



UNIVERSIDADE  
ESTADUAL DE LONDRINA



---

David Maykon Krepsky Silva  
Barbara Sfeir  
Caio Julio K. Campos

## Controle em malha aberta

Data de realização do experimento:

10 de novembro de 2015

Série/Turma:

1000/1011

Prof. Dr. Carlos Henrique Gonçalves Treviso

21 de novembro de 2015

---

## Resumo

A tensão de saída dos conversores de potência não é a mesma que a calculada devido as perdas no sistema e as componentes parasitas dos dispositivos utilizados. Outra fonte de variação na tensão de saída é a mudança na potência da carga. Conforme a carga varia, a tensão de saída passa por um período transitório. Para uma melhor estabilidade na tensão de saída e reduzir os efeitos transitórios é necessário o uso de um controlador que ajusta o *duty cycle* do sinal PWM enviado ao conversor. Neste trabalho foi avaliado o uso de um controlador em malha aberta com proteção contra aquecimento, para um conversor do tipo Buck, com o emprego do CI 3524. Com o auxílio de um potenciômetro, a tensão de comparação do CI foi modificada, o que ocasionou na variação da tensão de saída do conversor. Foi testado também a proteção contra superaquecimento com um termistor, onde foi possível observar a atuação do CI no corte a conversão devido ao aumento de temperatura.

# Sumário

<b>Resumo</b>	<b>1</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>3</b>
<b>2 Erro na tensão de saída</b>	<b>3</b>
<b>3 Transientes</b>	<b>3</b>
<b>4 Controlador em malha aberta</b>	<b>3</b>
<b>5 Revisão da Teoria</b>	<b>5</b>
5.1 Tensão de erro . . . . .	5
5.2 Circuito de controle . . . . .	5
<b>6 Metodologia Experimental</b>	<b>7</b>
6.1 Materiais . . . . .	7
6.2 Questões . . . . .	8
<b>7 Resultados</b>	<b>9</b>
7.1 Questão 1 . . . . .	9
7.2 Questão 2 . . . . .	9
7.3 Questão 3 . . . . .	9
7.4 Questão 4 . . . . .	10
7.5 Questão 5 . . . . .	10
7.6 Questão 6 . . . . .	10
7.7 Questão 7 . . . . .	10
<b>8 Discussão e Conclusão</b>	<b>11</b>

# 1 Introdução

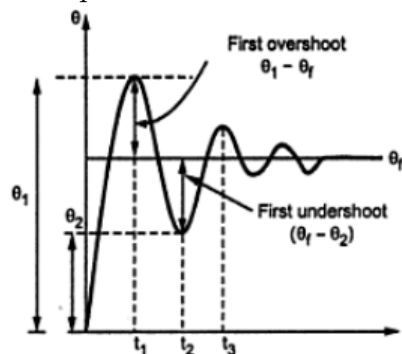
## 2 Erro na tensão de saída

Apesar das equações desenvolvidas na teoria, os circuitos conversores de potência geralmente não apresentam, de forma precisa, a mesma tensão de saída que a calculada. Isso se deve ao fato da variação da tensão de entrada, na variação nos parâmetros dos componentes, das componentes parasitas, as perdas no circuito e variações no ambiente, como a variação da temperatura. Esse erro na tensão de saída pode tornar inviável o uso de um conversor em sistemas onde uma tensão de saída precisa é necessária, podendo causar a queima do aparelho ou mal funcionamento.

## 3 Transientes

Outro fator a ser considerado durante o projeto de conversores são os transientes na tensão de saída, que são capazes de gerar altas tensão (*overshoot*) ou tensões abaixo da tensão mínima de funcionamento do equipamento (*undershoot*). Os transientes ocorrem durante a inicialização do conversor e durante a variação de carga na saída. Esse efeito é causado pelos elementos reativos e capacitivos do sistema e é um critério fundamental de design do conversor.

Figura 1: Exemplo de transiente na tensão de saída.

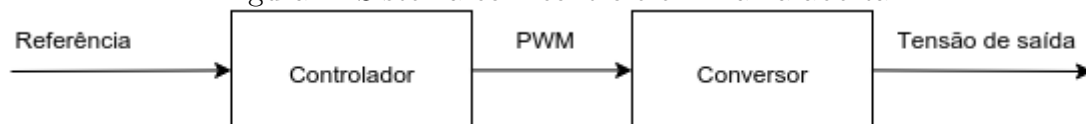


A figura 1 mostra um exemplo de transiente que ocorre durante a inicialização do sistema. Durante o projeto de um conversor, é desejado reduzir ao máximo o *overshoot*, bem como o tempo de estabilização do sistema.

## 4 Controlador em malha aberta

Para reduzir o erro fixo na tensão de saída, pode-se utilizar um controlador em malha aberta (*open loop*), de modo a ajustar a tensão até o ponto necessário. A principal desvantagem desse tipo de controle é que ele não reduz os efeitos dos transientes, sendo necessário um ajuste manual da tensão de saída para cada modificação na carga ou na tensão de entrada.

Figura 2: Sistema com controle em malha aberta.



A figura 2 mostra o diagrama de blocos para um sistema em malha aberta, onde a referência é dada manualmente, podendo ser com o auxílio de um potenciômetro. Nesse trabalho o controlador utilizado foi o CI 3524.

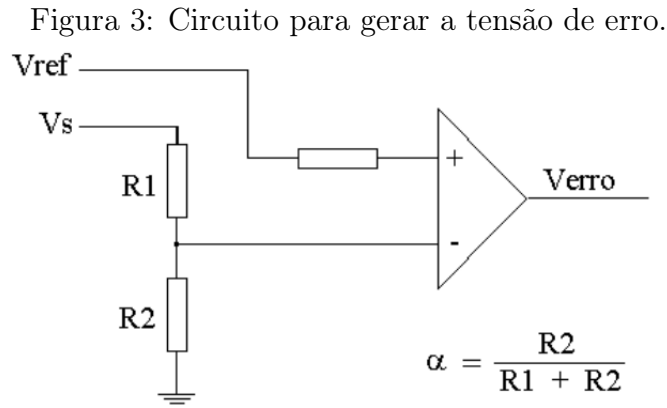
## 5 Revisão da Teoria

Para o conversor Buck em modo contínuo, o valor a ser ajustado de modo a compensar a tensão de saída é a largura do pulso de chaveamento do conversor, chamado de razão cíclica ( $D$ ). Sendo  $D$  a razão entre o tempo de condução do transistor e o período de chaveamento:

$$D = \frac{T_{on}}{T}.$$

O ajuste de  $D$  é feito por um bloco de controle, o qual usa uma tensão de erro ( $V_{erro}$ ) para calcular o valor de  $D$  que fará com que a tensão de saída se aproxime da desejada, reduzindo assim as variações na tensão de saída.

### 5.1 Tensão de erro



A tensão de erro é obtida comparando-se uma tensão de referência (a qual é conhecida) a uma tensão de ajuste. Para o controlador em malha aberta,  $V_s$  na figura 3 é gerada com o auxílio de um potenciômetro. Em circuitos mais elaborados (controlador em malha fechada),  $V_s$  é provindo a partir da tensão de saída do conversor.

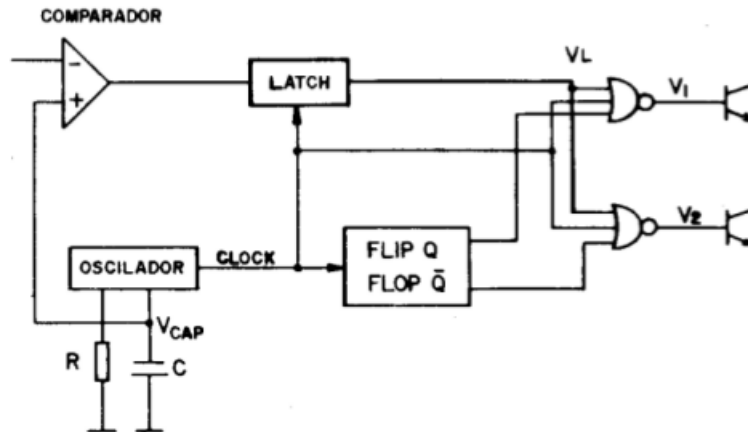
No circuito da figura 3, o amplificador operacional atua comparando a tensão de entrada  $V_s$ , multiplicada pelo ganho  $\alpha$ , a tensão de referência  $V_{ref}$ . O valor de  $V_{erro}$  é utilizado para ajustar o valor de  $D$  de modo que:

$$V_{ref} - V_s \alpha = 0.$$

### 5.2 Circuito de controle

O CI empregado nesse trabalho (SG3524) possui uma topologia semelhante a apresentada na figura 4. Seu funcionamento explicado abaixo.

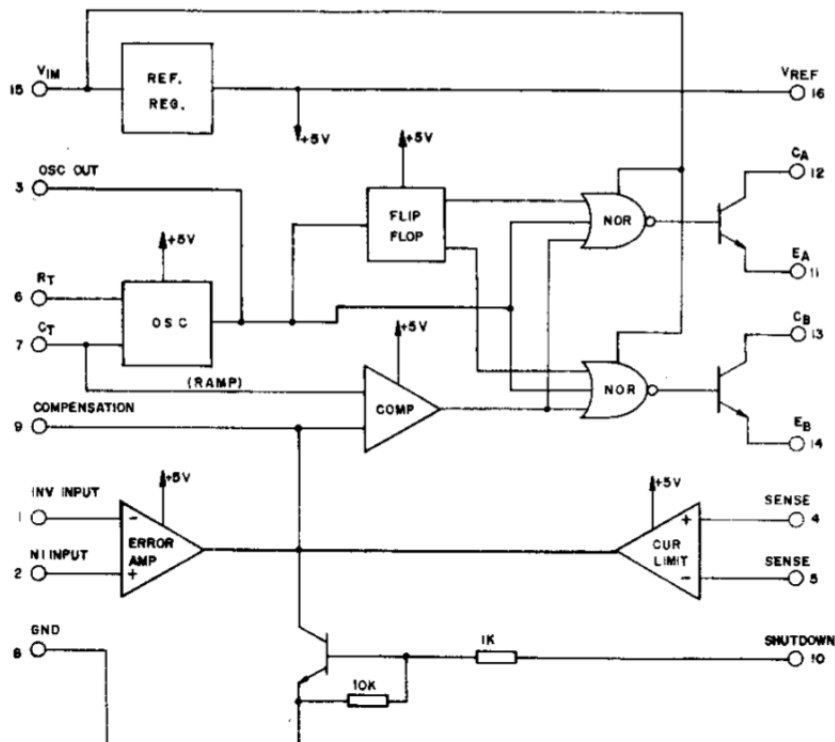
Figura 4: Topologia do circuito de controle.



O oscilador (cuja frequência de oscilação é determinada por  $R$  e  $C$ ) fornece um pulso positivo de curta duração (durante a descarga do capacitor  $C$ ) o qual ocasiona o *reset* do *latch*, muda a condição de saída do *flip-flop* e inibe as saídas. O estado do comparador é utilizado para armazenar o estado do comparador. Quando o *latch* recebe um pulso do oscilador, o mesmo vai para o estado zero e se mantém assim até que a tensão de erro seja menor do que  $V_c$ . Quando a tensão de erro se torna menor que  $V_c$ , o *latch* passa para um nível alto até o próximo pulso de *clock*. O *flip-flop*, por sua vez, garante que somente uma das duas saídas disponíveis estará ativa, possibilitando o uso do circuito em conversores do tipo *push-pull*. Vale notar que, ao se utilizar somente uma saída, temos uma variação máxima da largura de pulso de 50%, porém, se utilizarmos as duas saídas em paralelo, temos 100% de variação.

A figura 5 mostra o esquema interno do CI SG3524, onde é possível observar a semelhança com a topologia analisada.

Figura 5: Circuito integrado SG3524.



## 6 Metodologia Experimental

### 6.1 Materiais

O material utilizado foi:

- Protótipo do conversor Buck disponível no laboratório;
- CI 3524;
- AmpOp LM324;
- 2 potenciômetros de  $10\text{ k}\Omega$ ;
- 6 resistores de  $1\text{ k}\Omega$ ;
- 1 capacitor de  $1\text{ nF}$ ;
- 1 termistor de  $10\text{ k}\Omega$ ;
- Osciloscópio;
- Multímetro;
- Resistor variável de potência ( $50\text{ }\Omega$ ).

Para execução do experimento, faz-se necessário executar os seguintes passos:

1. montar o protótipo Buck (figura 6) com tensão de entrada de 30V.
2. montar o circuito do controlador conforme a figura 7, alimentando o CI com 12V;
3. ajustar o circuito para responder as perguntas da seção 6.2.

Figura 6: Montagem do conversor Buck.

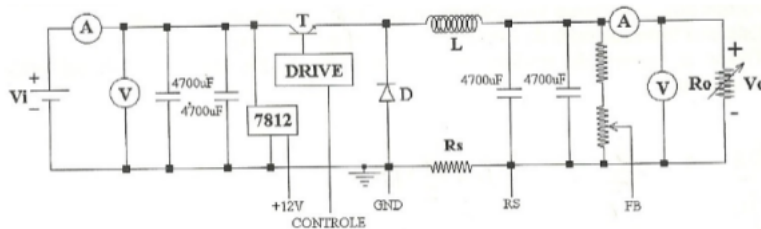
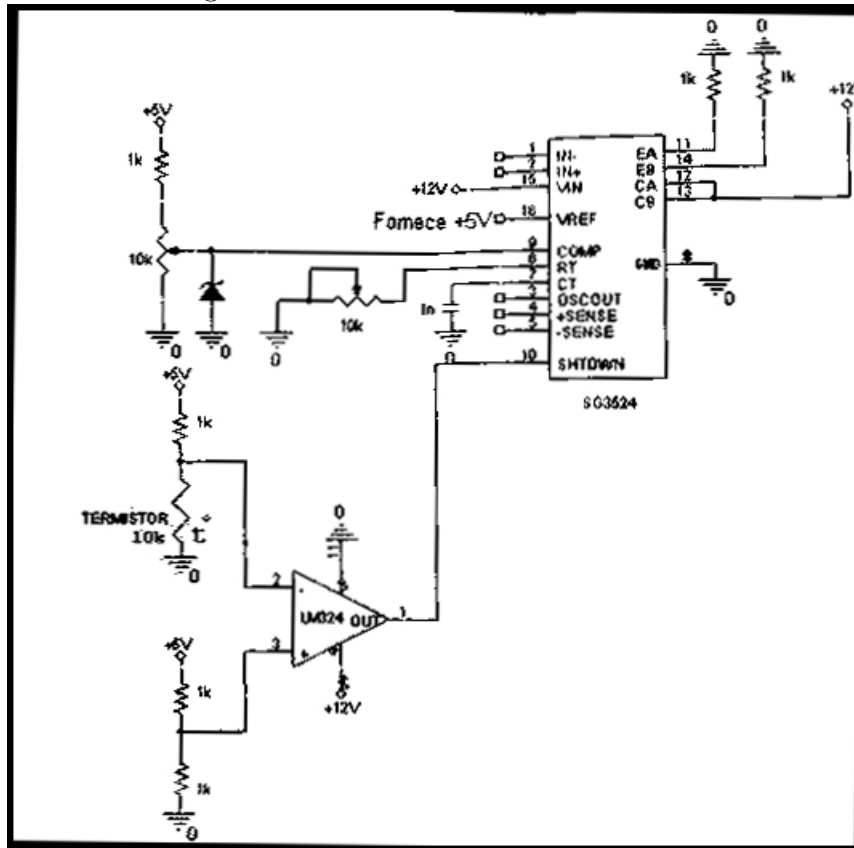




Figura 7: Controlador com CI SG3524.



## 6.2 Questões

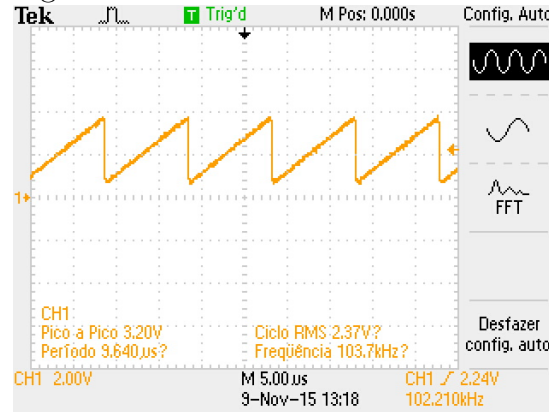
1. Para ajustar a frequência dos pulsos de controle, utilizar um capacitor de 1 nF e potenciômetro de 10 k $\omega$ ; Variando o potenciômetro, ajuste a frequência de saída para 100 kHz com  $K_c = 0.5$ . Qual a frequência de saída se o  $K_c$  for alterado para 1?
2. Variando o potenciômetro, ajuste a frequência de saída para 50 kHz (ou um valor próximo a este) com  $K_c = 0.5$ . Qual é a frequência de saída se o  $K_c$  for alterado para 1?
3. Simular um aumento de temperatura utilizando um ferro de solda e o termistor NTC para cortar os pulsos de comando através do pino *shutdown* do 3524;
4. Para o controlador com  $K_c = 0.5$  e frequência 100 kHz, qual a tensão de saída do conversor buck tendo como carga 25  $\omega$  / 1kW (ajustar o reostato para este valor)?
5. Para o controlador com  $K_c = 1$  e frequência 100 kHz, qual a tensão de saída do conversor buck tendo como carga 25  $\omega$  / 1kW (ajustar o reostato para este valor)?
6. Quais os conversores que devem utilizar o  $K_c = 0.5$ ? Cite três conversores.
7. Quais os conversores que devem utilizar o  $K_c = 1$ ? Cite três conversores.

## 7 Resultados

### 7.1 Questão 1

Seguindo as instruções da questão 1, foi obtido a imagem 8. Como pode ser visto na imagem, a frequência de saída é de  $f = 103,73\text{kHz}$ .

Figura 8: Forma de onda no controlador.

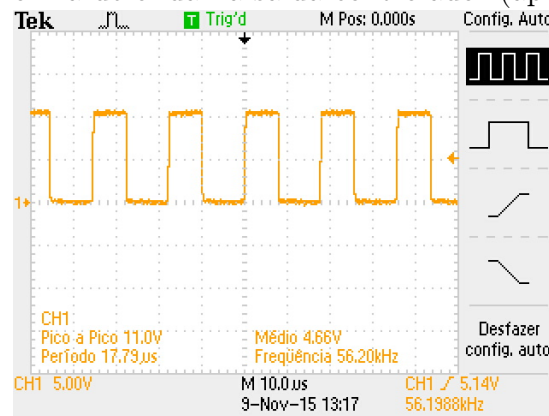


Para  $K_c = 1$ , a frequência de saída é dobrada. Sendo assim,  $f = 207,46\text{kHz}$ .

### 7.2 Questão 2

Como pode ser visto na figura 9, a frequência de saída é de 56 kHz.

Figura 9: Forma de onda na saída controlador (aprox. 50 kHz).



Fazendo  $K_c = 1$ , a frequência de saída passa para 108 kHz.

### 7.3 Questão 3

Utilizando o ferro de solda próximo ao termistor, foi possível notar que, quando a temperatura no NTC atinge um determinado valor, o conversor é desligado. Quando a temperatura começa a diminuir, o conversor volta a funcionar, dando um "tranco" no conversor e gerando uma alta corrente inicial.

#### 7.4 Questão 4

A tensão de saída mensurada foi de 13,02 V.

#### 7.5 Questão 5

A tensão de saída mensurada foi de 25,6V

#### 7.6 Questão 6

Os conversores que possuem duas chaves.

- *Forward 2T.*
- *Push-Pull.*
- *Half-Bridge.*

#### 7.7 Questão 7

Conversores que possuem somente uma chave e aceitam razão cíclica maior que 50%.

- *Buck.*
- *Boost.*
- *Flyback.*

## 8 Discussão e Conclusão

Neste experimento foi possível observar o funcionamento de um conversor Buck com controlador de malha aberta, utilizando o CI SG3524, bem como o funcionamento da proteção contra aumento de temperatura. Foi observado que é possível ajustar a tensão de saída do conversor através do circuito de controle (com o uso de um potenciômetro), bem como a frequência de chaveamento. Nota-se que, ao alterar o valor de  $K_c$  de 0,5 para 1, a frequência de saída dobra.

Também foi analisado o comportamento do sistema de proteção do CI. Observou-se que, com o auxílio de um AmpOp e um termistor NTC, é possível implementar um circuito de proteção contra o aumento excessivo de temperatura. Porém, tal circuito faz com que haja um pico de corrente no conversor quando a temperatura abaixa, sendo necessário modificações para evitar as altas correntes produzidas.

O método de controle utilizado (malha aberta) é bastante deficiente no controle efetivo da tensão, sendo necessário o ajuste manual da razão cíclica para compensar as variações no sistema. Um método mais robusto é utilizar o controle por malha fechada, onde a tensão utilizada na comparação com a tensão de erro é provinda da saída do conversor, e o ajuste é feito de forma automática.