

Microrredes de Distribuição em Corrente Contínua: tecnologias de conversores e comportamento de cargas eletrônicas



Lucas Antonio Pelike
l182171@dac.unicamp.br, Unicamp

Prof. José Antenor Pomilio (orientador)
antenor@unicamp.br, Unicamp

Julho de 2023

1 Introdução

O trabalho de IC foi feito durante a vigência 2022/2023 ¹ e é formado por duas partes principais: uma primeira que se propõe a estudar características de cargas originalmente projetadas para operar em CA quando alimentadas em CC e uma segunda, que é o projeto de um balanceador de corrente. Nas próximas seções, mais detalhes serão fornecidos para a motivação dos trabalhos, seu desenvolvimento e resumo dos resultados obtidos.

Palavras-chave: microrredes, redes de distribuição em CC, eletrônica de potência

2 Parte 1

O uso de redes CC como alternativa a redes CA tem-se expandido recentemente como consequência das vantagens que apresenta nos contextos de geração descentralizada, redução de perdas, aumento de vida útil e facilidade de integração. Apesar disso, ainda é limitada a quantidade de cargas que são projetadas para operação nesse tipo de alimentação. O objetivo dessa parte do trabalho é então de testar com alimentação CC como se comportam cargas inicialmente projetadas para operar em CA e verificar se existem vantagens nisso. Os testes foram feitos inicialmente considerando retificadores de ponte completa simples e em um segundo estágio, utilizando cargas mais próximas das que seriam usadas na prática.

2.1 Simulações

Inicialmente algumas simulações foram feitas no software Ngspice para uma ponte retificadora com um capacitor de filtro, para que se tivesse uma expectativa inicial da dissipação no retificador e aumento de temperaturas entre diferentes níveis de carga e modos de alimentação. Encontrou-se um aumento de 1°C a 2°C nos testes e uma dissipação menor em cada diodo em CA do que em CC, mas como em CC apenas dois diodos conduzem, a dissipação do retificador completo em CA pode ser maior do que em CC.

2.2 Retificadores teste

A próxima etapa foi de testes de dissipação em retificadores em ponte reais, construídos de acordo com a tabela 1. Os testes foram feitos utilizando um Analisador de Potência de alta precisão, ligado ao circuito como

Retificador	Diodos	Capacitor
Retificador 1	1N4007	150 μ F
Retificador 2	1N5408	180 μ F
Retificador 3	1N4007	10 μ F

Tabela 1: Características dos retificadores testados

¹Durante a sua realização, o projeto contou com uma bolsa disponibilizada pelo programa PIBIC/CNPq e foi realizado no LabReI na FEEC, Unicamp.

indicado na figura 1, que registrava a potência real na entrada e saída. Um *script* posteriormente processava as medições feitas (5 minutos de testes, que geravam aproximadamente 7500 amostras) e permitia realizar o cálculo da potência dissipada no retificador. Os testes foram feitos para as tensões CA de 100V, 120V, 220V e 240V, e quando testados em CC, o valor em pico equivalente foi utilizado. As cargas conectadas eram resistores e foram alterados com as variações na tensão de alimentação, para que o valor fosse aproximadamente próximo nas tentativas. Os valores das combinações resultavam em uma resistência equivalente de 1.5 k Ω para 100Vrms CA / 141V CC, 2.25 k Ω para 120Vrms CA / 169.7V CC, 6 k Ω para 220Vrms CA / 311.1V CC e 7.5 k Ω para 240Vrms CA / 339.4V CC.

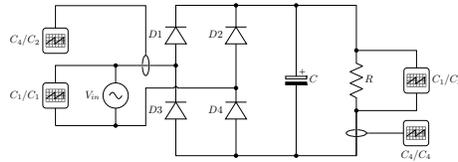


Figura 1: Circuito retificador com a localização dos pontos em que as medidas fora feitas

As temperaturas dos diodos e capacitores também foram registradas após o sistema atingir equilíbrio térmico utilizando um termômetro infravermelho.

2.2.1 Resultados

As seguintes tabelas ilustram os resultados obtidos nos testes. Foi encontrada uma dissipação menor quando

Potência dissipada [mW]	CC		CA	
	141.4V	169.7V	100Vrms	120Vrms
Retificador 1	152.6	134.9	190.6	173.1
Retificador 2	141.9	105.4	176.5	169.7
Retificador 3	149.6	130.3	241.4	228.9

Tabela 2: Resultados obtidos para os dois primeiros valores da tensão de alimentação

Potência dissipada [mW]	CC		CA	
	311.1V	339.4V	220Vrms	240Vrms
Retificador 1	139.6	166.9	164.7	179.3
Retificador 2	135.9	146.6	169.6	176.3
Retificador 3	140.9	145.6	226.2	222.8

Tabela 3: Resultados obtidos para os dois últimos valores da tensão de alimentação

os circuitos foram alimentados em CC do que em CA para uma mesma carga, e uma indicação que as temperaturas também seria inferiores. A magnitude da potência dissipada é próxima da esperada e parece mostrar que pode-se obter ganhos em eficiência caso dispositivos operem em CC. Com esses testes, também foi possível elaborar e melhorar a metodologia de medição e testes.

2.3 Cargas reais

Em adição aos testes feitos com os retificadores, testes utilizando cargas mais complexas também foram feitos. Essas cargas eram: uma fonte 15V sem PFC, uma PSU (Power Supply Unit) de um computador e lâmpadas LEDs. A metodologia de medição de dissipação foi aproximadamente a mesma, exceto no caso das lâmpadas, em que apenas observações e formas de onda de casos com características inesperadas foram registrados.

2.3.1 Fonte simples

Os resultados dos testes feitos com essa fonte, seguindo essencialmente a metodologia dos retificadores de teste e utilizando um resistor de 6 Ω de carga, estão nas tabelas 4 e 5. Nota-se que uma dissipação menor em CC foi encontrada, assim como no caso dos retificadores.

Potência dissipada [W]	141.4V	169.7V	311.1V	339.4V
Fonte em CC	6.048	6.143	5.795	6.268

Tabela 4: Resultados obtidos para a alimentação em CC

Potência dissipada [W]	100Vrms	120Vrms	220Vrms	240Vrms
Fonte em CA	6.943	6.187	7.348	6.362

Tabela 5: Resultados obtidos para a alimentação em CA

2.3.2 PSU

As figuras 2a e 2b mostram os sinais de corrente e tensão na PSU em testes em CC e CA. Pode-se ver o funcionamento do PFC na figura 2a por conta do sinal da corrente. Pode-se perceber também, como esperado, que existe um conteúdo em alta frequência no sinal da corrente. No caso CC pode-se ver que existe um *ripple* no sinal da corrente, com o valor de ≈ 100 mA entre vale e pico. Isso pode levar a problemas a outros dispositivos conectados em uma mesma rede. As medidas de eficiência mostraram uma leve vantagem para a CA, em que uma diferença de cerca de 2% de eficiência com a carga e nível de tensão usados foi encontrada.

2.3.3 Lâmpadas

As lâmpadas funcionaram visualmente de forma adequada em CA e CC, com um consumo aproximadamente 1W menor em CC. Apesar disso, alguns modelos apresentaram oscilações inesperadas em CC, como pode-se ver na figura 2d.



(a) PSU com ali- (b) PSU com ali- (c) Lâmpada com ali- (d) Lâmpada com
 mentação em CA mentação em CC mentação em CA alimentação em CC

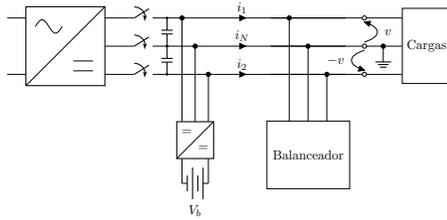
Figura 2: Formas de onda de alguns testes com a PSU e lâmpada

2.4 Conclusão

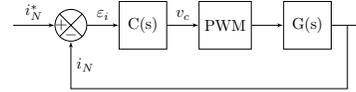
Os resultados obtidos indicaram que podem existir ganhos em eficiência e redução de custos quando se altera a alimentação para CC, mas podem existir também comportamentos inesperados. Assim, caso se pretenda usar cargas CA com a alimentação CC, deve-se estudar características da rede e da carga, verificando se é uma possibilidade viável.

3 Parte 2

A segunda parte, como mencionado inicialmente, propõe a projetar e montar um balanceador de corrente. A motivação para um circuito desse tipo surge quando se considera uma rede CC com alimentação simétrica como a mostrada na figura 3a. Dependendo de como o conversor CA-CC inicial é montado, existe-se o interesse de que a corrente no condutor central seja nula. Isso poderia ser, por exemplo, por conta do referencial central ser criado através de capacitores e assim, a existência dessa corrente não nula levaria a tensões diferentes nas cargas. O balanceador seria então adicionado ao sistema apara garantir esse equilíbrio, como mostrado na figura 3a. Para fins ilustrativos, o bloco do balanceador foi representado em separado do conversor CC-CC ligado à bateria, mas poderiam ser consolidados em um único a depender da implementação específica. O uso de capacitores é necessário por conta da necessidade de filtrar componentes espúrios de alta frequência e estabilizar as tensões na rede. Esse balanceador precisará de algum sistema de controle ativo para que seu funcionamento ocorra da forma prevista. O esquemático em blocos da figura 3b indica como será feito o controle para que i_N seja aproximada a zero durante a operação normal do balanceador. Na figura,



(a) Esquemático do sistema de interesse com o balanceador



(b) Esquema de blocos do balanceador.

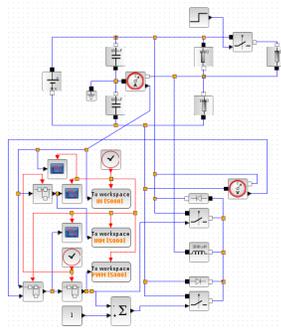
Figura 3: Diagramas do balanceador

i_N^* é o valor pretendido para a corrente i_N (no caso, 0), ε_i é o erro atual ($i_N^* - i_N$), $C(s)$ é o controlador a ser determinado, v_c é o sinal de controle gerado por $C(s)$, PWM é o bloco responsável em receber o sinal de controle v_c e gerar um sinal PWM a ser aplicado no circuito e $G(s)$ é a função de transferência do circuito montado. O controlador $C(s)$ que deverá ser usado é do tipo PI.

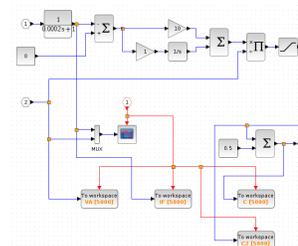
A implementação descrita anteriormente considera a realização com variáveis contínuas, mas a implementação prática será feita utilizando um controlador digital. A técnica utilizada será emulação, em que inicialmente um controlador será projetado conforme a descrição anterior e então uma aproximação, como *forward-Euler* ou trapezoidal, será usada para obter um controlador discreto, que será implementado utilizando um microcontrolador. Essa implementação digital traz também outros detalhes ao projeto, como configurações de PWM, timers, ADCs e taxas de amostragem, que serão tratados com mais detalhes nas próximas etapas.

3.1 Simulações

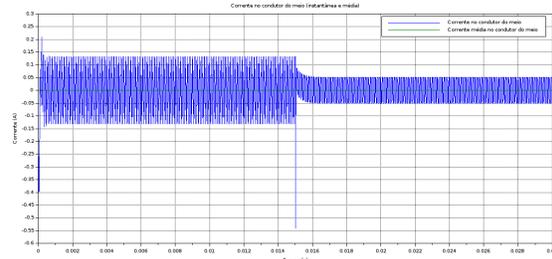
Para estudar o circuito e testar o controlador, foram montadas simulações no software Xcos/Scilab. As figuras 4a e 4b mostram os esquemáticos e a figura 4c mostra o sinal simulado da corrente no condutor médio. Pode-se ver que o controlador funcionou como projetado ao anular o erro inicial e também rejeitar



(a) Diagrama do sistema não completo com o controlador



(b) Diagrama do controlador. Os pesos K_p e K_i ainda



(c) Resultado de uma simulação inicial

Figura 4: Diagramas e resultado da simulação

perturbações, o que era esperado por ser um controlador do tipo PI.

3.2 Implementação física

A próxima etapa foi a implementação física, que foi feita através da integração de alguns módulos. O circuito a ser testado é o representado na figura 5a. Esse circuito é formado por uma fonte, capacitores, resistores de potência, sensores de tensão e corrente, um indutor e o circuito de acionamento de potência, que já estava montado em uma placa previamente usada para um inversor.

Os sensores usados, LEM LA55-P para corrente e LEM LV25-P para a tensão, são transdutores que tem saídas em níveis que não podem ser ligados diretamente ao circuito de controle. Para que seja possível integrá-los com o ADC do microcontrolador, ajustes nesses sinais podem ser feitos, mais especificamente, o uso de um resistor *shunt* para obter um sinal de tensão, um ganho, introdução de *offset* para ter uma excursão maior e filtragem. A figura 5b mostra o esquemático da placa que será usada. Essa placa foi montada antes do

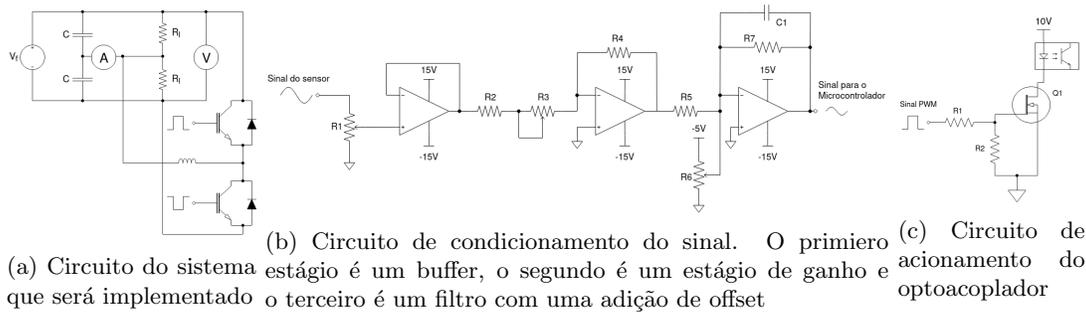
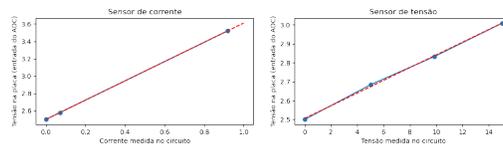


Figura 5: Circuitos que serão usados no projeto

período da IC para outros projetos e apenas reaproveitada nesse. Com ela, foi possível ajustar os sinais dos sensores para níveis adequados e otimizados para o ADC integrado ao microcontrolador e obter uma relação linear entre o valor lido e a grandeza medida. Os gráficos das figuras 6a e 6b mostram uma regressão linear feita para obter essa relação



(a) Gráfico do sensor de corrente (b) Gráficos do sensor de tensão

Figura 6: Gráficos entre a tensão medida após o condicionamento da placa e corrente/tensão medidas com um osciloscópio medidas pelo sensor. Os pontos e gráfico em azul representam as medições e o gráfico em vermelho representa a regressão linear

Um circuito, presente na figura 5c, também foi implementado para ajustar o nível de tensão no acionamento dos optoacopladores presentes na placa com o circuito de potência. Os testes são mostrados na figura 7a. Nota-se que o circuito funcionou corretamente, mas é necessário enviar um sinal complementar, devido à inversão que ocorre. Até o momento, apenas testes foram feitos com o sistema em malha aberta. Na figura 7b, pode-se ver a corrente no indutor e a tensão no condutor central, que são próximas das esperadas. Com



(a) Testes do circuito de acionamento. O sinal em verde é o presente no drain do Mosfet e o sinal em amarelo é o PWM gerado pelo microcontrolador. Nota-se o inversão do sinal

(b) Testes do circuito em malha aberta. O sinal em laranja é a corrente no condutor central e o sinal em amarelo é a tensão entre o condutor central e o referencial de menor potencial

Figura 7: Formas de onda dos testes em malha aberto realizados

essas etapas finalizadas, espera-se terminar a implementação do controlador até o final do período de IC.