

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

LAMARTINI MARTINS DE FARIA

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UMA CARGA ELETRÔNICA
REGENERATIVA, BASEADA EM INVERSOR NÃO-AUTÔNOMO,
APLICADA A EQUIPAMENTO CA**

VITÓRIA

2006

LAMARTINI MARTINS DE FARIA

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UMA CARGA ELETRÔNICA
REGENERATIVA, BASEADA EM INVERSOR NÃO-AUTÔNOMO,
APLICADA A EQUIPAMENTO CA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica, na área de concentração em Automação.

Orientador: Prof. Dr. Wilson Corrêa Pinto de Aragão Filho.

VITÓRIA

2006

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

Faria, Lamartini Martins de, 1979-

F224e Estudo e desenvolvimento de uma carga eletrônica regenerativa, baseada em inversor não-autônomo, aplicada a equipamento CA / Lamartini Martins de Faria. – 2006.

88 f. : il.

Orientador: Wilson Corrêa Pinto de Aragão Filho.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Eletrônica de potência. 2. Energia elétrica – Transmissão – Corrente contínua. 3. Conversores a tiristor. 4. Conversores de corrente elétrica. 5. Engenharia elétrica. I. Aragão Filho, Wilson Corrêa Pinto de. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 621.3

LAMARTINI MARTINS DE FARIA

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UMA CARGA ELETRÔNICA
REGENERATIVA, BASEADA EM INVERSOR NÃO-AUTÔNOMO,
APLICADA A EQUIPAMENTO CA**

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisição parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica - Automação.

Aprovada em 20 de dezembro de 2006.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Wilson Corrêa Pinto de Aragão Filho
Universidade Federal do Espírito Santo

Orientador

Prof. Dr. Domingos Sávio Lyrio Simonetti
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Márcio de Almeida Có
Centro Federal de Ensino Tecnológico do Espírito Santo

DEDICATÓRIA

Em primeiro lugar, a Deus, que tudo isso criou e nos deu a sabedoria necessária para entender parte de sua criação.

À minha esposa Leila, pela paciência, amor, incentivo, confiança, tranquilidade e carinho que sempre dedicou a mim, especialmente nos momentos mais difíceis.

Por último, mas não menos importante, à minha família, que sempre me apoiou em minhas decisões e me fez acreditar que era capaz de realizar meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Aos meus amigos e companheiros, especialmente aqueles que compartilharam comigo minhas experiências no Laboratório de Eletrônica de Potência e Acionamentos – LEPAC, em especial, Renato Orletti e Carlos Alberto Sarcinelli.

Aos professor Wilson Correia Pinto de Aragão Filho, pela orientação deste trabalho e pela paciência e compreensão durante toda a minha pós-graduação.

Aos demais professores do LEPAC, que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento do meu trabalho.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Cargas eletrônicas comerciais.....	18
Figura 1.2 Vista do painel frontal da carga eletrônica Sorensen modelo SLM.....	19
Figura 1.3 Ligação entre a carga eletrônica Sorensen e o equipamento sob teste.....	20
Figura 1.4 Curva tensão versus corrente da carga eletrônica Sorensen.....	20
Figura 1.5 Vista frontal da carga eletrônica Chroma modelo 63800.....	21
Figura 1.6 Formas de onda obtidas na entrada da carga eletrônica Chroma.....	21
Figura 1.7 Curva tensão versus corrente da carga eletrônica Chroma.....	22
Figura 1.8 Carga eletrônica regenerativa baseada em conversor Cúk.....	23
Figura 1.9 Carga eletrônica baseada em carga ativa.....	24
Figura 1.10 Carga eletrônica CC regenerativa baseada em inversor não-autônomo.....	24
Figura 2.1 Arranjo geral da carga eletrônica proposta.....	26
Figura 2.2 Circuito utilizado para estudo do retificador.....	27
Figura 2.3 Tensão e corrente em fase.....	28
Figura 2.4 Corrente atrasada em relação à tensão.....	29
Figura 2.5 Corrente adiantada em relação à tensão.....	30
Figura 2.6 Conversor em ponte completa, tiristorizado; (a) operando como retificador; (b) operando como inversor não-autônomo.....	31
Figura 2.7 CERE-CC.....	32
Figura 2.8 CERE-CA.....	33
Figura 2.9 Fluxo de potência na CERE-CA.....	37
Figura 2.10 Diagrama fasorial de tensão e corrente no módulo retificador.....	38
Figura 2.11 Diagrama fasorial de tensão e corrente no módulo inversor.....	39
Figura 3.1 Esquema do circuito do módulo retificador.....	43
Figura 3.2 Esquema do circuito do módulo inversor.....	44

Figura 3.3 Esquema do circuito de comando dos conversores.....	46
Figura 3.4 Curto circuito na falta de isolamento entre as fontes	47
Figura 3.5 Funcionamento em regime com transformadores de isolamento.....	47
Figura 3.6 Circuito de força da CERE-CA.....	49
Figura 3.7 Circuito de comando dos conversores.	50
Figura 3.8 Circuito equivalente considerando ao efeito da indutância de comutação	51
Figura 3.9 Formas de onda para $\alpha = 52^\circ$ e $\beta = 52^\circ$, $V_{CA,I} = 49V$	53
Figura 3.10 Formas de onda para $\alpha = 52^\circ$ e $\beta = 52^\circ$, $V_{CA,I} = 47,5V$	53
Figura 3.11 Formas de onda para $\alpha = 0^\circ$ e $\beta = 69^\circ$; $V_{CA,I} = 49V$	54
Figura 3.12 Formas de onda para $\alpha = 0^\circ$ e $\beta = 69^\circ$; $V_{CA,I} = 47,5V$	54
Figura 4.1 Etapas de funcionamento da CERE-CC.....	57
Figura 4.2 Etapas de funcionamento da CERE-CA.	57
Figura 4.3 Tensão e corrente CA no retificador.	61
Figura 4.4 Tensão e corrente CC no retificador.	61
Figura 4.5 Tensão instantânea e corrente CC no indutor.	62
Figura 4.6 Tensão e corrente CC no inversor.....	62
Figura 4.7 Tensão e corrente CA no inversor.....	63
Figura 4.8 Tensão e corrente CA no retificador.	64
Figura 4.9 Tensão e corrente CA no inversor.....	65
Figura 4.10 Tensão e corrente CA no retificador.	66
Figura 4.11 Tensões real e ideal (tracejada), e corrente CA no retificador.....	67
Figura 4.12 Tensão e corrente CA no inversor.....	67
Figura 4.13 Tensão e corrente CA no retificador.	68
Figura 4.14 Tensões real e ideal (tracejada), e corrente CA no retificador.....	69
Figura 4.15 Tensão e corrente CA no inversor.....	69
A 1 Tensão e corrente CA no retificador.....	78

A 2 Tensão e corrente CC no retificador.....	78
A 3 Tensão instantânea e corrente CC no indutor.....	79
A 4 Tensão e corrente CC no inversor.....	79
A 5 Tensão e corrente CA no inversor.....	80
A 6 Tensão e corrente CA no retificador.....	80
A 7 Tensão e corrente CC no retificador.....	81
A 8 Tensão instantânea e corrente CC no indutor.....	81
A 9 Tensão e corrente CC no inversor.....	82
A 10 Tensão e corrente CA no inversor.....	82
A 11 Tensão e corrente CA no retificador.....	83
A 12 Tensão e corrente CC no retificador.....	83
A 13 Tensão instantânea e corrente CC no indutor.....	84
A 14 Tensão e corrente CC no inversor.....	84
A 15 Tensão e corrente CA no inversor.....	85
A 16 Tensão e corrente CA no retificador.....	85
A 17 Tensão e corrente CC no retificador.....	86
A 18 Tensão e corrente CC no indutor.....	86
A 19 Tensão e corrente CC no inversor.....	87
A 20 Tensão e corrente CA no inversor.....	87

LISTA DE SÍMBOLOS

π	$\pi \cong 3,14$ (dimensão em radiano)
θ	$\theta = \omega t$ (dimensão em radiano)
α	Ângulo de atraso no disparo dos tiristores – $0 \leq \alpha \leq 180^\circ$ (dimensão em grau ou radiano)
β	Ângulo de avanço no disparo dos tiristores $\beta = 180^\circ - \alpha$ (dimensão em grau ou radiano)
ϕ	Ângulo de defasagem entre a tensão e corrente fundamental (dimensão em grau ou radiano)
ω	Freqüência angular do sistema elétrico – $\omega = 2\pi f$ (dimensão em radiano por segundo)
Δi	Variação de corrente sobre o indutor (dimensão em Ampère)
Δi_d	Diferença entre o valor máximo (pico) e mínimo (vale) da corrente sobre o indutor de filtro CC (dimensão em Ampère)
Δt	Variação de tempo (dimensão em segundo)
C	Capacitância (dimensão em Farad)
C_D	Capacitância de carga e descarga do circuito astável (dimensão em Farad)
C_f	Capacitância de filtro CA (dimensão em Farad)
$\cos\phi_1$	Fator de deslocamento entre tensão e corrente fundamental (adimensional)
C_s	Capacitância do <i>snubber</i> (dimensão em Farad)
di/dt	Variação de corrente em um intervalo de tempo (dimensão em Ampère por segundo)
D_{aux}	Disjuntor auxiliar
D_{RB}	Diodo do circuito astável
dv/dt	Variação de tensão e um intervalo de tempo (dimensão em Volt por segundo)
f	Freqüência (dimensão em Hertz)
f_{osc}	Freqüência de oscilação do circuito astável (dimensão em Hertz)
$i_{CA,I}$	Corrente CA instantânea no inversor (dimensão em Ampère)
$i_{CA,R}$	Corrente CA instantânea no retificador (dimensão em Ampère)
$I_{CA,R}$	Fundamental da corrente CA no retificador (dimensão em Ampère)
I_{at}, I_{re}	Correntes rms ativa e reativa (dimensão em Ampère)
i_d, I_d	Correntes rms e média, respectivamente, na linha CC (dimensão em Ampère)

I_{REF}	Corrente de referência na linha CC (dimensão em Ampère)
L	Indutor de filtro CC da carga eletrônica regenerativa (dimensão em Henrie)
L_C	Indutância de comutação (dimensão em Henrie)
MCC	Modo corrente constante
MCP	Modo potência constante
MCR	Modo carga constante
P	Potência ativa
P_R	Potência ativa drenada da fonte CA ou fornecida pelo equipamento sob teste (dimensão em Watt)
P_I	Potência ativa devolvida à da fonte CA (dimensão em Watt)
Q_R, Q_I	Potências reativas devido à corrente fundamental drenadas pelo retificador e inversor, respectivamente (dimensão em Volt-Ampère reativo)
R_{aux}	Reostato auxiliar
R_A, R_B	Resistências ôhmicas do circuito astável (dimensão em ôhm)
R_C	Potenciômetro de controle
R_L	Resistência interna do indutor (dimensão em ôhm)
R_s	Resistência ôhmica do <i>snubber</i> (dimensão em ôhm)
S_R, S_I	Potências aparente do retificador e inversor, respectivamente (dimensão em Volt-Ampère)
T	Período (dimensão em segundo)
t	Tempo (dimensão em segundo)
V_{CA}	Tensão instantânea da rede de alimentação CA
$V_{CA, I}$	Tensão instantânea CA no inversor (dimensão em Volt)
$V_{CA, I, rms}$	Tensão RMS CA no inversor (dimensão em Volt)
$V_{CA, I}$	Tensão média CA no inversor (dimensão em Volt)
$V_{CA, R}$	Tensão instantânea CA no retificador (dimensão em Volt)
$V_{CA, R, rms}$	Tensão RMS CA no retificador (dimensão em Volt)
$V_{CA, R}$	Tensão média CA no retificador (dimensão em Volt)
v_d, V_d	Tensões rms e média, respectivamente, na saída do conversor (dimensão em Volt)
V_R, V_I	Tensões médias de saída do retificador e inversor, respectivamente (dimensão em Volt)
v_L	Tensão rms sobre o indutor de filtro da linha CC (dimensão em Volt)
V_{thy}	Queda de tensão sobre um tiristor durante a condução (dimensão em Volt)

LISTA DE ABREVIATURAS

CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CCAT	Sistema de transmissão em Corrente Contínua em Alta Tensão
CERE	Carga Eletrônica Regenerativa
fp	Fator de Potência
G	<i>Gate</i> do tiristor
HVDC	“High Voltage, Direct Current”
IGBT	“Isolated Gate Bipolar Transistor”
Kt	Catodo do tiristor
pu	Por Unidade
RMS	<i>Root Mean Square</i> – $f(t)_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{-T}^T [f(t)]^2 dt}$
T ₁ , T ₂ , T ₃ , T ₄	Tiristores da carga eletrônica regenerativa
TDH	Taxa de Distorção Harmônica – compara uma forma de onda qualquer a uma senóide
UPS	“Uninterruptible Power Supply” – fonte de energia através de baterias e circuitos eletrônicos

SUMÁRIO

RESUMO	15
ABSTRACT.....	16
1 INTRODUÇÃO GERAL	17
1.1 VISÃO INICIAL	17
1.2 CARGAS ELETRÔNICAS ENCONTRADAS NO MERCADO	18
1.3 ESTUDO DE ALTERNATIVAS REGENERATIVAS MONOFÁSICAS	22
2 ESTUDO DOS CONVERSORES	26
2.1 INTRODUÇÃO	26
2.2 O MÓDULO RETIFICADOR E SEUS POSSÍVEIS MODOS DE FUNCIONAMENTO.....	26
2.2.1 <i>Modo 1: Tensão e corrente em fase.....</i>	<i>28</i>
2.2.2 <i>Modo 2: Corrente atrasada em relação à tensão.....</i>	<i>28</i>
2.2.3 <i>Modo 3: Corrente adiantada em relação à tensão.....</i>	<i>29</i>
2.3 O BARRAMENTO CC	30
2.4 O MÓDULO INVERSOR	31
2.5 O USO DA CERE.....	32
2.6 O CONTROLE DO FLUXO DE POTÊNCIA.....	33
2.6.1 <i>Controle de V_I.....</i>	<i>33</i>
2.6.2 <i>Controle de V_R.....</i>	<i>34</i>
2.7 EQUAÇÕES DA CARGA ELETRÔNICA CA.....	35
2.8 POTÊNCIAS NA CERE	36

2.8.1	<i>Potências no retificador</i>	37
2.8.2	<i>Potências no inversor</i>	38
3	A CERE DESENVOLVIDA	42
3.1	INTRODUÇÃO	42
3.2	CIRCUITO CONVERSOR TIRISTORIZADO	42
3.3	CIRCUITO DE COMANDO DA CERE	44
3.4	O INDUTOR DE FILTRO	46
3.5	O TRANSFORMADOR DE ACOPLAMENTO.....	46
3.6	A INDUTÂNCIA DE COMUTAÇÃO (L_C).....	51
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	56
4.1	CONDIÇÕES PARA A ENTRADA EM FUNCIONAMENTO	56
4.2	DETERMINAÇÃO DA INDUTÂNCIA DE COMUTAÇÃO	58
4.3	TESTES PARA CERE-CA FUNCIONANDO COMO CARGA INDUTIVA.....	59
4.3.1	<i>Carga leve</i>	59
4.3.2	<i>Carga pesada</i>	63
4.4	TESTES PARA CERE-CA FUNCIONANDO COMO CARGA RESISTIVA	65
4.4.1	<i>Carga leve</i>	65
4.4.2	<i>Carga pesada</i>	68
5	CONCLUSÃO	71
5.1	INTRODUÇÃO	71
5.2	CARGAS ELETRÔNICAS E RESISTIVAS	72
5.3	ESTUDO DOS CONVERSORES	72
5.4	A CERE DESENVOLVIDA	73
5.5	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	73

5.6 MELHORIAS A SEREM FEITAS	74
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	76
ANEXO A	78
GLOSSÁRIO.....	88

RESUMO

Apresenta-se nesse estudo uma nova proposta de carga eletrônica regenerativa (CERE) para testes em equipamentos elétricos que permite que laboratórios de eletrônica de potência realizem ensaios com baixas perdas de energia; nesse caso, o fluxo de potência fornecida pelo equipamento em teste é dirigido quase que totalmente de volta para a rede elétrica, minimizando a dissipação de energia por efeito Joule, diferente do que acontece com o uso de resistores ou cargas eletrônicas convencionais. Do ponto de vista técnico, tais ensaios poderão ter suas características variadas segundo a necessidade de análise do equipamento sob teste, permitindo submetê-los a diferentes condições de funcionamento.

O objetivo do protótipo da CERE-CA aqui desenvolvida é apenas comprovar os resultados teóricos e de simulação apresentados na dissertação. Neste primeiro momento, não haverá preocupação com a qualidade da energia que é regenerada para a rede CA, e nem com a precisão do controle do fluxo de corrente drenado da fonte CA. Estas e outras melhorias deverão ser implantadas em pesquisas futuras nessa área de eletrônica de potência.

ABSTRACT

A new proposal for regenerative electronic load testing is presented for experimentation of electronic power circuits. It must allow laboratory experimentation of electronic power circuits with minimal loss of energy; the amount of power provided by the equipment under test is almost totally returned to the mains, reducing the energy loss due to Joule effect, opposite to the use of resistors or conventional electronic loads. The characteristics of the test can be changed, subjecting the equipment to different operating conditions.

The purpose of the CERE-CA prototype developed is only to confirm the theory and simulations results presented. This work doesn't give emphasis to the quality of the energy returned to the mains, neither to the control of the flow of power from the mains. These and other relieves must be developed in future researches of power electronics.

1 INTRODUÇÃO GERAL

1.1 Visão Inicial

O uso de equipamentos para a realização de testes de “burn-in” é algo bem difundido atualmente, não somente para comprovar a eficiência, mas também a confiabilidade do dispositivo sob teste. O teste de “burn-in” consiste em drenar do equipamento sob teste potência durante um intervalo de tempo, que pode durar até 72 horas. Dessa forma, são ensaiados equipamentos como fontes de alimentação, “no-breaks”, UPS, entre outros, utilizando os mais diversos meios possíveis, e emulando os possíveis modos de funcionamento de cada um dos dispositivos citados. Cabe ressaltar que potência aplicada durante certo intervalo de tempo é energia, que tem um custo e deve ser analisada quanto à viabilidade de aplicação.

Um dos meios mais simples e utilizados para a realização desse tipo de teste é o emprego de bancos de resistores. Esse método é razoavelmente eficiente do ponto de vista do próprio teste, mas não o é se analisado em relação à eficiência energética. Isso porque o resistor é uma carga dissipativa, na qual toda a energia por ele recebida é transformada em energia térmica e liberada para o ambiente sob a forma de calor. Assim, não apenas a energia transformada em calor é gasta nesse processo, mas também uma outra parcela de energia é utilizada na eliminação desse calor gerado pelos bancos de resistores. Economicamente, tal solução é dispendiosa, uma vez que a utilização do circuito se torna altamente custosa, visto que testes de “burn-in” têm, normalmente, duração de 48 a 72 horas. Do ponto de vista operacional, a variação de carga não apresenta linearidade devido à variação dos valores de resistência, além de problemas de chaveamento, principalmente quando se observa o aparecimento do efeito “De Bounce”. Isso não é desejável do ponto de vista técnico, uma vez que durante esse fechamento de chaves há picos de corrente, prejudicando a simulação dinâmica de uma carga real, além de levar a um estresse do próprio circuito. Ainda há mais um inconveniente nesse caso que é a utilização de apenas resistores, não oferecendo a possibilidade de emulação de cargas indutivas ou capacitivas.

Existem no mercado vários equipamentos desenvolvidos com base em tecnologia envolvendo circuitos eletrônicos para tal finalidade. Tais equipamentos, tanto para a utilização em CA quanto em CC, se propõem a fornecer linearidade na variação da carga, bem como, em alguns casos, variação do valor do fator de potência, trazendo maior veracidade na realização de testes nos dispositivos já citados; nenhum deles, porém, é eficiente eletricamente, uma vez que não retornam a energia elétrica consumida para a rede: são, ainda, equipamentos onerosos ao usuário, tanto pelo custo inicial quanto pela operação. Na figura 1.1 são apresentados alguns desses dispositivos.



Figura 1.1 Cargas eletrônicas comerciais.

1.2 Cargas eletrônicas encontradas no mercado

As cargas eletrônicas encontradas atualmente, em sua maioria, ou são para corrente contínua ou para corrente alternada, isoladamente. Cargas eletrônicas que permitem flexibilidade de uso em um único equipamento, tanto para corrente contínua quanto para corrente alternada, são difíceis de se encontrar, além de caras, uma vez que o preço das mesmas é de alguns milhares de dólares por unidade. Além disso, são cargas dissipativas, constituídas internamente de bancos de resistores associados a indutores, capacitores e circuitos retificadores, juntamente a circuitos de comando.

Alguns fabricantes atualmente fornecem ao consumidor desse tipo de equipamento algumas opções que vão desde simples cargas resistivas até cargas eletrônicas, tanto para equipamentos CA quanto CC, e, em alguns casos, cargas que podem operar em ambas as situações.

Na Fig. 1.2 é mostrado o painel frontal de uma carga eletrônica CC/CA do fabricante Sorensen [24], atualmente disponível no mercado, e algumas de suas características de operação são apresentadas a seguir.

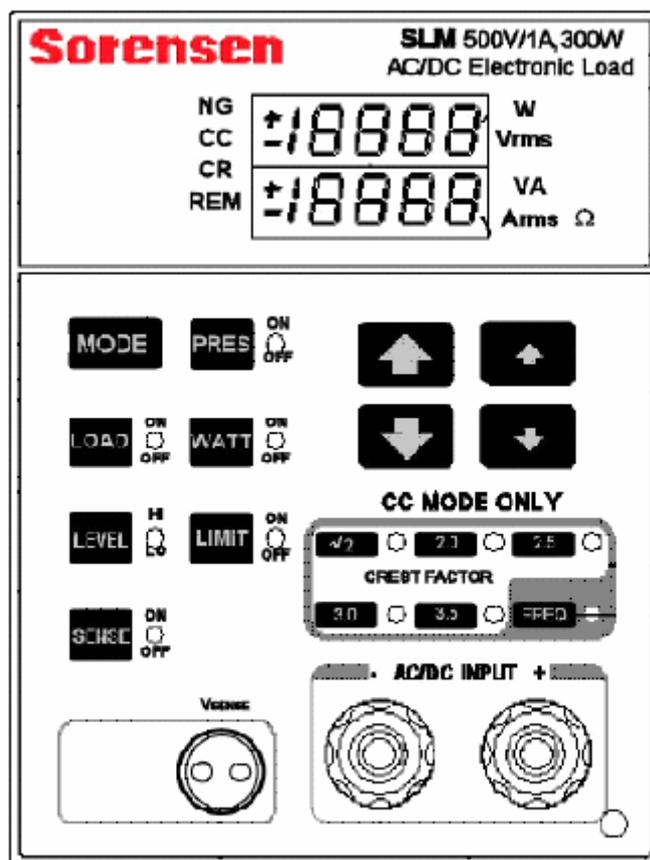


Figura 1.2 Vista do painel frontal da carga eletrônica Sorensen modelo SLM.

Quando consumindo grandes correntes, utiliza-se um conector especial para uma leitura mais precisa: uma amostra da tensão da fonte pode ser conectada a esse ponto, de modo a desprezar a queda de tensão nos condutores, conforme mostra a Fig. 1.3.

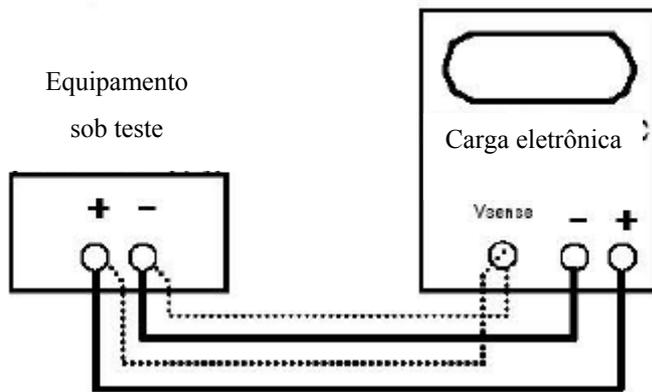


Figura 1.3 Ligação entre a carga eletrônica Sorensen e o equipamento sob teste.

Essa carga pode drenar até 300W de uma fonte supridora monofásica, com tensão variando entre 0 e 500V e corrente entre 0 e 1A, conforme apresenta a Fig. 1.4. Sua operação pode ser a corrente constante (MCC) ou a carga constante (MCR). Como desvantagem, não oferece opções de variação de fator de potência ao operador.

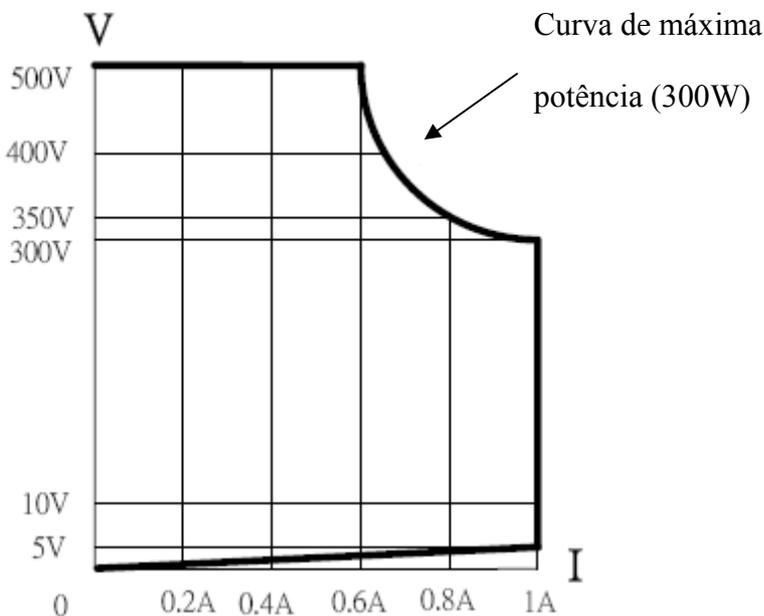


Figura 1.4 Curva tensão versus corrente da carga eletrônica Sorensen.

Mais informações sobre essa carga eletrônica podem ser obtidas diretamente no site do fabricante [24].

Outra carga também disponível é apresentada na Fig. 1.5 [23].



Figura 1.5 Vista frontal da carga eletrônica Chroma modelo 63800.

Como características de funcionamento, essa carga oferece:

- Operação a corrente constante (MCC), resistência constante (MCR) ou potência constante (MCP);
- Operação com variável fator de potência (0 a 1,0, indutivo ou capacitivo) e fator de crista (de 1,414 a 5,0);
- Medição de transitórios e regime permanente de respostas para tensão True RMS, corrente True RMS, potência ativa, reativa e aparente, fator de crista, fator de potência e corrente de pico, além de saída analógica para osciloscópio (caso exemplificado na Fig. 1.6).

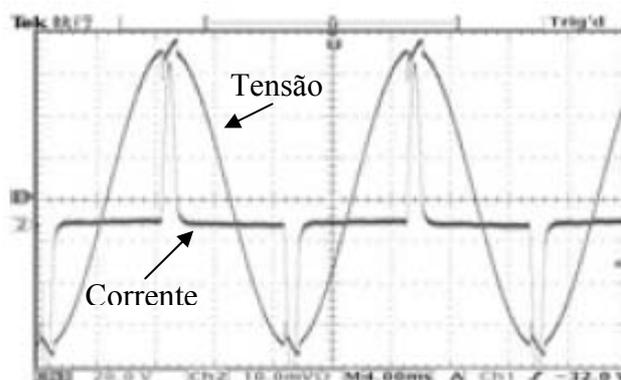


Figura 1.6 Formas de onda obtidas na entrada da carga eletrônica Chroma.

Essa carga monofásica tem potência máxima admitida de 4500VA, com correntes variando entre 0 e 45A RMS (com pico de 135A), tensão variando de 50 a 350V RMS e frequência entre 45 e 70Hz, conforme apresentado na Fig 1.7.

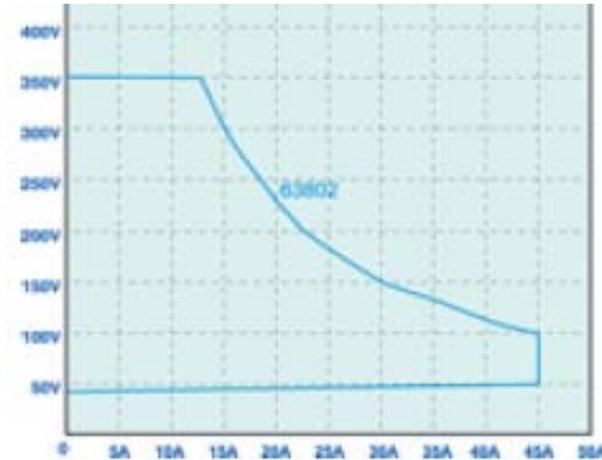


Figura 1.7 Curva tensão versus corrente da carga eletrônica Chroma.

Tais aplicações são bem interessantes do ponto de vista de testes em circuitos, mas não da eficiência energética. Mesmo apresentando flexibilidade quanto à emulação de situações reais de carga, toda a energia drenada da fonte é consumida internamente, gerando custo para a realização desse tipo de teste (“burn-in”). Uma carga eletrônica que pudesse retornar à rede a energia dela drenada, pelo menos em parte, seria muito útil, tendo em vista que o tempo de utilização dessas cargas em um teste de burn-in é bem longo, o que levará a um consumo elevado de energia.

1.3 Estudo de alternativas regenerativas monofásicas

O desenvolvimento de alternativas regenerativas deve levar em consideração a existência de cargas CC e CA. Várias alternativas já foram propostas, utilizando diferentes topologias de circuito e trazendo consigo vantagens e desvantagens.

Um método proposto consiste em utilizar um conversor do tipo Cúk para uso em laboratório [4]. Esse arranjo permite regeneração da energia absorvida com alta eficiência, retornando corrente quase senoidal à rede elétrica. O rendimento comprovado desse arranjo é da or-

dem de 95% de energia regenerada. Não oferece, porém, a possibilidade de variação no fator de potência.

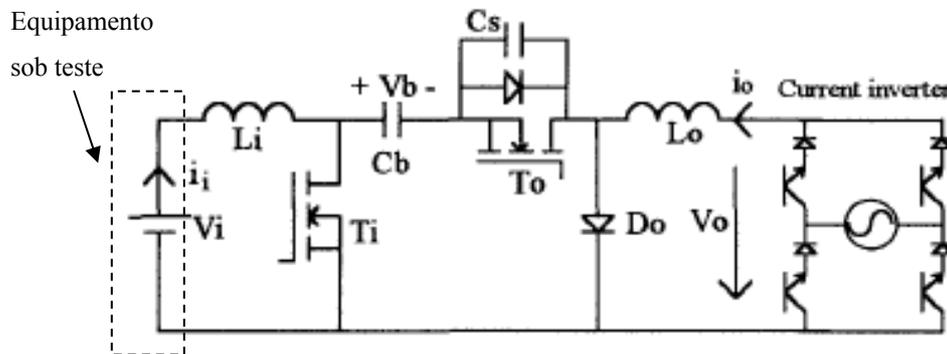


Figura 1.8 Carga eletrônica regenerativa baseada em conversor Cúk.

Outra alternativa seria a utilização de uma carga ativa [8], de forma que a energia entregue pelo equipamento sob teste não retorne à rede, mas sim ao capacitor de entrada do módulo de carga, conforme o arranjo apresentado na Fig. 1.9. Esse método é interessante do ponto de vista econômico, uma vez que o rendimento do conjunto é de aproximadamente 70%, e também quanto à versatilidade, uma vez que pode ser aplicado tanto a equipamentos com saída CC quanto CA. Outra grande vantagem desse arranjo é a ausência do inversor e do filtro de saída, o que reduz a complexidade do circuito. Como inconveniente, observa-se, que a conexão desse módulo proposto exige conhecimento prévio para a ligação do mesmo ao capacitor de entrada do equipamento sob teste, ao mesmo tempo em que é necessária a abertura da carcaça do mesmo. Outro fato que também deve ser considerado é que a fase da carga não pode ser controlada pelo usuário, o que restringe a veracidade do teste.

O princípio de operação das cargas ativas propostas pode ser descrito por dois estágios de funcionamento, sendo:

- O primeiro estágio inicia quando a chave **Sb** é fechada. O estágio termina com a abertura da chave **Sb**, que ocorre quando a corrente no indutor **Lb** alcança o valor da corrente de referência, mais Δi_I imposto pela histerese.

- O segundo estágio inicia quando **Sb** é aberta e o indutor **Lb** devolve energia para o capacitor de filtro de entrada. Este estágio termina quando **Sb** é fechada no momento em que i_{Lb} fica menor que a corrente de referência, dando início ao primeiro estágio.

O fato da corrente no indutor L_b ser controlada por histerese simplifica a implementação e controle de corrente da carga ativa.

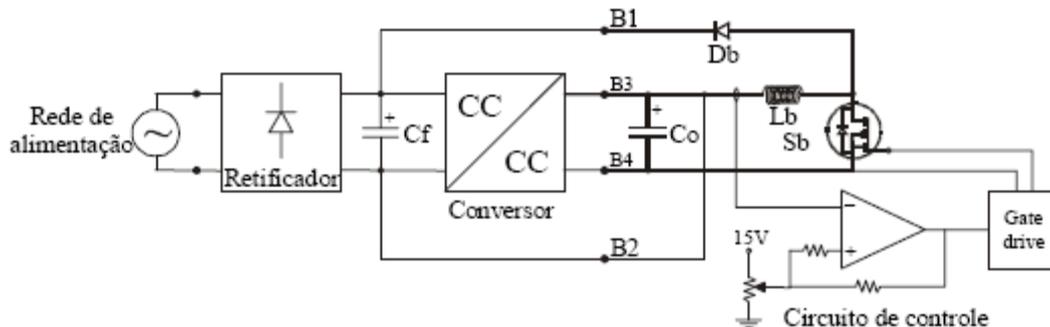


Figura 1.9 Carga eletrônica baseada em carga ativa.

Uma solução alternativa foi proposta utilizando a idéia de um elo CC, assim como em sistemas de transmissão em alta tensão, corrente contínua (HVDC) [2].

O conceito é que o equipamento sob teste (Fig. 1.10) é conectado ao inversor, estando este ligado à rede elétrica. O núcleo principal desse arranjo é o conversor em ponte completa, tecnologia já bastante conhecida e utilizada de maneira confiável e eficiente em vários sistemas de transmissão elétrica em todo o mundo. Traz consigo também a simplicidade no arranjo, onde tanto o módulo retificador quanto o módulo inversor são constituídos por quatro chaves semicondutoras de potência (para o caso monofásico), semi ou totalmente controladas, podendo ocorrer a comutação de forma autônoma ou não, dependendo do tipo de chave utilizada. A versatilidade desse arranjo é a utilização tanto em sistemas CC quanto CA, com alta eficiência energética e controle total da carga, tanto em módulo quanto em fase, o que o torna uma alternativa muito atraente para a utilização em testes de “burn-in”.

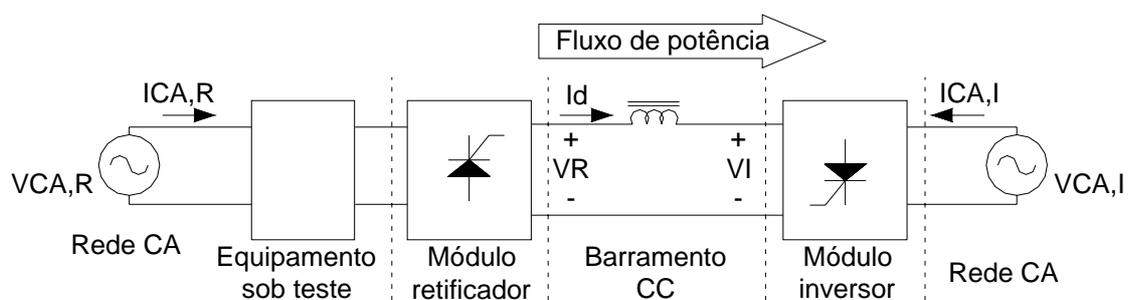


Figura 1.10 Carga eletrônica CC regenerativa baseada em inversor não-autônomo.

Um dispositivo capaz de funcionar como carga eletrônica que devolva a energia drenada à rede, que funcione tanto em CC quanto em CA, e que ofereça controle de suas grandezas mais importantes (tensão, corrente, fator de potência) é o objetivo desse estudo.

Propõe-se aqui um modelo monofásico baseado em dois circuitos conversores (retificador e inversor), constituídos de pontes monofásicas completas tiristorizadas, em ambos os casos, interligados por um barramento CC. A potência drenada pelo retificador é entregue ao inversor, que a retorna à rede elétrica, com baixas perdas devido às próprias características do arranjo.

2 ESTUDO DOS CONVERSORES

2.1 Introdução

O núcleo de funcionamento desse projeto é baseado em dois conversores CA/CC, ambos conceitualmente idênticos. Um estudo detalhado de cada um deles, ressaltando suas características principais de funcionamento, suas equações e suas formas de onda, se faz necessário.

A carga eletrônica CA proposta conta de três componentes principais: módulo retificador, barramento CC e módulo inversor, conforme mostra a figura 2.1.

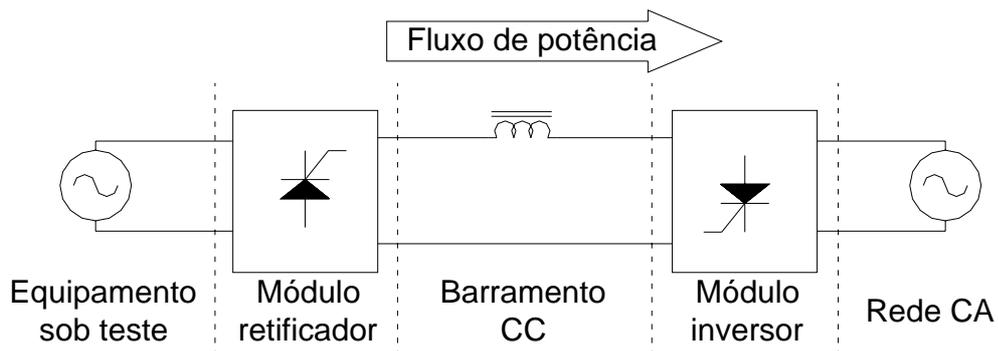


Figura 2.1 Arranjo geral da carga eletrônica proposta.

Em um primeiro momento, um estudo isolado de cada componente é apresentado, e posteriormente somar-se-ão os efeitos dos mesmos quando juntos no circuito completo.

2.2 O módulo retificador e seus possíveis modos de funcionamento

Dependendo do tipo de chave semicondutora utilizada, é possível operar um circuito retificador em três diferentes modos, apresentados a seguir. Nesse primeiro momento não será discutido sobre as harmônicas de corrente que aparecem nesse tipo de circuito e a forma de minimizar seus efeitos na rede elétrica.

As equações de potência ativa e reativa de um retificador monofásico de onda completa serão apresentadas posteriormente.

O circuito utilizado para as simulações, apresentado na Fig. 2.2, é constituído de um retificador monofásico de onda completa, tendo como carga em sua saída um resistor e um indutor, simulando uma fonte de corrente. Como a idéia principal da carga proposta é o princípio de funcionamento de um sistema HVDC real, suas características de operação são bastante semelhantes; dessa forma, a corrente CA nesse estudo é quadrada. A análise de defasamento entre a tensão e a corrente terá como referência as formas de onda de tensão e da fundamental da corrente. Nesse primeiro momento, apenas foram captadas formas de onda para comprovação dos modos de funcionamento, sem a preocupação de quantificar as grandezas envolvidas. Em todos os gráficos as formas de onda referem-se ao lado CA do retificador, sendo $V_{CA,R}$ a tensão de entrada, $i_{CA,R}$ a corrente de entrada e sua fundamental, $I_{CA,R}$. As comparações sobre defasamento são sempre entre a tensão $V_{CA,R}$ e a corrente $I_{CA,R}$.

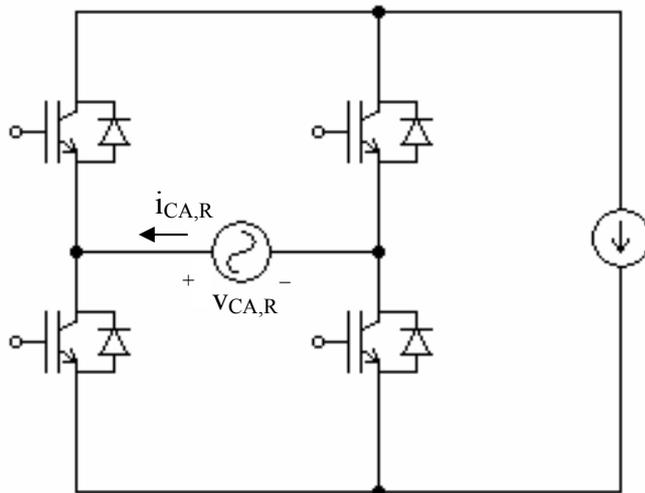


Figura 2.2 Circuito utilizado para estudo do retificador.

As simulações apresentadas a seguir foram obtidas com o controle de condução das chaves. Para o modo resistivo, a chave é fechada exatamente quando a forma de onda de tensão passa por zero; para o modo indutivo, a chave é fechada após esse cruzamento por zero e para o caso capacitivo, a chave é fechada antes da passagem da tensão por zero. Os tempos de defasagem entre o cruzamento da tensão por zero e o fechamento das chaves foi convenient-

temente escolhido de forma a fornecer as formas de onda necessárias para a análise em cada caso.

2.2.1 Modo 1: Tensão e corrente em fase

Nesse caso, que se assemelha às formas de onda de tensão e corrente obtidas em um resistor, pode-se utilizar uma chave semicondutora do tipo diodo, tiristor ou IGBT. Nota-se através da simulação que é possível emular o funcionamento de uma carga totalmente resistiva, com defasamento nulo entre as formas de onda de tensão e da fundamental da corrente e, consequentemente, fator de potência unitário. Particularmente, é interessante utilizar um retificador não autônomo, visto que chaves do tipo diodo ou tiristor têm saída de condução imposta pela própria rede elétrica, através da forma de onda da tensão. Uma vez polarizadas reversamente, essas chaves tendem a extinguir a corrente que circula por elas. O uso de chaves do tipo IGBT torna esse arranjo mais complexo do ponto de vista do controle de condução, uma vez que tanto a entrada quanto a saída do estado de condução devem ter controle externo.

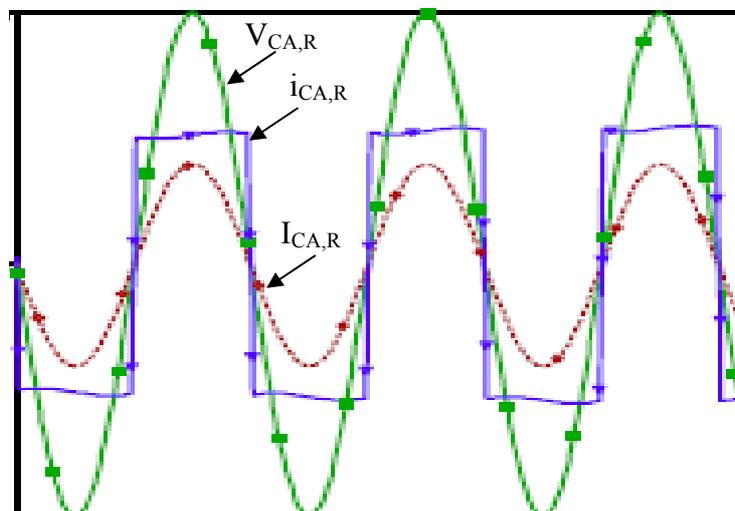


Figura 2.3 Tensão e corrente em fase.

2.2.2 Modo 2: Corrente atrasada em relação à tensão

Nesse modo de condução, pode-se simular o funcionamento de um circuito de natureza indutiva. Através do gráfico gerado na simulação apresentada, observa-se um atraso da fundamental da corrente em relação à tensão, conforme ocorre em um circuito indutivo. É

possível, então, utilizar o retificador para ser acoplado à saída de uma fonte CA, de forma a se comportar para tal fonte como um circuito de fator de potência menor que um, e de natureza indutiva. Nesse caso, o uso de diodos não é possível, uma vez que a corrente deve ser atrasada em relação à tensão. Uma vez mais, o uso de um retificador não autônomo é uma alternativa que simplifica o circuito de controle, visto que a utilização de tiristores nesse caso é possível. O uso de chaves do tipo IGBT também é aplicável, observando-se que ainda é preciso o controle dos momentos de entrada e saída de condução.

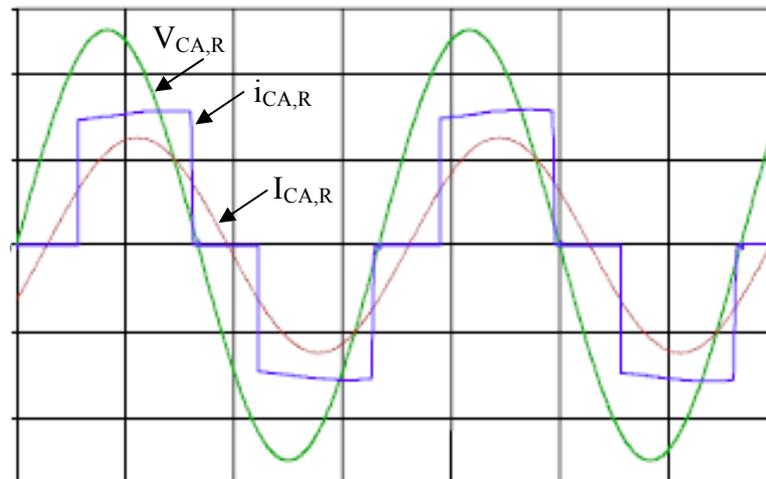


Figura 2.4 Corrente atrasada em relação à tensão.

2.2.3 Modo 3: Corrente adiantada em relação à tensão

Para simular um circuito de natureza capacitiva é necessário que a fundamental da corrente esteja adiantada em relação à tensão. É preciso, então, que haja condições para que a corrente comece a circular antes do zero da tensão. O uso de tiristores não mais é possível, visto que ele conduz apenas quando está polarizado diretamente e recebe um pulso de corrente em seu gate, simultaneamente. A configuração a ser utilizada nesse caso deverá ser escolhida de modo que haja controle total sobre as chaves. Um arranjo possível é a utilização de IGBT's, que permitem o controle total requerido.

Conforme pode ser observado nas formas de onda, a corrente adianta-se em relação à tensão, conforme o esperado.

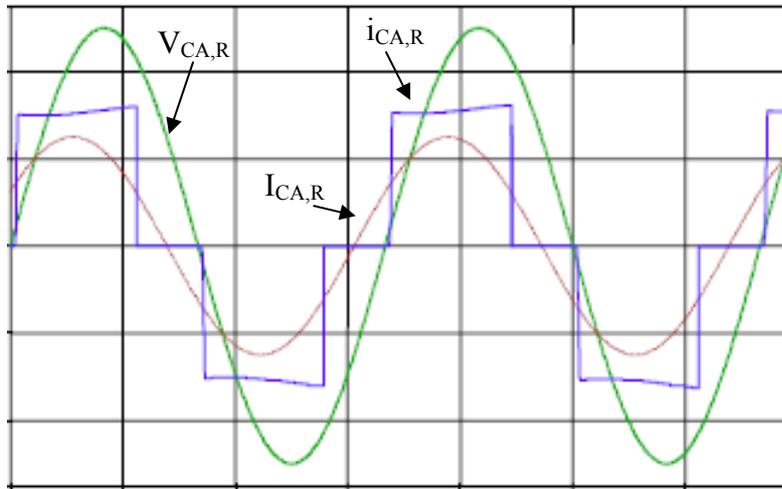


Figura 2.5 Corrente adiantada em relação à tensão.

Nos três casos apresentados, o retificador pode contemplar o funcionamento dos três diferentes tipos de circuito existentes, dependendo do controle das chaves semicondutoras, que poderá ser feito de acordo com as necessidades do usuário. Observa-se que, mesmo sendo um circuito ainda dissipativo, ele possibilita a versatilidade de utilização quanto à variação do fator de potência percebido pela fonte que o alimenta. Dessa forma, caso haja a opção pela utilização de um circuito dissipativo, pode-se utilizar esse arranjo para a emulação de uma carga eletrônica. O uso de chaves do tipo IGBT permite a simulação dos três tipos de funcionamento possíveis (circuitos resistivos, indutivos e capacitivos), ao passo que o tiristor só permite simular circuitos resistivos e indutivos.

2.3 O barramento CC

O barramento CC da carga eletrônica consta de um caminho fechado no qual circula a corrente CC. Compõe-se de um indutor e conexões através de condutores de modo a fechar o circuito.

O indutor do barramento tem a função de alisar a corrente CC, reduzindo as ondulações que aparecem devido às diferenças instantâneas de tensão entre retificador e inversor.

É necessário considerar que essa parte do circuito apresenta resistência devido à sua própria construção. A quase totalidade dessa resistência é devida à resistência associada ao

indutor, constituído de uma bobina de condutores, que, devido à própria resistividade de seu material, apresenta essa característica.

2.4 O módulo inversor

Também constituído por uma ponte completa monofásica, cabe ao inversor devolver à rede elétrica a diferença entre a energia fornecida pelo retificador e a energia dissipada no barramento CC.

O inversor consome potência reativa em seu funcionamento. Tal fato deve ser controlado para que o módulo tenha o menor consumo de energia possível, e maximize o fator de potência visto pela rede elétrica. Trabalhar com o ângulo de avanço β em um valor mínimo possível garante a redução no consumo dessa potência pelo conversor; observa-se ainda que o ângulo β tem restrições quanto a seu valor mínimo, de modo a garantir a condução. Isso será discutido posteriormente.

O funcionamento de um conversor em ponte completa, tiristorizado, como inversor exige a presença de uma fonte de tensão contínua, com polaridade convenientemente escolhida, garantindo a circulação de corrente. A polaridade dessa fonte de tensão CC deve ser negativa em relação ao sentido convencional de tensão na saída de um retificador, de forma que ela alimente o inversor.

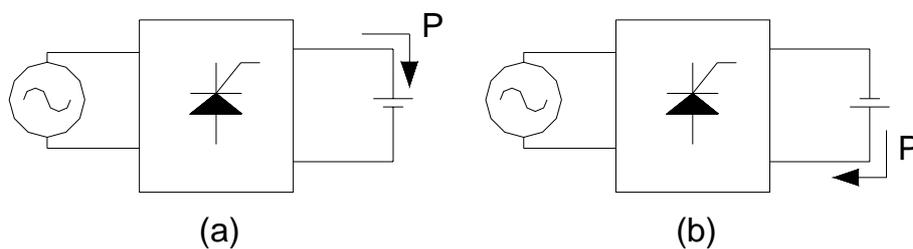


Figura 2.6 Conversor em ponte completa, tiristorizado; (a) operando como retificador; (b) operando como inversor não-autônomo.

Assim, o funcionamento completo da carga eletrônica passa por três estágios principais:

1° - O módulo retificador recebe a tensão de saída do equipamento sob teste, transformando-a em tensão contínua, na entrada do barramento CC;

2° - Já no barramento CC, a corrente é filtrada ao passar pelo indutor, reduzindo também sua ondulação (“ripple”);

3° - O inversor é alimentado com corrente lisa e tensão retificada. Uma vez garantidas as condições de funcionamento descritas anteriormente, o inversor devolverá a energia absorvida à rede elétrica.

2.5 O uso da CERE

Uma das maiores vantagens da carga eletrônica desenvolvida é sua versatilidade quanto à aplicação, que pode ser tanto para uso em sistemas CC quanto em sistemas CA.

O uso em sistemas CC já foi estudado e desenvolvido anteriormente [1], comprovando-se experimentalmente aquilo que era esperado para seu funcionamento. A carga eletrônica CC se presta à aplicação em testes de “burn-in” para equipamentos com saída CC, regenerando a energia entregue por tais equipamentos de volta à rede CA, após passar pelo processo de inversão, feito pelo conversor trabalhando em seu modo inversor, conforme apresentado na Fig. 2.7.

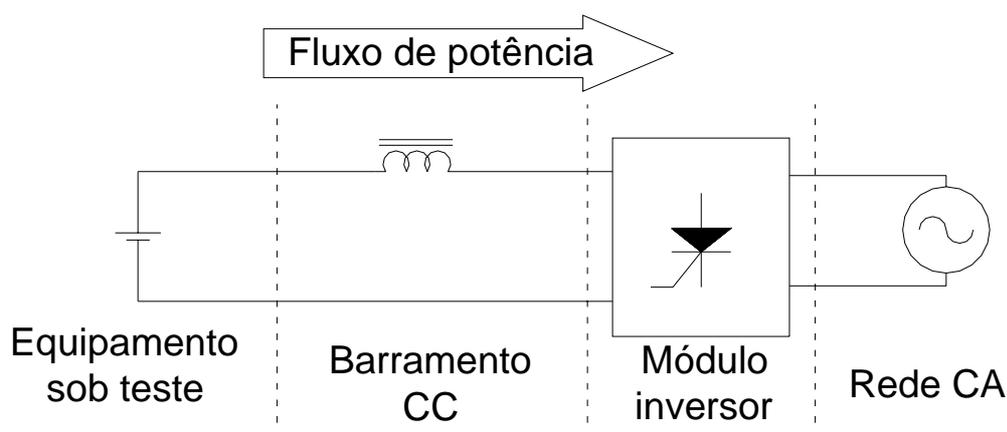


Figura 2.7 CERE-CC.

A aplicação em sistemas CA consta do mesmo módulo utilizado em sistemas CC, porém acrescido de um conversor funcionando em seu modo retificador. Uma vez acoplados,

esses circuitos trabalham como uma carga eletrônica CA, tendo o mesmo princípio de regeneração de energia que o módulo de carga eletrônica CC citado (Fig. 2.8).

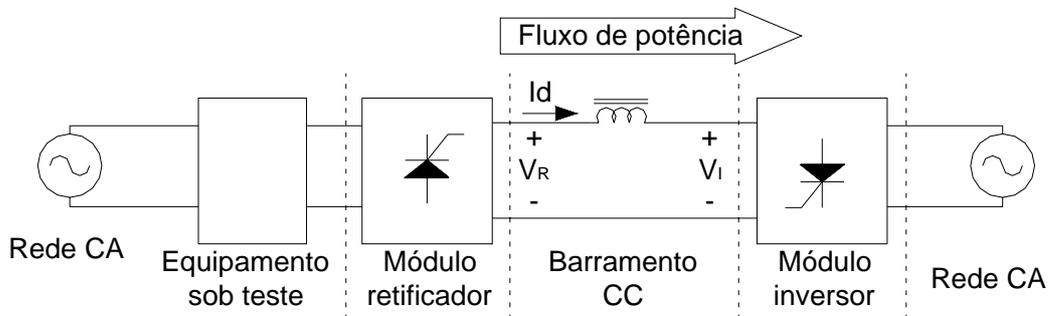


Figura 2.8 CEREC-CA.

O equipamento apresenta, então, essa versatilidade quanto ao uso: uma vez que se queira trabalhar como CEREC-CC, toda a parte responsável pela retificação é desabilitada, ficando apenas o módulo inversor em funcionamento. Se o objetivo é utilizá-la como CEREC-CA, habilita-se o módulo retificador, que juntamente com o módulo inversor, constitui a CEREC-CA completa.

2.6 O controle do fluxo de potência

A corrente no barramento CC é controlada segundo a equação 2.1:

$$i_d = \frac{V_R - V_I}{R_L} \quad (2.1)$$

O controle do fluxo de potência no barramento é feito controlando-se o nível da corrente i_d . Observa-se que há duas variáveis de controle nesse caso: V_R e V_I , uma vez que R_L é característica própria da linha e não pode ser alterada. Cabe então uma análise detalhada de cada modo de funcionamento e suas respectivas restrições.

2.6.1 Controle de V_I

O uso de um conversor nessa configuração consome potência reativa, o que não é desejável do ponto de vista de elevação de circulação de corrente e também da qualidade de energia. Esse consumo de potência reativa é tanto maior quanto maior for o ângulo α , para o retificador, e quanto maior for o ângulo β para o inversor. O funcionamento do conversor com pequenos ângulos de disparo é desejável para evitar consumo excessivo de reativos. Um estudo mais detalhado das equações que governam o funcionamento dos conversores será apresentado posteriormente.

No caso do conversor trabalhando no modo inversor, β é ajustado para seu mínimo valor possível, de modo a manter constante o valor médio da tensão V_I , consumindo o mínimo possível de potência reativa.

Se a configuração contar com um transformador de relação de transformação variável, também é possível, mantendo constante o valor de β , alterar o nível de V_I .

2.6.2 Controle de V_R

Uma vez que o valor médio V_I é controlado pelo inversor e mantido constante, o controle de V_R é feito pelo conversor funcionando no modo retificador. Assim, para aumentar a corrente I_d , aumenta-se o valor de V_R , através da redução do valor do ângulo α . Para reduzir o valor da corrente I_d , procede-se de forma inversa, aumentando-se o valor do ângulo α e, conseqüentemente, reduzindo-se V_R .

Assim como no caso do inversor, se houver no circuito do retificador um transformador com relação variável, V_R ganha um grau de liberdade a mais, podendo também ser controlado dessa maneira.

É importante salientar que o funcionamento dos dois conversores deve ser monitorado; na equação da corrente no barramento CC observa-se que, para que haja circulação da corrente i_d , faz-se obrigatório que $V_R > V_I$. Tal fato é necessário tendo em vista que o fluxo de corrente deve ser em um único sentido, do retificador para o inversor.

Como o objetivo da carga eletrônica desenvolvida é ser uma alternativa flexível para testes em cargas CA, com fator de potência variável através da variação do ângulo de disparo dos conversores, a implementação de uma malha de controle que mantenha a condição acima se faz necessária. Não somente por causa do fluxo de corrente, mas também para garantir que

haja condução contínua de corrente. Mesmo que seja garantida a condição $V_R > V_I$, se o funcionamento da carga for a corrente constante, as alterações nos ângulos de disparo deverão ser coordenadas. Num primeiro instante, por exemplo, a CERE poderia estar funcionando como carga puramente resistiva, com uma corrente de referência I_{REF} no barramento. Num segundo instante, poderia o usuário desejar alterar o fator de potência da CERE, porém sem alterar o valor de I_{REF} . Uma vez que alterar o fator de potência indutivo é alterar o valor de α , também o valor de V_R será afetado. Faz-se necessário que $V_R > V_I$ seja constante; se V_R tem seu valor alterado, também V_I deverá ser alterado, de modo a garantir que seja mantido constante o valor de I_d no barramento.

2.7 Equações da carga eletrônica CA

Um estudo mais detalhado das equações que relacionam tensões e correntes na CERE se faz necessário, uma vez que, conforme apresentado anteriormente, algumas condições são impostas para o seu funcionamento. Outro ponto importante é que essas equações servirão não apenas para a análise preliminar do funcionamento, mas também de base para o desenvolvimento da malha de controle a ser implementada futuramente.

Para um retificador monofásico de onda completa, a tensão de saída, já considerando as quedas de tensão sobre os tiristores, pode ser definida como (Eq. 2.2 [1]):

$$V_R = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot V_{CA,R,rms} \cdot \cos \alpha - 2 \cdot V_{th} = 0,9 \cdot V_{CA,R,rms} \cdot \cos \alpha - 2 \cdot V_{th} \quad (2.2)$$

Seguindo um raciocínio análogo, lembrando que $\beta = 180 - \alpha$, e, portando, $\cos \alpha = -\cos \beta$, encontra-se para um inversor monofásico de onda completa:

$$V_I = \left| \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot V_{CA,I,rms} \cdot \cos \alpha - 2 \cdot V_{th} \right| = 0,9 \cdot V_{CA,I,rms} \cdot \cos \beta + 2 \cdot V_{th} \quad (2.3)$$

Trata-se do módulo da tensão, uma vez que, nessa configuração, a tensão de entrada do inversor é referenciada em relação à tensão do retificador.

Assim, a corrente na linha pode ser definida como:

$$I_d = \frac{V_R - V_I}{R_l} = \frac{0,9 \cdot (V_{CA,R(rms)} \cdot \cos \alpha - V_{CA,I(rms)} \cdot \cos \beta) - 4 \cdot V_{th}}{R_L} \quad (2.4)$$

Desconsiderando as quedas de tensão nos tiristores, obtém-se:

$$I_d = \frac{V_R - V_I}{R_L} = \frac{0,9 \cdot (V_{CA,R(rms)} \cdot \cos \alpha - V_{CA,I(rms)} \cdot \cos \beta)}{R_L} \quad (2.5)$$

Como visto anteriormente, a corrente na linha pode ser controlada alterando-se tanto os níveis de tensão de entrada e saída quanto os ângulos de disparo. O sistema de controle para esse caso deve monitorar a corrente na linha, que pode ter um valor de referência fixado pelo usuário, ou mesmo apenas garantir que haja condições para a circulação da mesma. Para que a tensão V_R seja sempre maior que V_I , sem sobrecarregar o controle dos ângulos de atraso e avanço (α e β), pode-se prever a incorporação de um transformador abaixador entre a rede elétrica e o módulo inversor. Isto dará mais flexibilidade à utilização da CERE para diferentes níveis de tensão de saída dos equipamentos CA sob teste. Considerando que a mesma tensão CA de entrada do retificador seja aplicada à saída do inversor, o controle deve ser feito de modo a manter o ângulo α menor que o ângulo β , conforme se pode comprovar pela Eq. 2.6.

$$I_d = \frac{0,9 \cdot V_{CA(rms)} \cdot (\cos \alpha - \cos \beta)}{R_L} \Rightarrow \cos \alpha > \cos \beta \Rightarrow \alpha < \beta \quad (2.6)$$

Como será visto na seção a seguir, um aumento de α (para determinar um menor fator de potência nos terminais do equipamento CA) exige, possivelmente, um aumento, também, no ângulo β (para garantir $\alpha < \beta$) e, por conseqüência, aumenta-se o consumo de reativos da rede elétrica ligada ao módulo inversor. Isto poderá exigir a instalação de capacitores, junto ao inversor, para o fornecimento de parte dessa potência reativa, que, de outro modo, teria de ser totalmente fornecida pela rede elétrica, o que pode não ser interessante.

2.8 Potências na CERE

Para o desenvolvimento do estudo das potências envolvidas na CERE será utilizada a Fig. 2.9, com suas convenções e variáveis apresentadas.

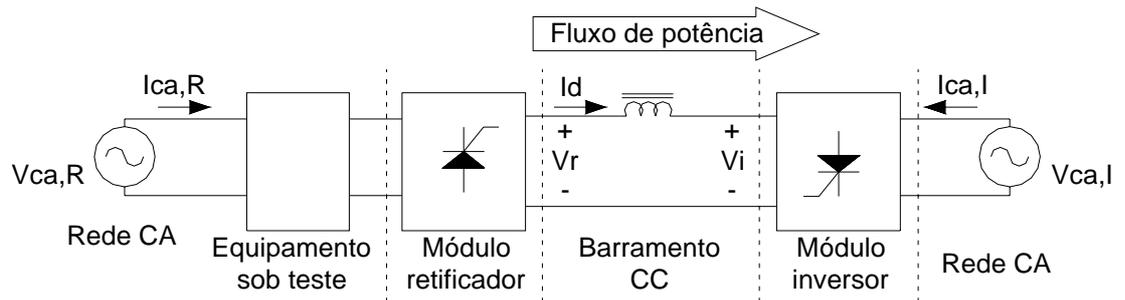


Figura 2.9 Fluxo de potência na CERE-CA.

2.8.1 Potências no retificador

O circuito retificador, como anteriormente apresentado, deve drenar da rede elétrica a potência ativa e entregá-la ao barramento CC. Também já comentado há o fato de que, se não houver uma compensação, o conversor consome potência reativa.

Considerando $V_{CA,R,rms}$ como a tensão eficaz CA de entrada no retificador, $I_{CA,R}$ como o valor eficaz da fundamental da corrente e Φ_1 como a defasagem entre $V_{CA,R,rms}$ e $I_{CA,R}$, pode-se equacionar a potência ativa de entrada na CERE como:

$$P_R = V_{CA,R,rms} \cdot I_{CA,R} \cdot \cos \phi_1 \quad (2.7)$$

Considerando $\alpha = \Phi_1$, pode-se reescrever a equação como:

$$P_R = V_{CA,R,rms} \cdot I_{CA,R} \cdot \cos \alpha \quad (2.8)$$

Essa é a potência ativa entregue pela rede à CERE. Observa-se que é fortemente influenciada pelo ângulo α ; sendo $V_{CA,R,rms}$ e $I_{CA,R}$ fixos, quanto maior for o ângulo α , menor é a potência ativa entregue à CERE e vice-versa.

Da mesma forma, pode-se equacionar a lei que define o consumo de potência reativa pelo conversor pela equação 2.9.

$$Q_R = V_{CA,R,rms} \cdot I_{CA,R} \cdot \sin \phi_1 = V_{CA,R,rms} \cdot I_{CA,R} \cdot \sin \alpha \quad (2.9)$$

A partir da equação apresentada, conclui-se que a CERE permite a variação tanto da potência ativa (P_R) quanto da potência reativa (Q_R - consumida) pelo controle do ângulo α . Verifica-se, ainda, que para a variação do fator de potência, visto pelo equipamento CA, a

CERE terá de ser controlada não somente pelo ângulo α , mas, também, pela corrente $I_{CA,R}$, que depende, por sua vez, da corrente no barramento CC. Esta terá de ser ajustada, simultaneamente ao ângulo α , para que a potência ativa (P_R) drenada pela CERE não seja alterada.

A potência aparente entregue ao retificador será:

$$S_R = V_{CA,R,rms} \cdot I_{CA,R} = \sqrt{P_R^2 + Q_R^2} \quad (2.10)$$

Um diagrama fasorial que representa essa situação é apresentado na Fig. 2.10:

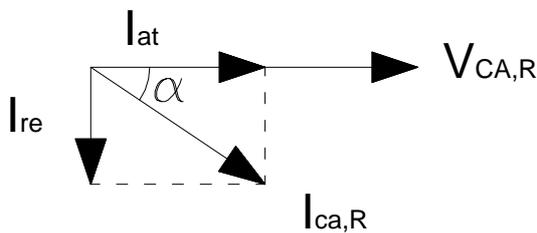


Figura 2.10 Diagrama fasorial de tensão e corrente no módulo retificador.

Conforme é possível observar pelo diagrama, o conversor no modo retificador tem, para a rede CA, característica indutiva, com corrente atrasada em relação à tensão. Uma vez mais se observa a possibilidade de controle do fator de potência do equipamento CA a partir do controle do ângulo α da CERE.

2.8.2 Potências no inversor

Por outro lado, se a análise é feita em relação ao módulo inversor, e considerando $V_{CA,I,rms}$ a tensão CA de saída do inversor, $I_{CA,I}$ a fundamental da corrente no inversor e Φ_I como a defasagem entre $V_{CA,I,rms}$ e $I_{CA,I}$, segue-se de maneira análoga que:

$$P_I = V_{CA,I,rms} \cdot I_{CA,I} \cdot \cos \phi_I = V_{CA,I,rms} \cdot I_{CA,I} \cdot \cos \alpha \quad (2.11)$$

Considerando $\beta = (180^\circ - \alpha)$:

$$P_I = -V_{CA,I,rms} \cdot I_{CA,I} \cdot \cos \beta \quad (2.12)$$

Pelo sinal negativo na equação, nota-se que a potência ativa é fornecida pelo conversor à rede CA quando trabalhando em seu modo inversor. É possível estender o mesmo raciocínio para a potência reativa no inversor:

$$Q_I = V_{CA,I,rms} \cdot I_{CA,I} \cdot \text{sen}\phi_1 = V_{CA,I,rms} \cdot I_{CA,I} \cdot \text{sen}\alpha = V_{CA,I,rms} \cdot I_{CA,I} \cdot \text{sen}\beta \quad (2.13)$$

O conversor trabalhando em seu modo inversor consome potência reativa; tal consumo é tanto maior quanto maior for o ângulo β , sendo $V_{CA,I,rms}$ e $I_{CA,I}$ fixos. Utilizar baixos valores de β para esse caso é desejável para reduzir o consumo de potência reativa pelo conversor, embora a utilização de compensação reativa, por meio de capacitores em paralelo com a rede elétrica ligada ao módulo inversor (como já discutido no item 2.7), possa minimizar tal restrição (β mínimo).

A potência aparente no lado CA do inversor será:

$$S_I = V_{CA,I,rms} \cdot I_{CA,I} = \sqrt{P_I^2 + Q_I^2} \quad (2.14)$$

Para representar uma situação de funcionamento do módulo inversor, apresenta-se um diagrama fasorial:

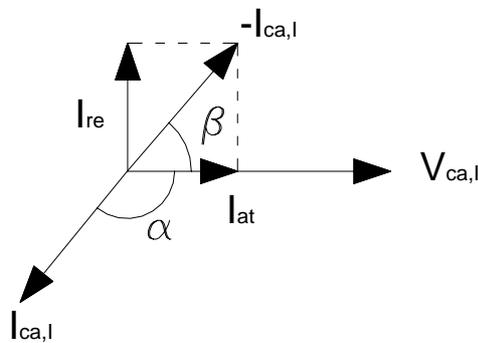


Figura 2.11 Diagrama fasorial de tensão e corrente no módulo inversor.

Considerando que a corrente $I_{CA,I}$ tem, na verdade, sentido de circulação oposto ao representado na figura, para caracterizar a rede elétrica como receptora (ou consumidora) de potência ativa, verifica-se que a rede elétrica comporta-se como carga capacitiva, fornecendo reativos ao inversor.

No funcionamento da CERE, grande parte da potência ativa consumida pelo retificador é regenerada pelo inversor, sendo devolvida à rede; uma pequena parcela dessa potência é

dissipada pela resistência equivalente do indutor presente no circuito (R_L). Considerando que para uma onda quadrada a corrente média é igual à corrente eficaz, pode-se enunciar a equação 2.15.

$$P_L = R_L \cdot I_d^2 = P_R - P_I \quad (2.15)$$

Sendo a resistência do indutor de baixo valor, quase toda a potência ativa entregue pelo retificador ao barramento é devolvida (ou entregue) à rede elétrica pelo inversor.

Uma vez conhecidas as bases teóricas da CERE proposta, o próximo passo é o desenvolvimento de um protótipo de laboratório que possa comprovar o funcionamento que foi estudado. Esse é o tema do próximo capítulo.

3 A CERE DESENVOLVIDA

3.1 Introdução

Para realizar experimentos que demonstrem que a CERE realmente funciona, foi construído um protótipo de laboratório, assunto que é o núcleo desse capítulo. Parte desse protótipo já estava disponível, uma vez que esse trabalho é continuação de outro previamente desenvolvido [1]. Tal protótipo tem como suas as próprias limitações encontradas em laboratório, no que se relaciona à corrente (4A), que é a corrente máxima que o autotransformador de acoplamento pode suportar. Quanto à tensão, por motivos de segurança, foi estabelecido que no barramento CC seja, no máximo, de 50V. O módulo é capaz, então, de drenar 200W de potência da fonte que o alimenta.

Trata-se de um circuito bem simples, mas funcional, que objetiva mostrar o funcionamento da carga eletrônica aqui desenvolvida. Melhorias futuras são necessárias, principalmente quanto à compensação de energia reativa no inversor, e também um método de controle automático do comando de ambos os conversores.

No caso desse estudo, o teste é feito em relação ao funcionamento da CERE-CA e suas propriedades; dessa forma, o equipamento sob teste apresentado na Fig. 2.1 é a própria rede elétrica.

Confirma-se na parte experimental toda a teoria já descrita anteriormente; sendo assim, testes de “burn-in” podem ser feitos de maneira satisfatória, tanto para equipamentos com saída CC (com resultados e discussões vistos no trabalho anterior) quanto para equipamentos com saída CA. Uma vez mais, torna-se interessante o uso dessa tecnologia, visto que grande parte da energia absorvida pelo retificador é devolvida à rede pelo inversor.

O desenvolvimento do protótipo se baseou nos seguintes passos:

- Definição dos conversores CA/CC e CC/CA;
- Definição do circuito de comando dos conversores;
- Definição do indutor de filtro do barramento CC;
- Definição do transformador de acoplamento à rede CA;

3.2 Circuito conversor tiristorizado

O circuito aqui utilizado é constituído de chaves do tipo tiristor, não-autônoma, que assegura o funcionamento da CERE apenas como carga resistiva e indutiva. Para o caso capacitivo, é necessário que sejam utilizados transistores de potência, chaves totalmente controladas, com controle de início e de extinção de condução da corrente. Tal melhoria deverá ser feita no futuro, visto que o circuito de comando aqui utilizado não contempla esse funcionamento (Vide item 2.2.3).

O conversor utilizado para o inversor é o mesmo utilizado anteriormente [1]. Constitui-se basicamente de quatro tiristores, cada qual com um circuito de snubber dedicado, conforme apresentado na Fig. 3.1.

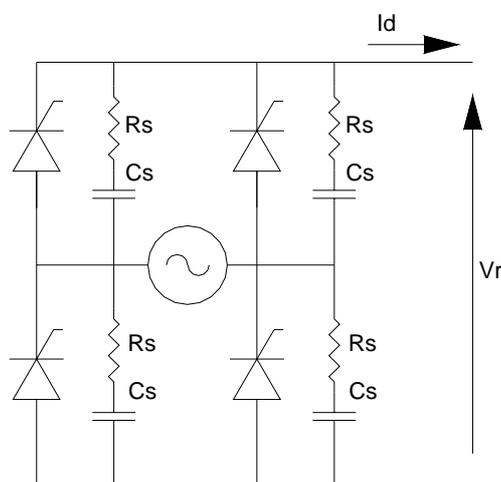


Figura 3.1 Esquema do circuito do módulo retificador.

Os tiristores desse circuito são da International Rectifier, série 25TTS08, tendo como principais características:

- Corrente média de condução (para forma de onda senoidal) = 16A;
- Queda de tensão durante a condução = 1,25V;
- Tensão máxima entre catodo e anodo = 800V.

O conversor utilizado para o retificador é conceitualmente idêntico ao já apresentado. O que difere os dois é apenas o modelo de tiristor. Devido à falta do tiristor 25TTS08 no laboratório, o mesmo foi substituído por outro, cujas características são bem parecidas com as do primeiro. Os tiristores utilizados no circuito retificador são da International Rectifier, série 40TPS25, com algumas de suas características listadas abaixo:

- Corrente média de condução (para forma de onda senoidal) = 25A;

- Queda de tensão durante a condução = 1,25V;
- Tensão máxima entre catodo e anodo = 800V.

O conversor inversor é apresentado na Fig. 3.2.

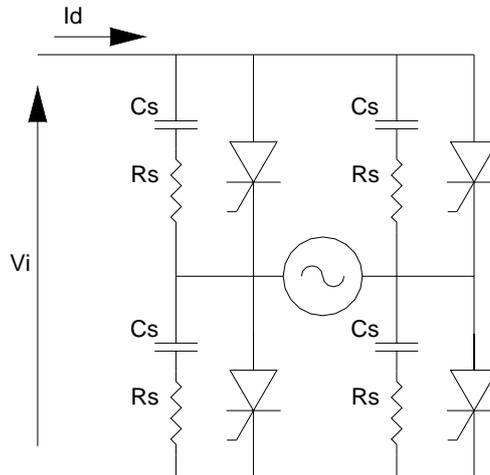


Figura 3.2 Esquema do circuito do módulo inversor.

Um circuito de “snubber” se fez necessário para reduzir os picos de tensão nos tiristores durante a comutação dos mesmos. Tais picos são devidos às correntes reversas de recuperação geradas nos tiristores, que, quando bloqueadas, podem gerar altas tensões sobre esses dispositivos, devido às indutâncias série do circuito.

Os valores definidos para o capacitor (C_s) e o resistor (R_s) de snubber foram, respectivamente, 22nF e 270Ω [1].

As características próprias dos tiristores fazem com que eles dissipem calor durante o período em que estão em condução. Para dissipar tal calor gerado foram dimensionados dissipadores para esses dispositivos [1].

3.3 Circuito de comando da CERE

O objetivo do circuito de comando é enviar aos gates dos tiristores os pulsos de corrente com formas, valores e instantes de tempo adequados, segundo a lógica de funcionamento da CERE.

O circuito utilizado para o comando dos tiristores, em ambos os conversores, é idêntico e baseia-se em um circuito integrado Siemens, modelo TCA 785. Tal circuito gera uma rampa sincronizada com a rede elétrica (tensão de controle), que pode ser variada através de um potenciômetro de precisão, através do qual o valor do ângulo α dos tiristores pode ser variado de 0 a 180°.

Há um estágio de potência no circuito de comando, cuja função principal é amplificar os sinais de comando, disparando o tiristor como fonte de corrente e não de tensão e impedir que uma tensão negativa seja aplicada na junção gate-catodo dos tiristores.

A isolamento entre o circuito de comando e o de potência é feito por transformadores de pulso Semikron, cujas principais características são listadas a seguir:

- Tensão de saída a vazio entre 5 e 15V;
- Corrente de gatilho de 100mA a 1A.
- Tempo de crescimento de tensão entre 0,5 e 5 μ s;
- Comprimento do pulso entre 10 μ s e 1ms;
- Frequência de operação entre 5 e 10KHz.

Para que o tiristor se mantenha em condução, é necessário que ele atinja um valor de corrente mínimo, chamada corrente de retenção. Para tanto, é preciso que o pulso seja aplicado ao gate do tiristor tempo suficiente para que o mesmo atinja tal condição. Assim, será necessário aplicar aos tiristores pulsos de corrente de longa duração, levando ao saturamento do transformador de pulso, o que fará com que o circuito de comando não funcione corretamente.

A solução encontrada foi enviar, ao invés de apenas um pulso de longa duração, um trem de pulsos, o que garantirá que o transformador de pulso não sature. O trem de pulsos foi gerado pelo circuito integrado LM 555 da National Semiconductor, programado com funcionamento astável, em frequência de 7,4kHz. Essa saída, juntamente com a saída do TCA 785, foi aplicada à entrada de uma porta "E", cuja saída controla a entrada do estágio de potência de cada tiristor, o que pode ser visto na figura 3.3.

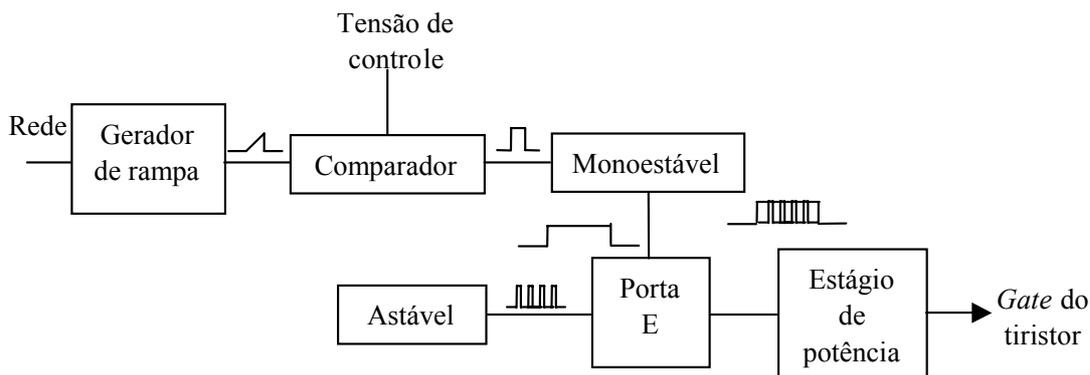


Figura 3.3 Esquema do circuito de comando dos conversores.

3.4 O indutor de filtro

Para que a corrente no barramento CC fique com a menor ondulação possível é necessário que haja um filtro, que nesse caso é constituído de um indutor.

Para as experiências foi utilizado um indutor previamente projetado e construído para o funcionamento da CERE em CC, cujas características básicas são [1]:

- Resistência (a 25°C) = 0,55Ω;
- Indutância = 249mH.

Cabe lembrar que, ao ser percorrida por uma corrente, a resistência própria do indutor poderá variar, não sendo de valor fixo ao longo de um intervalo de funcionamento.

3.5 O transformador de acoplamento

No trabalho precedente [1], o autor utilizou como acoplamento entre a rede CA e o inversor apenas um autotransformador, com o intuito não só de utilizar tensões mais baixas em seu experimento, mas também de reduzir o consumo de reativos pelo conversor.

Como consequência, o circuito ficou limitado não só às suas próprias características, mas também às características desse autotransformador, cuja tensão de entrada é de 220V fase-fase, e sua tensão de saída pode variar de 0 a 240V (em ambos os casos, valores eficazes de tensão). Sua potência máxima é de 1,5kVA e sua corrente máxima é de 6A. Por segurança, a corrente máxima na CERE foi definida como 4A.

A fonte CA da qual será drenada a potência pelo retificador é a mesma à qual o inversor deverá retornar a potência regenerada. Um arranjo que contivesse apenas os autotransformadores não poderia ser utilizado no atual caso, visto que, se não houver isolamento galvânico entre as fontes CA dos conversores, um curto-circuito ocorreria, conforme se pode ver na Fig 3.4, considerando-se a ligação completa da CERE (rede CA-retificador-barramento CC-inversor-rede CA):

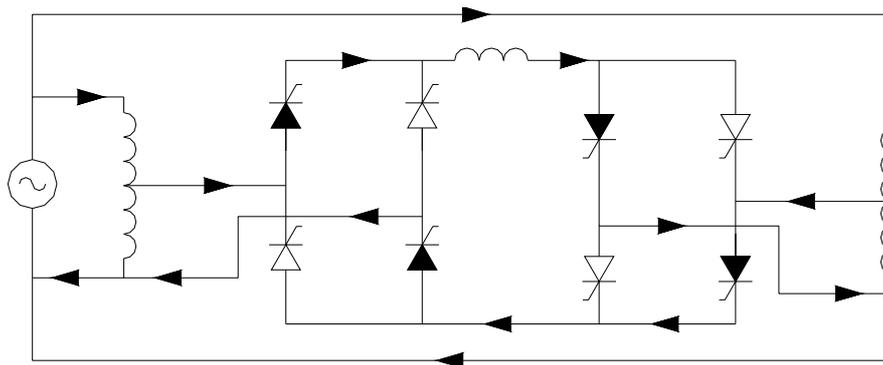


Figura 3.4 Curto circuito na falta de isolamento entre as fontes.

A solução encontrada foi isolar a fonte CA galvanicamente dos conversores, através de um transformador com primário e secundário totalmente isolados, conforme a Fig. 3.5:

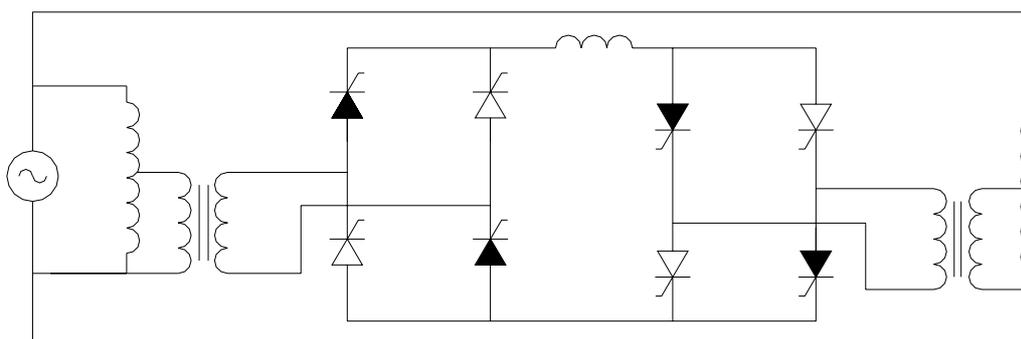


Figura 3.5 Funcionamento em regime com transformadores de isolamento.

Dessa forma, não há conexão elétrica entre as fontes do retificador e do inversor, suprimindo o problema apresentado, garantindo o funcionamento seguro da CERE-CA. Para

tanto, foram utilizados dois transformadores “Equacional”, disponíveis no laboratório de Máquinas Elétricas.

Outro problema encontrado foi a captação da amostra de tensão pelo circuito de comando. Uma vez que o sinal deve ser derivado da própria alimentação dos conversores, qualquer distúrbio na tensão CA terá seu efeito refletido no circuito de comando.

Para suprimir os efeitos de chaveamento na referência de tensão CA do circuito de comando foi utilizado um pequeno transformador, ligado do lado primário do transformador de isolamento. Dessa forma, minimizaram-se os efeitos das perturbações na tensão CA produzidas pelos conversores quando em funcionamento.

Dessa forma, uma vez definidos os componentes do circuito de força e de comando, o esquemático de ambos é apresentado nas figuras 3.6 e 3.7.

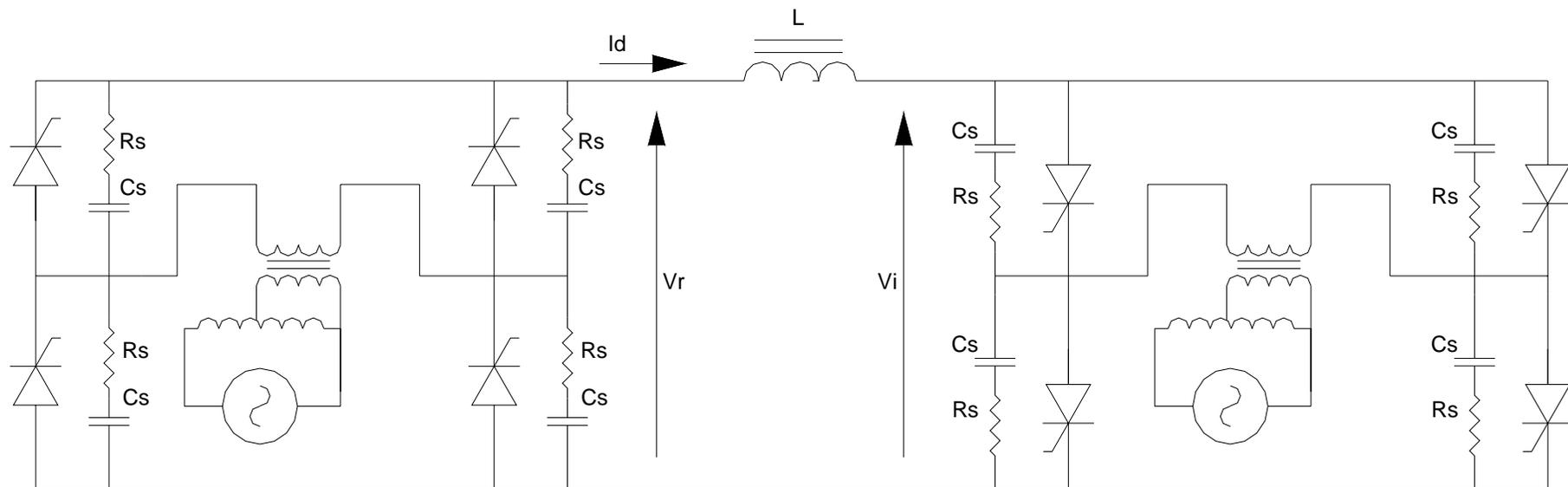


Figura 3.6 Circuito de força da CERE-CA.

Saída do transformador de acoplamento

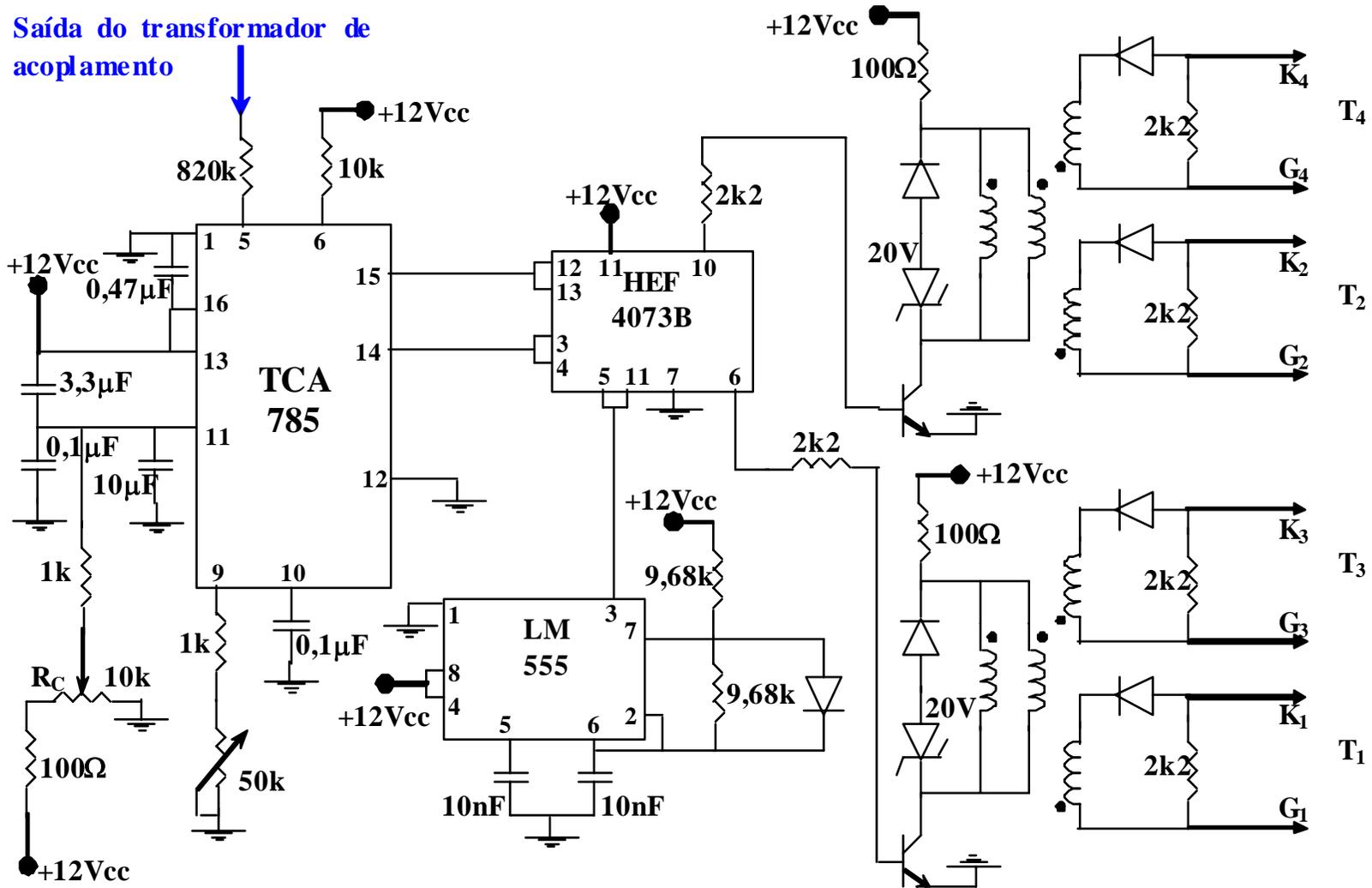


Figura 3.7 Circuito de comando dos conversores.

3.6 A indutância de comutação (L_C)

Naturalmente, a fonte CA apresenta uma indutância própria, chamada indutância de comutação. Tal indutância faz com que haja uma redução de tensão na carga durante o processo de comutação devido à tendência de manter o tiristor conduzindo. Dessa forma, durante a comutação, dois tiristores conduzem ao mesmo tempo, ocasionando o efeito citado. Com o uso desse conjunto autotransformador e transformador isolador, deverão aumentar consideravelmente os efeitos da indutância de comutação. Uma vez que a queda de tensão durante a comutação é diretamente proporcional à indutância de comutação e à corrente média de carga, os efeitos da comutação evidenciam-se mais nos casos onde esses dois valores são mais elevados. A indutância de comutação será característica intrínseca da fonte, já que o conjunto fonte-autotransformador-transformador isolador é fixo. Como é possível variar a corrente média na carga, os efeitos da comutação serão tão mais evidentes quanto maior for a corrente média de carga.

Um circuito equivalente que representa a situação é apresentado na figura 3.8 [7].

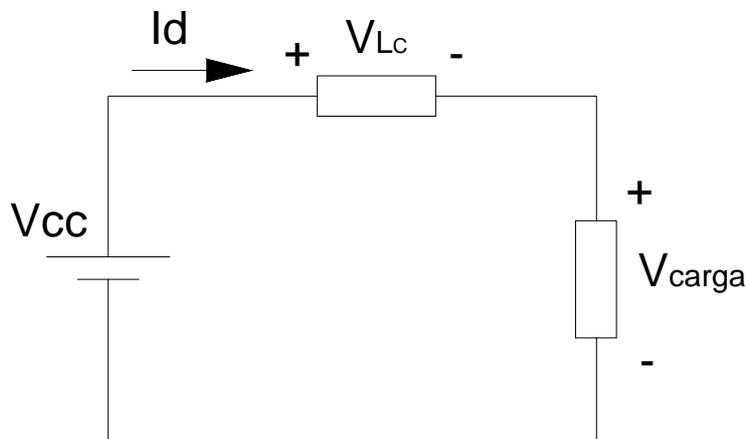


Figura 3.8 Circuito equivalente considerando ao efeito da indutância de comutação

Seguindo o raciocínio que envolve o circuito equivalente nesse caso, pode-se enunciar que:

$$V_{CC} = V_{LC} + V_{Carga} \Rightarrow V_{Carga} = V_{CC} - V_{LC} \quad (3.1)$$

$$V_{CC} = 0,9 \cdot V_0 \cdot \cos \alpha \quad (3.2)$$

O valor de V_{LC} pode ser calculado através da equação 3.3 [7]:

$$V_{LC} = 2 \cdot f \cdot L_C \cdot I_d = R_e \cdot I_d \quad (3.3)$$

Onde R_e é o valor de um resistor equivalente que representa a queda de tensão durante a comutação. Observa-se que os efeitos da indutância de comutação são tanto maiores quanto maior for a corrente I_d .

Há duas situações a serem analisadas:

- Funcionando como retificador, o conversor tem sua tensão de carga dada pela equação 3.4:

$$V_{Carga} = |0,9 \cdot V_o \cdot \cos \alpha - 2 \cdot f \cdot L_C \cdot I_d| \quad (3.4)$$

- Funcionando como inversor, e considerando que $\alpha = 180 - \beta$, e, por conseguinte, $\cos \alpha = \cos \beta$, o conversor tem sua tensão de carga dada pela equação 3.5:

$$V_{Carga} = |0,9 \cdot V_o \cdot \cos \alpha - 2 \cdot f \cdot L_C \cdot I_d| = |-0,9 \cdot V_o \cdot \cos \beta - 2 \cdot f \cdot L_C \cdot I_d| \quad (3.5)$$

Como principal efeito, nota-se que isso proporciona uma redução do nível de tensão no retificador; analisando o funcionamento no modo inversor, observa-se acréscimo na tensão do mesmo. Tais efeitos devem ser considerados na análise dos resultados obtidos, bem como das formas de onda resultantes dos ensaios de laboratório.

A seguir são apresentadas alguns resultados de simulação, considerando $L_C = 2,5\text{mH}$, tensão de $V_{CA,R} = 50\text{V}$. Os ângulos α e β , bem como tensão $V_{CA,I}$, são identificados em cada caso. As figuras 3.9 e 3.10 apresentam o funcionamento como carga indutiva, ao passo que as figuras 3.11 e 3.12 apresentam o funcionamento como carga resistiva. Nas figuras 3.9 e 3.11, a tensão do inversor é de 49V, contemplando o funcionamento com menor nível de corrente, enquanto que nas figuras 3.10 e 3.12 a tensão no inversor é de 47,5V, já contemplando o funcionamento com maior nível de corrente.

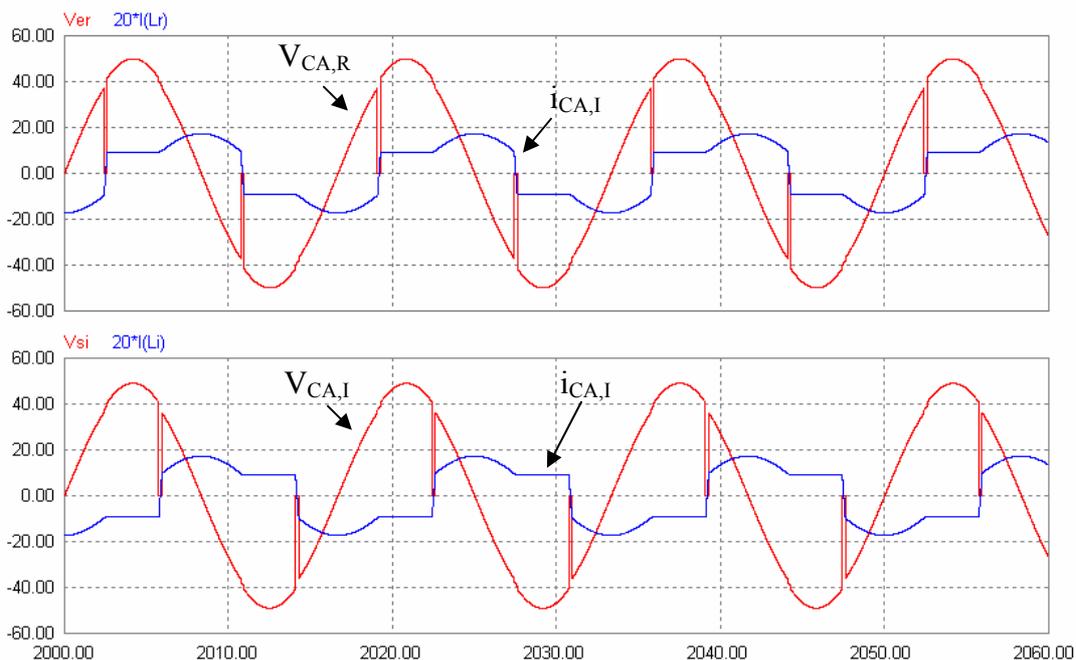


Figura 3.9 Formas de onda para $\alpha = 52^\circ$ e $\beta = 52^\circ$, $V_{CA,I} = 49V$.

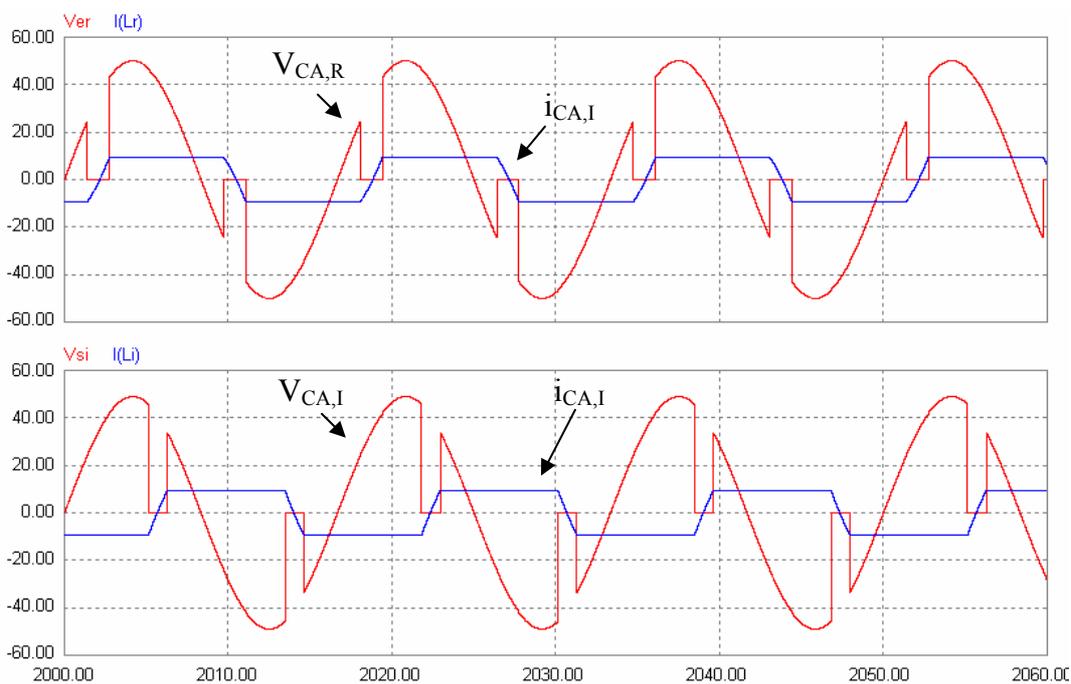


Figura 3.10 Formas de onda para $\alpha = 52^\circ$ e $\beta = 52^\circ$, $V_{CA,I} = 47,5V$.

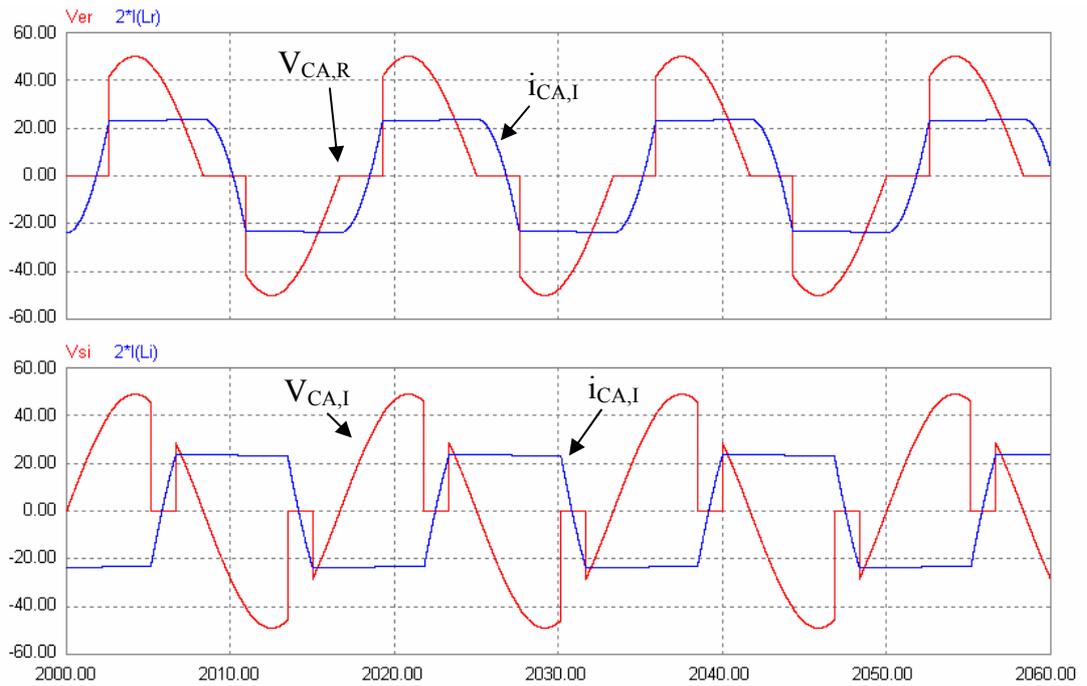


Figura 3.11 Formas de onda para $\alpha = 0^\circ$ e $\beta = 69^\circ$; $V_{CA,I} = 49V$.

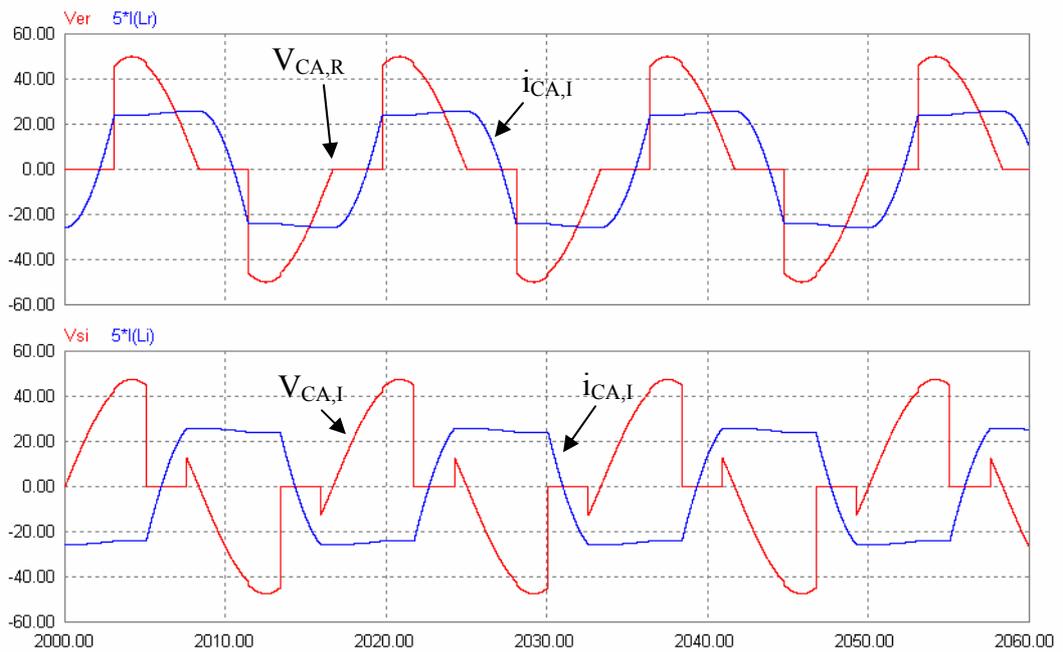


Figura 3.12 Formas de onda para $\alpha = 0^\circ$ e $\beta = 69^\circ$; $V_{CA,I} = 47,5V$.

Através dos resultados das simulações, observa-se que quanto maior o nível da corrente, mais evidente é o efeito da indutância de comutação; ainda mais, a comutação provoca

um curto-circuito durante um intervalo de tempo, que é tanto maior quanto maior for a corrente média do circuito.

Uma vez definidos os componentes do protótipo, o próximo passo é o seu ensaio em laboratório, tema do capítulo seguinte.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Estando definidos os dispositivos e a configuração dos conversores propostos, faz-se necessária a realização de um protótipo capaz de comprovar o estudo anteriormente proposto.

Para tanto, quatro condições foram estabelecidas:

- Teste do circuito emulando carga indutiva, com dois níveis de corrente diferentes (alta e baixa);

- Teste do circuito emulando carga resistiva, também com dois níveis de corrente diferentes (alta e baixa).

Tal consideração foi feita para que se pudesse analisar o funcionamento da CERE em diferentes níveis de carga, bem como os efeitos dessas variações no circuito.

4.1 Condições para a entrada em funcionamento

No trabalho anterior, uma fonte de tensão CC alimentava um conversor no modo inversor, cuja função era devolver à rede elétrica grande parte da potência que lhe era entregue. Para iniciar o funcionamento nessa condição, o autor utilizou o recurso de um resistor em série com o indutor do barramento CC, de modo a minimizar a corrente durante a partida do equipamento, garantindo a segurança do circuito bem como do operador. O ângulo de disparo era feito igual a zero, de tal forma que o conversor funcionava, em seu instante inicial de operação, como um retificador. Nesse aspecto, as tensões da fonte e do retificador se somavam, ficando a cargo do resistor auxiliar e do indutor suportar a soma dessas tensões. De forma a minimizar esse efeito somativo de tensões, a tensão da fonte CC era ajustada para um valor convenientemente pequeno, apenas para garantir a entrada em condução dos tiristores (Fig. 4.1-a). Daí em diante, ao mesmo tempo em que o valor de β era reduzido, a tensão da fonte era aumentada, de tal forma que, em certo momento, β tornar-se-ia menor que 90° (Fig. 4.1-b). A partir desse ponto o conversor entrava em seu modo inversor, o que invertia o sinal da tensão de entrada do inversor (V_i). Após a tensão do inversor e da fonte CC tornarem-se próximas entre si quanto a seus valores médios, o resistor auxiliar era curto-circuitado através do disjuntor auxiliar D_{aux} , anulando seus efeitos, e o circuito tornava-se o proposto anteriormente (Fig. 4.1-c). A figura 4.1-d ilustra o circuito equivalente da situação desejada.

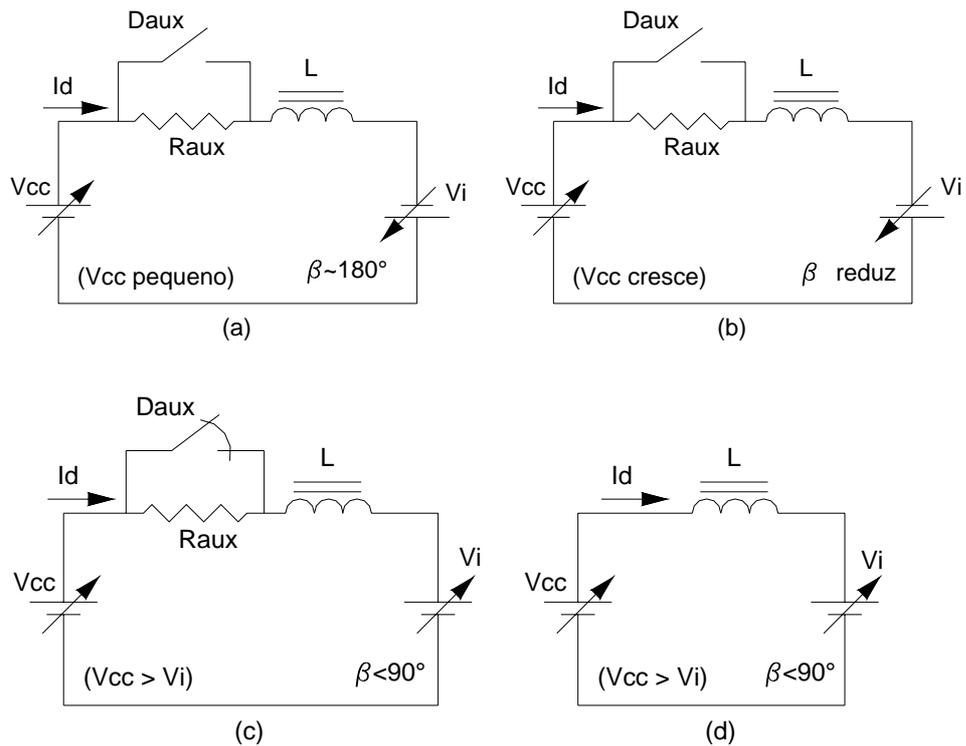


Figura 4.1 Etapas de funcionamento da CERE-CC.

Para o trabalho atual, a idéia foi fazer os ângulos dos dois conversores (α para o retificador e β para o inversor) próximos a 90° (Fig. 4.2-a). Isso garantiria que as tensões CC médias de ambos teriam valores bem próximos entre si, e pequenos, garantindo que uma pequena diferença de potencial fosse aplicada sobre o indutor, que seria o elemento limitador de corrente nesse caso. Há que se considerar que não mais é necessário o uso de um resistor auxiliar conforme o caso anterior, eliminando um elemento de circuito que não tem nenhuma função a não ser limitar a corrente durante o início da operação. A figura 4.2-b mostra o passo seguinte à entrada em funcionamento da CERE-CA.

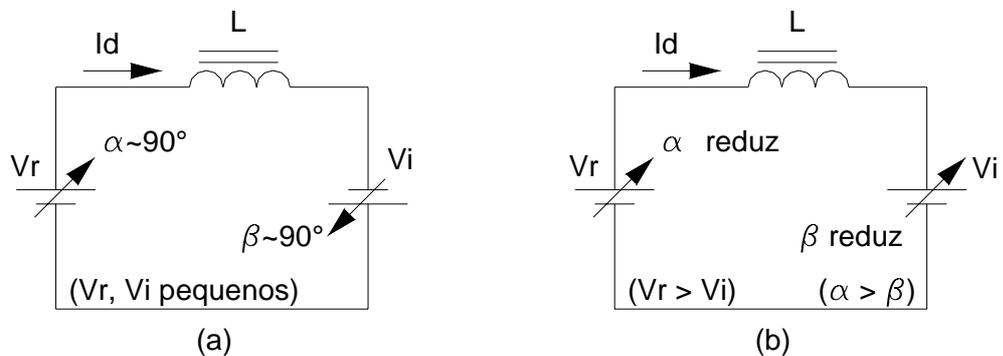


Figura 4.2 Etapas de funcionamento da CERE-CA.

Para a tomada de dados durante os testes, os ângulos de disparo foram mantidos fixos nos retificadores ($51,86^\circ$ para o funcionamento como carga indutiva e 0° para carga resistiva). Além disso, quando os testes para comparações entre diferentes modalidades de funcionamento foram feitos, também os ângulos de avanço do inversor foram mantidos constantes, variando apenas a tensão CA de entrada dos mesmos ($51,86^\circ$ e 49V para carga leve e $69,14^\circ$ e 47,5V para carga pesada, respectivamente ângulos de avanço e tensão CA do inversor em cada caso); dessa forma é possível comparar as diferenças de funcionamento entre os modos resistivo e indutivo com influência apenas dos parâmetros de entrada, ou seja, do retificador. Quanto à diferença de tensão CA do inversor entre os testes, esta foi necessária para que fosse possível aumentar a corrente de carga, uma vez que ao aumentar muito o valor de β para conseguir tal fato, o conversor saía totalmente de condução. Para tanto, não apenas β foi variado, mas também o nível de tensão CA do inversor o foi, de forma a favorecer o crescimento da corrente I_d .

Dentre os experimentos realizados no laboratório, as formas de onda mais importantes para o desenvolvimento do trabalho foram tomadas e algumas são apresentadas a seguir. No teste da CERE funcionando como carga indutiva e corrente baixa todas as formas de onda são apresentadas para que se possa ter idéia do funcionamento do circuito bem como de suas principais grandezas. Para os demais testes serão apresentadas apenas as formas de onda relativas às tensões e correntes CA no retificador e no inversor. As demais formas de onda para tais casos são apresentadas no anexo A para uma eventual consulta. Em todos os casos, a própria figura apresenta as escalas correspondentes de tensão e corrente.

4.2 Determinação da indutância de comutação

Para determinar um valor experimental da indutância de comutação dos conversores foram feitos quatro ensaios individuais em cada caso (retificador e indutor). Durante o processo de comutação, observou-se que a corrente tem variação bastante linear, o que permitiu calcular, de forma satisfatória, a indutância de comutação através da equação 4.1.

$$V_L = L_C \cdot \frac{di_d}{dt} = L_C \cdot \frac{\Delta i_d}{\Delta t} \quad (4.1)$$

Dos quatro ensaios realizados em cada conversor, fez-se uma média dos valores encontrados de L_C , sendo que, para ambos os conversores, esse valor tendeu para 8mH.

4.3 Testes para CERE-CA funcionando como carga indutiva

Foram tomadas duas medições (dois níveis de corrente: alta e baixa) para exemplificar o funcionamento nesse caso. Para tanto, a tensão de entrada no retificador foi mantida fixa em 50V, enquanto a tensão CA do inversor foi de 47,5V para carga pesada e 49V para carga leve. Os valores dos ângulos de disparo do retificador foram mantidos constantes para efeito de comparação entre o funcionamento da CERE nos dois níveis de corrente propostos.

4.3.1 Carga leve

A seguir são apresentados alguns gráficos obtidos durante a realização e experiências, bem como algumas considerações em cada caso. Para esse primeiro caso são apresentadas as formas de onda de tensão e corrente no retificador e no inversor, tanto CA quanto CC, e também no indutor.

Para a realização desse primeiro ensaio, foram definidos $\alpha = 51,86^\circ$ e $\beta = 51,86^\circ$.

Segundo as equações 2.2 e 2.3, os valores ideais esperados para as tensões são:

$$V_R = 50 \cdot 0,9 \cdot \cos(51,86^\circ) = 27,79V$$

$$V_I = 49 \cdot 0,9 \cdot \cos(51,86^\circ) = 27,23V$$

$$I_d = \frac{V_R - V_I}{R_L} = \frac{27,79 - 27,23}{0,55} = 1A$$

A partir desses dados é possível calcular algumas grandezas envolvidas:

- Potência entregue pela rede elétrica ao retificador:

$$P_R = V_R \cdot I_d = 27,79 \cdot 1 = 27,79W$$

- Potência entregue pelo inversor à rede elétrica:

$$P_I = V_I \cdot I_d = 27,23 \cdot 1 = 27,23W$$

- Potência dissipada pela resistência própria do indutor:

$$P_L = R_L \cdot I_d^2 = 0,55 \cdot 1^2 = 0,55W$$

Dos valores experimentais obtidos ($V_R = 24,2V$, $V_I = 22,8V$ e $I_d = 1,12A$), podem ser calculadas essas mesmas grandezas para efeito de comparação:

$$P_R = V_R \cdot I_d = 24,2 \cdot 1,12 = 27,10W$$

$$P_I = V_I \cdot I_d = 22,8 \cdot 1,12 = 25,53W$$

$$P_L = R_L \cdot I_d^2 = 0,56 \cdot 1,12^2 = 0,70W$$

$$P_L = P_R - P_I = 27,1 - 25,53 = 1,57W$$

Observa-se que o circuito apresenta grandezas bem próximas das calculadas teoricamente, correspondendo à expectativa de funcionamento esperada. As pequenas diferenças entre os resultados experimentais e teóricos devem-se principalmente às influências das indutâncias de comutação.

Um fato já esperado é que a resistência própria do indutor variasse com a temperatura. De acordo com o aumento da carga e conseqüentemente com a dissipação de calor, esse valor aumenta; com isso, a potência dissipada pelo resistor também aumenta. Isso faz com que haja uma diferença entre a potência P_L calculada tendo como base o valor da resistência a frio e a diferença entre P_R e P_I , conforme foi demonstrado. Nos cálculos seguintes a potência dissipada pelo indutor não mais será calculada utilizando-se seu valor de resistência a frio, mas sim como sendo a diferença entre as potências P_R e P_I .

A seguir são apresentadas as formas de onda correspondentes: as figuras 4.3 e 4.4 apresentam as formas de onda de tensão e corrente CA e CC, respectivamente, em ambos os casos referentes ao retificador; a figura 4.5 apresenta as formas de onda de tensão e corrente no indutor e as figuras 4.6 e 4.7 apresentam as formas de onda de tensão e corrente CC e CA, respectivamente, em ambos os casos referentes ao inversor.

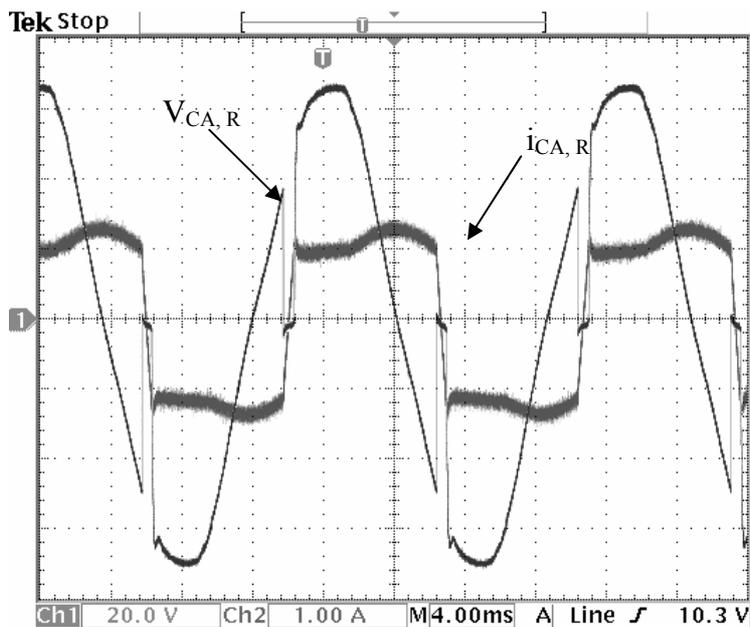


Figura 4.3 Tensão e corrente CA no retificador.

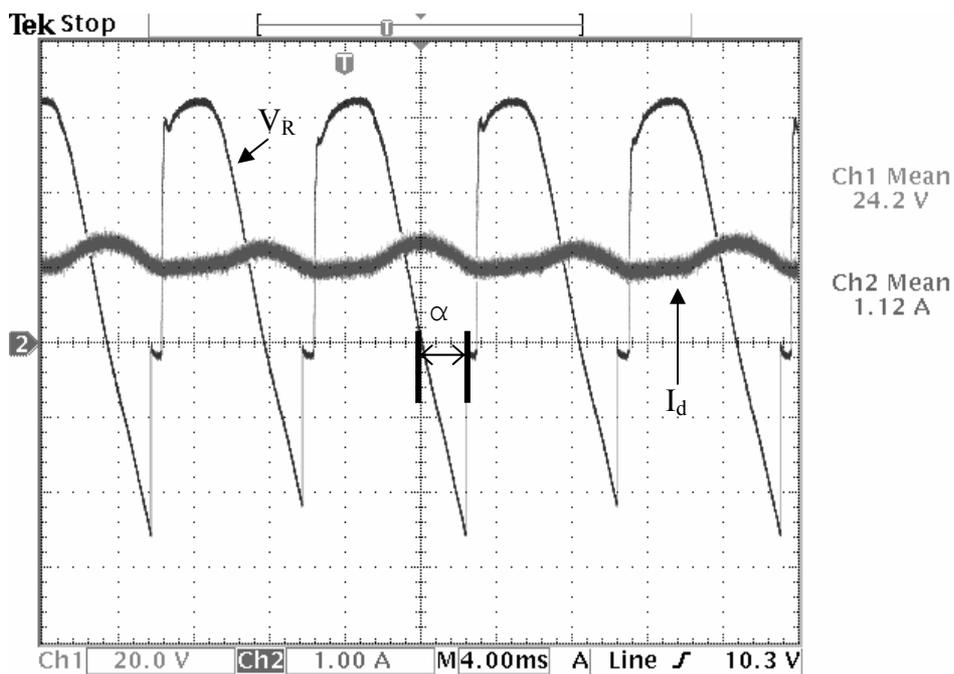


Figura 4.4 Tensão e corrente CC no retificador.

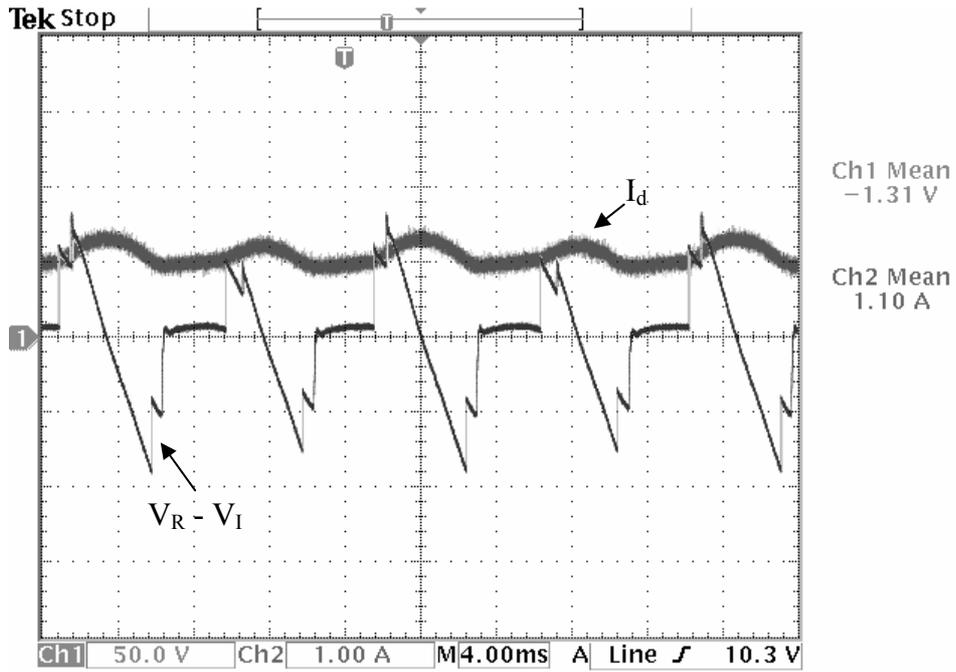


Figura 4.5 Tensão instantânea e corrente CC no indutor.

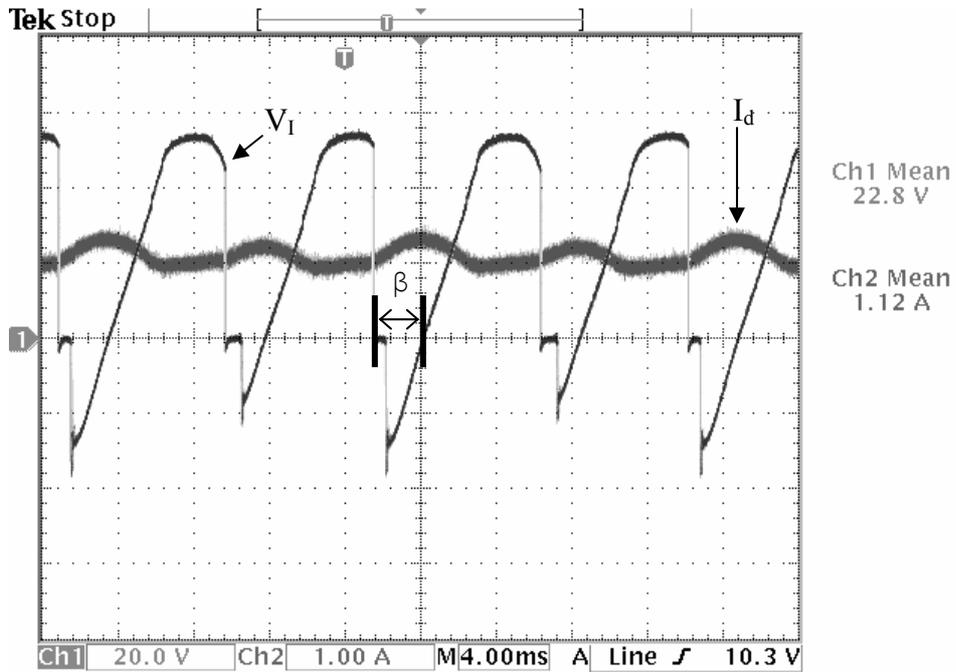


Figura 4.6 Tensão e corrente CC no inversor.

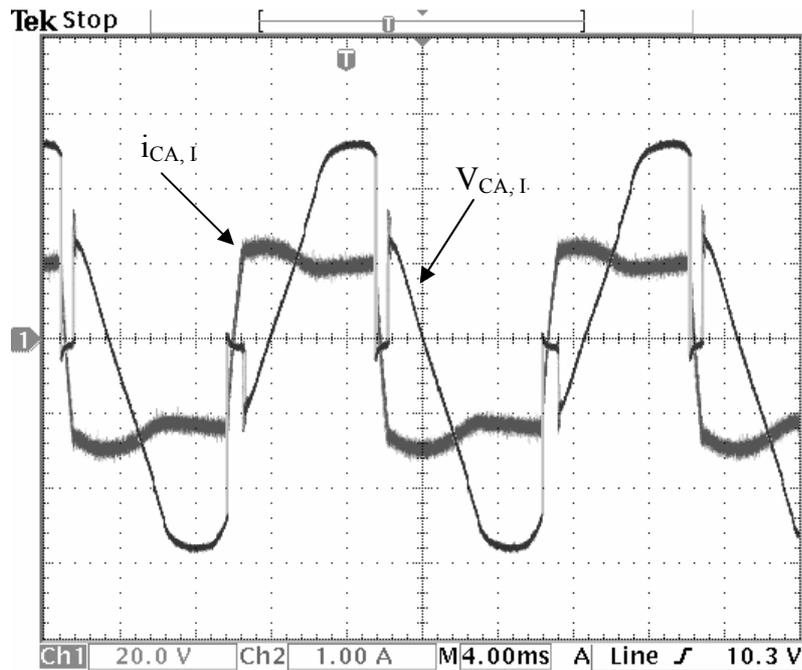


Figura 4.7 Tensão e corrente CA no inversor.

Ao observar as formas de onda, percebe-se que há um pequeno curto-circuito no momento da comutação. Isso se deve à indutância de comutação L_C , característica própria do circuito, devida não apenas à indutância própria da fonte que o alimenta, mas também às indutâncias características do transformador e do autotransformador utilizados.

Há que se lembrar também que a influência da indutância de comutação é diretamente proporcional à corrente I_d ; espera-se que, com o aumento da corrente de carga, tais efeitos sejam mais evidenciados.

4.3.2 Carga pesada

Nesse caso, os valores definidos para os ângulos foram $\alpha = 51,86^\circ$ e $\beta = 69,14^\circ$.

Os valores teóricos esperados para as tensões e a corrente são:

$$V_R = 50 \cdot 0,9 \cdot \cos(51,86^\circ) = 27,79V$$

$$V_I = 47,5 \cdot 0,9 \cdot \cos(69,14^\circ) = 15,22V$$

$$I_d = \frac{V_R - V_I}{R_L} = \frac{27,79 - 15,22}{0,56} = 22,44A$$

Se comparados os valores teóricos e seus correspondentes experimentais ($V_R = 15,3V$, $V_I = 13V$ e $I_d = 2,92A$), observa-se uma discrepância muito grande, principalmente no valor da tensão V_R , e, conseqüentemente, no valor da corrente I_d . Uma vez mais, o efeito da indutância de comutação tem seu efeito pronunciado, porém com maior influência, devido ao aumento da corrente de carga, o que, além de aumentar a queda de tensão sobre o indutor, também aumenta o ângulo de comutação.

Para esse caso, apenas os valores experimentais obtidos foram considerados, para os cálculos das potências:

$$P_R = V_R \cdot I_d = 15,3 \cdot 2,92 = 44,68W$$

$$P_I = V_I \cdot I_d = 13,0 \cdot 2,92 = 37,96W$$

$$P_L = P_R - P_I = 44,68 - 37,96 = 6,72W$$

A seguir são apresentadas as formas de onda correspondentes às formas de onda de tensão e corrente CA no retificador e no inversor, respectivamente, pelas figuras 4.8 e 4.9.

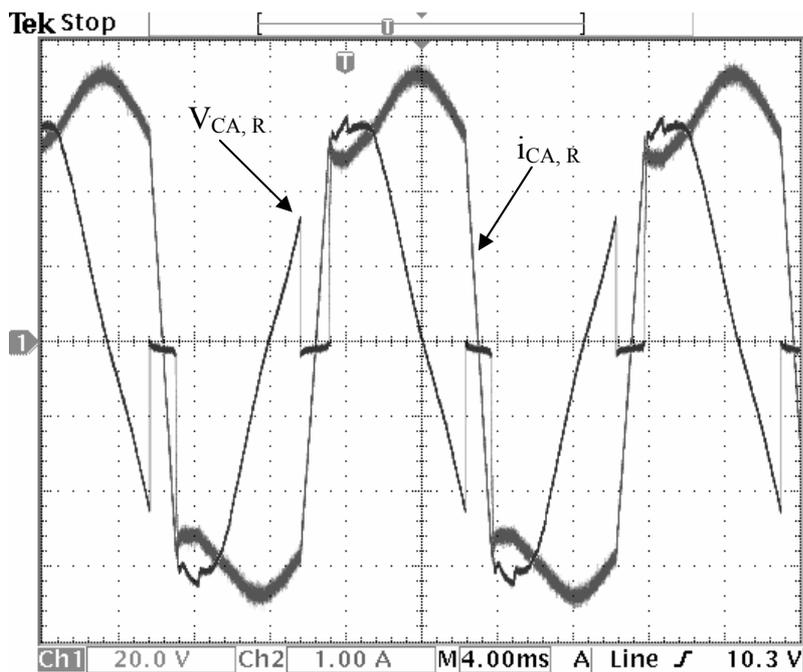


Figura 4.8 Tensão e corrente CA no retificador.

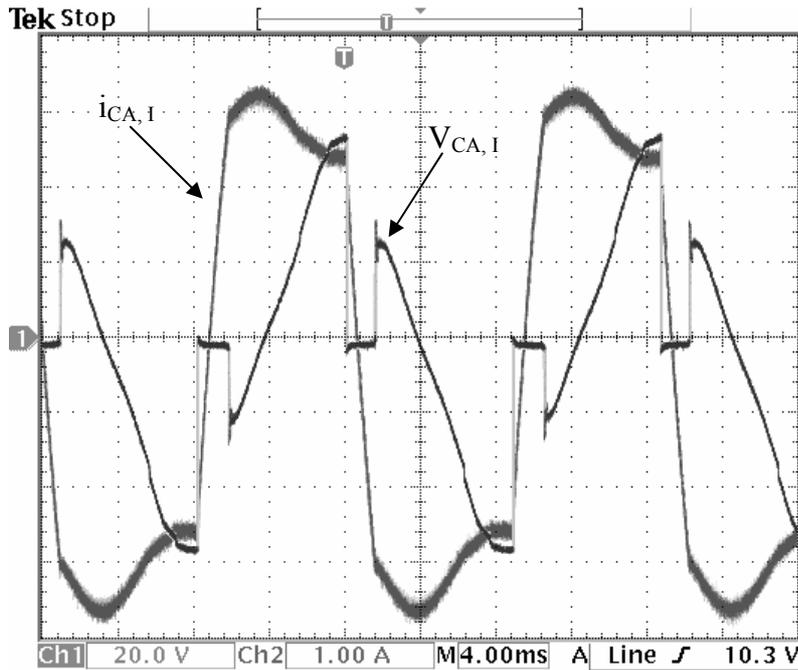


Figura 4.9 Tensão e corrente CA no inversor.

4.4 Testes para CERE-CA funcionando como carga resistiva

Assim como no caso da carga indutiva, foram tomadas duas medições (dois níveis de corrente: alta e baixa) para exemplificar o funcionamento. Para tanto, a tensão de entrada no retificador foi mantida fixa em 50V, enquanto a tensão CA do inversor foi de 47,5V para carga pesada e 49,5 para carga leve. Os valores dos ângulos de disparo foram mantidos constantes para efeito de comparação entre o funcionamento da CERE nos dois níveis de corrente propostos.

4.4.1 Carga leve

Para tanto, $\alpha = 0^\circ$ e $\beta = 51,86^\circ$. Com isso, os valores teóricos das tensões são:

$$V_R = 50 \cdot 0,9 \cdot \cos(0^\circ) = 45V$$

$$V_I = 49 \cdot 0,9 \cdot \cos(51,86^\circ) = 27,23V$$

Tomando como base os valores obtidos experimentalmente ($V_R = 33V$, $V_I = 31,5V$ e $I_d = 1,4A$), as potências envolvidas são as seguintes:

$$P_R = V_R \cdot I_d = 33 \cdot 1,4 = 46,2W$$

$$P_I = V_I \cdot I_d = 31,5 \cdot 1,4 = 44,1W$$

$$P_L = P_R - P_I = 46,2 - 44,1 = 2,1W$$

Observe-se que a queda de tensão total no circuito é subtraída para o retificador, mas é somada para o inversor. Daí resulta $V_{I(\text{real})} > V_{I(\text{ideal})}$. Isto acontece pelo fato que a tensão do inversor é negativa, em relação à do retificador, enquanto as quedas de tensão devido à indutância de comutação continuam positivas.

As formas de onda para esse teste são apresentadas a seguir, sendo correspondentes às formas de onda de tensão e corrente CA no retificador e no inversor, respectivamente, pelas figuras 4.10 e 4.12.

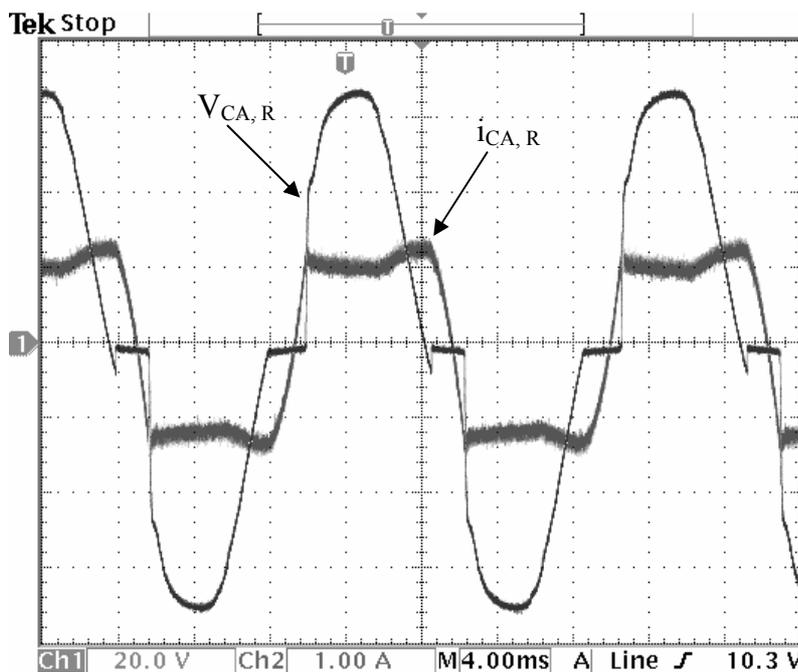


Figura 4.10 Tensão e corrente CA no retificador.

Devido aos efeitos de comutação, observa-se um curto-circuito quando a corrente comuta de um par de tiristores ao outro. A figura 4.11 apresenta um comparativo, onde se pode perceber qual seria a forma de onda de tensão ideal, sem o afundamento de tensão que ocorre na realidade (linha tracejada).

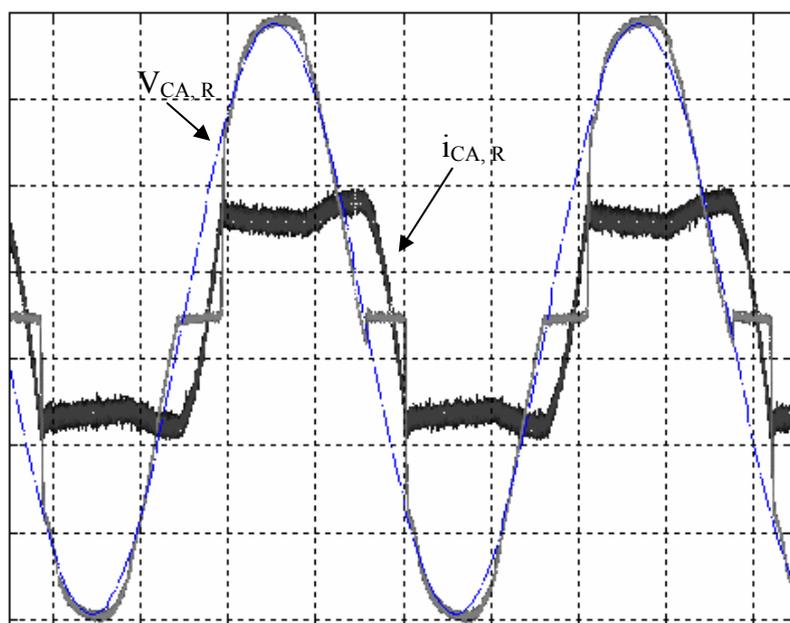


Figura 4.11 Tensões real e ideal (tracejada), e corrente CA no retificador.

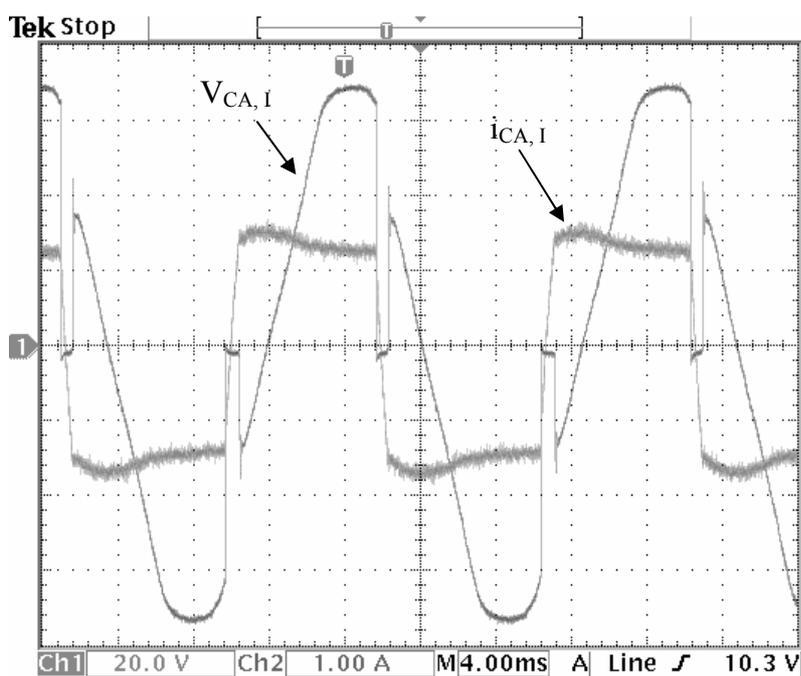


Figura 4.12 Tensão e corrente CA no inversor.

4.4.2 Carga pesada

Para esse teste os valores definidos dos ângulos foram $\alpha = 0^\circ$ e $\beta = 69,14^\circ$; consequentemente, os valores teóricos de tensão esperados são:

Valores teóricos das tensões:

$$V_R = 50 \cdot 0,9 \cdot \cos(0^\circ) = 45V$$

$$V_I = 47,5 \cdot 0,9 \cdot \cos(69,14^\circ) = 15,22V$$

Utilizando os valores obtidos experimentalmente ($V_R = 24,6V$, $V_I = 21V$ e $I_d = 2,75A$), as potências envolvidas são as seguintes:

$$P_R = V_R \cdot I_d = 24,6 \cdot 2,75 = 67,65W$$

$$P_I = V_I \cdot I_d = 21 \cdot 2,75 = 57,75W$$

$$P_L = P_R - P_I = 67,65 - 57,75 = 9,9W$$

A seguir são apresentadas as formas de onda correspondentes às formas de onda de tensão e corrente CA no retificador e no inversor, respectivamente, pelas figuras 4.13 e 4.15.

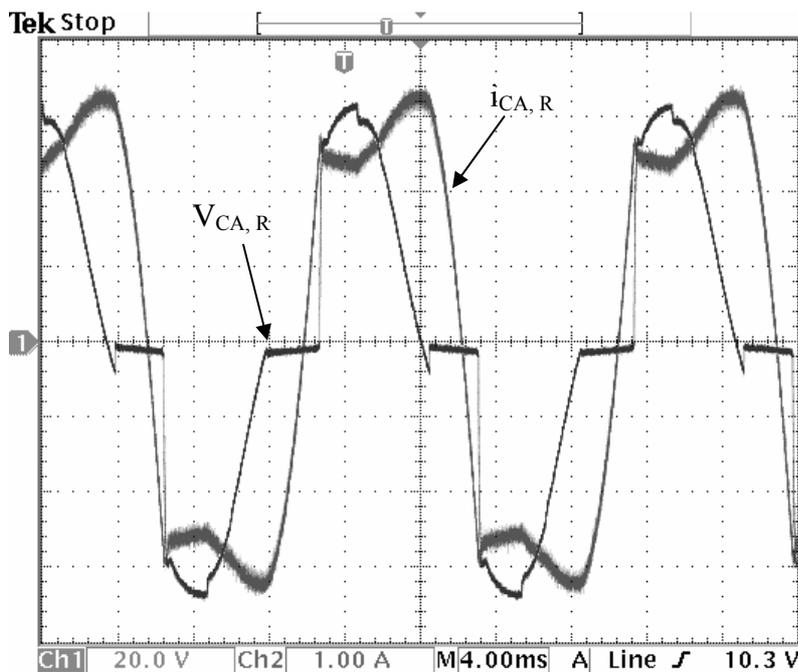


Figura 4.13 Tensão e corrente CA no retificador.

Da mesma forma que no caso anterior, na figura 4.14 é apresentado um gráfico onde as formas de onda de tensão real e ideal podem ser comparadas.

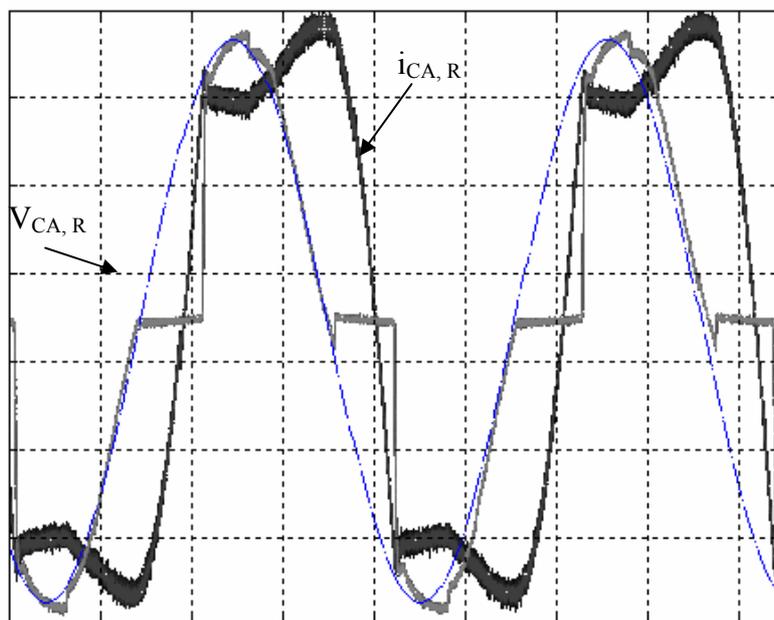


Figura 4.14 Tensões real e ideal (tracejada), e corrente CA no retificador.

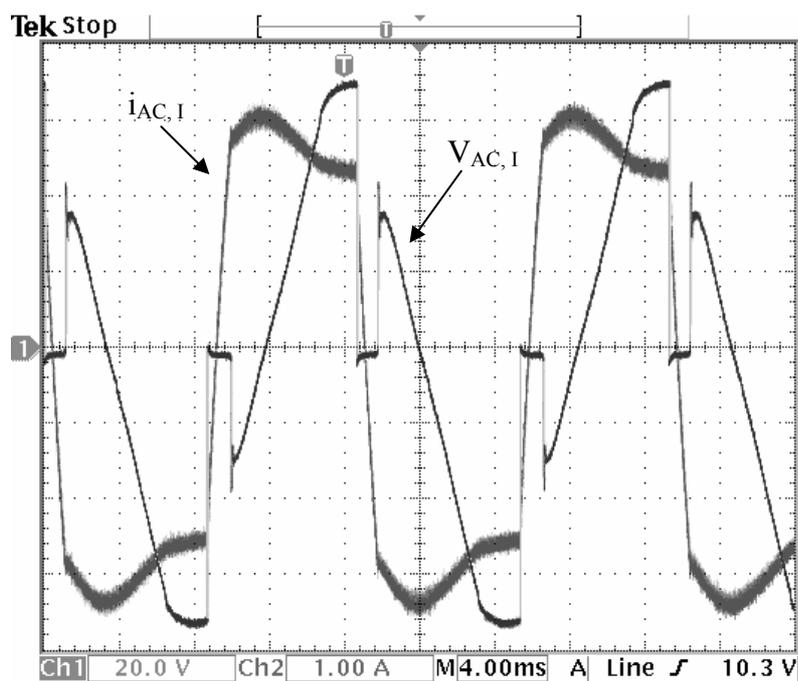


Figura 4.15 Tensão e corrente CA no inversor.

Uma vez apresentados os gráficos, é possível fazer as comparações necessárias e algumas observações:

- Para a CERE funcionando como carga indutiva, observa-se que, apesar dos efeitos da indutância de comutação serem evidentes, o circuito comporta-se de maneira satisfatória, emulando de maneira suficiente tal situação.

- Funcionando como carga resistiva, a CERE tem suas formas de onda prejudicadas pelo aumento significativo de corrente e seus efeitos durante a comutação. Apesar disso, respondeu de modo aceitável ao esperado, uma vez que sofreu os efeitos de uma característica intrínseca do próprio circuito que é a presença da indutância de comutação.

Num primeiro momento, uma solução para minimizar a indutância de comutação e seus efeitos é diminuir elementos de circuito que contribuem para aumentar tal grandeza. Nesse arranjo proposto, há a presença não apenas da indutância característica da fonte, mas também as indutâncias próprias do transformador e do autotransformador. O efeito delas combinado é cumulativo, contribuindo fortemente para aumentar a indutância de comutação total. Quanto aos transformadores isoladores, vale lembrar que a fonte que alimenta o retificador deve estar totalmente isolada da fonte que alimenta o inversor. Eliminar os dois transformadores em questão fará com que o circuito não funcione, conforme foi visto anteriormente. Como nesse caso a idéia é que a CERE se mantenha fiel à sua proposta de carga eletrônica, eliminar o transformador isolador do retificador já traria significativa redução no valor de L_C , reduzindo seus efeitos, sem o prejuízo no isolamento entre as fontes do retificador e do inversor. Na hipótese de utilizar-se uma fonte CA de teste (um inversor de frequência alimentado por baterias, por exemplo, de saída senoidal) podem ser dispensados, do lado retificador, tanto o autotransformador quanto o transformador isolador, o que diminuiria, em muito, o valor de L_C .

De qualquer forma, as experiências realizadas comprovam o funcionamento esperado; melhorias no futuro trarão ainda mais veracidade aos testes envolvendo fontes.

5 CONCLUSÃO

5.1 Introdução

Seguindo uma linha de raciocínio iniciada anteriormente em outro trabalho [1], desenvolveu-se aqui um novo conceito de carga eletrônica regenerativa, assim como foram relacionadas suas principais equações, além de suas características e restrições de funcionamento. Como consequência disso, simulações foram feitas para a análise de funcionamento da carga eletrônica e, além disso, um protótipo foi construído com o objetivo de validar o estudo apresentado.

Tal carga desenvolvida destina-se à aplicação em testes de “burn-in”, cuja função é drenar, do equipamento sob teste, corrente, e conseqüentemente, tensão, de forma a verificar o comportamento de tais equipamentos. Esses testes são feitos utilizando-se bancos de resistores (nos casos mais simples) e, em situações que exigem maior complexidade, principalmente quando se deseja variar o fator de potência da carga ou fazer o controle fino da corrente drenada, bancos de resistores associados a indutores e/ou capacitores (como quando se utiliza cargas eletrônicas). Cargas eletrônicas normalmente não proporcionam a aplicação a equipamento CC e CA em um mesmo dispositivo; ou a carga é para aplicação em corrente contínua ou para aplicação em corrente alternada. Considerando que tais cargas têm um custo elevado, manter uma carga CC e outra CA para a realização de testes torna-se inviável economicamente. Não apenas pelo custo inicial, mas também porque tais cargas eletrônicas, apesar das opções de funcionamento, são dissipativas, gerando custo enquanto funcionam. Além disso, há limitações de alguns de seus parâmetros (como corrente, por exemplo).

O modelo aqui proposto é um arranjo simples, baseado em uma tecnologia já conhecida e consolidada: a transmissão em corrente contínua e alta tensão (HVDC). Assim, a CERE funciona drenando energia da rede de alimentação CA, transmitindo-a através de um elo de corrente contínua, e posteriormente devolvendo grande parte dessa energia à rede CA.

Como um primeiro protótipo desenvolvido, este se destinou a comprovar sua proposta: uma carga eletrônica CA regenerativa, que drena energia da rede CA, que permite a variação do fator de potência, e devolvendo a maior parte dessa energia à rede alimentadora.

5.2 Cargas Eletrônicas e Resistivas

Cargas resistivas ou eletrônicas são dispositivos usualmente utilizados em diversos ensaios de protótipos comerciais ou de pesquisa. Pelo baixo custo dos resistores em relação às cargas eletrônicas comerciais, além de sua robustez e capacidade de condução de corrente, normalmente bancos de resistores são utilizados em laboratórios de pesquisa para testes de potência elevada. Tais bancos são associados em série e/ou paralelo, de acordo com a necessidade de drenagem de corrente, através de chaves mecânicas, o que traz atrasos na resposta dinâmica desses testes, além de oscilações nos valores de tensão e corrente.

Utilizando cargas eletrônicas tais efeitos são minimizados e até mesmo suprimidos, visto que, através de prévia programação de seu modo de funcionamento, tais dispositivos têm a variação da carga feita através do chaveamento de dispositivos semicondutores, alterando as resistências sem que haja oscilações nas formas de onda de tensão e corrente, como acontece quando se usam chaves com contatos mecânicos.

Tanto as cargas eletrônicas comerciais existentes quanto os resistores não possuem a capacidade de regeneração de energia. Desta forma, em testes de “burn-in” a dissipação por efeito Joule pode ser enorme, dependendo da potência do equipamento sob teste. Tais ensaios podem ter custo elevado, visto que os protótipos sob teste têm a necessidade de passar várias horas ligado, transformando a energia elétrica que recebem em calor, que liberam para o ambiente.

5.3 Estudo dos conversores

O ponto de partida para o desenvolvimento da CERE-CA foi o estudo de uma configuração de retificador que pudesse defasar, do lado CA, a corrente em relação à tensão. O conversor escolhido permite abranger os três tipos de carga: resistiva, indutiva e capacitiva; além disso, sua simplicidade e robustez tornam-no ainda mais atrativo para tal aplicação.

Algumas simulações do conversor foram feitas no intuito de comprovar tal versatilidade e as formas de onda comprovaram o que foi proposto inicialmente. Ainda mais, um estudo detalhado do barramento CC foi feito, bem como a análise do inversor, responsável pela regeneração.

Para a análise das restrições envolvidas nesse caso, as equações pertinentes a cada componente foram estudadas em separado, para posterior análise em conjunto; a partir daí estavam lançadas as bases de funcionamento do dispositivo proposto. O próximo passo seria, naturalmente, a construção do protótipo para os testes práticos.

5.4 A CERE desenvolvida

A carga eletrônica regenerativa foi construída seguindo os padrões já utilizados anteriormente, de maneira que os conversores, bem como os circuitos de comando, fossem idênticos entre si, diferenciando-se apenas quanto a seu funcionamento. Baseou-se na configuração de retificador e inversor monofásico de onda completa, tiristorizado, comandado via circuitos integrados dedicados.

O desenvolvimento do protótipo exigiu vários aprimoramentos para reduzir distúrbios prejudiciais a seu funcionamento. Um deles foi a existência de um curto-circuito na fonte, que foi eliminado utilizando-se transformadores isoladores; outro problema foi a perda de referência do circuito de comando devido às deformações nas formas de onda do lado CA dos conversores, resolvido facilmente através de um pequeno transformador isolador ligado diretamente à rede CA, cuja tensão secundária estava em fase com a tensão aplicada à entrada do conversor em questão.

Construído o protótipo, a ênfase no ensaio do mesmo foi o passo seguinte.

5.5 Resultados experimentais

A validação do presente trabalho se daria após a comprovação, na prática, daquilo que fora proposto anteriormente de forma teórica. Para tanto, alguns testes foram feitos, sempre com o cuidado de compará-los com resultados de simulação, analisando o comportamento da CERE-CA em laboratório.

Como o conversor utilizado permite apenas a emulação de cargas resistivas e indutivas, testes que contemplassem essas duas características se fizeram necessário. Dessa forma, foram feitos dois testes em cada modo de funcionamento, um deles com baixo nível e outro

com nível mais elevado de corrente, para que as conseqüências de variação de corrente na carga pudessem ser analisadas na prática.

Comparando-se os testes realizados com os resultados de simulação, nota-se que a CERE comporta-se de maneira satisfatória, comprovando sua funcionalidade.

5.6 Melhorias a serem feitas

A carga eletrônica aqui proposta atendeu às expectativas de maneira satisfatória; contudo, melhorias no futuro trarão ainda mais qualidade e veracidade em seu funcionamento. A seguir são propostas algumas delas.

a) Faz-se necessário no futuro estender o funcionamento da CERE-CA à modalidade de carga capacitiva, visto que apenas os casos resistivo e indutivo são abrangidos por este protótipo. Para tanto, deve-se implementar um conversor baseado em IGBT's, de modo que o mesmo possa trabalhar em seu modo retificador adiantando a corrente em relação à tensão.

b) Circuito de controle

Os circuitos de controle projetado são analógicos, não existe realimentação e a variação do ângulo de disparo dos tiristores é feita de forma manual, através de um potenciômetro de precisão. Esse problema pode ser eliminado com o uso de realimentação, o que resolveria algumas restrições de maneira automática (manter $V_R > V_I$, por exemplo). A precisão do controle do fluxo de corrente poderá ser melhorada substituindo o comando analógico por um microprocessador. Além disso, utilizar o microprocessador permitiria a programação de variação automática de carga ao longo do teste, o que torna o processo mais interessante do ponto de vista da análise de comportamento sob carga variável. Mais que isso, a utilização de chaves do tipo IGBT requer outro circuito de comando, que permita o controle não apenas da entrada em condução, mas também da comutação. Para o tiristor, a comutação é automática e exige apenas o disparo que controla a entrada em comutação; o IGBT, porém, exige que esse disparo tenha tempo definido (pulso de disparo com duração controlada), que é o tempo que cada chave deverá conduzir.

c) Indutância de comutação

A inclusão do auto-transformador, bem como do transformador isolador, trouxe efeitos ao circuito durante o processo da comutação. Tal efeito foi observado quanto ao aumento da indutância de comutação (L_C).

Uma maneira de minimizar esse efeito é reduzir componentes que tragam consigo tais conseqüências. O transformador isolador, por exemplo, torna-se necessário em apenas um dos lados. Isolar o lado do inversor traria efeitos da indutância de comutação mais evidentes apenas desse lado; com isso, reduzir-se-ia bastante a indutância de comutação do lado retificador. Conforme proposto anteriormente, a necessidade de fazer com que $V_R > V_I$ sugere a utilização de um transformador abaixador do lado do inversor, que serviria não apenas para tornar a tensão CA do inversor menor que sua correspondente no retificador, mas também para fazer o isolamento necessário.

De outra forma, o auto-transformador foi utilizado no laboratório para segurança durante o desenvolvimento do trabalho, além de reduzir a energia reativa consumida. Em um projeto final, sua presença pode ser dispensada.

Eliminando-se os as contribuições dos transformadores, os efeitos da indutância de comutação serão minimizados diretamente.

d) Qualidade de energia

Uma vez que o inversor consome potência reativa, faz-se necessária a compensação destes através de filtros apropriados, sintonizados e/ou ativos, de forma devolver à rede alimentadora corrente senoidal com baixa taxa de distorção harmônica (TDH). Há necessidade de se estudar filtros de alta frequência, ativos ou sintonizados, para suprimir as correntes harmônicas acima de 60Hz e assim devolver à rede elétrica uma corrente senoidal com TDH baixa.

e) Carga eletrônica regenerativa trifásica

A extensão do desenvolvimento do projeto à aplicação em circuitos trifásicos é importante, não apenas do ponto de vista dos equipamentos sob teste, mas também para o equilíbrio da rede alimentadora. Assim, equipamentos com saída trifásica poderão ser testados, e, além disso, o inversor devolverá energia de forma igualmente distribuída às três fases do sistema elétrico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CROCE, R. G. **Estudo e desenvolvimento de uma carga eletrônica baseada em inversor não autônomo**, 2003. Dissertação de pós-graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2003.
- [2] ARAGÃO FILHO, W. C. P.; CROCE, R. G. **Analysis of an adjustable, dc-link-based, regenerative electronic load**. In: COBEP, 7., 2003, Fortaleza. **Anais...** São Paulo: SOBRAEP, 2003;
- [3] FARIA, L. M. **Estudo e base de projetos de um módulo didático de transmissão em corrente contínua**. 2003. Trabalho acadêmico (Graduação em Engenharia Elétrica)-Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2003;
- [4] VENDRUSCULO, E. A.; POMILIO, J. A. **Conversores com capacitor flutuante e comutação suave: aplicações em fonte de tensão com alto fator de potência e carga eletrônica regenerativa**. Revista de Eletrônica de Potência, SOBRAEP, V.2, N. 1, Jun. 1997;
- [5] BARRETO, W. V. **Estudo e simulação de um sistema de transmissão em corrente contínua**. 2001. Trabalho acadêmico (Graduação em Engenharia Elétrica)-Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2001;
- [6] VENDRUSCULO, E. A.; POMILIO, J. A. **High-efficiency regenerative electronic load using capacitive idling converter for power sources testing**. In: PESC, 27., 1996, Baveno. **Anais...** Baveno: IEEE, 1996;
- [7] BARBI, I. **Eletrônica de potência**. Edição do Autor. Florianópolis:[s.n.], 1997;
- [8] VINCENZI, F. R. S.; BISSOCHI JR, C.A.; GOMES, D. F. B.; VIEIRA JR, J.B.; FARIAS, V.J. E DE FREITAS, L.C., **Carga ativa com reciclagem de energia**. In: CBA 2000, Anais...Florianópolis, 2000.
- [9] PADIYAR, K. R. **HVDC power transmission systems: Technology and system interactions**. 1st ed. New Delhi: John Wiley & Sons, 1991;
- [10] GRAINGER, J. J.; STEVENSON JUNIOR, W. D. **Power system analysis**. New York: McGraw-Hill, 1994;

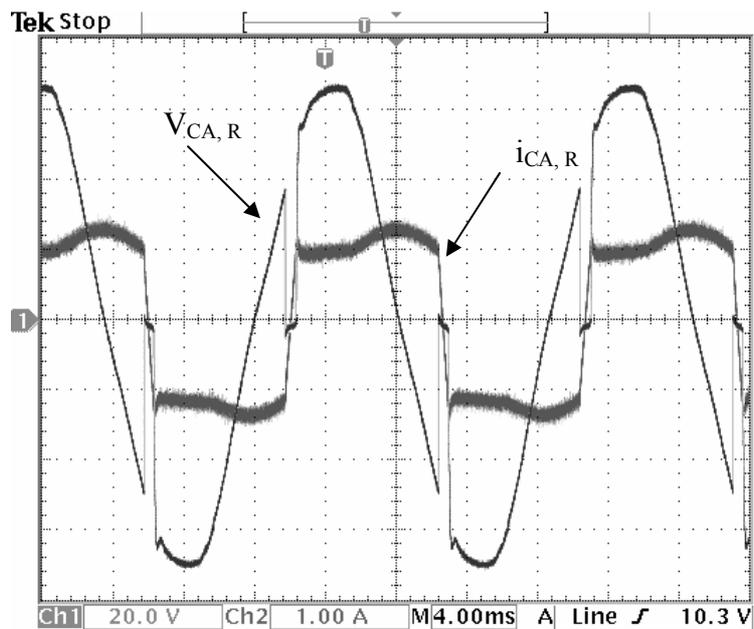
- [11] GÖNEN, T. **Electric power transmission system**. 1st ed. New York: John Wiley & Sons, 1988;
- [12] LANDER, C. W. **Eletrônica industrial: Teoria e aplicações**. 1. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1988;
- [13] MOHAN, N.; UNDELAND, T. M.; ROBBINS, W. P. **Power electronics: Converters, applications and design**. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1989/1995;
- [14] RASHID, M. H. **Power electronics: Circuits, devices and applications**. 2nd ed. New York: Prentice Hall, 1993;
- [15] FRERIS, L. L. Control of HVDC systems In: High voltage direct current converters and systems. 1965, Londres. B. J., Cory Macdonald, 1965;
- [16] BRADLEY, D. A. **Power electronics**. 2nd ed. New York: Chapman & Hall, 1995;
- [17] ELGERD, O. I. **Introdução aos sistemas de energia elétrica**. São Paulo: McGraw Hill do Brasil, 1984;
- [18] KIMBARK, E. W. **Direct current transmission**. New York: John Wiley & Sons, 1971;
- [19] Informações sobre cargas eletrônicas da Agilent Technologies. Disponível em: <<http://www.agilent.com>>. Acesso em: 10 ago. 2006;
- [20] Informações sobre cargas eletrônicas da American Reliance Inc. Disponível em: <<http://www.amrel.com>>. Acesso em: 10 ago. 2006;
- [21] Informações sobre cargas eletrônicas da California Instruments. Disponível em: <<http://www.calinst.com>>. Acesso em: 10 ago. 2006;
- [22] Informações sobre cargas eletrônicas da Nh Research Inc. Disponível em: <<http://www.nhresearch.com>>. Acesso em: 10 ago. 2006;
- [23] Informações sobre cargas eletrônicas **Chroma Ate Inc**. Disponível em: <<http://www.chromaate.com>>. Acesso em: 15 ago. 2006;
- [24] Informações sobre cargas eletrônicas **Sorensen - Elgar Electronics Corporation**. Disponível em: <www.sorensen.com>. Acesso em: 15 ago. 2006;

ANEXO A

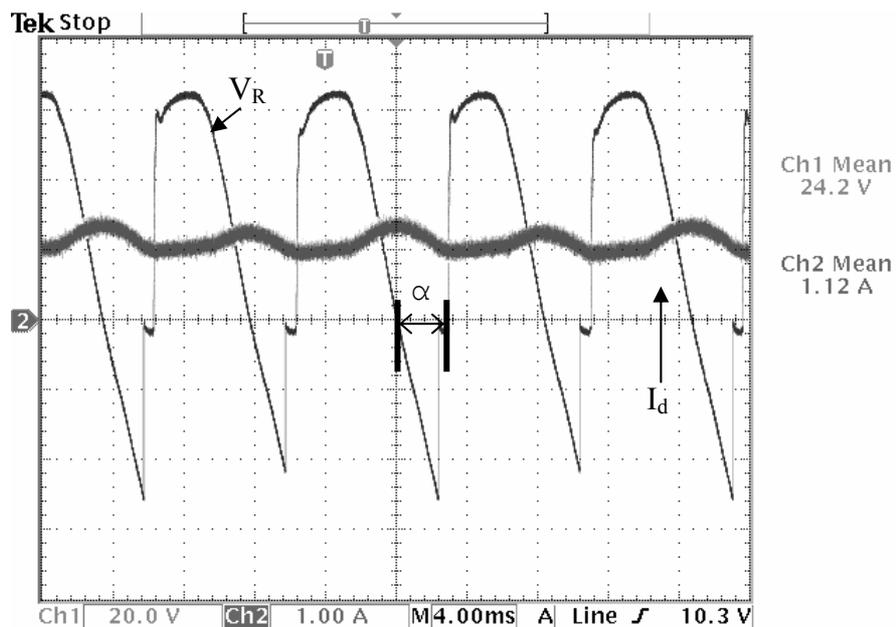
Formas de onda obtidas em laboratório durante os ensaios da CERE-CA

Nota: as escalas de tensão e corrente estão especificadas nos gráficos apresentados.

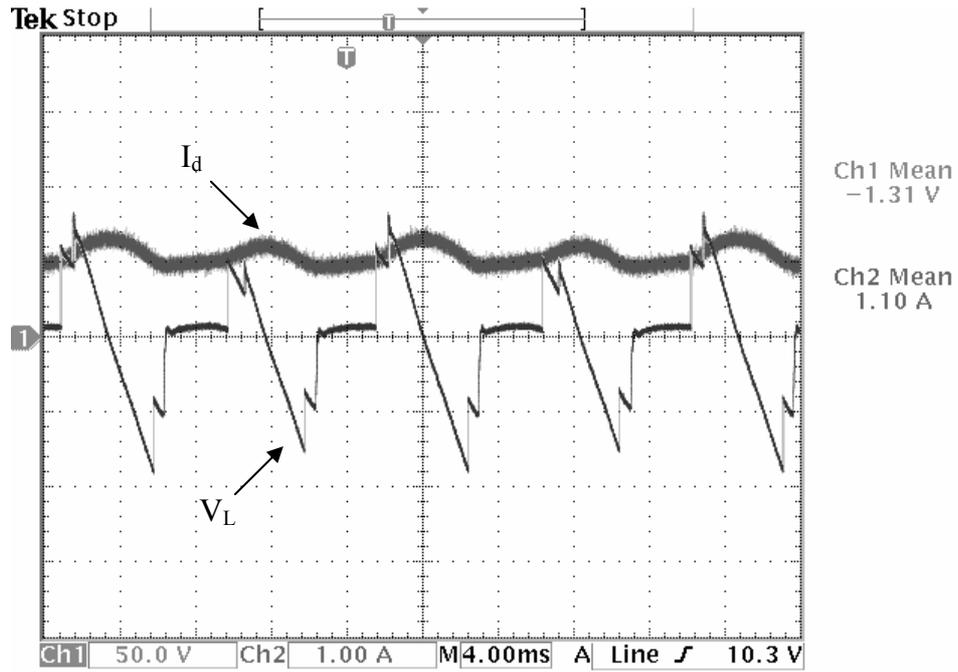
Caso 1: Funcionamento como carga indutiva, com $\alpha = \beta = 51,86^\circ$, $V_{CA,I} = 49V$



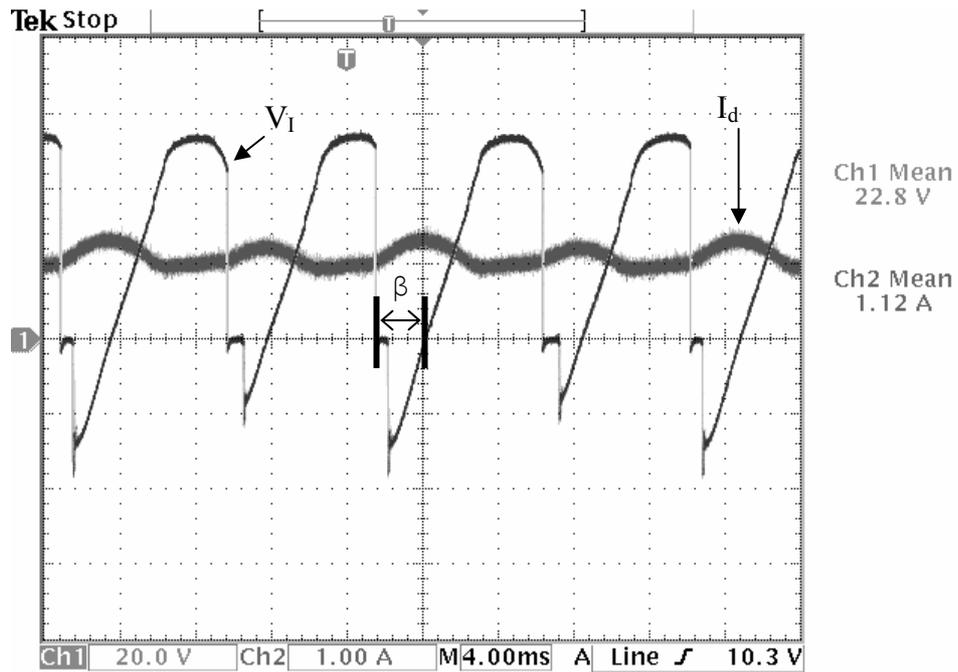
A 1 Tensão e corrente CA no retificador.



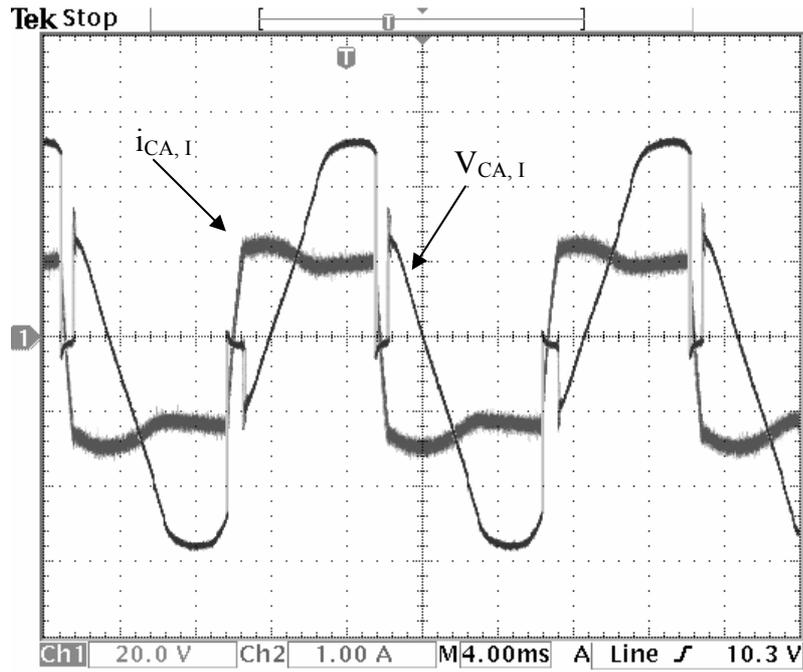
A 2 Tensão e corrente CC no retificador.



A 3 Tensão instantânea e corrente CC no indutor.

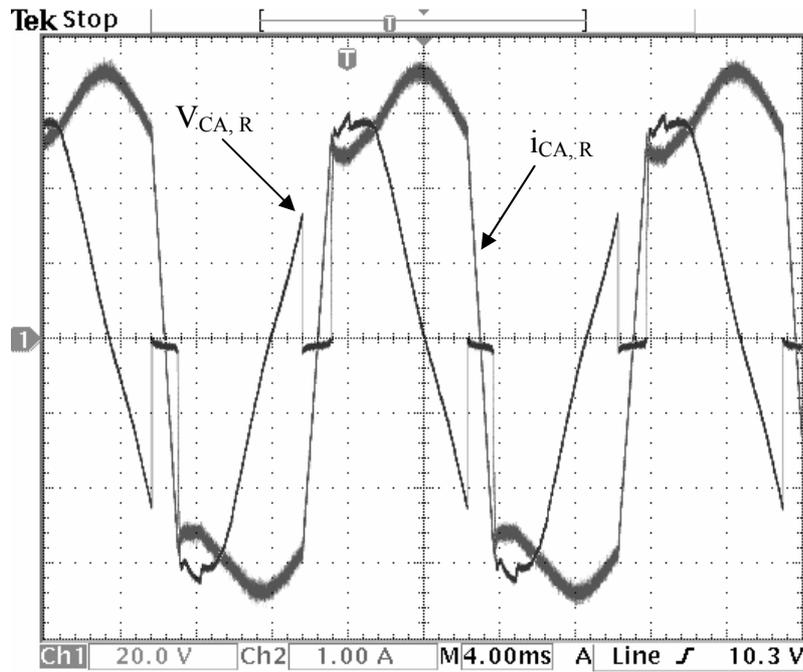


A 4 Tensão e corrente CC no inversor.

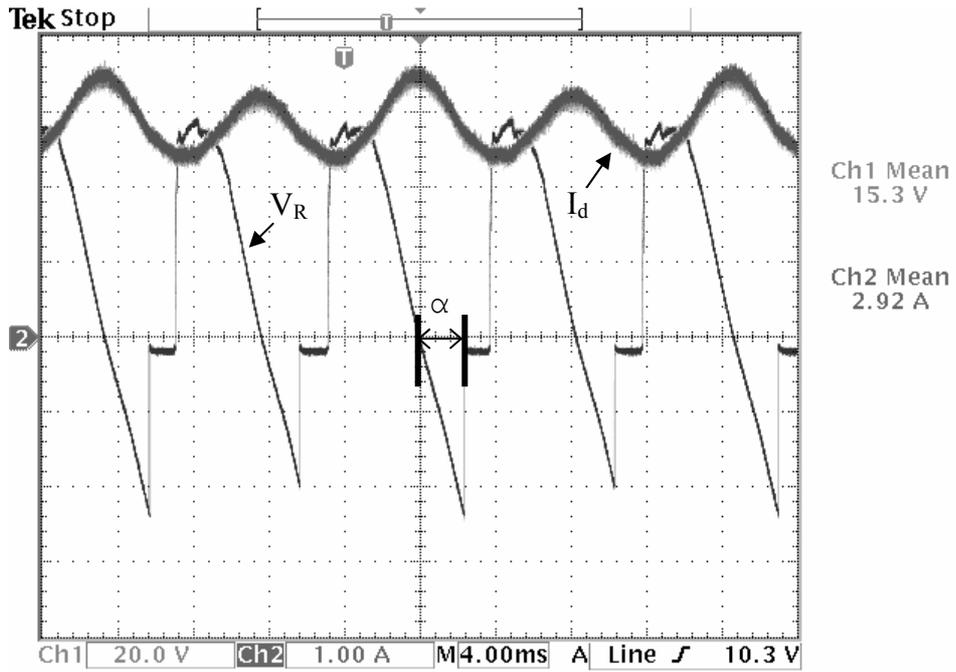


A 5 Tensão e corrente CA no inversor.

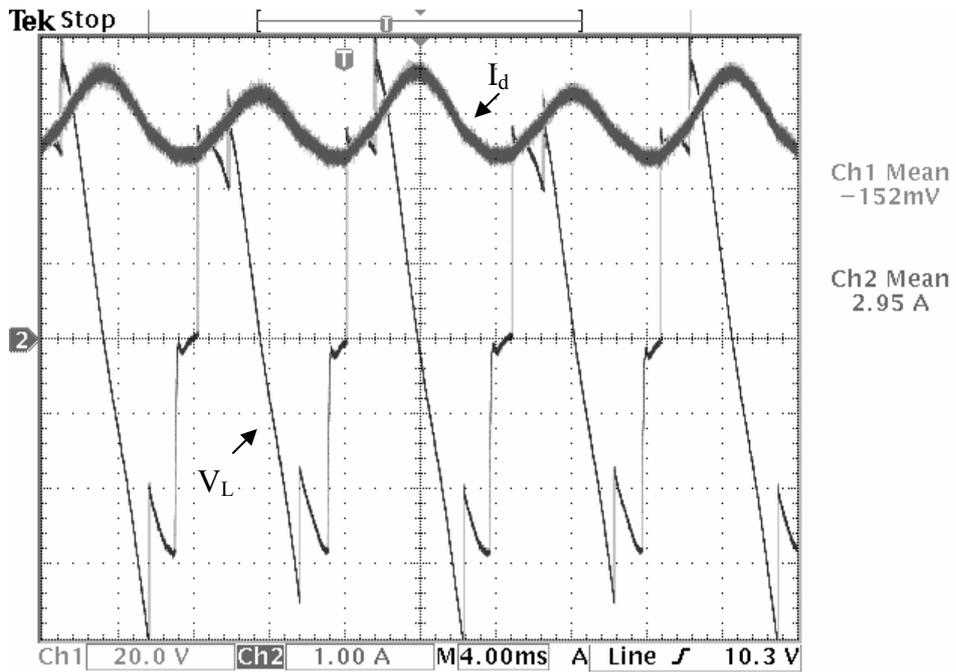
Caso 2: Funcionamento como carga indutiva, com $\alpha = 51,86^\circ$, $\beta = 69,14^\circ$, $V_{CA,I} = 47,5V$



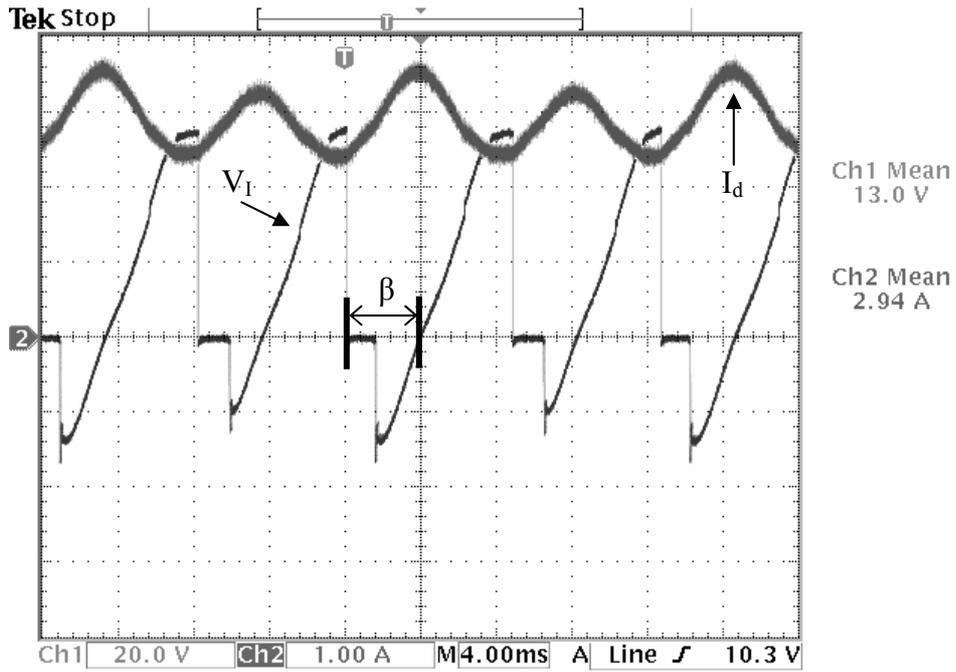
A 6 Tensão e corrente CA no retificador.



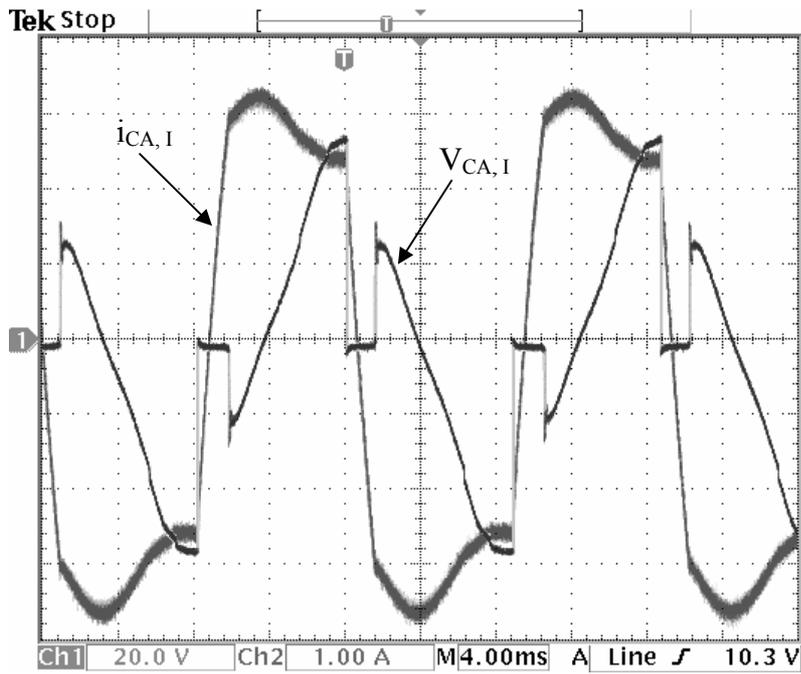
A 7 Tensão e corrente CC no retificador.



A 8 Tensão instantânea e corrente CC no indutor.

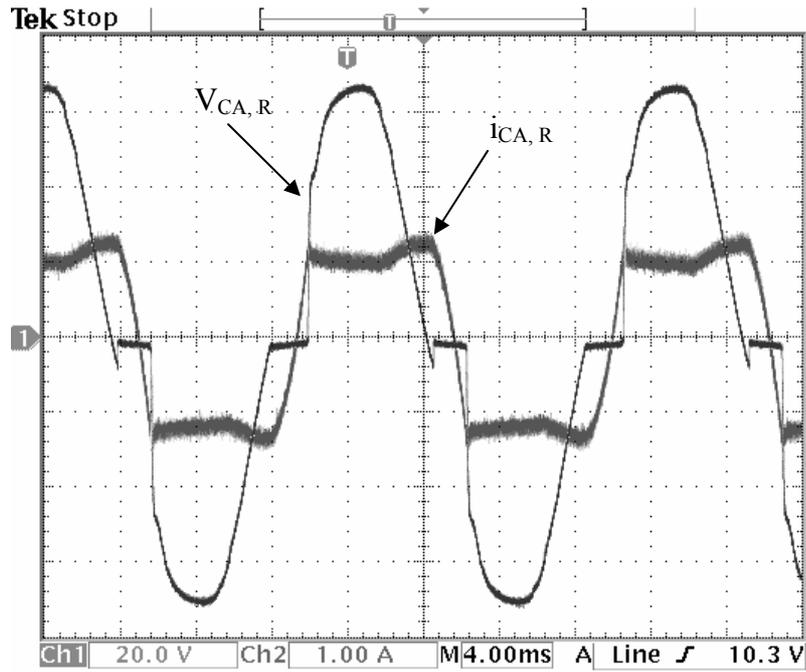


A 9 Tensão e corrente CC no inversor.

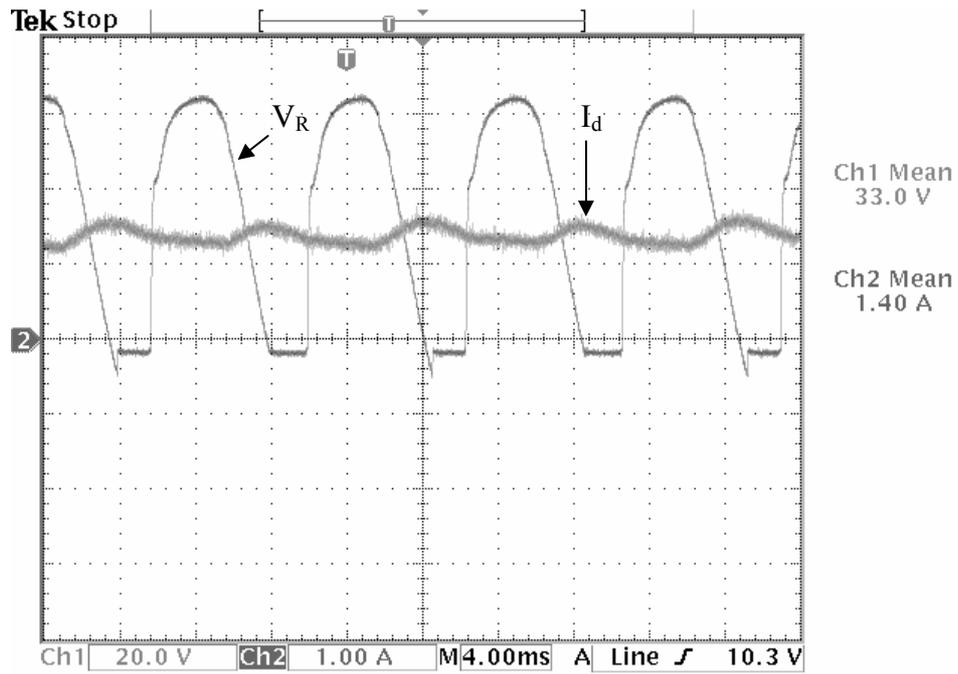


A 10 Tensão e corrente CA no inversor.

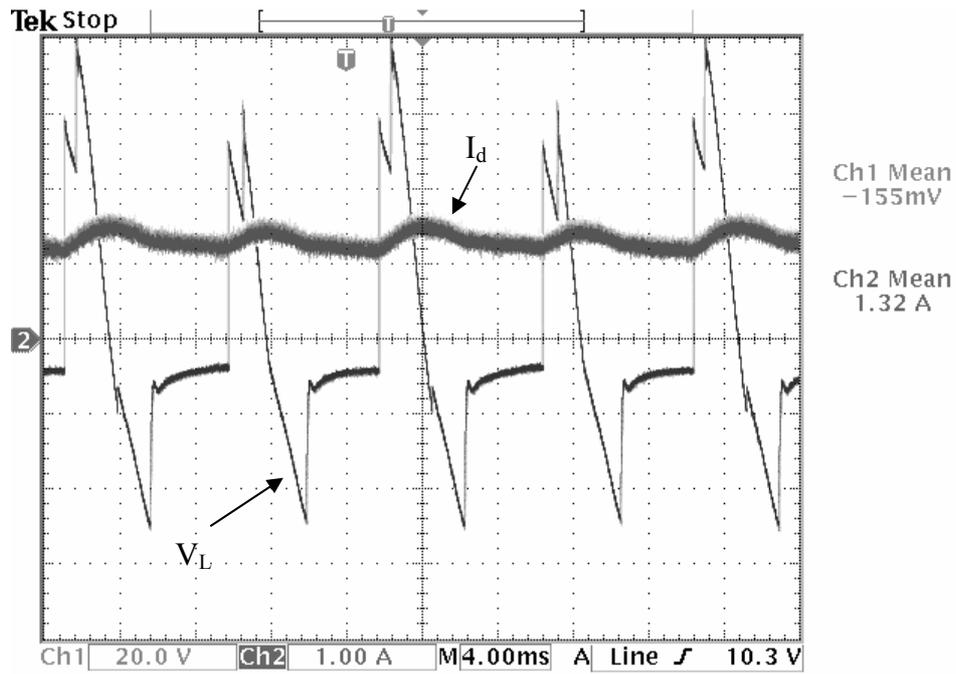
Caso 3: Funcionamento como carga resistiva, com $\alpha = 0^\circ$, $\beta = 51,86^\circ$, $V_{CA,I} = 49V$



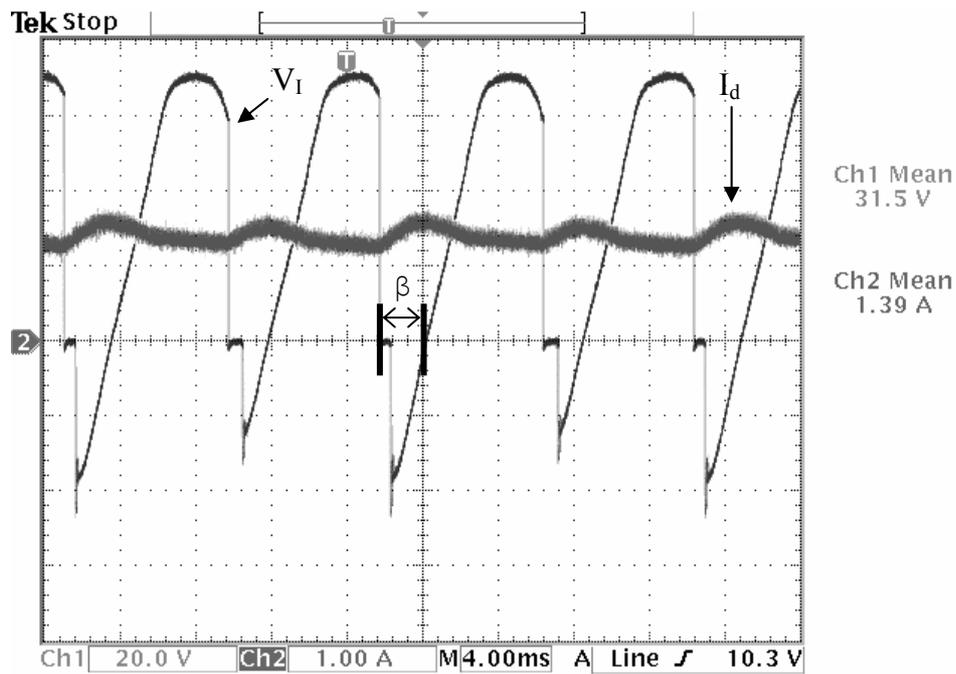
A 11 Tensão e corrente CA no retificador.



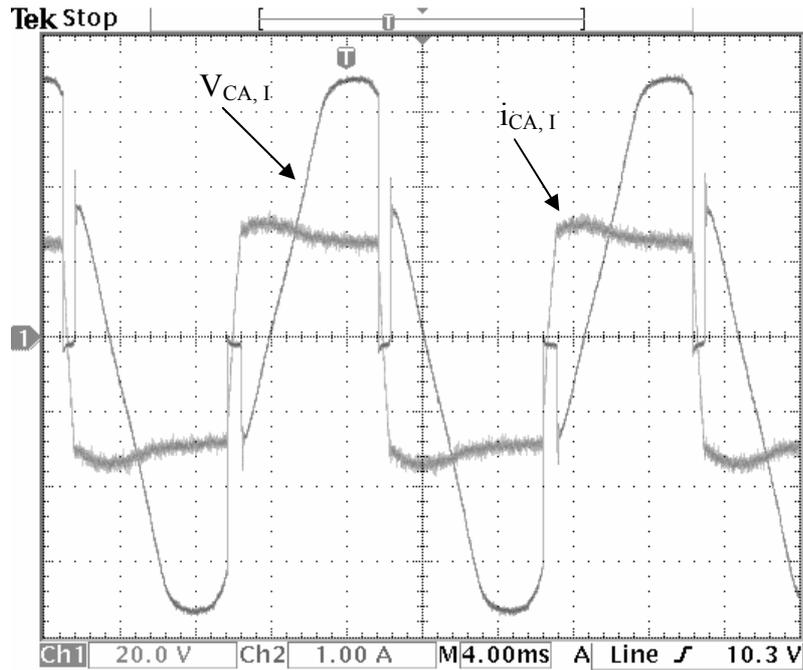
A 12 Tensão e corrente CC no retificador.



A 13 Tensão instantânea e corrente CC no indutor.

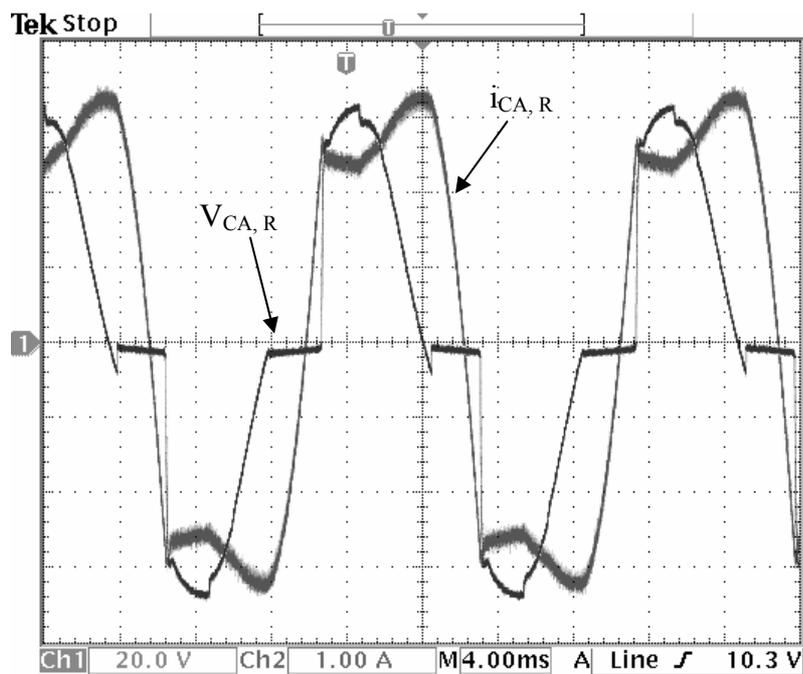


A 14 Tensão e corrente CC no inversor.

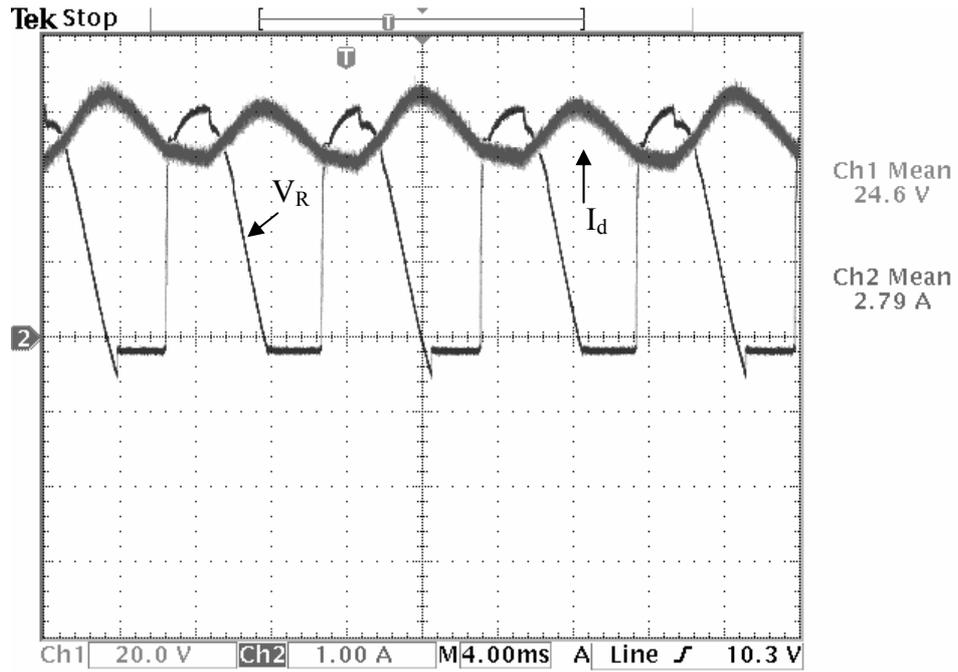


A 15 Tensão e corrente CA no inversor.

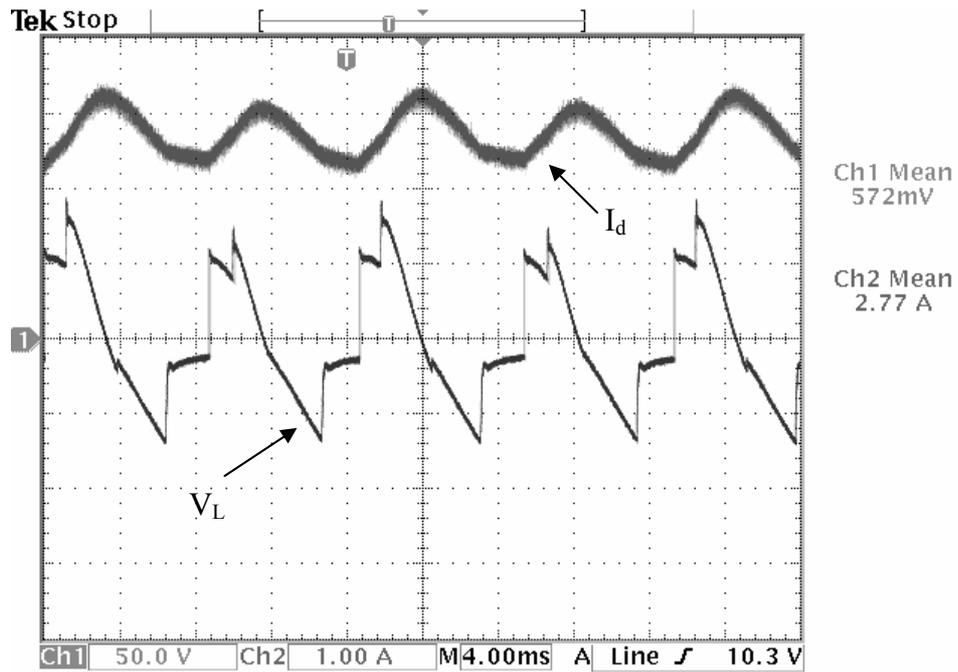
Caso 4: Funcionamento como carga resistiva, com $\alpha = 0^\circ$, $\beta = 69,14^\circ$, $V_{CA,I} = 47,5V$



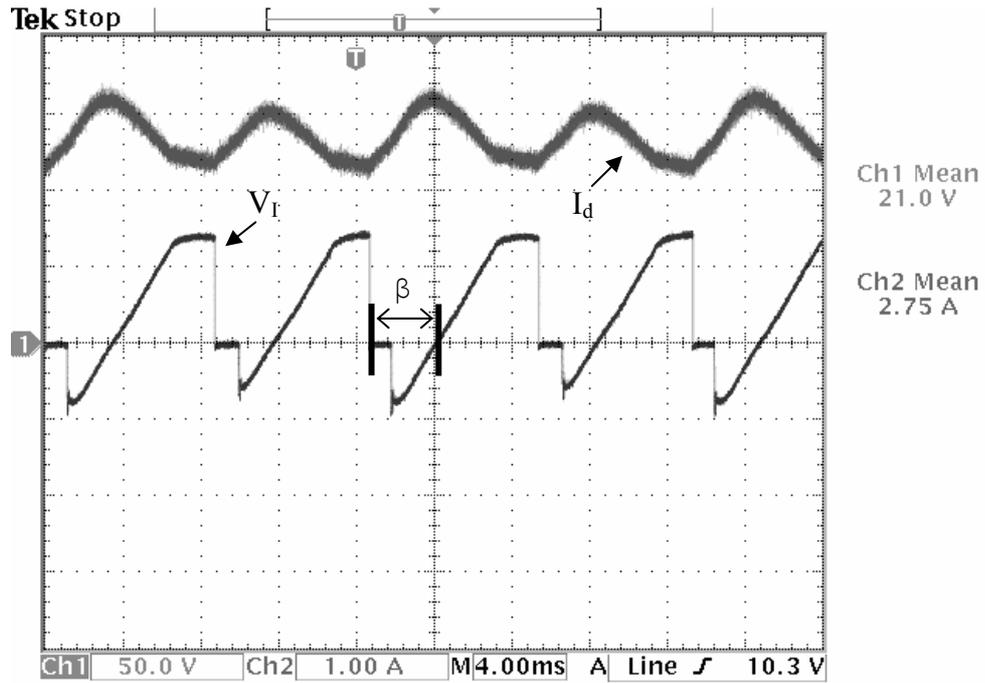
A 16 Tensão e corrente CA no retificador.



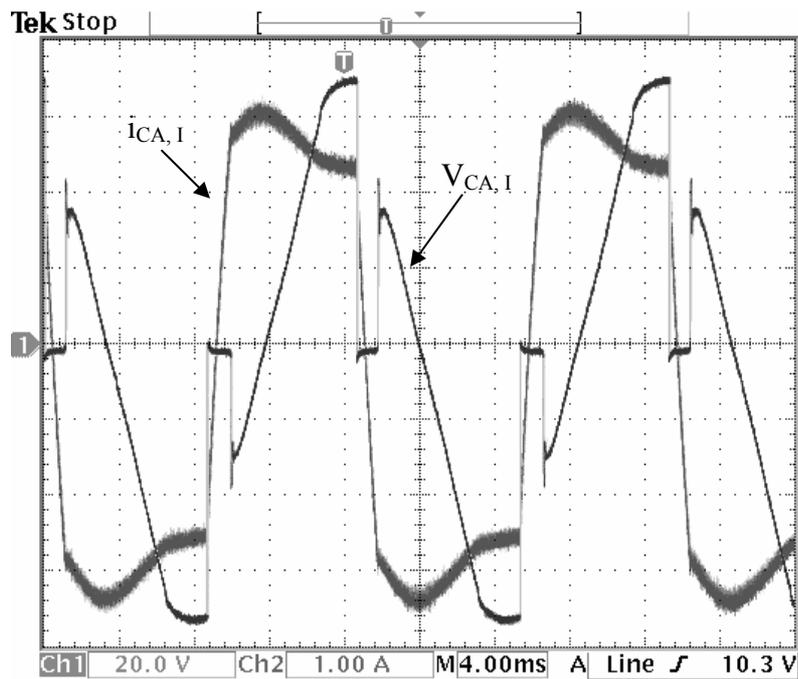
A 17 Tensão e corrente CC no retificador.



A 18 Tensão e corrente CC no indutor.



A 19 Tensão e corrente CC no inversor.



A 20 Tensão e corrente CA no inversor.

GLOSSÁRIO

Astável	Circuito cuja forma de onda de saída tem período invariável ao longo do tempo
“Cúk”	Tipo de conversor CC-CC [4]
“Burn-in”	Teste o qual se deixa um equipamento operando por várias horas para verificar seu desempenho e robustez em funcionamento ininterrupto
Efeito Joule	Dissipação de energia em forma de calor
“Gate”	Gatilho do tiristor
GPIB e RS-232	Tipos de interligação entre a carga eletrônica e o computador
Monoestável	Circuito cujo período da forma de onda de saída pode ser variado ao longo do tempo através de uma referência ou controle
“Ripple”	Ondulações na forma de onda
“Snubber”	Circuito que reduz picos de tensão nos tiristores durante a comutação