



QUALIENERGI

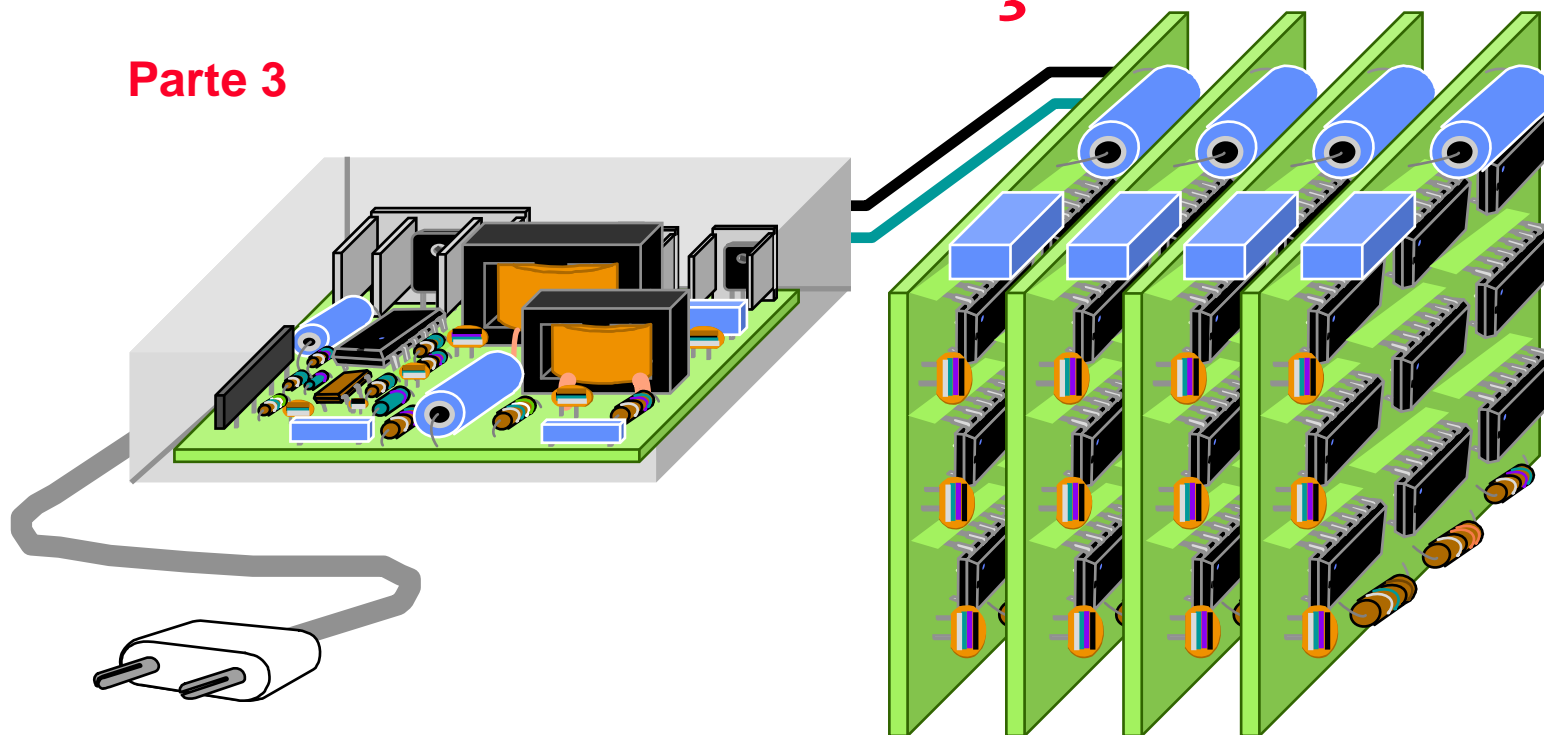
**Centro Virtual de Pesquisas em
Qualidade da Energia Elétrica**



**LEP – Laboratório de
Eletrônica de Potência**

Fontes de Alimentação Chaveadas

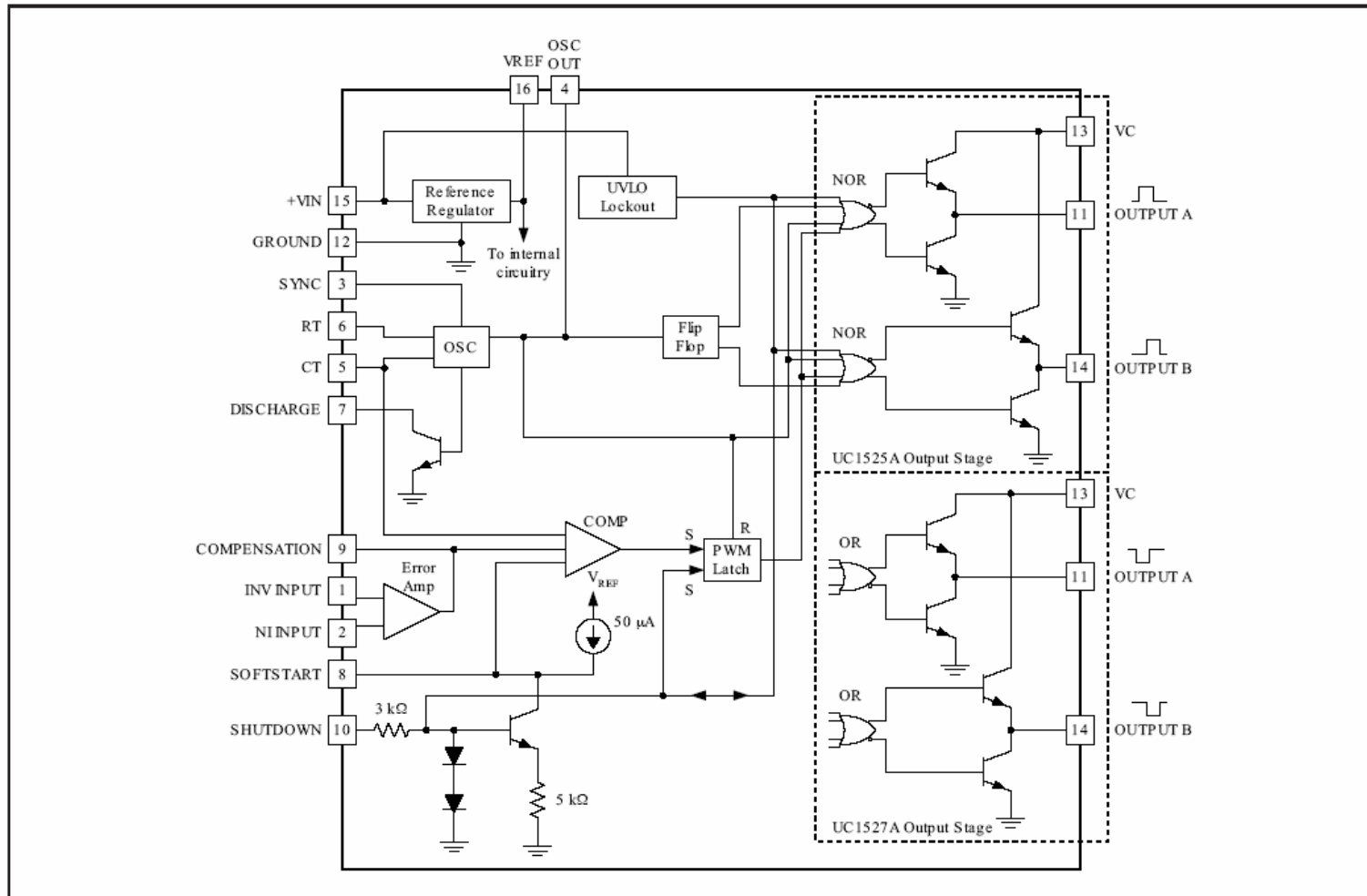
Parte 3



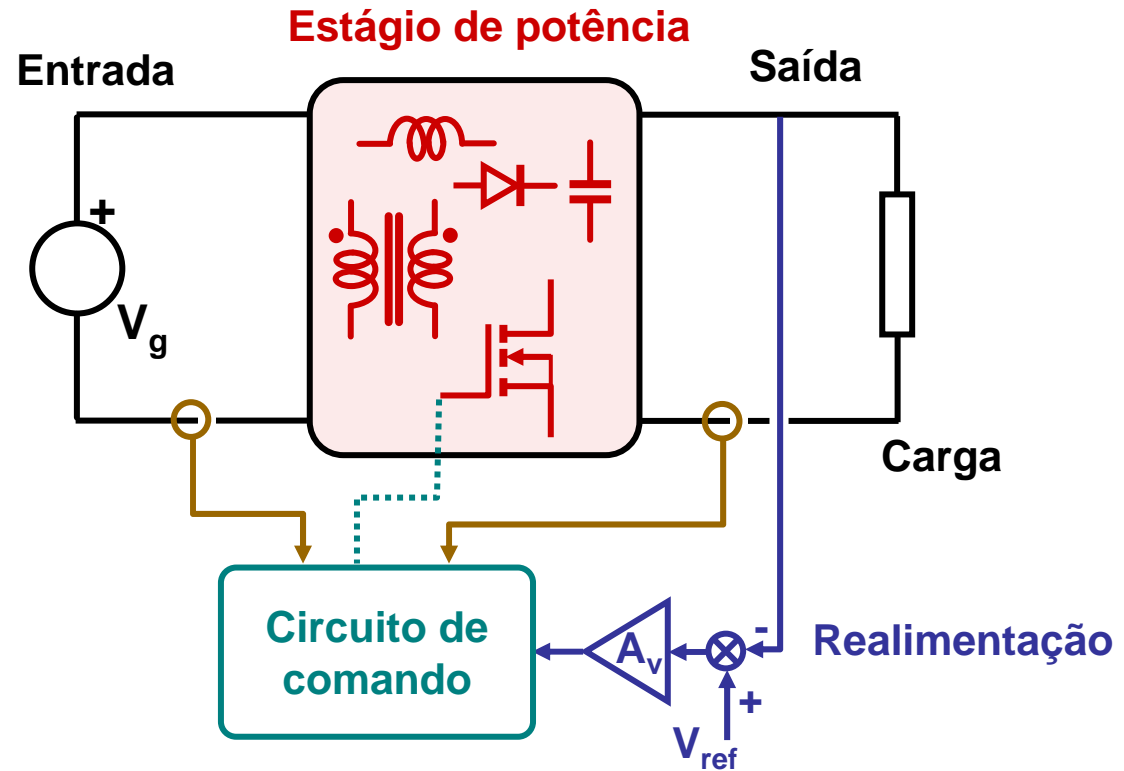
Prof. Dr. Carlos Alberto Canesin

Circuitos de comando para conversores chaveados

BLOCK DIAGRAM

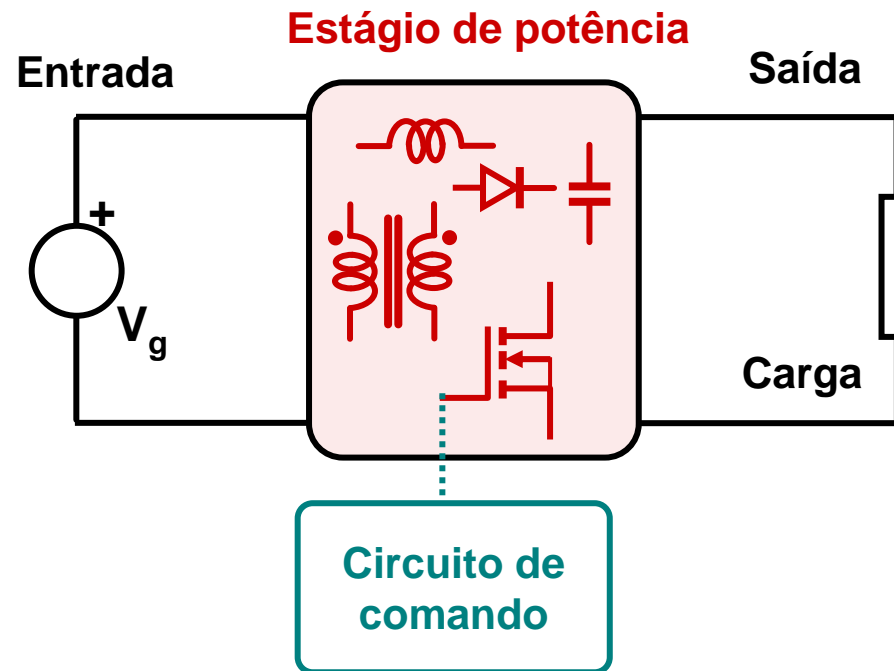


Visão Geral

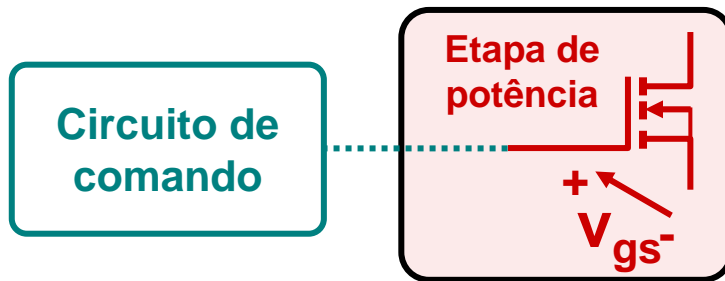


- Em geral, os conversores são compostos dos seguintes estágios:
 - Estágio de potência
 - Circuito de comando
 - Rede de realimentação de variáveis de entrada e/ou saída
 - Proteções

Visão Geral

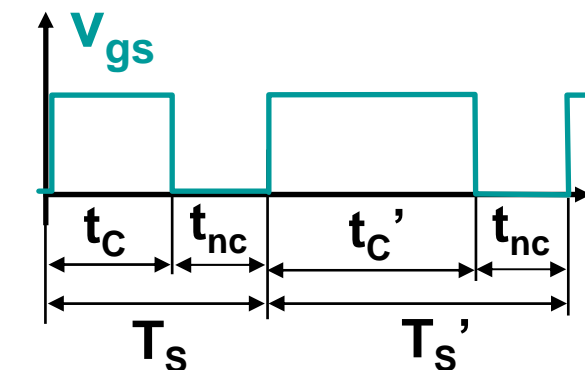
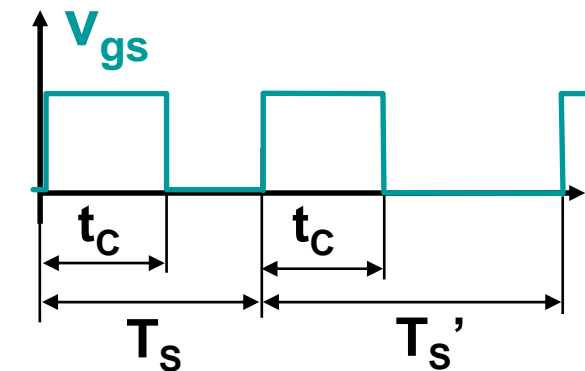
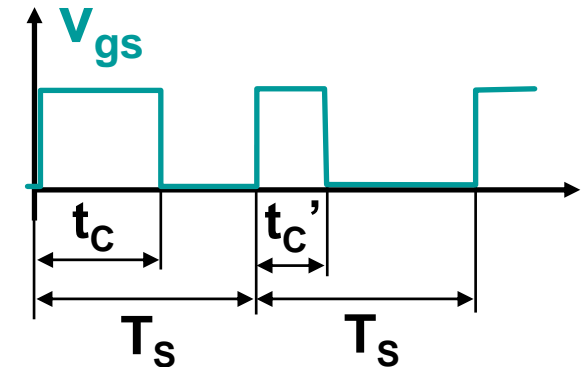


- Em todos os casos, a transferência de energia entre a entrada e a saída é controlada com a comutação cíclica do interruptor controlado (transistor, normalmente, ou tiristor).
- Em geral, quanto maior for o tempo de condução (interruptor fechado) em relação ao período de comutação, maior será a transferência de energia.
- Pode-se operar com frequência fixa; ou com tempo de condução fixo; ou com tempo de bloqueio (não condução) fixo.

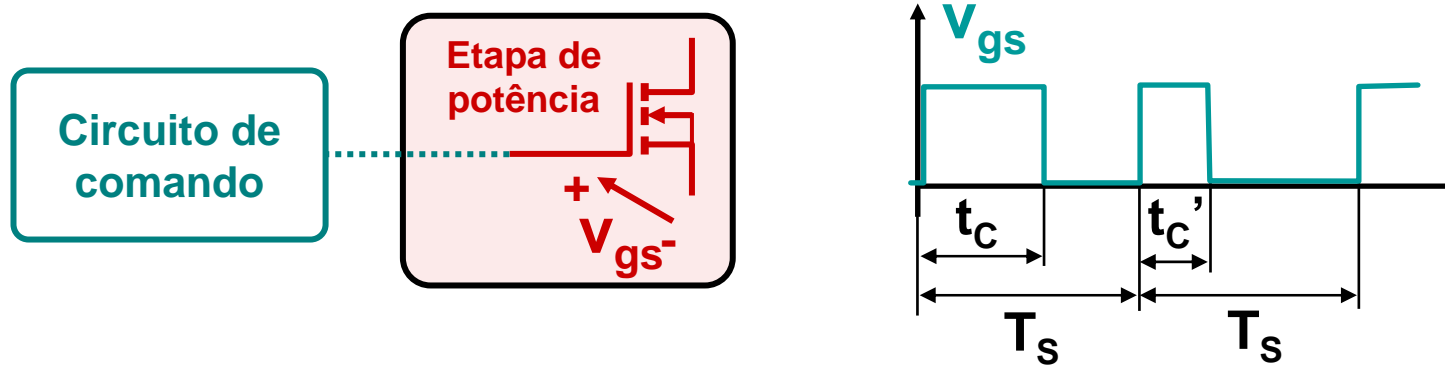


- Operação com frequência fixa (e tempo de condução variável). T_s não varia e t_c é variável.
- Operação com tempo de condução fixo (e frequência variável). T_s varia e t_c é constante.
- Operação com tempo de bloqueio fixo (e frequência variável). T_s varia e $t_{nc} = T_s - t_c$ não varia (constante).

Tipos de operação



Circuitos de comando com operação com frequência fixa

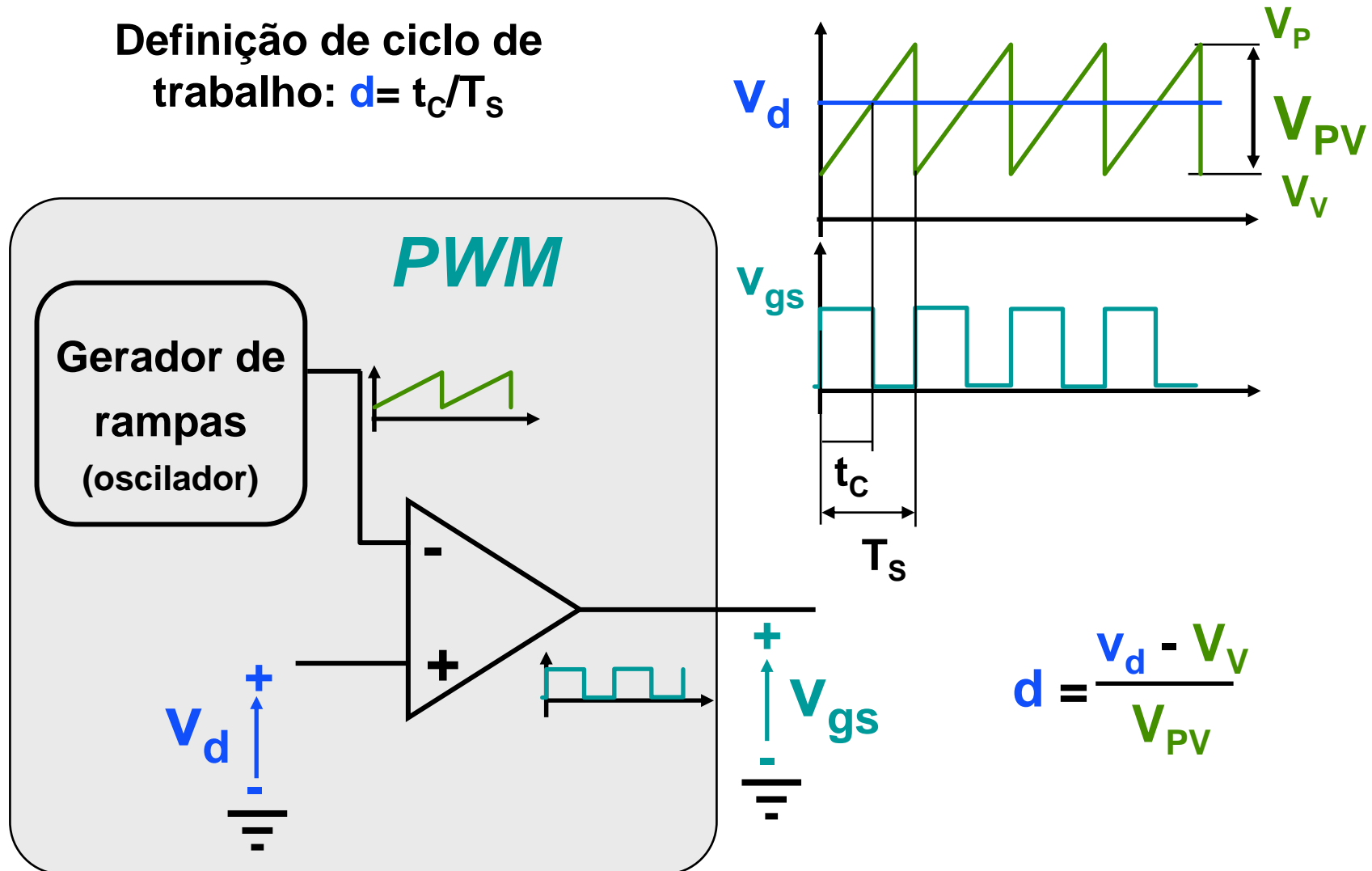


- É a mais utilizada em conversores. As razões são as seguintes:
 - Otimiza-se o projeto dos componentes reativos.
 - As perdas em comutação são constantes.
 - Estreitamento do espectro das interferências eletromagnéticas geradas.
- Facilmente obtida com um modulador de largura de pulso (Pulse Width Modulator, PWM)

Modulador por Largura de Pulso (MLP)

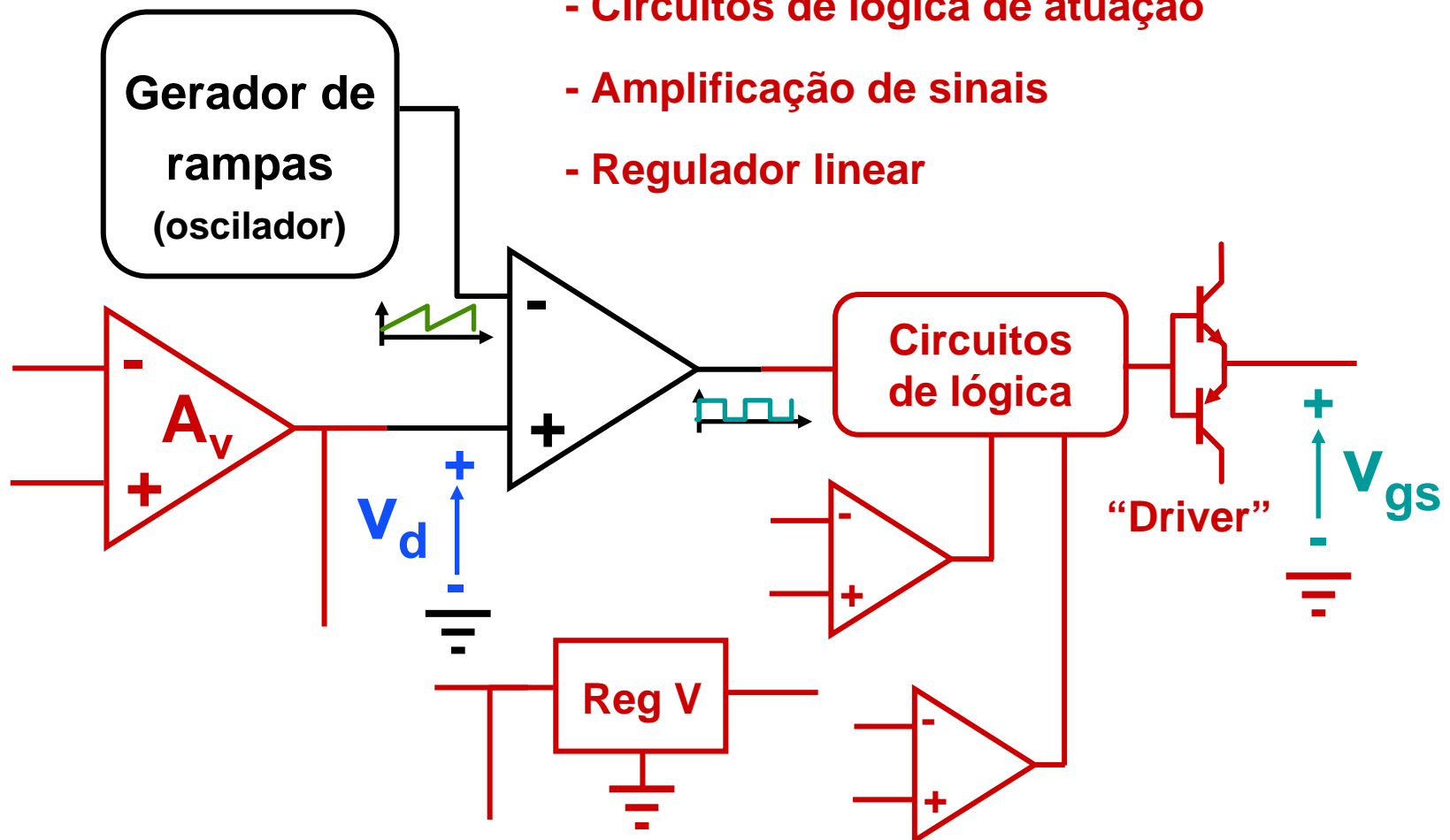
O “coração” do circuito de comando dos conversores comutados é o modulador de largura de pulso, PWM (ou, em português: MLP)

Definição de ciclo de trabalho: $d = t_c / T_s$



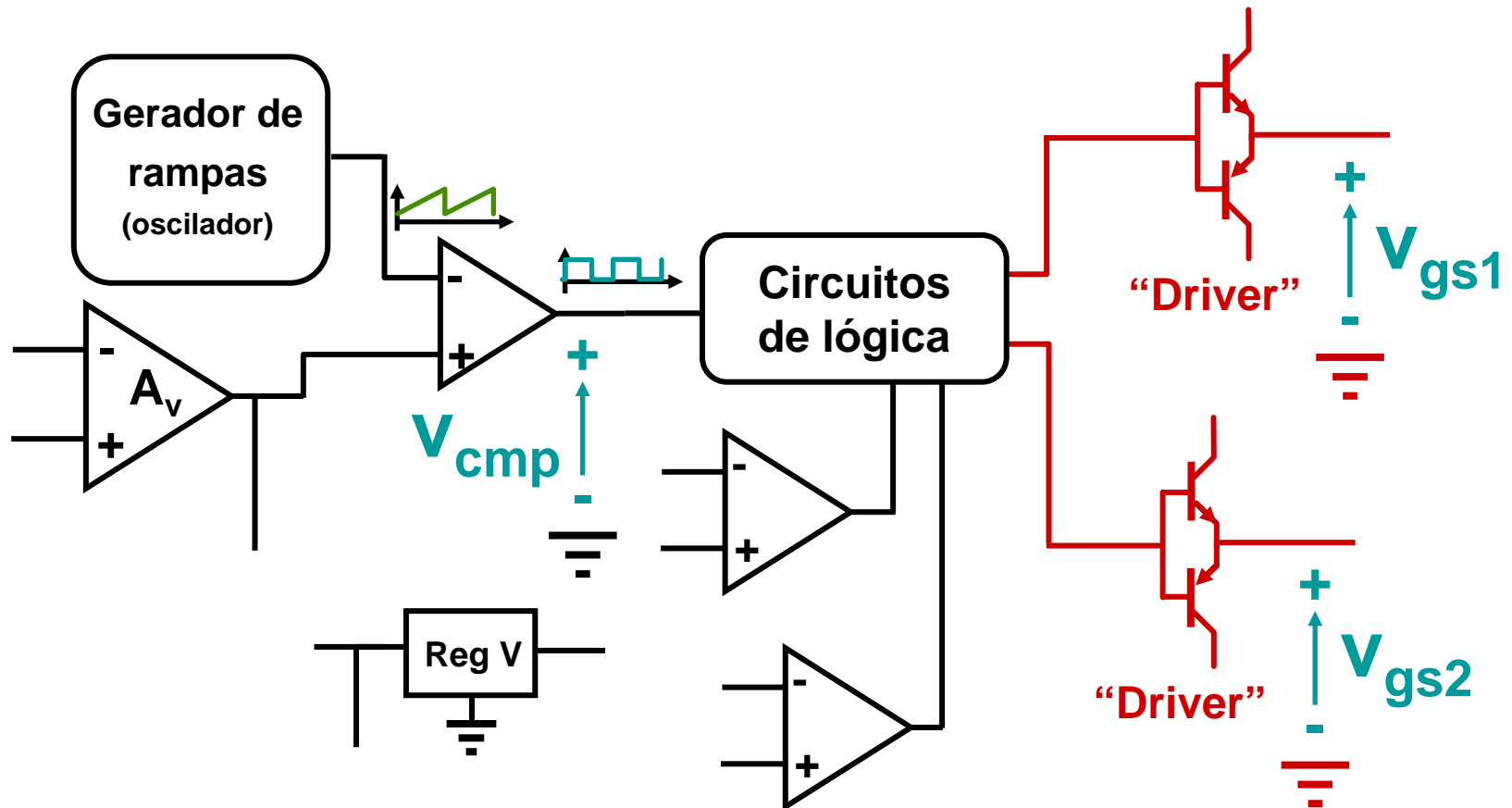
Circuitos de comando integrados baseados no MLP

- Normalmente incluem-se mais funções:
 - Amplificador de erro do laço de tensão
 - Comparadores para sinais
 - Circuitos de lógica de atuação
 - Amplificação de sinais
 - Regulador linear

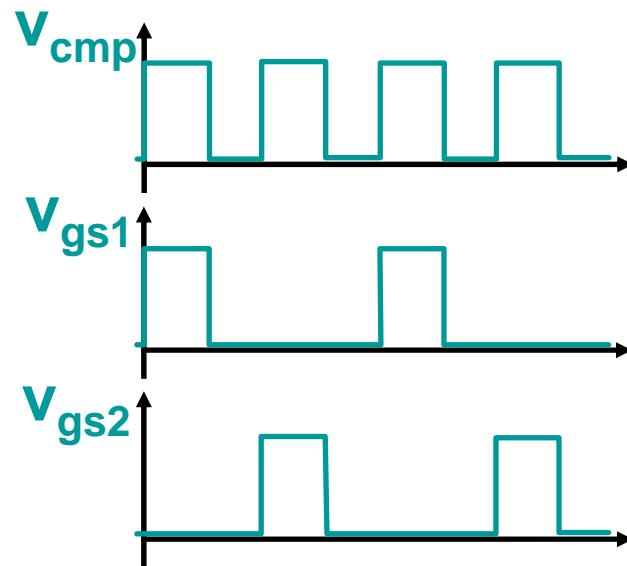
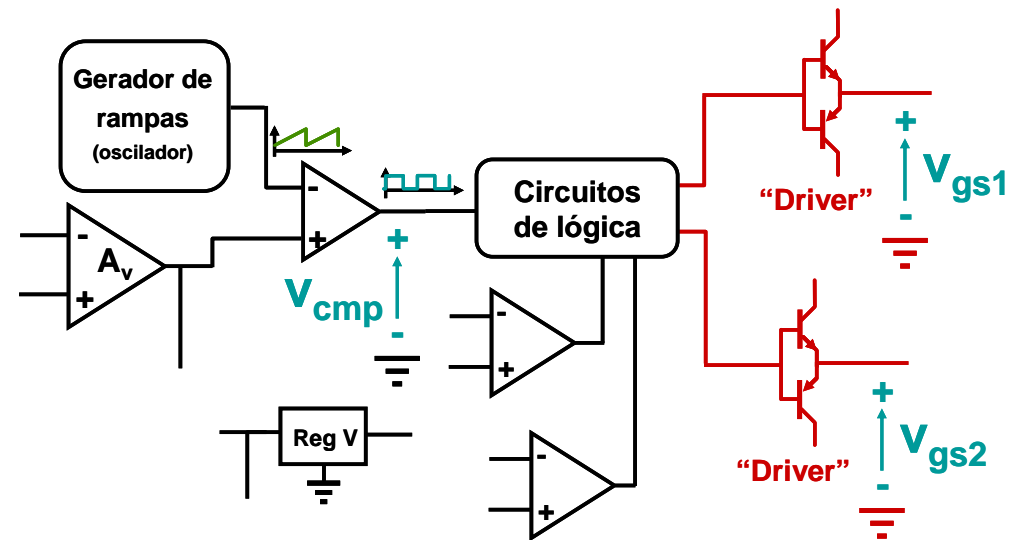


Circuitos de comando integrados baseados no MLP

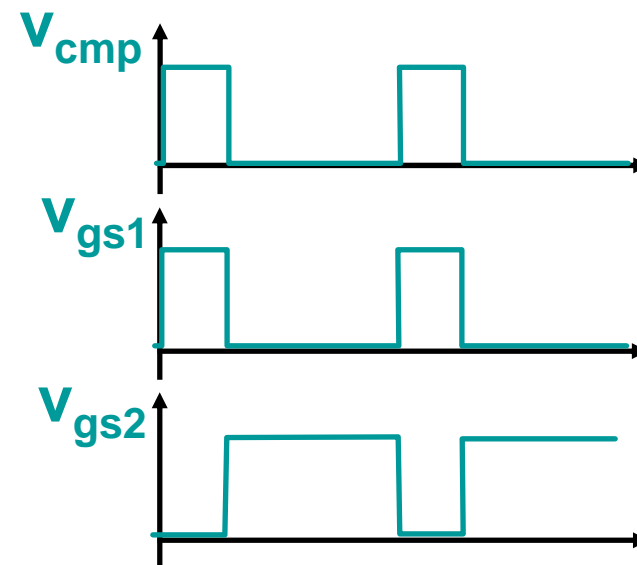
- Alguns circuitos de comando geram duas saídas
 - Defasadas de 180°
 - Complementares



Circuitos de comando integrados baseados no MLP



Defasadas de 180°

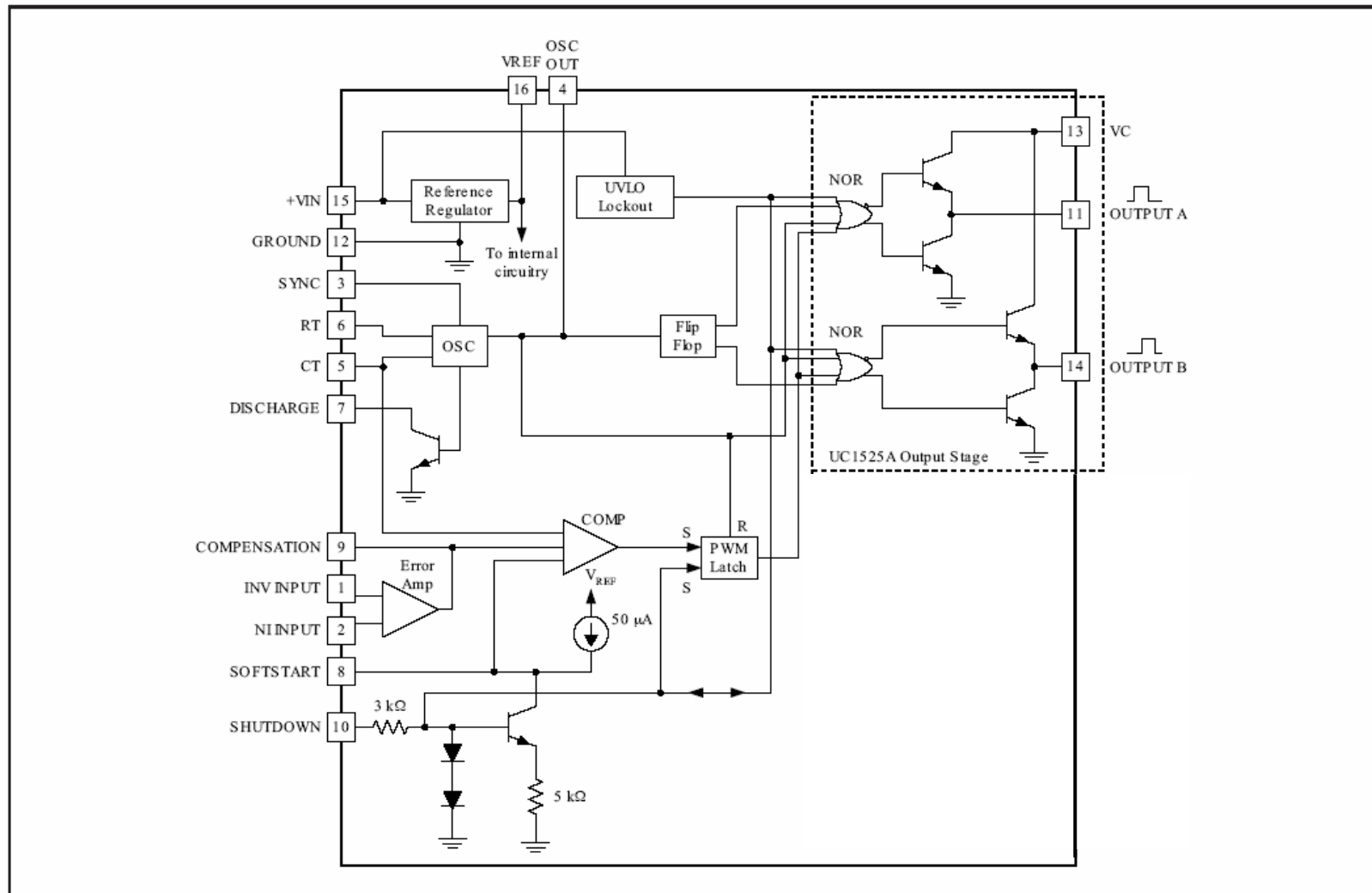


Complementares

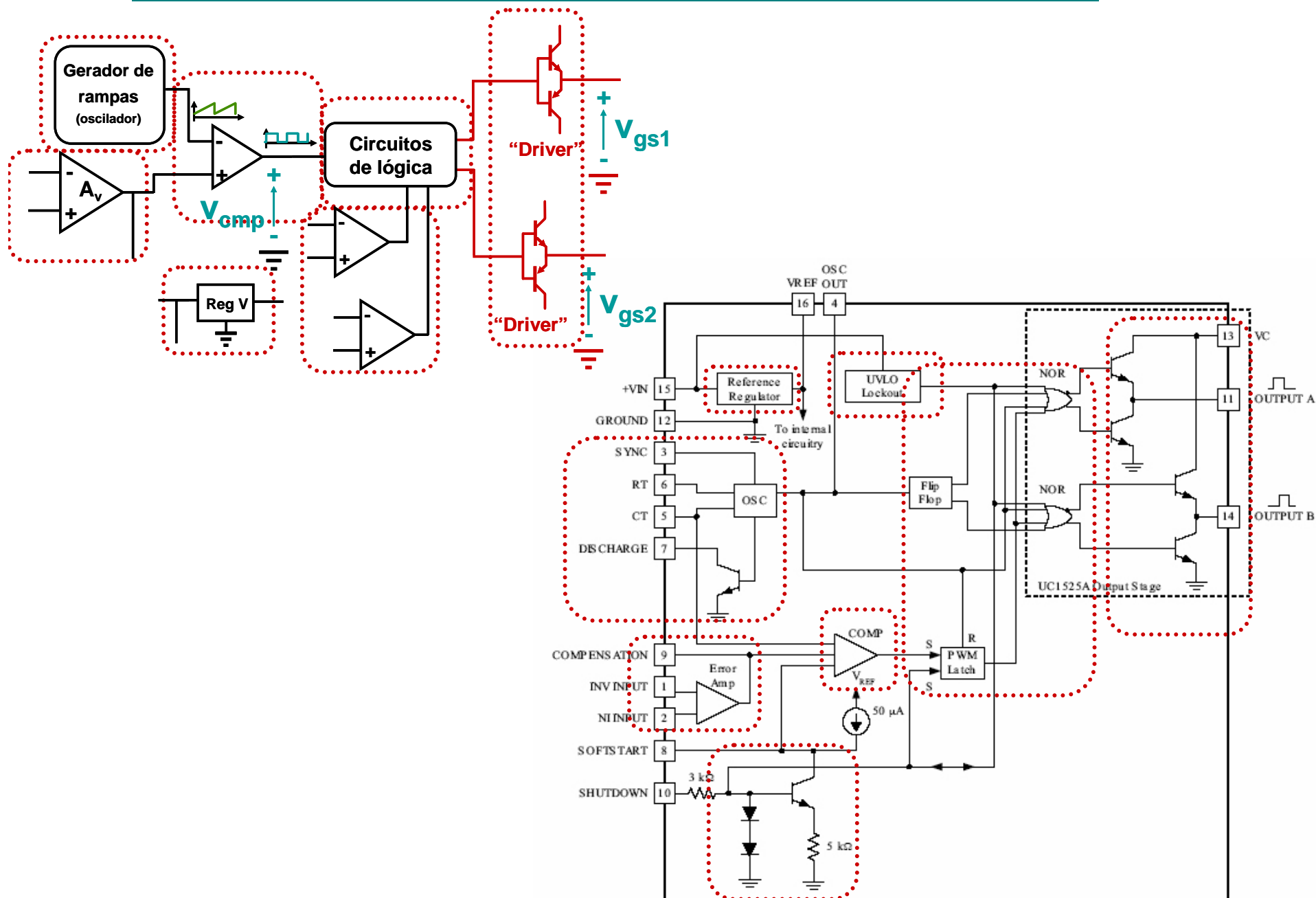
Exemplo de circuito de comando integrado PWM: UC 3525

Diagrama de blocos do UC 3525

BLOCK DIAGRAM

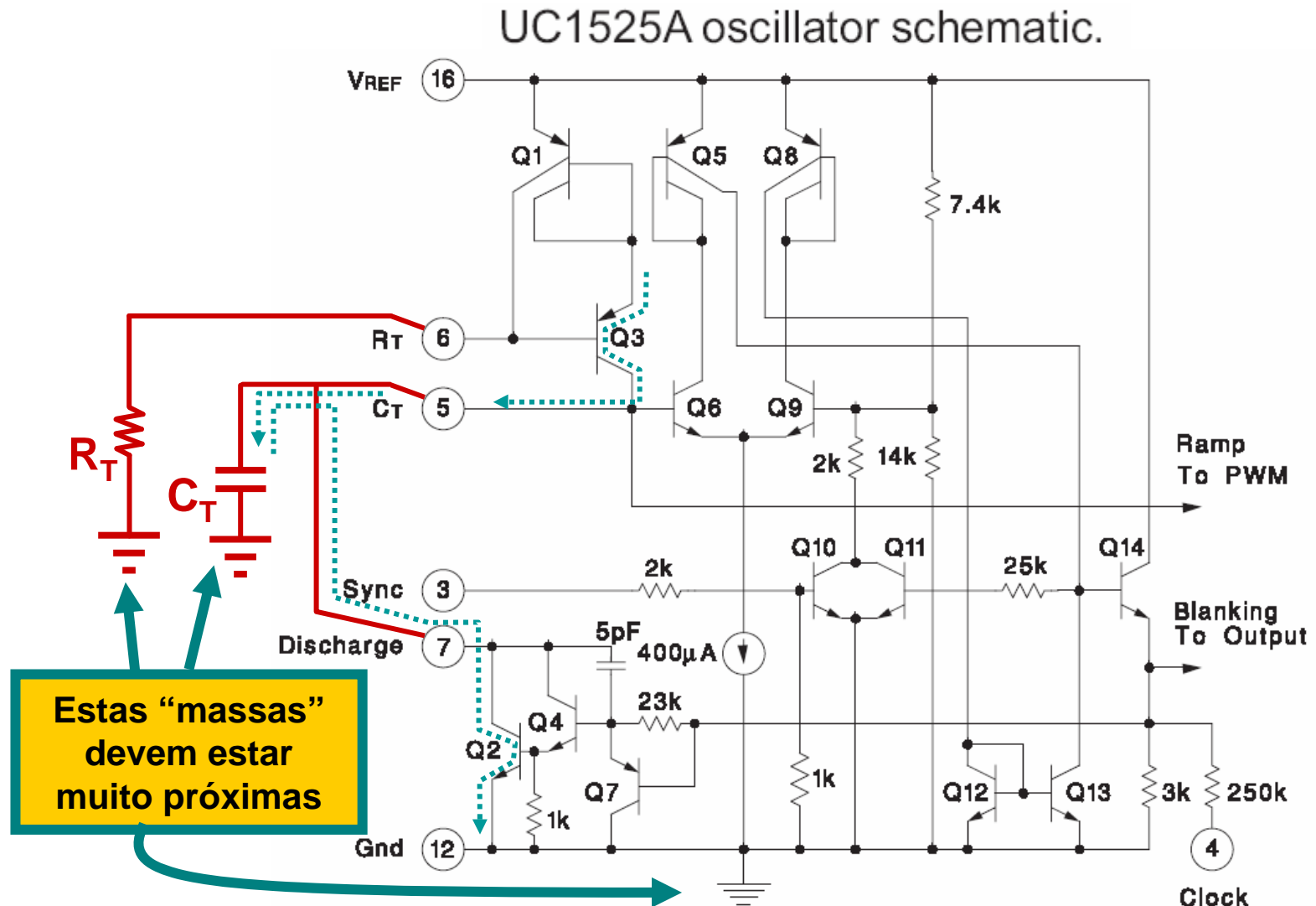


Exemplo de circuito de comando integrado PWM: UC 3525



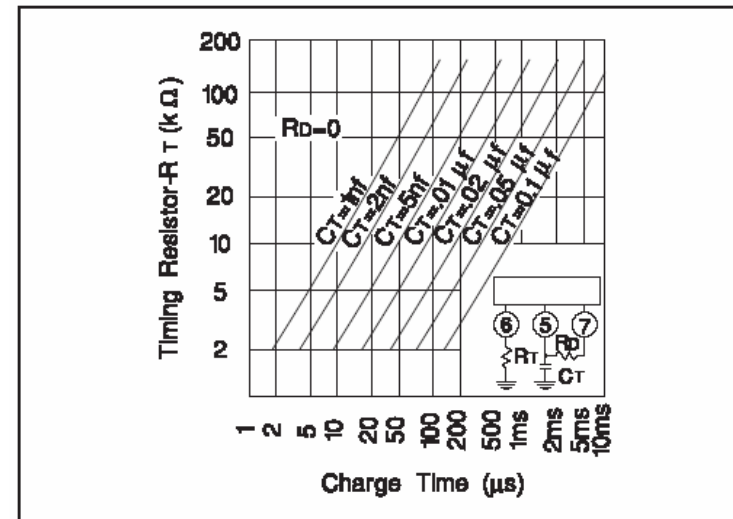
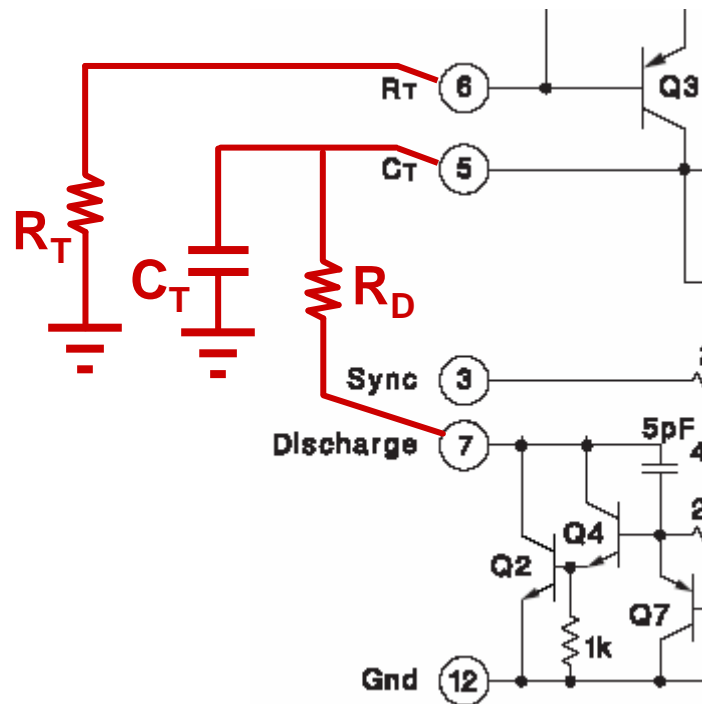
Exemplo de circuito de comando integrado PWM: UC 3525

- Montagem do gerador de rampas (oscilador)

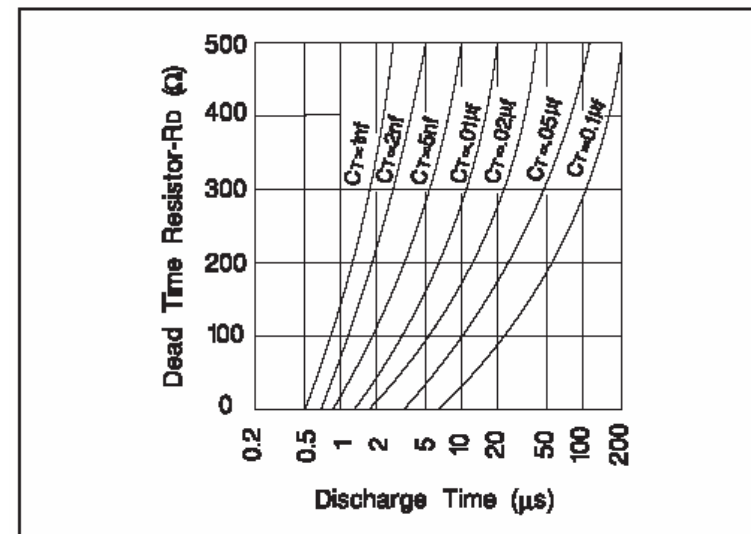


Exemplo de circuito de comando integrado PWM: UC 3525

- Montagem com “tempo morto regulável”



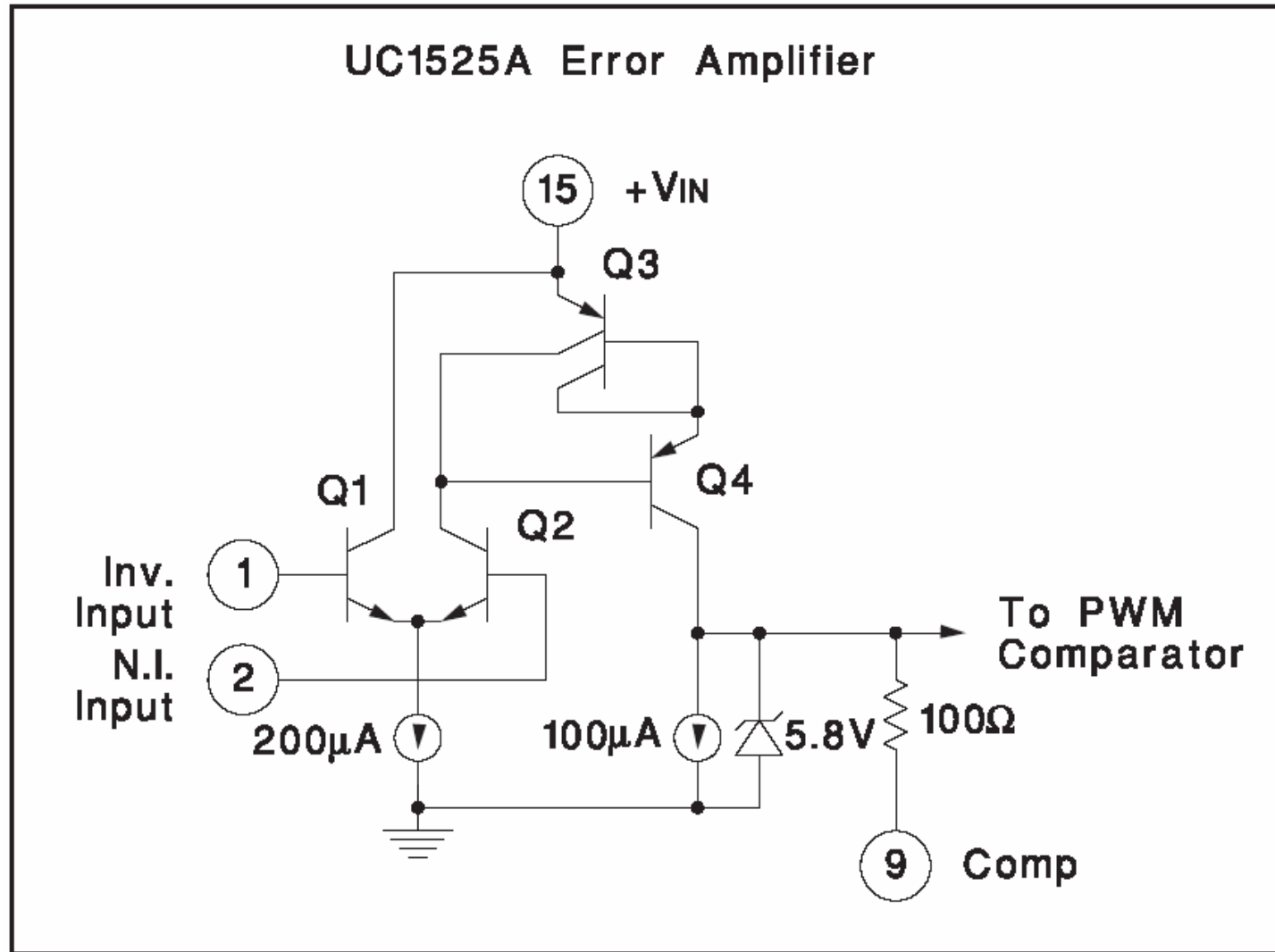
Oscillator Charge Time vs R_T and C_T .



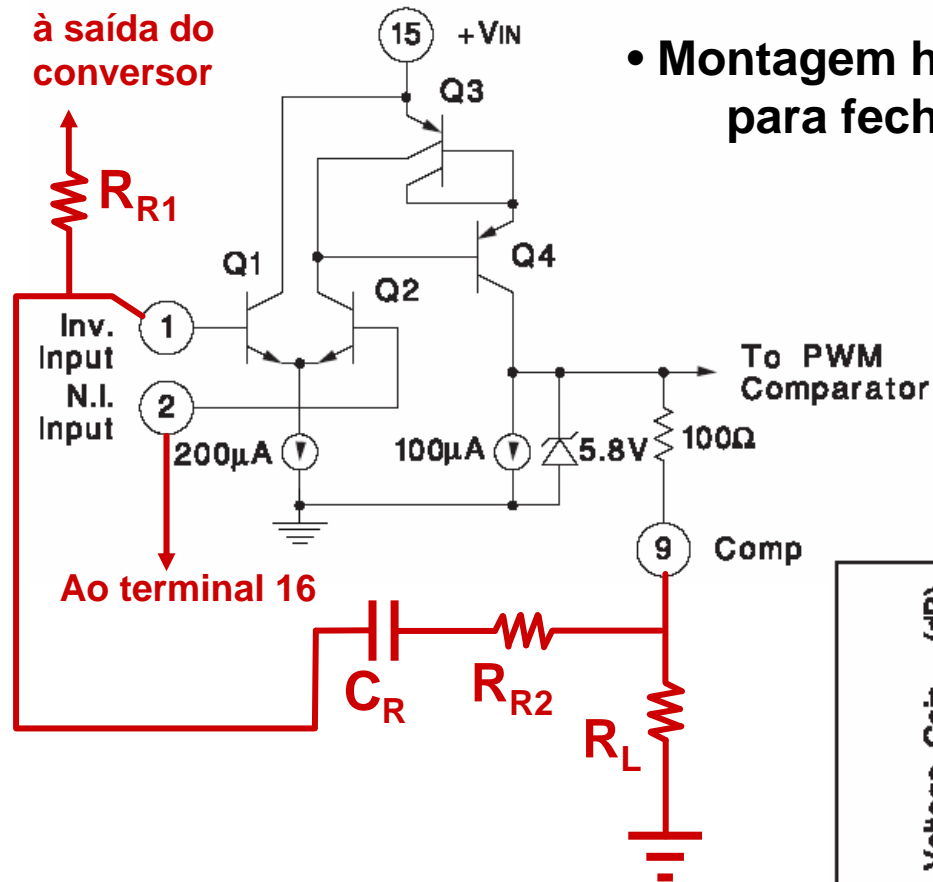
Oscillator Discharge Time vs R_D and C_T .

Exemplo de circuito de comando integrado PWM: UC 3525

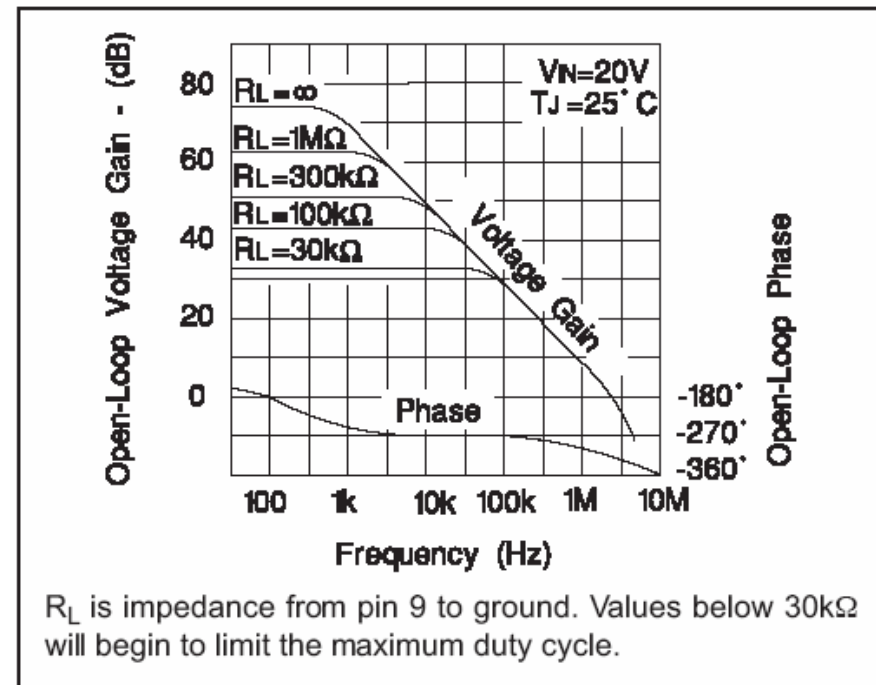
- O amplificador de erro é de transcondutância (comportamento como fonte de corrente na saída)



Exemplo de circuito de comando integrado PWM: UC 3525



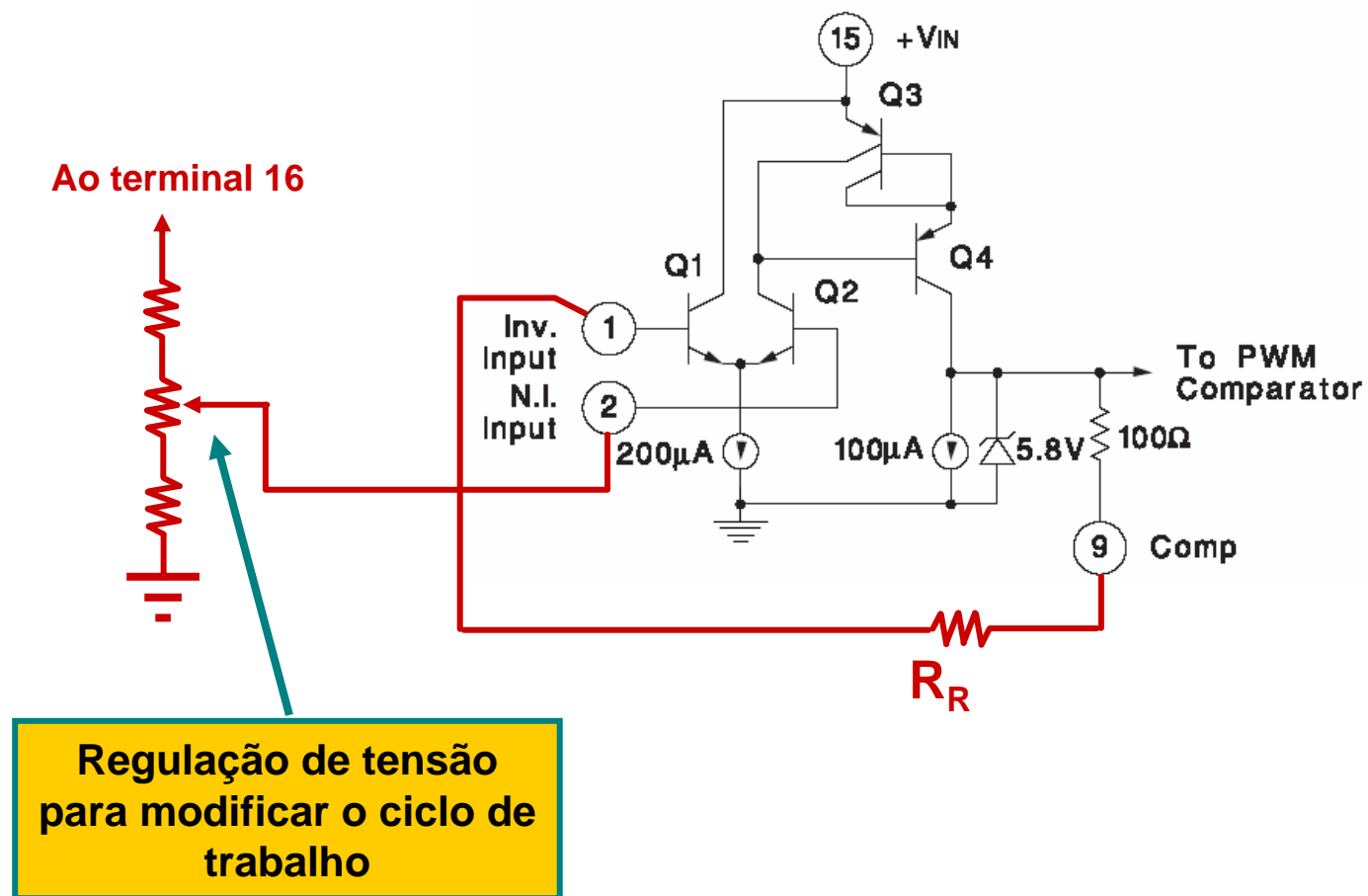
- Montagem habitual do amplificador de erro para fechar o laço de realimentação



Error amplifier voltage gain and phase vs frequency.

Exemplo de circuito de comando integrado PWM: UC 3525

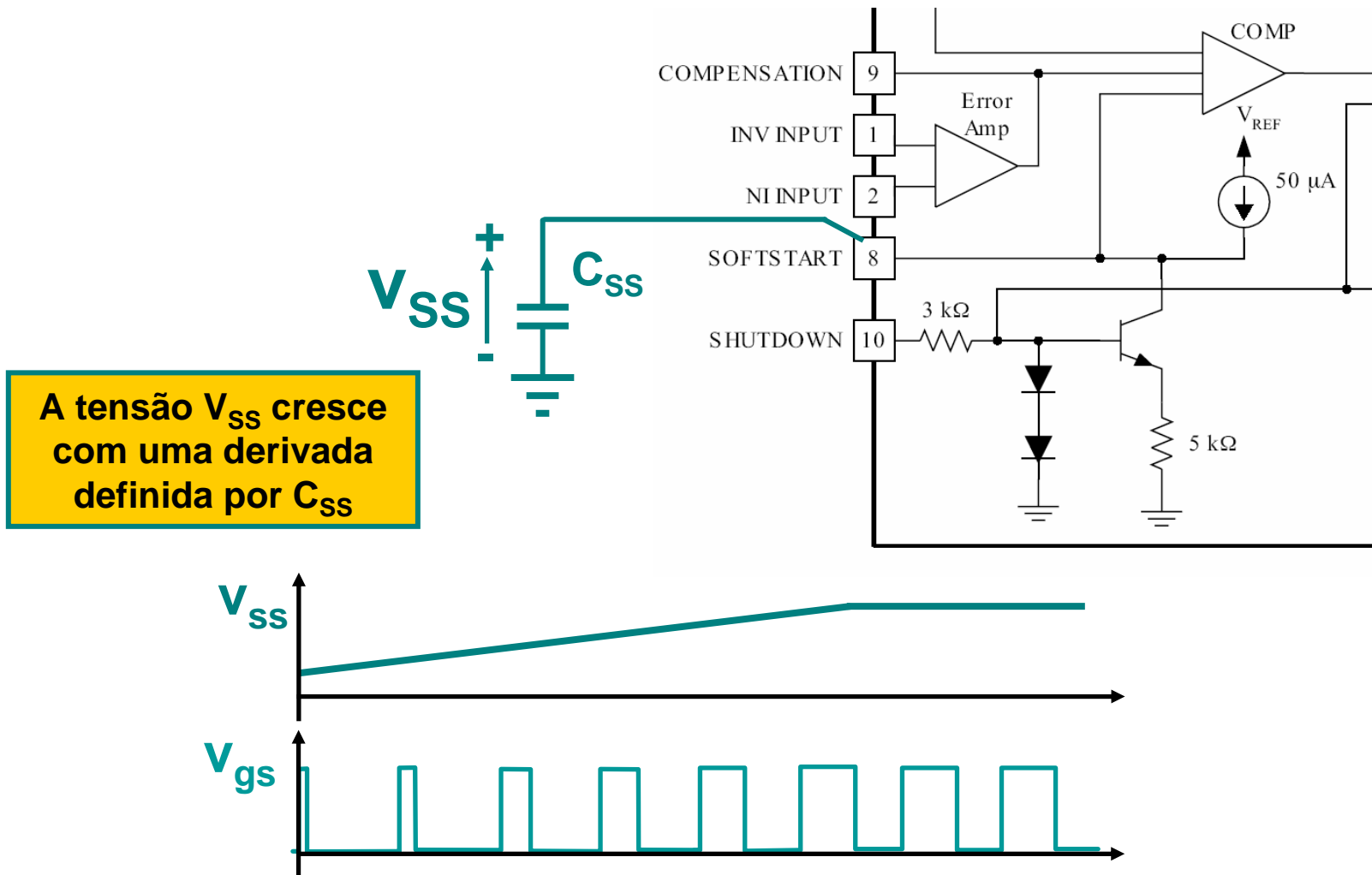
- Montagem do amplificador de erro para verificação do funcionamento em laço aberto



Exemplo de circuito de comando integrado PWM: UC 3525

- Partida suave (controle de “inrush”)

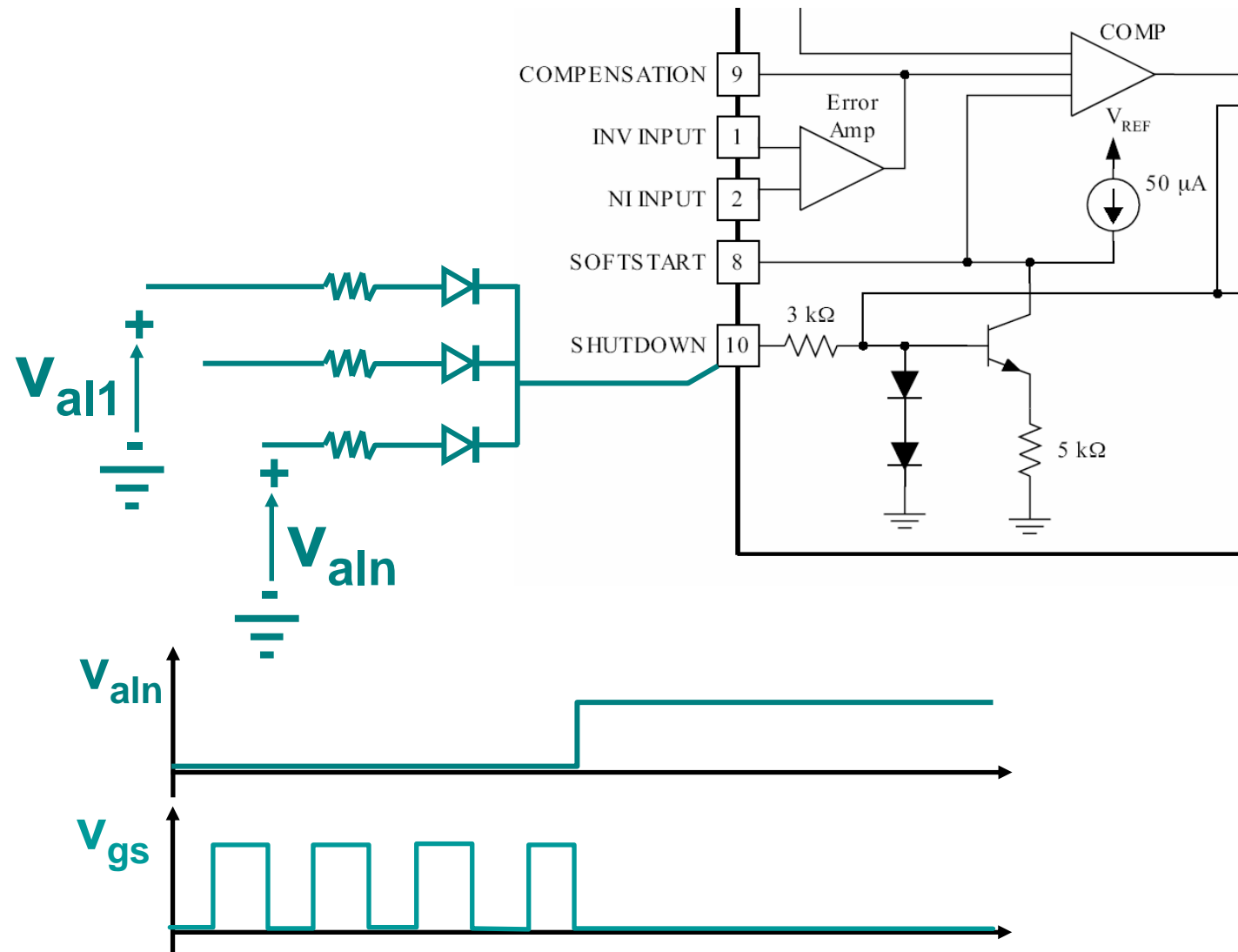
O ciclo de trabalho aumenta lentamente no processo de partida do conversor



Exemplo de circuito de comando integrado PWM: UC 3525

- Tratamento das proteções e sinais de alarmes

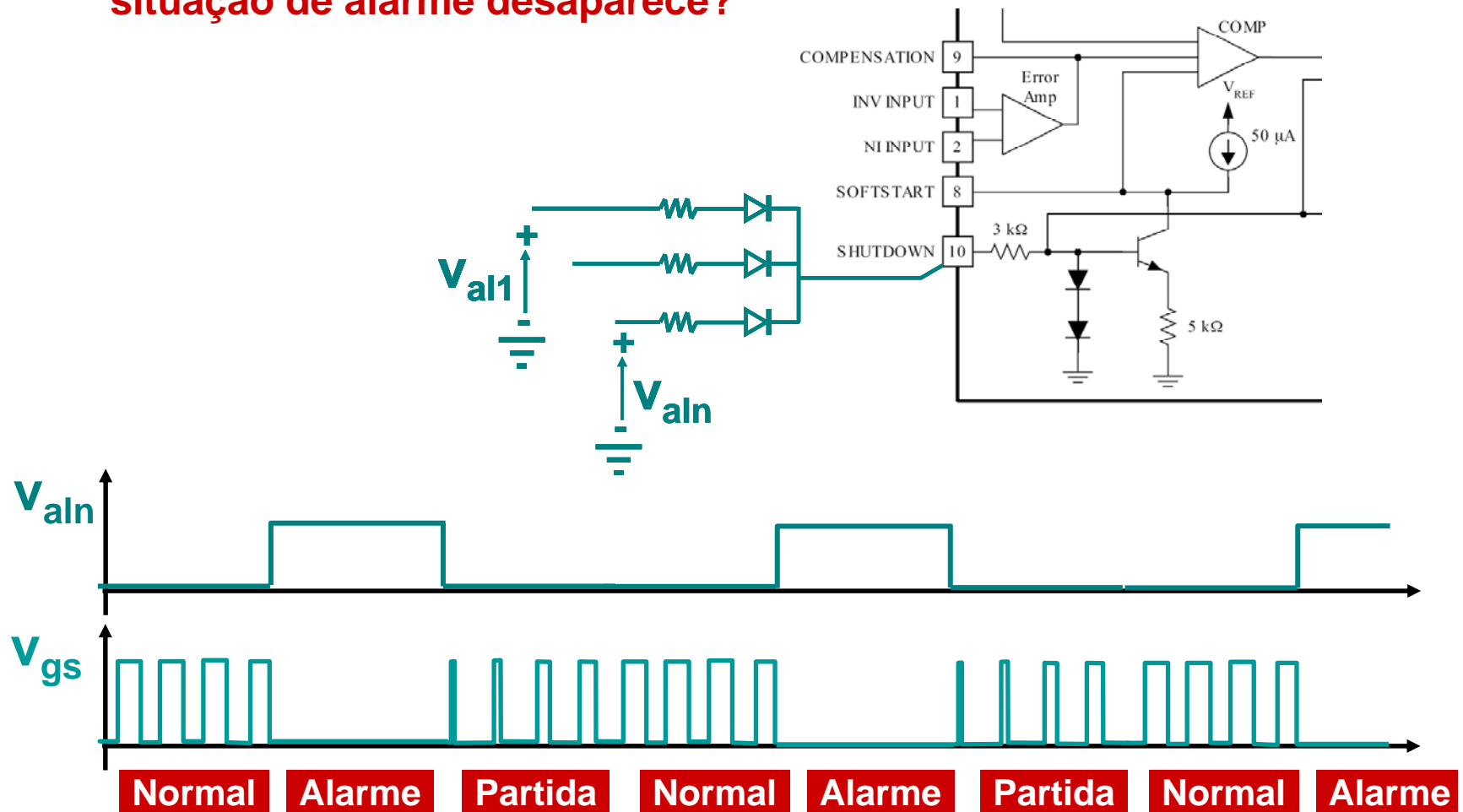
No UC 3525 utiliza-se o terminal 10 (“Shutdown”) para tal propósito



Exemplo de circuito de comando integrado PWM: UC 3525

- **Tratamento das proteções e sinais de alarmes**

O que ocorre após interrupção dos pulsos de controle se a situação de alarme desaparece?

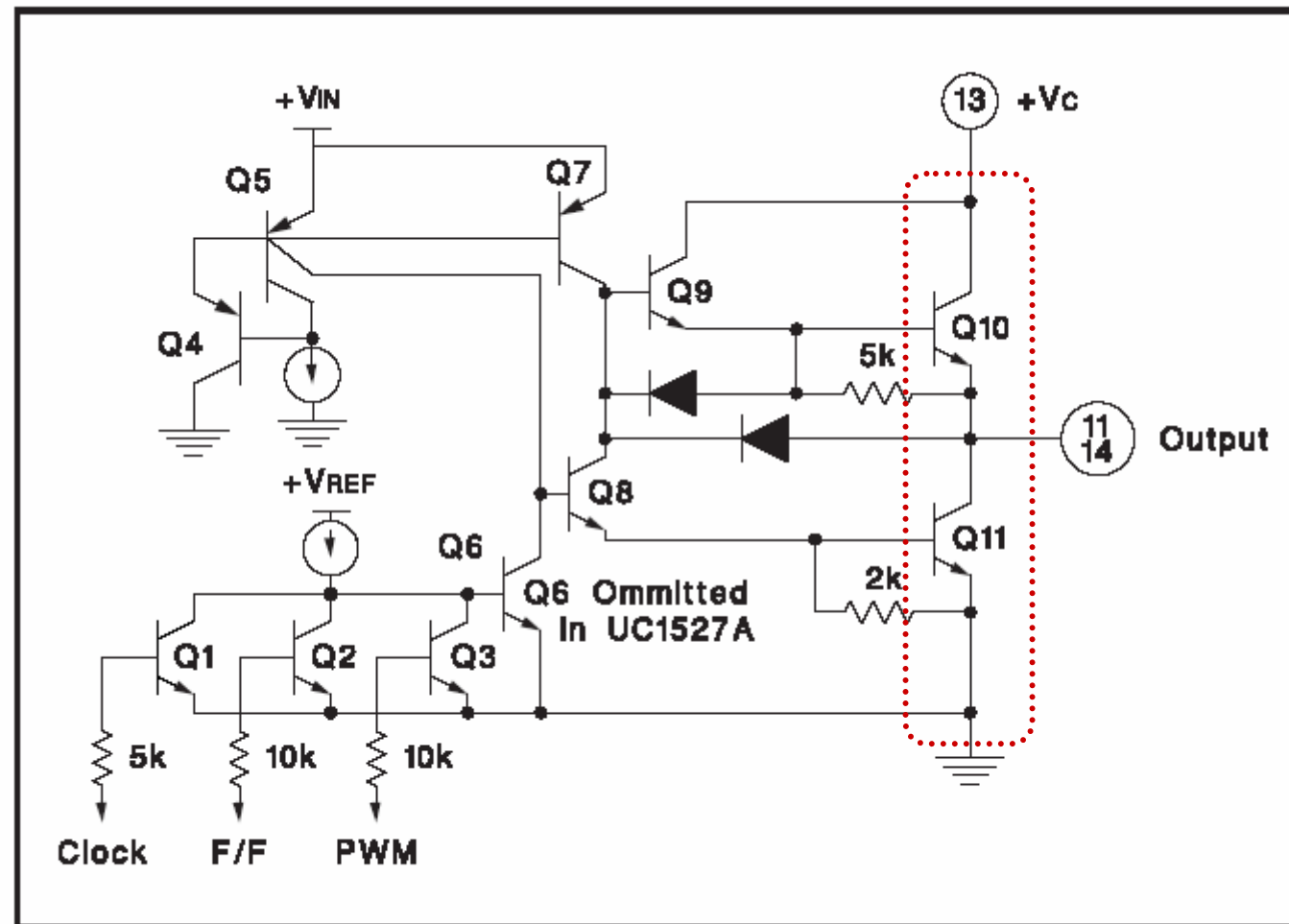


Este tipo de operação recebe o nome popular de “modo solução”

Exemplo de circuito de comando integrado PWM: UC 3525

- Amplificadores de corrente de saída

Não são complementares, mas sim montagem em “totem pole”

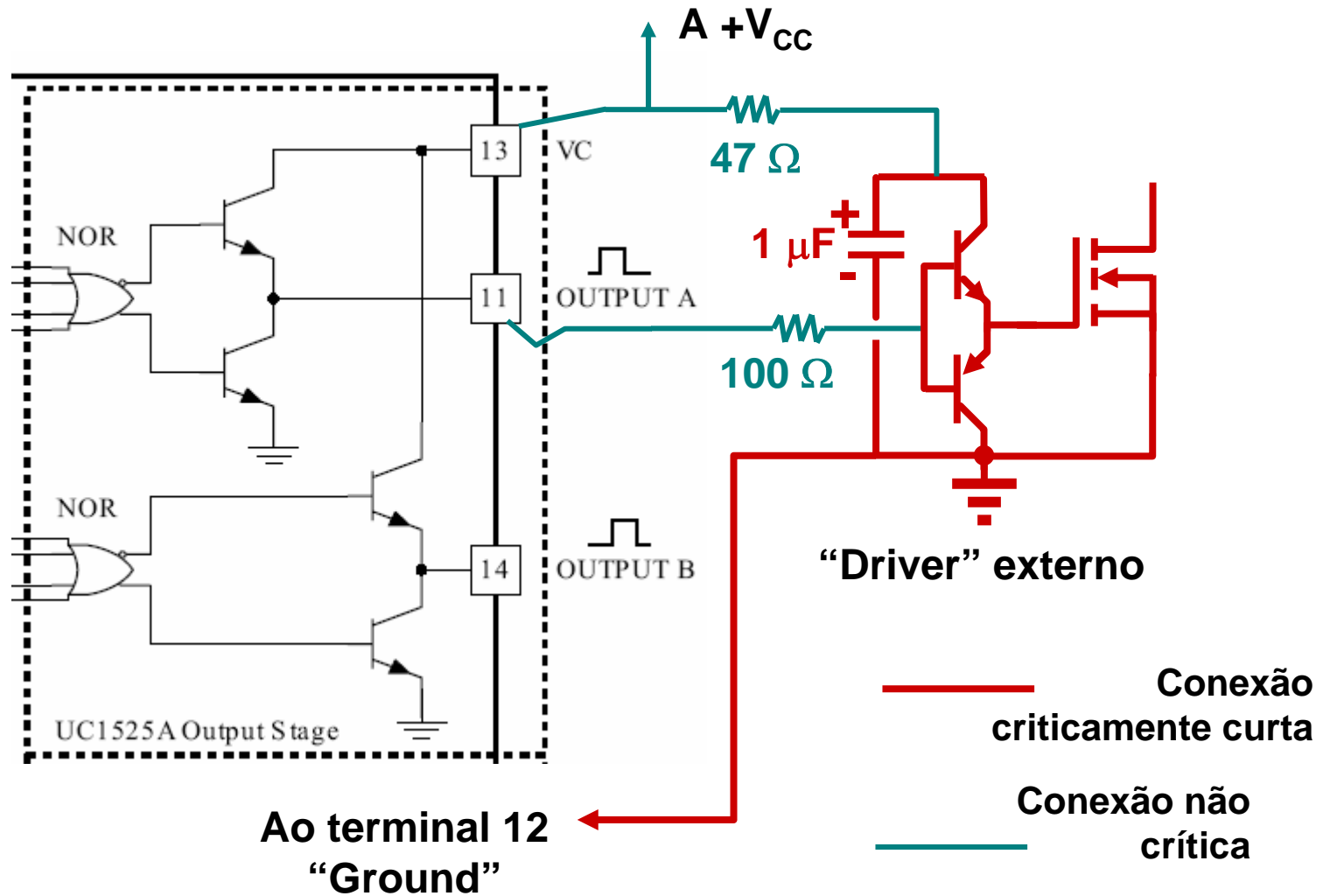


UC1525A output circuit (1/2 circuit shown).

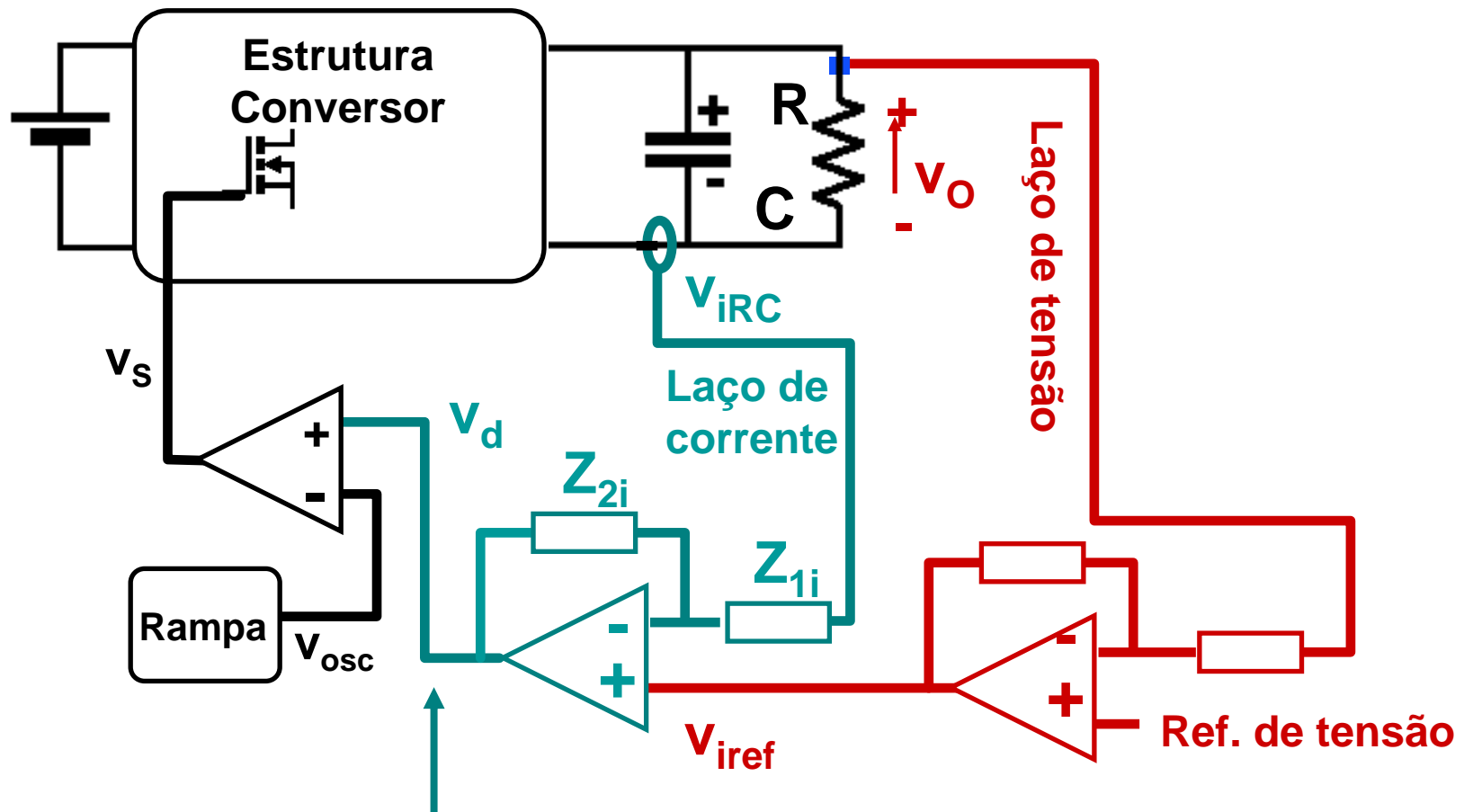
Exemplo de circuito de comando integrado PWM: UC 3525

- **Amplificadores de corrente de saída**

Recomenda-se realizar uma amplificação posterior externa ao “chip” e tão perto do transistor quanto possível



Controle para Fontes Chaveadas



Introdução

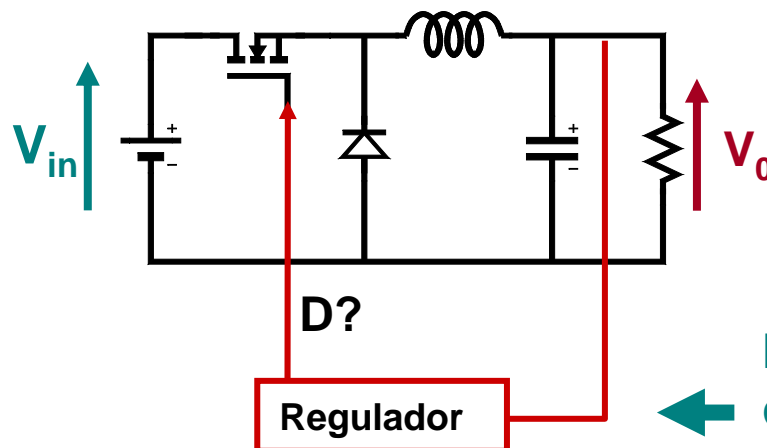
As fontes de alimentação se caracterizam por ter a tensão de saída constante.

V_0 deve ser constante ainda que se altere o ponto de funcionamento:

- Tensão de entrada, e/ou
- Carga



É necessário adaptar o ciclo de trabalho de forma automática



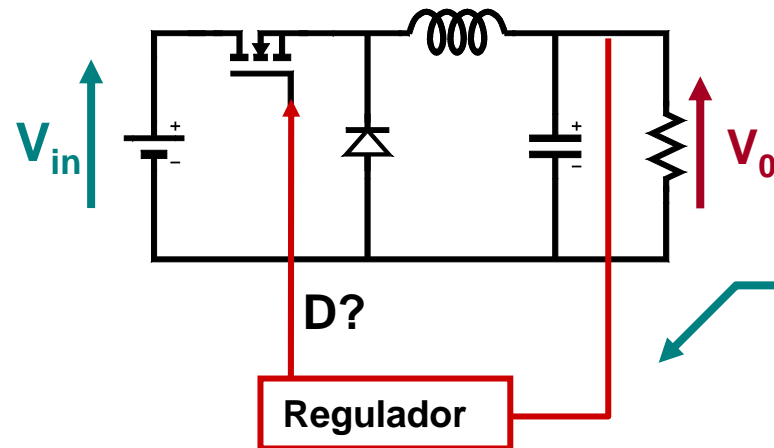
Implementa-se um circuito de controle que deve variar o ciclo de trabalho o necessário para manter V_0 constante

Introdução

Como trata-se de um sistema realimentado, pode se tornar instável

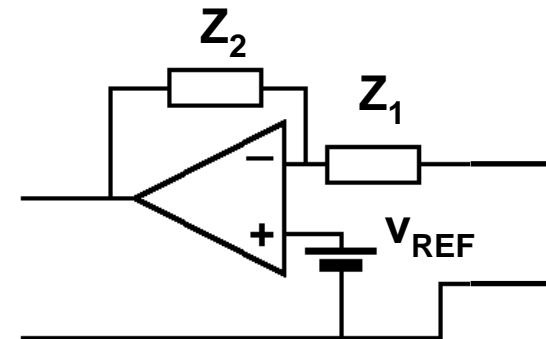
É necessário fazer um estudo detalhado do sistema para assegurar sua estabilidade em qualquer condição de funcionamento

Descrição do sistema completo

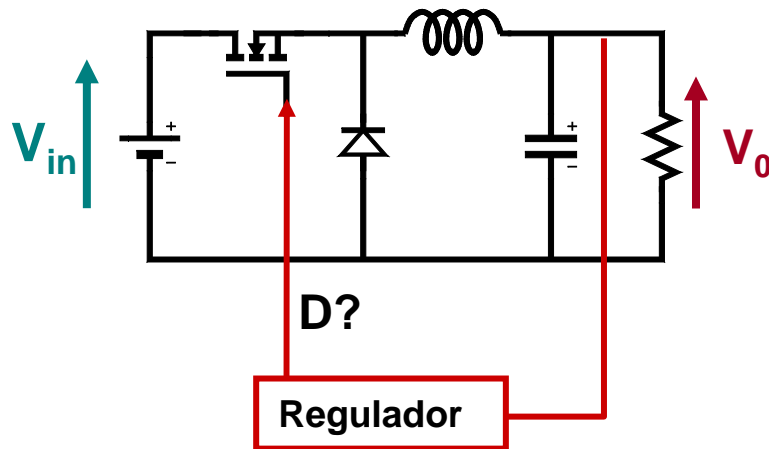


A etapa de potência terá seu modelo linearizado: $G(s)$

O regulador é implementado com um amplificador operacional e uma rede de compensação (O modelo linear $G_R(s)$ é imediato)



Introdução

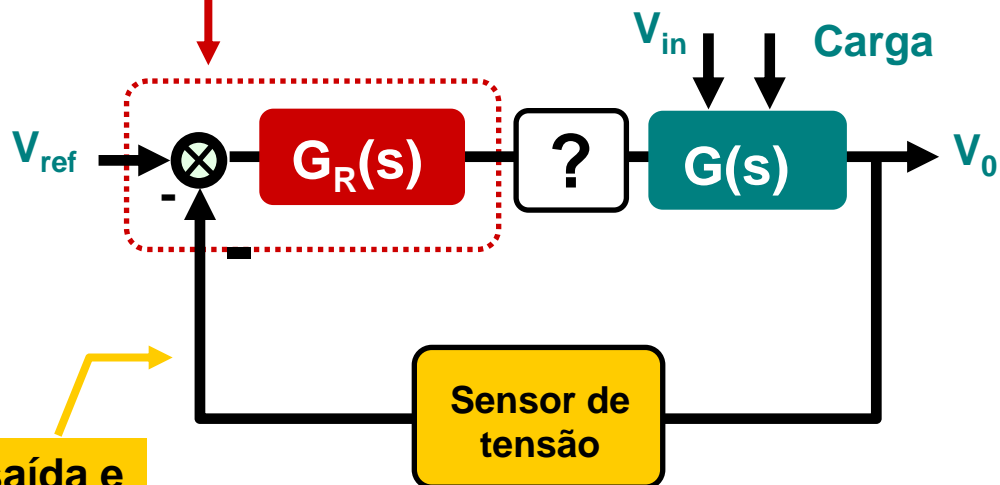


2

A informação do erro que teremos em cada instante é introduzido no regulador para que este faça a correção necessária

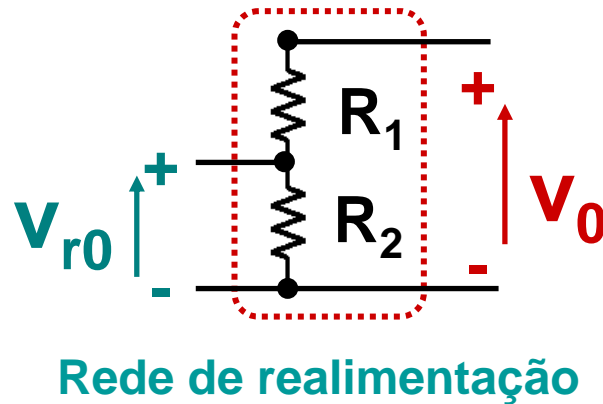
1

Medimos a tensão de saída e a comparamos com a tensão de referência (a que desejamos ter na saída)



Introdução

Para sensorar a tensão de saída, utiliza-se um divisor resistivo



- O circuito de controle trabalha com tensões baixas (5 - 12 V)
- A tensão de saída pode ter valores elevados
- A tensão de referência não pode ter qualquer valor

Utiliza-se a rede de realimentação para adaptar a tensão de saída à de referência

Exemplo:

Obtemos a V_{ref} com um diodo zener de 5,1 V

A tensão de saída desejada é de 48 V

Fixamos $R_2 = 10\text{ k}$

$$V_{r0} = 5,1 = 48 \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

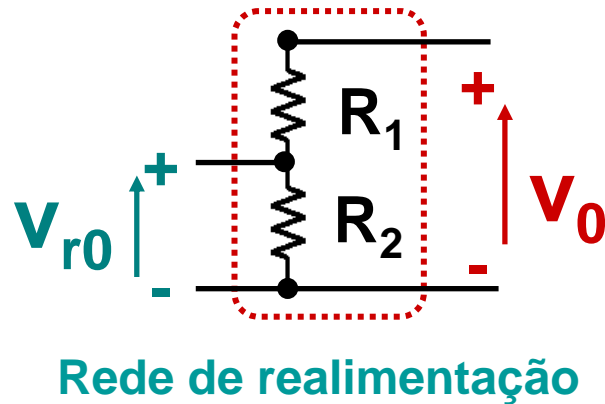


$$R_1 = \frac{48 \cdot 10\text{k}}{5,1} - 10\text{k} = 84\text{k}$$

Introdução

- Não existem elementos reativos
- O circuito é linear

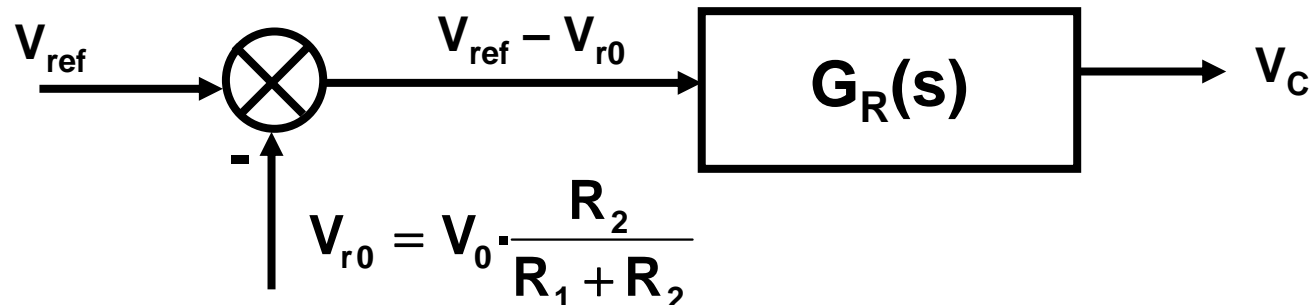
O modelo é muito sensível



Equação (em vazio): $V_{r0} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_0$

Linearização: $\hat{V}_{r0} = \hat{V}_0 \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$

A tensão V_{r0} é comparada com a tensão de referência e o erro é introduzido no regulador

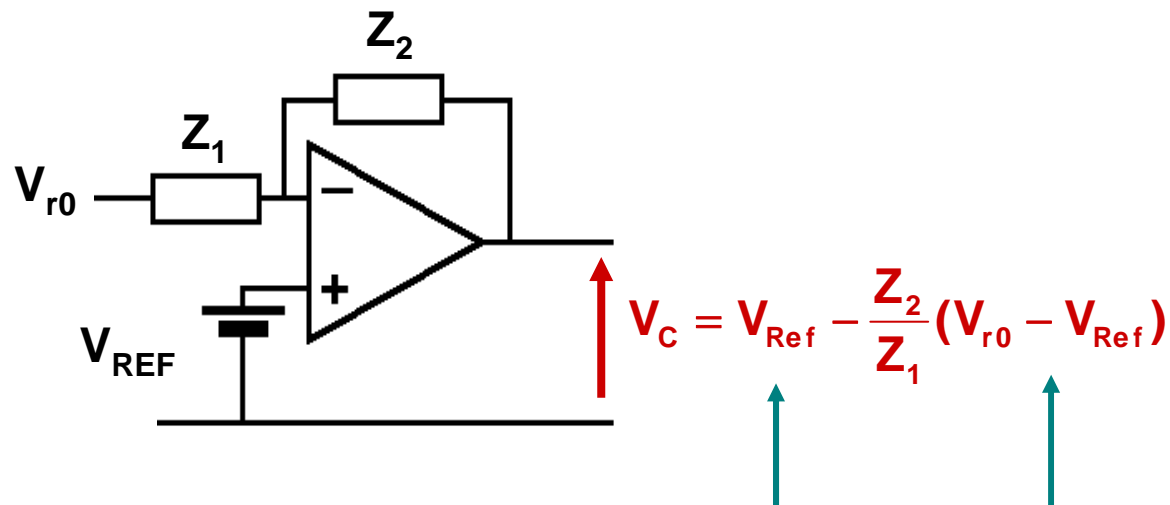


Introdução

O regulador é implementado com um amplificador operacional

O subtrator do diagrama de blocos é implementado com o próprio operacional

Neste momento não entraremos em detalhes a respeito da rede de compensação (modelação e técnicas de compensação e controle)



A ação do regulador é observada na saída sobre o valor constante da tensão de referência

O regulador atua sobre o sinal de erro ($V_{r0} - V_{ref}$).

A subtração das duas tensões é feita pelo operacional

A saída do regulador (V_C) é uma tensão

Introdução

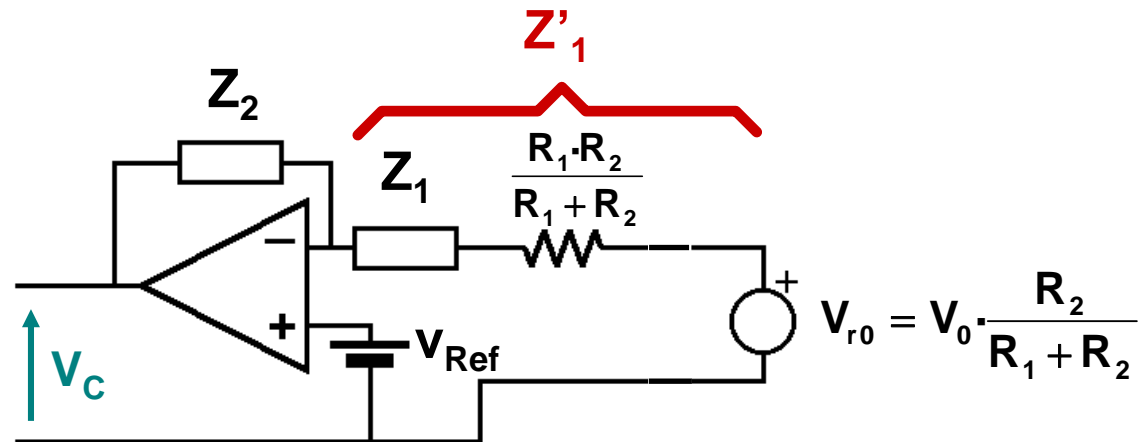
Linearização do regulador

Z_1 e Z_2 são redes passivas (resistências e capacitâncias)

$$V_C = V_{Ref} - \frac{Z_2}{Z_1} (V_{r0} - V_{Ref}) \longrightarrow \hat{V}_C = -\frac{Z_2}{Z_1} \hat{V}_{r0}$$

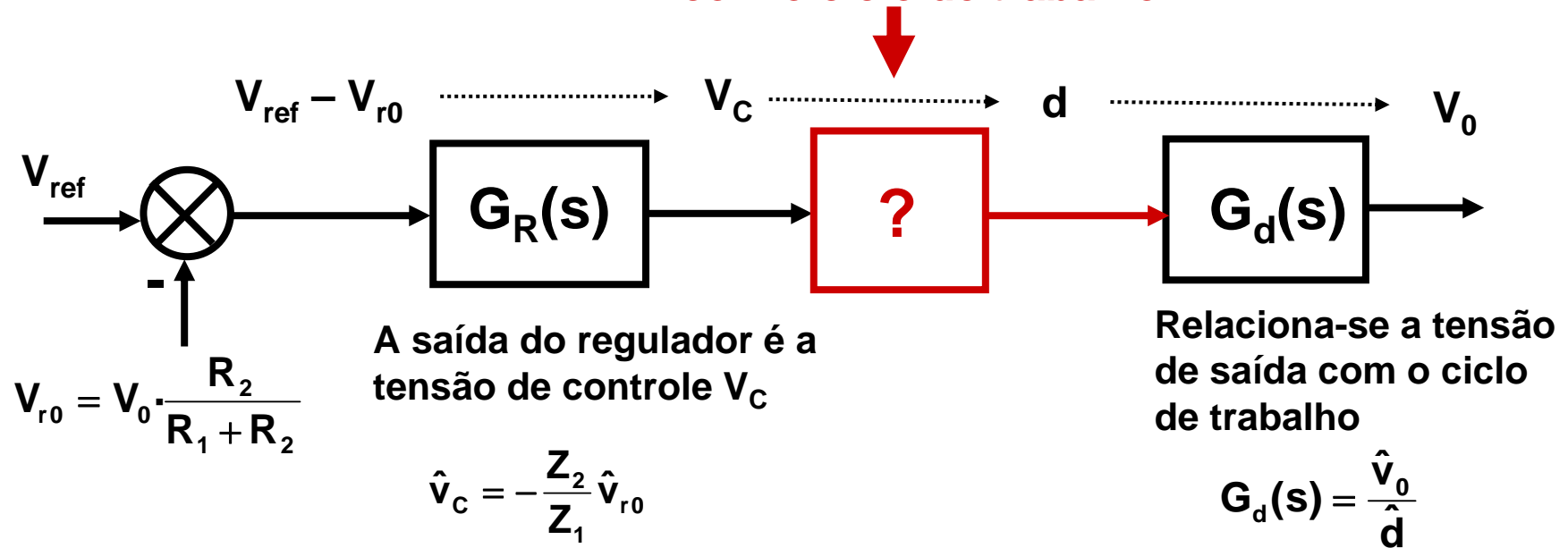
Devido a disposição do sistema, se produz uma interação entre a rede de realimentação e o regulador

$$\hat{V}_C = -\frac{Z_2}{Z_1} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \hat{V}_{r0}$$

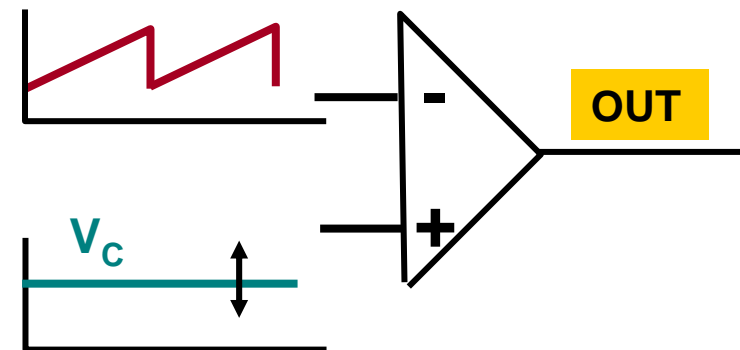
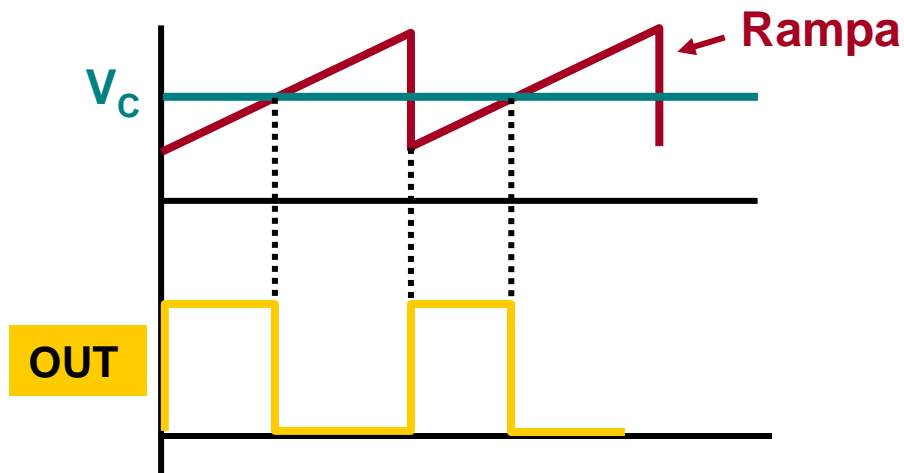


Circuito PWM

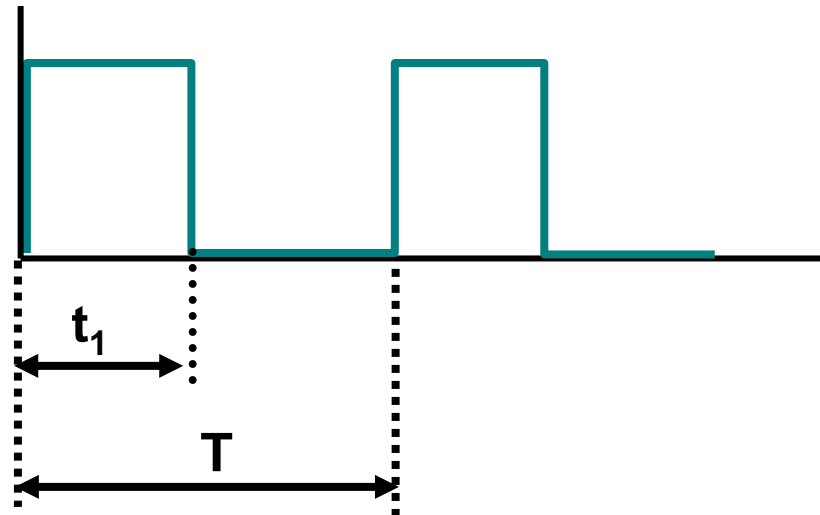
Como se relaciona a tensão de controle com o ciclo de trabalho?



O sistema que realiza a conversão é o circuito Modulador de Largura de Pulso "PWM" (*Pulse Width Modulation*)

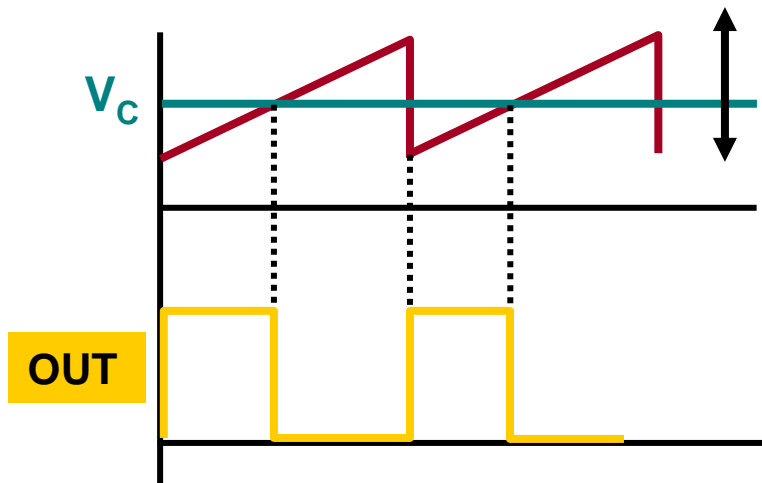


Circuito PWM



Ciclo de trabalho (*Duty Cycle*)

$$D = \frac{t_1}{T}$$

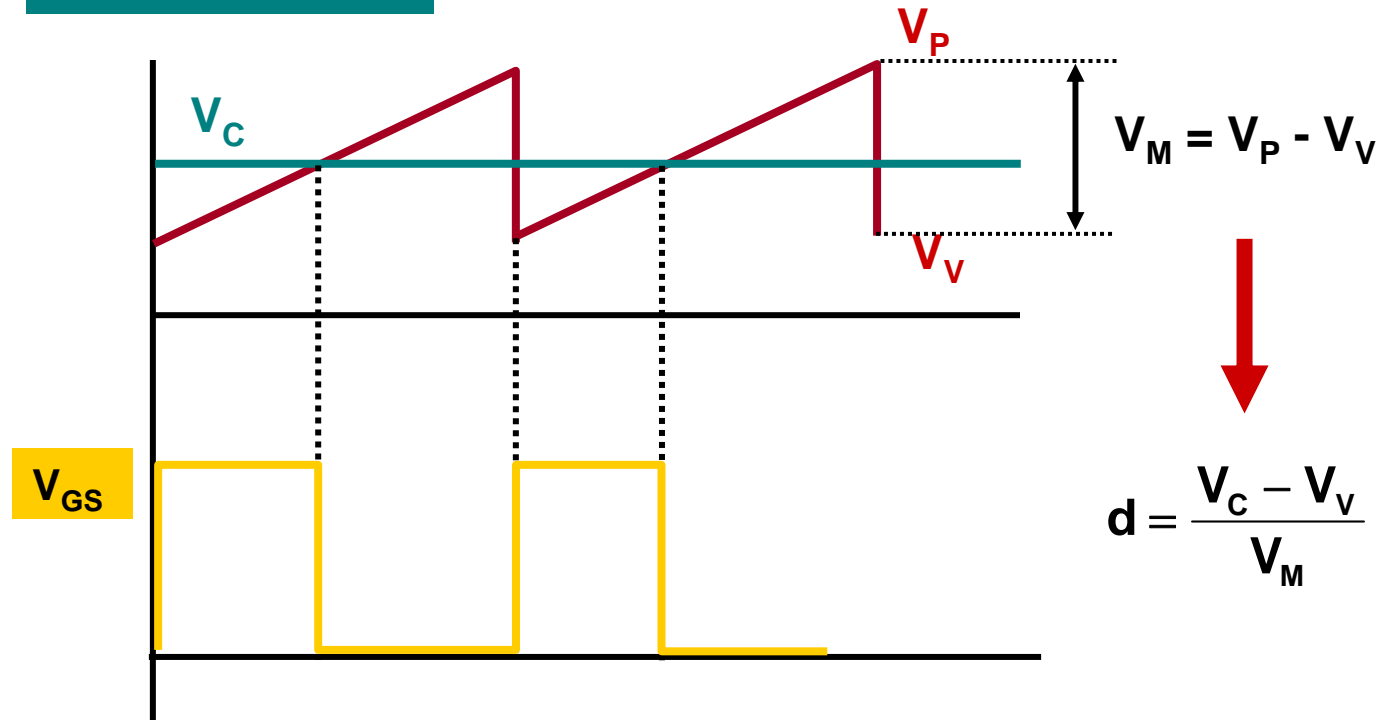


Variando a tensão de controle V_c altera-se o ciclo de trabalho

A rampa é gerada no circuito PWM, como no UC3525, por exemplo

Tipicamente está deslocada pouco acima para evitar problemas com ciclos de trabalho pequenos

Circuito PWM



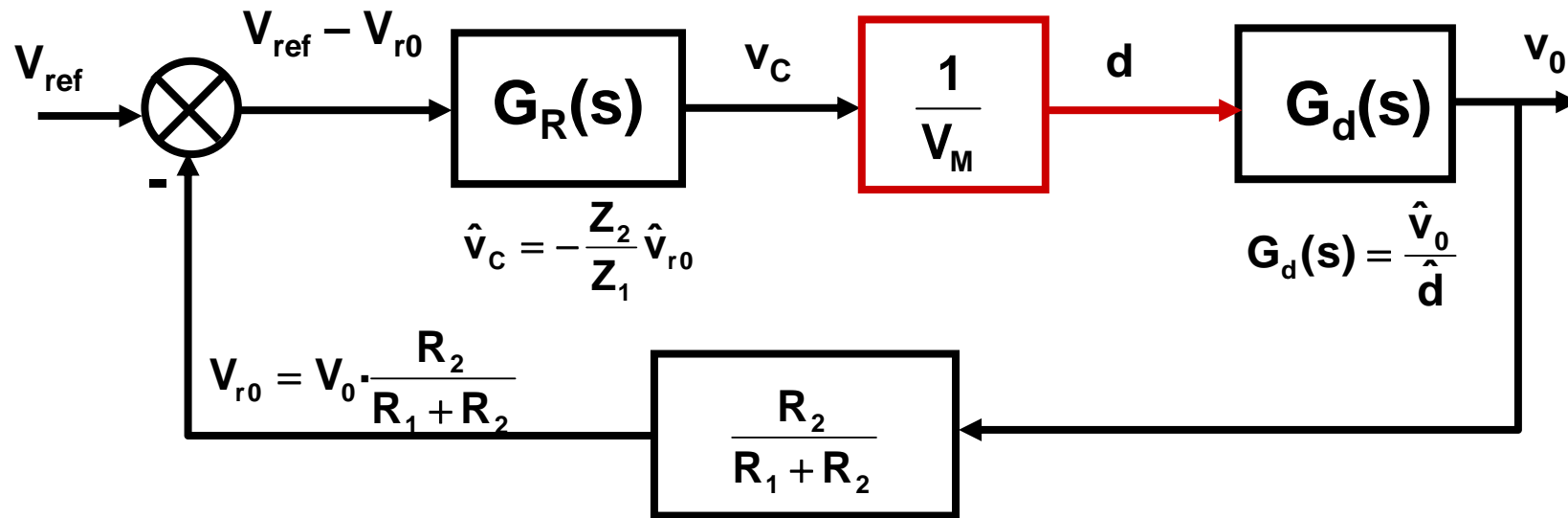
Linearização do bloqueio PWM

V_M e V_V são valores constantes



$$\hat{d} = \frac{\hat{v}_c}{V_M}$$

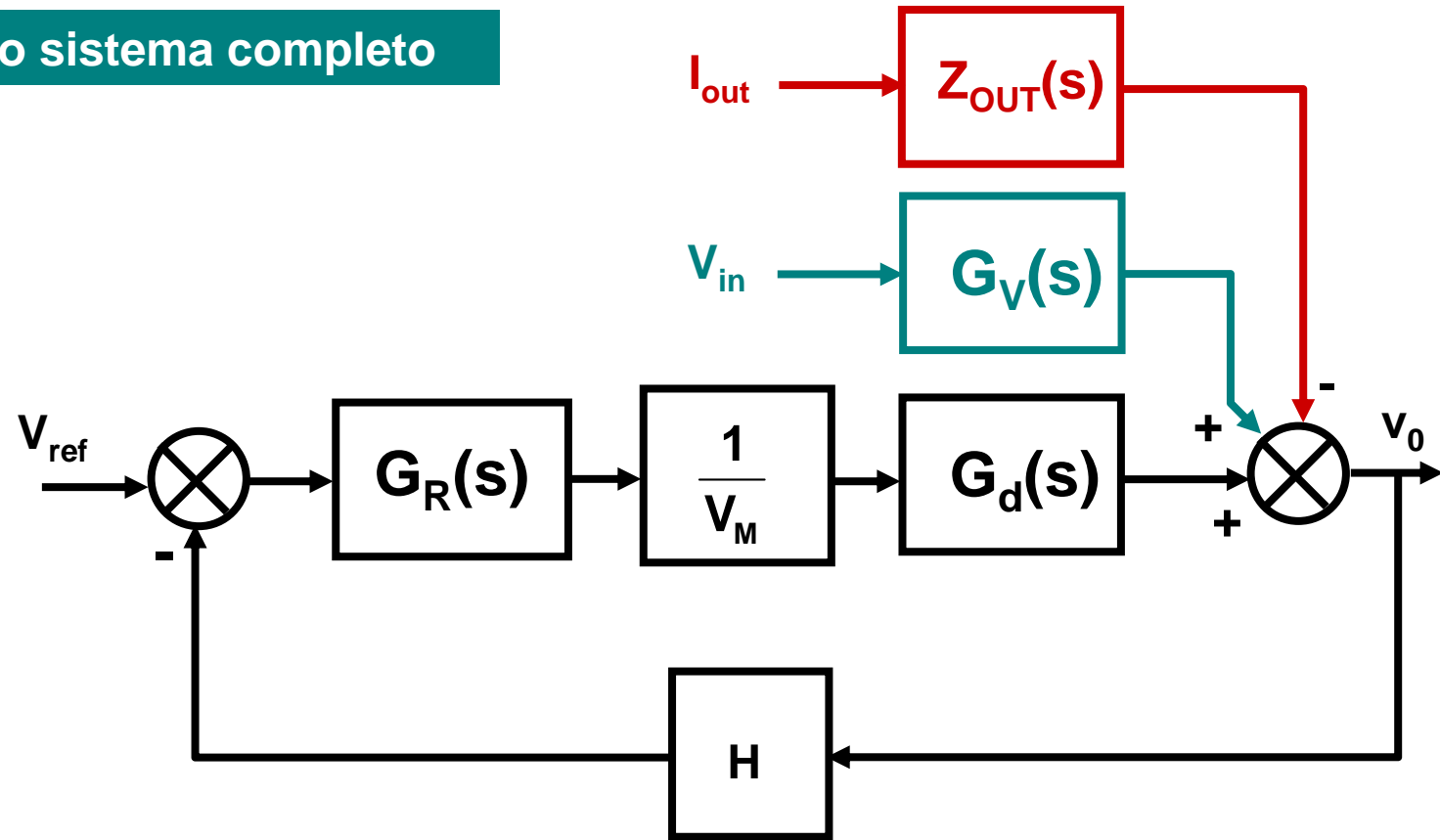
Modelo do laço de realimentação completo



Agora teremos um modelo linearizado do sistema de regulação da tensão de saída

Na realidade, a tensão de saída pode ser afetada também por perturbações na tensão de entrada ou na carga

Modelo do sistema completo



Agora teremos um modelo linearizado do sistema completo

Podemos estudar o comportamento do conversor em laço fechado:

- Regulação estática
- Comportamento dinâmico
- Estabilidade do sistema

Conceitos de sistemas realimentados

Com o diagrama de blocos anterior, a expressão da tensão de saída será:

$$\hat{V}_0 = \frac{G_R \cdot G_d / V_M}{1 + H \cdot G_R \cdot G_d / V_M} \cdot \hat{V}_{Ref} + \frac{G_V}{1 + H \cdot G_R \cdot G_d / V_M} \cdot \hat{V}_{in} - \frac{Z_{out}}{1 + H \cdot G_R \cdot G_d / V_M} \cdot \hat{i}_0$$

Ganho de laço: T(s)

Define-se como o produto de ganhos do laço, sem considerar a realimentação (H)

- $T(s) = G_R(s) \cdot G_d(s) \cdot 1/V_M$
- H: é um divisor resistivo $\frac{R_2}{R_1 + R_2}$

Podemos expressar a função anterior como:

$$\hat{V}_0 = \frac{1}{H} \cdot \frac{T}{1 + T} \cdot \hat{V}_{Ref} + \frac{G_V}{1 + T} \cdot \hat{V}_{in} - \frac{Z_{out}}{1 + T} \cdot \hat{i}_0$$

Conceitos de sistemas realimentados

A realimentação minimiza os efeitos das perturbações

P.ex.: Supondo \hat{v}_{Ref} e \hat{i}_{out} nulos $\rightarrow \hat{v}_0 = \frac{G_v}{1+T} \cdot \hat{v}_{in}$

Se o ganho de laço é alto, a influência na saída de uma variação em \hat{v}_{in} será mínima.

O mesmo ocorre para uma variação na carga

Além disso, a realimentação insensibiliza o comportamento do sistema (a tensão de saída) ante variações nos valores de componentes devidos ao tempo, temperatura, etc.

$$\hat{v}_0 = \frac{1}{H} \cdot \frac{T}{1+T} \cdot \hat{v}_{Ref} \quad \text{se } T \text{ é grande} \rightarrow \hat{v}_0 = \frac{1}{H} \cdot \hat{v}_{Ref}$$

A saída somente dependerá da rede passiva de realimentação

CONTUDO, GANHOS MUITO ELEVADOS TAMBÉM PODEM LEVAR À INSTABILIDADE !!!!

Conceitos de sistemas realimentados

Estabilidade do sistema

Um sistema é estável quando ante uma entrada limitada, a resposta é limitada.

Para estudar a estabilidade de um sistema é possível utilizar diversos métodos:

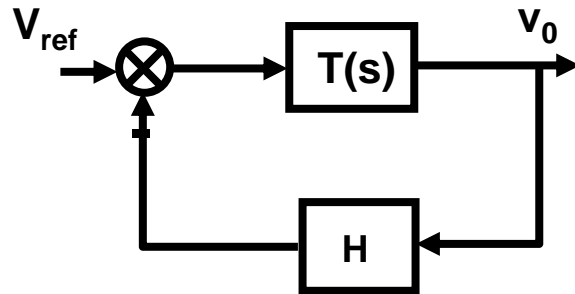
- Critério de Nyquist
- Diagrama de Bode
- Lugar das raízes, etc...

Na realidade, além da estabilidade em si mesma, é interessante conhecer o quão perto estamos de um sistema instável. É o que se denomina de estabilidade relativa.

Utilizaremos o critério de **Margem de Ganho** e de **Margem de Fase !!**

Mediremos os parâmetros sobre o diagrama de Bode

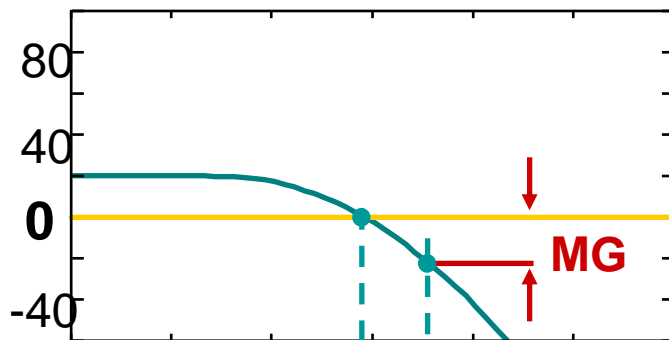
Margem de Ganho e Margem de Fase



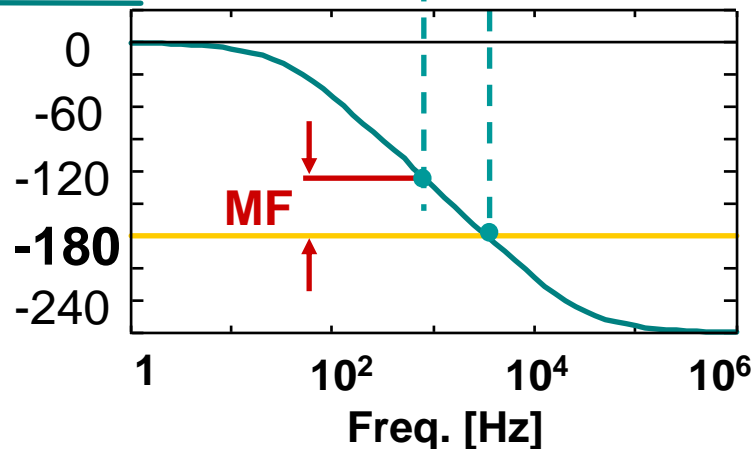
Em um sistema deste tipo, a estabilidade em malha fechada será analisada estudando o diagrama de Bode de $T(s) \cdot H$

- $T(s) = G_R(s) \cdot G_d(s) \cdot 1/V_M$
- H : é um divisor resistivo $\frac{R_2}{R_1 + R_2}$

$|G \cdot H|$ [dB]



$|G \cdot H|$ [°]



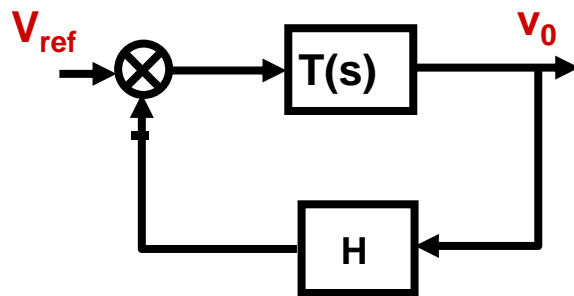
MG: *margem de ganho*

MF: *margem de fase*

Benefícios devidos ao controle

Regulação estática

O laço de controle regula a tensão de saída ante mudanças na tensão de entrada e de carga. Segundo o diagrama estabelecido, a saída segue a entrada, que é a tensão de referência.



O erro entre a entrada e a saída será:

$$\text{Error} = \frac{1}{1 + H \cdot T(0)}$$

Quanto maior o ganho em CC (frequência nula), a saída seguirá com mais fidelidade a referência. Com um integrador, o erro seria nulo.

O problema, como informado, é que ganhos elevados geralmente implicam em problemas de estabilidade

Benefícios devidos ao controle

Rapidez de resposta da saída ante variações do ponto de funcionamento

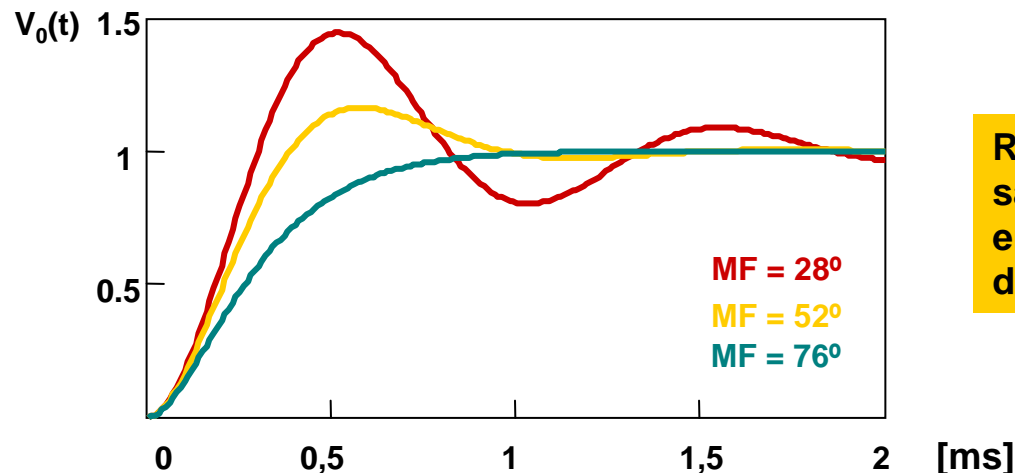
A rapidez de resposta também está relacionada com a margem de fase

- Se a MF é muito pequena, o sistema será muito oscilatório. Está próximo da instabilidade.
- Se a MF é muito grande, o sistema será muito lento

A modo indicativo, uma MF de 76° dá lugar a uma resposta não sobre-oscilatória mais rápida possível.

Com uma MF de 52° , a sobre-oscilação da tensão de saída é de 16%.

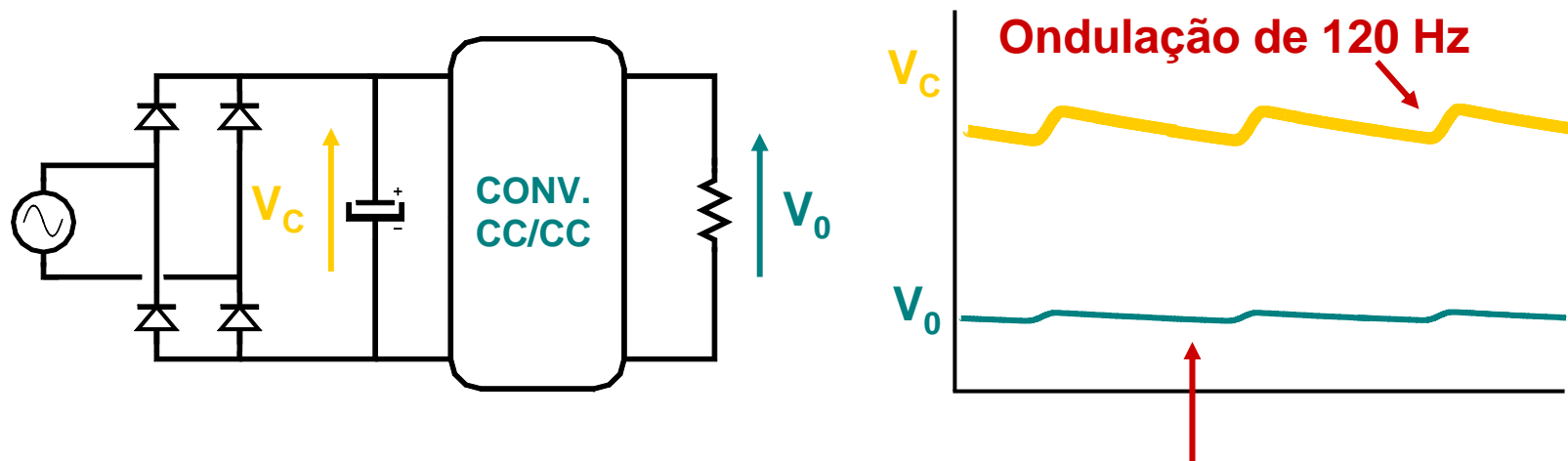
Com uma MF de 28° , a sobre-oscilação da tensão de saída é de 44%.



Resposta da tensão de saída ante um degrau de entrada, quando o laço tem diferentes valores de MF

Benefícios devidos ao controle

Também é importante conhecer a capacidade do sistema de atenuar variações na tensão de entrada



O ripple de 120 Hz são transmitidos para a saída. O laço deve ter a capacidade para atenuá-lo suficientemente.

$$\hat{V}_0 = \frac{G_v}{1+T} \cdot \hat{V}_{in} \quad \rightarrow$$

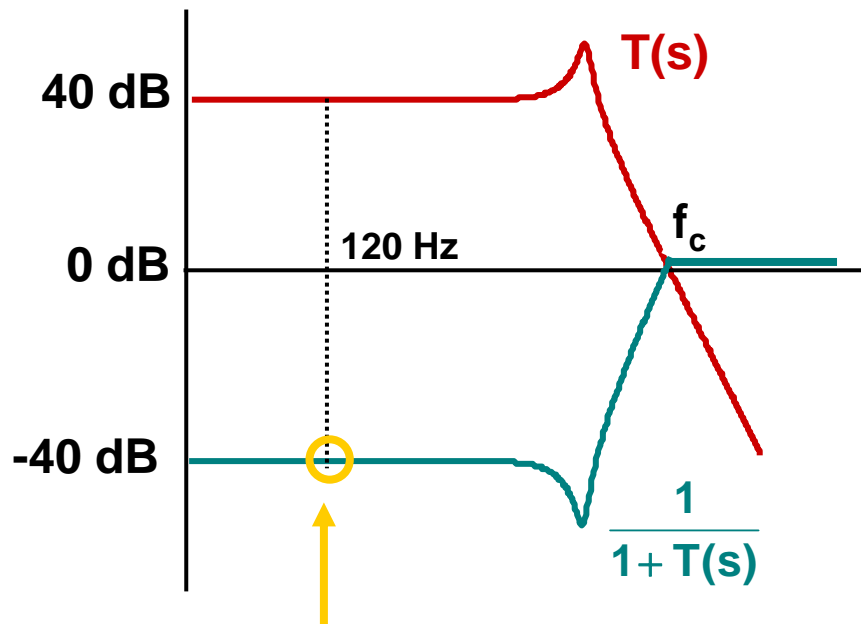
Construindo o diagrama de Bode desta função podemos ver o que ocorre com uma perturbação de uma certa amplitude e de uma certa frequência

Benefícios devidos ao controle

Devemos analisar a função:

$$F_i(s) = \frac{1}{1 + T(s)} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Si } T(s) \ll 1 \rightarrow F_i(s) = 1 \\ \text{Si } T(s) \gg 1 \rightarrow F_i(s) = \frac{1}{T(s)} \end{array} \right.$$

Exemplo:



O laço conseguiria atenuar uma perturbação de 120 Hz em 40 dB

A frequência de corte de $T(s)$ sempre é menor que a frequência de comutação (pelo menos uma década)

O laço somente pode atenuar perturbações com frequências menores que a freq. de corte f_c . (Conceito de Largura de Banda)

Por outro lado, como o modelo do conversor é por valores médios, na realidade não se pode proporcionar informação válida para frequências superiores à de comutação

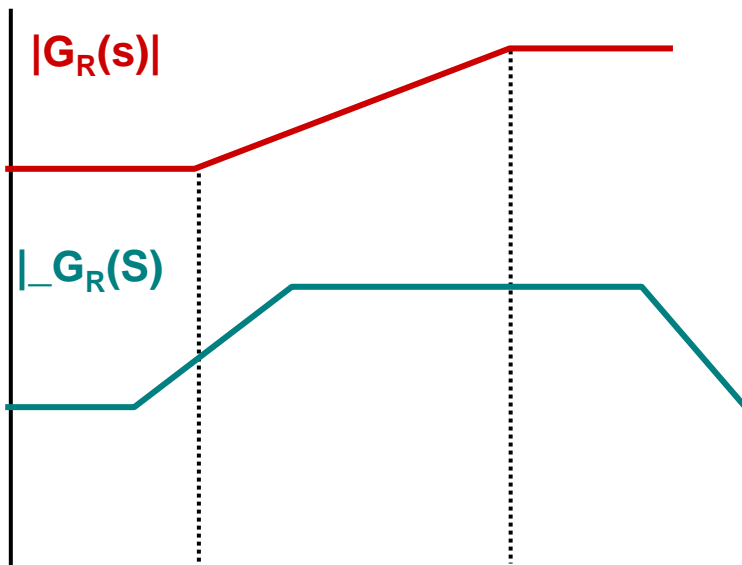
Projeto de reguladores

Para conseguir obter as vantagens dinâmicas desejadas podemos utilizar diversos tipos de reguladores

- Regulador PD
- Regulador PI
- Regulador PID

Regulador PD

Tem ação proporcional e diferencial



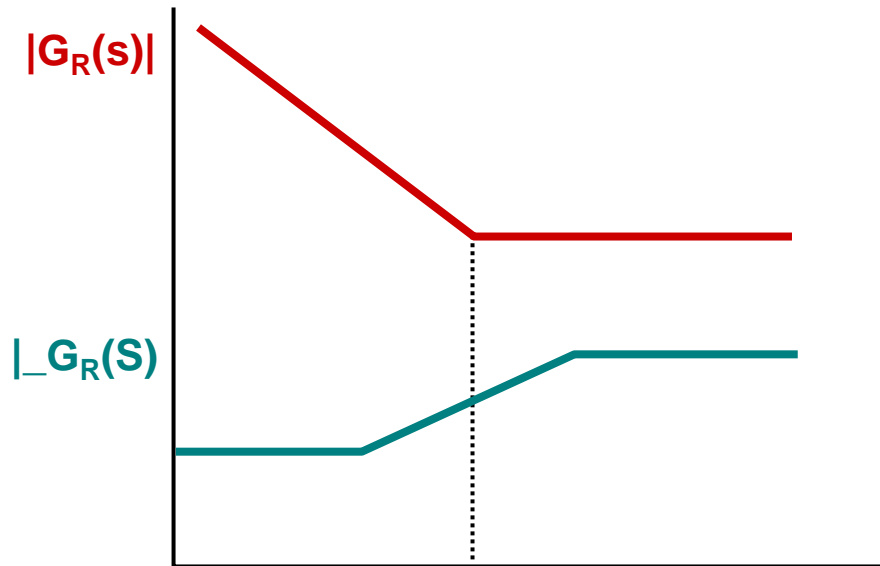
Adiciona ganho e pode
aumentar a frequência de corte

Adiciona fase e pode
melhorar a margem de fase

Projeto de reguladores

Regulador PI

Tem ação proporcional e integral



Adiciona ganho a baixa frequência. Melhora a regulação estática e rejeição a 120 Hz (ou, 100Hz, para 50Hz freq. Rede)

Na pratica, se deseja ter todas estas vantagens:

- Frequência de corte elevada
- Grande margem de fase
- Ganho em baixa frequência

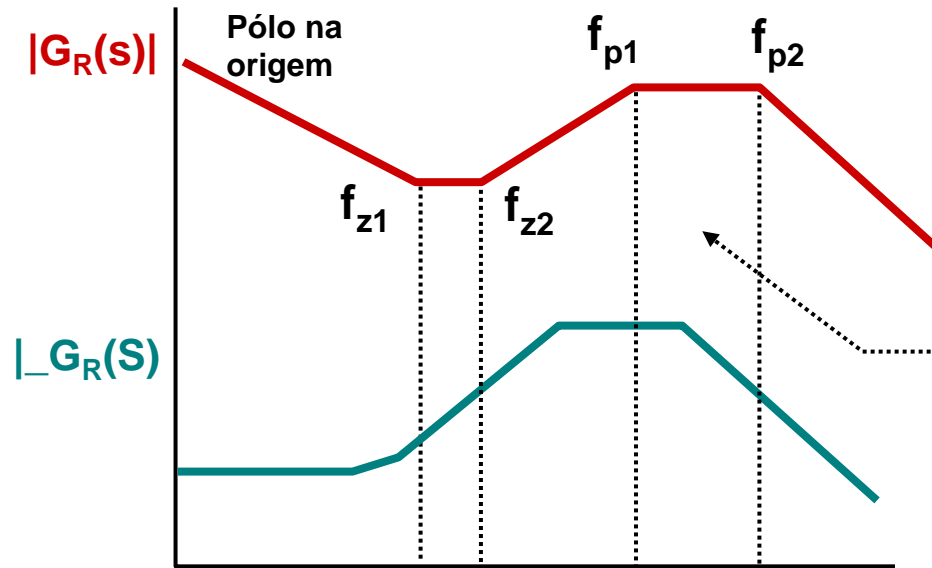


Para tanto, se utiliza um regulador que combina todas: PID

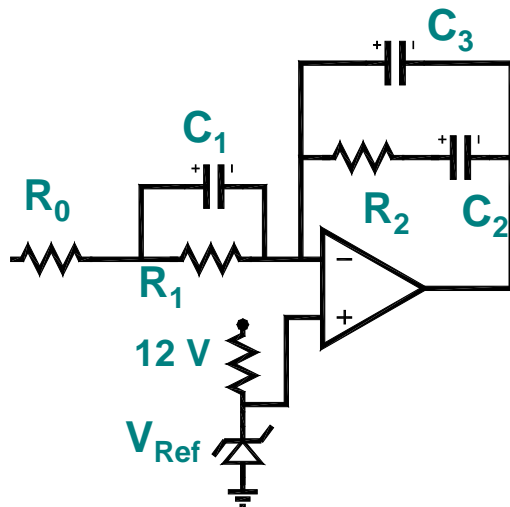
Projeto de reguladores

Regulador PID

Tem ação proporcional, integral e diferencial



Projeta-se de forma que a frequência de corte de $T(s)$ esteja nesta zona

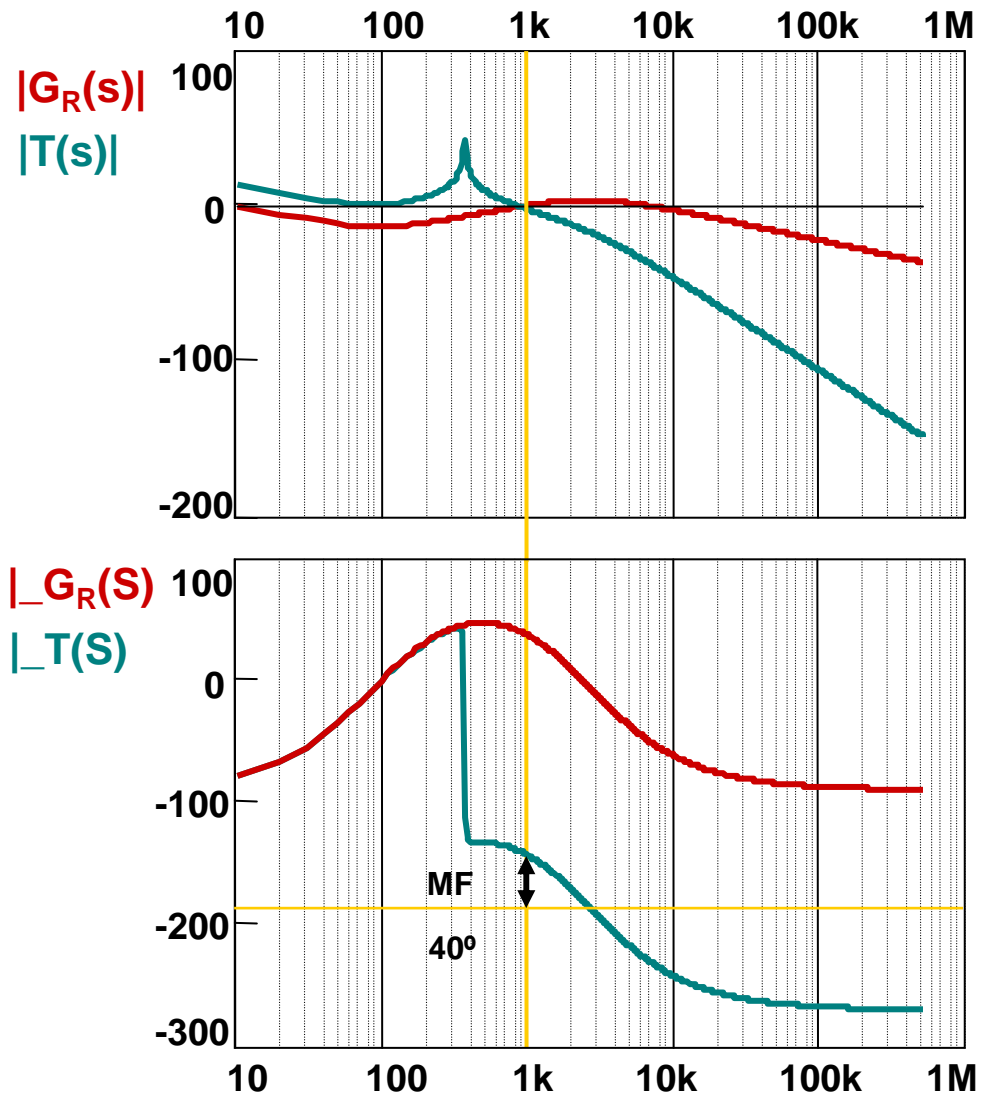


Implementação prática

$$G_R(s) = \frac{(1 + R_1 C_1 s) \cdot (1 + R_2 C_2 s)}{[s(C_2 + C_3)(R_0 + R_1)] \cdot [1 + R_2 \frac{C_2 C_3}{C_2 + C_3} s] \cdot [1 + C_1 \frac{R_0 R_1}{R_0 + R_1} s]}$$

Projeto de reguladores

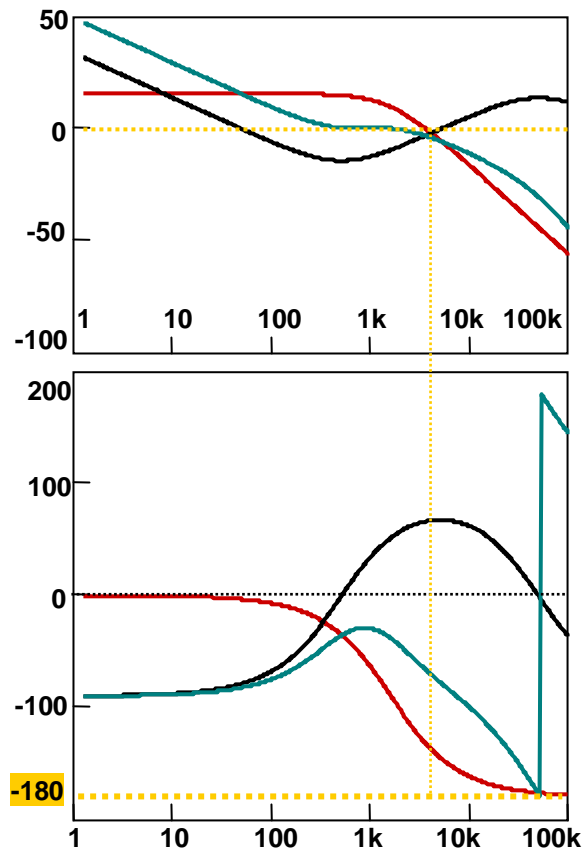
Regulador PID: Exemplo real



Na pratica é complicado ajustar todos os parâmetros para se ter vantagens em todos os pontos desejados

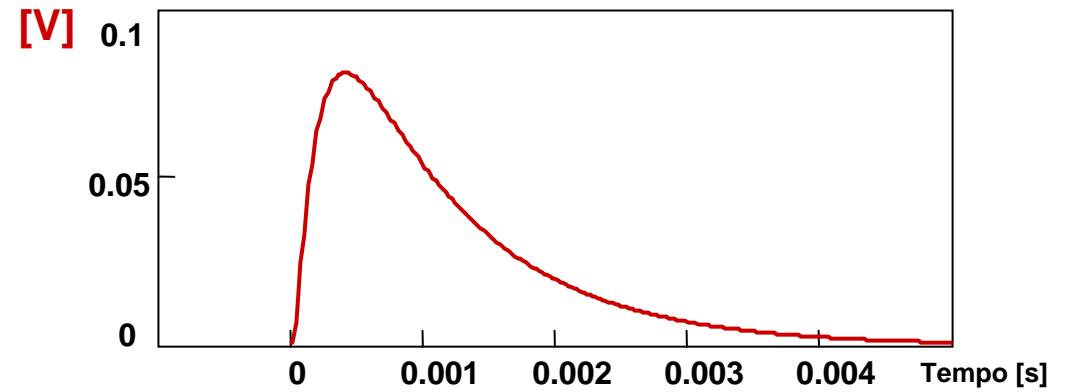
Projeto de reguladores

Regulador PID: Exemplo real

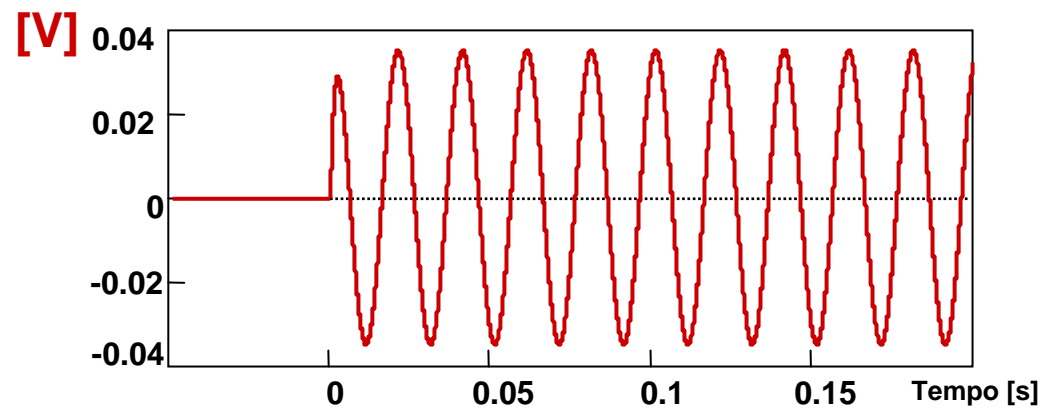


- $T_0(s) = G_d(s) \cdot H \cdot 1/V_M$
- $G_R(s)$
- $T(s)$

Resposta ante um degrau de tensão de entrada de amplitude 0,5 V



Se a tensão de entrada tem um ripple senoidal de amplitude 0,5 V e freq. 50 Hz

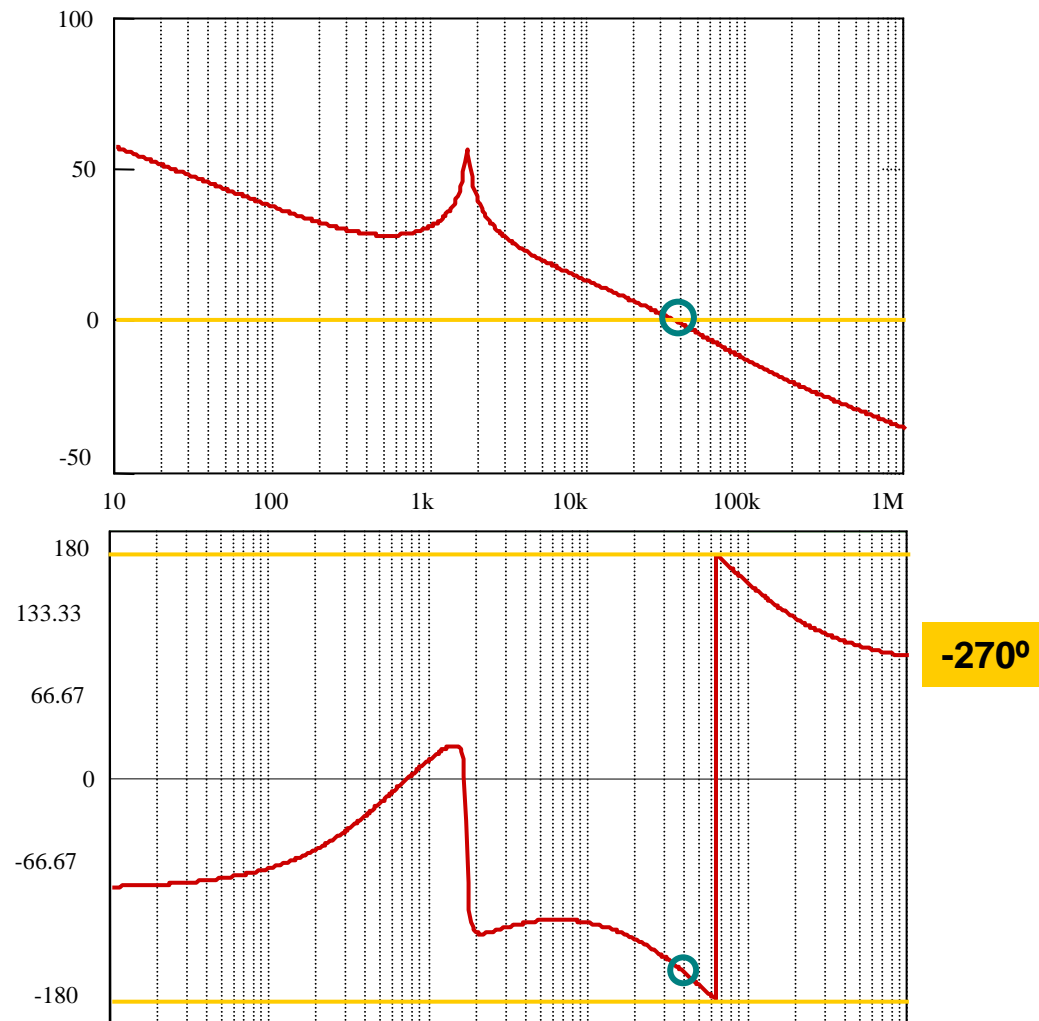


Projeto de reguladores

Efeito de um zero no Semiplano Positivo (Flyback, elevador, etc)

Nos conversores que têm zero no semiplano positivo resulta complicações para se ter uma margem de fase ampla.

O zero aumenta o defasamento.

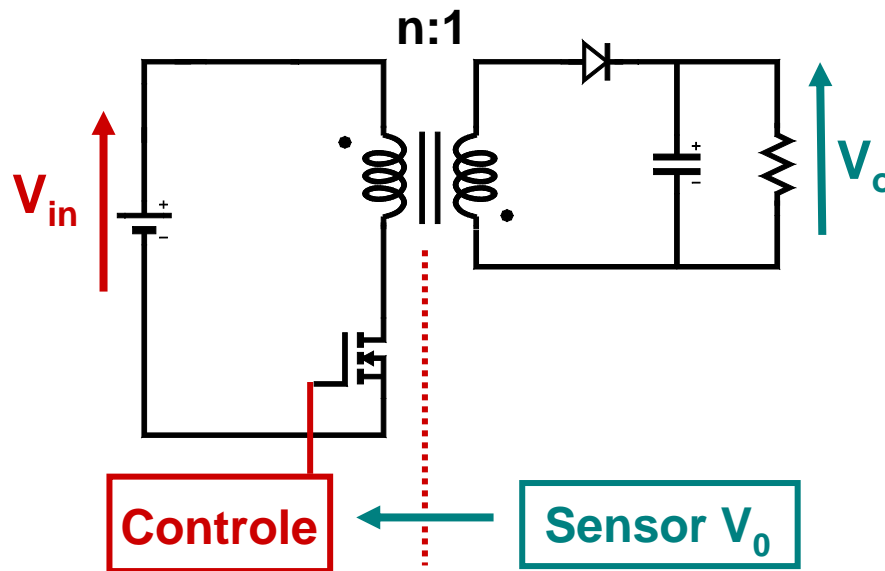


É complicado ter uma margem de fase ampla

Projeto de reguladores com isolamento galvânico

Em geral, os conversores conectados à rede elétrica necessitam isolamento galvânico por razões de segurança.

O laço de controle não pode romper o isolamento



Isolação primário/secundário

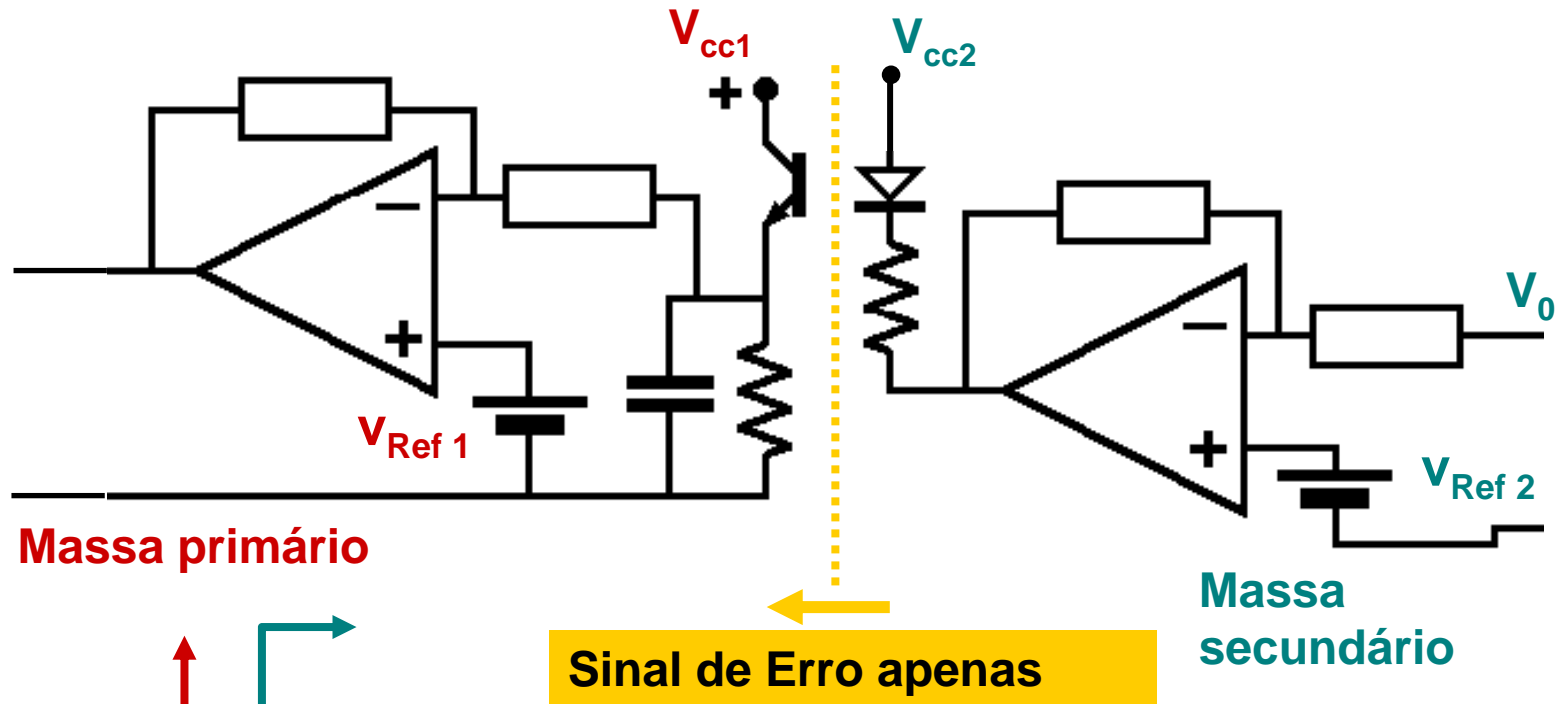
- Transformador
- Optoacoplador

Há diversas opções possíveis:

- Valor absoluto de V_o
- Valor de erro em relação à referência
- Circuito de controle no secundário

Projeto de reguladores com isolamento galvânico

A forma mais habitual de resolver é utilizando um optoacoplador



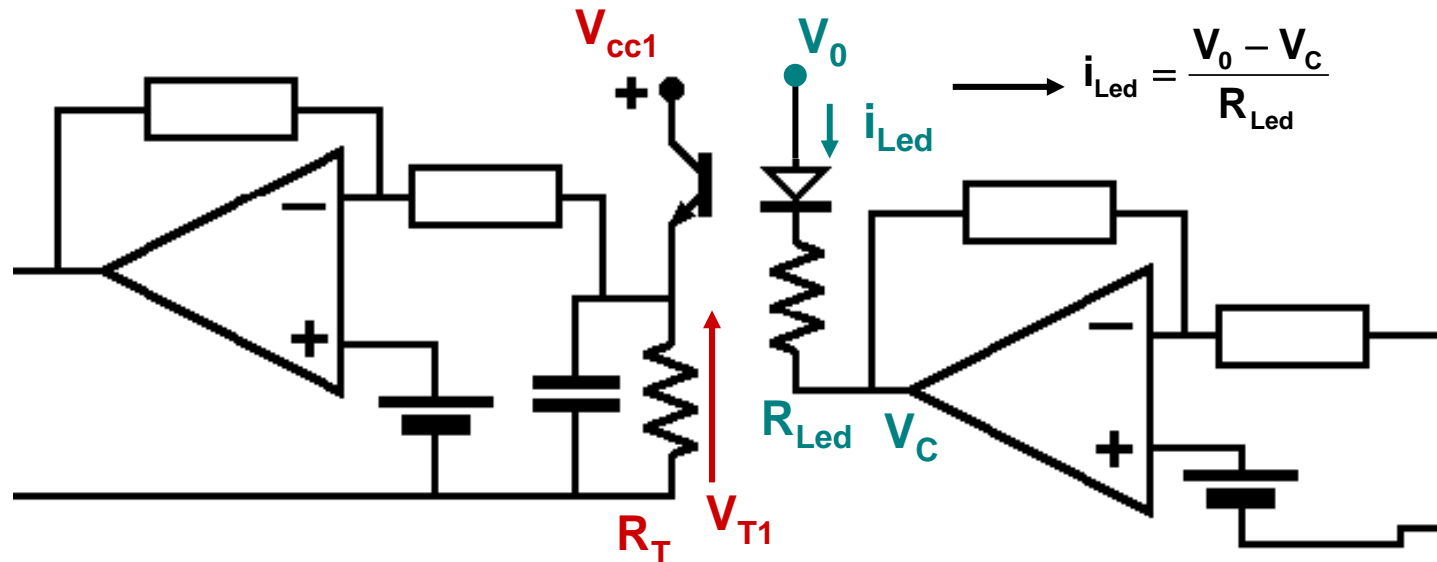
O regulador pode ser distribuído entre o primário e o secundário

É complicado transmitir a informação de um valor absoluto de forma precisa com um optoacoplador

Projeto de reguladores com isolamento galvânico

A alimentação do optoacoplador no secundário pode gerar um problema se não levado em conta apropriadamente.

Se alimentamos o dispositivo com a própria tensão de saída:



CTR: Current Transfer Ratio

$$CTR = \frac{i_{Trans}}{i_{LED}}$$

É muito variável!!!

$$V_{T1} = R_T \cdot i_{Led} \cdot CTR$$

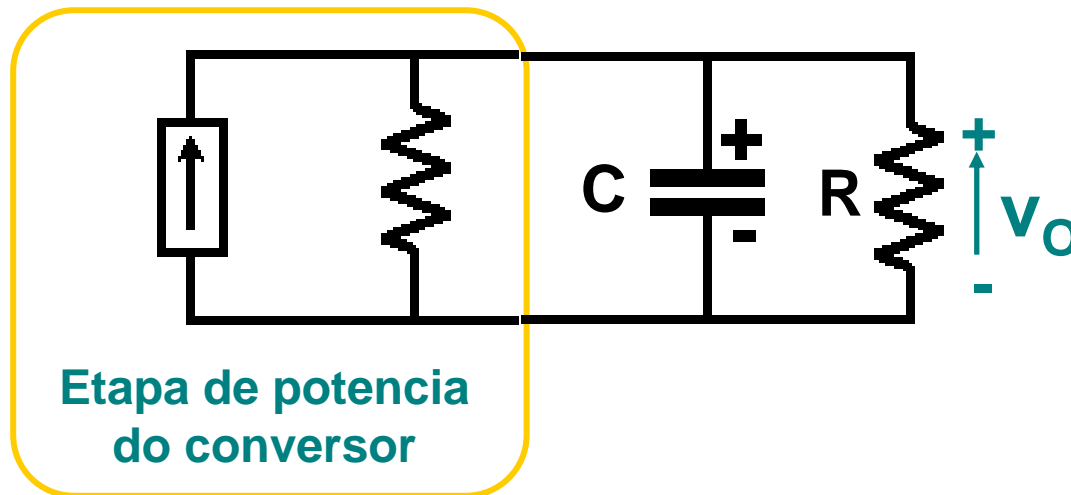
$$V_{T1} = R_T \cdot CTR \cdot \frac{V_0 - V_C}{R_{Led}} \rightarrow \hat{V}_{T1} = R_T \cdot CTR \cdot \frac{\hat{V}_0 - \hat{V}_C}{R_{Led}}$$

Na expressão aparece a tensão de saída V_0 e afeta a função de transferência

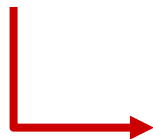
Controle no Modo Corrente

Até o momento analisamos o que se denomina de controle no Modo Tensão, onde se regula a tensão de saída controlando-a diretamente

Poderíamos regular a tensão de saída controlando a corrente que injetamos no filtro de saída. Este tipo de controle se denomina de “Controle de Modo Corrente”



Um laço interno de corrente transforma o resto do conversor em algo que se comporta como uma fonte de corrente.

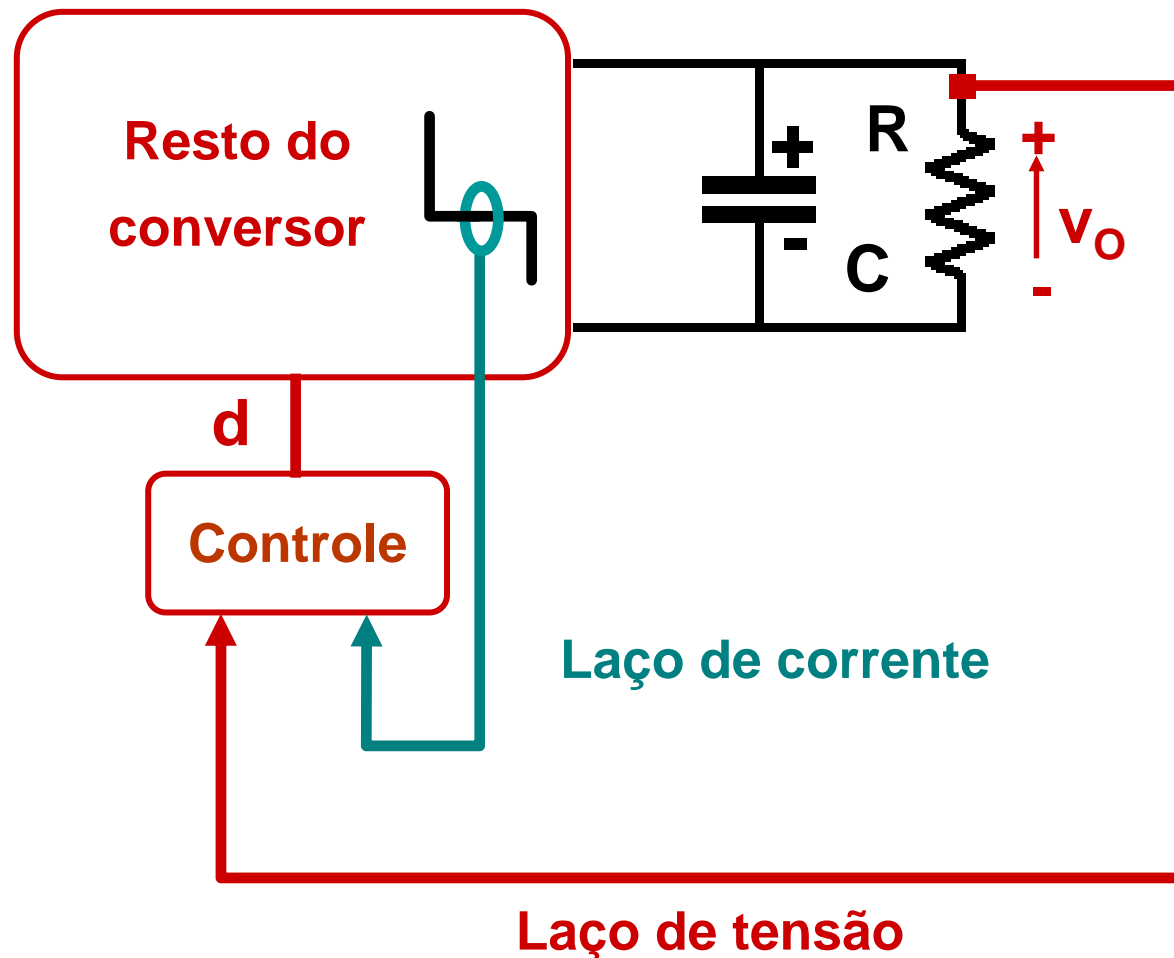


Tem um comportamento similar ao MCD. A função de transferência é “próxima” a uma de primeira ordem!!

Controle no Modo Corrente

Os sistemas de controle Modo Corrente são implementados com dois laços de realimentação:

- Um laço de corrente: controla o valor da corrente que se injeta
- Um laço de tensão: obriga que a tensão de saída seja a desejada



Controle no Modo Corrente

Há diversos tipos de controle Modo Corrente. Os mais interessantes são:

- **Controle Modo Corrente de Pico**
- **Controle Modo Corrente Média**

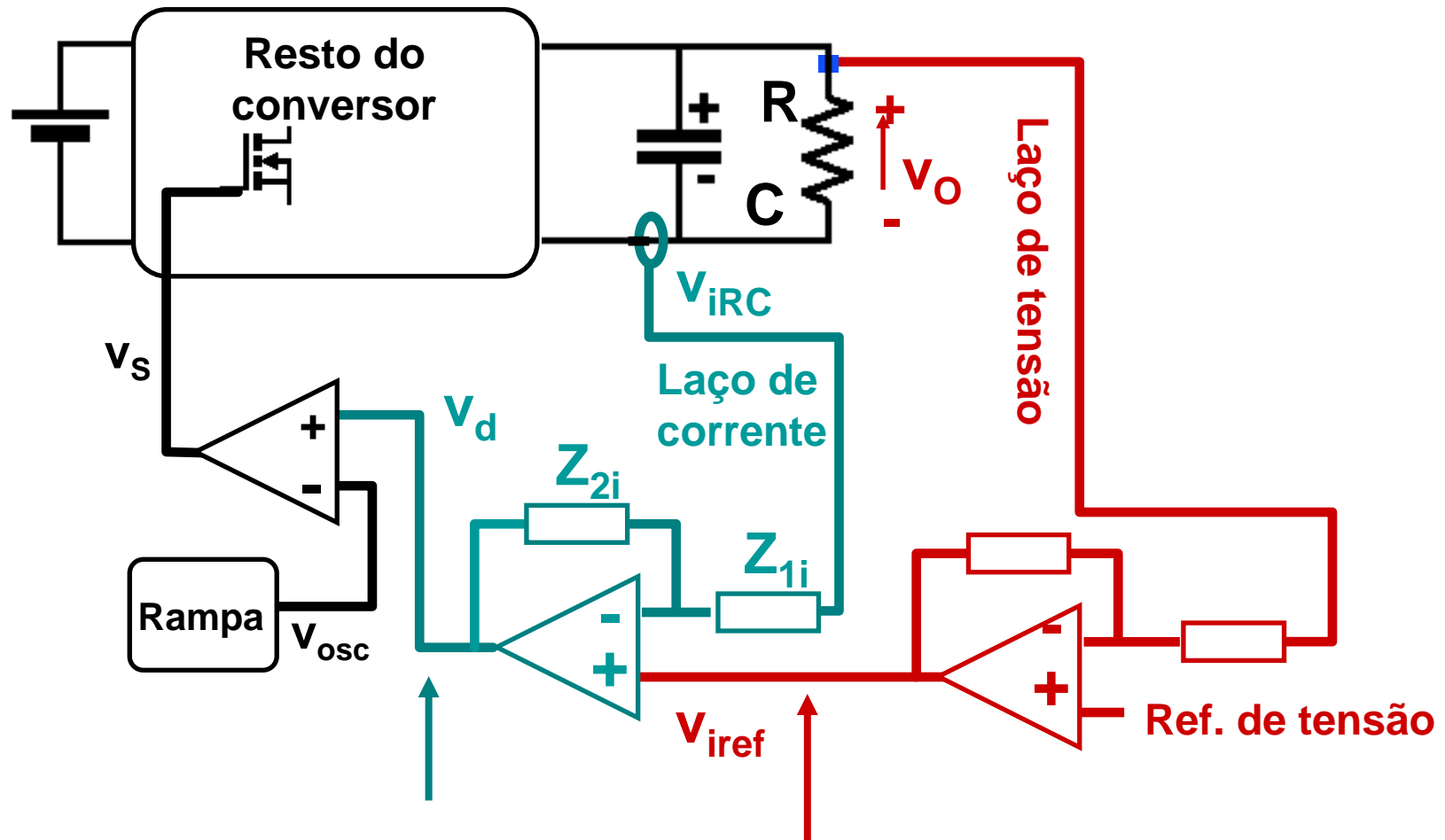
Controle Modo Corrente de Pico

Se controla o valor de pico da corrente que circula pelo indutor (por ex)

Controle Modo Corrente Média

O valor de corrente que se controla é o valor médio da corrente que circula pelo indutor (por exemplo)

Esquema básico de um sistema de Controle no Modo Corrente Média



O ciclo de trabalho se controla em função do que o laço de corrente impõe

O laço de tensão impõe o valor da referência que irá seguir o laço de corrente