

10

Capítulo

Osciladores com Controle de Ganho

Meta deste capítulo

Entender o princípio de funcionamento de osciladores com controle automático de ganho.

objetivos

- Entender o princípio de funcionamento de osciladores com controle automático de ganho;
- Analisar osciladores com controle automático de ganho;
- Projetar os componentes de osciladores com controle automático de ganho;
- Avaliar o funcionamento por simulação de osciladores com controle automático de ganho;
- Implementar e ensaiar osciladores com controle automático de ganho.

Pré-requisitos

Ter estudado o capítulo sobre osciladores a cristal.

Continuidade

A continuidade no estudo de osciladores e multivibradores se dará pelo estudo dos osciladores de relaxação.

Prof. Clóvis Antônio Petry.

Florianópolis, dezembro de 2012.

1 Introdução

Os osciladores estudados até o presente momento apresentam problemas de estabilidade da frequência de oscilação e da amplitude da tensão disponibilizada em sua saída. No capítulo anterior estudaram-se os osciladores a cristal, que tem como principal característica a oscilação com frequência bem definida, dada pela frequência de ressonância do cristal. Assim, para que um oscilador tenha frequência fixa e bem definida de oscilação e tensão de saída estabilizada e pré-determinada pelo projetista ou pré-ajustada pelo usuário, precisar-se-á inserir aos osciladores estudados nos capítulos anteriores um circuito capaz de controlar a tensão de saída.

A título de exemplo na Figura 1 mostra-se um amplificador com controle automático de ganho (CAG, ou em inglês AGC – *Automatic gain control*) [2]. Neste circuito, a tensão $+V_{AGC}$ é a tensão de controle de ganho, originada a partir de outro circuito. Para um amplificador de áudio, esta tensão de controle pode ser obtida da saída do amplificador ou de algum estágio intermediário, e que permita obter um sinal de saída sem distorção harmônica. Em osciladores, o sinal de CAG pode ser obtido diretamente de sua saída, limitando assim a amplitude da tensão de oscilação a valores pré-definidos por projeto. Deste modo consegue-se determinar de antemão a amplitude da tensão de saída, o que é uma característica desejada em osciladores, visto que nos circuitos estudados anteriormente não se conhecia a amplitude que seria apresentada pelo oscilador em sua saída.

Além disso, os circuitos de controle automático de ganho são amplamente utilizados em circuitos de áudio e vídeo, assim como em receptores de sinais de rádio, circuitos digitais de processamento de imagens, dentre outros.

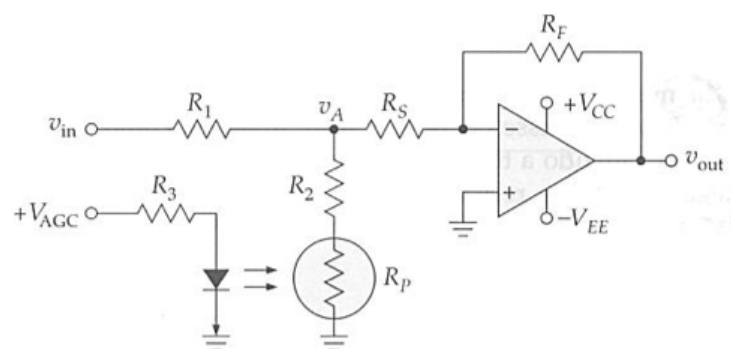


Figura 1 – Amplificador com controle automático de ganho.

O objetivo deste capítulo é o estudo de osciladores com controle automático de ganho (CAG), utilizando-se para tal diferentes técnicas, dentre as quais: resistores não-lineares, opto-acopladores, diodos, transistores, etc.

2 Controle Automático de Ganho

Nos primeiros capítulos do material de osciladores e multivibradores verificou-se que o critério de Barkhausen estabelece que para que o sistema da Figura 2 oscile deve-se satisfazer os seguintes requisitos:

$$\alpha \cdot \beta = -1;$$

$$\theta = \pm 360^\circ \cdot n.$$

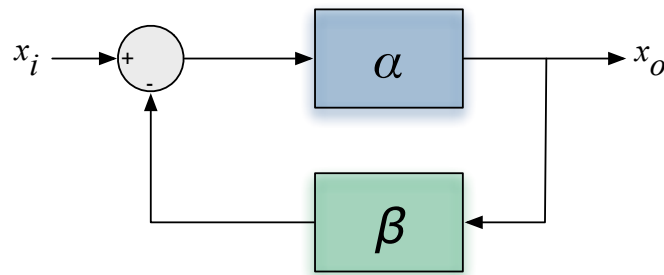


Figura 2 - Estrutura básica de um oscilador.

Este ponto específico de funcionamento para o sistema da Figura 2 depende particularmente dos componentes dos circuitos do amplificador e da malha de realimentação, significando em outras palavras que o ponto de equilíbrio do sistema depende de diversos elementos do circuito, inclusive de suas características internas e de sua variação com a temperatura. Deste modo, a amplitude da tensão de oscilação apresenta um valor particular que, após o transitório de partida do oscilador, faz com seu ganho seja exatamente unitário e com defasagem nula. Determinar analiticamente esta amplitude, para os osciladores estudados anteriormente, é tarefa árdua e que exige conhecimento de modelagem dos semicondutores (transistores e amplificadores operacionais).

Além disso, mesmo que o projetista estime a amplitude da tensão de saída do circuito oscilador e determine os componentes do circuito para que o circuito apresente o valor desejado de tensão de oscilação, o envelhecimento dos componentes e sua variação com a temperatura e tolerâncias de fabricação irá influenciar o ganho e fase do sistema, tornando assim a tensão de saída dependente destes parâmetros.

O controle automático de ganho é justamente um circuito capaz de estabilizar a amplitude da tensão de saída, fazendo com que ao longo do tempo ela apresenta pouca variação. Na Figura 3 mostra-se o diagrama de blocos dos sistema resultante com um bloco CAG [7].

No circuito da Figura 3, o sinal de saída (x_o) é realimentado pelo bloco de controle de ganho, atuando sobre o amplificador (bloco α) de modo a tornar o ganho do sistema dependente da amplitude da saída. O circuito de controle automático de ganho atua do seguinte modo:

- Se o sinal de saída ($x_o \uparrow$) aumentar de valor, o controle de ganho reduzirá o ganho

do amplificador ($\alpha \downarrow$) fazendo com o que o sinal de saída retorne ao valor original;

- Se o sinal de saída ($x_o \downarrow$) diminuir de valor, o controle de ganho aumentará o ganho do amplificador ($\alpha \uparrow$) fazendo com o que o sinal de saída retorne ao valor original.

Portanto, sempre que o sinal de saída variar de amplitude, o controle de ganho atuará sobre os sistema modificando seu ganho visando manter a amplitude da saída com valor constante (estabilizado).

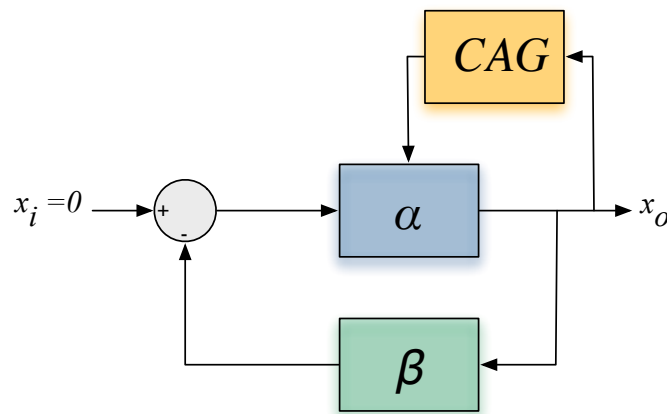


Figura 3 - Sistema com controle de ganho.

Existem diferentes maneiras de associar um controle automático de ganho aos osciladores estudados nos capítulos anteriores. Algumas destas maneiras serão abordadas em detalhes nos próximos tópicos deste capítulo.

É importante ressaltar que o controle automático de ganho pode ser inserido tanto em amplificadores e osciladores com transistores, como aqueles implementados com amplificadores operacionais. Além disso, o controle de ganho pode atuar também sobre o ganho da malha de realimentação (β) ao invés de alterar o ganho do amplificador (α).

3 Oscilador com Ponte de Wien

O circuito do oscilador com Ponte de Wien é apresentado novamente na Figura 4. A rede de realimentação é formada pela associação de impedâncias série (R_1 e C_1) e paralela (R_2 e C_2). Sabe-se também que:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2}}.$$

Usualmente é comum utilizar-se resistores e capacitores iguais nas duas redes de realimentação, levando a:

$$R_1 = R_2 \text{ e } C_1 = C_2;$$

$$\omega_o = \frac{1}{R \cdot C} \quad \rightarrow \quad F_o = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}.$$

Afora isso, o ganho da malha de realimentação positiva, na frequência de oscilação, é:

$$\frac{v_+}{v_o} = \frac{1}{3} \quad \rightarrow \quad \beta = 3.$$

Assim, o ganho da malha de realimentação negativa deverá ser:

$$\frac{R_f}{R_g} = 2 \quad \rightarrow \quad \alpha = 2.$$

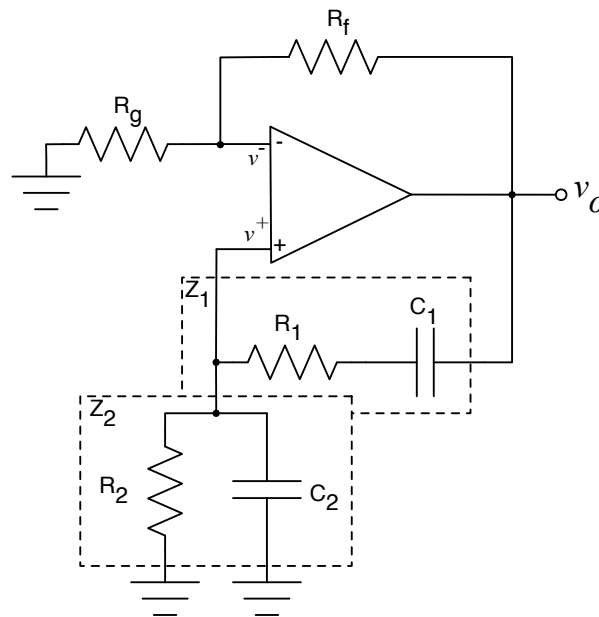


Figura 4 - Oscilador com ponte de Wien.

3.1 Controle Automático de Ganho com Resistências Não-Lineares

Uma das maneiras mais simples de se fazer o controle de ganho de um oscilador é empregando resistências não-lineares, por exemplo lâmpadas ou resistores dependentes da temperatura (termistor).

Na Figura 5 mostra-se um oscilador com Ponte de Wien empregando uma lâmpada incandescente de pequena potência na malha de realimentação negativa. A relação entre o valor da resistência de R_1 e L (lâmpada) é tal que na partida do oscilador, quando a lâmpada está fria, sua resistência é baixa, fazendo com que o ganho seja bem maior do que 2 ($\alpha > 2$). Note que o ganho da malha de realimentação é dado por:

$$\beta = f(R_3, C_3, R_4, C_4).$$

A medida que o circuito inicia as oscilações e a corrente elétrica começa a circular pela lâmpada, esta aquece, aumentando a resistência do filamento, fazendo com que o ganho diminua. Se a tensão de saída aumentar muito, a corrente na lâmpada será alta e conseqüentemente sua

resistência, fazendo então com que a tensão de saída diminua. Assim, o circuito terá um ponto de equilíbrio determinado pela temperatura da lâmpada em regime permanente.

O mesmo princípio, baseado no aquecimento de um elemento não-linear, é empregado no circuito da Figura 6, onde a lâmpada foi substituída por um resistor dependente da temperatura (termistor). É importante lembrar que existem termistores com coeficiente positivo de temperatura (PTC) e com coeficiente negativo de temperatura (NTC). Nos primeiros a resistência diminui se a temperatura aumenta, enquanto nos segundos ocorre o contrário, ou seja, a resistência aumenta com o aumento da temperatura.

A partir disso, sabendo que na partida o ganho do amplificador deve ser alto para que as oscilações iniciem, tem-se que $R_1 > R_2$. Já quando o circuito estiver em regime permanente e com o termistor (R_1) quente, o ganho deve diminuir, ou seja, R_1 deve diminuir de valor. Daí se conclui que o termistor R_1 deve ter coeficiente negativo de temperatura.

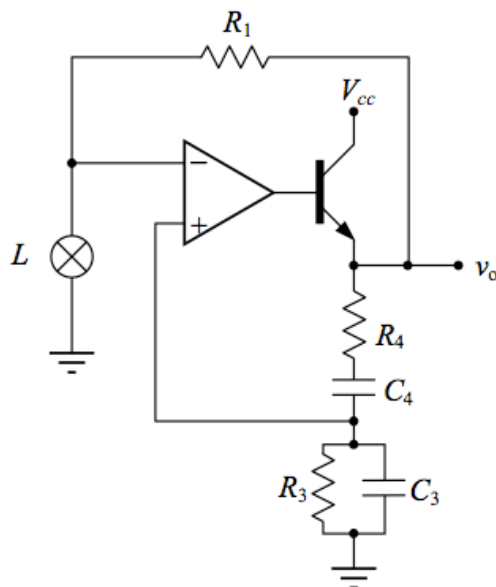


Figura 5 - Oscilador com Ponte de Wien e controle de ganho com lâmpada incandescente.

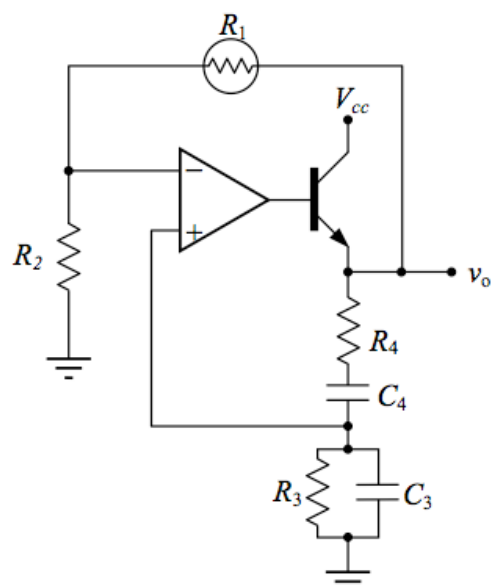


Figura 6 - Oscilador com Ponte de Wien e controle de ganho com termistor.

3.2 Controle Automático de Ganho com FET

Os transistores de efeito de campo (FET) possuem três regiões de operação distintas: a saturação, o corte e a região de resistência controlada, onde a resistência entre dreno (*Drain* - D) e fonte (*Source* - S) (r_{DS}) é controlada pela tensão aplicada entre gatilho (*Gate* - G) e fonte (V_{GS}).

Na Figura 7 mostra-se um oscilador com Ponte de Wien e controle automático de ganho com transistor de efeito de campo [7]. Neste circuito, o ganho da malha de realimentação negativa é dado por, desprezando a impedância de C:

$$\alpha = \frac{R_1}{R_{in}} \quad \rightarrow \quad R_m = R_2 // r_{DS}.$$

Um transistor de efeito de campo operando na região de resistência controlada deve ter pequena tensão entre dreno e fonte (V_{DS}), tipicamente menor que 1 V, levando a:

$$v_- = v_o \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \ll 1;$$

$$\frac{R_2}{R_1} \ll 1.$$

Quando a tensão de saída aumenta de amplitude, o diodo D irá conduzir os semiciclos negativos desta tensão, carregando o capacitor C. Por meio do divisor de tensão formado por R₅ e R₆ a tensão armazenada no capacitor C será aplicada no gatilho do transistor de efeito de campo. Este transistor, por sua vez, irá aumentar a resistência entre dreno e fonte (r_{DS} ↑), aumentando a resistência R_{in} e diminuindo o ganho (β) do circuito. Portanto, o circuito pode ser projetado para operar com uma tensão de saída pré-determinada.

O circuito formado pelo diodo D e o capacitor C funciona como um retificador para os semiciclos negativos, originando uma forma de onda de tensão conforme mostrado na Figura 8. Portanto, a tensão de gatilho do transistor de efeito de campo será uma tensão contínua, proporcional ao pico negativo da tensão de saída do oscilador, que é uma tensão alternada.

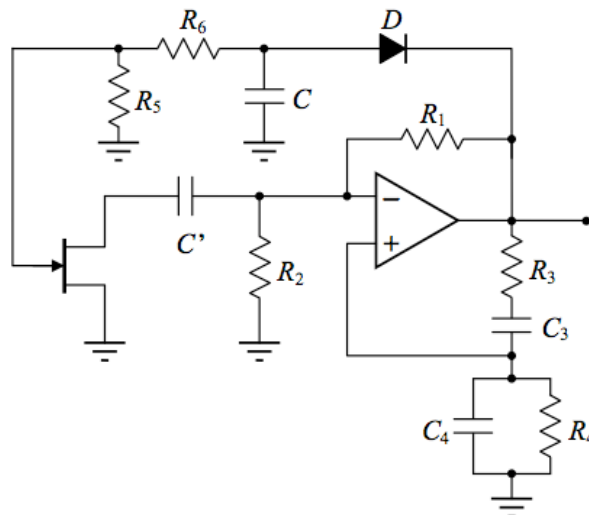


Figura 7 - Oscilador com Ponte de Wien e controle automático de ganho com FET.

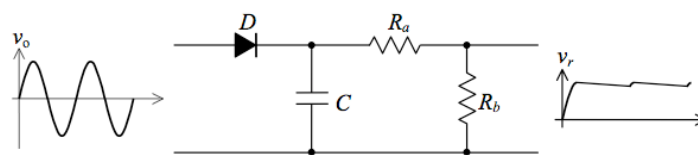


Figura 8 - Retificador de tensão alternada meia onda.

Pode-se mostrar [7] que a tensão máxima na saída do oscilador é dada pela expressão a seguir, onde V_p é a tensão de limiar (*pinch-off*) do transistor de efeito de campo.

$$v_{o_max} \cong \left(1 + \frac{R_6}{R_5}\right) \cdot |V_p|.$$

3.3 Controle Automático de Ganho com Diodos

Amplificadores empregando elementos não-lineares, tais como diodos ou diodos zener são comuns em aplicações de eletrônica analógica. Em diversas aplicações se utiliza diodos semicondutores conectados na saída de circuitos para limitar a excursão da tensão deste circuito entre valores bem definidos, justamente pela escolha dos diodos.

Na Figura 9 mostra-se um amplificador com diodos zener na malha de realimentação [10]. Lembre que a tensão no terminal negativo do amplificador operacional é praticamente igual a tensão no terminal positivo (curto-circuito virtual), ou seja, zero. Assim, os diodos zener conduzirão se:

- $v_o > 0 \quad \rightarrow \quad v_o > V_{Z1} + 0,7 ;$
- $v_o < 0 \quad \rightarrow \quad v_o < -V_{Z2} - 0,7 .$

Portanto, a saída ficará limitada a:

$$-V_{Z2} - 0,7 < v_o < V_{Z1} + 0,7 .$$

Na Figura 9 pode-se verificar pelo gráfico que mostra a relação entre a tensão de saída (v_o) e a tensão de entrada (v_{in}) que o ganho é linear (R_2/R_1) até se atingir a tensão de condução dos diodos zener ($V_{Z1} + 0,7$) se $v_o > 0$, por exemplo, limitando a partir daí a amplitude máxima da tensão de saída. Para tensões negativas na saída o comportamento é similar.

O circuito da Figura 9, se empregado em circuitos osciladores, limitaria a amplitude da tensão de saída, mas iria distorcer esta tensão, visto que o mesmo não altera o ganho de forma linear, mas atua como um ceifador (corta os picos) quando a tensão exceder a tensão zener. Já o circuito da Figura 10 possui um resistor (R_A) conectado em série com os diodos zener, alterando a relação de amplificação (α) do circuito, gerando uma relação linear entre a saída e a entrada, como pode ser visto na mesma figura.

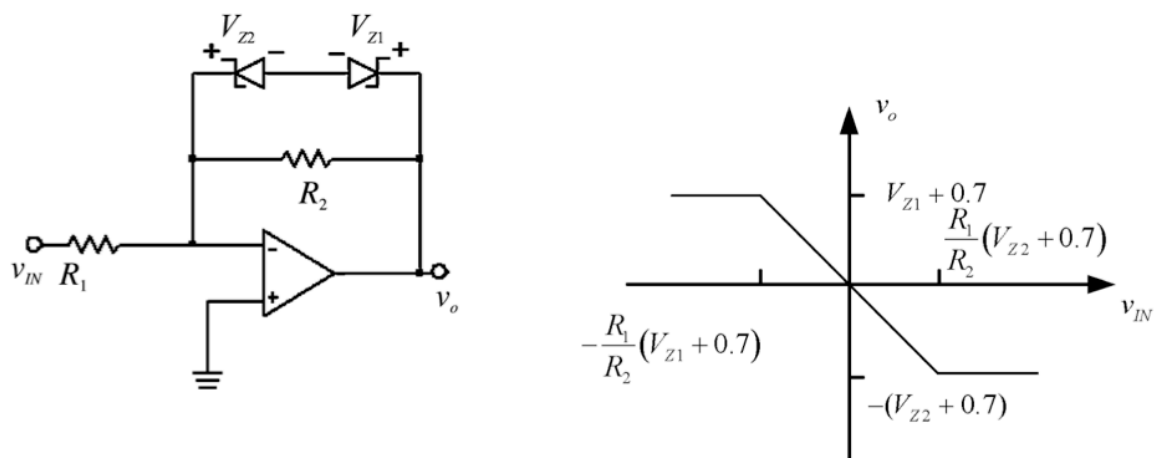


Figura 9 - Amplificador com diodos zener na malha de realimentação.

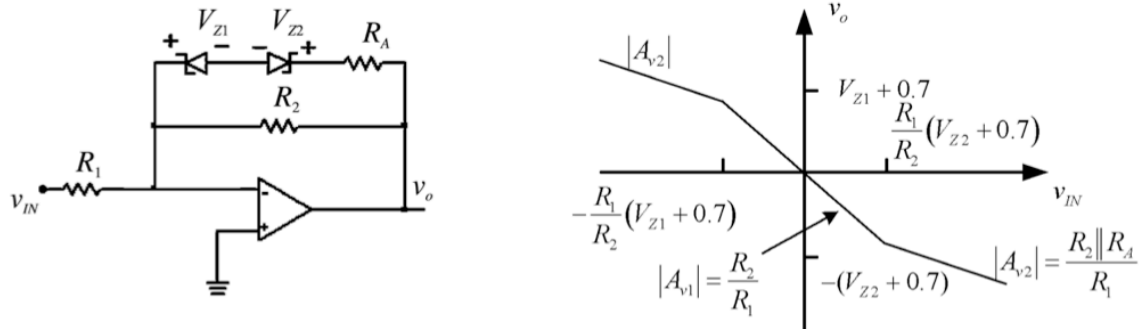


Figura 10 - Amplificador com diodos zener e diodo série na realimentação.

Para o circuito da Figura 10 tem-se duas situações para o ganho em malha fechada:

- $v_o > V_{Z1} + 0,7$ ou $v_o < -V_{Z2} - 0,7$:
 - Diodos zener estão conduzindo;
 - $\alpha = \frac{v_o}{v_{in}} = -\frac{R_2 \parallel R_A}{R_1} = -\frac{\left(\frac{R_2 \cdot R_A}{R_2 + R_A}\right)}{R_1} = -\frac{R_2 \cdot R_A}{R_1 \cdot (R_2 + R_A)}$.
- $-V_{Z2} - 0,7 < v_o < V_{Z1} + 0,7$:
 - Diodos zener estão bloqueados;
 - $\alpha = \frac{v_o}{v_{in}} = -\frac{R_2}{R_1}$.

A Figura 11 mostra um oscilador com Ponte de Wien com diodos na malha de realimentação, operando como controle automático de ganho [10]. Neste circuito, se os diodos estiverem conduzindo o ganho será:

$$\alpha = \frac{v_o}{v_-} = \frac{R_2}{R_1}.$$

Já com os diodos em condução:

$$\alpha = \frac{v_o}{v_-} = \frac{R_2 \parallel R_3}{R_1} = \frac{\frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}}{R_1} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1 \cdot (R_2 + R_3)}.$$

Lembrando que na frequência de oscilação:

$$\beta = \frac{v_o}{v_+} = 3;$$

$$v_+ = v_- = \frac{v_o}{3}.$$

Fazendo a análise das correntes no terminal negativo do amplificador operacional:

$$\frac{v_o}{3 \cdot R_1} = \frac{v_o - \frac{v_o}{3}}{R_2} + \frac{v_o - \frac{v_o}{3} - V_D}{R_3};$$

$$v_o = \frac{3 \cdot V_D}{2 \cdot \left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right) - \frac{R_3}{R_1}}.$$

Pela expressão anterior nota-se que a amplitude da tensão de saída pode ser determinada pela escolha apropriada dos valores dos resistores (R_1 , R_2 e R_3). A tensão de saída depende também da tensão direta dos diodos na malha de realimentação.

Por exemplo, considerando os valores dos componentes a seguir, a tensão de saída será:

$$R_1 = 4,65 \text{ k}\Omega, R_2 = 10 \text{ k}\Omega \text{ e } R_3 = 50 \text{ k}\Omega;$$

$$V_D = 0,72 \text{ V}, \text{ valor típico para diodos de sinal (1N4148);}$$

$$v_o = \frac{3 \cdot V_D}{2 \cdot \left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right) - \frac{R_3}{R_1}} = \frac{3 \cdot 0,72}{2 \cdot \left(1 + \frac{50k}{10k}\right) - \frac{50k}{4,65k}} = 1,73 \text{ V}.$$

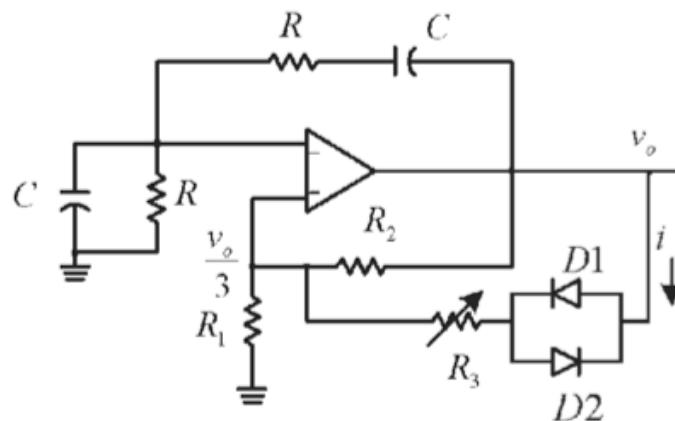


Figura 11 - Oscilador com Ponte de Wien e diodos para CAG.

Outros osciladores com Ponte de Wien são mostrados nas Figura 12 e Figura 13. Suas funções de transferência são obtidas conforme feito acima, respectivamente:

$$v_o = \frac{3 \cdot (V_Z + V_D)}{2 \cdot \left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right) - \frac{R_3}{R_1}};$$

$$v_o = \frac{3 \cdot V_D}{\left(2 - \frac{R_x}{R_1}\right) \cdot \left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right) - \frac{R_3}{R_1}}.$$

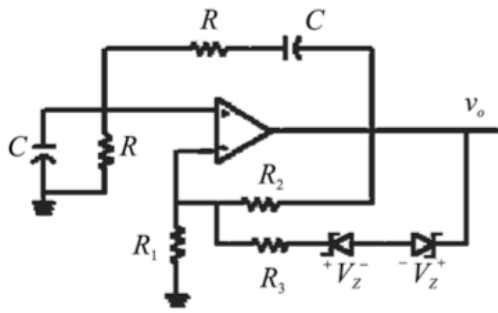


Figura 12 - Oscilador com Ponte de Wien diodos zener no CAG.

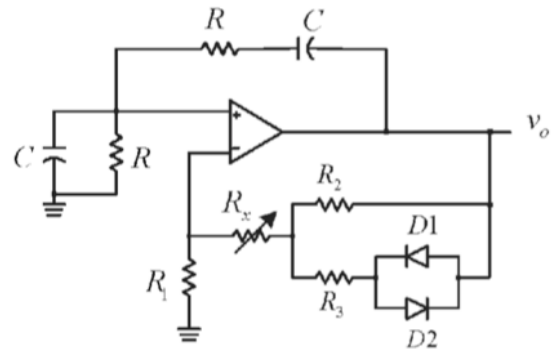


Figura 13 - Variação do oscilador com Ponte de Wien diodos zener no CAG.

3.4 Exemplo de Projeto de Controle Automático de Ganho com Diodos

Considerando o oscilador com Ponte de Wien mostrado na Figura 11, pede-se para determinar seus elementos para:

$$\omega_o = 10 \text{ krad/s} \quad \rightarrow \quad F_o = \frac{\omega_o}{2 \cdot \pi} = 1.591,55 \text{ Hz};$$

$$v_o = 2V.$$

Escolhendo um capacitor de $0,01 \mu\text{F}$:

$$\omega_o = \frac{1}{R \cdot C} \quad \rightarrow \quad R = \frac{1}{\omega_o \cdot C} = \frac{1}{10k \cdot 0,01\mu} = 10 \text{ k}\Omega.$$

Para iniciar as oscilações, o ganho do sistema deve ser um pouco maior do que unitário, assim, sabendo que para atender ao critério de Barkhausen $\alpha = 2$:

$$\alpha = \frac{R_2}{R_1} \rightarrow 2,2.$$

Escolhendo então R_2 , determina-se R_1 :

$$R_2 = 11 \text{ k}\Omega;$$

$$R_1 = \frac{R_2}{\alpha} = \frac{11k}{2,2} = 5 \text{ k}\Omega.$$

O resistor R_3 é determinado em função da tensão desejada na saída:

$$v_o = \frac{3 \cdot V_D}{2 \cdot \left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right) - \frac{R_3}{R_1}} \quad \rightarrow \quad R_3 = \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot (3 \cdot V_D - 2 \cdot v_o)}{(2 \cdot R_1 - R_2) \cdot v_o};$$

$$R_3 = \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot (3 \cdot V_D - 2 \cdot v_o)}{(2 \cdot R_1 - R_2) \cdot v_o} = \frac{5k \cdot 11k \cdot (3 \cdot 0,72 - 2 \cdot 2)}{(2 \cdot 5k - 11k) \cdot 2} = 50,6 \text{ k}\Omega \quad \rightarrow \quad R_3 = 50 \text{ k}\Omega.$$

O circuito projetado acima foi simulado, conforme mostrado na Figura 14. A forma de onda da tensão de saída é mostrada na Figura 15. Ajustando o valor de R_3 para ser obter 2 V de pico na tensão de saída obteve-se um valor de 73 k Ω , o que equivale a uma tensão direta para o diodo de 0,45 V.

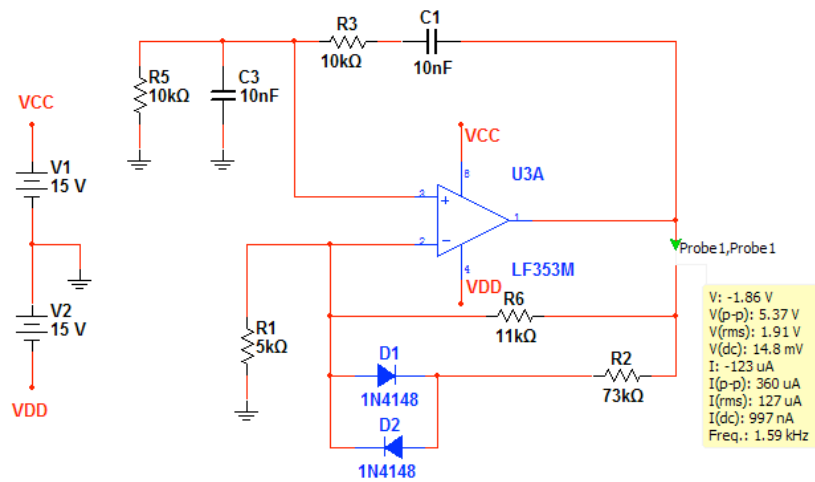


Figura 14 - Oscilador com Ponte de Wien para simulação.

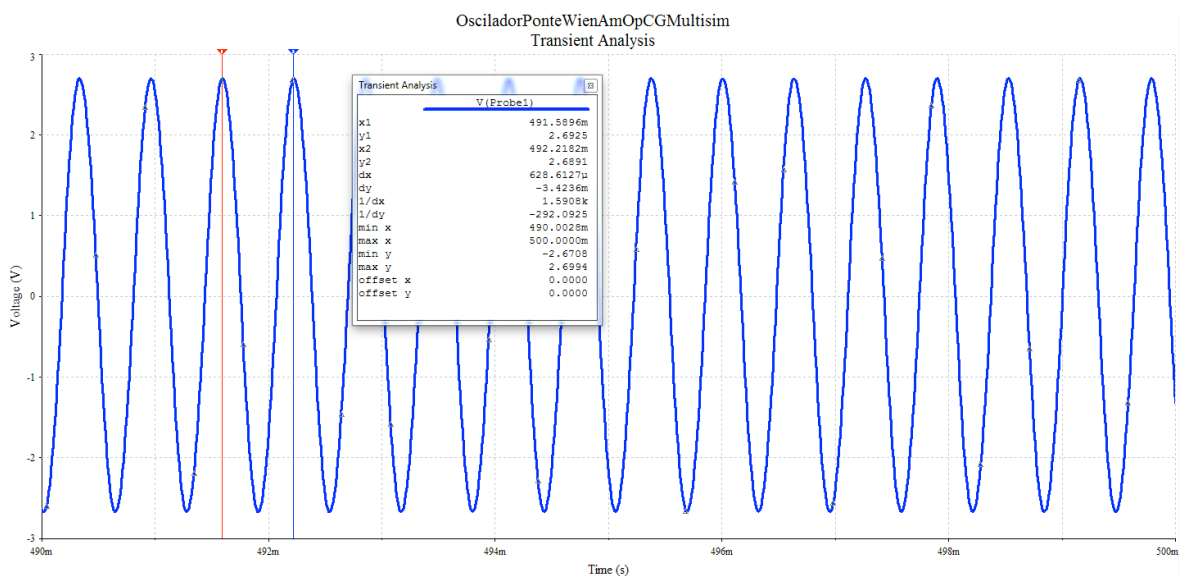


Figura 15 - Forma de onda da tensão de saída do oscilador simulado.

A expressão que permite calcular o resistor R_3 em função da tensão desejada na saída depende fortemente da queda de tensão direta do diodo (V_D). Assim, o projeto leva a melhores resultados se for considerada a curva $I_F \times V_D$ do diodo. No circuito da Figura 14 tem-se que:

$$v_+ = v_- = v_o \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2 // R_3} = 2 \cdot \frac{5k}{5k + 11k // 73k} = 0,69V ;$$

$$i_D = \frac{v_o - v_-}{R_3} = \frac{2 - 0,69}{73k} = 0,018mA .$$

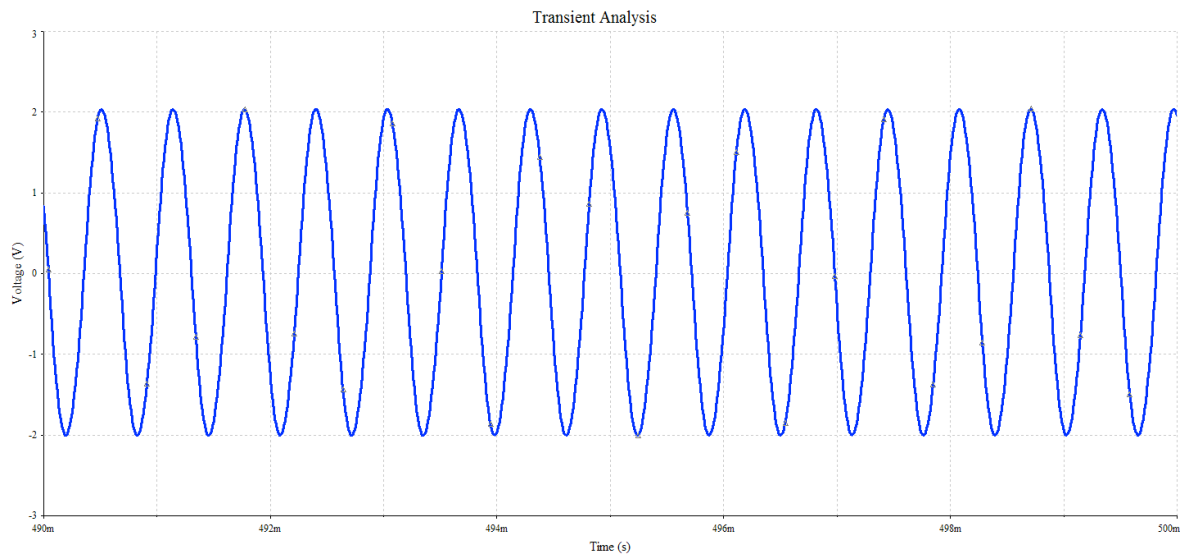


Figura 16 - Tensão de saída após ajuste em R_3 .

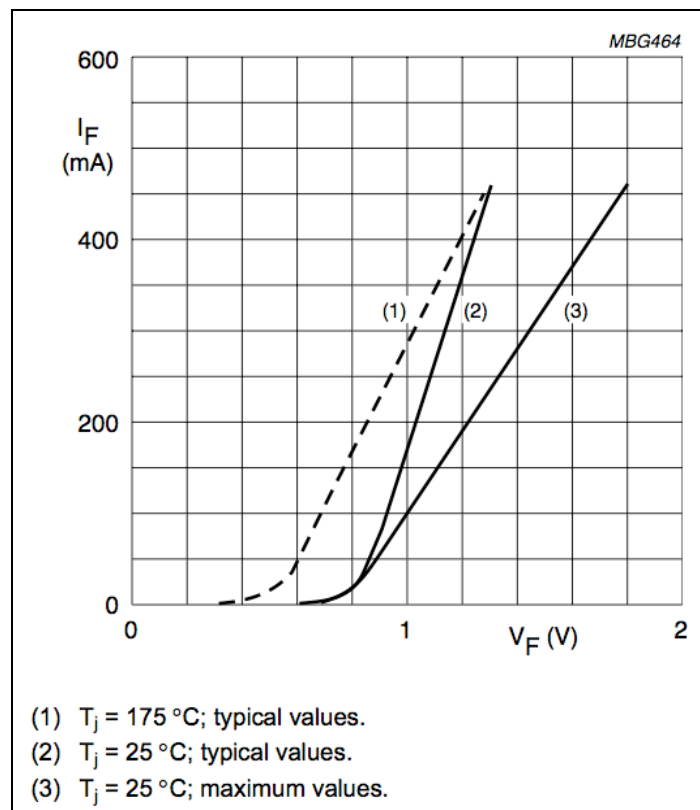


Figura 17 - Curva $I_F \times V_D$ do diodo 1N4148.

Com estes valores e com a Figura 17 pode-se verificar que a tensão direta do diodo terá valores entre 0,6 e 0,8 V e difícil de ser estimada pela curva característica. Se concluí daí que determinar o valor exato do resistor R_3 em função da tensão desejada na saída e da tensão direta dos diodos é uma tarefa que exigirá ajustes via simulação ou bancada. Por outro lado, pode-se utilizar a equação que relaciona $I_F \times V_D$, obtendo-se então melhores resultados.

Exercícios Gerais

Exercício 01:

Explique o funcionamento do controle automático de ganho do oscilador com Ponte de Wien da Figura 18.

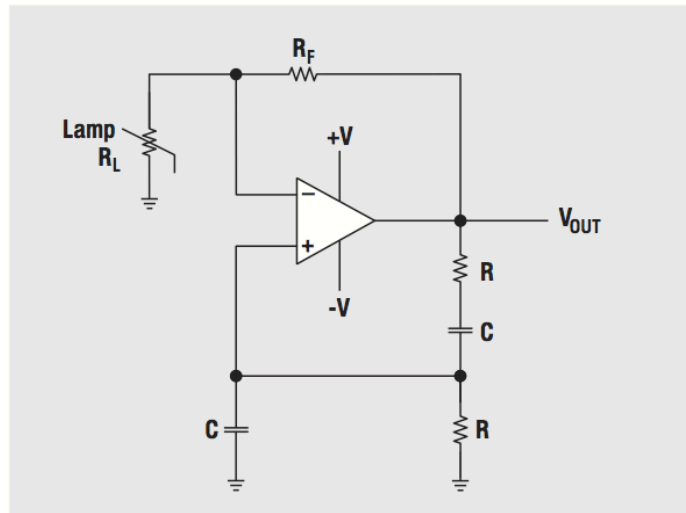


Figura 18 - Circuito para exercício 1.

Exercício 02:

Explique o funcionamento do controle automático de ganho do oscilador com Ponte de Wien da Figura 18.

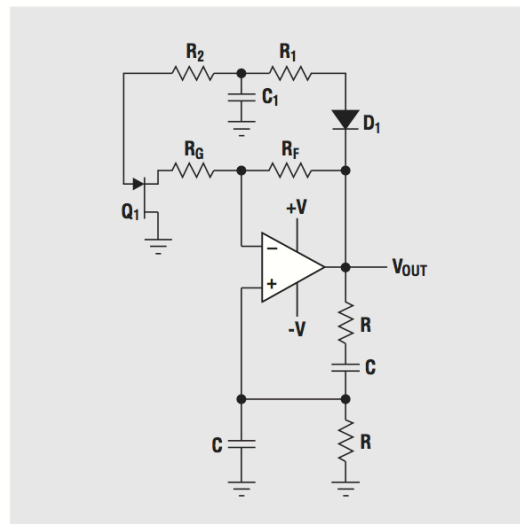


Figura 19 - Circuito para exercício 2.

Exercício 03:

Projete o circuito da Figura 19 para uma frequência de oscilação de 5 kHz e tensão de saída de 5 V.

Exercício 04:

Explique o funcionamento do circuito da Figura 20.

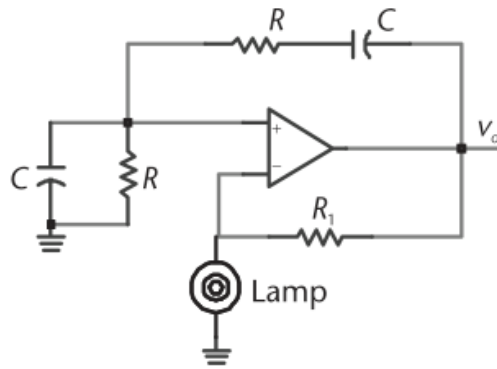


Figura 20 - Circuito do oscilador para exercício 04.

Exercício 05:

Explique o funcionamento dos circuitos das Figura 22 e Figura 22.

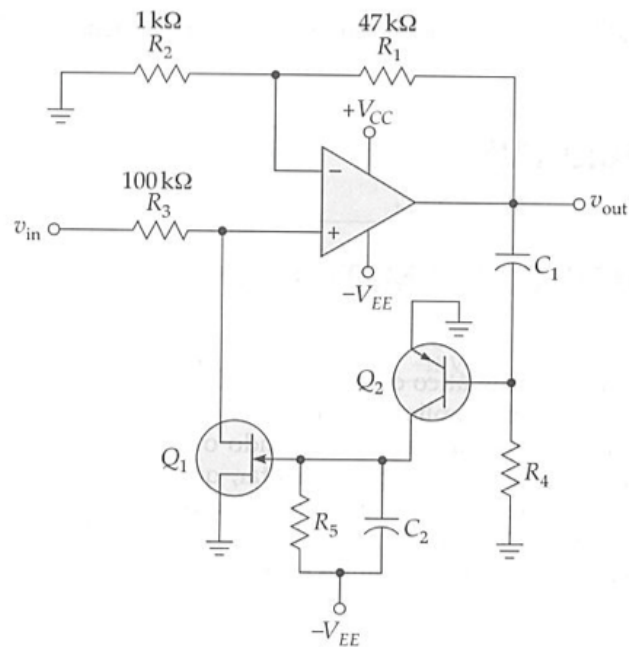


Figura 21 - Amplificador com controle automático de ganho.

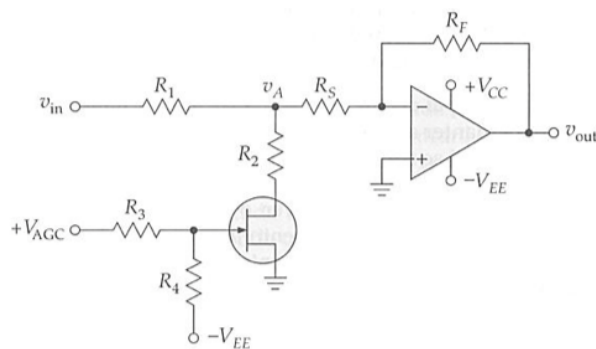


Figura 22 - Amplificador com CAG.

4 Referências

- [1] BOYLESTAD, R. L. e NASHELSKY, L. Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos. 8ª ed. Rio de Janeiro: Prentice Hall do Brasil, 1984.
- [2] A. P. MALVINO. Eletrônica. Volumes 1 e 2. Editora McGraw Hill do Brasil, São Paulo, 1987.
- [3] LALOND, David E.; Ross, John A. Princípios de Dispositivos e Circuitos Eletrônicos – volumes 1 e 2. Makron Books. São Paulo, 1999.
- [4] BOGART JR, Theodore F. Dispositivos e Circuitos Eletrônicos – volumes 1 e 2. Makron Books. 3ª ed, São Paulo, 2001.
- [5] PERTENCE JUNIOR, A. Eletrônica Analógica: Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos: teoria, projetos, aplicações e laboratório. Porto Alegre: Bookman, 2003.
- [6] SEDRA, A. S. Microeletrônica. Volume 2. São Paulo: Makron Books, 1995.
- [7] MIYARA, F. Osciladores Senoidales. Segunda edición, 2004. Disponível eletronicamente: <http://www.fceia.unr.edu.ar/enica3>. Acessado em 12/03/2012.
- [8] SOBRINHO, J. P. F.; Carvalho, J. A. D. Osciladores. Editora Érica. São Paulo, 1992.
- [9] FERREIRA, G. S. e SCHLICHTING, L. C. M. Osciladores e Multivibradores. Notas de aula. Departamento Acadêmico de Eletrônica, Campus Florianópolis, Instituto Federal de Santa Catarina, 2011.
- [10] LINEAR COMPONENTS, F. Theory of Oscillators. Chapter 1: <http://www.linearcomponents.com>. Acessado em 19/05/2012.