \times (Q - Q_{min})}{(2^n - 1)^2}. \quad (3.29)$$

Por outro lado, a potência do transformador de alimentação pode ser obtida através do circuito equivalente mostrado na Figura 3.11, onde se observa a rede, o banco de capacitores e o dispositivo proposto.

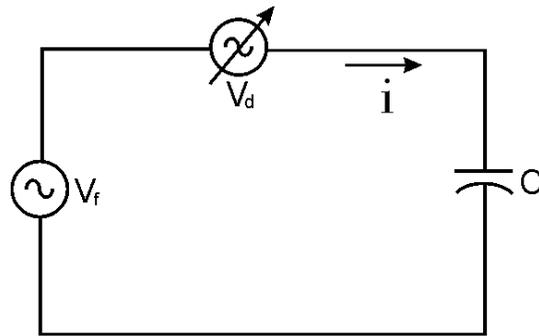


Figura 3.11 – Circuito equivalente.

A rede está representada pela fonte de tensão constante e o dispositivo proposto pela fonte de tensão variável, donde é possível escrever:

$$S_d = V_d \times i,$$

como,

$$V_d = V_f - X_c \times i,$$

temos,

$$S_d = V_f \times i - X_c \times i^2. \quad (3.30)$$

Para encontrar o máximo da equação (3.30) iguala-se a zero sua derivada em relação a i . Logo:

$$\frac{dS_d}{di} = V_f - 2 \times X_c \times i,$$

como,

$$V_f - 2 \times X_c \times i = 0,$$

temos,

$$X_c \times i = \frac{V_f}{2}. \quad (3.31)$$

Como $X_c \times i$ é igual à tensão no banco de capacitores, a tensão no dispositivo será igual à metade da tensão da fonte, e neste caso a potência máxima fornecida pelo dispositivo será igual a um quarto da potência nominal do banco de capacitores mais as perdas e correntes de magnetização dos transformadores de decremento. Porém, caso a tensão da rede seja adequada ao uso direto das chaves, é possível eliminar este transformador de alimentação reduzindo substancialmente o custo do dispositivo. Assim,

$$S_{sMax} = \frac{Q}{4}. \quad (3.32)$$

3.2 Aplicações com Banco de Capacitores Ajustável

É interessante notar que frequentemente não é necessário atingir potência reativa capacitiva zero, pois é comum existir uma necessidade de potência reativa constante, referente a parcela abaixo da faixa de potência variável, no gráfico da Figura 3.12 esta faixa está em torno de 1,2 Mvar. Nestes casos o custo do dispositivo proposto diminui. Considere as curvas de energia reativa obtidas das leituras realizadas em dois alimentadores reais de duas subestações distantes 80 km uma da outra, tomadas a cada 5 minutos e mostradas nas Figuras 3.12 e 3.13, denominados alimentadores caso A e caso 2 respectivamente. Observe que existe uma demanda constante de pelo menos 1,2 Mvar para o caso A e de 2,0 Mvar para o caso B, independente da hora ou do dia da semana. Nestes casos os dispositivos a serem empregados seriam dimensionados considerando-se pelo menos 2,3 Mvar e 2,5 Mvar como potência dos bancos e 1,2 Mvar e 2,0 Mvar como potências constantes, respectivamente. Assim, aplicando a Equação 3.32 os dispositivos de controle de tensão teriam potências nominais de pelo menos 275 kvar e 125 kvar.

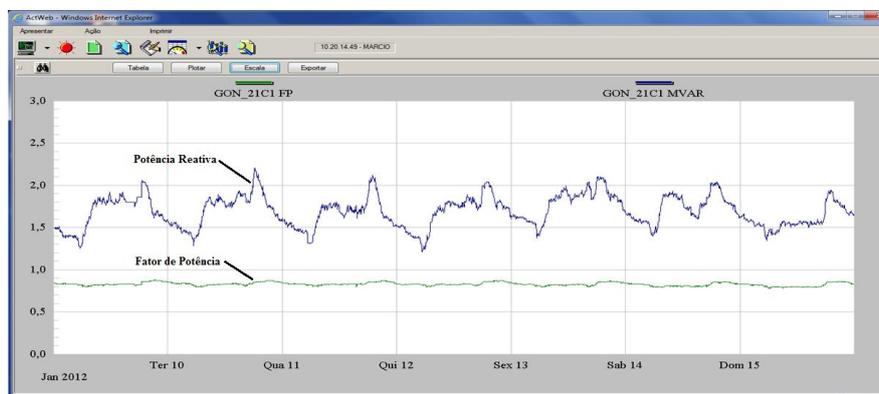


Figura 3.12 – Leituras de Mvar amostradas a cada 5 minutos (caso A).

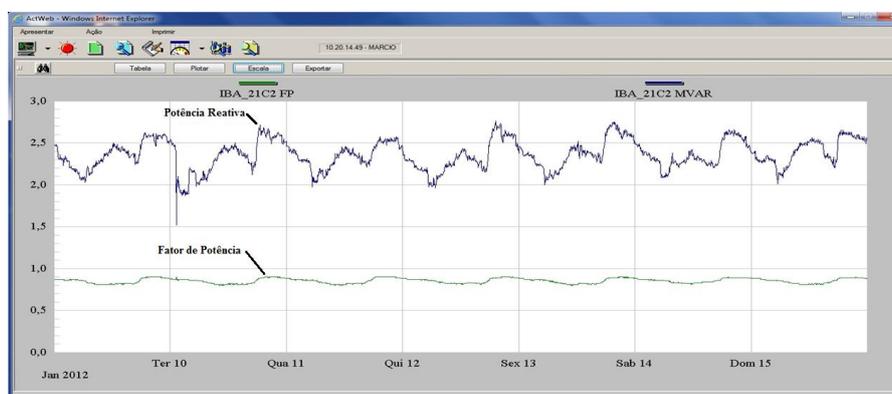


Figura 3.13 – Leituras de Mvar amostradas a cada 5 minutos (caso B).

Neste ponto é analisado o comportamento dinâmico do dispositivo, utilizando o perfil de carga de um alimentador real. Considere o alimentador do caso A. A Figura 3.14 mostra o diagrama esquemático do modelo numérico utilizado nas simulações, elaborado no software MATLAB. Todos os modelos numéricos utilizados neste trabalho constam no anexo. Foram modelados a linha de transmissão, as cargas do alimentador, o módulo de controle da tensão e o banco de capacitores.

A curva de demanda reativa mostrada na Figura 3.12 foi utilizada para modelar as cargas ativa e reativa, que em conjunto, simulam o comportamento da carga real do alimentador. Para tanto a curva de demanda reativa foi discretizada considerando-se apenas um dia, como mostrado na Figura 3.15.

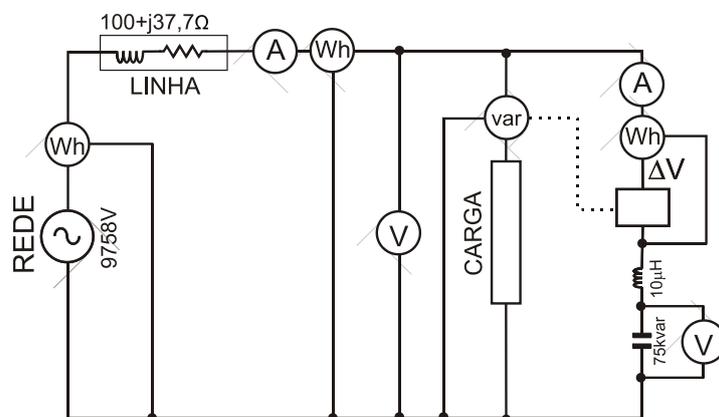


Figura 3.14 – Diagrama esquemático do modelo do alimentador do caso A.

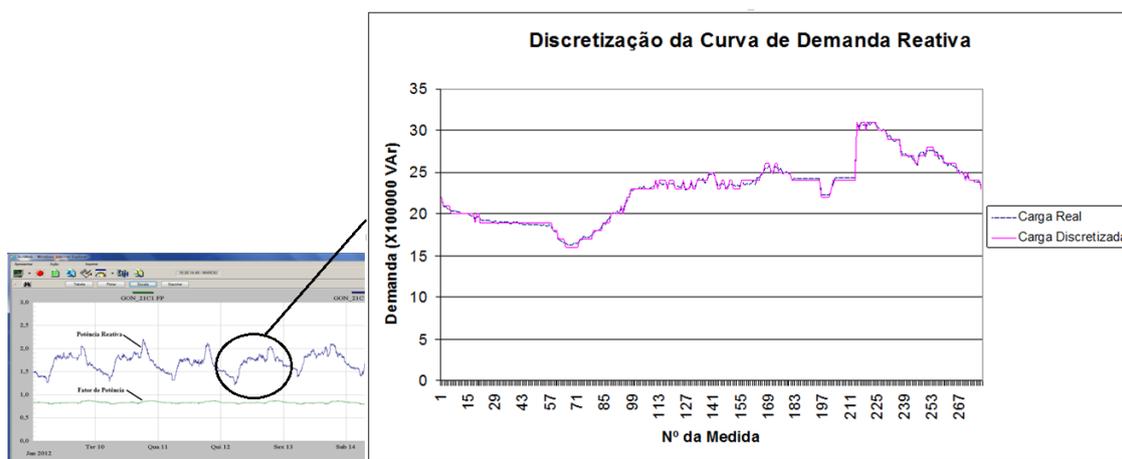


Figura 3.15 – Curva de demanda discretizada.

Note que os valores de potência reativa mostrados na Figura 3.15 não são exatamente os mesmos mostrados na Figura 3.12. Foi aplicado um fator

multiplicador para permitir a utilização de apenas cinco bits para representar a curva de demanda discretizada. Isto não representa um problema já que o que o formato da curva de carga foi preservado e é similar a curva real. As figuras 3.16 e 3.17 mostram os diagramas esquemáticos dos modelos numéricos utilizados nas simulações das cargas reativa e ativa respectivamente. Os modelos utilizaram os dados obtidos pela metodologia descrita. Também foi inserido, no modelo um disjuntor que acopla o conjunto dispositivo proposto, mais banco de capacitores (compensador) à rede em um dado momento. Desta forma tornando evidente o momento de início do funcionamento do dispositivo. Observe que as variações na potência reativa do alimentador real ocorrem no período de alguns minutos, sendo este um comportamento típico. Assim, o tempo de resposta não necessita ser muito baixo o que, conseqüentemente, reduz as perdas por chaveamento. O dispositivo modelado utiliza um tempo de resposta de alguns ciclos o que é suficiente. A Figura 3.18 mostra a corrente drenada da rede, a potência reativa solicitada da rede, e as potências ativa e reativa solicitadas pela carga com o compensador desligado. Já na Figura 3.19 observa-se o mesmo gráfico com o compensador em operação. Observe que os resultados das simulações foram condensados no tempo, ou seja, o período de 24 horas foi reduzido ao período de 24 segundos. Assim cada segundo de simulação corresponde ao período de uma hora, sendo necessário para viabilizar as simulações já que o volume de dados gerados durante um período de 24 horas não é suportado pelo simulador. Além disso, o comportamento transitório do compensador pode ser visualizado com mais destaque.

Comparando os resultados das duas simulações fica evidente uma redução da potência reativa absorvida da rede de até 100%, o que resulta em redução na corrente que circula pela linha, com conseqüente diminuição das perdas e melhoria do perfil de tensão.

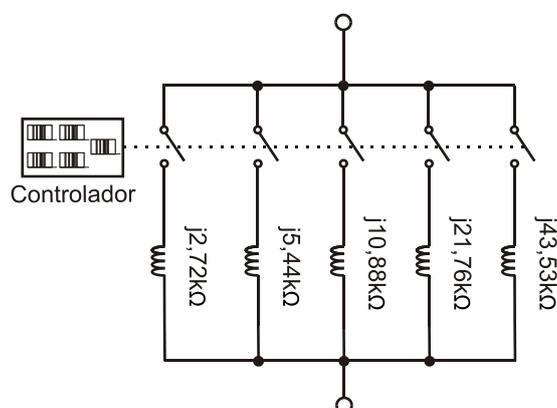


Figura 3.16 – Diagrama esquemático do modelo da carga reativa.

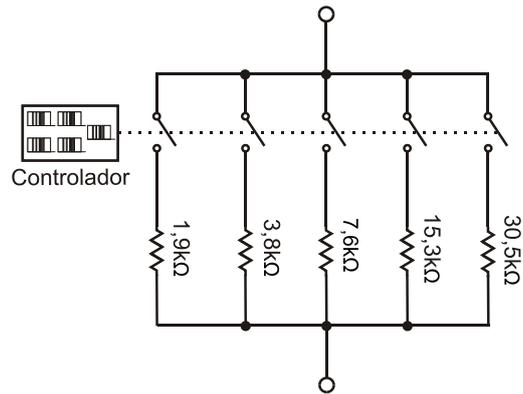


Figura 3.17 – Diagrama esquemático do modelo da carga ativa.

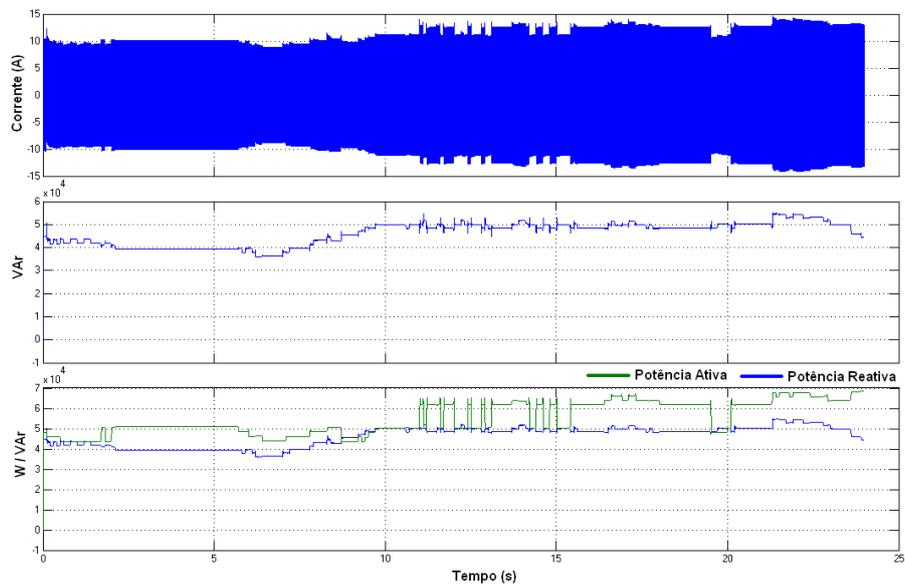


Figura 3.18 – Corrente e potências drenadas da rede, sem compensação.

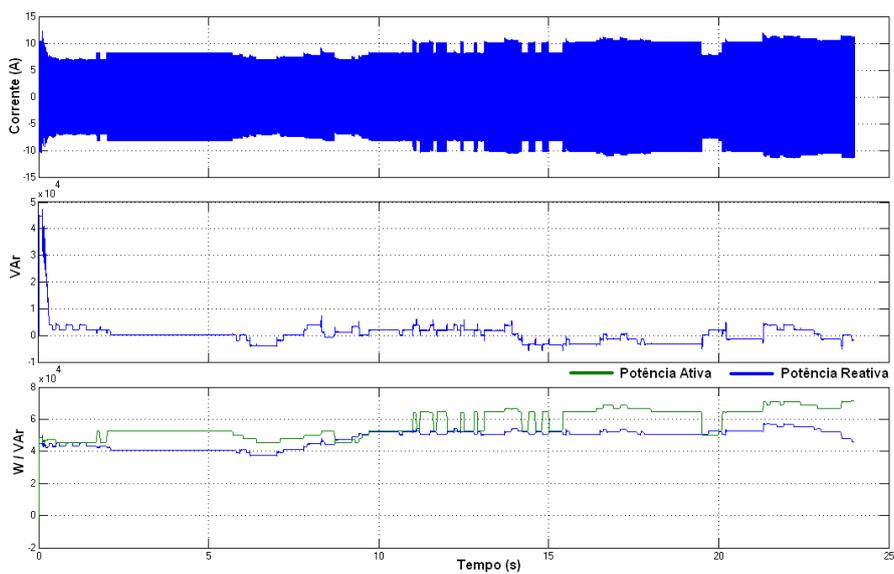


Figura 3.19 – Corrente e potências drenadas da rede, com compensação.

As figuras 3.20 e 3.21 mostram o perfil da tensão sobre a carga com o compensador desligado e ligado, respectivamente. Analisando os perfis de tensão mostrados nas figuras 3.20 e 3.21, observa-se uma melhoria no nível da tensão durante todo o período de simulação apesar das variações do nível de carga. É importante considerar que o efeito do compensador sobre o perfil da tensão depende da potência de curto-circuito no local da instalação e da potência do compensador, pois quanto menor a potência de curto-circuito e maior a potência do compensador, maior será o efeito. Este comportamento pode ser inferido visto que uma elevada potência de curto-circuito está associada a uma baixa impedância série do sistema de alimentação, enquanto, a potência do elemento *shunt* está inversamente relacionada com sua impedância.

Neste ponto será analisado o comportamento da tensão, corrente e potência no banco de capacitores durante a operação do compensador. A Figura 3.22 mostra a potência reativa fornecida, a tensão e a potência reativa solicitada pela carga. Nota-se que a potência reativa acompanha a variação da tensão. No entanto a potência reativa na carga não está precisamente acoplada. Isso se deve à tolerância ajustada no sistema de controle que permite que certa quantidade de potência reativa seja trocada com a rede sem que qualquer ação de controle seja realizada. A tolerância é decorrência da natureza discreta do compensador que não pode fornecer qualquer valor de potência reativa solicitada pela carga, podendo apenas assumir valores próximos. Por outro lado, a tolerância permite reduzir significativamente o número de operações realizadas pelo compensador em um dado intervalo de tempo, contribuindo para o aumento da vida útil do dispositivo. O comportamento da corrente no banco é mostrado na Figura 3.23, onde podem ser observados os transitórios provocados pelo processo de mudança de estado. Os transitórios não são significativos e não influenciam o funcionamento do dispositivo. Ao longo deste capítulo será abordada mais detalhadamente a relação entre o controle do fluxo de reativo e a regulação da tensão.

Neste momento será analisada a influência do compensador na redução das perdas a montante do ponto de instalação. São consideradas as perdas na linha e a potência ativa consumida pelo próprio compensador. Para tanto o diagrama esquemático do modelo mostrado na Figura 3.14 foi modificado, acrescentando-se um medidores de energia ativa e voltímetros na carga e no banco de capacitores. O mesmo aparato é utilizado para medir a energia ativa drenada da rede e a energia ativa utilizada pela carga. São feitas duas simulações: uma com o compensador desligado e outra com o compensador

ligado. Assim, é possível determinar a melhoria do desempenho do sistema e as perdas em cada caso, além do possível retorno financeiro caso o compensador fosse utilizado no alimentador real. A Figura 3.24 mostra o diagrama esquemático do modelo numérico utilizado.

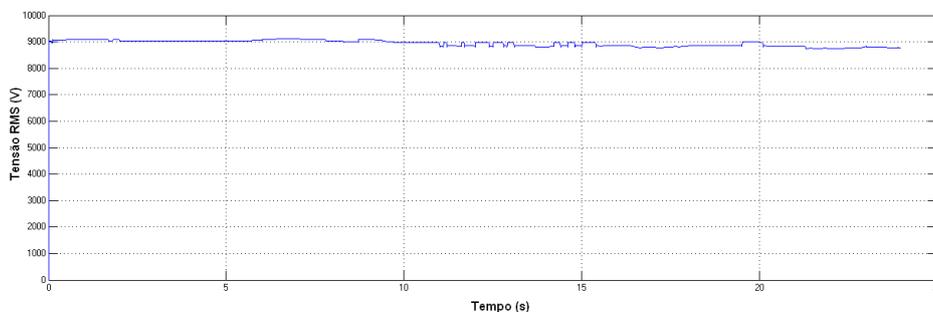


Figura 3.20 – Perfil da tensão sobre a carga com o compensador desligado.

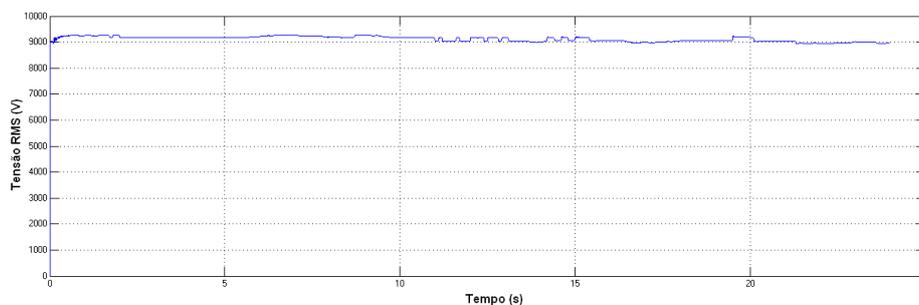


Figura 3.21 – Perfil da tensão sobre a carga com o compensador ligado.

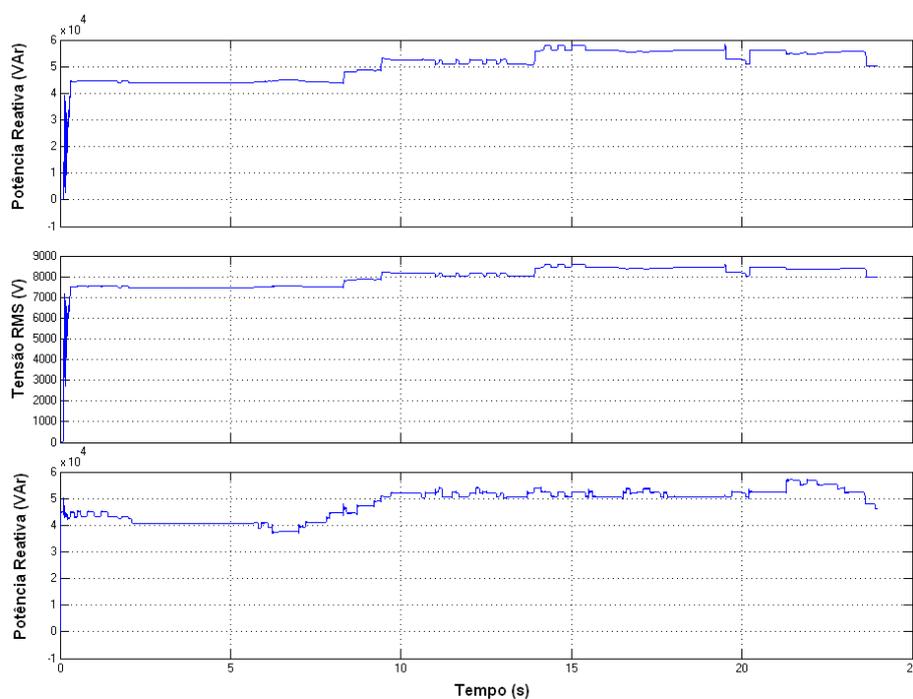


Figura 3.22 – Potência reativa, tensão no banco e potência reativa na carga.

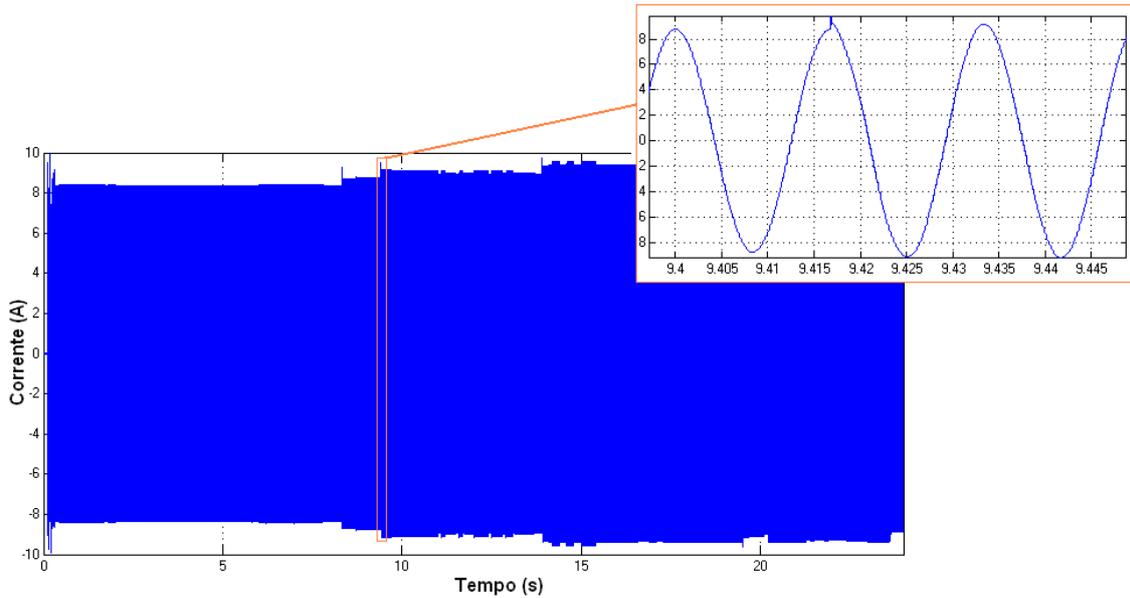


Figura 3.23 – Corrente no banco de capacitores.

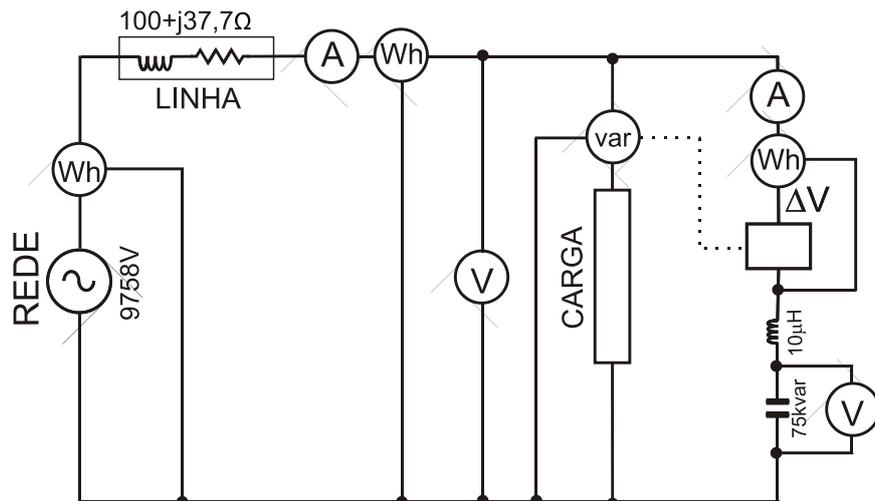


Figura 3.24 – Diagrama esquemático do modelo numérico para análise das perdas.

A Tabela 3.3 mostra o resultado de três simulações realizadas em condições diferentes. Na primeira coluna tem-se o resultado da simulação sem qualquer ação para a redução do fluxo de potência reativa. Observe que o total das perdas a montante do ponto de instalação chega a aproximadamente 12,34% da potência entregue a carga. Este patamar de perdas representa um caso frequente e resulta num montante equivalente a R\$ 1.085.523,04 por ano, considerando-se a tarifa média nacional de R\$ 300,10 por MWh para os clientes do sistema de distribuição. A segunda coluna exhibe o resultado da simulação do mesmo sistema, com a adição de um banco de capacitores

fixo cujo valor se aproxima da média da demanda de potência reativa. Neste caso houve uma diminuição significativa nas perdas o que resultou em uma economia de cerca de R\$ 239.747,42 por ano, que equivale a uma redução de cerca três pontos percentuais em relação ao caso anterior. Na terceira coluna vê-se o resultado da simulação com a utilização do compensador proposto. Neste caso o fluxo de potência reativa foi reduzido a menos de 5% do fluxo sem compensação, resultando numa redução das perdas em torno de 4,3 pontos percentuais e uma economia de R\$ 352.961,48 por ano quando comparado com o caso sem compensação, e de R\$ 113.214,06 quando comparado com o caso do uso do banco de capacitores fixo. Note que a diferença, entre o resultado obtido com o uso do banco fixo de capacitores e com o uso do compensador, depende do perfil do fluxo de potência reativa na carga, pois os bancos de capacitores fixos possuem uma gama limitada de potências disponíveis, ou seja, as células capacitivas que possuem apenas alguns valores nominais fabricados como por exemplo, 100, 200 e 400kVAr. Assim, a associação delas resulta em bancos com valores nominais discretos. É uma prática comum entre as distribuidoras utilizar células de mesmo valor para compor um banco, com o objetivo de reduzir o número dos itens de estoque e facilitar a manutenção. Esta prática limita ainda mais a gama de valores disponíveis. Além disso, a potência reativa realmente fornecida pelo banco vai depender da tensão nos seus terminais, visto que, o valor nominal é obtido apenas quando tensão nominal é aplicada aos seus terminais. Isto gera um excesso de potência reativa capacitiva ou indutiva, resultando em perdas. Já no caso do compensador, é possível obter um valor excelente, tão próximo do ideal quanto se deseje, o que resulta em uma compensação mais precisa. É importante salientar que, normalmente, os bancos de capacitores instalados no sistema de distribuição têm como objetivo principal melhorar o perfil de tensão, o que nem sempre resulta em uma melhoria no fluxo de potência reativa e conseqüentemente das perdas.

A Figura 3.25 mostra o diagrama esquemático do modelo numérico utilizado para obter os dados empregados na análise das perdas e do perfil de tensão. Nele podemos destacar a presença do controle de banco de capacitores por nível de tensão, dois disjuntores e dois bancos de capacitores, em uma configuração que é encontrada com muita frequência nos sistemas das distribuidoras. O uso de dois ou mais bancos tem o objetivo de permitir controlar melhor a potência reativa injetada na barra e conseqüentemente melhorar o perfil de tensão.

Tabela 3.3 – Resultado das simulações para análise das perdas (kWh).

	Sem compensador	Com banco fixo	Com compensador
Energia na carga	1306,98	1342,60	1359,42
Energia no compensador	0	0	6,79
Energia absorvida da rede	1468,25	1468,25	1468,25
Perdas	161,27	125,65	108,83
Perdas %	12,34%	9,36%	8,01%
Energia na carga (real)	80341,53	82531,01	83564,93
Energia no compensador (real)	0	0	417,64
Energia absorvida da rede (real)	90255,00	90255,00	90255,00
Custo das perdas (diário)	R\$ 2.974,04	R\$ 2.317,19	R\$ 2.007,02
Custo das perdas (anual)	R\$ 1.085.523,04	R\$ 845.775,62	R\$ 732.561,56
Perdas recuperadas (anual)	-----	R\$ 239.747,42	R\$ 352.961,48

A Figura 3.26 mostra o fluxograma do sistema de controle, cuja a filosofia é utilizar os bancos para controlar a tensão no barramento, acoplando-os ao sistema quando a tensão está abaixo de um valor mínimo e desacoplando quando está acima de um valor máximo, sendo os limites ajustáveis. A Figura 3.27 mostra o resultado da simulação, onde são vistos os estados dos disjuntores de banco e o perfil da tensão. A Tabela 3.4 mostra os números da simulação.

Tabela 3.4 – Perdas (kWh) para banco com controle por tensão.

	Banco Chaveado (ΔV)
Energia na carga	1.323,80
Energia no compensador	0
Energia absorvida da rede	1.468,25
Perdas	144,45
Perdas %	10,91%
Energia na carga (real)	81.375,46
Energia no compensador (real)	0
Energia absorvida da rede (real)	90.254,99
Custo das perdas (diário)	R\$ 2.663,86
Custo das perdas (anual)	R\$ 972.308,99
Perdas recuperadas (anual)	R\$ 113.214,06

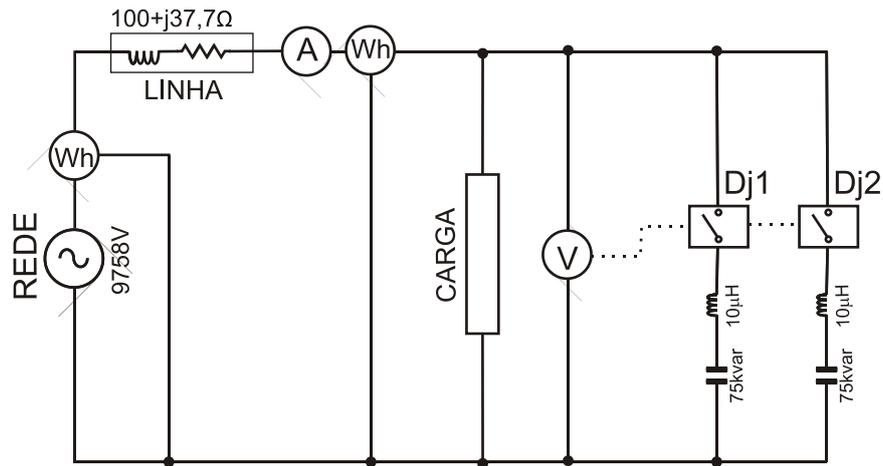


Figura 3.25 – Modelo dos bancos com controle por nível de tensão.

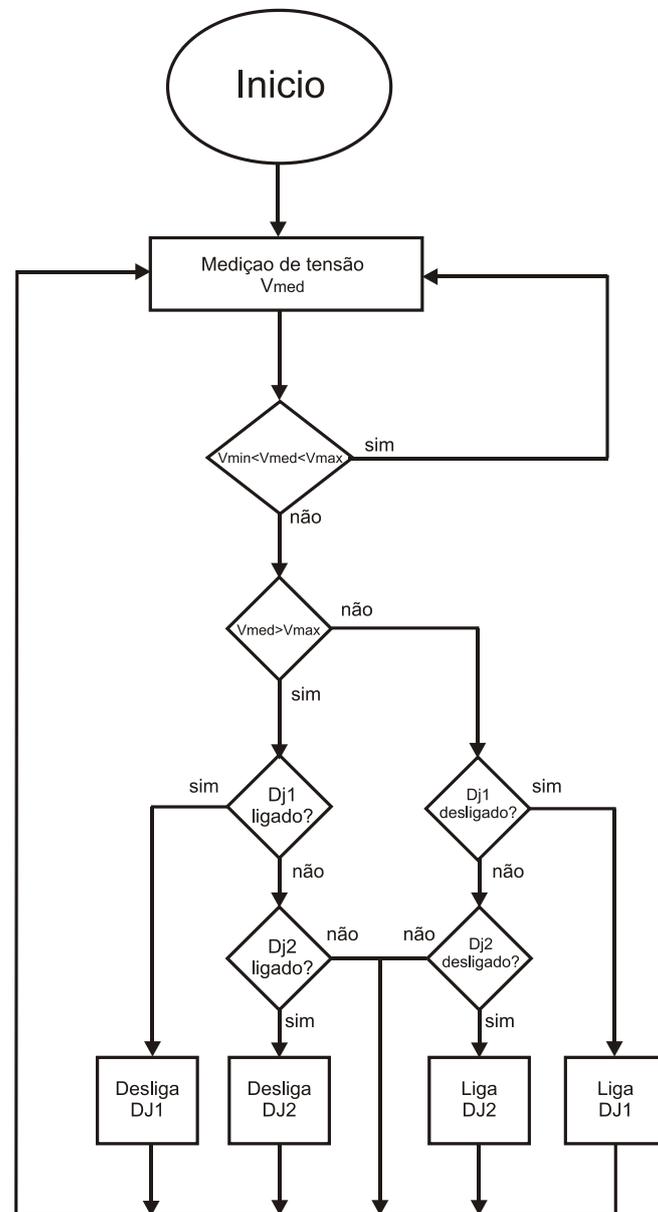


Figura 3.26 – Sistema de controle por nível de tensão.

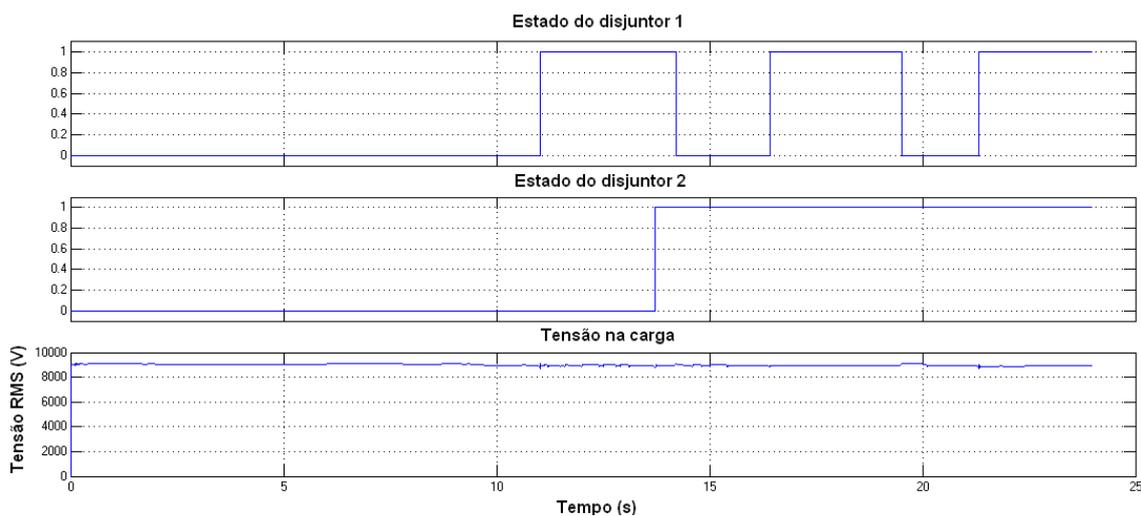


Figura 3.27 – Tensão na carga e estado dos disjuntores.

Nos sistemas de distribuição a utilização de bancos de capacitores para compensar o fluxo de reativo normalmente ocorre quando existe um equipamento responsável pela regulação da tensão, como por exemplo, um regulador de tensão ou transformador com comutador de *tap* sob carga. Porém, esses casos são pouco frequentes devido ao alto custo do equipamento. Observe que a utilização dos bancos de capacitores com controle por tensão melhorou o perfil da tensão e a manteve dentro da faixa permitida definida pela regulamentação da ANEEL. No entanto, as perdas observadas foram as maiores dentre todos os dispositivos simulados, ou seja, esta configuração entre as analisadas é a menos indicada quando o objetivo é reduzir as perdas.

Sob o ponto de vista operacional e regulatório é mais importante para as empresas distribuidoras manter o nível de tensão dentro dos limites estabelecidos pelos instrumentos normativos, do que focar na redução de perdas, pois violar os limites de tensão gera penalidades e pode provocar danos aos equipamentos próprios e dos clientes, além de poder reduzir a vida útil dos elementos isolantes do sistema.

O instrumento normativo, denominado “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST)”, no seu módulo 8, que trata da qualidade da energia elétrica, determina, na seção 8.1 (Qualidade do Produto) item 2.5.2.3 alínea “a”, que: “A tensão a ser contratada nos pontos de conexão pelos acessantes atendidos em tensão nominal de operação superior a 1 kV deve situar-se entre 95% e 105% da tensão nominal de operação do sistema no ponto de conexão e, ainda, coincidir com a tensão nominal de um dos terminais de derivação previamente exigido ou recomendado para o transformador da unidade consumidora”.

A seguir será realizada uma análise do desempenho de uma solução alternativa para controle da tensão e redução das perdas, composta por um banco de capacitores chaveado e o compensador proposto (caso 2). Também será realizada uma comparação do desempenho do compensador do caso 2 com o desempenho da solução convencional que utiliza apenas bancos de capacitores chaveados (caso 1). A Figura 3.28 mostra os diagramas esquemáticos de ambos os casos. A única diferença entre eles é a substituição de um banco de capacitores chaveado por um compensador. Vale enfatizar que os bancos de capacitores utilizados em ambos os casos possuem as mesmas características e o sistema elétrico simulado é o mesmo, porém houve um aumento na carga simulando sazonalidades, uma característica muito comum em regiões de veraneio ou com forte presença agroindustrial.

O aumento na carga levou o alimentador a uma condição de sobrecarga, que elevou as perdas e prejudicou a regulação. É interessante observar que esta condição atualmente tornou-se frequente devido principalmente à rápida expansão da carga e ao baixo nível de investimento no sistema.

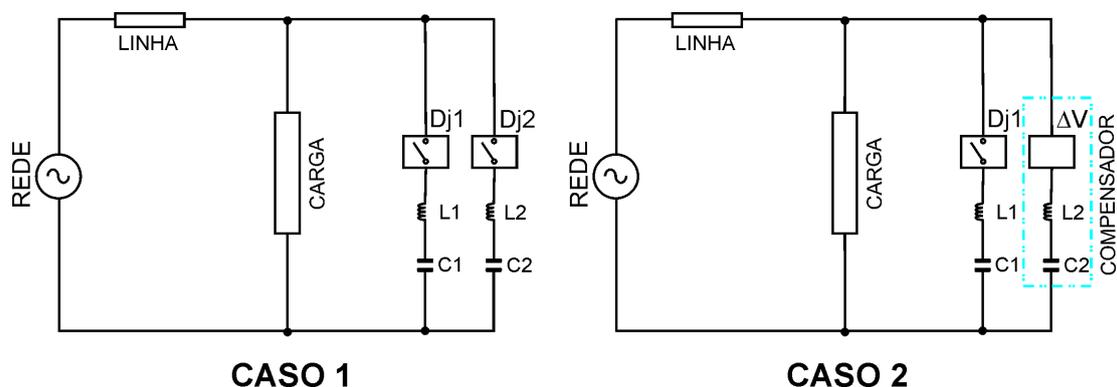


Figura 3.28 – Circuitos para a comparação de desempenho dos casos 1 e 2.

Para as simulações é necessário definir alguns parâmetros do sistema. A tensão nominal escolhida para a rede é 9.500 V e os *taps* disponíveis nos transformadores da carga são 9.500 V, 9.100 V e 8.700 V. Devido à elevada queda de tensão na linha, foi selecionado o *tap* 8.700 V. Assim, a tensão na carga pode variar entre 8.265 V e 9.135 V sem violar os limites legais. Para prover uma margem de segurança, o controle dos bancos por tensão foi ajustado para atuar quando a tensão no barramento for inferior a 8.400 V ou superior a 9.100 V. Os dois bancos de capacitores possuem potências nominais diferentes: o primeiro tem uma potência equivalente a 2,4 Mvar e o segundo 1,2 Mvar. Estes valores foram selecionados por serem padronizados e muito usuais. Já o

perfil de carga é o mesmo das simulações anteriores e o tempo de simulação foi ampliado para 52 segundos com o objetivo de observar um padrão característico e eliminar a influência das condições iniciais do sistema. A Figura 3.29 mostra os resultados da simulação para o caso convencional e a Figura 3.30 mostra os resultados para a solução proposta. Observe que os resultados obtidos pela solução proposta em relação ao perfil de tensão são melhores que os da solução convencional. A linha verde no gráfico de tensão determina o limite inferior definido para o sistema de controle e a linha vermelha o limite regulatório. Note que no caso da solução convencional o limite inferior foi violado inúmeras vezes e que em vários momentos a tensão nos terminais da carga ficou abaixo do limite regulatório. Já no caso da solução proposta houve menos violações do limite inferior e a tensão ficou pouco tempo abaixo do limite regulatório, portanto, caracterizando uma solução melhor que a convencional.

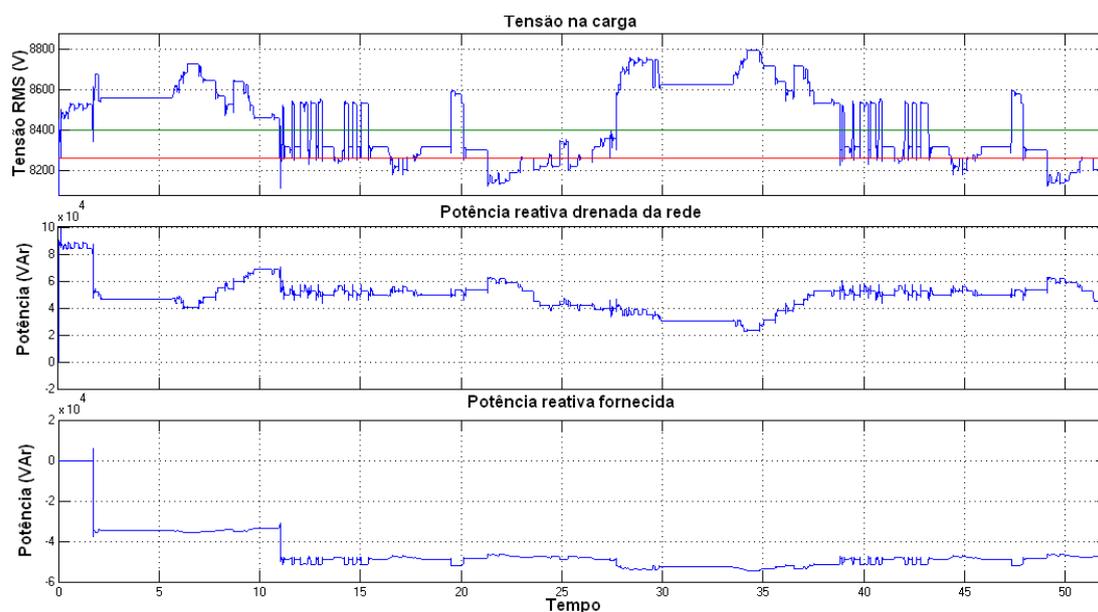


Figura 3.29 – Desempenho da solução convencional (caso 1).

É interessante notar que apesar da quantidade de potência reativa nominal ser a mesma em ambos os casos, a quantidade de energia reativa fornecida à carga foi maior no caso 2. Isso ocorreu porque a energia reativa em um capacitor depende da tensão em seus terminais. Assim, no caso 2 a tensão na carga no momento da energização do banco de capacitores C1 era maior do que no caso 1. Isso resultou num degrau de tensão maior, que ocorre toda vez que o banco 1 for energizado.

A Tabela 3.5 mostra um comparativo das perdas em ambos os casos. Nota-se uma redução de 4,09 pontos percentuais nas perdas do caso 2 em relação ao caso 1, resultando numa economia de R\$ 463.400,48 no período de um ano.

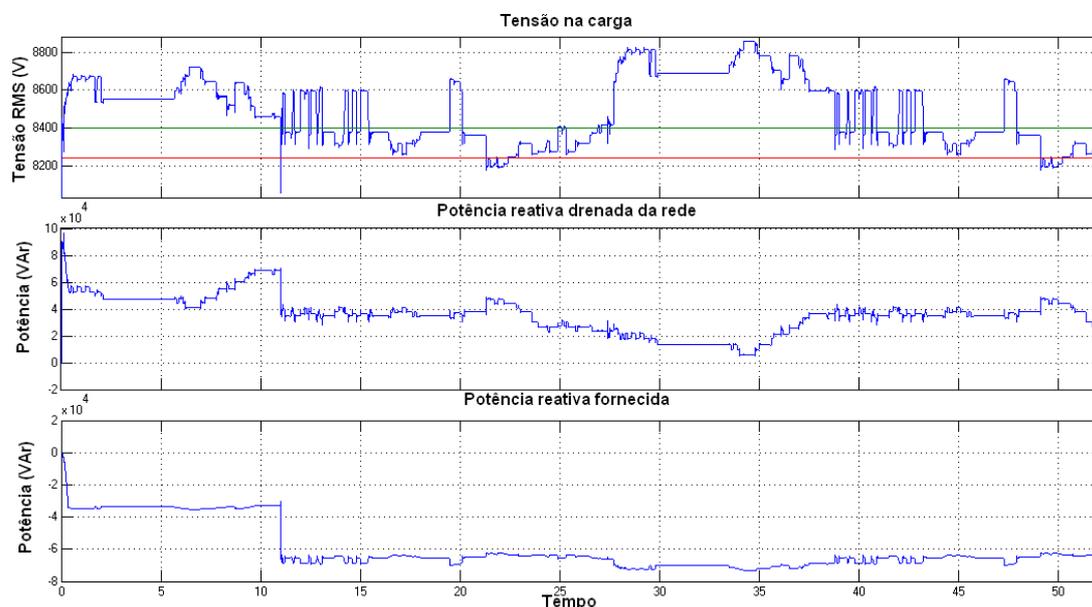


Figura 3.30 – Desempenho da solução alternativa (caso 2).

Tabela 3.5 – Comparativo entre as perdas (kWh) dos casos 1 e 2.

	Banco Chaveado (ΔV)	Banco + Compensador
Energia na carga	4.694,64	4.864,82
Energia no compensador	0,00	18,77
Energia absorvida da rede	5.539,98	5.560,99
Perdas	845,33	677,40
Perdas %	18,01%	13,92%
Energia na carga (real)	288.584,86	299.045,68
Energia no compensador (real)	0,00	1.153,73
Energia absorvida da rede (real)	340.548,38	341.839,94
Custo das perdas (diário)	R\$ 7.194,95	R\$ 5.925,36
Custo das perdas (anual)	R\$ 2.626.156,37	R\$ 2.162.755,89

Até agora foram analisadas as perdas a montante do ponto de instalação dos equipamentos para compensação de reativo. No entanto cerca de 50% das perdas nos sistemas de distribuição encontram-se a jusante, notadamente nos transformadores de distribuição e na rede secundária. Como a redução das perdas a montante é consequência da redução da corrente drenada da fonte, é razoável inferir que os

equipamentos para compensação de reativo não teriam influência sobre as perdas a jusante. Mas uma análise mais cuidadosa mostra que a maior parte dessas perdas está concentrada nos transformadores, onde as perdas estão divididas em duas parcelas principais, perdas no ferro e no cobre.

As perdas no ferro variam com a tensão, assim um controle mais apurado do nível de tensão sobre a carga, mantendo-a a mais baixa possível sem violar os limites legais traria uma redução dessas perdas, principalmente na condição de carga leve, quando a tensão sobre a carga tende a ser mais elevada e as perdas no ferro tornam-se mais relevantes. As perdas no ferro são divididas em duas parcelas: uma referente às perdas por correntes parasitas e outra referente às perdas por histerese, que podem ser calculadas pelas seguintes equações:

$$W_p = P_p \left(\rho \cdot \frac{f}{50} \cdot \frac{B_M}{10000} \right)^2, \quad (3.33)$$

$$W_h = P_h \cdot \frac{f}{50} \left(\frac{B_M}{10000} \right)^2, \quad (3.32)$$

em que:

W_p – Perdas por correntes parasitas;

W_h – Perdas por histerese;

ρ – Resistividade do material das lâminas;

B_M – Valor máximo da indução magnética das lâminas;

P_p – Coeficiente que depende do material das lâminas;

P_h – Coeficiente que depende do material das lâminas;

f – Frequência da variação do fluxo magnético no núcleo.

Como:

$$B_M = \frac{\theta_M}{S},$$

$$\theta_M = 10^8 \frac{V_1}{4,44 \cdot f \cdot N_1}. \quad (3.34)$$

tem-se

$$W_{Fe} = W_h + W_p$$

$$W_{Fe} = \left(\frac{B_M}{10000} \right)^2 \cdot \left[P_p \left(\rho \cdot \frac{f}{50} \right)^2 + P_h \cdot \frac{f}{50} \right],$$

$$W_{Fe} = \left(\frac{10^4 \cdot V_1}{4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot S} \right)^2 \cdot \left[P_p \left(\rho \cdot \frac{f}{50} \right)^2 + P_h \cdot \frac{f}{50} \right], \quad (3.35)$$

em que,

W_{Fe} – Perdas totais no ferro;

θ_M – Valor máximo do fluxo magnético nas lâminas;

S – Secção transversal do núcleo;

V_1 – Tensão nos terminais do enrolamento primário.

N_1 – Número de espiras do enrolamento primário;

Analisando a equação (3.35), conclui-se que em um transformador as perdas totais no ferro variam com o quadrado da tensão aplicada ao enrolamento primário, ou seja, aquele ligado a fonte, já que todos os outros parâmetros são constantes e dependem da conformação do núcleo ou do material do qual ele é construído. Assim, considerando-se os limites de tensão permitidos pela regulamentação, as perdas no ferro podem variar de -9,75% a +10,25% em relação às perdas na tensão nominal. Desta forma, manter a tensão igual ou menor que a tensão do *tap* selecionado dos transformadores elimina perdas desnecessárias. Entretanto, é muito frequente que o sistema opere próximo ao limite de tensão superior, devido principalmente à necessidade de manter o nível de tensão adequado aos clientes que se localizam no final dos ramais. Além disso, o uso de bancos de capacitores chaveados não possibilita um controle de tensão preciso, pois como visto na Figura 1.7 o acoplamento de um banco de capacitores chaveado ao sistema provoca um degrau de tensão sem a possibilidade de se estabelecer valores intermediários.

Como as perdas no ferro são independentes da carga, tornam-se mais significativas na condição de carga leve, quando a tensão do sistema atinge seu nível mais elevado e o fluxo de reativo seu nível mais baixo. Nestas condições pode ser mais vantajoso controlar o nível da tensão. Por outro lado, é imperativo atender aos limites regulatórios. Assim, caso haja iminência de violação dos limites de tensão, o controle por nível de tensão deve ser adotado independentemente do fluxo de reativo. Com o intuito de agregar esta característica, o sistema de controle do dispositivo proposto mostrado na Figura 3.5, foi modificado e o novo controle pode operar tanto no controle do fluxo de reativo como no controle da tensão, bastando apenas selecionar o modo de operação. A Figura 3.31 mostra o fluxograma do sistema de controle modificado, a Figura 3.32 mostra o resultado da simulação do mesmo sistema utilizado anteriormente e as Tabelas 3.6 e 3.7 mostram o sumário das variáveis de entrada do controle e o resultado da

análise das perdas, respectivamente. Observe que o resultado das perdas não foi melhor do que o obtido com o uso do compensador ajustado para o controle do fluxo de reativo.

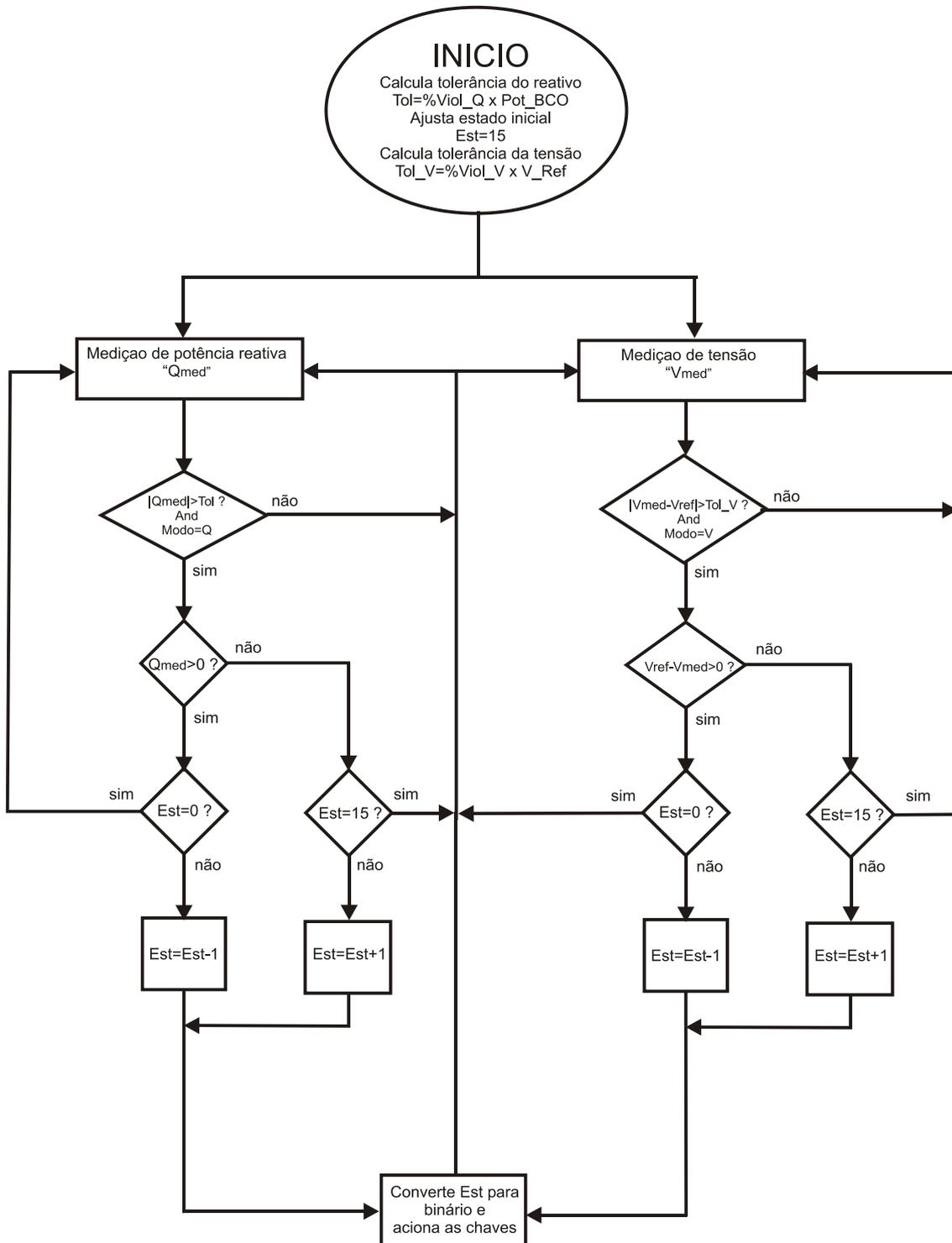


Figura 3.31 – Sistema de controle modificado com controle por tensão.

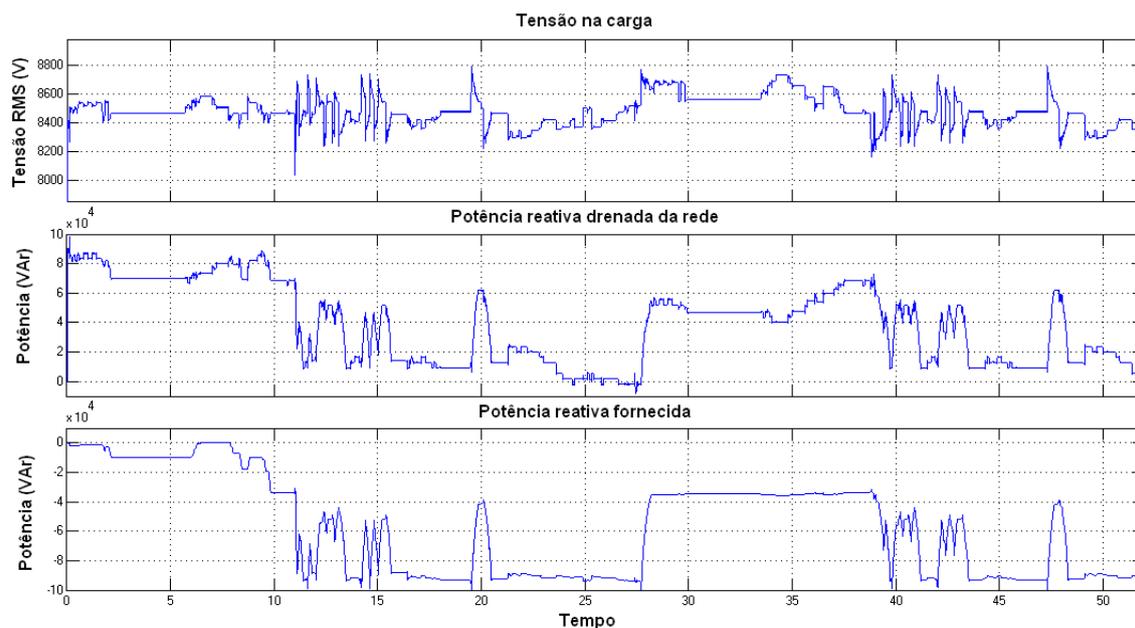


Figura 3.32 – Desempenho do controle por tensão.

Tabela 3.6 – Sumário de entradas do controle com dois modos de operação.

Entrada	Descrição
% Viol_V	Percentual de variação da tensão sem atuação do controle.
V_Ref	Tensão de referência.
Vmed	Tensão medida no barramento da carga.
Qmed	Potência reativa medida na rede
Pot_BCO	Potência do banco de capacitores associado ao dispositivo.
% Viol_Q	Percentual de variação da potência reativa em relação a potência do banco sem atuação do controle.
Modo	Modo de operação (V- Tensão, Q- Fluxo de reativo).

No entanto é possível melhorar o desempenho incorporando ao controle um modo de operação automático, ou seja, enquanto a tensão estiver dentro dos limites definidos o controle atuará compensando o fluxo de reativo. Porém, caso qualquer limite de tensão seja violado, o controle passa a atuar controlando a tensão, até que esta retorne à faixa desejável. A Figura 3.35 mostra o fluxograma do sistema de controle com o modo de operação automático e a Tabela 3.8 mostra o sumário das três variáveis de entradas acrescentadas para o modo de operação automático. As entradas “Vmin” e “Vmax”

definem as tensões abaixo ou acima da qual o controle deve operar no modo de controle por nível de tensão.

Tabela 3.7 – Perdas (kWh) para o compensador com controle por tensão.

	Compensador (ΔV) + Banco (ΔV)
Energia na carga	4814,00
Energia no compensador	15,17
Energia absorvida da rede	5631,27
Perdas	802,10
Perdas %	16,66%
Energia na carga (real)	295921,89
Energia no compensador (real)	932,52
Energia absorvida da rede (real)	346160,38
Custo das perdas (diário)	R\$ 6.956,10
Custo das perdas (anual)	R\$ 2.538.975,92

Tabela 3.8 - Sumário de entradas do controle com modo automático.

Entrada	Descrição
% Viol_V	Percentual de variação da tensão sem atuação do controle.
V_Ref	Tensão de referência.
Vmed	Tensão medida no barramento da carga.
Qmed	Potência reativa medida na rede
Pot_BCO	Potência do banco de capacitores associado ao dispositivo.
% Viol_Q	Percentual de variação da potência reativa em relação à potência do banco sem atuação do controle.
Vmin	Limite de tensão inferior para o modo de operação automático.
Vmax	Limite de tensão superior para o modo de operação automático.
Hister	Histerese para retorno ao modo de operação por fluxo de potência reativa.

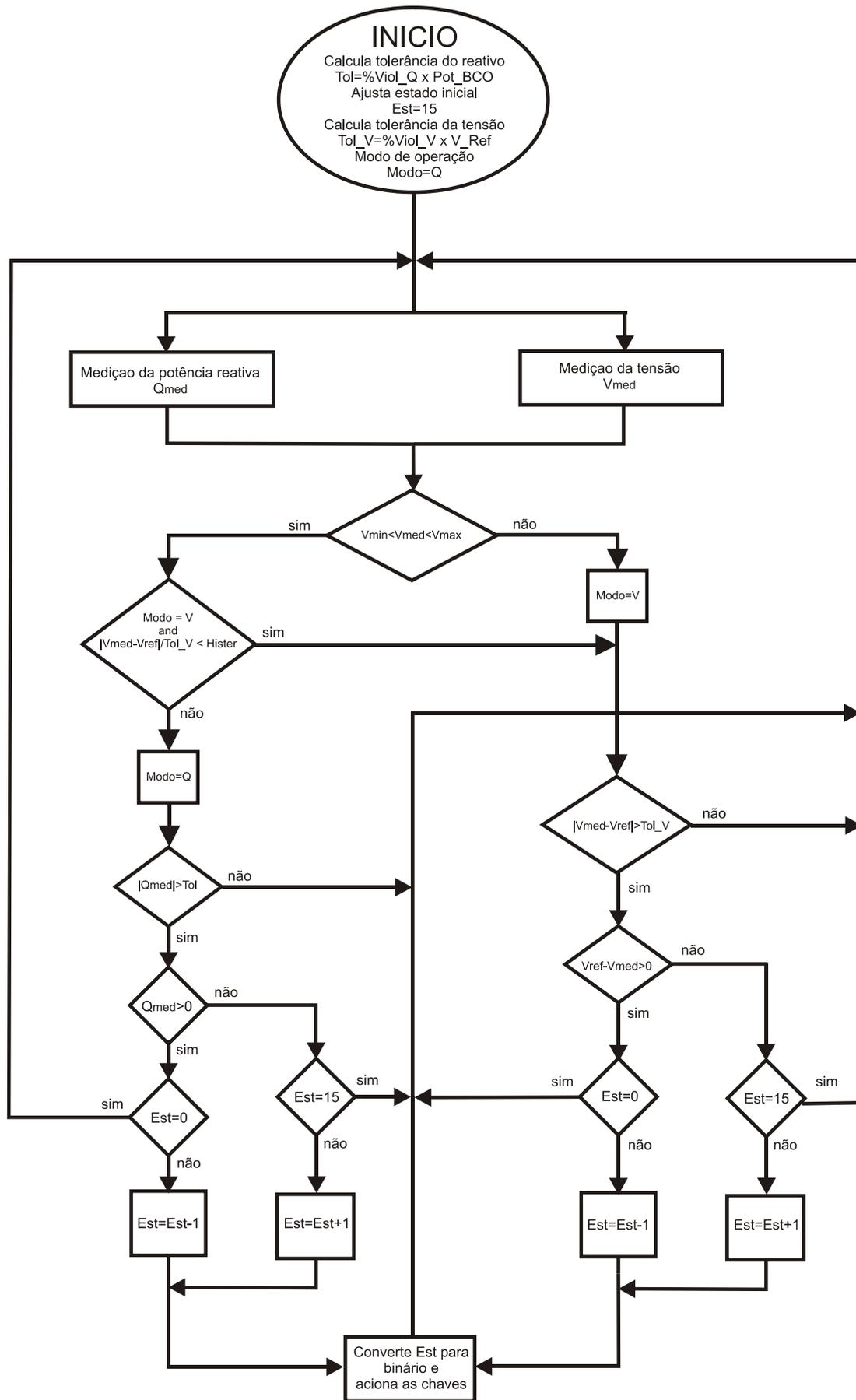


Figura 3.33 – Sistema de controle com modo de operação automático.

Caso a tensão se encontre dentro da faixa, o sistema atuará controlando o fluxo de potência reativa. A passagem do modo de fluxo de potência reativa para o modo controle por nível de tensão é imediata. No entanto para retornar ao modo de controle por fluxo de potência reativa é necessário que a tensão se aproxime da tensão de referência por um valor percentual da tensão de referência definido na entrada “Hister”. Esta característica tem por objetivo evitar que ocorra uma oscilação entre os modos de operação, ou seja, o sistema alternar entre os dois modos de controle devido a uma condição limítrofe da tensão. Cabe salientar que o nível de compensação da tensão depende da potência de curto-circuito no local de instalação do compensador e é diferente do nível de compensação do fluxo de potência reativa.

Para avaliar o desempenho do compensador com o modo de operação automático foi realizada uma simulação com duração de 24 segundos, cujos resultados são mostrados na Figura 3.34.

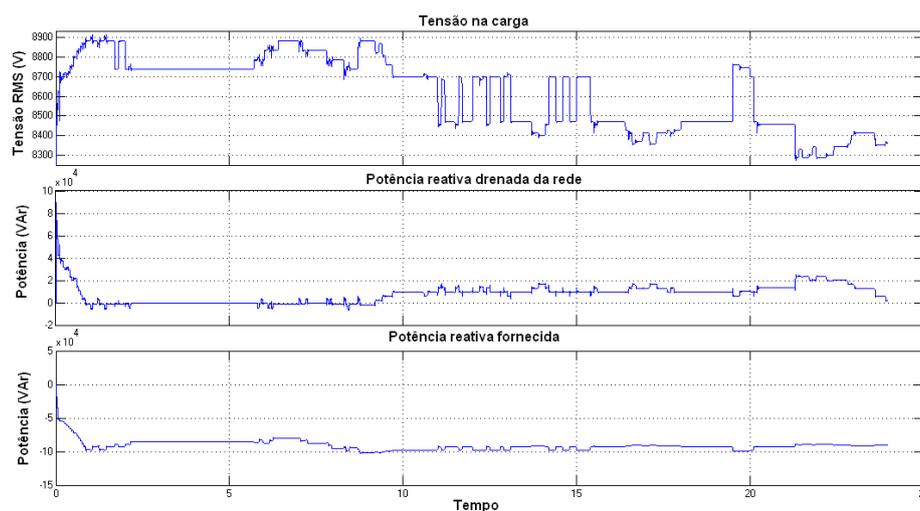


Figura 3.34 – Desempenho do controle no modo de operação automático.

O resultado da análise de perdas é mostrado na Tabela 3.9. Neste momento é interessante fazer uma comparação da análise de perdas e violação dos limites de tensão de todos os casos já vistos. A Tabela 3.10 sumariza cada caso. Conclui-se que o modo de operação automático e o controle por potência reativa possuem o mesmo desempenho. Entretanto, haverá uma diferença significativa quando o sistema operar em carga leve, pois a tensão no barramento estará acima da tensão nominal. No entanto, pode haver potência reativa a ser compensada, fazendo com que o controle por fluxo de reativo injete potência reativa no sistema aumentando ainda mais o nível da tensão na

barra, podendo levar a uma violação do limite regulatório. Isso não ocorre com o modo de operação automático, pois quando o nível da tensão atingir o limite máximo definido, o controle passa a operar por nível de tensão e evita que o limite seja violado. Não foram considerados os custos associados as penalidades regulatórias decorrentes das violações de tensão, pois o cálculo destas não é simples e é descrito em detalhes no PRODIST, módulo 8 seção 8.1. Outros aspectos, tais como, flutuação de tensões e variação de tensão de curta duração, também resultam em penalidades regulatórias. Além das multas regulatórias as distribuidoras também devem pagar uma compensação aos clientes afetados, diretamente em suas contas de energia até ocorrer a regularização das não conformidades regulatórias detectadas.

Considere o perfil de carga mostrado na Figura 3.35, que foi obtido de um alimentador localizado em uma região litorânea fortemente afetada pela sazonalidade. Observe a queda na carga devido ao término do período de veraneio. Utilizando o mesmo percentual de variação de carga observado em nosso modelo e simulando o período de carga leve com controle em modo automático obtêm-se os resultados mostrados na Figura 3.36. Note que em vários intervalos de simulação o limite máximo legal de 9.135V, definido anteriormente, é violado.

Operando no modo de controle por tensão, no entanto, em vários momentos não foi possível diminuir o nível da tensão sobre a carga, pois o compensador já operava em sua potência reativa mínima. Neste caso, nada pode ser feito para evitar que o limite de tensão seja ultrapassado. Por outro lado, outra condição frequente onde a tensão no barramento da carga também pode se tornar muito elevada ocorre quando há um excesso de reativo capacitivo na carga ou na linha. O excesso de reativo capacitivo na carga ocorre principalmente quando existe uma presença de grandes clientes comerciais e industriais que possuem compensação própria de reativo, em concordância com a regulamentação da ANEEL denominada PRODIST (ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2010) no seu módulo 8, que trata da qualidade da energia elétrica, seção 8.1 (Qualidade do Produto) item 3.2.1 que determina: “Para unidade consumidora ou conexão entre distribuidoras com tensão inferior a 230 kV, o fator de potência no ponto de conexão deve estar compreendido entre 0,92 e 1,00 indutivo ou 1,00 e 0,92 capacitivo, de acordo com regulamentação vigente”. Já o excesso de reativo capacitivo na linha ocorre quando esta conecta-se a um barramento comum a montante, que utiliza bancos de capacitores para prover um nível de tensão adequado aos clientes localizados no final de ramais, ou quando outro conjunto de cargas ligado ao

barramento comum torna-se capacitivo. É importante observar que o limite legal para o fator de potência é 0,92. No entanto, há inúmeros casos registrados na literatura onde o fator de potência encontrado em linhas de distribuição pode chegar a 0,3 e as perdas a 50%, conforme relatado em (GUIMARÃES, COURA, *et al.*, 2012), principalmente em áreas rurais com grande extensão territorial. Nestes casos, torna-se necessária uma fonte de potência reativa indutiva durante alguns períodos, que podem ser de horas ou dias, a depender do caso.

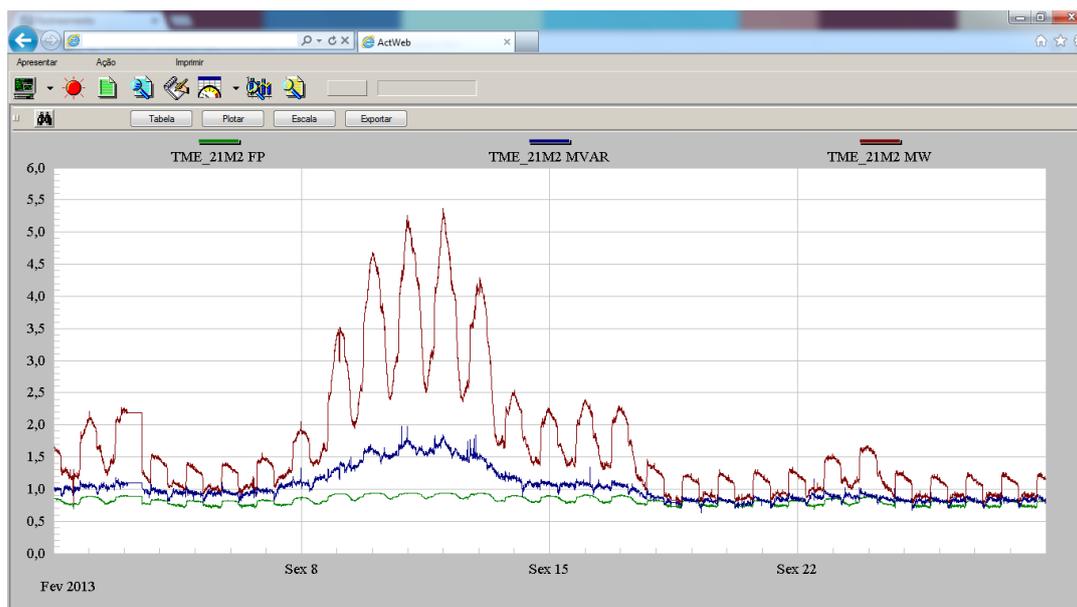


Figura 3.35– Perfil de carga de alimentador na região litorânea: fator de potência (verde), potência reativa (azul) e potência ativa (vermelho).

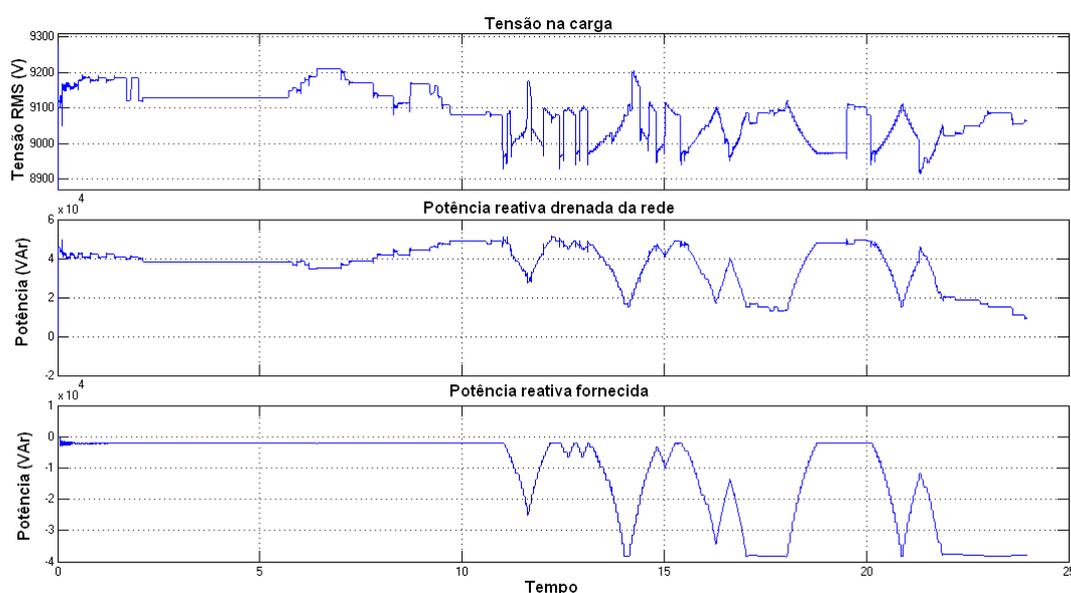


Figura 3.36 – Compensador no modo de operação automático e carga e leve.

Tabela 3.9 – Análise de perdas com o controle em modo automático.

	Controle automático
Energia na carga	2.258,00
Energia no compensador	8,57
Energia absorvida da rede	2.568,27
Perdas	301,70
Perdas %	13,36%
Energia na carga (real)	138.801,75
Energia no compensador (real)	526,93
Energia absorvida da rede (real)	157.874,51
Custo das perdas (diario)	R\$ 2.640,84
Custo das perdas (anual)	R\$ 963.908,06

Tabela 3.10 – Comparativo entre os esquemas de compensação.

	Sem compensação	Banco fixo	Banco chaveado	Comp. (ΔV) + Banco (ΔV)	Comp. (ΔQ) + Banco (ΔV)	Controle automático
Energia na carga	2.080,00	2.153,00	2.174,00	2.236,00	2.258,00	2.258,00
Energia no compensador	0,00	0,00	0,00	7,57	8,57	8,57
Energia absorvida da rede	2.646,00	2.564,70	2.553,30	2.557,17	2.568,27	2.568,27
Perdas	566,00	411,70	379,30	313,60	301,70	301,70
Perdas %	27,21%	19,12%	17,45%	14,03%	13,36%	13,36%
Energia na carga (real)	127.859,89	132.347,29	133.638,18	137.449,39	138.801,75	138.801,75
Energia no compensador (real)	0,00	0,00	0,00	465,09	526,93	526,93
Energia absorvida da rede (real)	162.652,54	157.654,94	156.954,17	157.191,82	157.874,51	157.874,51
Custo das perdas (diário)	R\$ 4.817,44	R\$ 3.504,14	R\$ 3.228,37	R\$ 2.733,57	R\$ 2.640,84	R\$ 2.640,84
Custo das perdas (anual)	R\$1.758.366,73	R\$1.279.009,86	R\$1.178.354,24	R\$997.751,96	R\$963.908,06	R\$963.908,06
Perdas recuperadas (anual)	R\$ 0,00	R\$ 479.356,87	R\$ 580.012,49	R\$760.614,77	R\$794.458,67	R\$794.458,67
Violação do limite de tensão	SIM	SIM	SIM	NÃO	NÃO	NÃO

3.3 Análise do comportamento do banco de capacitores ajustável com cargas não lineares

Nesta seção será analisado o comportamento do banco de capacitores ajustável atuando em um sistema onde existem cargas não lineares. Foram realizadas quatro simulações utilizando-se o modelo numérico mostrado na Figura 3.24 e o sistema de controle mostrado na Figura 3.5, na primeira simulação não há qualquer tipo de compensação de potência reativa, na segunda é acoplado um banco de capacitores

ajustável, em ambos os casos as cargas são lineares, na terceira simulação o sistema não terá compensação de reativos, porém neste caso a carga será não linear com uma distorção harmônica total (DHT) de 45,57%, onde há uma predominância de harmônicos pares e uma componente de corrente contínua, finalmente na quarta simulação será acoplado um banco de capacitores ajustável ao mesmo sistema da terceira simulação. A Figura 3.37 mostra o resultado da primeira simulação com o sistema com cargas lineares e sem compensação de potência reativa. A Figura 3.38 mostra o resultado da segunda simulação, observe que a potência reativa drenada da rede foi reduzida, mostrando a eficácia do compensador.

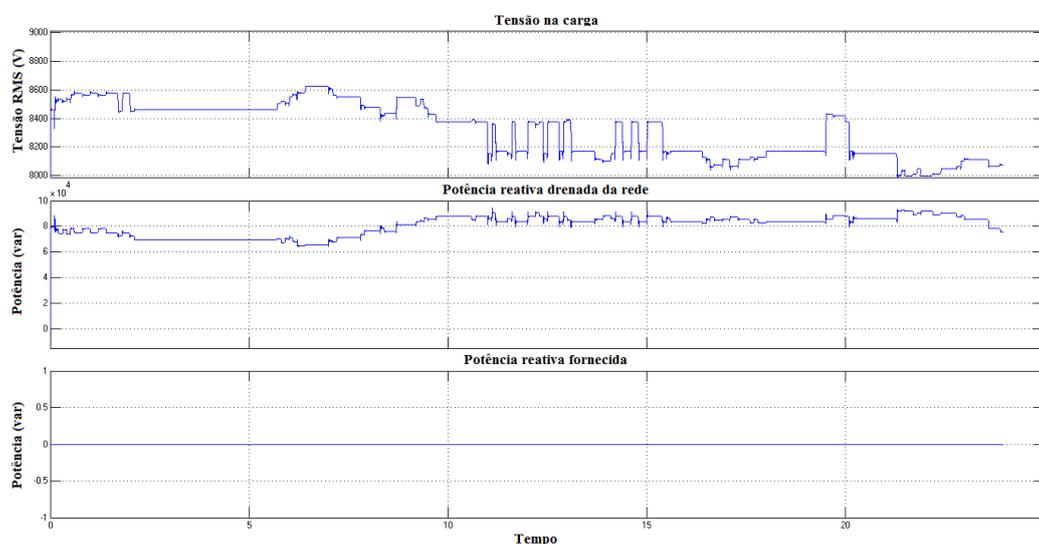


Figura 3.37 - Resultado da simulação com carga linear e sem compensador.

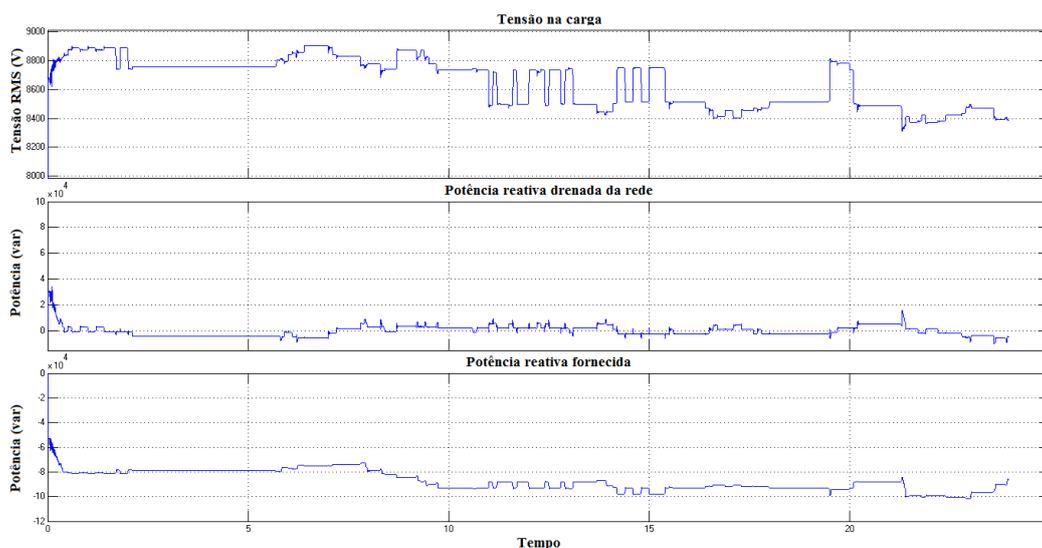


Figura 3.38 - Resultado da simulação com carga linear e compensador.

A Figura 3.39 mostra a forma de onda da corrente drenada pela carga para o caso não linear, e a Figura 3.40 mostra o resultado da simulação com carga não linear e sem compensador.

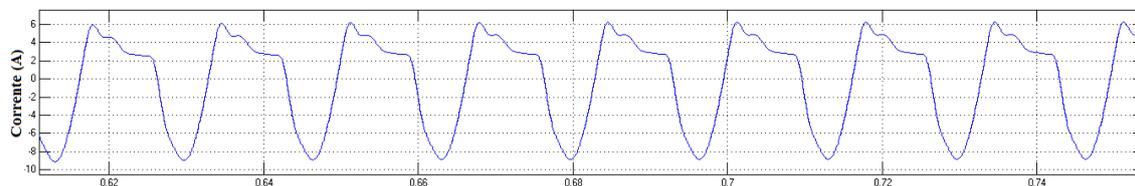


Figura 3.39 - Forma de onda da corrente drenada pela carga não linear.

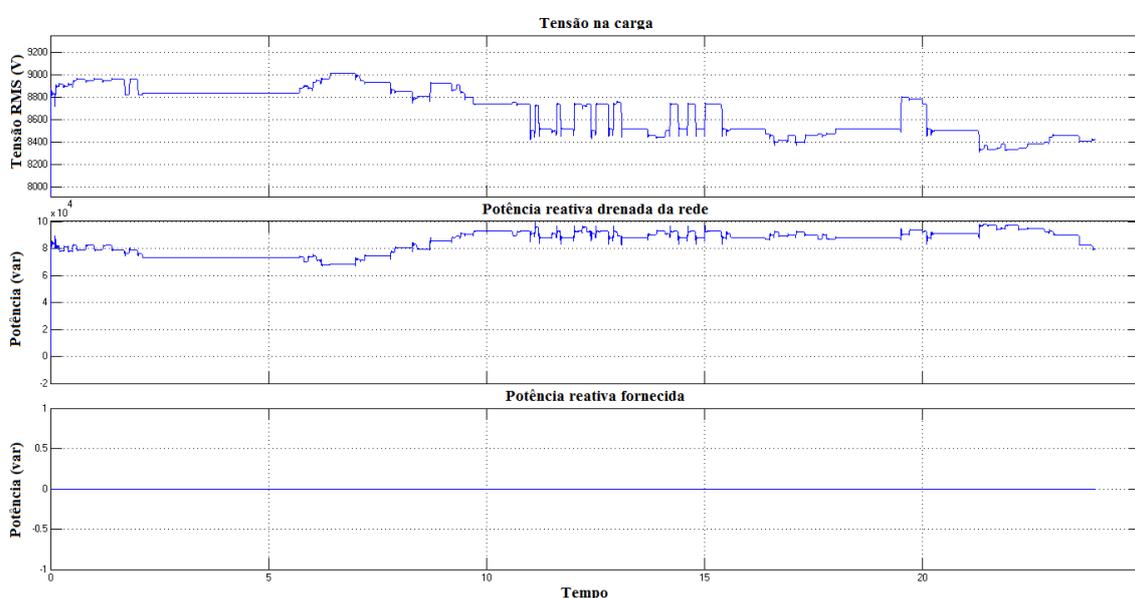


Figura 3.40 - Resultado da simulação com carga não linear e sem compensação.

A Figura 3.41 mostra o resultado da simulação com uma carga não linear e com o compensador, é possível observar que a compensação de potência reativa foi tão eficaz como no caso com a carga linear. Este resultado se deve ao fator de que a medida da potência reativa que é utilizada pelo sistema de controle, está sendo obtida utilizando-se um método de cálculo eficaz verdadeiro que não é afetado pela forma de onda. É importante resaltar que o banco de capacitores ajustável não atua como filtro e não tem a capacidade de reduzir a DHT do sistema. A Tabela 3.11 mostra um sumário dos resultados obtidos em relação a redução de perdas com e sem compensador e com e sem carga não linear.

Analisando a Tabela 3.11, observa-se que a redução das perdas com a utilização do banco de capacitores ajustável não foi afetada pelo grau de não linearidade da carga

e na verdade apresentou um percentual de redução de perdas um pouco maior que no caso com a carga linear.

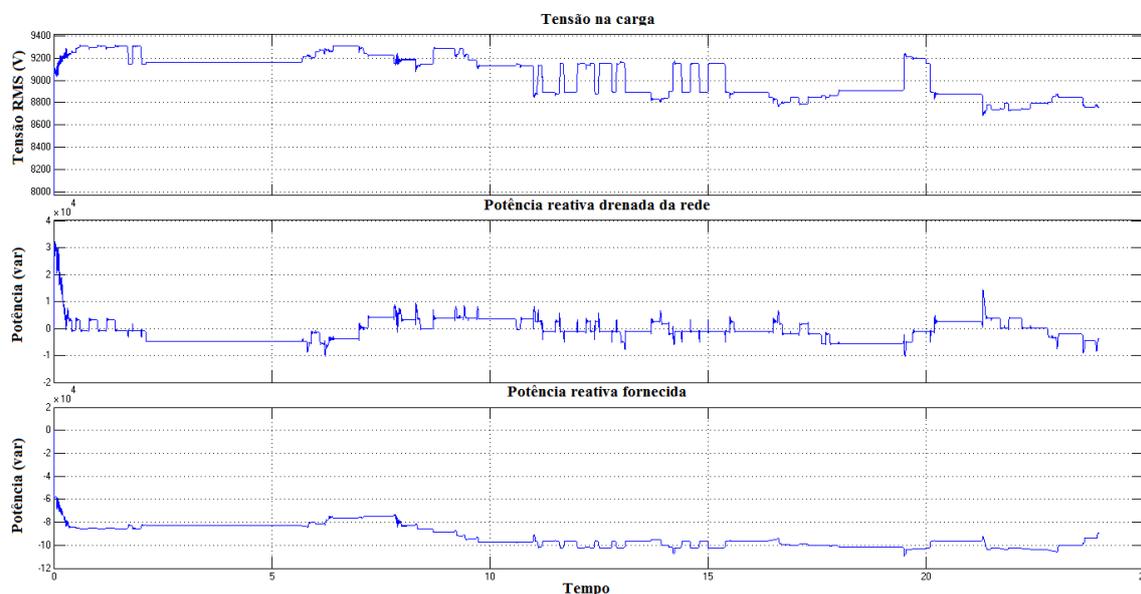


Figura 3.41 - Resultado da simulação com carga não linear e com compensação.

Tabela 3.11 - Perdas com cargas linear e não linear.

	Carga linear		Carga não linear	
	Sem Compensador	Com Compensador	Sem Compensador	Com Compensador
Energia na carga	2.097	2.264	1.411	1.528
Energia no compensador	0	6,397	0	6,93
Energia absorvida da rede	2.599,2	2.567,197	1762,8	1.665,03
Perdas	502,2	296,8	351,8	130,1
Perdas %	23,95%	13,11%	24,93%	8,51%

3.4 Considerações sobre a utilização do banco de capacitores ajustável em sistemas trifásicos

Todas as simulações e resultados obtidos até este ponto são referentes a sistemas monofásicos. De fato o comportamento observado nas simulações e os resultados obtidos podem ser extrapolados para o sistema trifásico. No entanto, algumas considerações relevantes devem ser feitas.

- A topologia mostrada na Figura 3.1 atua simultaneamente nas três fases e apresenta a vantagem de economizar uma chave bidirecional para cada transformador de decremento, isto se reflete como uma redução do custo do dispositivo. No entanto, o dispositivo não pode compensar individualmente a potência reativa drenada em cada fase. Se o fluxo de energia reativa for diferente em cada fase, ou seja, desequilibrado pode haver também um desequilíbrio nas tensões. Neste caso, o sistema de controle irá compensar o fluxo de reativo total o que pode acarretar num aumento deste desequilíbrio. Porém, este problema pode ser mitigado utilizando-se um compensador monofásico para cada fase. Assim, é possível compensar do fluxo de reativo por fase e minimizar o desequilíbrio das tensões.
- Considere que ocorreu um dano, ou a queima de um elo fusível interno ou uma grande variação nos parâmetro de uma célula capacitiva de um banco, este tipo de fenômeno não é raro e pode ocasionar desequilíbrios nas tensões e comprometimento da capacidade de compensação. Nos sistemas convencionais que utilizam bancos de capacitores chaveados na configuração dupla estrela isolada (geralmente utilizada em subestações) como o mostrado na Figura 3.42, é instalado um transformador de corrente (TC) na ligação entre as duas estrelas, com o objetivo de fornecer um sinal de corrente a um relé de proteção de sobre-corrente instantânea, que desliga o banco, quando uma corrente maior que um valor previamente ajustado circula.

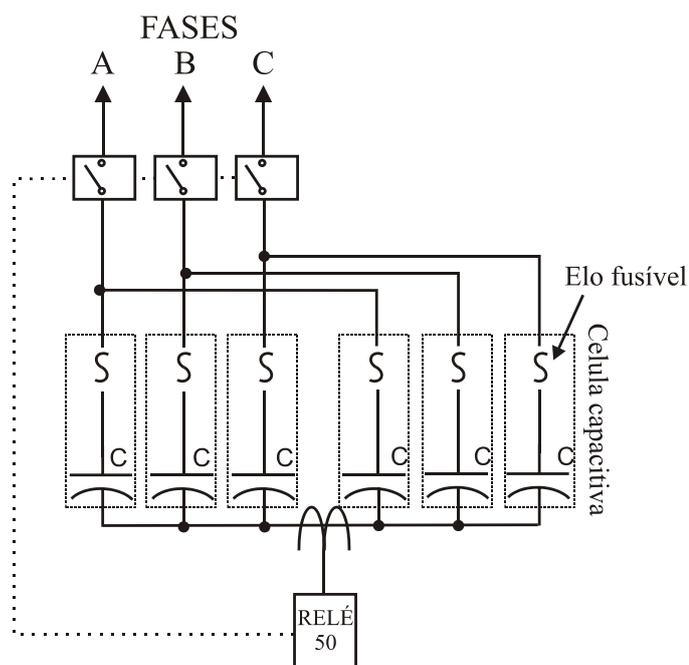


Figura 3.42 - Configuração dupla estrela isolada.

O objetivo desta proteção é evitar que um dano em um dos braços da estrela do banco de capacitores comprometa a integridade do restante do banco, e evitar o surgimento de desequilíbrio nas tensões do barramento. É importante salientar que não se trata de uma proteção contra curtos-circuitos, mas uma forma de evitar que o banco de capacitores trabalhe desequilibrado. Com utilização do banco de capacitores ajustável é possível fazer algo similar, simplesmente aplicado tensão zero nos terminais do banco de capacitores. Além disso, é possível estender esta proteção as outras configurações de bancos onde isto não seria possível.

- Outro aspecto a ser considerado é a mudança no faseamento das tensões sobre a carga, devido a uma compensação desequilibrada do fluxo de potência reativa. Este efeito normalmente é pouco significativo, e o desvio angular observado é de poucos graus, em virtude das características dos sistema de distribuição que geralmente utiliza uma configuração estrela aterrada. Isto garante uma influência mínima dos desequilíbrios das corrente no módulo e fase das tensões da rede. Outra característica significativa é que, as correntes desequilibradas normalmente possuem faseamento não simétrico, ou seja, com ângulos diferente de 120° entre cada fase. Nesta condição as quedas de tensão que surgem na linha de distribuição e nas impedâncias series até o ponto de conexão, irão alterar a fase das tensões nos terminais da carga. Como exemplo, considere o circuito mostrado na Figura 3.43, ele representa uma situação usual para um sistema de distribuição onde são representadas a rede, a linha de distribuição e a carga.

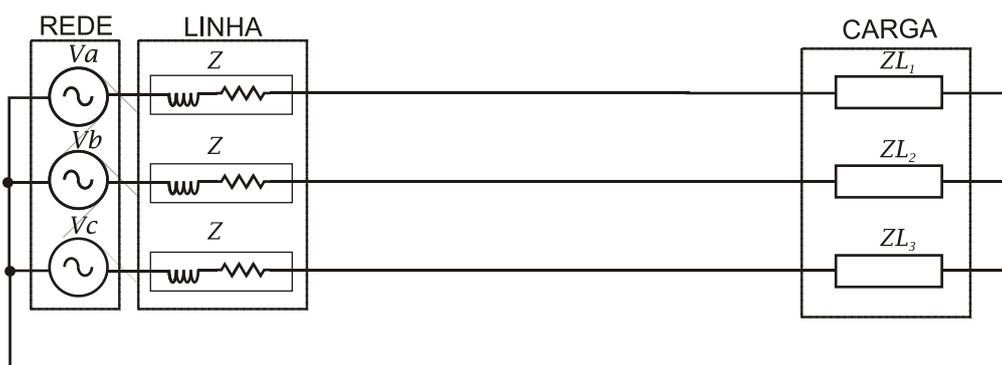


Figura 3.43 - Circuito exemplo para avaliação de desvio angular.

Utilizando os mesmos parâmetros de simulação mostrados na Figura 3.24 é possível simular o comportamento dos ângulos das fases das tensões na carga, quando a compensação de potência reativa de uma das fases falha e as outras fases continuam sendo compensadas normalmente. Está é uma situação desfavorável, que normalmente

não ocorre pois a proteção de desequilíbrio da dupla estrela descrita anteriormente irá atuar desligando todo o banco de capacitores. Entretanto, considere que proteção falhou, nesta condições ocorrerá o maior desvio angular possível para aquela fase, sem que haja a ocorrência de uma falta. A Figura 3.44 mostra a variação do faseamento com a mudança da carga. O valor do desvio angular médio observado foi de apenas $0,923^\circ$ e o valor máximo de $3,12^\circ$ o que não compromete o funcionamento da maioria das cargas. Cabe salienta que este é um caso que dificilmente ocorrerá, pois será necessária uma falha dupla no sistema.

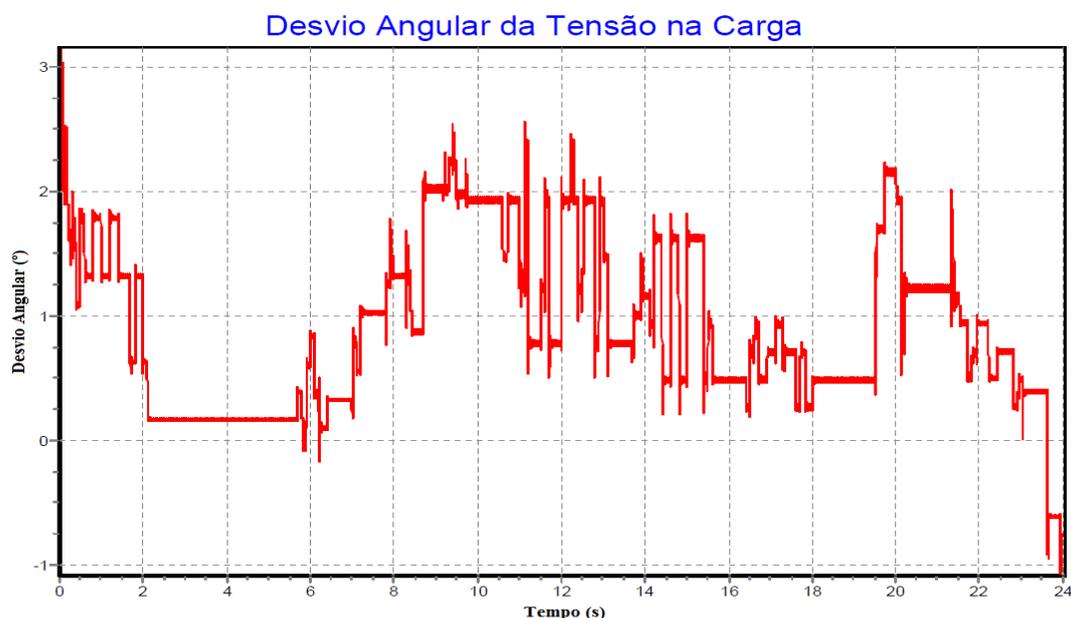


Figura 3.44 - Desvio angular da tensão na carga.

3.5 Conclusões

Neste capítulo foi apresentado um dispositivo denominado controlador de banco de capacitores ajustável, cujo objetivo era tornar um banco de capacitores fixo numa fonte de potência reativa com valor ajustável. Esta fonte de reativo pode ser utilizada para reduzir as perdas técnicas em sistemas de distribuição. Foram realizadas diversas simulações que indicam que objetivo foi alcançado. De fato, várias simulações mostraram uma redução significativa no percentual das perdas em relação as soluções convencionais normalmente utilizadas pelas distribuidoras. Além disso, o dispositivo proposto apresentou perdas muito baixas o que resultou em um rendimento elevado.

Outros aspectos interessantes são:

- Diferentemente de outros equipamentos a potência nominal do dispositivo proposto é de apenas $1/4$ da potência reativa do banco de capacitores que ele controla;
- O dispositivo proposto utiliza um controle discreto e pode ser projetado para prover tantos níveis de reativo quantos forem desejados sem aumentar muito o custo da solução;
- O dispositivo proposto pode utilizar qualquer tipo de chave disponível no mercado, com destaque para os tiristores. Isto lhe confere uma vantagem em relação a outras soluções mais sofisticadas, como por exemplo o UPFC, que demandam chaves totalmente controladas, que são mais caras;
- Devido a sua conformação, nenhuma das chaves utilizadas no dispositivo proposto precisa suportar simultaneamente a tensão da rede e a corrente da carga. Assim, utilizam-se chaves mais baratas;
- O dispositivo proposto pode fornecer apenas energia reativa capacitiva e não pode compensar sistemas onde há excesso da mesma;
- O dispositivo proposto pode também ser utilizado tanto para o controle do fluxo de potência reativa como para o controle da tensão no barramento onde ele está instalado, bastando apenas modificar a lógica de controle;
- O dispositivo proposto pode ser utilizado em conjunto com um sistema de compensação de reativos ou controle da tensão já existente, bastando para isso ajustar a lógica de controle, o que resulta em redução dos custos de instalação;
- O funcionamento do dispositivo proposto não é afetado pela presença de cargas não lineares, mas não possui a capacidade de reduzir os harmônicos existentes no sistema.

No capítulo 5 será mostrado um experimento desenvolvido para corroborar os dados obtidos neste capítulo e validar o modelo numérico.

4 Proposta de Dispositivos para Compensação de Potência Reativa e Controle da Tensão

Neste capítulo será apresentada a proposta de um compensador estático utilizando o dispositivo abordado no capítulo anterior. Na sequência é apresentado um compensador série cuja finalidade é compensar a impedância de uma linha de distribuição, melhorando a regulação e aumentando a capacidade de transmissão. Em seguida é apresentado um dispositivo que permite controlar, de modo desacoplado, o nível da tensão e a compensação de potência reativa, e finalmente é apresentado um dispositivo que injeta energia reativa sem a utilização de elementos armazenadores de energia, como capacitores e indutores. Este dispositivo tem como principais vantagens elevada robustez, vida útil e ausência de transitórios ou harmônicos.

4.1 Compensador estático de reativo

Como o compensador proposto no capítulo anterior não é capaz de compensar potência reativa injetada por uma carga capacitiva, uma pequena alteração que se resume à adição de um reator em paralelo, cuja potência é a metade da potência do banco de capacitores, agregar esta funcionalidade. O conjunto assim formado constitui um compensador estático com função similar ao SVC abordado no Capítulo 2. A Figura 4.1 mostra a configuração proposta.

A Figura 4.2, mostra o diagrama esquemático do modelo numérico do compensador estático proposto, onde foi incorporado um reator com potência igual à do banco de capacitores original. Assim, é necessário dobrar a potência do banco de capacitores para que a capacidade de fornecimento de potência reativa capacitiva permaneça inalterada.

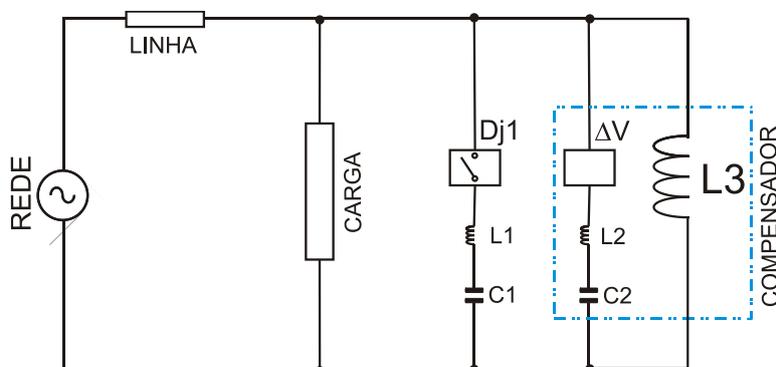


Figura 4.1 – Compensador estático de reativo proposto (topologia 2).

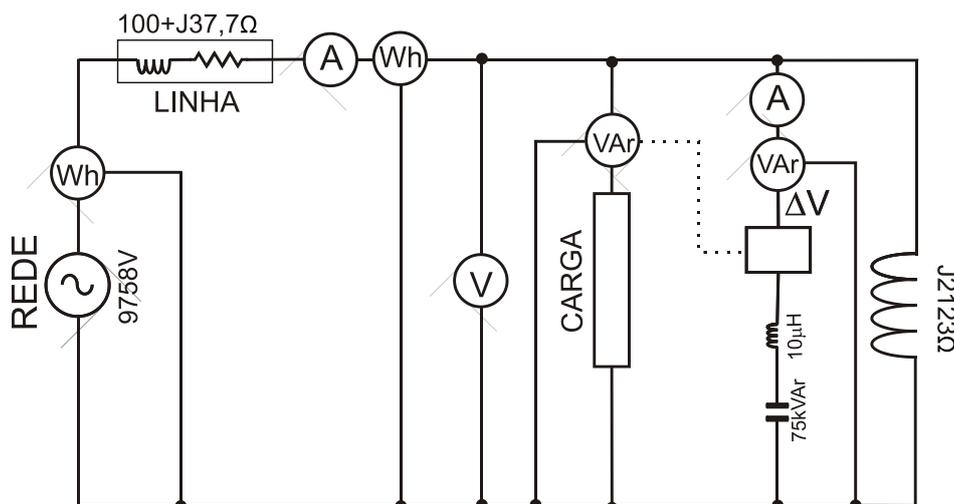


Figura 4.2 – Diagrama esquemático do modelo do compensador estático proposto.

Nas Figuras 4.3 e 4.4, são apresentados os resultados de duas simulações que incorporam um excesso de potência reativa capacitiva na carga durante um período de quatro horas, onde são utilizados bancos de capacitores chaveados por tensão e o compensador estático proposto, respectivamente. Observa-se que o compensador estático consome potência reativa indutiva durante aproximadamente 12 horas para compensar o excedente de energia reativa capacitiva e ajudar a manter a tensão no barramento da carga dentro do limite regulatório.

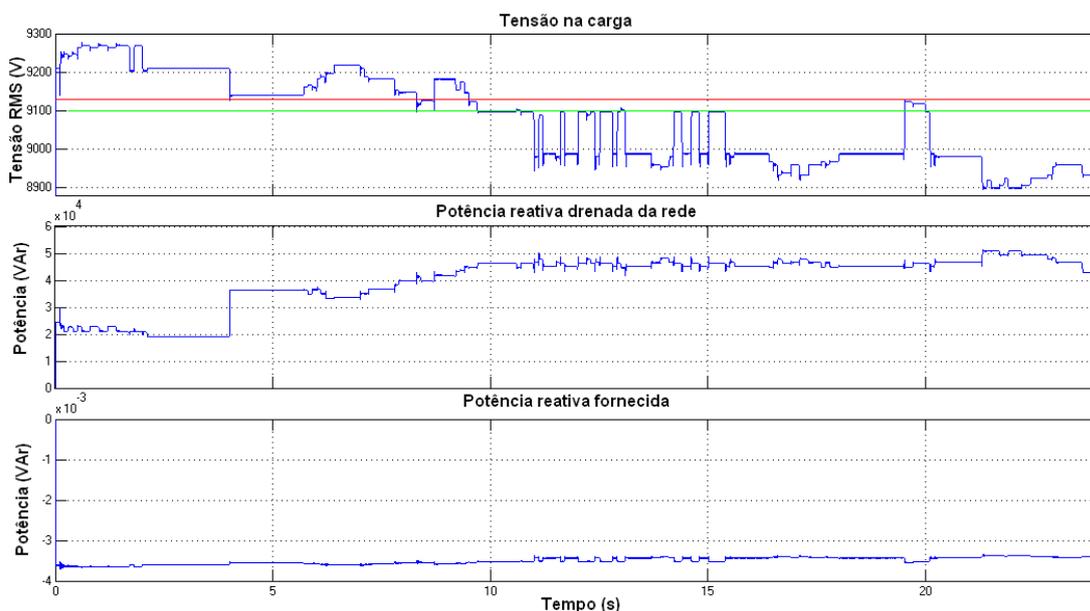


Figura 4.3 – Banco chaveado por tensão com excedente capacitivo: valor eficaz da tensão, potência reativa drenada da rede pela carga e potência reativa do dispositivo.

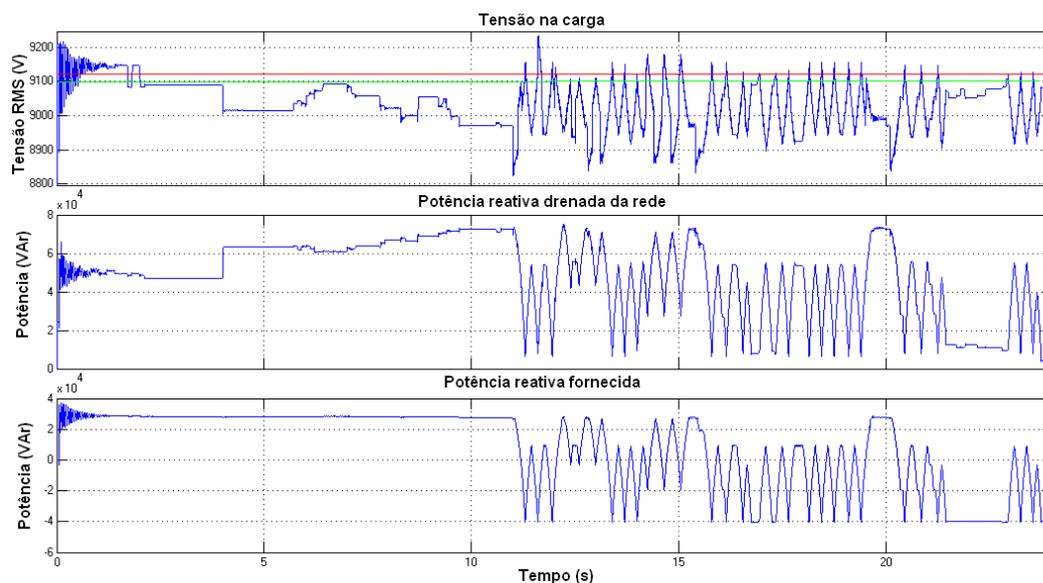


Figura 4.4 – Compensador estático proposto com excedente capacitivo: valor eficaz da tensão, potência reativa drenada da rede pela carga e potência reativa do dispositivo.

Por outro lado, a configuração proposta perde resolução, uma vez que os 16 estados agora estão divididos entre indutivos, capacitivos e um neutro. Este desempenho pode ser melhorado utilizando-se outro dispositivo de controle de reativo apenas para o reator, obtendo-se assim um compensador duplo com resolução de 32 estados divididos entre indutivos, capacitivos e um neutro. Além disso, neste caso não é mais necessário dobrar a potência do banco de capacitores e, portanto os dois dispositivos para controle de reativo podem ser idênticos. Entretanto, a lógica de controle do indutor é complementar à do capacitor e o sistema de controle deve sofrer modificações para contemplar esta funcionalidade. O dispositivo resultante é equivalente ao TCR+TSC abordado no Capítulo 2. A Figura 4.5 mostra o dispositivo proposto, a Figura 4.6 mostra o diagrama esquemático do modelo numérico elaborado, a Figura 4.7 mostra o fluxograma do sistema de controle modificado, a Figura 4.8 mostra o resultado da simulação do caso anterior e a Tabela 4.1 mostra o sumário das entradas do controle.

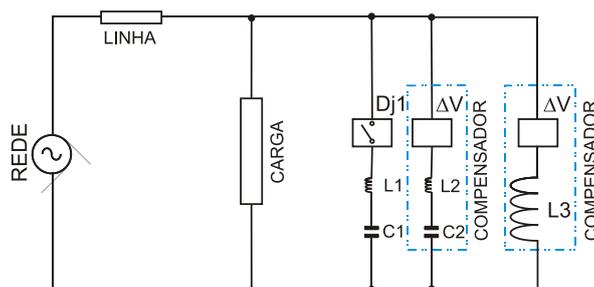


Figura 4.5 – Compensador estático de reativo duplo proposto (topologia 3).

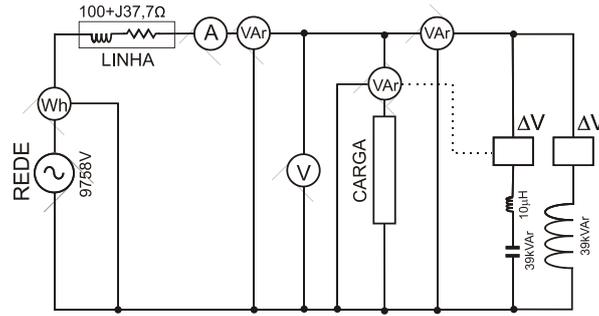


Figura 4.6 – Compensador estático com dois dispositivos de controle.

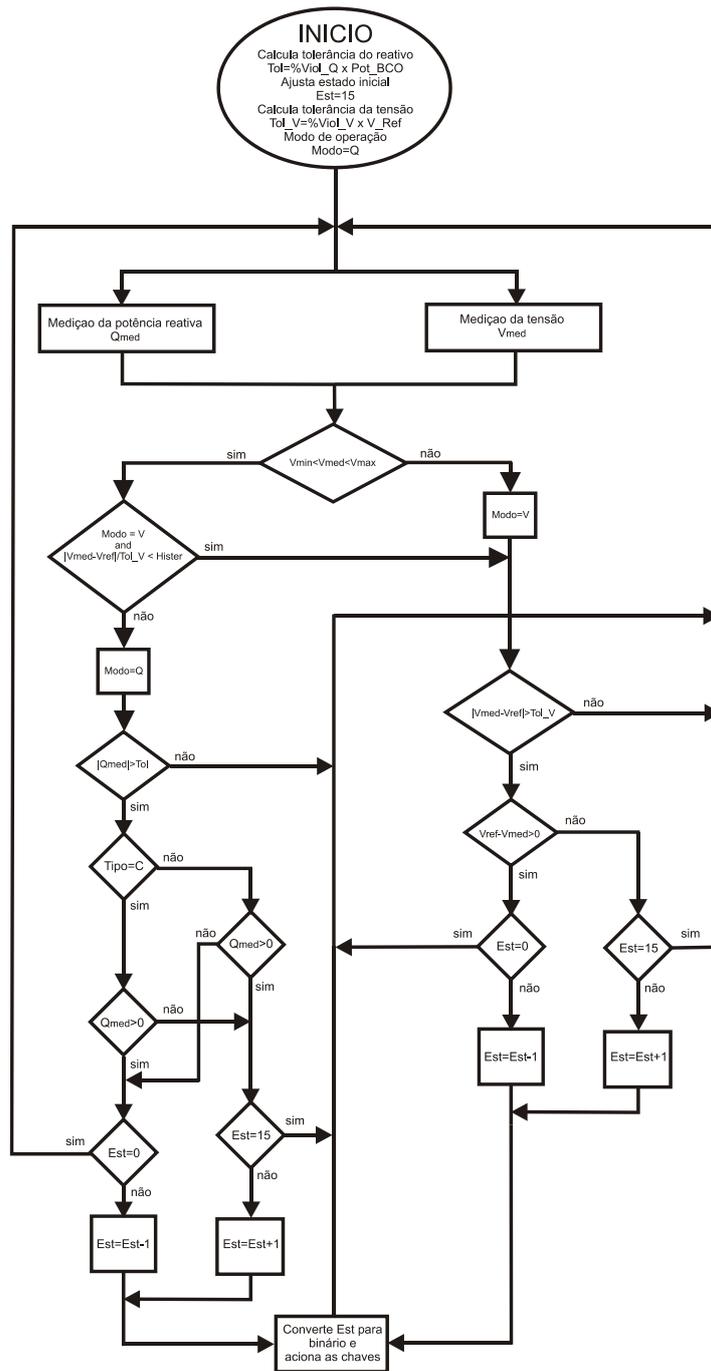


Figura 4.7 – Sistema de controle para fonte de reativo capacitivo ou indutivo.

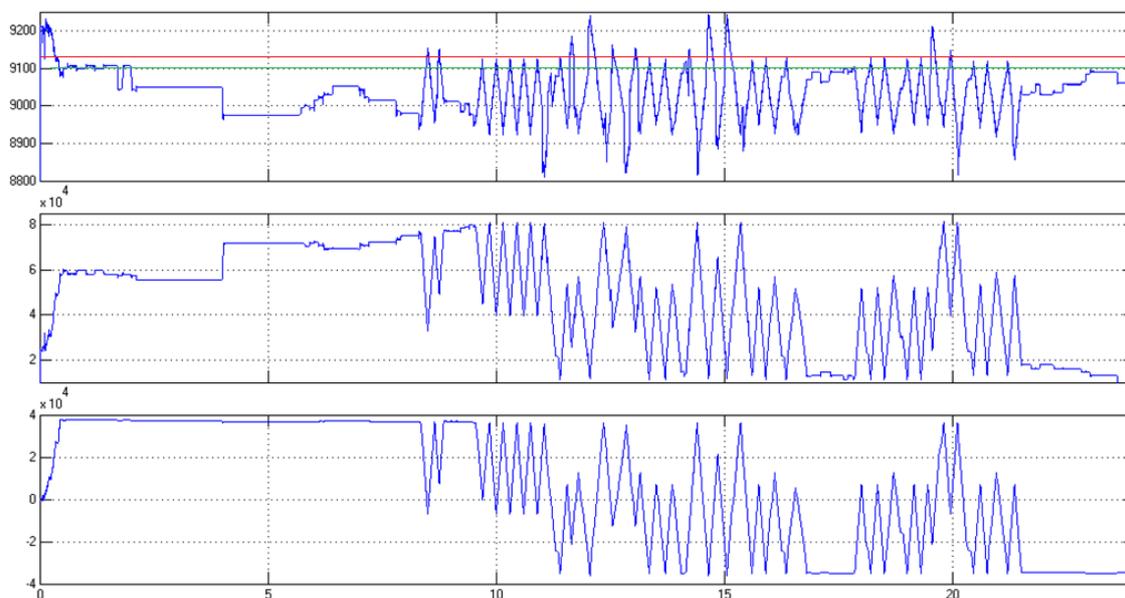


Figura 4.8 – Compensador estático duplo proposto com excedente capacitivo: valor eficaz da tensão, potência reativa drenada da rede e potência reativa do dispositivo.

Tabela 4.1 - Sumário de entradas do controle com modo automático.

Entrada	Descrição
% Viol_V	Percentual de variação da tensão sem atuação do controle.
V_Ref	Tensão de referência.
Vmed	Tensão medida no barramento da carga.
Qmed	Potência reativa medida na rede.
Pot_BCO	Potência do banco de capacitores associado ao dispositivo.
% Viol_Q	Percentual de variação da potência reativa em relação a potência do banco sem atuação do controle.
Vmin	Limite de tensão inferior para o modo de operação automático.
Vmax	Limite de tensão superior para o modo de operação automático.
Hister	Histerese para retorno ao modo de operação por fluxo de potência reativa.
Tipo	Tipo de fonte de potência reativa (indutiva ou capacitiva).

4.2 Compensador série

As violações do nível da tensão verificadas nos casos abordados anteriormente ocorrem essencialmente devido a problemas de regulação provocados pela impedância da fonte e da linha, onde a impedância da linha geralmente é preponderante. De acordo com (FUCHS, 1979) a impedância de uma linha de transmissão normalmente é composta por uma componente reativa indutiva e uma componente resistiva, onde a componente indutiva geralmente é maior que a componente resistiva. Isto se deve as características do projeto, que tenta minimizar a componente resistiva pois ela é responsável pelas perdas. Entretanto, para se reduzir a parcela resistiva de uma linha é necessário aumentar a bitola do condutor, ou trocar o tipo de material utilizado, por exemplo, trocar alumínio por cobre, mas em ambos os casos isto implica em aumento significativo no custo da linha. Assim, em linhas de distribuição onde a carga é pequena e que geralmente atendem a pequenas localidades utilizam-se condutores de pequena secção transversal como por exemplo 6mm^2 em cobre. Nestes casos a parcela resistiva pode ser maior. Assim compensando a componente indutiva com o uso de um compensador série é possível melhorar a regulação e a capacidade de condução da linha.

A Figura 4.9 mostra o dispositivo proposto e a Figura 4.10 mostra o diagrama esquemático do modelo do sistema completo. A Figura 4.11 mostra os resultados da simulação do sistema em carga leve, apenas com a compensação de tensão por bancos de capacitores chaveados, enquanto a Figura 4.12 mostra a simulação também em carga leve, mas com compensador série e bancos de capacitores chaveados. Analisando os resultados destas simulações observa-se que no primeiro caso a tensão varia até 6,6% ao longo do dia, o que denota uma regulação ruim. Já no segundo caso o regulador série elimina o efeito da reatância indutiva da linha e a tensão varia em torno de 1%, que é um resultado bem melhor. Observe também que o nível da tensão na carga melhorou saindo de no máximo 9.300V no primeiro caso para 9.680V no segundo caso.

A Figura 4.13 mostra a simulação com carga pesada e compensação de tensão por banco de capacitores chaveados e a Figura 4.14 mostra a simulação com carga pesada, compensador série e banco de capacitores chaveados. O comportamento da tensão é similar ao comportamento em carga leve e as mesmas conclusões podem ser obtidas. Nota-se que a variação no nível da tensão observada permite alterar a tensão nominal da rede de 8.700 V para 9.500 V. Assim, o ajuste de todos os sistemas de controle também são alterados. É importante ressaltar que o banco de capacitores não atuou durante toda

a simulação, pois não houve violação dos limites de tensão definidos. As oscilações observadas na Figura 4.14 são resultado transitório da interação entre o banco de capacitores que compõem o compensador série e o sistema e duram apenas alguns ciclos.

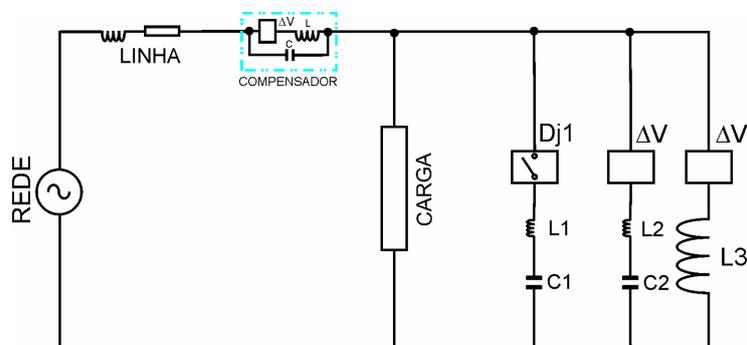


Figura 4.9 – Compensador estático série proposto (topologia 4).

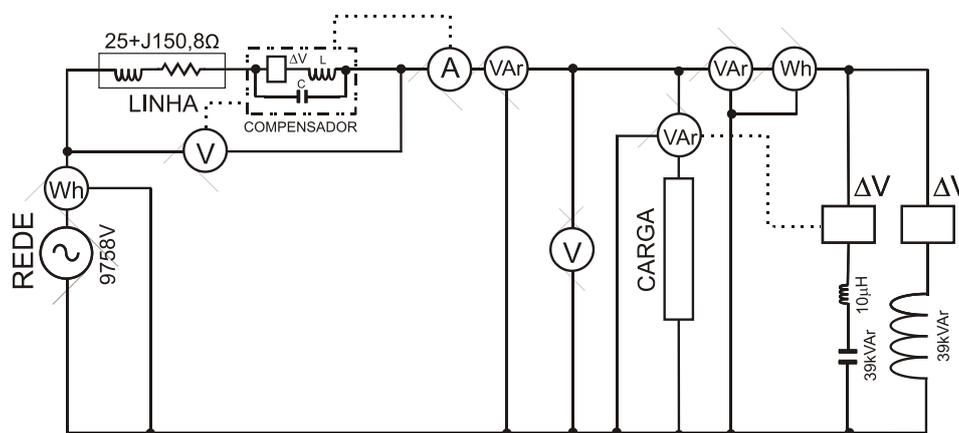


Figura 4.10 - Diagrama esquemático do modelo numérico do sistema completo.

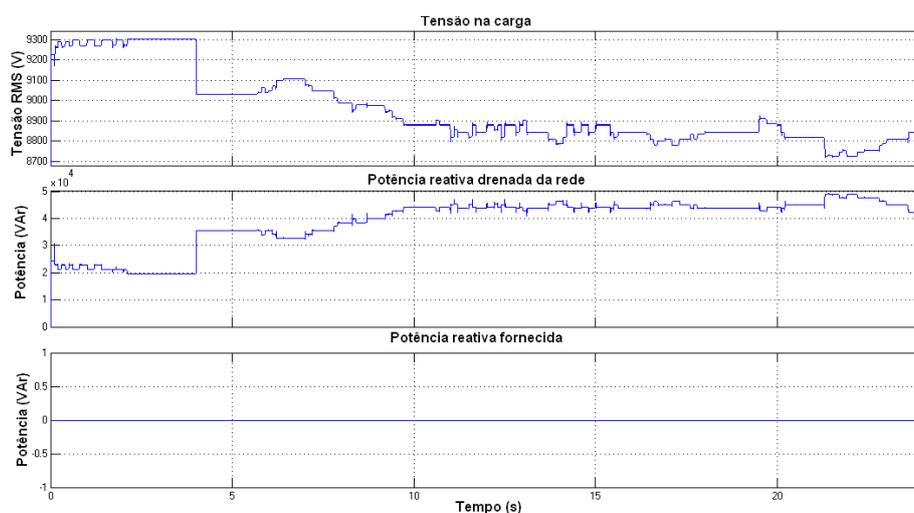


Figura 4.11 – Sistema em carga leve com bancos de capacitores chaveados: valor eficaz da tensão, potência reativa drenada da rede e potência reativa do dispositivo.

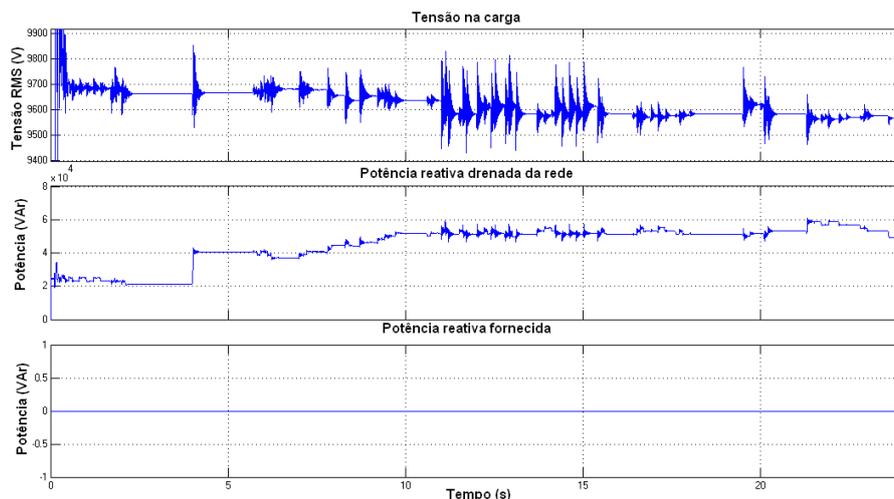


Figura 4.12 – Sistema em carga leve com compensador série e bancos chaveados: valor eficaz da tensão, potência reativa drenada da rede e potência reativa do dispositivo.

Na simulação mostrada na Figura 4.15, um dos bancos de capacitores chaveados ficou acoplado manualmente durante toda a simulação para prover reativo como um banco fixo. Além dele, foram acoplados ao sistema o compensador série e o compensador estático. Observe que a potência reativa necessária para compensar a reatância da linha é baixa, quando comparada com a reatância da carga. Isto resulta em um compensador com potência e dimensões reduzidas em relação ao compensador usado para a carga. Neste caso a potência do banco de capacitores é a equivalente a 430 kVAr, a potência do reator é de 300 kVAr e a potência do dispositivo é 80 kVAr.

Analisando as Figuras 4.11 e 4.13, observa-se a influência da linha em carga leve e pesada com o uso de banco de capacitores chaveado, onde pode ser verificada uma variação do nível da tensão nos dois casos da ordem de 6,89% e 3,33%, respectivamente. Nota-se que neste caso há violação do limite regulatório. Já nas Figuras 4.12 e 4.14 têm-se os mesmos casos, só que com a presença do compensador série. Nesta nova situação, as variações no nível da tensão para carga leve e pesada são praticamente as mesmas e de cerca de 1%. Na Figura 4.15, pode-se observar o efeito de todos os elementos estudados até agora, o compensador série que minimiza a variação da tensão no barramento, o compensador estático minimiza a energia reativa solicitada da rede, e conseqüentemente as perdas, e o banco de capacitores chaveado operando como banco fixo para prover a parte constante da potência reativa solicitada pela carga.

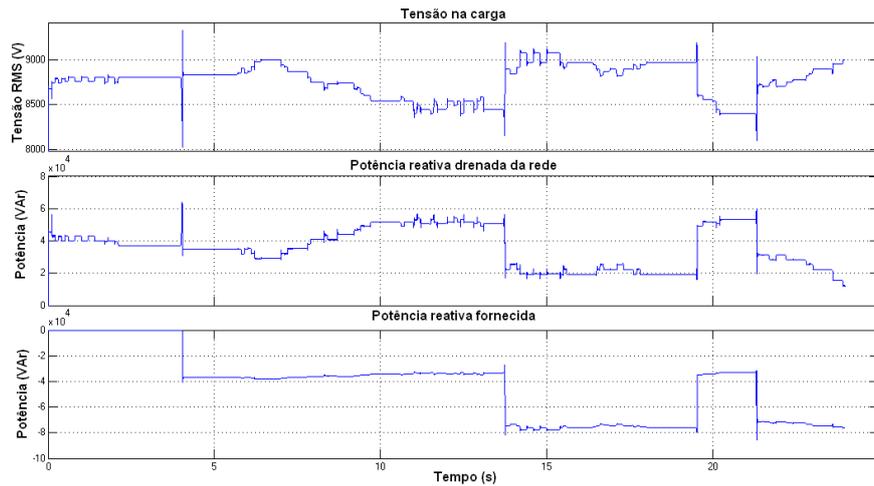


Figura 4.13 – Sistema em carga pesada com bancos de capacitores chaveados: valor eficaz da tensão, potência reativa drenada da rede e potência reativa do dispositivo.

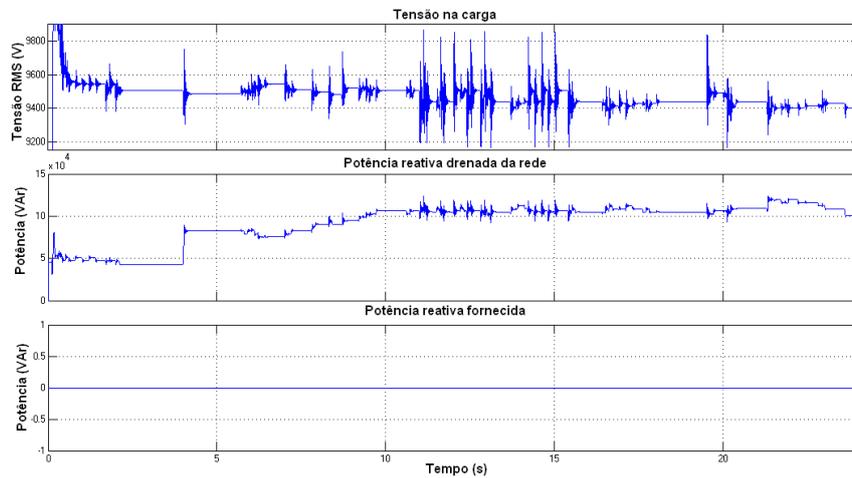


Figura 4.14 – Sistema em carga pesada com comp. série e bancos chaveados: valor eficaz da tensão, potência reativa drenada da rede e potência reativa do dispositivo.

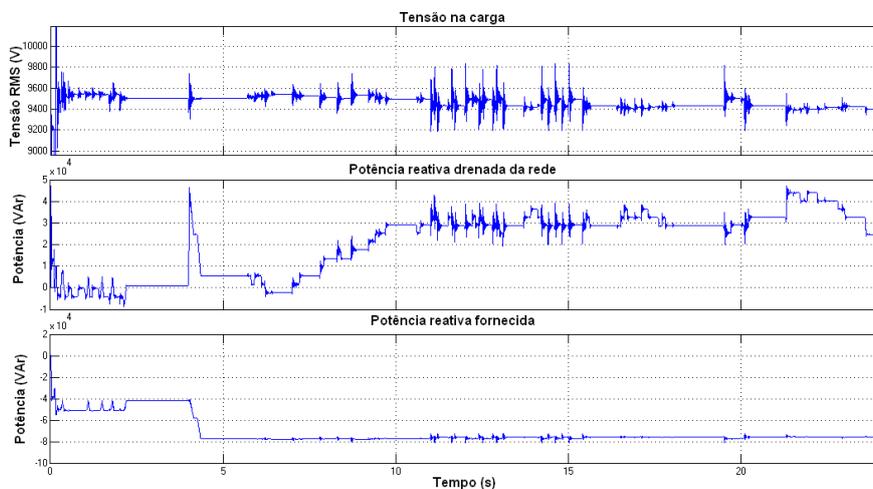


Figura 4.15 – Sistema em carga pesada, compensador série, estático e banco fixo: valor eficaz da tensão, potência reativa drenada da rede e potência reativa do dispositivo.

4.3 Compensador estático de potência reativa e de tensão desacopladas

As topologias propostas anteriormente permitem compensar o fluxo de potência reativa ou nível da tensão. No entanto, a ação em um dos parâmetros provoca alteração no outro, ou seja, eles estão acoplados. Assim, em alguns casos, devido a limitações operativas, torna-se inviável a realização do controle de um deles. Considere o caso de um alimentador em carga leve, onde há potência reativa a ser compensada, situação em que, é comum que o nível da tensão esteja elevado e próximo ao limite regulatório. Neste caso, pode ser inviável realizar a compensação do fluxo de potência reativa, pois esta ação elevaria ainda mais o nível da tensão, o que poderia acarretar na violação do limite. Uma solução natural para este problema seria a utilização de um regulador de tensão em conjunto com um compensador de potência reativa. Porém, esta solução tornaria a dinâmica do conjunto extremamente lenta, devido ao elevado tempo de resposta do regulador de tensão convencional (eletromecânico), que é da ordem de alguns segundos. Esta limitação pode ser eliminada com a utilização de uma associação entre qualquer uma das soluções de compensação de potência reativa propostas anteriormente com o regulador de tensão proposto por (BRITO, 2011) (BRITO, LIMONGI, *et al.*, 2014), cujo tempo de resposta é da ordem de meio ciclo. Assim, obtém-se uma topologia onde os transitórios de tensão são rapidamente suprimidos e o controle da tensão e do fluxo de potência reativa estão desacoplados. Adicionalmente, utilizando-se de uma configuração monofásica é possível compensar desequilíbrios na tensão e na carga.

Segundo a (ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2010) desequilíbrio de tensão é o fenômeno associado a alterações dos padrões trifásicos do sistema de distribuição e é medido através de duas equações definidas nos itens 5.3.2 e 5.3.3 do PRODIST, módulo 8 mostradas a seguir. O item 5.6.1 define que o limite máximo para o fator de desequilíbrio deve ser menor ou igual a 2%.

$$F_D = \frac{V_-}{V_+} \cdot 100 \quad (4.1)$$

$$F_D = 100 \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}}, \quad (4.2)$$

sendo:

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2},$$

em que:

F_D – Fator de desequilíbrio;

V_+ – Magnitude da tensão eficaz de sequência positiva;

V_- – Magnitude da tensão eficaz de sequência negativa;

V_{ab}, V_{bc}, V_{ca} – Tensões eficazes de linha.

A Figura 4.16 mostra a topologia proposta. Observa-se em destaque o módulo de compensação de potência reativa “CR” e o módulo regulador de tensão “CV”. A Figura 4.17 mostra o diagrama esquemático do modelo numérico utilizado, onde foi simulado um sistema desequilibrado tanto em tensão quanto na carga. A Figura 4.18 mostra o resultado da simulação com o compensador fora de operação e o sistema em carga leve, observando-se que houve violação tanto do limite de tensão quanto do fator de desequilíbrio. Já a Figura 4.19 mostra que o desequilíbrio da carga prejudica a regulação e a compensação da potência reativa, que é geralmente trifásica. A Figura 4.20 mostra a simulação do sistema nas mesmas condições, porém agora com o compensador em operação. Observa-se que a tensão sobre a carga varia dentro de uma faixa de $\pm 0,5\%$ em torno da tensão de referência e que o fator de desequilíbrio não ultrapassa o patamar de 0,5%. Já o resultado da compensação da potência reativa é mostrado na Figura 4.21. Considerando o sistema agora em carga pesada, com o compensador fora de operação, obtêm-se os resultados mostrados nas Figuras 4.22 e 4.23, onde é possível observar que os problemas de regulação, desequilíbrio e compensação da potência reativa são acentuados. As Figuras 4.24 e 4.25 mostram os resultados da simulação com o compensador em operação, observando-se que os resultados obtidos são idênticos aos do caso da carga leve, com um aumento no fator de desequilíbrio que mesmo assim ficou abaixo do limite de 2%. Por outro lado, o efeito do compensador não se limitou a melhorar a tensão a jusante do ponto de instalação, havendo também uma melhora na tensão a montante, devido à redução da potência reativa demandada da rede. Houve também uma redução significativa nas perdas no ferro dos transformadores a jusante do ponto de instalação, principalmente com o sistema em carga leve, devido à regulação precisa, pois como visto anteriormente as perdas no ferro variam com o quadrado da tensão.

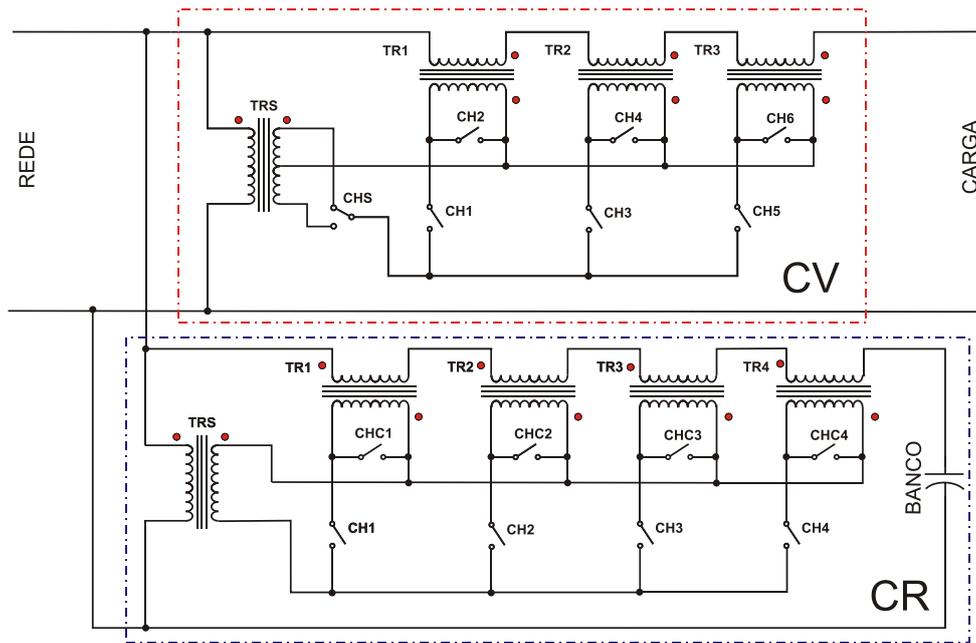


Figura 4.16 - Compensador Q/V desacoplado (topologia 5).

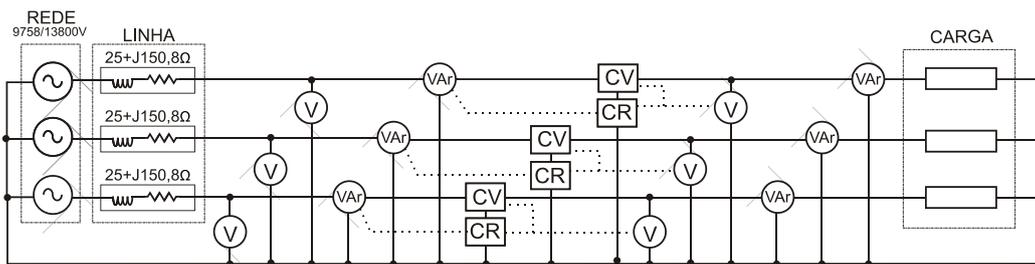


Figura 4.17 - Diagrama esquemático do modelo numérico do compensador Q/V.

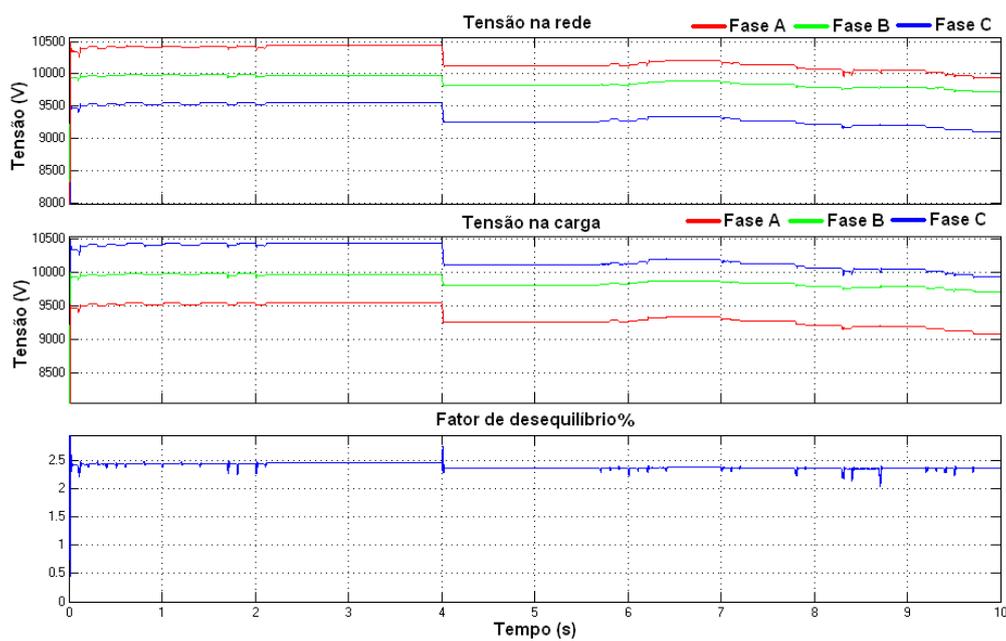


Figura 4.18 – Tensões com carga leve e compensador Q/V desligado.

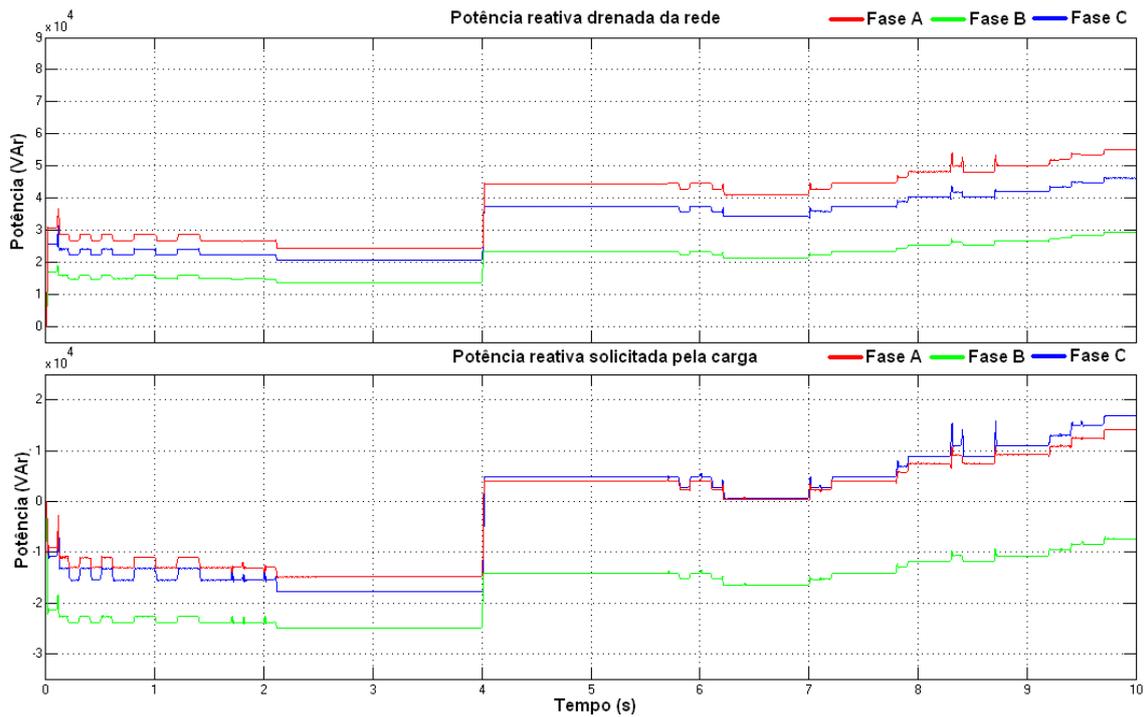


Figura 4.19 - Potência reativa com carga leve e compensador Q/V desligado.

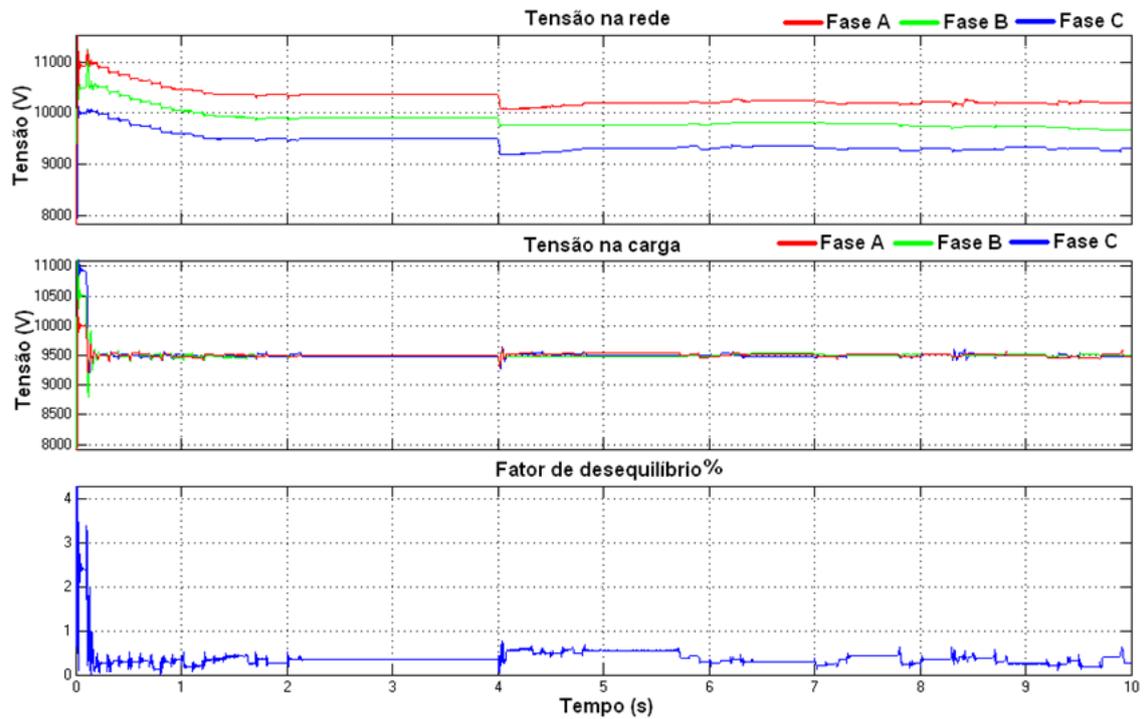


Figura 4.20 - Tensões com carga leve e compensador Q/V ligado.

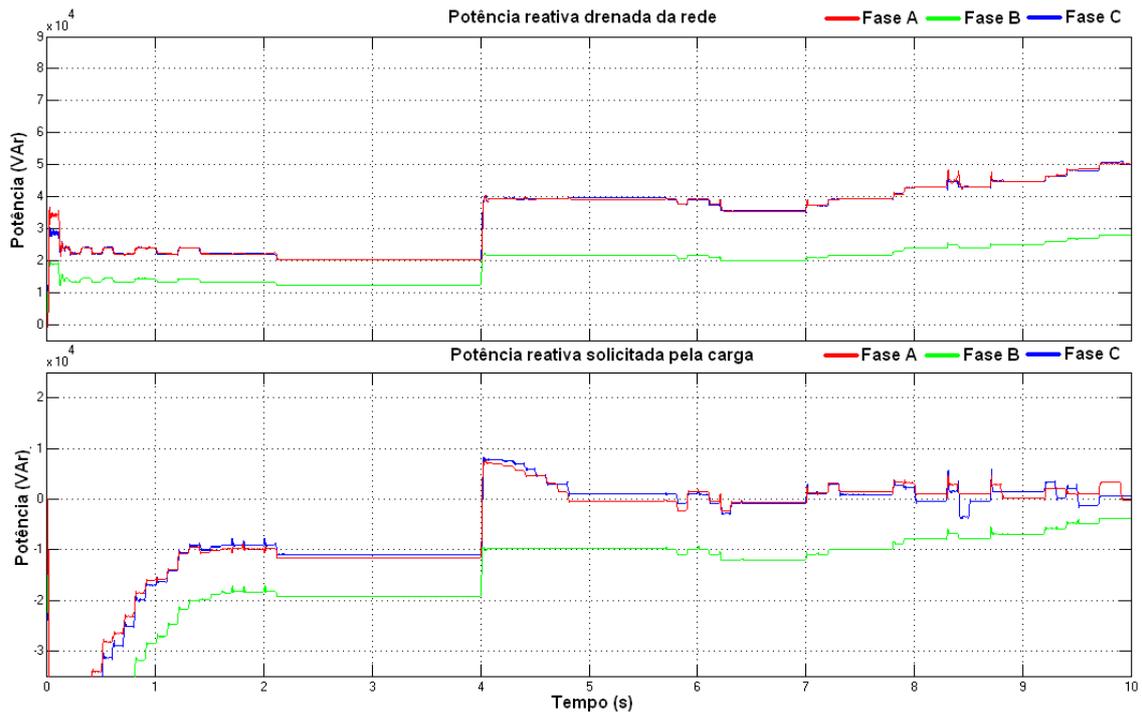


Figura 4.21- Potência reativa com carga leve e compensador Q/V ligado.

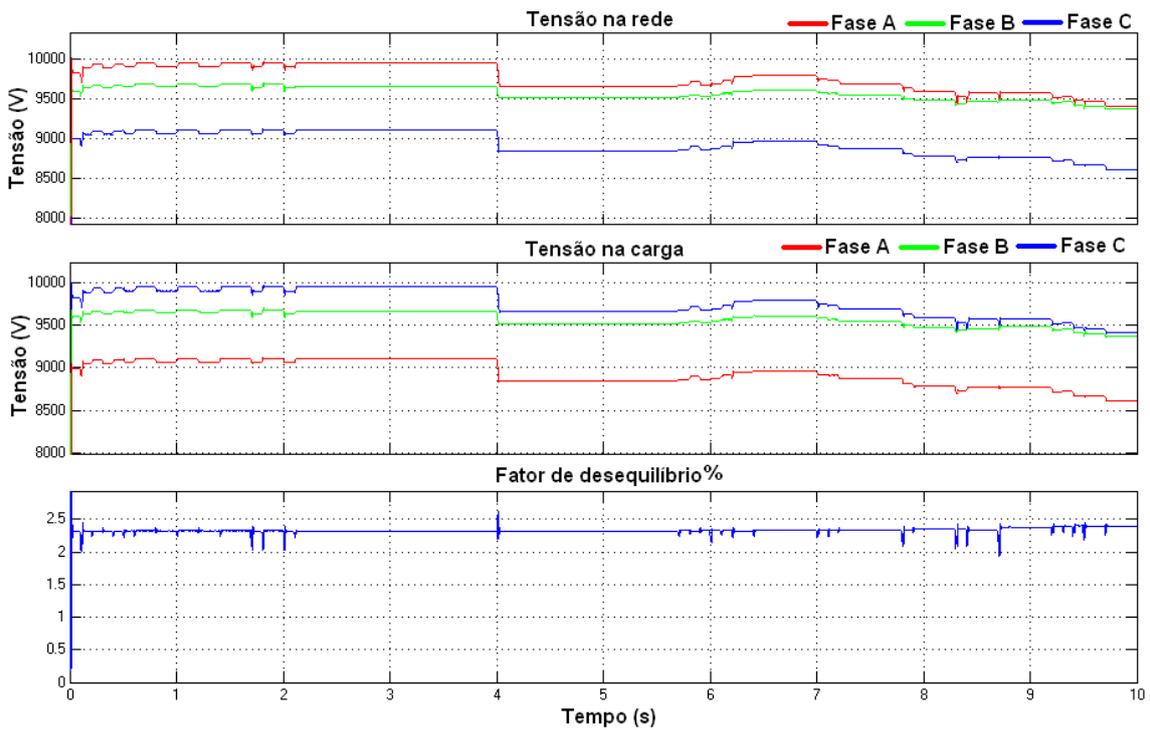


Figura 4.22 - Tensões com carga pesada e compensador Q/V desligado.

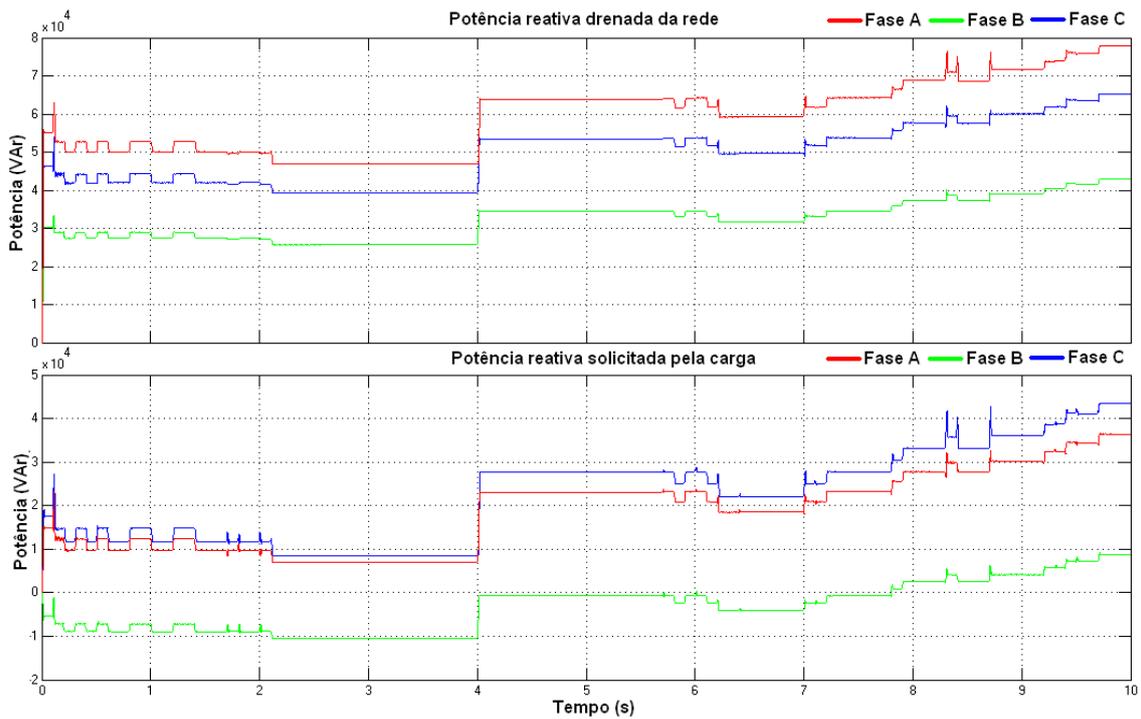


Figura 4.23 - Potência reativa com carga pesada e compensador Q/V desligado.

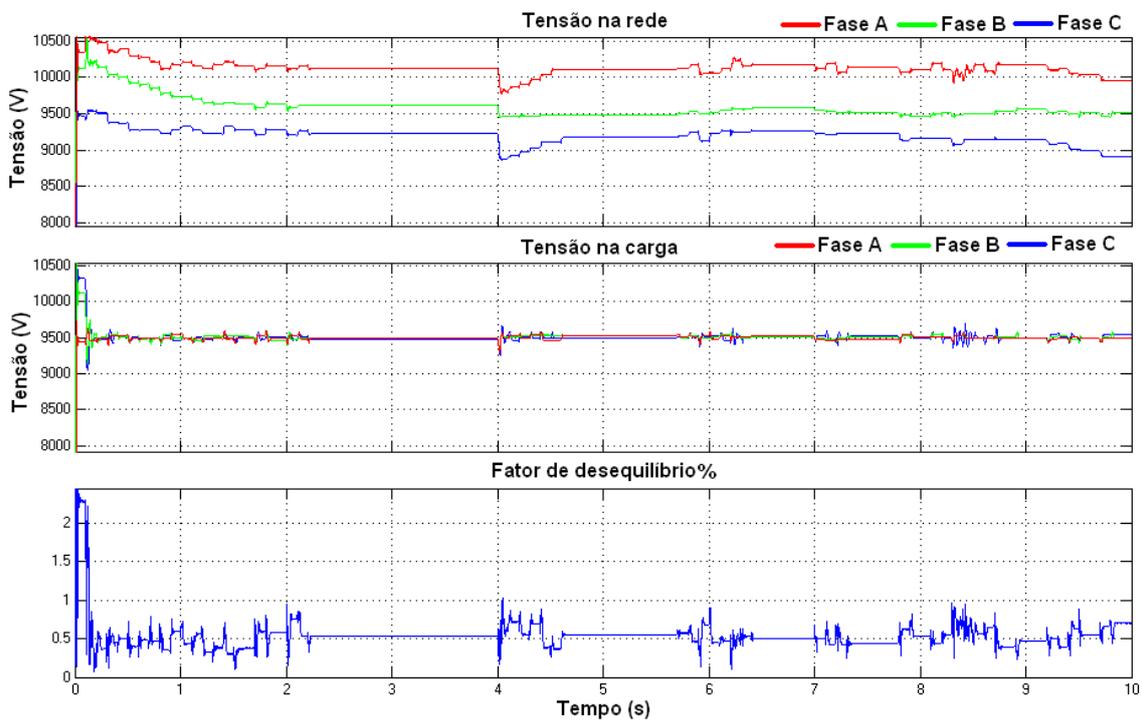


Figura 4.24 - Tensões com carga pesada e compensador Q/V ligado.

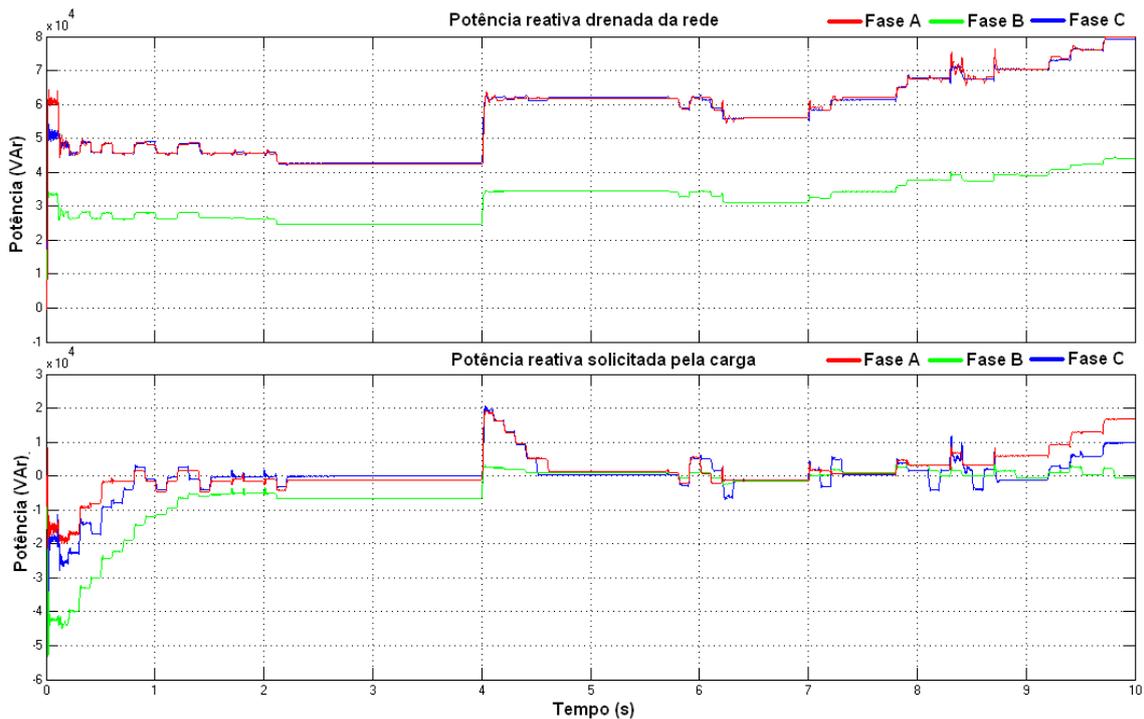


Figura 4.25 - Potência reativa com carga pesada e compensador Q/V ligado.

4.4 Controlador de fluxo de potência entre linhas

Os dispositivos apresentados nos tópicos anteriores utilizam elementos armazenadores de energia para realizar o controle do fluxo de potência reativa e do nível da tensão. Por outro lado, dispositivos como IPFC ou o transformador defasador (TD) utilizam como fonte de potência ativa e reativa uma barra adjacente e podem controlar o fluxo de potência entre as barras (REDDY, GULATI, *et al.*, 2012). A Figura 4.26 mostra o diagrama unifilar de um sistema de duas barras acopladas por uma linha, donde pode-se obter as equações, que permitem calcular o fluxo de potência entre as barras.

$$P = \frac{|V_s||V_r|}{X_{sr}} \sin(\delta_s - \delta_r) \quad (4.3)$$

$$Q = \frac{|V_s||V_r|}{X_{sr}} \left(\cos(\delta_s - \delta_r) - \frac{|V_r|}{|V_s|} \right), \quad (4.4)$$

em que:

P – Potência ativa injetada na barra receptora;

Q – Potência reativa injetada na barra receptora;

V_s - Tensão na barra transmissora;

V_r - Tensão na barra receptora;

X_{sr} - Impedância da linha que conecta as barras;

δ_r - Ângulo da tensão na barra receptora;

δ_s - Ângulo da tensão na barra transmissora.

Através do controle do ângulo das tensões nas barras transmissora e receptora é possível controlar o fluxo das potências de forma desacoplada, ou seja, controlar o fluxo de uma das potências (P) sem influenciar no fluxo da outra (Q), uma vez que tipicamente $(\delta_s - \delta_r)$ é pequeno. O dispositivo proposto mostrado na Figura 4.27 possui a capacidade de executar o controle do fluxo de potência de forma desacoplada de maneira similar ao IPFC e ao TD. A topologia básica utilizada é mesma dos dispositivos propostos abordados anteriormente. Porém, neste caso é necessário um sistema trifásico, pois utilizam-se tensões de diferentes fases que são combinadas para se obter a defasagem desejada.

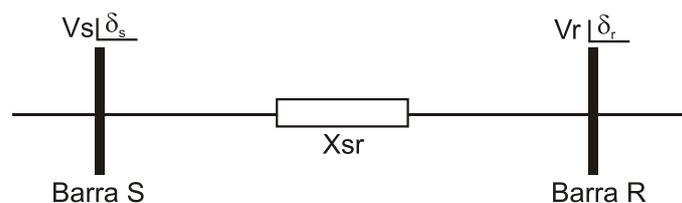


Figura 4.26 - Sistema com duas barras acopladas.

Isto permite obter o mesmo efeito que uma fonte de energia reativa que utiliza elementos armazenadores de energia. Por outro lado o dispositivo proposto também altera o nível da tensão tal qual um regulador de tensão. O controle dos dois parâmetros é realizado independentemente e ficam desacoplados.

4.4.1 Descrição do funcionamento

Para facilitar o entendimento do funcionamento do dispositivo proposto, será analisada apenas uma fase e esta análise pode ser estendida para o sistema completo. A Figura 4.28 mostra apenas a fase “C” do dispositivo proposto. Note que o dispositivo proposto é composto de dois módulos em cascata, um responsável por produzir o defasamento necessário e outro responsável pelo nível da tensão de saída.

Na Figura 4.29 é mostrado o diagrama unifilar de um sistema com duas barras e o dispositivo proposto, que é representado pela impedância X_c , pelo defasador θ e pelo regulador τ .

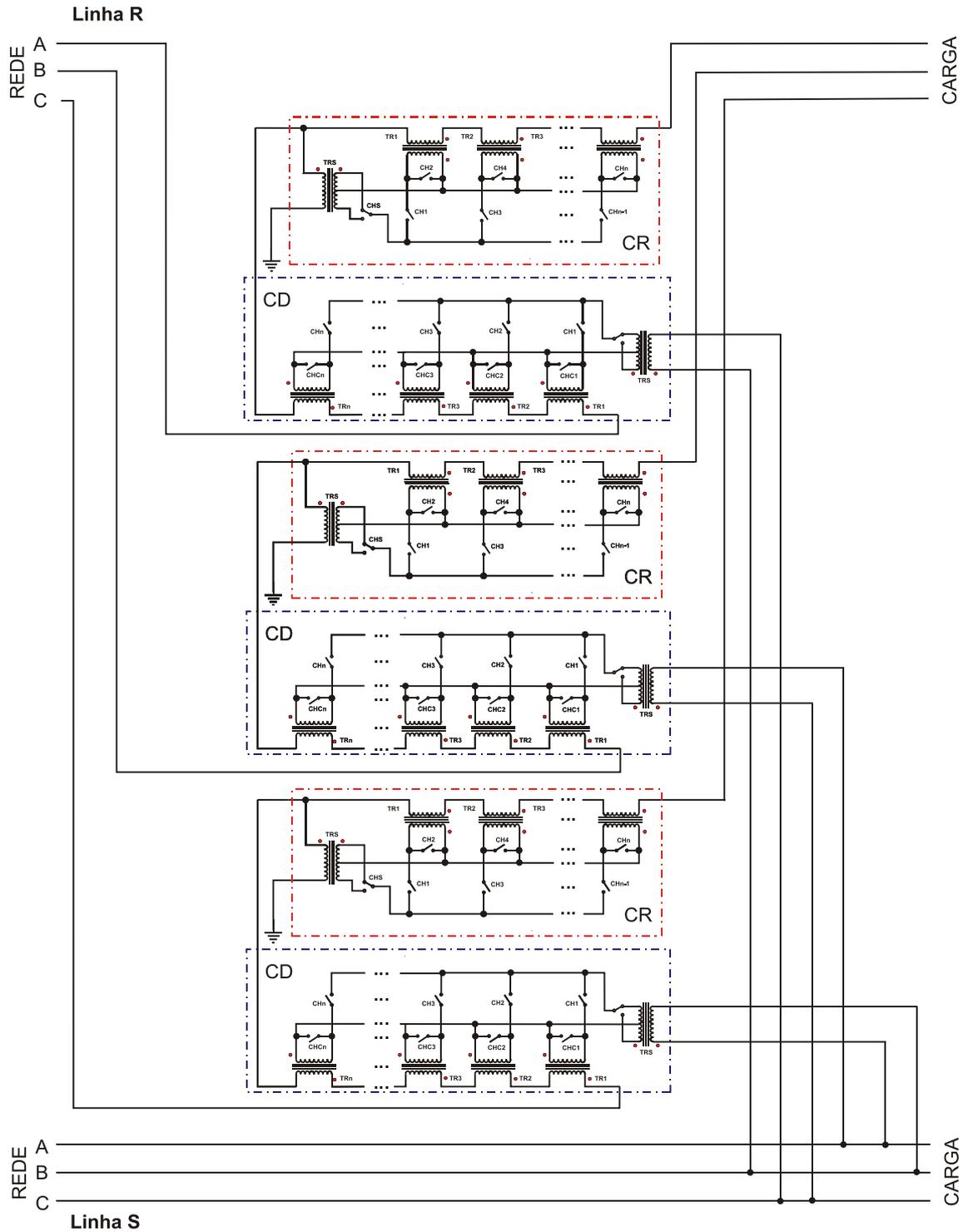


Figura 4.27 - Controlador de fluxo de potência entre linhas (topologia 6).

Baseando-se na Figura 4.29 pode-se escrever as seguintes equações:

$$\sqrt{2}V_c \sin \theta = (\sqrt{2}V \sin 0 + \sqrt{2}V' \sin \delta_s) \tau, \tag{4.5}$$

$$V_c \cos \theta + V_c \sin \theta j = (V + V' \cos \delta_s + V' \sin \delta_s j) \tau, \tag{4.6}$$

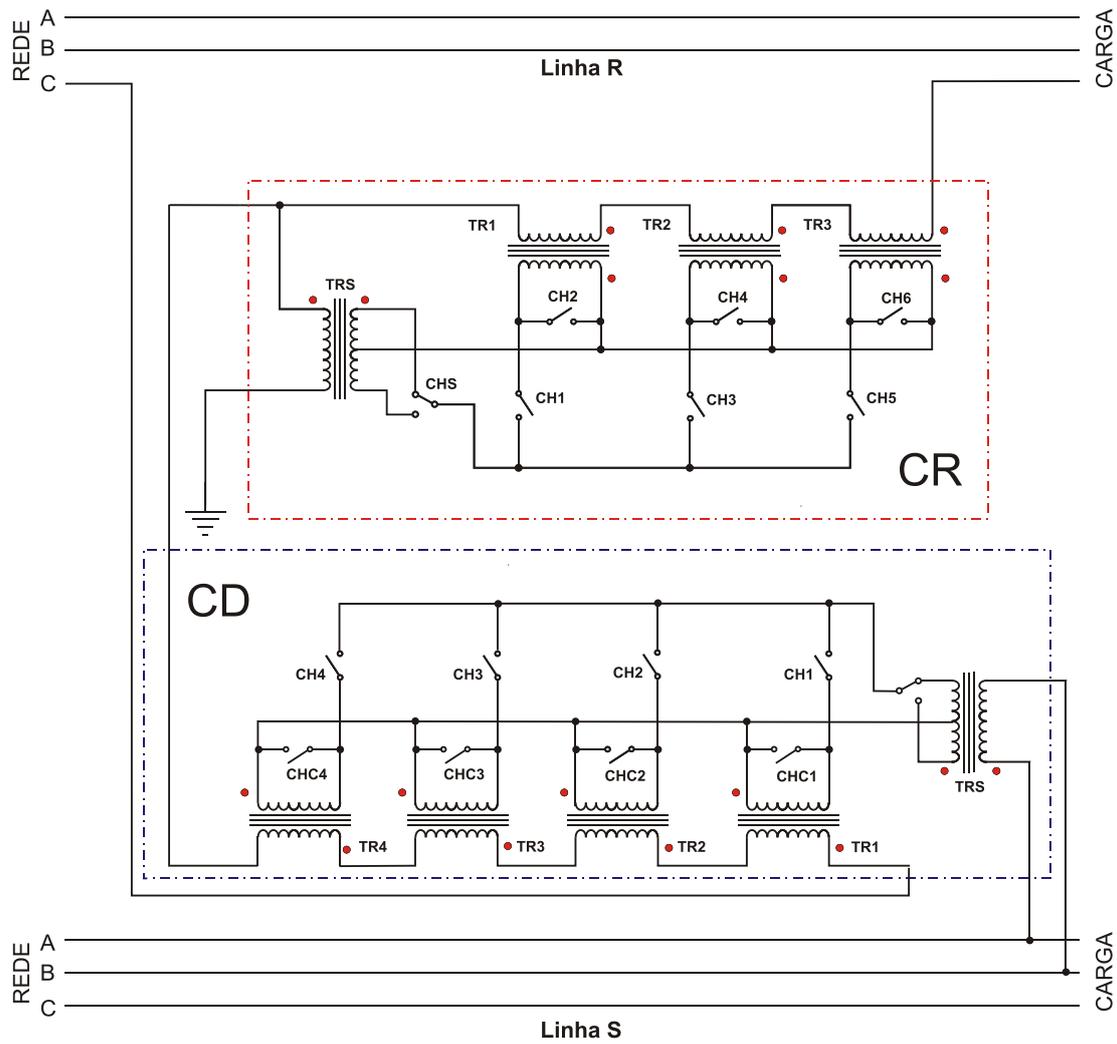


Figura 4.28 - Controlador de fluxo de potência entre linhas (fase “C”).

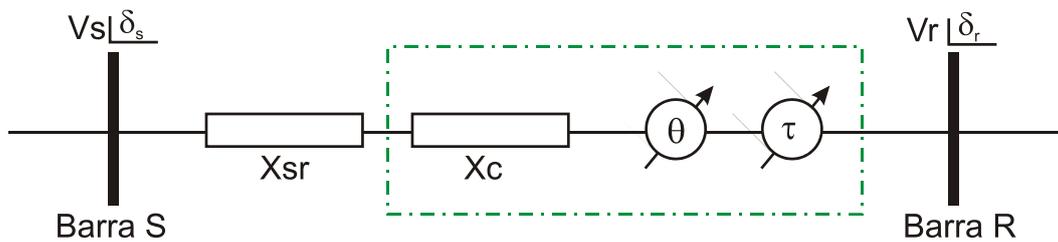


Figura 4.29 - Diagrama unifilar do sistema de duas barras e o dispositivo proposto.

em que:

V - Tensão eficaz na barra transmissora;

V_c - Tensão eficaz na saída do controlador;

θ - Ângulo da tensão na saída do controlador;

δ_s - Ângulo da tensão da barra transmissora;

V' - Tensão eficaz a ser somada com a tensão da receptora.

Considerando-se apenas o defasamento tem-se:

$$\begin{aligned}\tan^{-1} \frac{\sin \theta}{\cos \theta} &= \tan^{-1} \frac{V' \sin \delta_s}{V+V' \cos \delta_s}, \\ \tan \theta &= \frac{V' \sin \delta_s}{V+V' \cos \delta_s}, \\ V' &= \frac{V \tan \theta}{\sin \delta_s - \cos \delta_s \tan \theta}.\end{aligned}\quad (4.7)$$

Como a soma de V' ajusta o ângulo necessário mas altera o módulo da tensão, é necessário fazer uma correção. Logo:

$$\tau = \frac{V}{|V+V' \sin \delta_s|}.\quad (4.8)$$

Note que o modulo defasador ajusta a quantidade de tensão defasada de um ângulo δ_s necessária para se obter o ângulo θ na tensão de saída que será aplicada à barra receptora. Porém, este processo altera o módulo da tensão de saída e o módulo de nível de tensão atua ajustando o nível da tensão de saída para o valor desejado. Por outro lado, o módulo defasador pode compensar qualquer desvio fasorial existente na tensão da rede e o módulo de nível de tensão pode compensar desequilíbrio nas tensões da rede e atuar como regulador de tensão. O módulo defasador pode utilizar qualquer tensão disponível no sistema desde que haja um defasamento angular suficiente para se obter o ângulo de saída desejado.

Em um sistema trifásico, o ângulo formado entre a tensão simples de uma fase e a tensão composta formada pelas outras duas fases é de -90° , como pode ser observado no diagrama fasorial mostrado na Figura 4.30.

É importante salientar que V' pode ser aplicada com polaridade aditiva ou subtrativa, o que define o sentido para o qual se deseja realizar a defasagem. Analisando a Figura 4.28, nota-se que uma similaridade dos módulos com o módulo mostrado na Figura 3.2, apresentando apenas duas diferenças, o transformador de alimentação possui uma derivação central e o acréscimo da chave CHS. A finalidade dessas mudanças é possibilitar a escolha da polaridade com a qual V' será somada á tensão da rede.

Aplicando a mesma abordagem utilizada no item 3.1.1 ao dispositivo mostrado na Figura 4.28 obtém-se:

$$V' = V_{xy} \cdot a_s \cdot Rtr_{1\tau} \cdot CH_s (CH_1 + 2CH_2 + \dots + 2^{n-1}CH_n), \quad (4.8)$$

$$\tau = a_{s\tau} \cdot Rtr_{1\tau} \cdot CH_{s\tau} (CH_{1\tau} + 2CH_{2\tau} + \dots + 2^{n-1}CH_{n\tau}), \quad (4.9)$$

$$V_\theta = (V' + V)\tau, \quad (4.10)$$

onde:

V - Tensão na barra receptora;

V_{xy} - Tensão composta das fases adjacentes na barra transmissora;

V_θ - Tensão na saída do controlador com ângulo θ e módulo desejado;

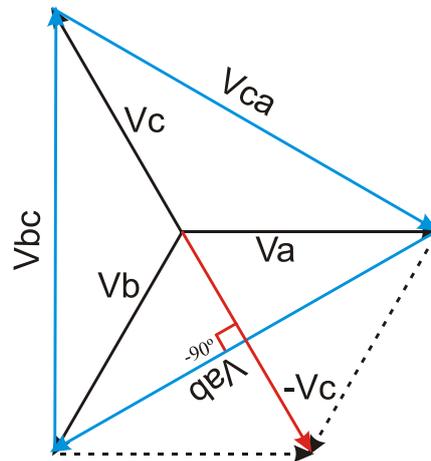


Figura 4.30 - Diagrama fasorial do sistema trifásico.

a_s - Relação de transformação do transformador de alimentação;

$a_{s\tau}$ - Relação de transformação do transformador de alimentação do módulo de nível de tensão;

$CH_{1\tau}$ - Estado da Chave $CH_{1\tau}$ (0,1);

$CH_{2\tau}$ - Estado da Chave $CH_{2\tau}$ (0,1);

$CH_{n\tau}$ - Estado da Chave $CH_{n\tau}$ (0,1);

$CH_{s\tau}$ - Estado da Chave $CH_{s\tau}$ (-1,0,1);

CH_1 - Estado da Chave CH_1 (0,1);

CH_2 - Estado da Chave CH_2 (0,1);

CH_n - Estado da Chave CH_n (0,1);

CH_s - Estado da Chave CH_s (-1,0,1);

Rtr_1 – Relação de espiras do menor transformador série.

$Rtr_{1\tau}$ – Relação de espiras do menor transformador série do módulo de tensão.

A Figura 4.31 mostra três diagramas unifilares que representam três casos do mesmo sistema, onde cada caso corresponde a uma configuração operativa.

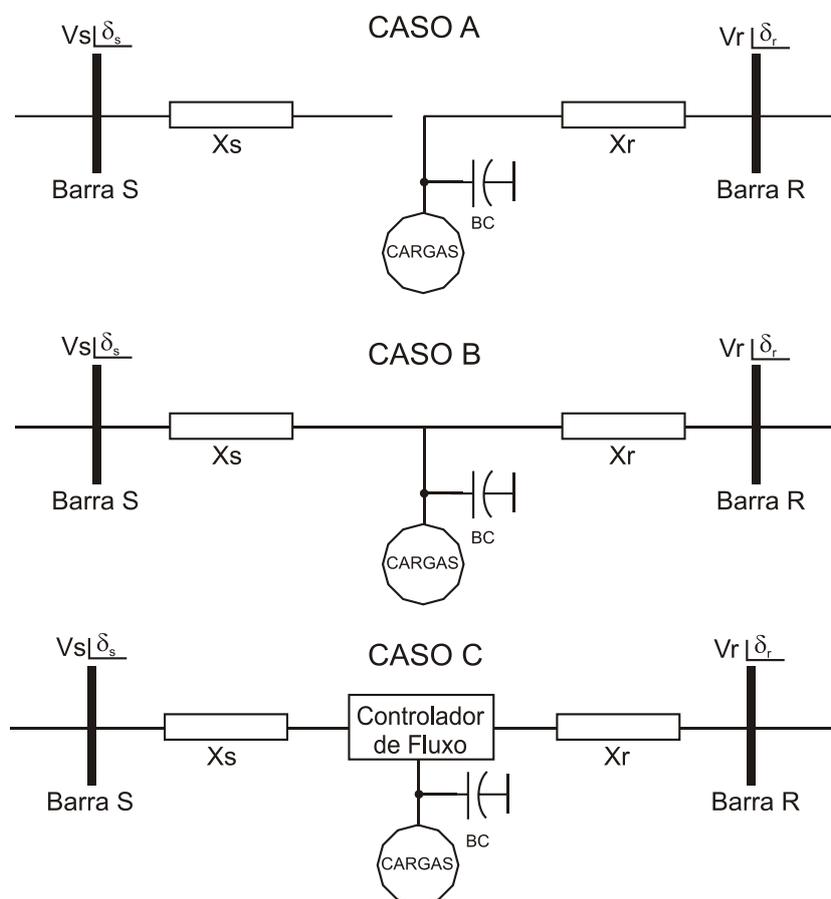


Figura 4.31 - Diagrama unifilar do sistema simulado.

Note a existência de duas linhas com impedâncias e capacidades de condução diferentes, oriundas de duas subestações diferentes, representadas pelas barras “R” e “S”. A barra “R” alimenta um conjunto de cargas que apresentam um excedente de potência reativa indutiva ou capacitiva que necessita ser compensada, pois a linha que as alimenta, em alguns horários entra em sobre-carga. Já a barra “S” apresenta um excedente de potência reativa capacitiva e sua linha associada tem uma capacidade de condução maior e uma impedância menor. Com base no sistema descrito, foi elaborado o modelo de simulação cujo diagrama esquemático -e mostrado na Figura 4.32.

No caso “A” tem-se a configuração considerada padrão, onde as cargas são alimentadas exclusivamente pela barra “R”, através de uma linha que apresenta uma

impedância X_r . Além desses elementos, há também um banco de capacitores fixo que contribui para reduzir a necessidade de energia reativa. Simulando este caso, obtém-se o gráfico mostrado na Figura 4.33, que apresenta o fluxo de energia ativa e reativa em cada linha e nas cargas. Observe que não há fluxo de energia na linha da barra “S” pois a mesma está desacoplada. Além disso, o fluxo de potência reativa na linha da barra “R” é menor do que a demandada pela carga, devido à presença do banco de capacitores fixo. No caso “B”, as linhas são acopladas na tentativa de suprir a necessidade de potência reativa na linha da barra “R” e eliminar a ocorrência de sobre-cargas, já que a barra “S” possui um excedente de potência reativa capacitiva que poderia ser utilizada para compensação. Observando a Figura 4.34, conclui-se que o intento foi bem sucedido e o fluxo de potência reativa indutiva através da linha da barra “R” foi eliminado. No entanto, não houve redução apenas da potência reativa, havendo também uma redução da potência ativa. Aliás, a maior parte da potência ativa e reativa passou a fluir pela linha da barra “S”, o que pode comprometer sua capacidade de atender as cargas a ela associadas. No caso “C” foi utilizado o dispositivo proposto para acoplar as linhas, de forma a obter apenas o fluxo de potência reativa necessário para compensar as necessidades da barra “R” sem permitir um fluxo de potência ativa e sem comprometer o carregamento da barra “S”. A Figura 4.35 mostra o resultado da simulação. Observe que neste caso o fluxo de potência ativa entre a linha da barra “S” e a linha da barra “R” foi muito reduzido em relação ao caso anterior e se aproximou de zero, que é eventualmente atingido devido à natureza discreta do controlador. Note que houve fluxo de potência reativa tanto indutiva quanto capacitiva de acordo com a necessidade da carga e que a compensação de potência reativa foi muito eficaz mantendo a potência reativa que flui através da linha da barra “R” muito próxima de zero.

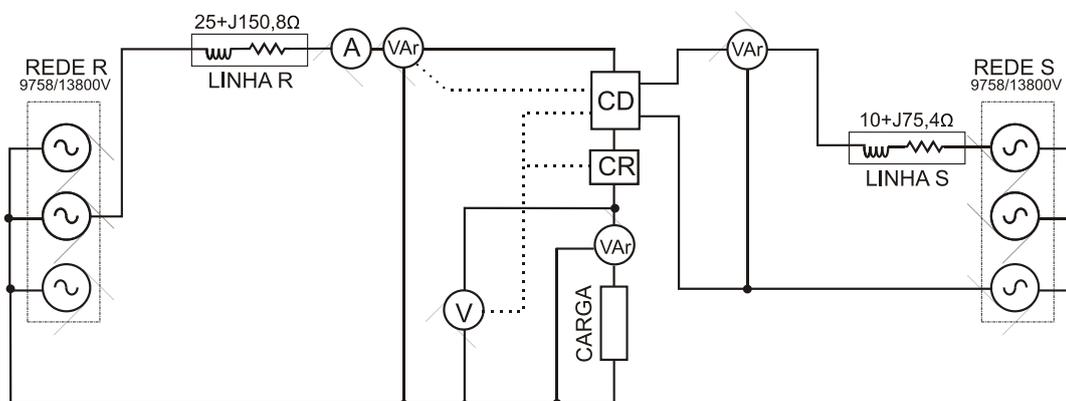


Figura 4.32 - Diagrama esquemático do modelo com duas barras e controlador de fluxo.

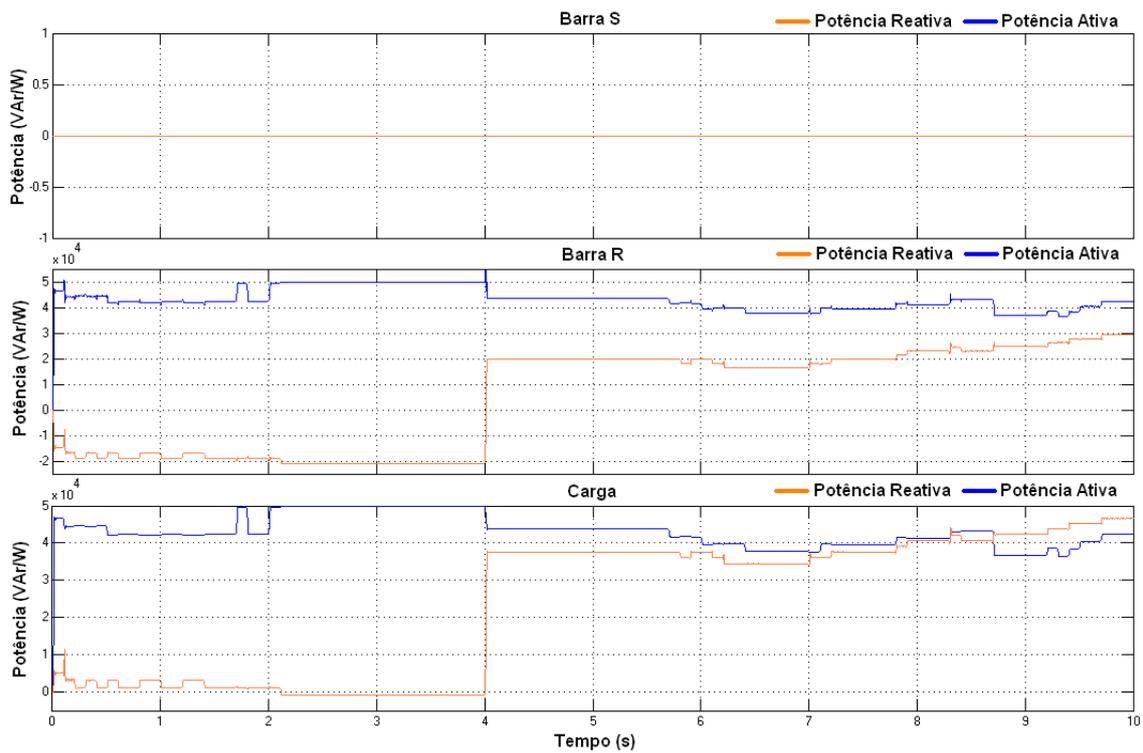


Figura 4.33 - Fluxo nas Barras desacopladas e sem controlador de fluxo.

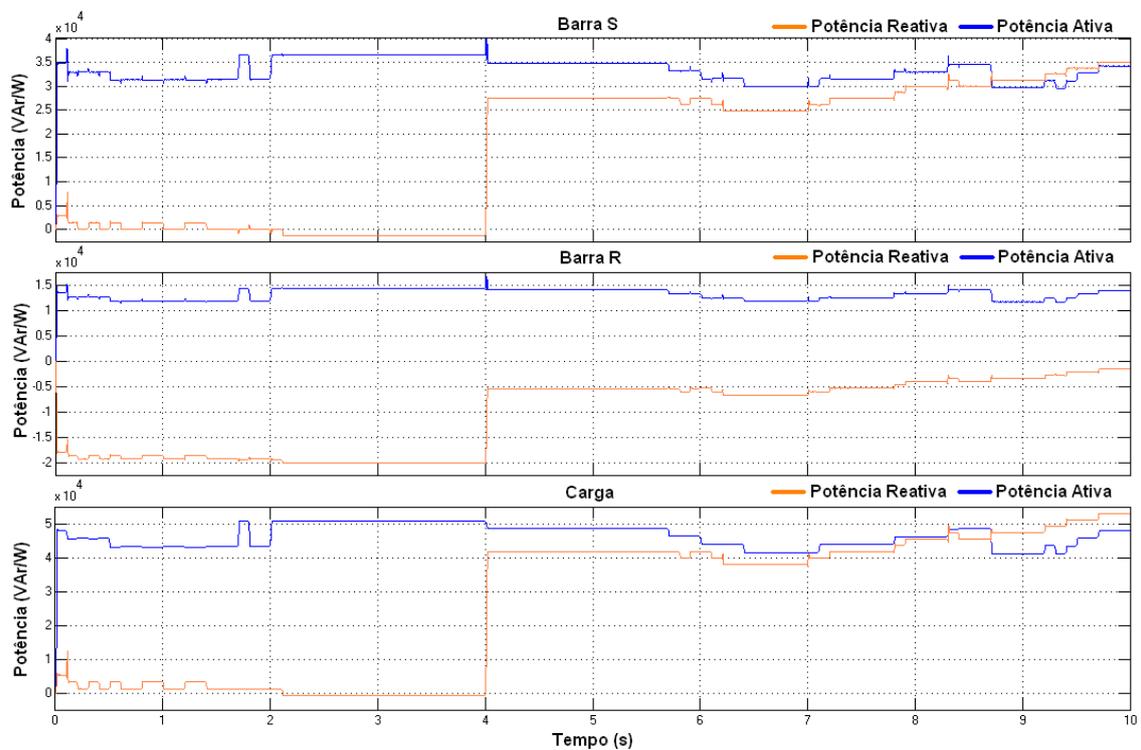


Figura 4.34 - Fluxo com barras acopladas e sem controlador de fluxo.

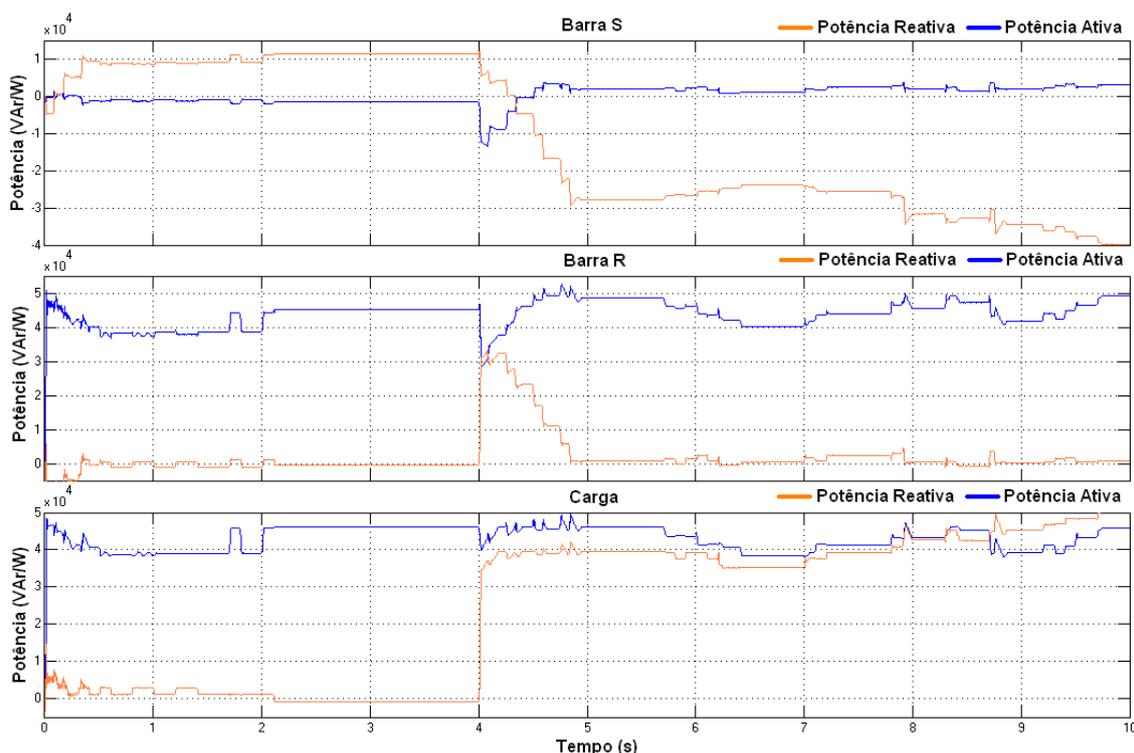


Figura 4.35 - Fluxo com barras acopladas através do controlador de fluxo.

4.5 Conclusões

Neste capítulo foram apresentados 4 dispositivos para compensação de reativos e controle da tensão com diferentes funcionalidades e desempenhos. Foram também realizadas diversas simulações que demonstraram a funcionalidade das propostas. Os resultados obtidos foram satisfatórios. Assim, eles constituem alternativas viáveis para utilização em sistemas de potência. As principais características são comuns a todos os dispositivos propostos já que eles utilizam a mesma arquitetura básica e são listadas a seguir.

- Os dispositivos propostos podem utilizar qualquer tipo de chave disponível no mercado, com destaque para os tiristores. Isto lhe confere uma vantagem em relação a outras soluções autocomutadas como por exemplo o UPFC que demanda chaves totalmente controladas, que são mais caras;
- Devido as suas conformações nenhuma das chaves utilizadas nos dispositivos propostos precisa suportar simultaneamente a tensão da rede e a corrente da carga. Assim, utilizam-se chaves mais baratas;

- O dispositivo proposto pode ser utilizado tanto para o controle do fluxo de potência reativa como para o controle da tensão no barramento onde ele está instalado.

5 Protótipo do Banco de Capacitores Ajustável

Para corroborar os resultados das simulações foi realizada a construção física (protótipo) do banco de capacitores ajustável abordado no capítulo 3.

A construção do protótipo se iniciou com a definição dos objetivos e parâmetros iniciais do projeto.

1. Objetivos:

- Montar um protótipo que utilize o mesmos algoritmos e conceitos utilizados nas simulações em pequena escala, incorporando sistema de controle e medição;
- Montar um sistema de teste de baixa potência simulando uma subestação (SE), linha de transmissão, cargas, elementos de compensação e o dispositivo proposto.
- Utilizar dados reais obtidos a partir de um sistema de automação de subestações de uma concessionária para modelar o comportamento da carga no sistema de teste.
- Obter resultados experimentais aderentes com os resultados obtidos em simulações, para validar a teoria.

2. Parâmetros do protótipo:

- Corrente máxima drenada da rede elétrica 3A;
- Tensão nominal 220V;
- Capacidade de medição de tensão, corrente com 1% de exatidão e potências ativa, reativa e fator de potência com 2% de exatidão;
- Capacidade de medição de energia com 2% de exatidão integralizada a cada minuto;
- Capacidade para fornecer até 2000VAR de potência reativa capacitiva com degraus de 6,25%;
- Saída de comunicação serial RS232 para comunicação com computador que executa um software de monitoramento, que faz o registro em banco de dados de todas as leituras a cada minuto.

3. Parâmetros do sistema simulado:

- Cargas ativas e reativas simuladas discretamente com resolução de 32 degraus e controladas separadamente;
- Potência nominal da carga 1.031VA;
- Impedância da linha simulada através de elementos passivos.

5.1 Metodologia

O sistema de teste foi dividido em quatro módulos principais e um *software* de aquisição, controle e armazenamento:

1. Módulo de carga emulada - O objetivo é emular uma carga com comportamento similar a carga utilizada nas simulações numéricas;
2. Módulo de medição e controle - O objetivo é realizar a medição das tensões, correntes e potências no sistema de teste e utilizar estas medições para controlar o compensador de potência reativa de forma a obter uma redução nas perdas do sistema compatíveis com os resultados das simulações;
3. Módulo de compensação - O objetivo é prover a carga modulada toda a energia reativa que ela demandar durante todo o período de tempo do experimento, reduzindo a corrente drenada da rede e conseqüentemente as perdas.
4. Módulo de impedância da linha - O objetivo é simular os parâmetros da linha utilizada nas simulações numéricas, para permitir avaliar as reduções das perdas e a regulação de tensão do sistema;
5. *Software* de aquisição, controle e armazenamento - Este *software* tem por objetivo controlar o módulo de carga modulada determinando o consumo de energia ativa e reativa durante todo o experimento. O *software* também obtém dados de medição do módulo de medição e controle e os armazena em um banco de dados relacional para posterior análise.

5.2 Módulo de carga emulada.

O módulo de carga emulada é um dispositivo controlado por software, que utiliza uma porta serial como meio de comunicação. O software de controle é executado em um microcomputador e o comportamento da carga desejado é armazenado em um banco de dados que pode ser alterado conforme a necessidade. Os parâmetros da carga, parte real e imaginária podem ser ajustados separadamente e podem assumir perfis de comportamento distintos. A carga emulada é dividida em dois blocos distintos, um é responsável pela demanda de potência ativa e o outro pela demanda de potência reativa.

As Figuras 5.1 e 5.2 mostram o diagramas esquemáticos dos blocos de carga ativa e reativa, respectivamente.

Observe que o bloco de potência ativa utiliza lâmpadas incandescentes como elemento de carga. A escolha deste elemento foi motivada pelo custo, disponibilidade e facilidade de uso e montagem. Já para os elementos indutivos utilizaram-se reatores eletromagnéticos para lâmpadas fluorescentes, devido aos mesmos motivos. Todas as lâmpadas e reatores utilizados são idênticos, ou seja, mesma tensão e potência nominais. Comutando adequadamente as cinco chaves mostradas em cada bloco é possível obter até 32 níveis para potências ativa e reativa independentemente, o que resulta em até 1.024 combinações de potência.

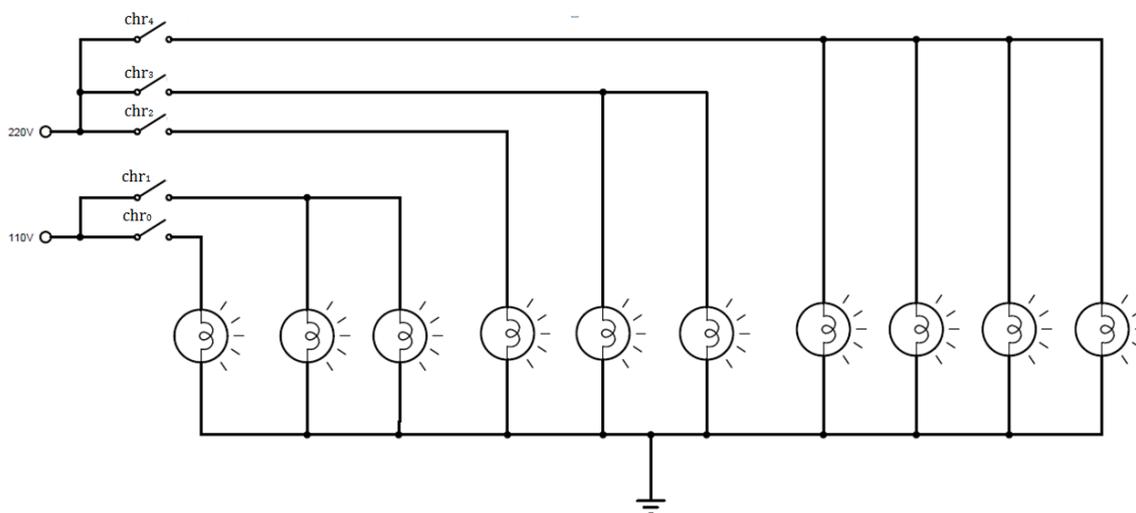


Figura 5.1 - Bloco de potência ativa da carga emulada.

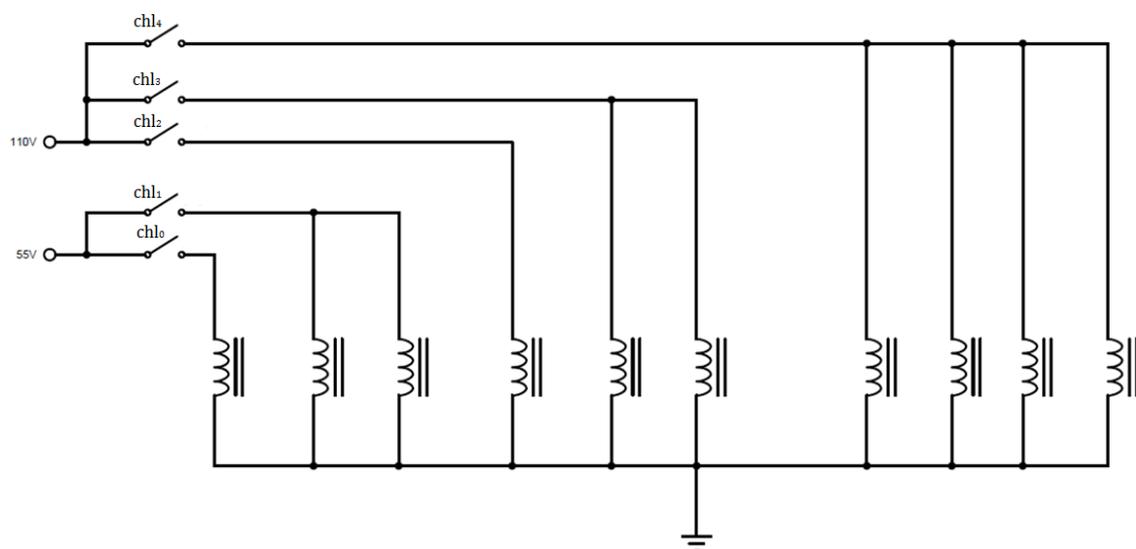


Figura 5.2 - Bloco de potência reativa da carga emulada.

Para se obter todos os níveis de potência desejados com um número reduzido de cargas idênticas, foi necessário utilizar níveis de tensão diferentes. Assim, nos experimentos realizados foram utilizados três níveis de tensão, 220V, 110V e 55V, obtidos a partir de um transformador isolador com potência nominal de 2,2kVA com três derivações. O nível mais baixo de potência ativa é obtido quando apenas a chave chr_0 da Figura 5.1 é fechada, neste momento uma carga resistiva é alimentada com metade da tensão nominal que é 220V e demanda 1/4 da potência nominal. De acordo com a filosofia de emulação binária o fechamento da chave chr_1 deve demandar o dobro da potência demandada com o fechamento da chave chr_0 , observe que o fechamento da chave chr_1 alimenta duas cargas com metade de suas tensões nominais o que resulta em metade da potência nominal, ou seja, o dobro do caso anterior. Seguindo a mesma filosofia o fechamento da chave chr_2 deve demandar o dobro da potência do fechamento da chave chr_1 o que de fato ocorre pois uma carga é alimentada com sua tensão nominal e demanda potência nominal. O fechamento da chave chr_3 alimenta duas cargas em paralelo com suas tensões nominais demandando o dobro da potência do caso anterior e finalmente o fechamento da chave chr_4 alimenta quatro cargas com suas tensões nominais, demandando quatro vezes a potência nominal, ou seja, o dobro do caso anterior. A mesma filosofia é adotada para as cargas indutivas, só que neste a tensão nominal é de 110V. As Figuras 5.3 e 5.4 mostram a carga emulada com seu respectivo controle e o transformador de alimentação utilizado, respectivamente. Para se obter nível desejado de carga ativa e reativa, basta comutar corretamente as chaves, a fim de energizar apenas o conjunto de elementos necessários. Para se determinar que chaves devem ser ligadas ou desligadas utiliza-se uma lógica binária onde cada chave impõe um degrau de carga de acordo com:

$$P = p_0(chr_n \times 2^n + chr_{n-1} \times 2^{n-1} + \dots + chr_0), \quad (5.1)$$

$$Q = q_0(chl_n \times 2^n + chl_{n-1} \times 2^{n-1} + \dots + chl_0), \quad (5.2)$$

em que:

P – Potência ativa demandada pela carga;

Q – Potência reativa demandada pela carga;

p_0 – Potência ativa demandada por um elemento de carga ligado na menor tensão;

q_0 – Potência reativa demandada por um elemento de carga ligado na menor tensão;

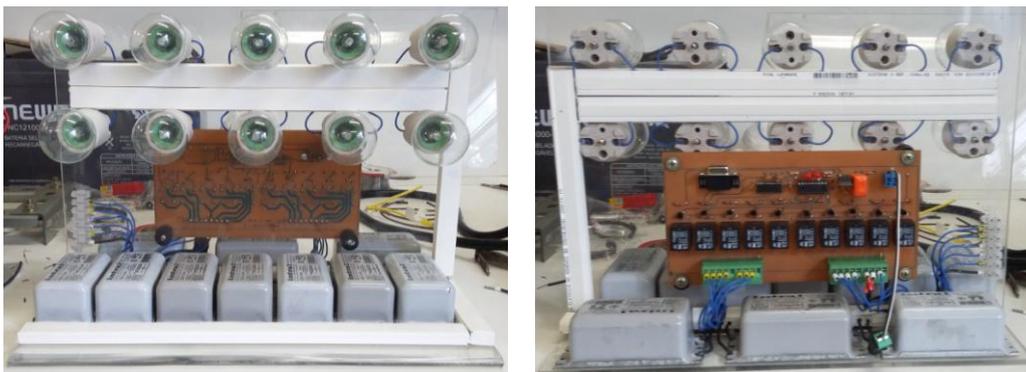


Figura 5.3 - Carga emulada.

A comutação das chaves é realizada através de um dispositivo de controle desenvolvido para trabalhar em conjunto com um *software* que permite impor a carga correta no momento desejado.

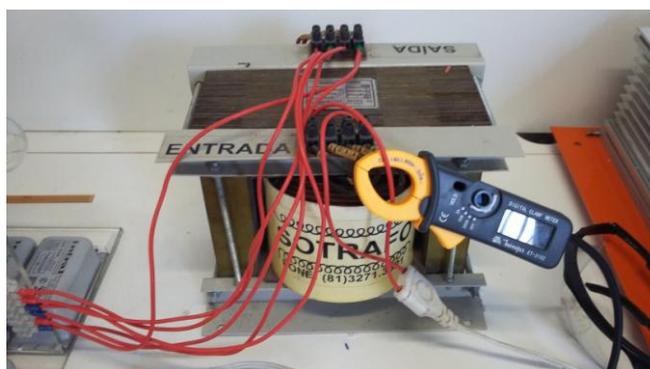


Figura 5.4 - Transformador de alimentação.

A Figura 5.5 mostra o diagrama esquemático do dispositivo controlador de carga. Observe que no projeto foram utilizados relés que atuam como chaves, acionados por transistores que funcionam como *buffers*. Estes transistores são controlados por um microcontrolador PIC16F648A, que é o cérebro do dispositivo e responsável por estabelecer a comunicação serial com o computador que executa o software de controle, interpretando e executando os comandos recebidos. Para tanto foi necessário escrever um *firmware* e confeccionar uma placa de circuito impresso. A Figura 5.6 mostra o diagrama de blocos deste microcontrolador que foi selecionado devido ao seu baixo custo e grande disponibilidade no mercado nacional. As Figuras 5.7 e 5.8 mostram o modelo 3D do dispositivo e o dispositivo montado, respectivamente.

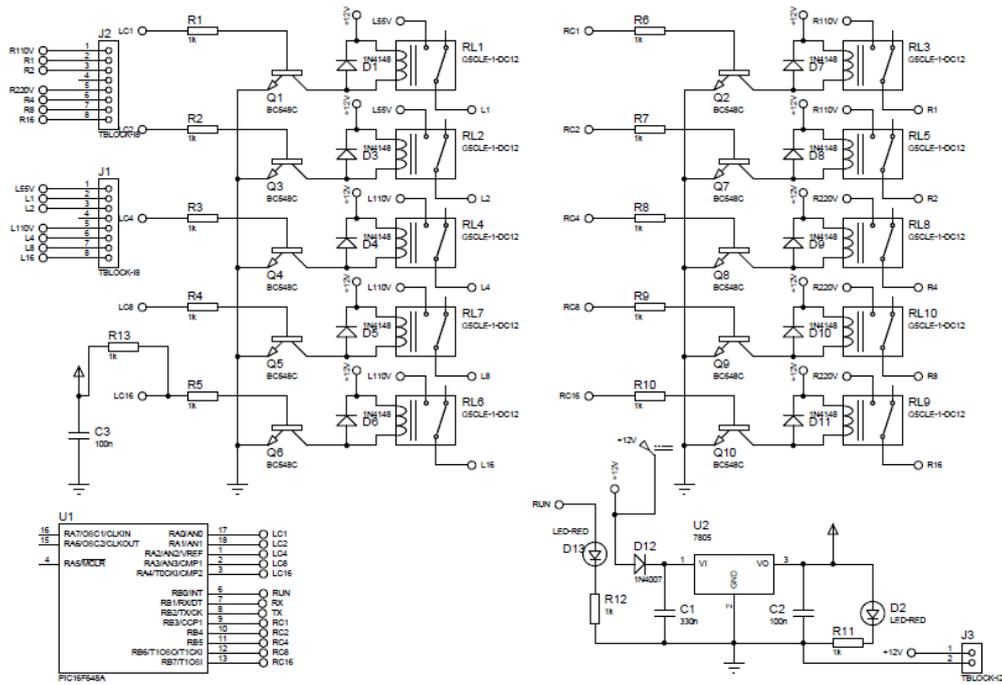


Figura 5.5 - Dispositivo controlador de carga.

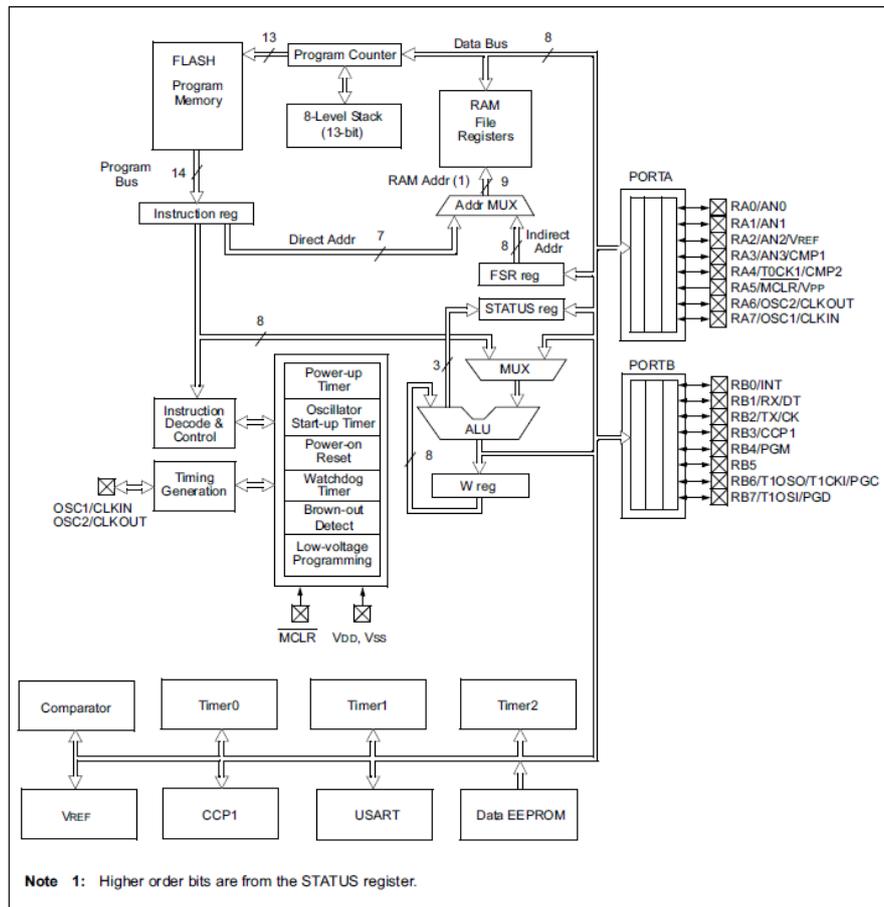


Figura 5.6 - Diagrama de blocos do PIC16F648A (MICROCHIP TECHNOLOGY INC., 2003).

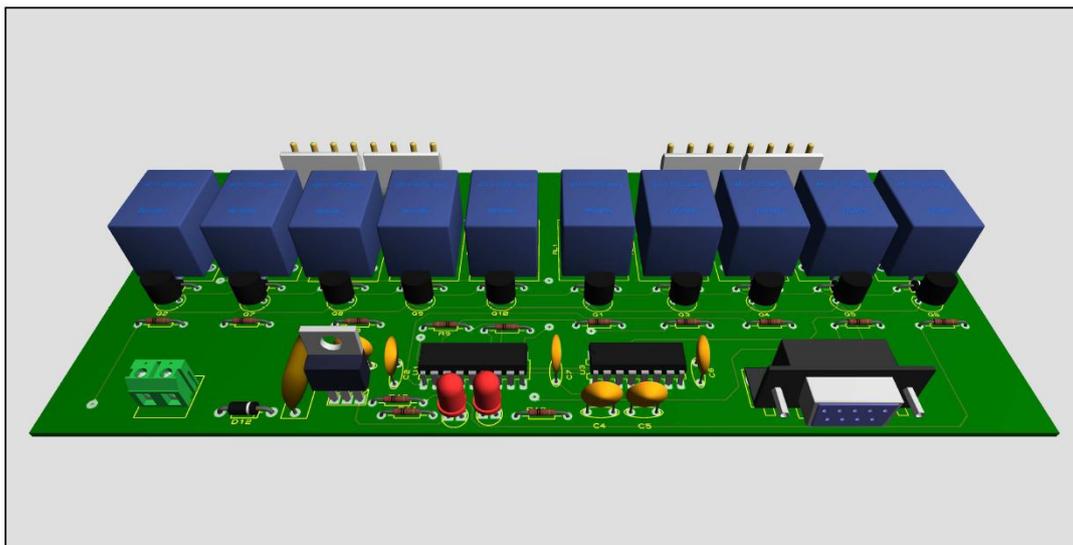


Figura 5.7 - Modelo 3D do controlador de carga.

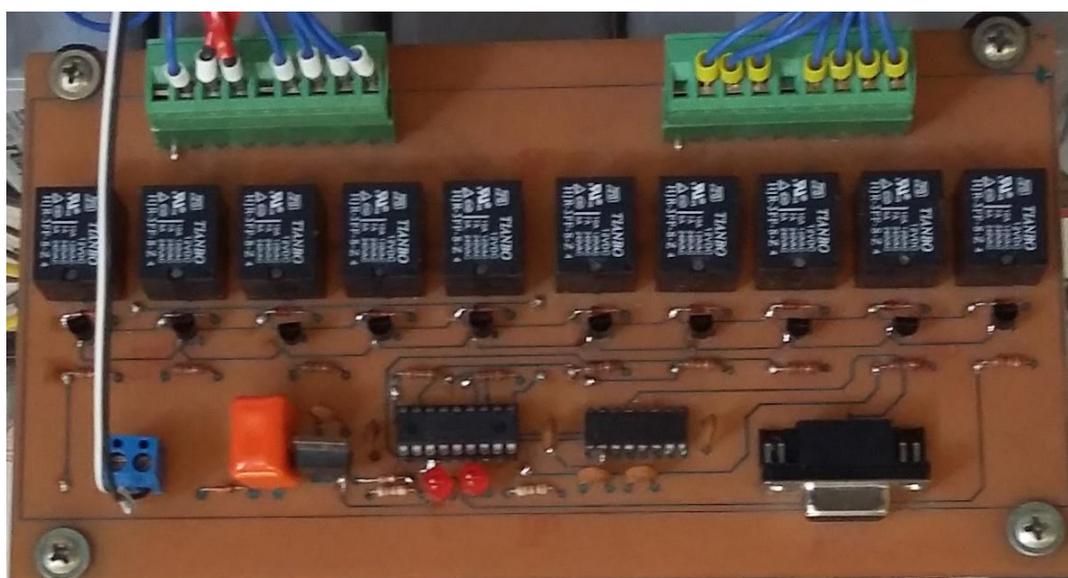


Figura 5.8 - Dispositivo controlador de carga montado.

5.3 Módulo de medição e controle

O módulo de medição e controle é o dispositivo responsável por medir tensão, corrente e potência ativa de forma contínua e a partir desses dados calcular o fator de potência, a potência reativa e a energia ativa. Estes dados são então utilizados pelo módulo para executar uma das lógicas de controle desenvolvidas e discutidas no Capítulo 3, acionando saídas que atuam sobre um conjunto de chaves que compõe o módulo compensador. Além disso, este módulo envia as leituras realizadas

constantemente para o *software* de controle de carga que as armazena em um banco de dados para posterior análise. As leituras de tensão e corrente deste módulo utilizam um algoritmo baseado na definição de valor eficaz, ou seja, realiza uma medição dita eficaz verdadeira (true RMS). As equações a seguir definem o método de cálculo utilizado.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n V(i)^2}{n}}, \quad (5.3)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n I(i)^2}{n}}, \quad (5.4)$$

em que:

V_{rms} – Tensão eficaz;

I_{rms} – Corrente eficaz;

n – Número de amostras tomadas a intervalos iguais durante o ciclo;

V – Tensão instantânea em cada momento de amostragem;

I – Corrente instantânea em cada momento de amostragem.

Foi utilizada neste módulo uma taxa de amostragem de 32 amostras por ciclo, ou seja, uma amostra é realizada a cada 520,83 μ s. Esta taxa de amostragem está de acordo com o PRODIST, módulo 8, seção 2.6.1.2, que define a taxa de amostragem mínima para equipamentos de medição em 16 amostras por ciclo. Para a medição de potência ativa utilizou-se um método similar ao empregado para as medições de tensão e corrente, e definido pela equação a seguir.

$$P = \frac{\sum_{i=0}^n I_i * V_i}{n}, \quad (5.5)$$

em que,

P – Potência ativa.

Os valores de tensão eficaz, corrente eficaz e potência ativa utilizados pelo algoritmo de controle e transmitidos para o software de armazenamento, são uma média de dez leituras consecutivas, e a utilização desta média tem por objetivo minimizar o ruído aleatório. Assim, obteve-se uma precisão nas medidas de tensão e corrente de 0,5% e

de 1% para a medição da potência. A potência reativa e o fator de potência são calculados a partir da definição de acordo com as equações a seguir.

$$S = V_{rms} * I_{rms} \quad (5.6)$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (5.7)$$

$$FP = \frac{P}{S} \quad (5.8)$$

em que,

S – Potência aparente;

Q – Potência reativa;

FP – Fator de potência;

Para o cálculo da energia ativa consumida utilizou-se a potência ativa integralizada a intervalos de um segundo, conforme a equação a seguir:

$$E_A = \sum_{i=0}^t \frac{P_i}{3600} \quad (5.9)$$

em que,

E_A – Energia ativa consumida em Wh dentro de um intervalo de tempo;

P_i – Potência ativa medida a cada segundo;

t – O intervalo de tempo em segundos.

Para realizar todas as medições e cálculos o módulo de medição e controle foi projetado utilizando-se três microcontroladores que trabalham em paralelo, realizando simultaneamente, leituras, cálculos e comandando as chaves do módulo compensador. As Figuras 5.9, 5.10 e 5.11 mostram o diagrama esquemático do módulo de medição e controle. Na Figura 5.9, vê-se os três microcontroladores (U1, U8 e U7) da Microchip, PIC16F876 (MICROCHIP TECHNOLOGY INC., 1999), PIC12F629 e PIC12F675 (MICROCHIP TECHNOLOGY INC., 2003) que são os cérebros do dispositivo. Vê-se também um *display* de cristal liquido LM016L (LCD1) (HITACHI LTD. CORPORATION, 1998), onde são exibidos todas as grandezas medidas e calculadas e o modo de operação do controle (ativo/desativado). Também são utilizados três botões que permitem mudar as grandezas exibidas e ativar ou desativar o controle. Na Figura

5.10 vê-se os amplificadores operacionais (U2:A, U2:B e U2:C) que fazem parte do circuito integrado TL074 (ST MICROELECTRONICS GROUP OF COMPANIES, 2001) utilizado no condicionamento dos sinais de corrente e tensão. Para gerar a tensão simétrica necessária para alimentar os amplificadores operacionais utilizou-se o MAX232 (U3) (MAXIM INTEGRATED PRODUCTS, 2003) que converte a tensão de alimentação simples de 5V em uma tensão simétrica de +10V e -10V. Observe também a presença de uma chave analógica bidirecional CD4066 (U5) (TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED, 2003) que é utilizada para mudança automática do calibre, o que permite melhorar a precisão da medição de corrente para valores abaixo de 1A. Isto se faz necessário, pois o dispositivo foi projetado para medir correntes de até 10A e de acordo com (MEDEIROS FILHO, 1981) para melhorar a precisão das medidas é necessário realiza-las no quarto final da escala, ou seja, o mais próximo possível do fundo de escala. Assim, para correntes abaixo de 1A a imprecisão e os ruídos poderiam comprometer as leituras e a interpretação dos resultados, mas com a utilização de uma mudança de calibre o fundo de escala passa a ser de 1A, melhorando significativamente a precisão das leituras e a confiabilidade dos resultados.

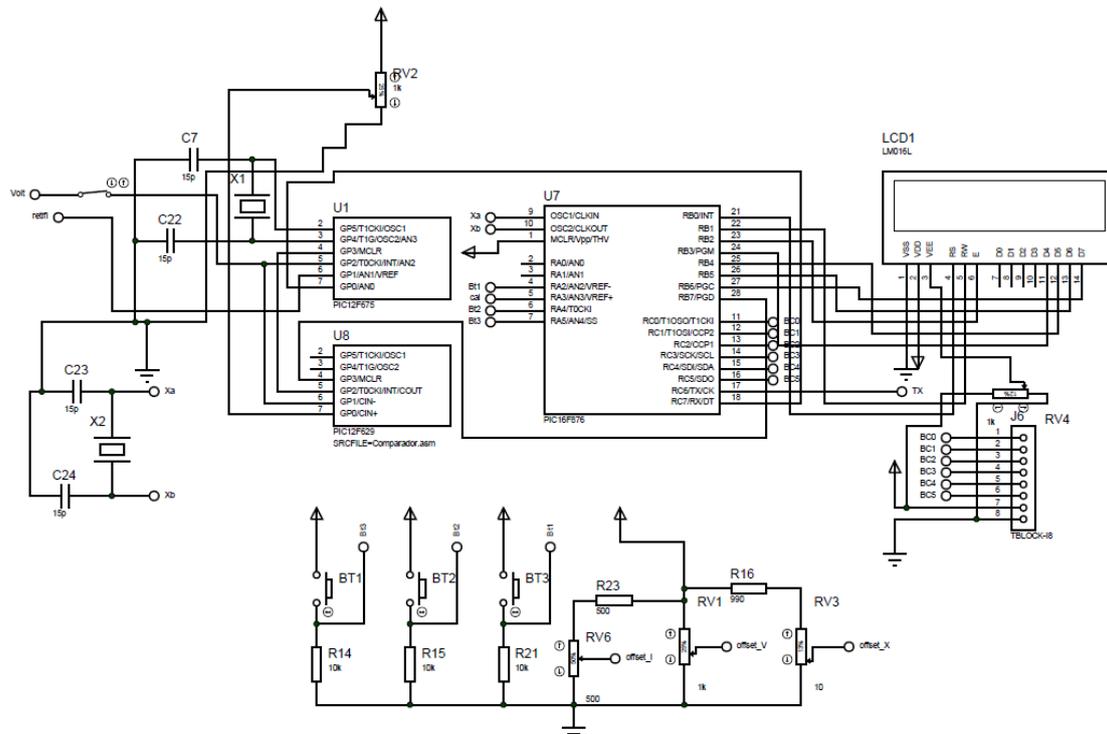


Figura 5.9 - Diagrama esquemático do módulo de medição e controle parte 1.

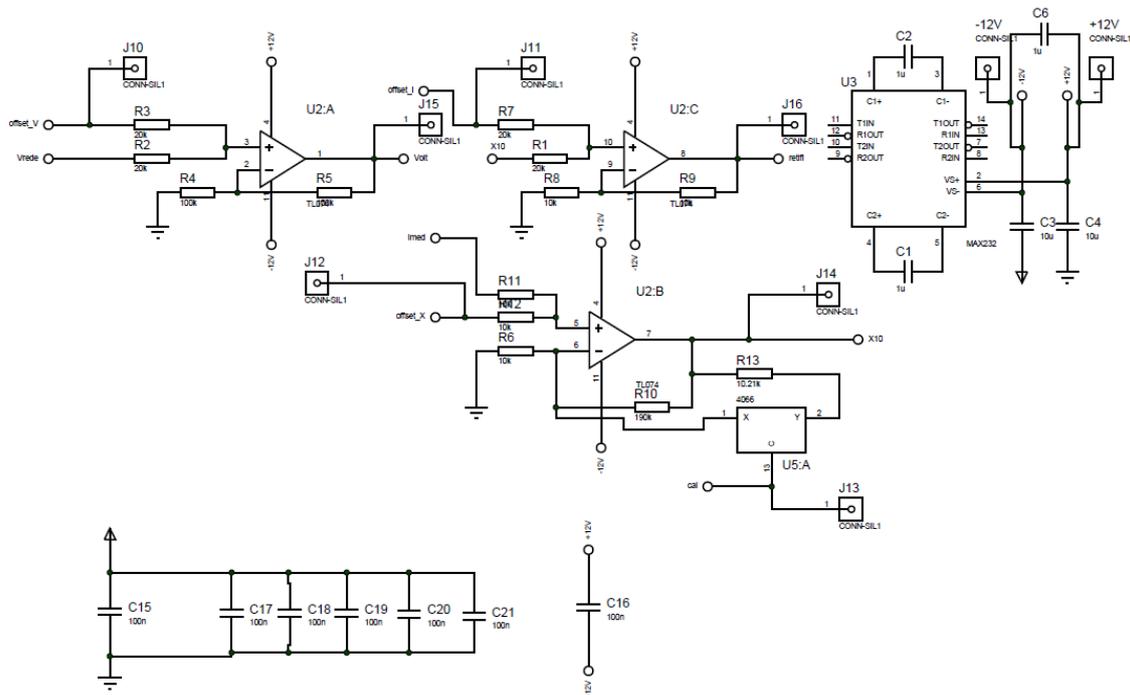


Figura 5.10 - Diagrama esquemático do módulo de medição e controle parte 2.

Cada um dos microcontroladores executa um *software* embarcado (*firmware*) desenvolvido na linguagem de programação mais adequada as necessidades de desempenho e funcionalidade. Para o PIC12F675 e PIC12F629 os *firmwares* foram desenvolvidos em linguagem *assembly*, pois ela permite obter o maior desempenho possível, necessário para capturar e processar os sinais de tensão e corrente oriundos do circuito condicionador. Já para o PIC16F876 o *firmware* foi desenvolvido em linguagem *Pascal*, pois neste caso não ha necessidade de desempenho máximo e a vasta biblioteca de funções já prontas reduzem significativamente o tempo de desenvolvimento. Estes *firmwares* foram exaustivamente testados ("debugados") e validados antes da construção do dispositivo físico, utilizando-se um *software* de simulação bastante utilizado e consagrado, o ISIS pertencente ao pacote de desenvolvimento chamado PROTEUS da empresa LABCENTER. Para cada dispositivo projetado foi elaborado um modelo onde tanto o *firmware* como as funcionalidades foram testadas. A Figura 5.11 mostra a tela principal do ISIS com o modelo do módulo de medição e controle.

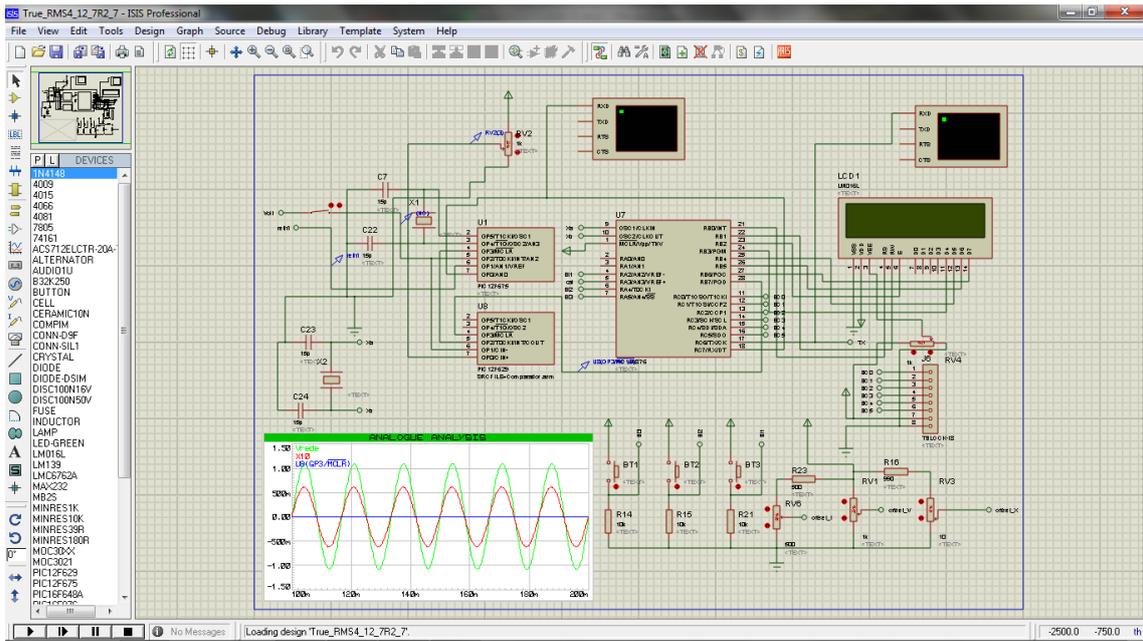


Figura 5.11 - Tela principal do *software* de simulação ISIS.

O *software* ISIS trabalha em conjunto com o *software* ARES que foi utilizado para o projeto de placa de circuito impresso (PCI), onde o dispositivo foi montado. Na Figura 5.12 é mostrada a tela principal do ARES. A Figura 5.13 mostra o modelo 3D do módulo de medição e controle e a Figura 5.14 mostra o módulo de medição e controle montado.

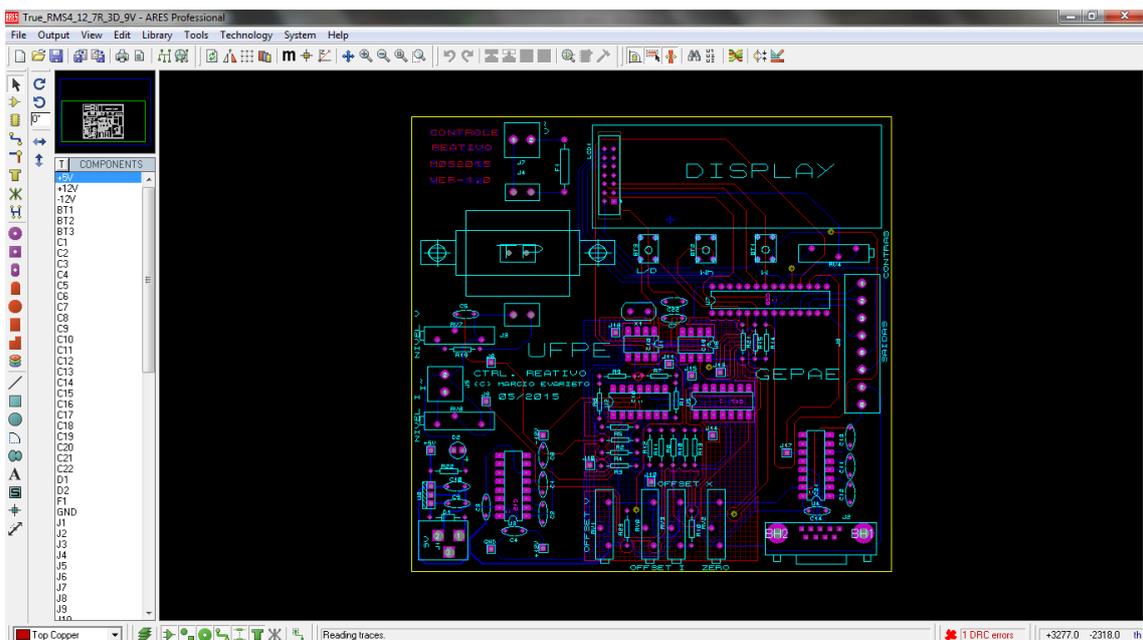


Figura 5.12 - Tela principal do *software* de projeto de PCI ARES.

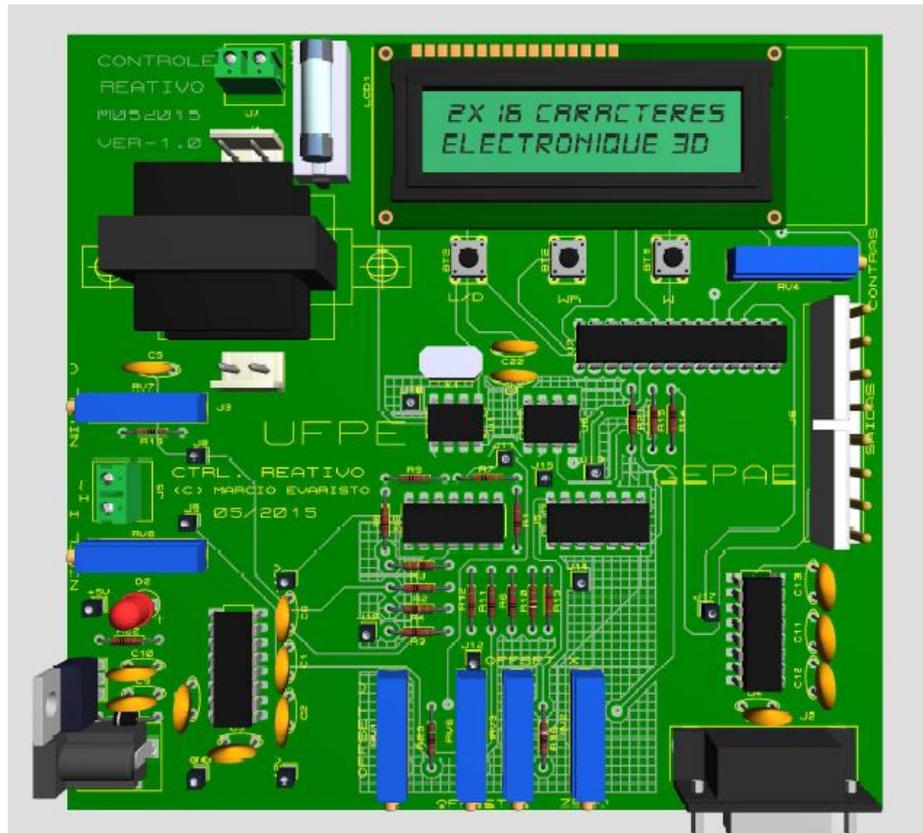


Figura 5.13 - Modelo 3D do módulo de medição e controle.

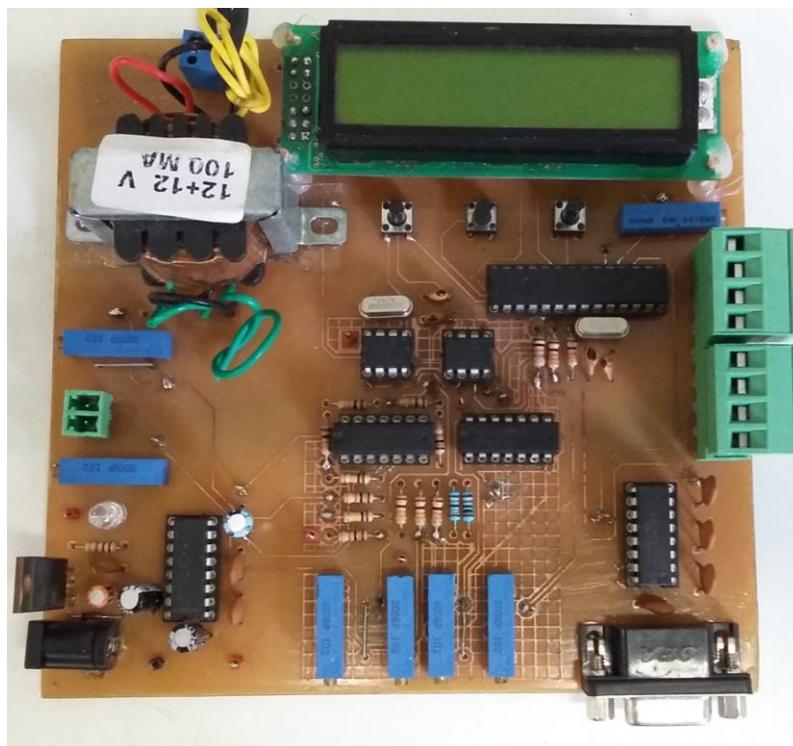


Figura 5.14 - Módulo de medição e controle.

O módulo de medição e controle possui uma interface homem/máquina (IHM) própria o que lhe permite trabalhar independentemente de outros. Nele através do display de cristal líquido (LCD) é possível visualizar as leituras instantâneas de tensão, corrente, potência ativa e fator de potência, ou utilizando os botões de seleção alternar a tela e exibir a energia ativa consumida e o custo em reais dessa energia. A Figura 5.15 mostra as duas telas simultaneamente.

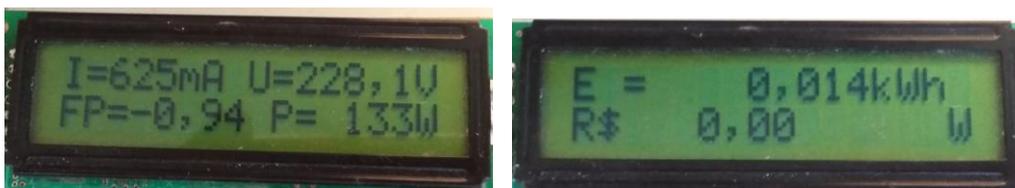


Figura 5.15 - Telas de informação do módulo de medição e controle.

O módulo de medição e controle possui duas entradas, uma de tensão e outra de corrente isoladas da rede de alimentação através de um transformador de potencial (TP) e um transformador de corrente (TC), respectivamente. O TP está incorporado na própria PCI do módulo enquanto que o TC utilizado é do tipo núcleo dividido, ou seja, no formato de uma garra e é acoplado através de um conector existente na PCI. A Figura 5.16 mostra o TP e TC utilizados respectivamente. Além dessas entradas o módulo possui duas saídas: uma envia informações para o computador que executa o *software* de controle da carga e armazenamento e a outra envia comandos para o módulo de compensação. A Figura 5.17 mostra o TC conectado a PCI e as saídas.



Figura 5.16 - TP e TC utilizados pelo módulo de medição e controle.

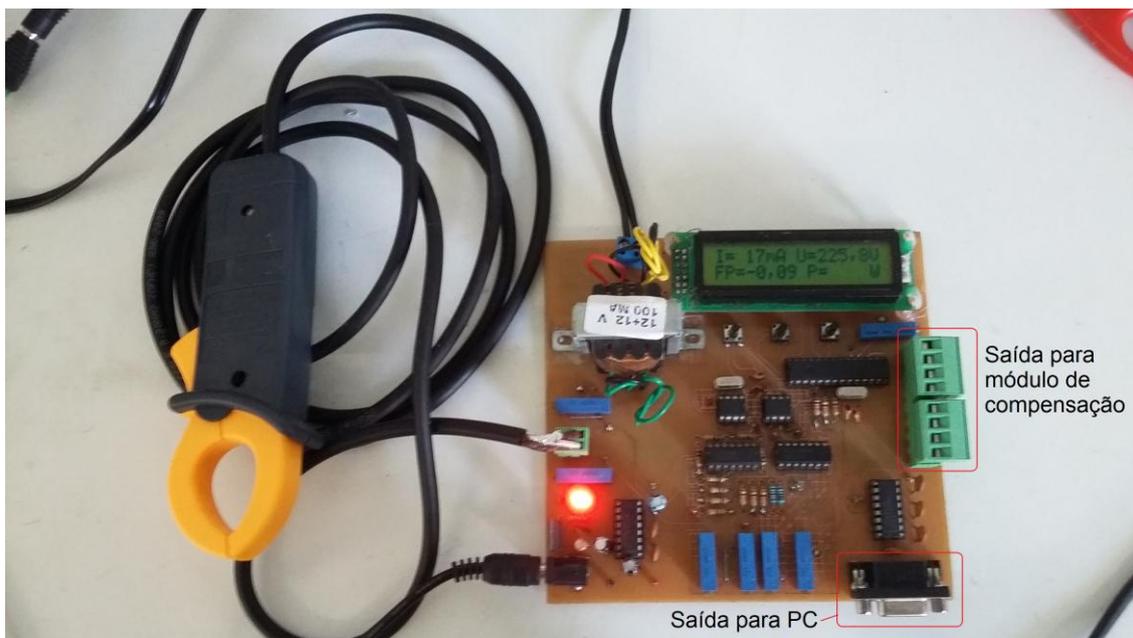


Figura 5.17- Garra de corrente conectada e saídas do módulo de medição e controle.

5.4 Módulo de compensação

O módulo de compensação é composto por transformadores de decremento, fonte de reativo (capacitor) e placa de acionamento. O módulo de compensação é responsável por fornecer a carga a energia reativa que ela demandar, minimizando a corrente drenada da fonte e consequentemente reduzindo as perdas. A Figura 5.18 mostra o diagrama esquemático deste módulo.

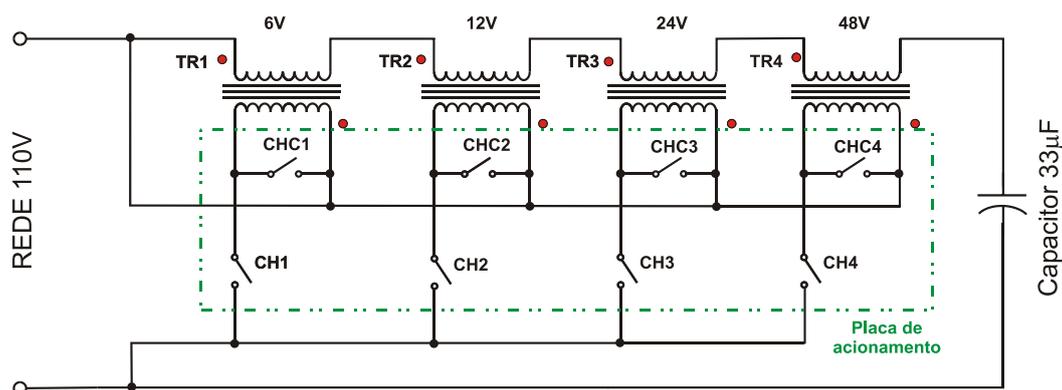


Figura 5.18 - Diagrama esquemático do módulo de compensação.

Observe a presença de quatro transformadores de decremento com tensões nominais de 6, 12, 24 e 48V e corrente de 2A. Este valores foram escolhidos por serem valores comerciais e disponíveis. A Figura 5.19 mostra o módulo do compensador com os

transformadores de decremento, capacitor e placa de acionamento. É importante observar que dois dos transformadores mostrados então em série, para se obter a tensão de 48V.

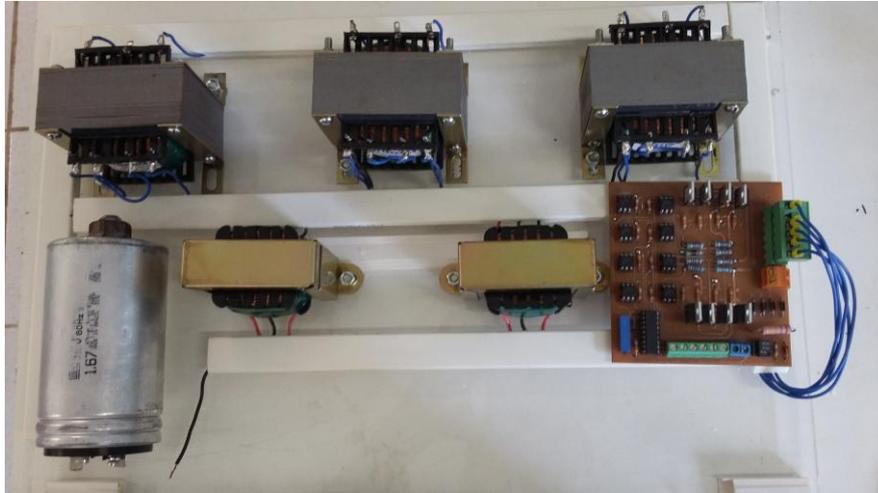
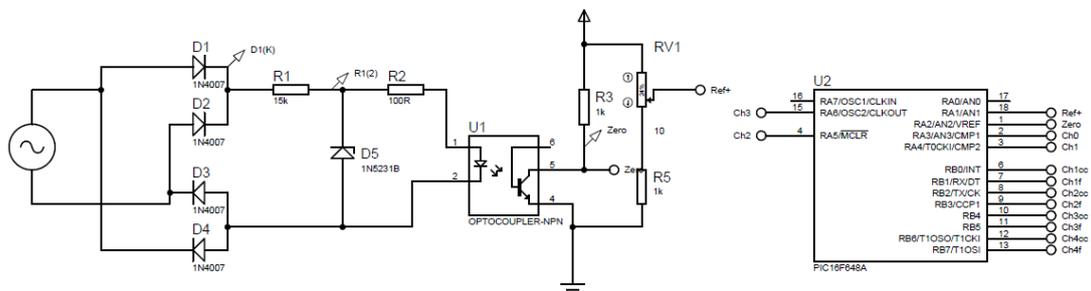


Figura 5.19 - Módulo compensador.

A Figura 5.20 mostra o diagrama esquemático da placa de acionamento. Pode-se observar que no projeto foram utilizados os Triacs BT139-600E (NXP SEMICONDUCTORS, 2013) como chaves bidirecionais que são acionadas por *drivers* optoisolados da linha MOC30XX (FAIRCHILD SEMICONDUCTOR CORPORATION, 2005) e estes são controlados pelo microcontrolador PIC16F628A, que implementa a lógica de disparo, tempo morto e passagem pelo zero. Para este microcontrolador foi desenvolvido um *firmware* em linguagem *assembly*. A Figura 5.21 e 5.22 mostram o modelo 3D e a placa de acionamento respectivamente.



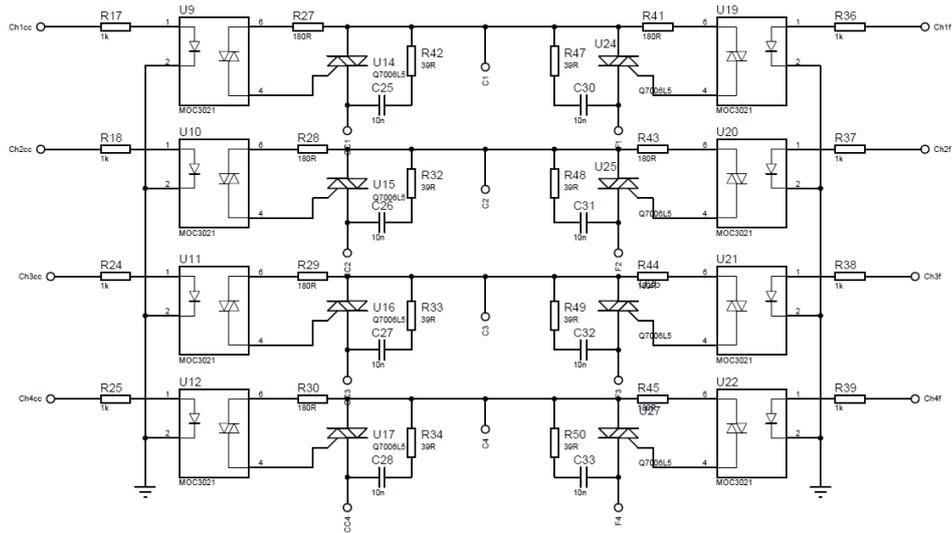


Figura 5.20 - Diagrama esquemático da placa de acionamento.

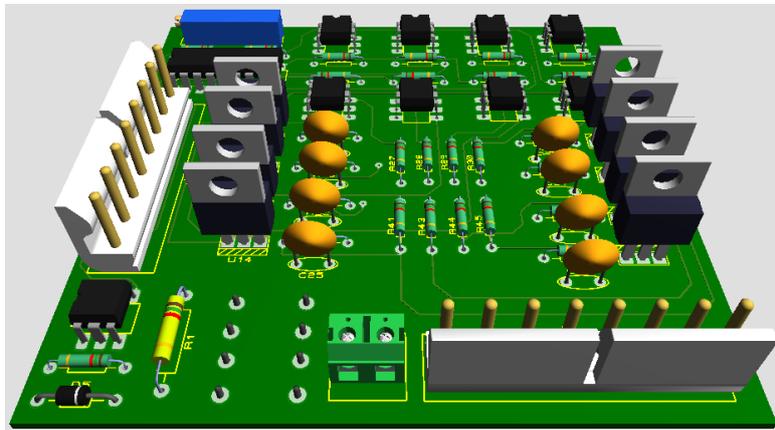


Figura 5.21 - Modelo 3D da placa de acionamento do módulo compensador.

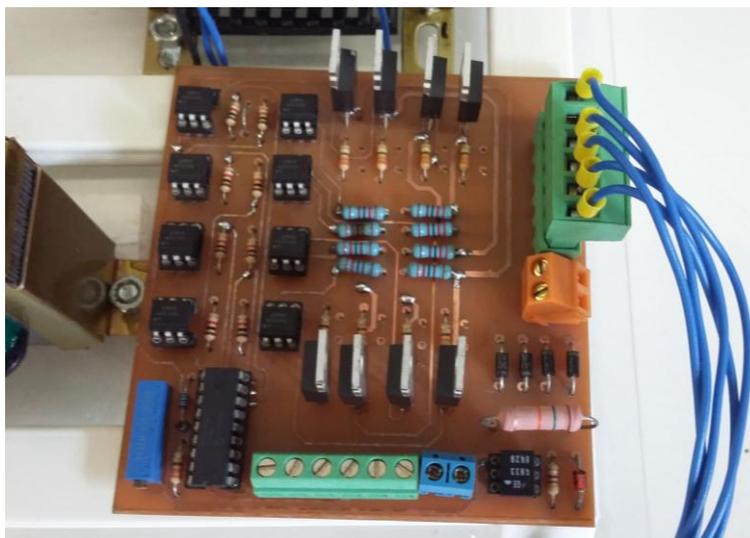


Figura 5.22 - Placa de acionamento do módulo compensador.

5.5 Módulo de impedância de linha

O módulo de impedância de linha é composto apenas por elementos passivos resistores e indutores, cujo o objetivo é simular as características de uma linha de distribuição. Os parâmetros do módulo foram definidos baseados no comportamento da linha de distribuição utilizada nas simulações numéricas da seção 3.2, cujo o diagrama esquemático do modelo numérico é mostrado na Figura 3.16. A impedância da linha utilizada no experimento foi de $48+j16\Omega$. A Figura 5.23 mostra os resistores e indutores utilizados para representar a impedância da linha.

5.6 Software de controle e armazenamento

O *software* de controle e armazenamento foi desenvolvido na linguagem de programação *Object Pascal*, que diferentemente das outras linguagens utilizadas nos módulos de controle e armazenamento, carga controlada e compensador que são procedurais, é uma linguagem orientada a objeto (CANTÚ, 2003). O compilador utilizado para gerar o código executável foi o Delphi na versão 7.0, que provê uma interface de desenvolvimento bastante amigável e de alta produtividade, além de uma vasta biblioteca de componentes. A Figura 5.24 mostra a tela principal do Delphi.



Figura 5.23 - Elementos passivos utilizados como impedância da linha de transmissão.

O software desenvolvido utiliza o banco de dados relacional Microsoft Access pertencente ao pacote de *software* Office 2007 da Microsoft, para armazenar os dados adquiridos do módulo de medição e controle, bem como armazenar os dados utilizados para gerar uma curva, através do módulo de carga controlada. A opção pelo Microsoft

Access foi motivada principalmente pela integração com os outros *softwares* do pacote Office, o que permite converter e compartilhar facilmente dados entre eles, por exemplo, uma curva de carga criada a partir de uma planilha do Microsoft Excel pode alimentar o banco de dados, bastando para tanto apenas copiar e colar.

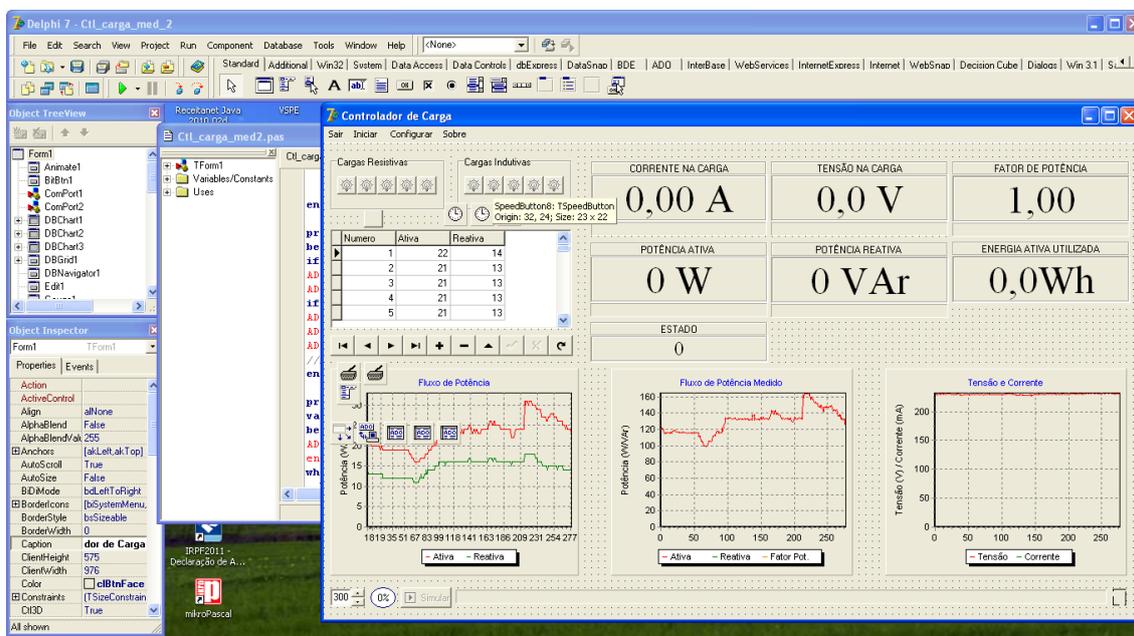


Figura 5.24 - Tela principal do compilador Delphi.

O *software* de controle e armazenamento envia dados de potência ativa e reativa simultaneamente para o módulo de carga controlada a intervalos regulares definidos pelo usuário. Ele também recebe dados enviados pelo módulo de medição e controle e os exibe em sua tela principal, além disso, os armazena no banco de dados a intervalos regulares. Os dados são recebidos em pacotes contendo tensão, corrente, potência ativa, sentido do fluxo de potência reativa e calibre. O *software* também calcula a potência reativa, energia consumida e o fator de potência e exibe de forma gráfica a tensão, corrente, potência ativa, potência reativa e fator de potência. Os dados armazenados no banco de dados são potência ativa, corrente, tensão e o sentido do fluxo de potência reativa. A Figura 5.25 mostra a tela principal do *software* desenvolvido. Caso seja necessário é possível através de botões de controle ligar ou desligar um bloco de carga ativa ou reativa de forma independente, isto é particularmente útil quando se deseja realizar um teste.

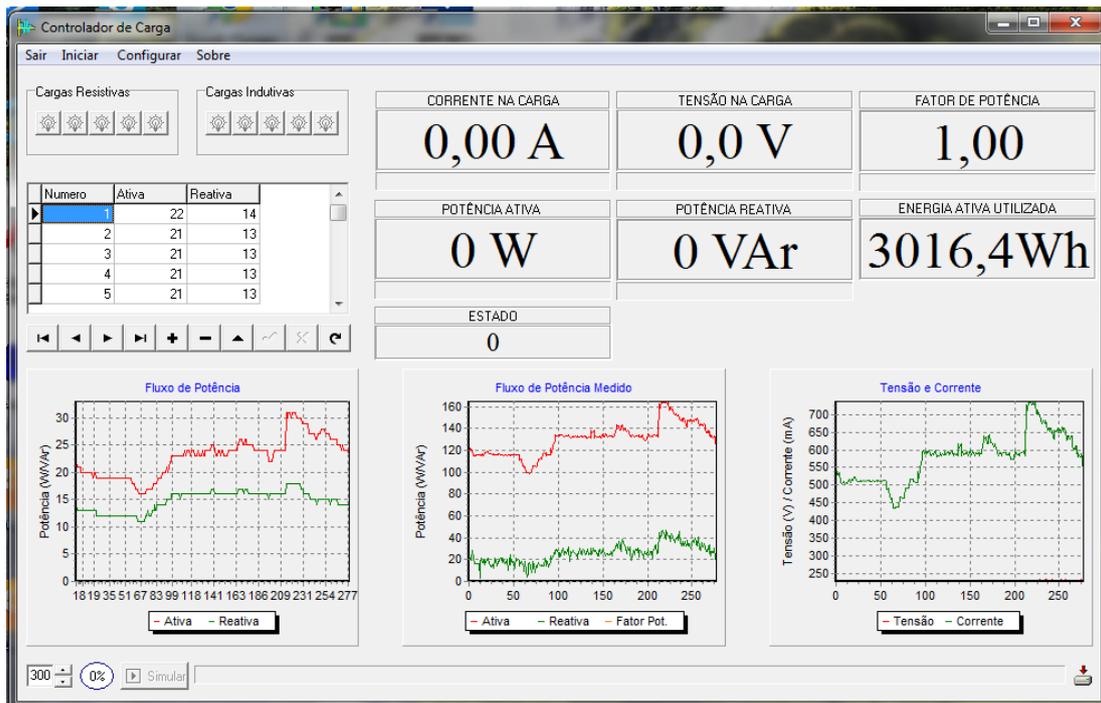


Figura 5.25 - Tela do *software* de aquisição e controle.

5.7 Montagem do experimento e resultados

O experimento foi montado seguindo o diagrama esquemático mostrado na Figura 5.26.

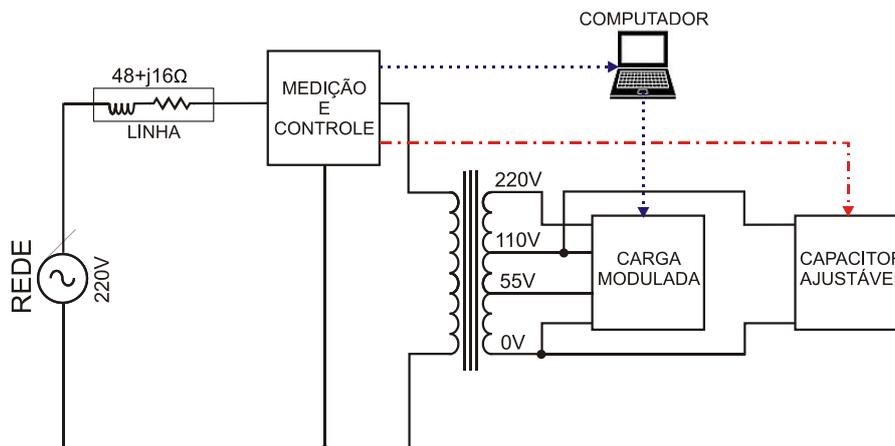


Figura 5.26 - Diagrama esquemático do experimento.

As linhas pontilhadas, representam o fluxo de dados entre o computador e o módulo de carga emulada e entre o computador e o módulo de medição e controle. Para permitir este fluxo de dados tanto o módulo de medição e controle quanto o módulo de carga emulada possuem portas de comunicação serial padrão RS232 que são conectadas a

outras duas portas seriais padrão RS232 associadas ao computador, através de um cabo de comunicação (cabo manga) no padrão de três fios, ou seja, sem controle do fluxo de dados por *hardware*. O computador envia comandos para o módulo de carga emulada e recebe medições e estados do módulo de medição e controle. A linha traço ponto representa o fluxo de sinais de controle entre o módulo de medição e controle e o módulo compensador. O módulo de medição e controle determina a necessidade de reativo do sistema e comanda as chaves do módulo compensador de forma a suprir esta necessidade. A comunicação entre estes módulo é paralela.

O experimento foi realizado utilizando as curvas de carga ativa e reativa de alimentador oriundas do software de automação e controle de subestações de uma empresa distribuidora de energia elétrica. Estes dados foram exportados no formato "csv", ou seja, tabulado por vírgulas. Este formato é facilmente importado pelo Excel, que foi utilizado para processar e discretizar os dados, tornando-os compatíveis com o experimento, utilizando o mesmo método descrito na secção 3.2. Posteriormente, estes dados foram importados pelo Access e utilizados pelo software de aquisição, controle e armazenamento. A Figura 5.27 mostra os dados obtidos durante um período de 278 minutos com o controle desativado (sem compensação) e 278 minutos com o controle ativado (com compensação).

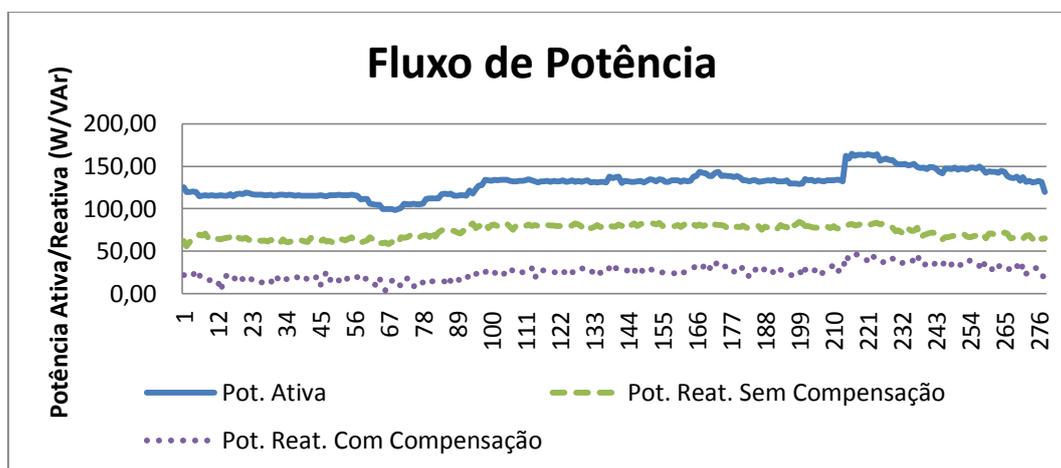


Figura 5.27 - Dados do fluxo de potências ativa e reativa obtidas do experimento.

Observe que houve uma significativa diminuição no fluxo de potência reativa demandada da fonte, ou seja, o compensador funcionou adequadamente e forneceu a maior parte da potência reativa demandada pela carga. Processando os dados observou-se uma diminuição das perdas em 3,47 pontos percentuais, um resultado compatível

com o obtido na secção 3.2. A Figura 5.28 mostra o perfil de tensão na carga do sistema com e sem compensação. Analisando os dados observou-se que houve uma melhoria no nível da tensão em média de 1,69% e uma diminuição da corrente drenada da fonte de em média 13,64%. A Figura 5.29 mostra o perfil da corrente drenada da fonte com e sem compensação.

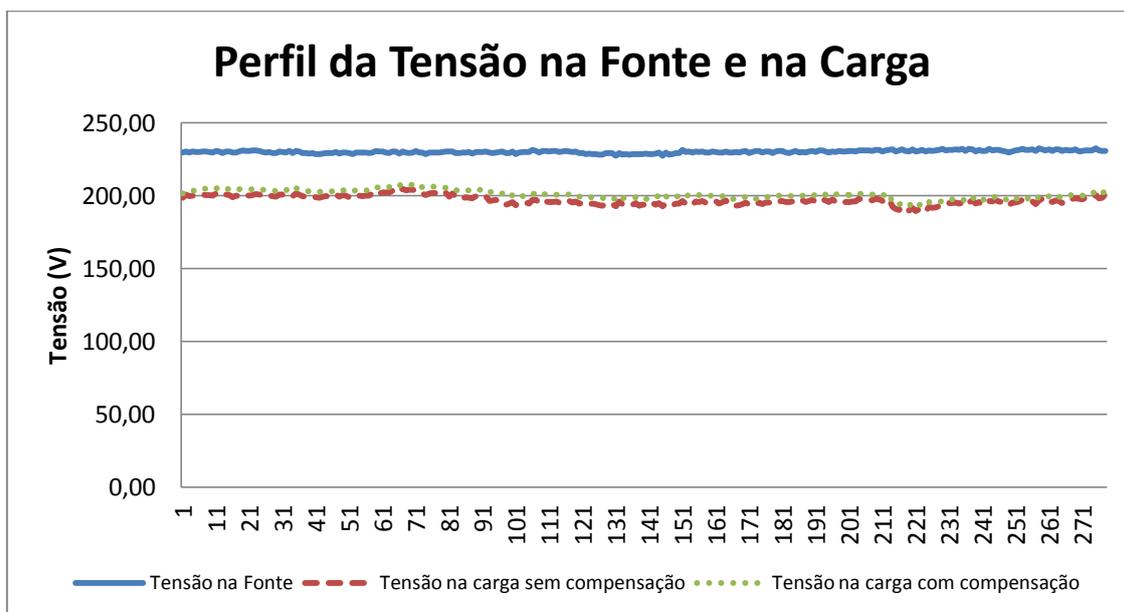


Figura 5.28 - Perfil da tensão na fonte e na carga.

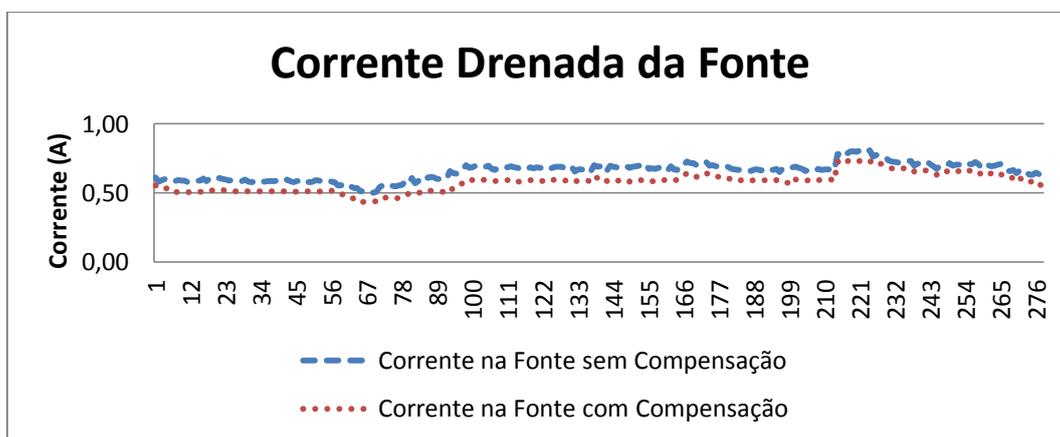


Figura 5.29 - Perfil de corrente drenada da rede com e sem compensação.

5.8 Conclusões

Neste capítulo foi mostrado o experimento desenvolvido para atestar os modelos teórico e numérico desenvolvidos no capítulo 3 para a proposta do banco de capacitores ajustável. Os dados produzidos são consistentes e de boa qualidade, e demonstram que o experimento apresentou um comportamento similar ao observado nas simulações,

corroborando a teoria e o modelo numérico desenvolvido. Além disso, a lógica de controle utilizada no modelo teórico se mostrou eficaz minimizando o fluxo de potência reativa demandada da rede, controlando o fluxo de potência reativa no capacitor e fornecendo apenas uma fração da potência reativa que o capacitor injetaria se fosse ligado diretamente.

6 Estudo de Viabilidade Econômica e Retorno de Investimento

Neste Capítulo será realizada uma análise de viabilidade econômica e retorno de investimento considerando-se os casos abordados no Capítulo 3, de acordo com a Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Casos abordados na análise de viabilidade e retorno de investimento.

	Banco fixo	Banco chaveado	Banco ajustável
Energia na carga	132.347,29	133.638,18	138.801,75
Energia no compensador	0,00	0,00	526,93
Energia absorvida da rede	157.654,94	156.954,17	157.874,51
Custo das perdas (diário)	R\$ 3.504,14	R\$ 3.228,37	R\$ 2.640,84
Custo das perdas (anual)	R\$1.279.009,86	R\$ 1.178.354,24	R\$ 963.908,06
Perdas recuperadas (anual)	R\$ 479.356,87	R\$ 580.012,49	R\$ 794.458,67
Violação do limite de tensão	SIM	SIM	NÃO

No primeiro caso será considerada apenas a instalação de um banco de capacitores fixo com potência nominal de 3,6MVA_r, no segundo caso será considerada a instalação de dois bancos de capacitores chaveados com potências de 1,2 e 2,4MVA_r, que utilizam chaves tripolares a vácuo adequadas ao uso em bancos de capacitores e no terceiro caso será considerada a instalação de um banco de capacitor chaveado de 2,4MVA_r e um banco de capacitores ajustável com potência nominal de 1,2MVA_r.

Para a análise de viabilidade geralmente é considerada a taxa mínima de atratividade, que é valor mínimo de rentabilidade que um dado empreendimento deve alcançar para que o projeto seja considerado viável do ponto de vista do empreendedor. Projetos que apresentem indicadores de viabilidade positivos, mas que não forneçam esta taxa mínima de retorno não são considerados aplicações interessantes. Nos casos abordados uma solução será considerada viável se o tempo de retorno de investimento for menor que 1/3 da vida útil estimada da solução e o valor presente líquido (VPL) (ROSS, WESTERFILED e JAFFE, 1995) for positivo, estes critérios foram adotados levando-se em conta os custos de manutenção das chaves, estruturas e eventual substituição das células capacitivas. Além dos benefícios associados a redução das

perdas também será considerada a eliminação de violações no nível da tensão o que resulta na eliminação das compensações aos clientes conforme definido no PRODIST módulo 8 seção 2.13.

6.1 Análise de retorno de investimento para o banco fixo

O custo de um banco de capacitores fixo de 1,2MVA_r não é composto apenas do valor das células capacitivas, deve-se também levar em consideração a estrutura onde as células serão montadas. De acordo com (GODOI, 2009) o custo médio de um banco de capacitores de 1,2MVA_r é de R\$ 24.100,00, aplicando-se a correção monetária do período com base no índice geral de preços do mercado (IGP-M) teremos um custo atualizado de R\$ 34.255,29. Baseado no custo de instalação do banco podemos calcular VPL através da equação a seguir:

$$VPL = -C_o + \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{(1+r)^n}, \quad (6.1)$$

em que,

C_o – Montante a ser aplicado na data zero;

C_i – Fluxo de caixa na data i ;

r – Taxa de juros;

n – Período em anos.

O VPL corresponde ao valor que o balanço de um projeto teria se todos seus custos e benefícios fossem trazidos para o momento inicial, ou seja, se fosse calculado o valor presente de cada uma das parcelas que compõem o fluxo de caixa do projeto ao longo de sua vida útil. O período de fluxo de caixa considerado será o correspondente a 1/3 da vida útil do banco de capacitores, ou seja, 5 anos. Caso o VPL seja positivo a instalação do banco será considerada viável. Já a taxa de juros para remuneração do capital considerada será a taxa do Sistema Especial de Liquidação e Custódia (SELIC) estipulada pelo Banco Central do Brasil com um valor de 13,75% a.a. ou 1,1458% a.m. Para o cálculo do tempo de retorno do investimento será utilizada a equação a seguir:

$$Tr = \frac{CI}{B}, \quad (6.2)$$

onde,

Tr - Tempo de retorno simples;

CI - Custo de investimento;

B - Benefício.

O benefício a ser considerado no cálculo do tempo de retorno de investimento será composto de duas parcelas, uma referente as perdas recuperadas e outra referente as compensações pagas aos clientes devido a violação dos níveis de tensão. A ANEEL define no módulo 8 do PRODIST, uma metodologia para o cálculo destas compensações, baseada na equação a seguir:

$$Valor = \left[\left(\frac{DRP - DRP_M}{100} \right) k_1 + \left(\frac{DRC - DRC_M}{100} \right) k_2 \right] K_3, \quad (6.3)$$

em que,

$Valor$ - Valor da compensação a ser paga em reais;

DRP – Índice de duração relativa da transgressão para tensão precária;

$DRP_M = 3\%$;

DRC – Índice de duração relativa da transgressão para tensão crítica;

$DRC_M = 5\%$;

$k_1 = 0$, se $DRP \leq DRP_M$;

$k_1 = 3$, se $DRP > DRP_M$;

$k_2 = 0$, se $DRC \leq DRC_M$;

$k_2 = 7$, para unidades consumidoras atendidas em Baixa Tensão, se $DRC > DRC_M$;

$k_2 = 5$, para unidades consumidoras atendidas em Média Tensão, $DRC > DRC_M$;

$k_2 = 3$, para unidades consumidoras atendidas em Alta Tensão, $DRC > DRC_M$;

k_3 – Valor líquido da fatura de energia elétrica ou do encargo de uso do sistema de distribuição, considerando também as demandas e energias reativas excedentes, referente ao mês de apuração.

O DRP e DRC são calculados utilizando-se 1008 leituras válidas obtidas em intervalos consecutivos (período de integralização) de 10 minutos cada, aplicadas as expressões a seguir:

$$DRP(\%) = \frac{nlp}{1008} 100, \quad (6.4)$$

$$DRP(\%) = \frac{nlc}{1008} 100, \quad (6.5)$$

onde,

nlc – representa o maior valor entre as fases do número de leituras situadas na faixa crítica;

nlp – representam o maior valor entre as fases do número de leituras situadas na faixa precária.

Um valor de leitura é considerado precário para tensões maiores que 1kV e menores que 69kV quando for menor 0,95 PU e maior que ou igual a 0,90 PU. Caso o valor da leitura seja menor que 0,90 PU ou maior que 1,05 PU a tensão é considerada crítica.

Analisando a Figura 6.1 observar-se o perfil da tensão na carga do sistema elétrico adotado na seção 3.2 sem qualquer tipo de compensação. A linha traçada corresponde a tensão de 8.265V, ou seja, o limite de tensão precária. Neste caso não houve violação do limite de tensão crítica. O valor da transgressão corresponde a 44,42% das leituras realizadas. Assim, o valor da compensação aos clientes corresponde a R\$ 8.028.000,69 por ano.

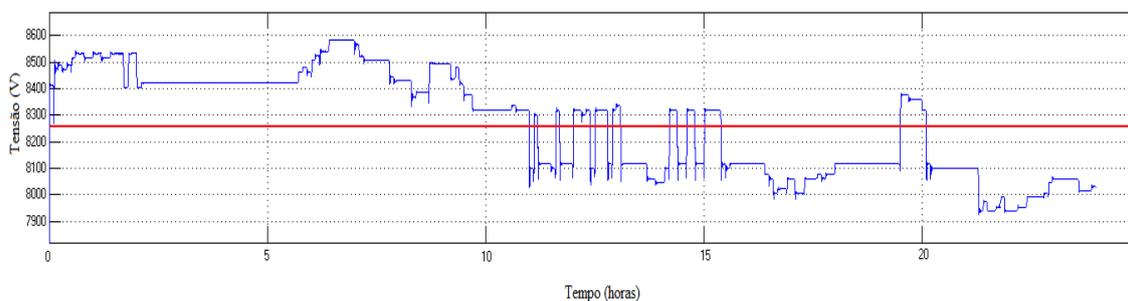


Figura 6.1 - Perfil da tensão na carga sem compensação.

Considerando-se a utilização de um banco de capacitores fixo com potência nominal de 3,6MVAR obtemos o perfil de tensão mostrado na Figura 6.2. Como no caso anterior também não houve violação do limite de tensão crítica e as transgressões da tensão precária diminuiu para 17,51% do total das leituras o que corresponde a uma valor de compensação de R\$ 2.828.508,33. Observe que o valor das compensações são muito elevadas e tornam o controle do nível de tensão imperativo. Baseado nos dados apurados é possível calcular a viabilidade e o tempo de retorno do investimento.

Utilizando as equações 6.1 e 6.2, verificamos que o VPL para um período de 5 anos é igual a R\$ 13.866.063,63 um valor positivo logo a instalação do banco de capacitores é viável e o tempo de retorno do investimento é de 7,05 dias.

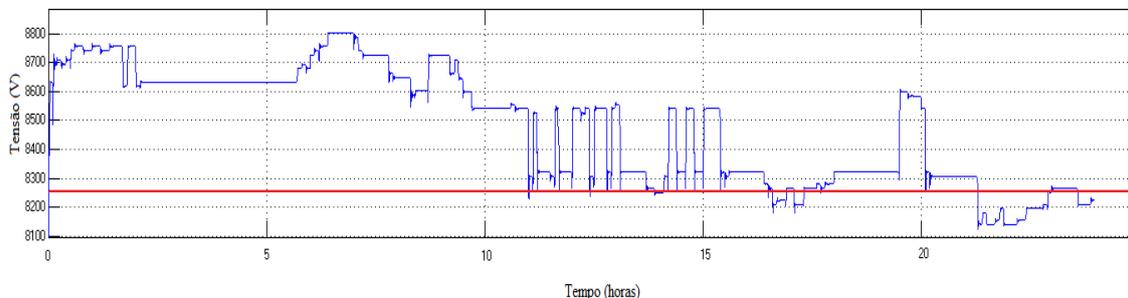


Figura 6.2 - Tensão na carga com banco de capacitores fixo.

6.2 Análise de retorno de investimento para o banco chaveado

O custo de um banco chaveado leva em conta além dos elementos já considerados no banco fixo o custo de um conjunto de chaves trifásico que é capaz de chavear o banco suportando a corrente de carga. No entanto, não suporta uma corrente de falta. De acordo com (GODOI, 2009) o custo de um banco chaveado é de R\$47.000,00. Aplicando a mesma correção monetária que no caso anterior obtemos o valor de R\$66.804,92 para um banco de 1,2MVar. A Figura 6.3 mostra o perfil da tensão na carga com o uso de dois bancos de capacitores chaveados com potências de 1,2MVar e 2,4MVar.

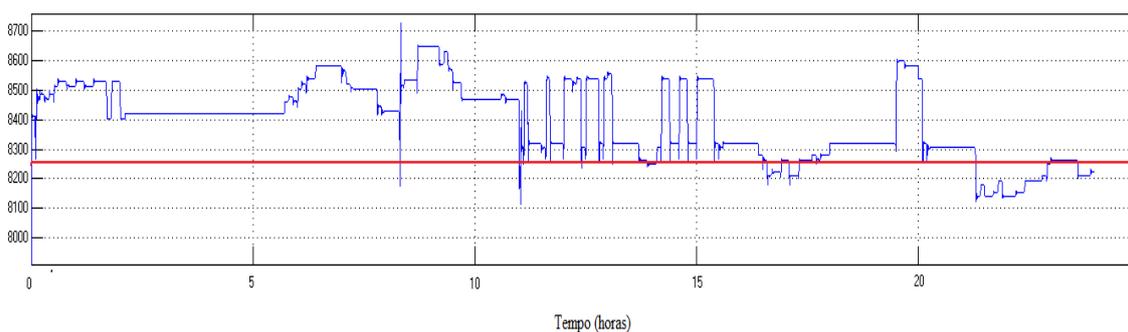


Figura 6.3 - Tensão na carga com banco de capacitores chaveado.

Neste caso o percentual de violação do limite da tensão precária foi de 17,59% e o VLP igual a R\$13.835.090,54, como no caso anterior a instalação é viável e o tempo de retorno do investimento é de apenas 13,68 dias.

6.3 Análise de retorno de investimento para o compensador com banco de capacitores ajustável

No caso do compensador com banco de capacitores ajustável temos três casos a considerar, no primeiro caso o sistema não possui nenhum tipo de compensação existente como visto nas seções anteriores, no segundo caso já existe uma compensação de reativo do tipo bancos chaveados que é a mais comumente utilizada e foi apenas acrescentado o controlador, como visto na Figura 3.30 caso 2. O terceiro caso é idêntico ao anterior, mas não será considerada a parcela de compensação por violação do limite de tensão. A Figura 6.4 mostra o perfil da tensão na carga com o uso de um banco de capacitores ajustável com potência nominal de 1,2MVar e um banco de capacitores chaveado com potência de 2,4MVar. Observe que não houve violação do limite da tensão na carga logo não haverá qualquer incidência de penalidades compensatórias.

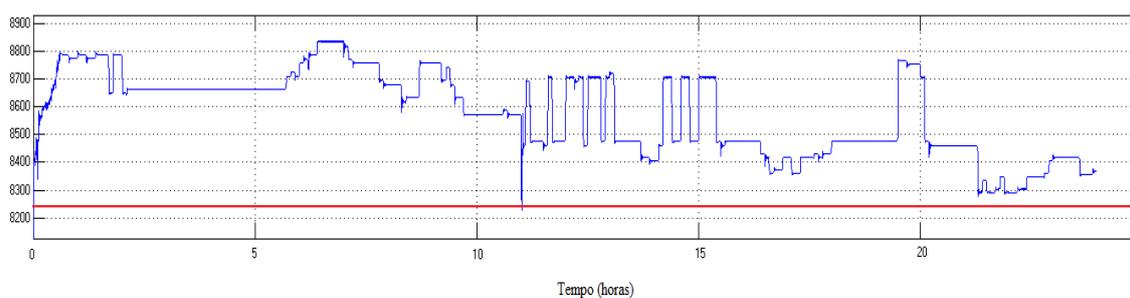


Figura 6.4 - Tensão na carga com o compensador com banco de capacitores ajustável.

O compensador com banco de capacitores ajustável utiliza três componentes básicos, um banco de capacitores que é a fonte de potência reativa, uma chave para manobras de bancos de capacitores, que é utilizada para acoplar ou desacoplar o compensador da rede e o controlador do banco de capacitores. Em uma instalação nova o custo do compensador deve levar em conta os três componentes, mas em uma instalação antiga, onde já existe o bancos de capacitores chaveados, apenas o custo do compensador será considerado. Na Tabela 6.2 vemos uma estimativa do custo de um controlador com potência nominal de 300kVA, que será utilizado para controlar um banco de capacitores com potência nominal de 1,2MVar.

Considerando-se o primeiro caso, ou seja, não ha compensação existente, o custo total da compensação é de R\$256.203,91, além do custo do controlador foram considerados os custos de dois bancos chaveados com 1,2MVar e 2,4MVar respectivamente. Calculando o VPL obtemos um valor de R\$21.347.617,86 e um Tr de

11,36 dias. Observe que o tempo de retorno foi menor que no caso do banco chaveado, isto se deve ao fato de que como não há violações no nível da tensão o benefício aumenta compensando o custo mais elevado da solução. Considerando-se o segundo caso, ou seja, ha uma compensação utilizando banco de capacitores chaveado existente obteremos um VPL de R\$7.933.504,62 e um Tr de 6,69 dias. Estes tempos de retorno de investimentos baixos observados são resultado direto dos encargos oriundos da violação do limite da tensão, é interessante considerar o terceiro caso onde não ha encargos decorrente da violação do limite de tensão, desta forma o benefício a ser considerado é apenas devido a redução das perdas técnicas. Neste caso obtemos um VPL de R\$507.240,53, ou seja, positivo logo o projeto é viável e o Tr é igual a 94,96 dias. Uma outra analise interessante é calcular qual o valor da redução do número de pontos percentuais nas perdas que viabiliza a instalação do equipamento, este valor depende das características do sistema considerado. Assim, para o sistema analisado anteriormente uma redução de 0,33 pontos percentuais viabiliza a instalação do equipamento com um tempo de retorno de 5 anos. A Tabela 6.3 sumariza os resultados obtidos.

Tabela 6.2 - Custo estimado do controlador de banco de capacitores.

Custo estimado do controlador de banco de capacitores	
Item	Preço (R\$)
Chaves tiristores	1.019,70
Ventilação/radiadores e acessórios	1.471,12
Transformador de alimentação 13,8kV/1.018V X 300kVA	11.700,00
Transformadores de decremento	31.598,33
Estrutura de suporte e montagem	10.000,00
Total	55.789,15

Outro aspecto interessante a ser considerado é o tempo de vida útil das células capacitivas que compõem os bancos de capacitores utilizados na compensação de reativos. De acordo com a norma NBR 5282 (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1998) uma célula capacitiva submetida a uma sobre tensão de 1,3 vezes sua tensão nominal deve suporta-la durante 1 minuto, além desse tempo haverá um comprometimento permanente. Ha uma expectativa de que pelo menos 200 eventos dessa natureza ocorram durante a vida útil do banco de capacitores (GODOI, 2009). Em um compensador que utiliza bancos de capacitores fixos ou chaveados nada

pode ser feito para evitar o fenômeno, mas com a utilização do controlador de banco isto pode ser evitado, pois o controlador detecta a sobre tensão e rapidamente ajusta tensão aplicada ao banco de capacitores eliminando o problema. Desta forma, os custos com manutenção e indisponibilidade do compensador são reduzidos.

Tabela 6.3 - Comparativo de custos, benefícios e tempo de retorno de investimento.

	COMPENSADORES					
	Sem Compensação	Banco Fixo	Banco Chaveado	Banco Chave+Control. (caso1)	Banco Chave+Control. (caso 2)	Banco Chave+Control. (caso 3)
Potência Banco	0	3,6 MVar	3,6MVar	2,4+1,2MVar	2,4+1,2MVar	2,4+1,2MVar
Potência Controlador	0	0	0	300kVAr	300kVAr	300kVAr
Custo	0	R\$ 68.510,58	R\$ 200.414,76	R\$ 256.203,91	R\$ 55.789,15	R\$ 55.789,15
Perdas Recuperadas	0	R\$ 479.356,87	R\$ 580.012,49	R\$ 794.458,67	R\$ 214.446,18	R\$ 214.446,18
Payback (dias)	0	7,05	13,68	11,36	6,69	94,96
VPL	0	R\$ 13.866.063,63	R\$ 13.835.090,54	R\$ 21.347.617,86	R\$ 7.933.504,62	R\$ 507.240,33
Encargos nível da Tensão (anual)	R\$ 8.028.000,00	R\$ 2.828.508,00	R\$ 2.828.508,00	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Energia Faturada (anual)	R\$ 6.462.207,75	R\$ 6.689.382,11	R\$ 6.752.746,36	R\$ 7.214.880,69	R\$ 7.214.880,69	R\$ 7.214.880,69

6.4 Conclusões

Neste capítulo foram abordadas três soluções para compensação do fluxo de potência reativa e foram analisadas a viabilidade econômica e o tempo de retorno de investimento de cada uma, todas se mostraram viáveis com tempos de retorno de investimento baixos, devido principalmente ao custo das violações de tensão. Observou-se que no caso do sistema sem nenhuma compensação de potência reativa os encargos compensatórios por transgressão do limite de tensão são maiores que o faturamento, logo a operação do sistema é inviável. Já com a utilização do banco fixo ou chaveado os custos da transgressão de tensão ainda são elevados atingindo mais de quarenta por cento do total do faturamento o que novamente torna a operação dos sistema inviável pois o percentual médio de rentabilidade do setor de distribuição de energia elétrica no Brasil é em torno de 25% (DOEGE e LAKOSKI, 2012). A utilização do compensador com banco de capacitores ajustável eliminou as transgressões, utilizando a mesma potência reativa que nos casos anteriores, isto tornou a solução mais atraente. Outro benefício importante observado é a capacidade de eliminar a incidência de sobre tensões sobre as células capacitivas que podem diminuir a vida útil ou causar dano. Observou-se que o tempo de retorno do investimento para instalação do controlador de banco é baixo

e o investimento foi considerado viável em todas as análises. Além disso, uma pequena redução de apenas 0,33 pontos percentuais viabiliza a instalação do equipamento.

7 Conclusões

A compensação de potência reativa mostra-se uma forma eficaz de reduzir as perdas em sistemas de distribuição sem a necessidade de grandes investimentos. Este trabalho mostrou seis topologias para compensação de potência reativa e controle da tensão cujos custo e complexidade foram apresentados de forma crescente.

A primeira topologia realiza as funções dos bancos de capacitores chaveados sem apresentar suas desvantagens e permite fornecer uma quantidade variável de potência reativa com qualquer resolução desejada. Por outro lado, substitui o TSC e o TCR com a vantagem de que as chaves utilizadas não necessitam suportar duas vezes a tensão de pico da rede nem a corrente nominal do banco. Além disso, não produz distorções harmônicas durante a operação em regime permanente. Adicionalmente, utiliza apenas um banco de capacitores ou reator, que por vezes já se encontra no sistema, reduzindo assim os custos de instalação e manutenção. Foi realizado um experimento que atestou as características e funcionalidades do dispositivo proposto corroborando a teoria e o modelo numérico desenvolvidos. Uma análise de viabilidade econômica e tempo de retorno do investimento mostrou que o dispositivo é viável e apresenta um tempo de retorno de investimento baixo, além de evitar que eventos espúrios de tensão provoquem dano ou diminuição da vida útil das células capacitivas, o que resulta em diminuição dos custos de manutenção e indisponibilidade.

A segunda topologia é composta do compensador formado pela primeira topologia e um elemento armazenador de energia passivo (reator ou banco de capacitores) e realiza as funções de um compensador estático (SVC), que quando comparado a um compensador síncrono apresenta vantagens em relação à resposta dinâmica e aos custos de aquisição, manutenção e operação. Já quando comparada com TCR+CF, as principais vantagens são relativas ao custo, pois o dispositivo proposto só precisa suportar um quarto da potência reativa máxima fornecida ao sistema e não necessita de transformador com enrolamento terciário com potência igual à potência reativa fornecida à rede, cujo objetivo é eliminar as distorções harmônicas produzidas durante a operação em regime permanente.

A terceira topologia é composta por dois compensadores formados utilizando-se a primeira topologia, sendo um fornecendo e o outro absorvendo potência reativa. Desta forma, obtêm-se as mesmas características do TSC+TCR, com as seguintes vantagens: menor potência nominal do dispositivo de controle para a mesma potência reativa

fornecida, as chaves utilizadas são submetidas a tensões e correntes de trabalho menores, o fornecimento de potência reativa capacitiva é mais linear e não produz harmônicos durante a operação em regime permanente. Já quando comparado ao STATCOM as vantagens são as mesmas anteriores exceto quanto ao fornecimento de potência reativa capacitiva mais linear. Porém, pode ser utilizado em sistemas onde a tensão da rede ou a potência requerida torna o uso do STATCOM inviável.

A quarta topologia utiliza os mesmos componentes da segunda topologia, só que nesse caso o objetivo é compensar a reatância indutiva da linha permitindo aumentar a capacidade de transmissão e melhorar a regulação da tensão na carga. As características apresentadas são similares às do TCSC e tem a vantagem de exigir um compensador com potência nominal menor, o que resulta em chaves mais baratas. Já em relação ao SSSC, tem-se as mesmas vantagens anteriores mais a possibilidade de poder ser utilizado em níveis de tensão e potência maiores.

A quinta topologia utiliza uma associação entre um módulo compensador de potência reativa e um regulador de tensão discreto. O primeiro compensa o fluxo de potência reativa, utilizando qualquer uma das três primeiras topologias, que será selecionada conforme a necessidade e o segundo regula a tensão na carga. Este arranjo permite compensar o fluxo de potência reativa e controlar o nível da tensão na carga de forma desacoplada. Assim, é possível reduzir as perdas à jusante do compensador, apenas mantendo a tensão na carga menor que ou igual a 1 PU. Devido à redução da corrente reativa, há uma diminuição dos efeitos da regulação provocados pela impedância da linha. Quando comparado ao UPFC a topologia proposta apresenta como principais vantagens: ausência de barramento de corrente contínua e de grandes capacitores, pode utilizar tiristores que são as chaves mais baratas e robustas, pode ser utilizada em níveis de tensão e potência que são inviáveis para o UPFC, não há perdas por chaveamento na operação em regime permanente pois não há a necessidade de chaveamento constante e não necessita de filtros ou transformadores especiais. Já quando comparado com o transformador SEN suas principais vantagens são a melhor resposta dinâmica, o uso das chaves em níveis de tensões e correntes menores e a modularidade, ou seja, caso seja necessário aumentar a resolução do compensador, basta acrescentar mais módulos.

A sexta topologia utiliza apenas transformadores e chaves para permitir o controle do fluxo de potências ativa e reativa forma desacoplada entre duas linhas e assim compensar o fluxo de potência reativa de uma linha utilizando a disponibilidade de outra. Este dispositivo pode ser comparado com o IPFC, com as vantagens de poder

operar em níveis de tensão e potência maiores, ser modular, utilizar qualquer tipo de chave, inclusive tiristores, não apresentar perdas por chaveamento na operação em regime permanente e não necessitar de filtros ou transformadores especiais. Quando comparado com o transformador defasador, sua principal vantagem é o baixo tempo de resposta, pois os transformadores defasadores utilizam comutadores de derivação eletromecânicos, o que os torna muito lentos e limita o número de operações diárias, além de demandarem muita manutenção. A Tabela 5.1 mostra um comparativo entre as topologias propostas e as soluções tradicionais.

Tabela 7.1 - Comparativo entre as topologias propostas *versus* tradicionais

	Fornecer potência reativa	Absorver potência reativa	Tensão da instalação	Potência da instalação	Varição da potência reativa	Controle independente da tensão	Tensão nas chaves	Potência do equipamento	Modularidade	Distorções harmônicas	Tipo de chave
Capacitor chaveado	SIM	NÃO	A	A	D	NÃO	MA	Q	SIM	NP	Me
Compensador síncrono	SIM	SIM	A	A	Li	NÃO	---	Q	NÃO	NP	---
TSC	SIM	NÃO	A	A	D/Di	NÃO	MA	Q	NÃO	NP	SCR
TCR	NÃO	SIM	A	A	Li	NÃO	A	Q	NÃO	A	SCR
TCR+CF	SIM	SIM	A	A	Li	NÃO	A	2Q	NÃO	A	SCR
TCR+TSC	SIM	SIM	A	A	Li+D	NÃO	A	Q	NÃO	A	SCR
TCSC	SIM	SIM	A	A	Li	NÃO	A	Q	NÃO	A	SCR
STATCOM	SIM	SIM	Me	Me	Li	NÃO	A	Q	NÃO	A	IGBT
SSSC	SIM	SIM	Me	Me	Li	NÃO	A	Q	NÃO	A	IGBT
IPFC	SIM	SIM	Me	Me	Li	SIM	Me/B	Q	NÃO	B	IGBT
UPFC	SIM	SIM	Me	Me	Li	SIM	Me/B	Q	NÃO	B	IGBT
Transformador SEN	SIM	SIM	A	A	Di	SIM	---	Q	NÃO	NP	---
Topologia 1	SIM	NÃO	A	A	Di	NÃO	Me/B	Q/4	SIM	NP	Todas
Topologia 2	SIM	SIM	A	A	Di	NÃO	Me/B	Q/2	SIM	NP	Todas
Topologia 3	SIM	SIM	A	A	Di	NÃO	Me/B	Q/4	SIM	NP	Todas
Topologia 4	SIM	SIM	A	A	Di	NÃO	Me/B	Q/2	SIM	NP	Todas
Topologia 5	SIM	SIM	A	A	Di	SIM	Me/B	Q/4	SIM	NP	Todas
Topologia 6	SIM	SIM	A	A	Di	SIM	Me/B	Q	SIM	NP	Todas

Onde:

MB – Muito Baixa;

MA – Muito Alta;

A – Alta;

Me – Média;

Li – Linear;
D – Degrau;
Di – Discreta;
B – Baixa;
Q – Potência reativa nominal do compensador;
NP – Não produz.

Analisando a Tabela 5.1 conclui-se que as topologias propostas realizam as mesmas funções das topologias tradicionais. Por outro lado apresentam uma série de características interessantes tais como:

- Pode ser utilizado qualquer tipo de chaves eletrônicas disponíveis, com especial destaque para os tiristores, que são as chaves mais baratas, robustas e possuem as maiores tensões e correntes de trabalho;
- A potência do dispositivo de controle é uma fração da potência reativa do compensador;
- O tempo de resposta dos dispositivos é baixo e varia de meio a alguns ciclos;
- Não necessita de chaveamento constante, nem de etapa CC;
- Não há produção de harmônicos durante a operação em regime permanente;
- Não há perdas por chaveamento durante a operação em regime permanente;
- Apresentam elevado rendimento;
- O dispositivo de controle é escalável, ou seja, pode ser aplicado em diversos níveis de tensão e potência;
- Grande flexibilidade, ou seja, pode ser dimensionado conforme as necessidades da aplicação;
- Não há a necessidade da utilização de sistemas de arrefecimento robustos e dispendiosos.

7.1 Sugestões de trabalhos futuros

- Realizar experimentos com sistemas trifásicos para todas as topologias, a fim de corroborar os resultados das simulações;

- Analisar a possibilidade de desenvolver uma topologia para compensação de distorções harmônicas, utilizando o mesmo princípio de funcionamento das topologias propostas.

Referências

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Capacitores de potência em derivação para sistema de tensão nominal acima de 1 000 V**. São Paulo: ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1998.

ABRADEE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORAS DE ENERGIA ELÉTRICA. **Site ABRADDEE**. Disponível em: <www.abradee.com.br>. Acesso em: 07 Abril 2012.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Nº 505**. Rio de Janeiro. 2001.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST - Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**. Brasília. 2010.

ANEEL. **Módulo 8: Permissionárias de Distribuição - Submódulo 8.1: Revisão tarifária periódica**. Brasília. 2013.

BEÊ, R. T. **Alocação de Bancos de Capacitores em Sistema de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando Algoritmos Genéticos**. UFPR. Curitiba - PR. 2007.

BRANDINI, P. A. F. **Metaheurística Particle Swarm Utilizada para Alocação Ótima de Bancos de Capacitores em Sistemas de Distribuição Radial**. Ilha Solteira – SP. 2007.

BRITO, M. E. C. **Topologia para Restaurador Dinâmico de Tensão de Baixo Custo**. UFPE. Recife. 2011.

BRITO, M. E. C. et al. A step-dynamic voltage regulator based on cascaded reduced-power series transformers. **Electric Power Systems Research - V.108**, Março 2014. 245-253.

BUENO, E. A.; LYRA, C.; CAVELLUCCI, C. **Distribution Network Reconfiguration for Loss Reduction with Variable Demands**. São Paulo - Brasil: [s.n.], 2004.

CANTÚ, M. **Mastering Delphi 7**. Alameda, CA - USA: Sybex Inc., 2003.

COSTA, A. M.; FRANÇA, P. M.; LYRA, C. Two-Level Network Design with Intermediate Facilities: An Application to Electrical Distribution Systems. **Omega V-39 No.1**, p. 3-13, 2010.

DAS, J. C. Analysis and Control of Large-Shunt-Capacitor-Bank Switching Transients. **Transactions on Industry Applications**, V.41 No.6, Nov/Dez 2005. 1444-1451.

DIXON, J. W. et al. A Full Compensating System for General Loads, Based on a Combination of Thyristor Binary Compensator, and a PWM-IGBT Active Power Filter. **IEEE Transactions on Industrial Electronics** , Vol. 50, N° 5, out. 2003. 982 - 989.

DOEGE, R.; LAKOSKI, J. C. Análise comparativa de rentabilidade e lucratividade dos negócios geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. **REVISTA DE ESTUDOS CONTÁBEIS**, LONDRINA, v. 3, p. 48-62, Dezembro 2012.

EMPRESA DE PESQUISA ENÉRGICA. **Anuário estatístico de energia elétrica 2013**. Rio de Janeiro. 2013.

FAIRCHILD SEMICONDUCTOR CORPORATION. **MOC3051M - MOC3052M**. USA: Fairchild Semiconductor Corporation, 2005.

FUCHS, R. D. **Transmissão de Energia Elétrica - Linhas Aéreas**. São Paulo: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1979.

GODOI, A. A. **Alocação de Bancos de Capacitores em Redes Primárias e Secundária de Energia Elétrica**. UFPR. Curitiba. 2009.

GONZÁLEZ, J. F. V. **Redução de Perdas em Redes Primárias de Distribuição de Energia Elétrica por Instalação e Controle de Capacitores**. UNICAMP. São Paulo. 2003.

GONZÁLEZ, J. F. V. **Estratégias para Redução de Perdas Técnicas e Melhoria nas Condições de Operação de Redes de Distribuição de Energia Elétrica**. UNICAMP. Campinas, SP. 2011.

GRÜNBAUM, R.; NOROOZIAN, M.; THORVALDSSON, B. FACT – Powerful Systems for Flexible Power Transmission. **ABB Review**, Maio 1999. 4-17.

GUIMARÃES, R. O. et al. **Redução de Perdas Técnicas em Redes de 34,5 kV com a Aplicação de Reatores para Compensação Reativa**. UFRJ. Rio de Janeiro - RJ. 2012.

HINGORANI, N. G.; GYUGYI, L. **Understanding Facts: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems**. [S.l.]: Mohamed E. El-Hawary, 2000.

HITACHI LTD. CORPORATION. **HD44780U (LCD-II)**. Tokyo - Japan: Hitachi Ltd. Corporation , 1998.

IVNER, S.; FRANK, H. Thyristor-Controlled Shunt Compensation in Power Networks. **ASEA Journal**, vol. **54**, 1981. 121 - 127.

JIN, H.; GOÓS, G.; LOPES, L. An Efficient Switched-Reactor-Based Static Var Compensator. **IEEE Transactions on Industry Applications**, Vol. **30**, N° **4**, Julho 1994. 997-1005.

KHEDERZADEH, M. **Application of TCSC to Enhance Power Quality**. Universities Power Engineering Conference, 2007. 42nd International. Brighton: IEEE. 2007. p. 607-612.

LEE, S.; GRAINGER, J. Optimum Placement of Fixed and Switched Capacitors on Primary Distribution Feeders, Power Apparatus and Systems. **IEEE Transactions on V-100 No.1**, p. 345-352, 1981.

MARTIGNONI, A. Transformadores. In: MARTIGNONI, A. **Transformadores**. São Paulo: Globo, 1969. p. 24-30.

MATHUR, R. M.; VARMA, R. K. **Thyristor-Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems**. [S.l.]: Mohamed E. El-Hawary, 2002.

MAXIM INTEGRATED PRODUCTS. **+5V-Powered, Multichannel RS-232, Drivers/Receivers**. Sunnyvale, CA - USA: Maxim Integrated Products, 2003.

MEDEIROS FILHO, S. D. **Fundamentos de Medidas Eléctricas**. Segunda Edição. ed. Rio de Janeiro - RJ: Guanabara Dois, 1981.

MERLIN, A.; BACK, H. **Search for a Minimal-Loss Spanning Tree Configuration in an Urban Power Distribution System**. Cambridge, UK: [s.n.]. 1975.

MICROCHIP TECHNOLOGY INC. **DS30292B** -. Chandler, AZ - USA: The Microchip Corporate Literature Center, 1999.

MICROCHIP TECHNOLOGY INC. **DS40300C - PIC16F62X - Data Sheet - FLASH-Based 8-Bit CMOS Microcontroller**. Chandler, AZ - USA: Microchip Technology Incorporated, 2003.

MICROCHIP TECHNOLOGY INC. **DS41190C - PIC12F629/675 - Data Sheet - 8-Pin FLASH-Based 8-Bit - CMOS Microcontrollers**. Chandler, AZ - USA: The Microchip Corporate Literature Center, 2003.

MILLER, T. J. **Reactive Power Control in Electric Systems**. [S.l.]: John Willey & Sons, 1982.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano Nacional de Eficiência Energética**. Brasília. 2011.

MIRZAEI, H. et al. Design Comparison of High Power Medium-Voltage Converters Based on 6,5kV Si-IGBT/Si-PiN Diode, 6,5kV Si-IGBT/SiC-JBS Diode, and 10kV SiC MOSFET/SiC-JBS Diode. **Industry Application, IEEE Transactions on V.PP No.99**, 01 Janeiro 2014. 1.

MORÁN, L.; ZIOGAS, P.; JOOS, G. Analysis and Design of a Synchronous Solid-State VAR Compensator. **IEEE Trans. Industry Applications V.IA-25, No.4**, jul. 1981. 598-608.

NXP SEMICONDUCTORS. **BT139-600E 4Q Triac**. San Jose, CA - USA: NXP N. V., 2013.

PATCHAROEN, T.; NGAOPITAKKULA, A.; POTHISARN, C. **Inrush Current Analysis for Switching Large Shunt Capacitor Bank in a 230kV Substation System**. Electrical Machines and System (ICEMS), International Conference on. Busan: [s.n.]. 2013. p. 1325-1329.

QUEIROZ, L. M. O. **Estimação e Análise das Perdas Técnicas na Distribuição de Energia Elétrica**. UNICAMP. Campinas, SP. 2010.

QUEIROZ, L. M. O. et al. **Decision Support System to Design Distribution Networks**. 19th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, CIRED 2007, Proceedings of the 19th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. Viena, Austria: [s.n.]. 2007. p. 1-4.

QUEIROZ, L. M. O.; LYRA, C. Adaptive Hybrid Genetic Algorithm for Technical Loss Reduction in Distribution Networks under Variable Demands. **IEEE Transactions on Power Systems V-24 No.1**, p. 445-453, 2009.

REDDY, T. et al. Application of Phase Shifting Transformer in Indian Power System. **International Journal of Computer and Electrical Engineering, V.4, No.2**, Abril 2012. 242-245.

ROSS, A. S.; WESTERFIELD, W. R.; JAFFE, F. J. **Administração Financeira (Corporate Finance)**. São Paulo: Editora Atlas, 1995. 74-96 p.

SEN, K. K.; SEN, M. L. Introducing the Family of “Sen” Transformers: A Set of Power Flow Controlling Transformers. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, V 149 OL. 18, NO. 1**, Janeiro 2003. 149-157.

SILVA, M. C. D.; FRANÇA, P. M.; SILVEIRA, P. D. B. D. Long-Range Planning of Power Distribution Systems: Secondary Networks. **Computers & Electrical Engineering V-22 No.1**, p. 179-191, 1996.

ST MICROELECTRONICS GROUP OF COMPANIES. **TL074, TL074A, TL074B - Low Noise J-FET Quad Operational Amplifiers**. ITALY: ST Microelectronics Group of Companies, 2001.

STRAUCH, M. T. **Desenvolvimento de Metodologia para Cálculo das Perdas Elétricas em Redes de Distribuição de Baixa Tensão**. UFBA. Salvador, BA. 2002.

SUMI, Y. et al. New Static var Control Using Force-Commutated Inverters. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems V. PAS-100 No.9**, Setembro 1981. 4216-4224.

SZUVOVIVSKI, I. **Alocação Simultânea de Bancos de Capacitores e Reguladores de Tensão em Sistemas de Distribuição Usando Algoritmos Genéticos e Fluxo de Potência Ótimo**. UFPR. Curitiba - PR. 2008.

TELECOMMUNICATIONS INDUSTRY ASSOCIATION. **Asynchronous Facsimile DCE Control Standard - Service Class 2 - TIA/EIA-592-A**. Arlington, VA - USA: Telecommunications industry association, 1998.

TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED. **SCHS051D - CD4066B - Cmos Quad Bilateral Switch**. Dallas, Texas - USA: Texas Instruments Incorporated, 2003.

TORSENG, S. Shunt-Connected Reactors and Capacitors. **IEE Proc. Part C, vol. 128, n° 6**, Novembro 1981. 366-373.

TYLL, H. K.; SCHETTLER, F. **Historical Overview on Dynamic Reactive Power Compensation Solutions from the Begin of AC Power Transmission Towards Present Applications**. Power Systems Conference and Exposition, PSCE'09 IEEE/PES. Seattle, WA: [s.n.]. 2009. p. 1-7.

UTC - UNISONIC TECHNOLOGIES CO., LTD. **QW-R101-006,C - UTC LM78XX Linerar Integrated Circuit**. USA: UTC - Unisonic Technologies CO., LTD., 2006.

WEI, X. et al. A Common Modeling Framework of Voltage-Sourced Converters for Load Flow, Sensitivity, and Dispatch Analysis. **IEEE Transactions on Power Systems, V.19 No.2**, Maio 2004. 934-941.

WEI, X. et al. **A Dispatch Strategy for an Interline Power Flow Controller Operating At Rated Capacity**. New York, NY, USA: [s.n.]. 10 Outubro 2004.

Anexos

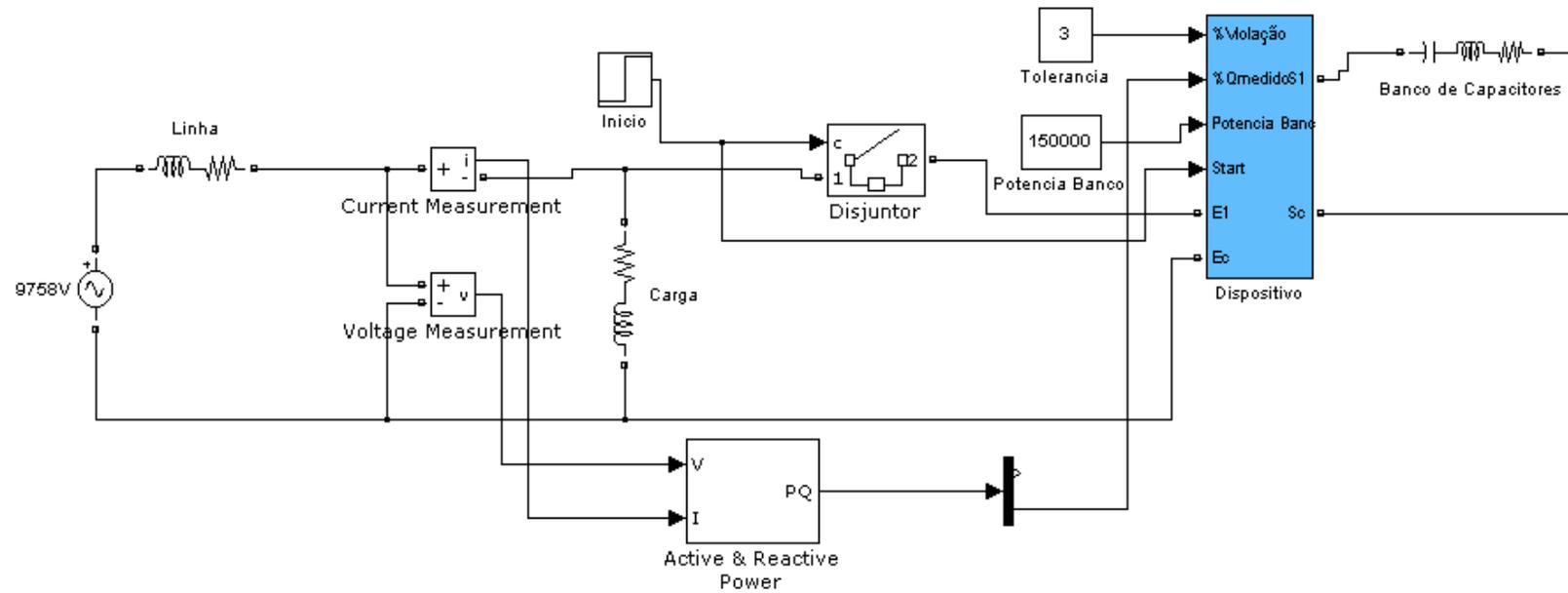


Figura 0.1 – Modelo do sistema de potência com dispositivo proposto.

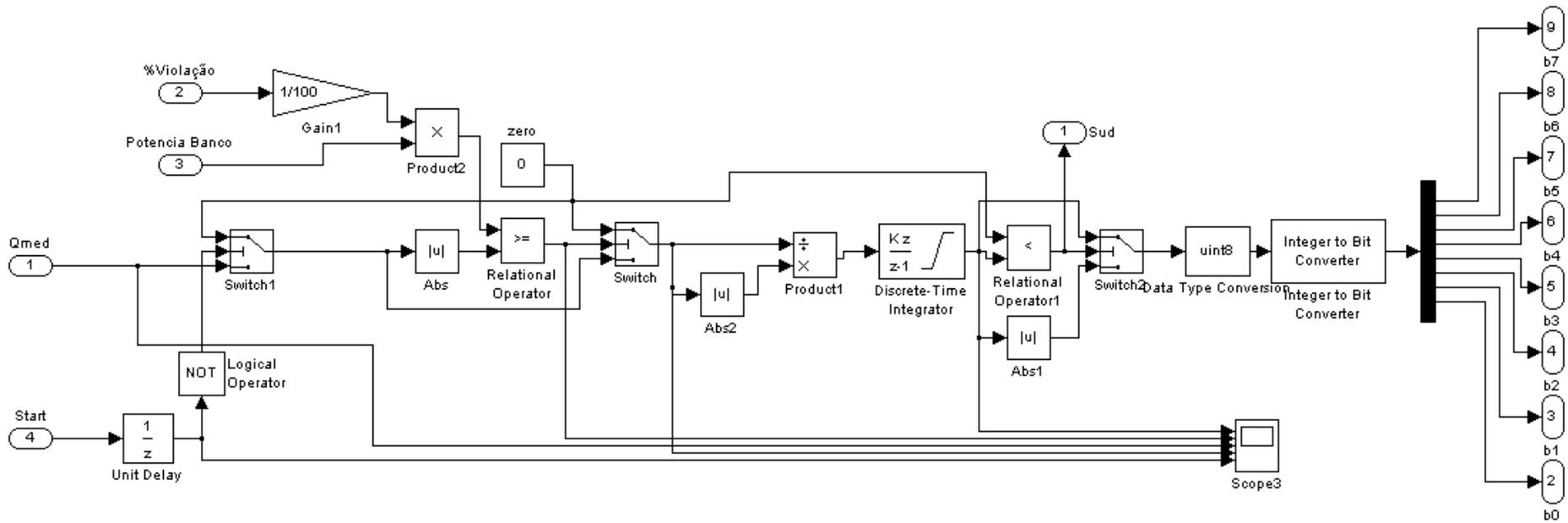


Figura 0.2 – Modelo do sistema de controle.

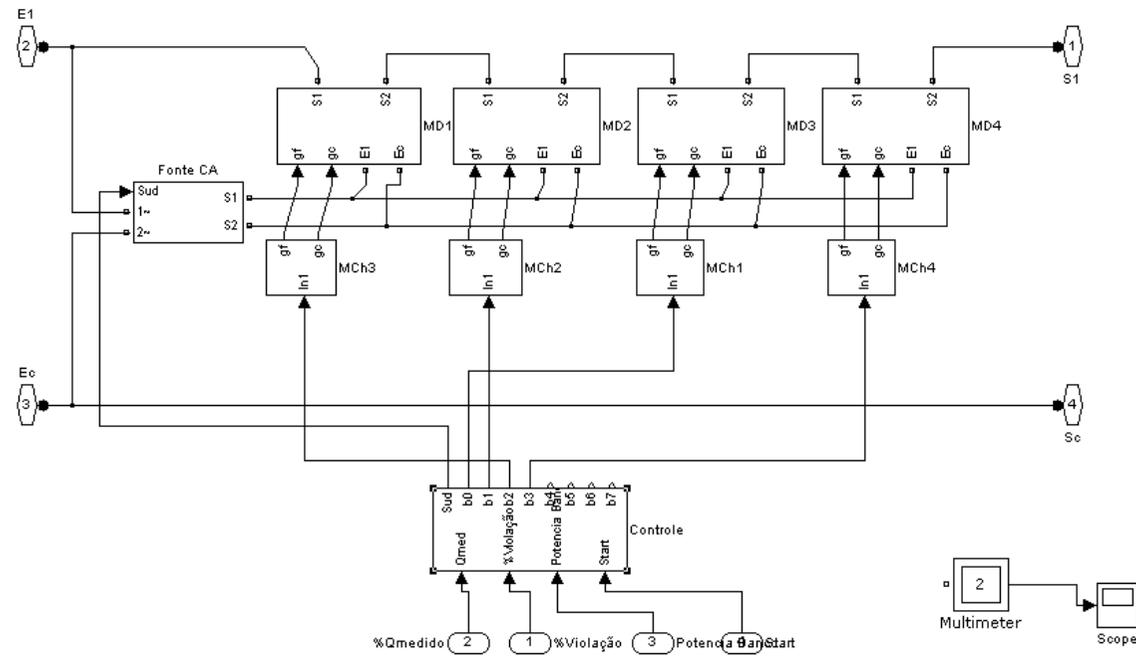


Figura 0.3 – Modelo do *hardware* do dispositivo.

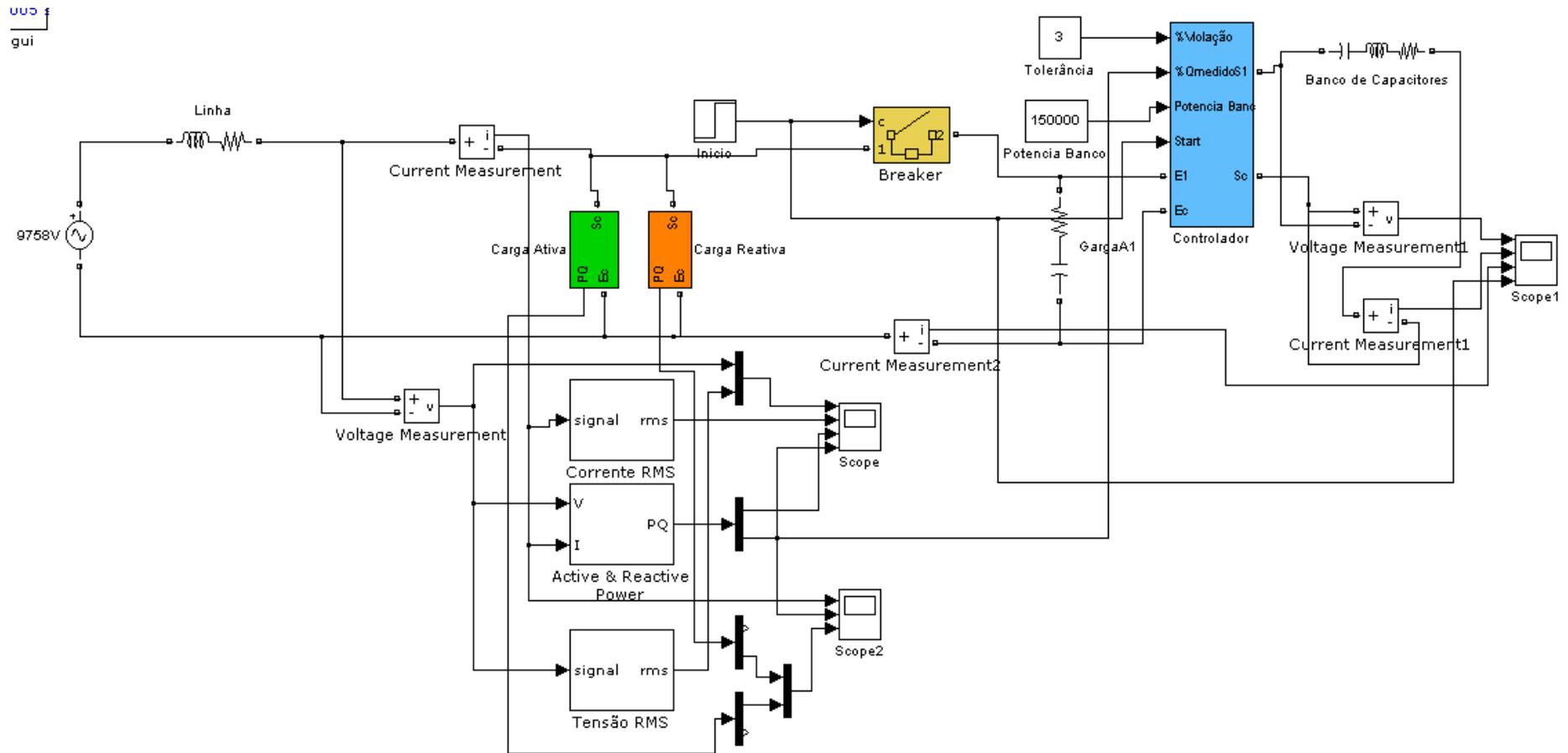


Figura 0.4 – Modelo do alimentador do caso 1.

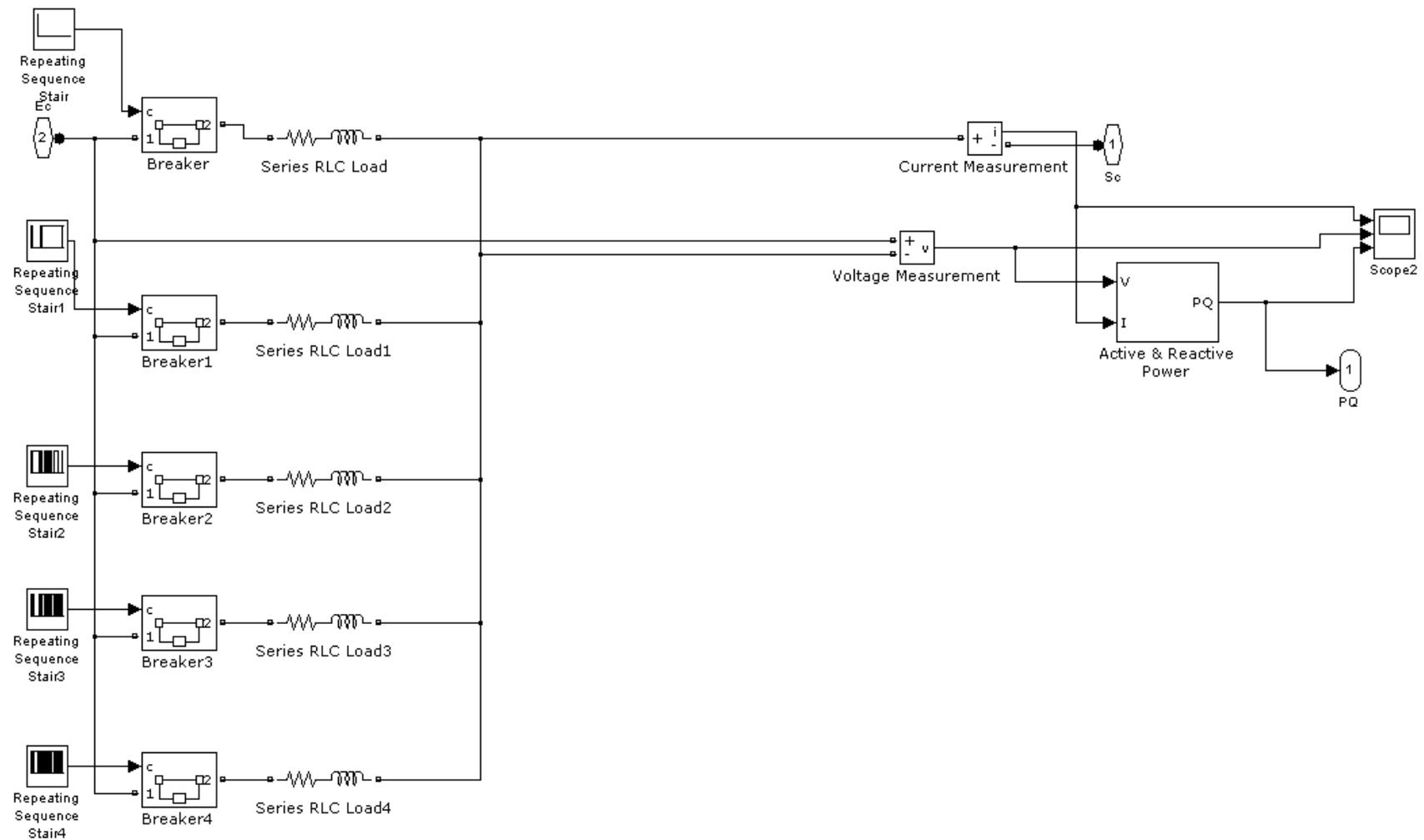


Figura 0.5 – Modelo da carga reativa.

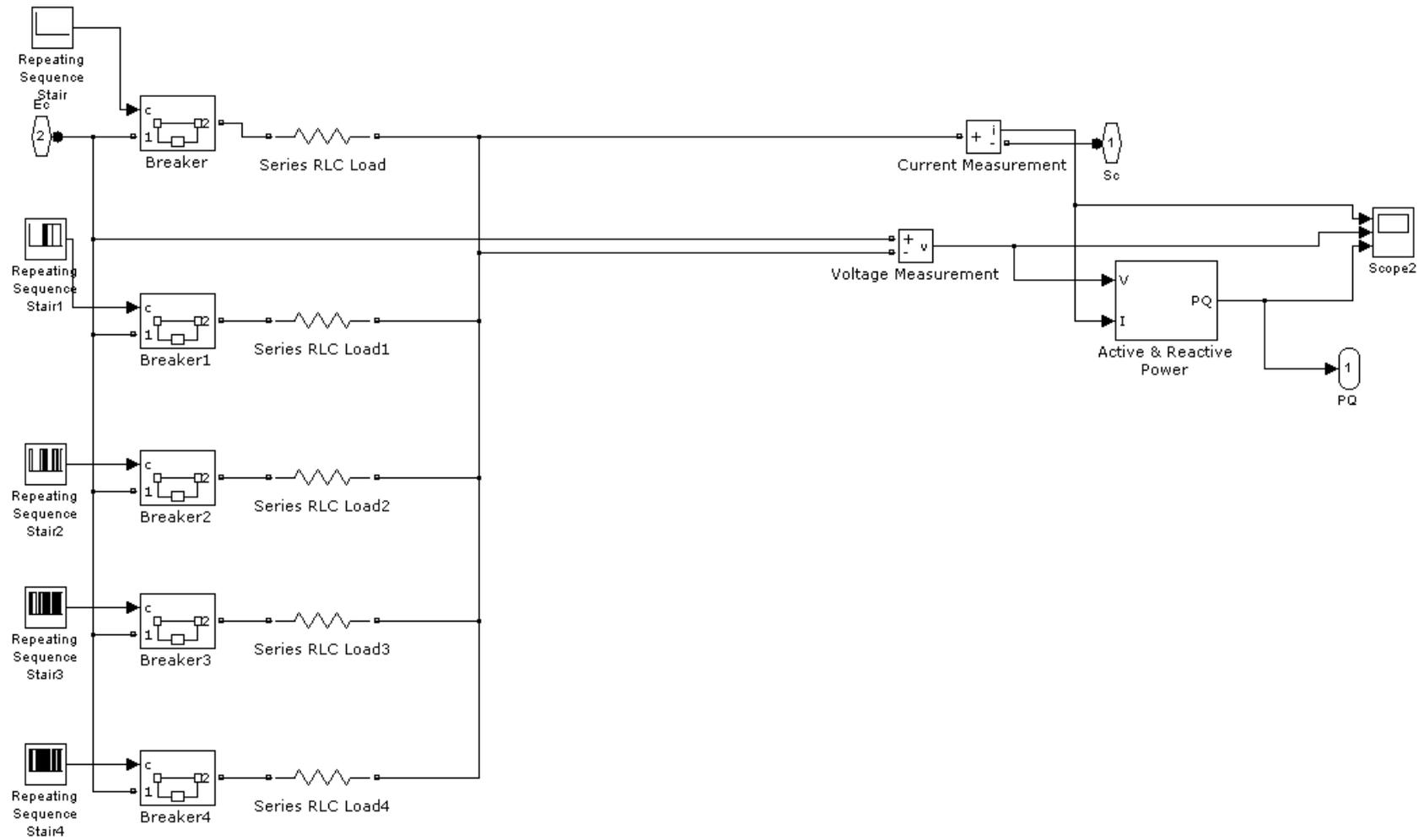


Figura 0.6 – Modelo da carga ativa.

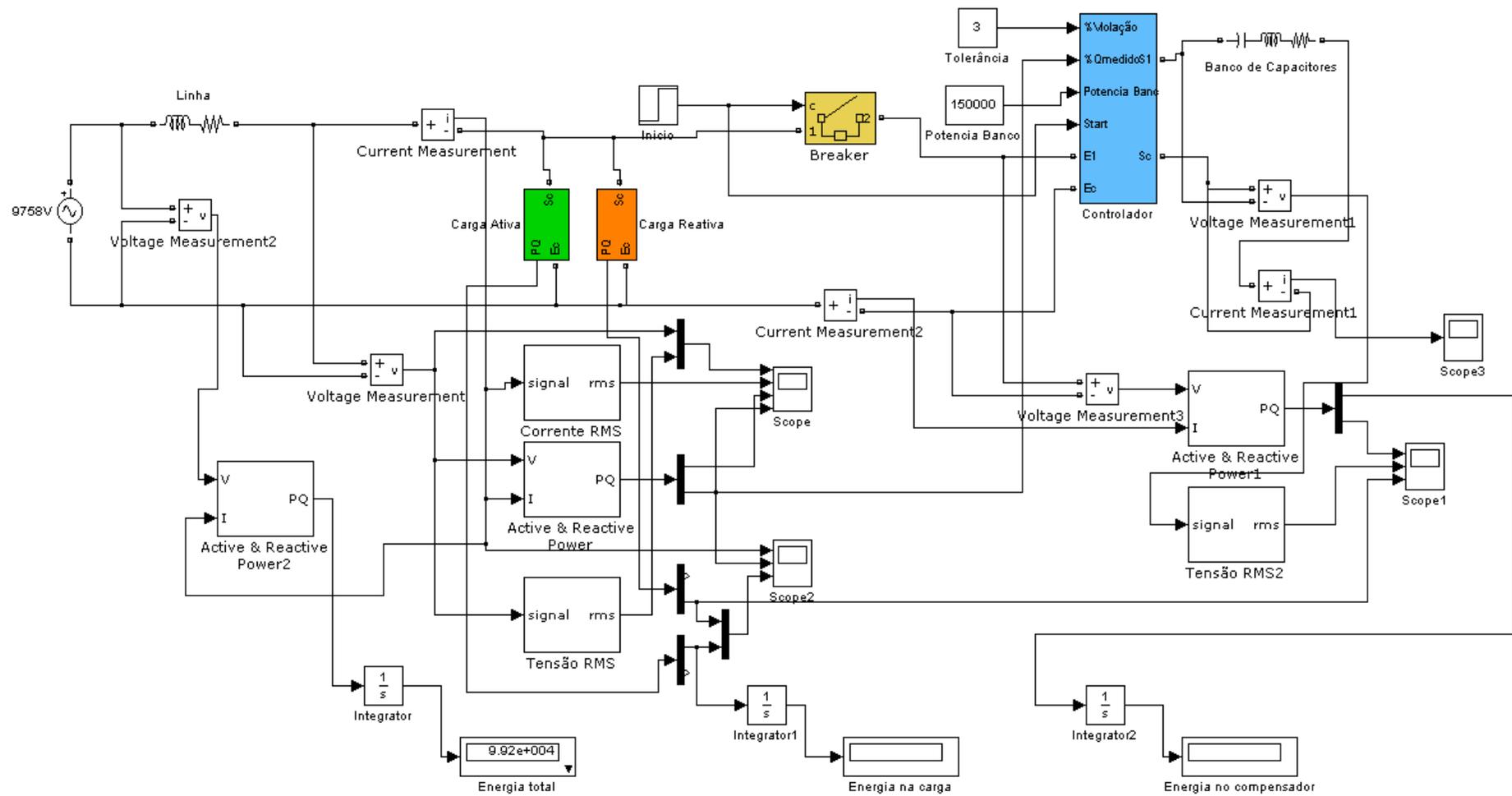


Figura 0.7 – Modelo para análise das perdas.

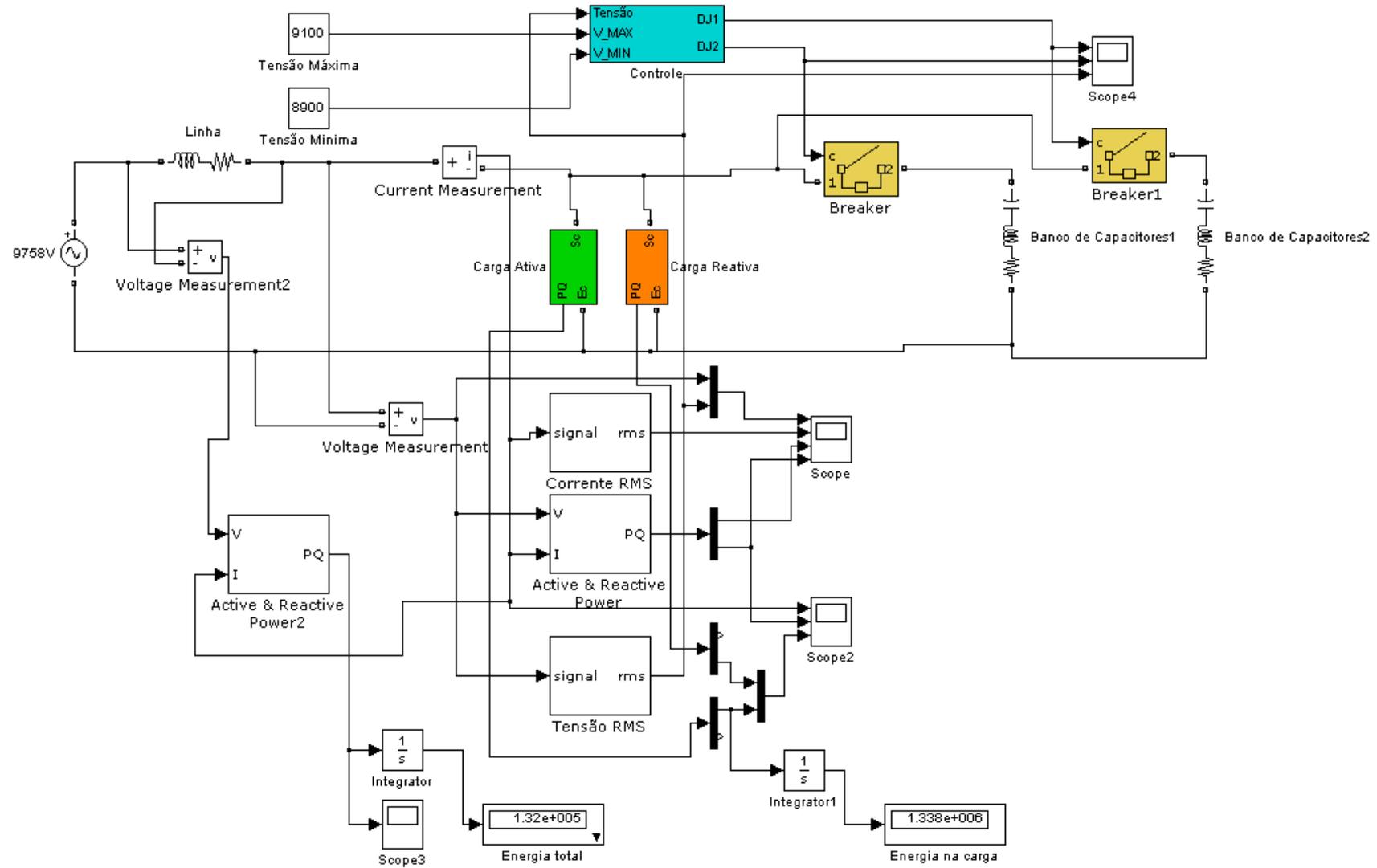


Figura 0.8 – Modelo dos bancos com controle por nível de tensão.

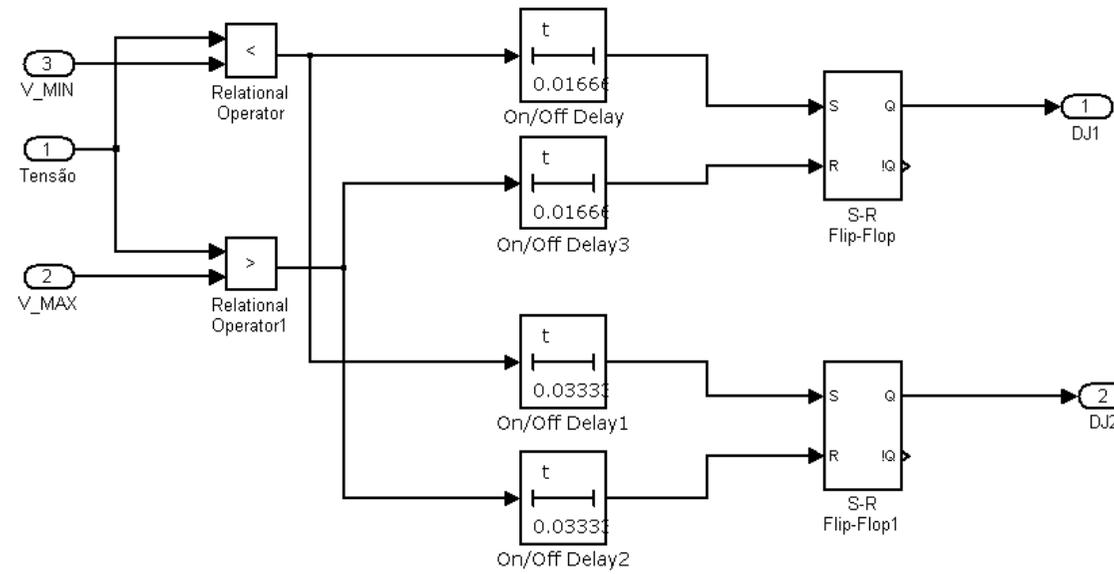


Figura 0.9 – Sistema de controle por nível de tensão.

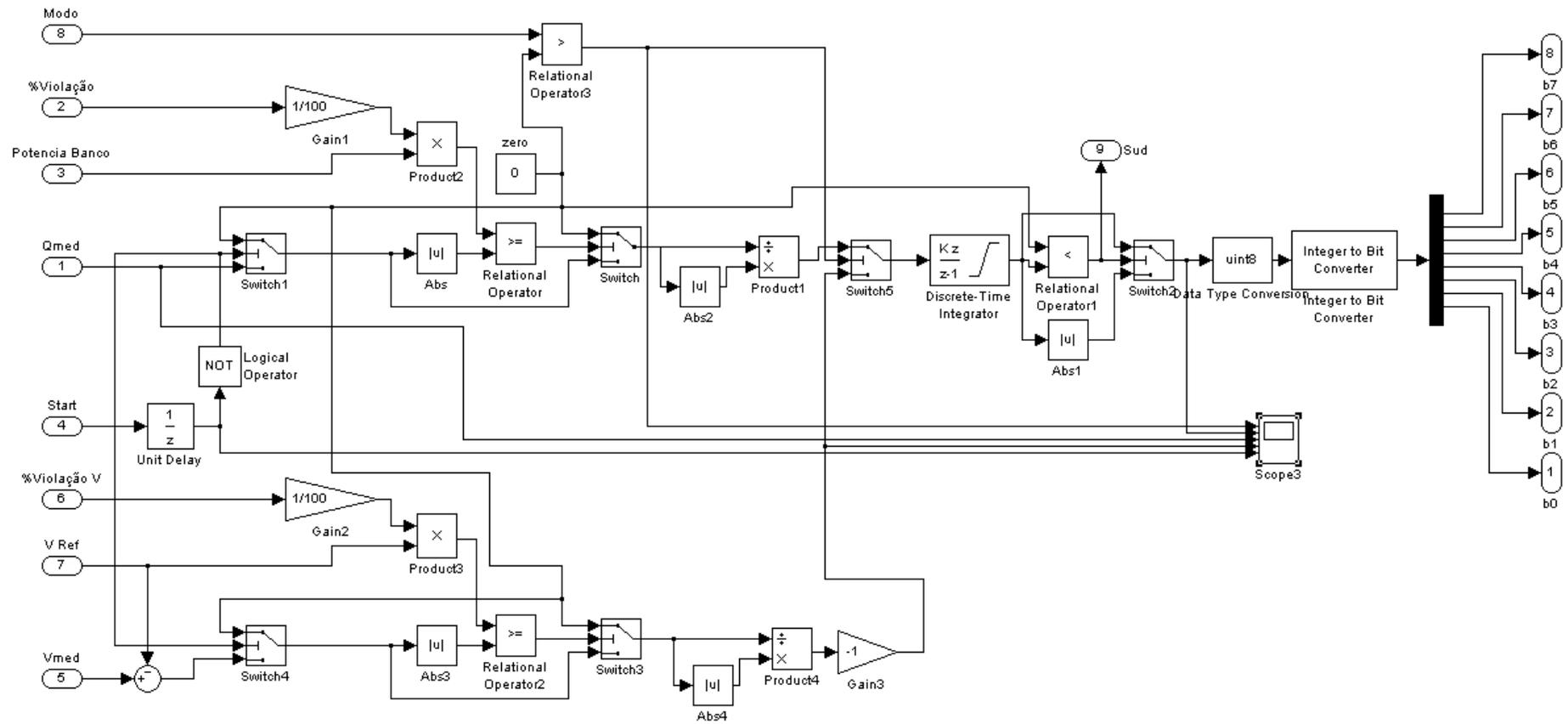


Figura 0.10 – Sistema de controle modificado com controle por tensão.

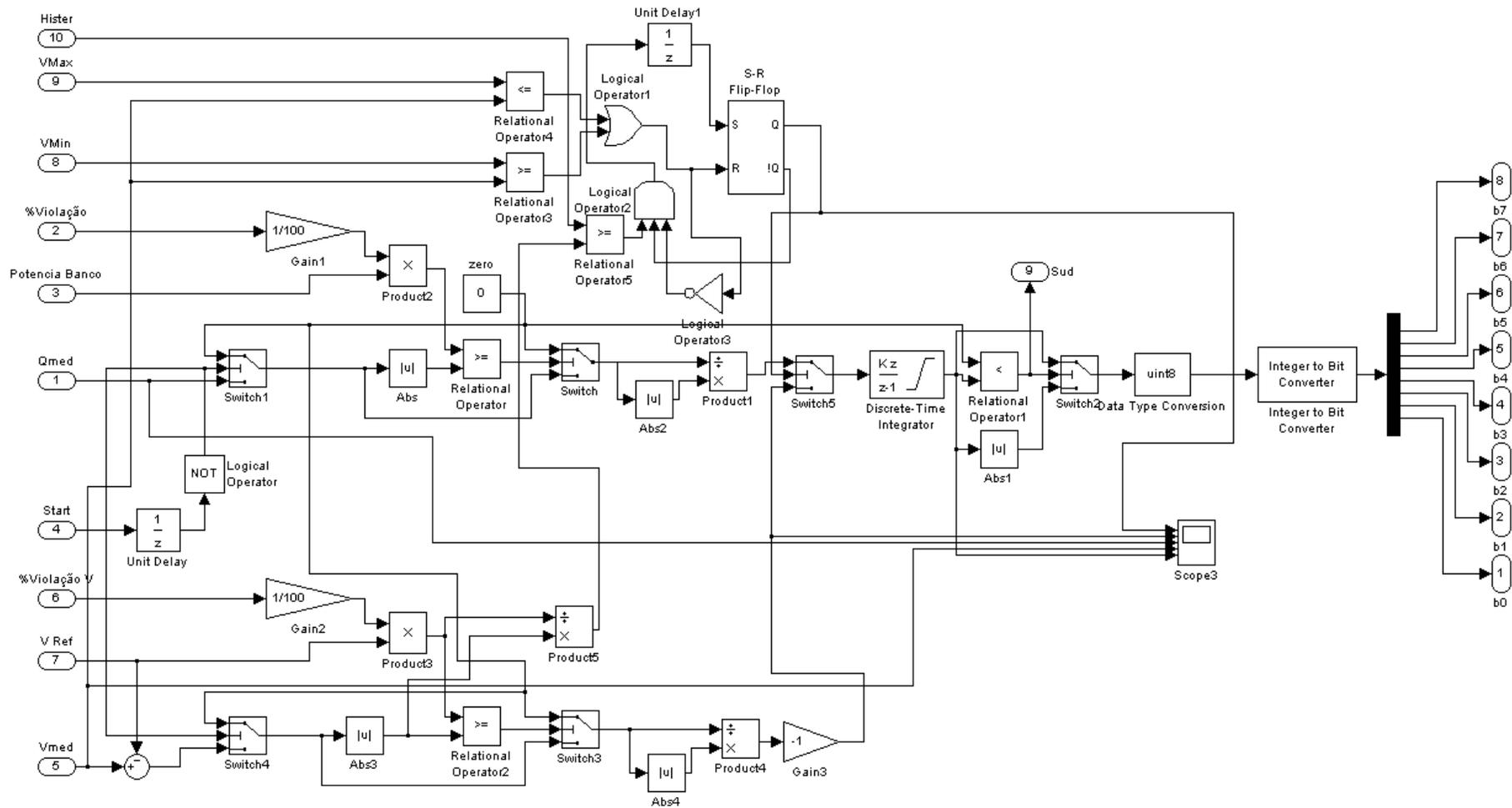


Figura 0.11 – Sistema de controle com modo de operação automático.

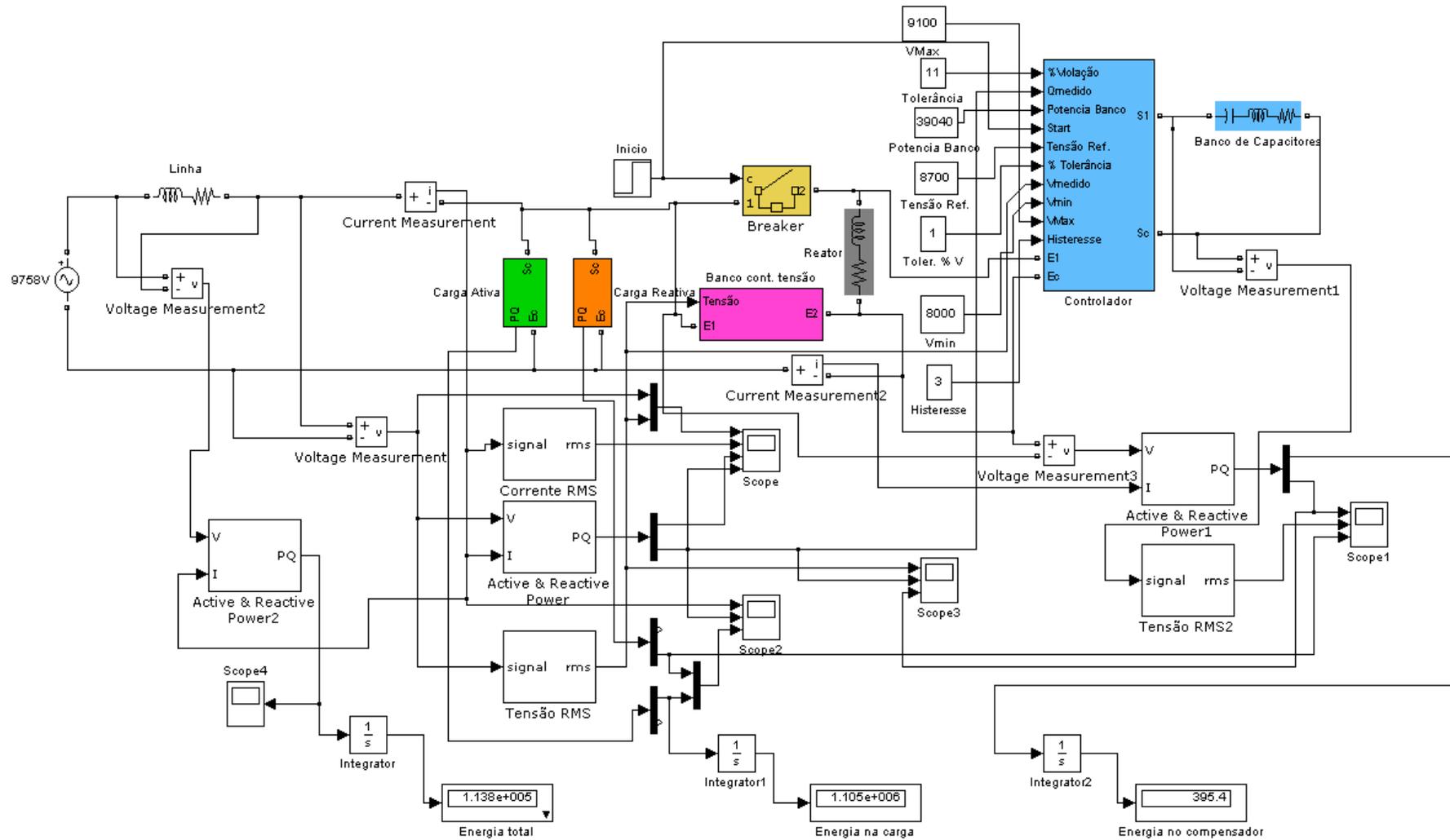


Figura 0.12 – Modelo numérico do compensador estático proposto

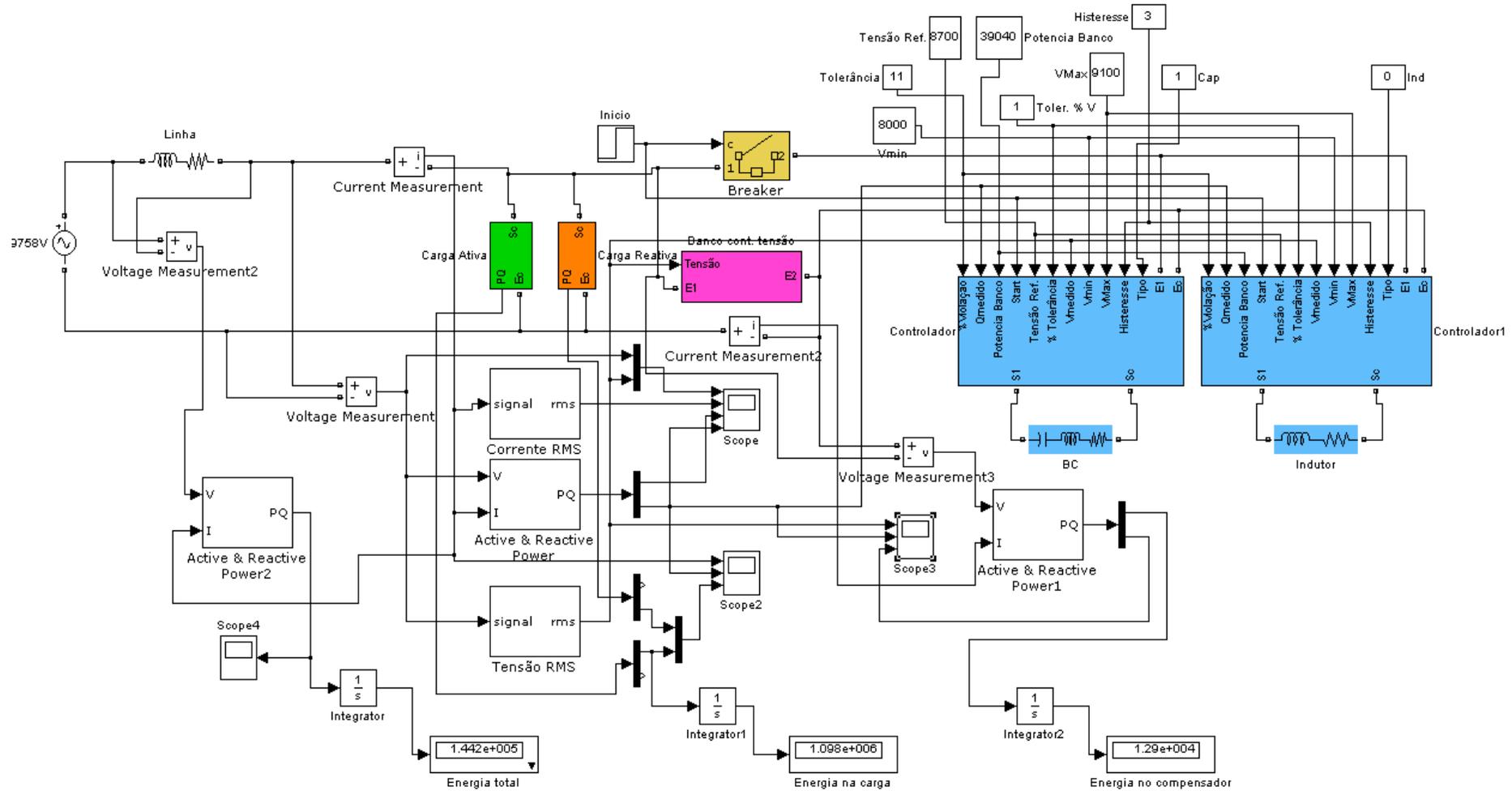


Figura 0.13 – Compensador estático com dois dispositivos de controle.

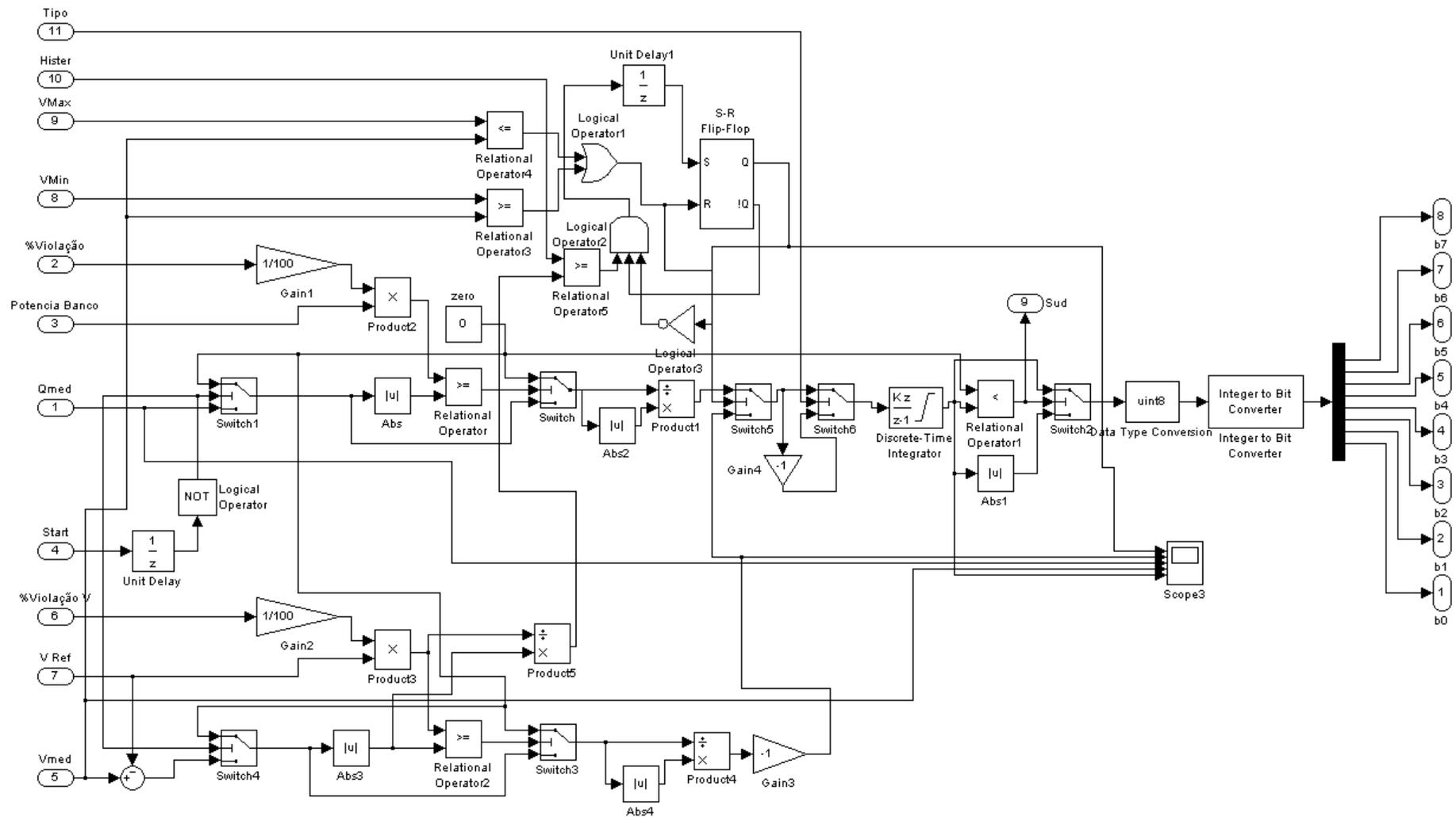


Figura 0.14 – Sistema de controle para fonte de reativo capacitivo ou indutivo.

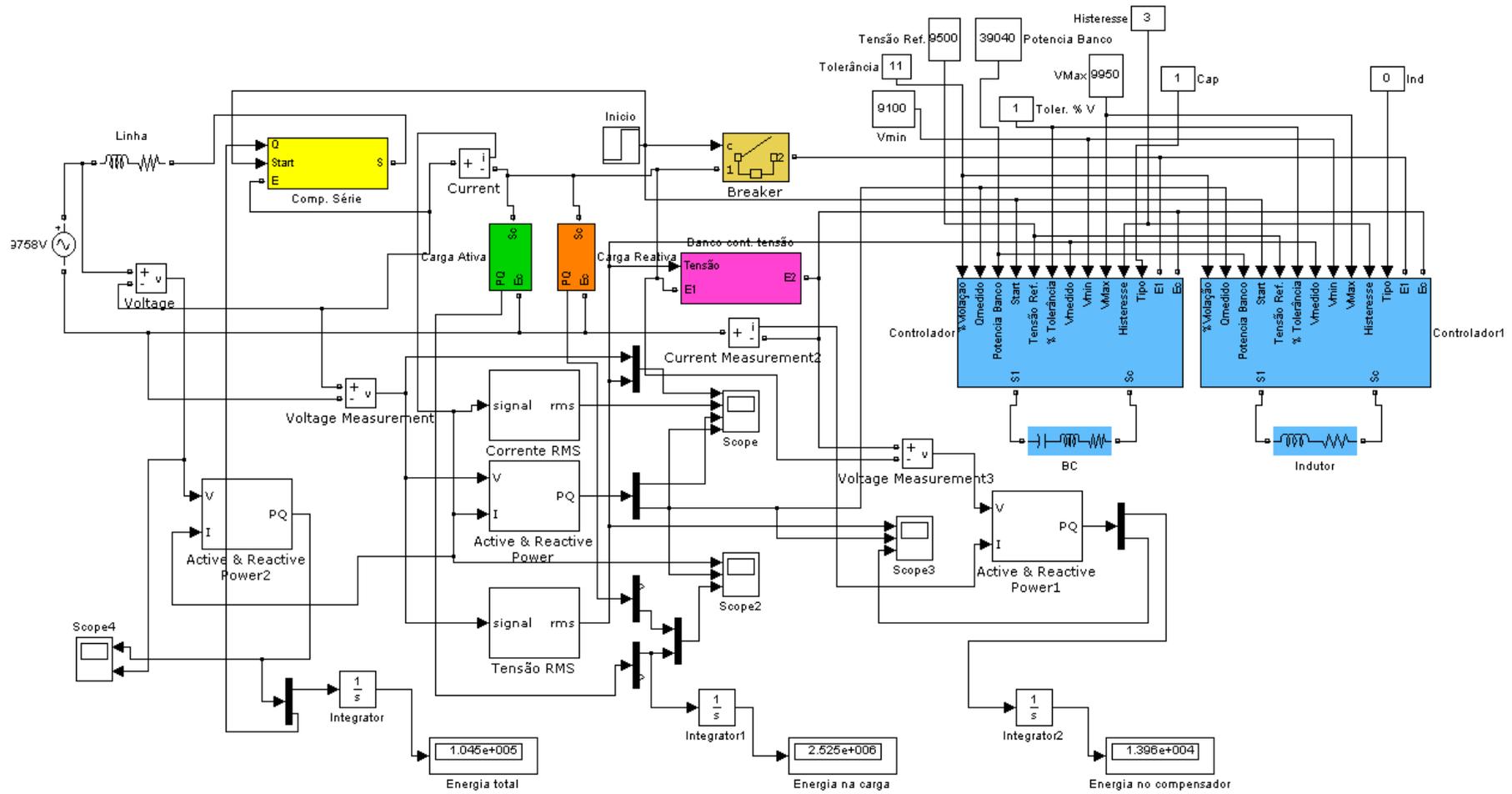


Figura 0.15 - Modelo numérico do sistema completo.

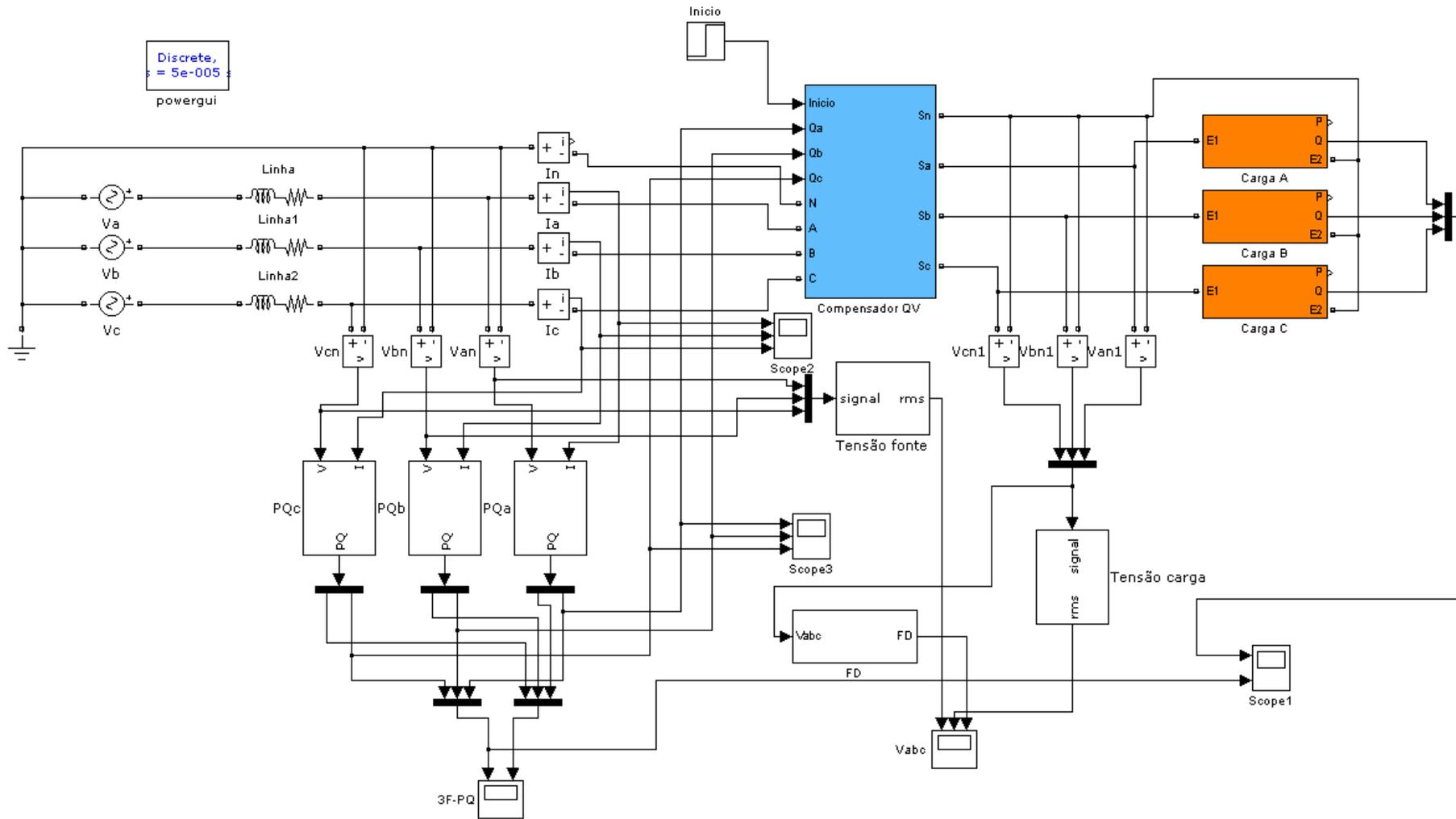


Figura 0.16 - Modelo numérico do compensador Q/V.

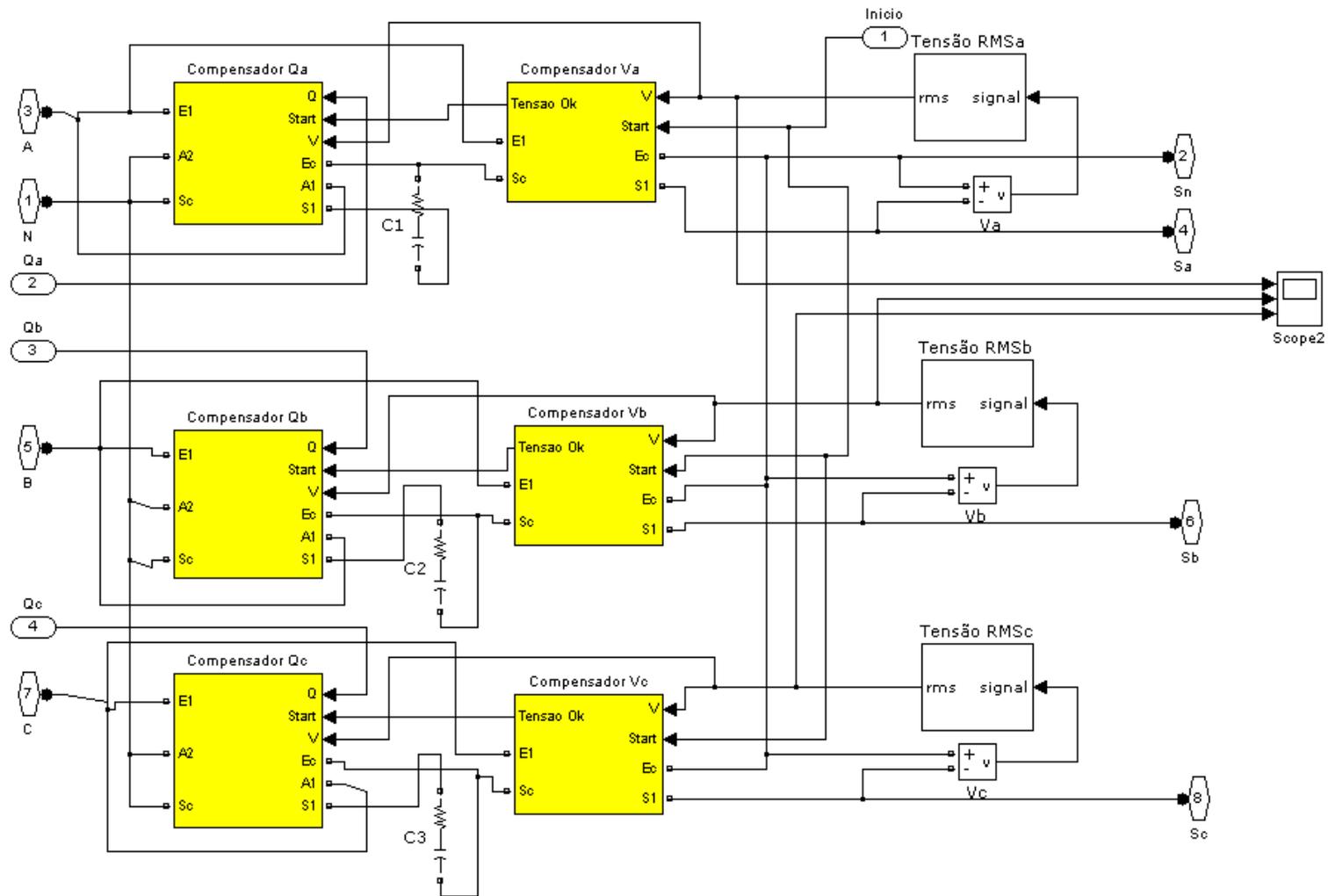


Figura 0.17 - Modelo numérico do subsistema compensador