

Experiência 5: Circuitos osciladores e conversores digital-analógicos

Esta experiência analisa *circuitos osciladores e conversores digital-analógicos*.

Circuitos osciladores são fundamentais em eletrônica, servindo como temporizadores, clocks e geradores de sinal. Todo equipamento de medição que envolve medidas cíclicas, como osciloscópios ou multímetros digitais, contém osciladores. A experiência foca em circuitos de relaxação (com portas lógicas e capacitores) e no circuito integrado 555 (que envolve resistores, capacitores, transistor de potência e flip-flop).

Existem várias maneiras de classificar um circuito oscilador. Em primeiro lugar, um circuito oscilador pode produzir diferentes tipos de onda: quadrada, triangular, senoidal, dente de serra, rampa. Em segundo lugar, circuitos osciladores variam em estabilidade e precisão. Os circuitos mais simples, que utilizam resistores e capacitores em conjunto com portas lógicas, não têm frequências precisas e podem ser afetados por temperatura. Os circuitos mais complexos em geral utilizam cristais piezelétricos para produzir frequências precisas. Osciladores *de relaxação* utilizam o seguinte princípio: um capacitor é carregado através de um resistor (fazendo com que a tensão no capacitor suba gradualmente) até certo ponto; a partir desse ponto o capacitor é descarregado, e o ciclo recomeça.

Para entender o conteúdo da experiência, verifique os seguintes pontos do livro texto:

- Circuito astável com amplificador operacional (Capítulo 13.5).
- Circuitos com CI 555 (Capítulo 13.7).

Os circuitos relevantes para esta experiência estão apresentados na Fig. 19.



Figura 18 – Conexões de CI TL081 e CI 555

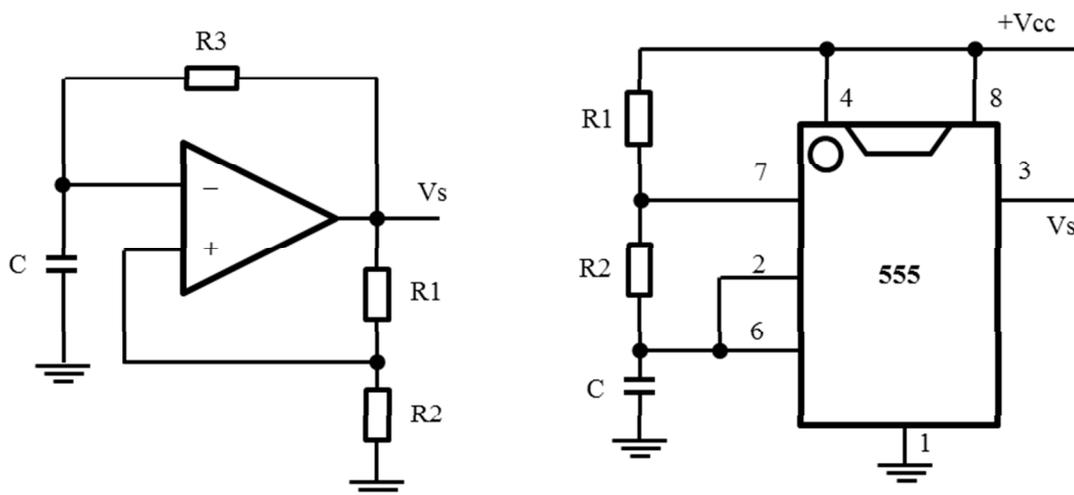


Figura 19 – Circuitos osciladores astável com amplificador operacional e com CI 555

Além disso, a experiência aborda conversores digital-analógicos. Um conversor digital-analógico (DAC) transforma um número binário em um nível de tensão correspondente. Suponha que um DAC de 4 bits deva ser projetado, gerando uma saída entre 0 e 15 volts. O intervalo 0-15 deve então ser dividido em 15 subintervalos (já que o zero corresponde à terra). Se a entrada for 0010 (ou seja, número 2 em binário), a saída deve ser $2 * (15/15) = 2$ volts, e assim por diante.

Existem várias maneiras de construir um conversor digital-analógico. Um dos esquemas mais simples é ilustrado na Figura 20, para um conversor de 3 bits. O princípio de funcionamento do circuito é baseado no comportamento de “somador” que o amplificador operacional permite. Note que o ponto A é um terra virtual devido à realimentação. Portanto, cada entrada X, Y ou Z gera uma corrente inversamente proporcional ao resistor entre a entrada e o terra virtual. Considere primeiro o sinal X e suponha que $X = V_{cc}$. Nesse caso, a corrente por R_1 é $V_{cc} / 2 \text{ k}\Omega$, e essa mesma corrente fluirá por R_4 , gerando uma tensão de $-V_{cc} / 2$ na saída. Considere agora o sinal Y e suponha que $Y = V_{cc}$. Pelo mesmo raciocínio (baseado na terra virtual em A), o sinal Y contribuirá com $-V_{cc} / 4$ na saída. Finalmente, se $Z = V_{cc}$, a contribuição de Z será $V_{cc} / 8$ na saída. Todas essas tensões são somadas (devido à terra virtual) e o circuito adquire um carácter de DAC. Portanto a saída é proporcional ao número binário XYZ (note que X é o dígito mais significativo): $V_s = -(X/2 + Y/4 + Z/8)$.

É importante notar que o circuito da Figura 20 coloca o **amplificador operacional em configuração inversora**; portanto a constante de proporcionalidade entre saída e entradas é negativa.

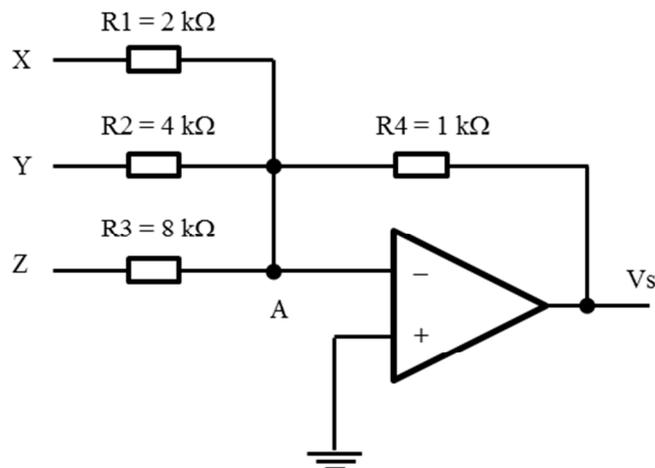


Figura 20 – Conversor digital-analógico por somador

Um fato muito importante sobre o circuito da Fig. 20 é o chamado “Princípio da Superposição”. O Princípio da Superposição simplesmente enfatiza que um circuito linear com muitas entradas pode ser analisado em etapas: cada entrada pode ser analisada separadamente (com todas as outras entradas em terra); o efeito de todas as entradas é a soma dos efeitos das entradas em separado. Como o circuito da Fig. 20 é linear, este princípio pode ser utilizado.

Este tipo de conversor por somador tem um problema sério: para criar conversores de muitos bits, passa a ser necessário utilizar resistores de resistência muito alta. Como ilustração, suponha que a menor resistência em um DAC de 14 bits é de $1 \text{ k}\Omega$ e calcule o valor da maior resistência. Para resolver esse problema, existem circuitos que usam malhas de resistores para “simular” a duplicação de resistências.

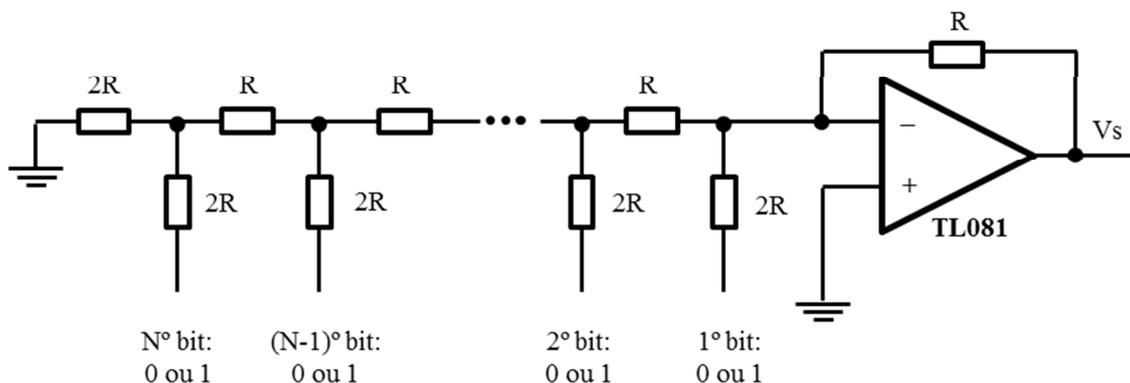


Figura 21 – Conversor digital-analógico com malha resistiva

O circuito da Fig. 21 utiliza uma malha simétrica de resistores de dois valores (R e $2R$) para gerar um conversor digital-analógico. Esta malha é chamada rede $R2R$. A derivação das propriedades da rede $R2R$ é relativamente complexa, e está resumida no Apêndice. A ideia básica é a seguinte: como o circuito é linear, é possível analisar uma

entrada por vez. Cada entrada “enfrenta” uma resistência duas vezes maior que a entrada anterior, devido à presença de um bloco $2R/R$. O amplificador operacional simplesmente soma todas essas entradas.

No circuito da Fig. 21, o 1º. bit é o mais significativo, e o Nº. bit é o menos significativo.

Note que o valor exato do resistor R não é importante no resultado final; o que importa é que exista uma relação de 2 para 1 entre os resistores indicados. Note também que o circuito é bastante rápido; o único atraso na conversão é o tempo de resposta do amplificador operacional, que em geral é extremamente pequeno. Finalmente, note que **o amplificador está na configuração inversora**, portanto V_s é negativa.

A gama de aplicações de conversores digital-analógico é vasta, pois DACs são utilizados para controlar motores e sensores a partir de computadores. Além disso, DACs podem ser utilizados como blocos básicos na construção de conversores analógico-digital (tópico da próxima experiência). Existem variantes em torno da ideia de conversores digital-analógicos: conversor digital-frequência (produzem uma frequência proporcional a um número binário) e conversor frequência-analógico (produzem uma tensão proporcional a uma frequência de entrada, como um rádio FM).

Atividade 1 (rel)

- Monte um oscilador astável com amplificador operacional TL081 ($C = 10 \text{ nF}$, $R_1 = R_2 = R_3 = 10 \text{ k}\Omega$) e utilizando alimentação de 12V e -12V .
- Faça os **gráficos** das formas de onda nos pinos 2, 3 e 6. Meça a frequência e a amplitude dos sinais.

Atividade 2 (rel)

- Monte um oscilador com o CI 555, utilizando $C = 10 \text{ nF}$, $R_1 = R_2 = 100 \text{ k}\Omega$ e alimentação $V_{cc} = 12 \text{ V}$.
- Faça os **gráficos** das formas de onda dos pinos 2, 3, e 7. Meça a frequência e amplitude dos sinais.

Atividade 3 (rel)

- Pegue o conversor digital-analógico de quatro bits já montado, utilizando a malha resistiva $R2R$, conforme o projeto mostrado na Fig. 22. Entenda o circuito.
- Use $V_{ref} = 5 \text{ volts}$ e alimentação simétrica $\pm 10 \text{ volts}$ no amplificador operacional. Este circuito tem quatro sinais de entradas (simbolizados pelas quatro chaves), que podem estar em terra (zero) ou tensão de referência V_{ref} (um). A saída é igual ao valor de tensão representado pelas entradas em binário; onde cada bit corresponde a $V_{ref} / 16$. Note que todos os resistores têm valor R ou $2R$.
- Para entrada 1010, qual é a tensão de saída (em função de R e V_{ref})?

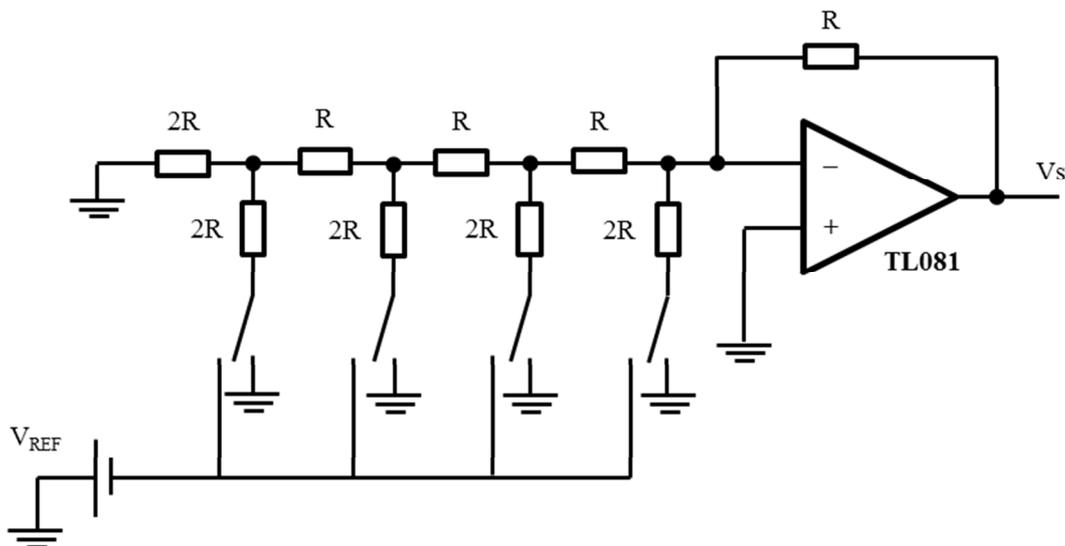


Figura 22 – Projeto de um conversor digital-analógico

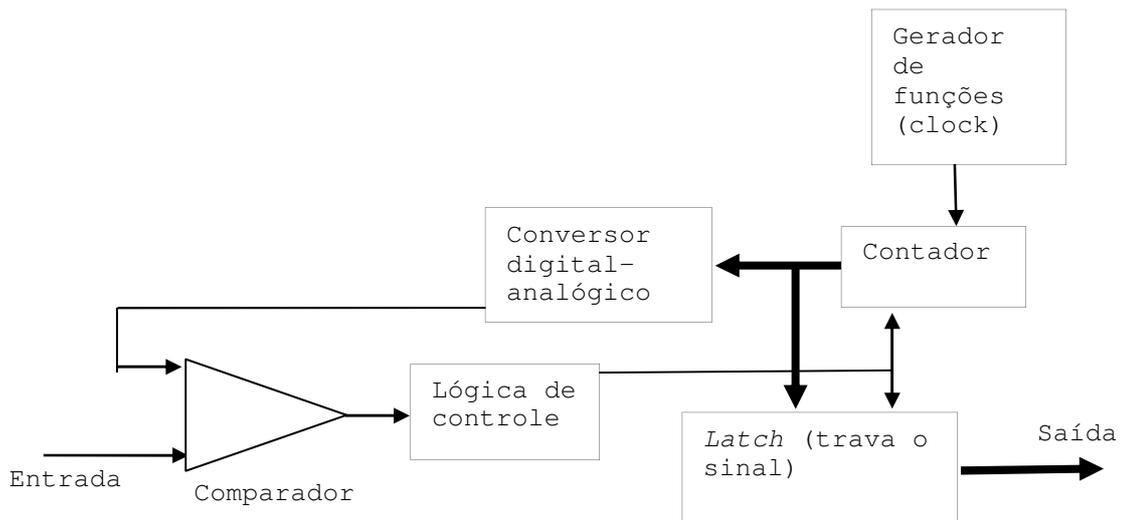
Apêndice: Conversores Analógico/Digital

Conversores analógico-digitais (conversores AD) transformam um sinal analógico em um conjunto de bits. Conversores AD são circuitos fundamentais em automação, particularmente em instrumentação e controle, já que sensores em geral produzem sinais analógicos. O objetivo desta experiência é projetar e montar um conversor analógico-digital que será usado como um multímetro simplificado.

Existem vários métodos para construir um conversor AD. Os mais comuns são:

- O método mais rápido (chamado *flash conversion*) consiste em utilizar um banco de comparadores. Por exemplo, para gerar um conversor AD de 4 bits, são necessários 16 comparadores. O primeiro comparador compara o sinal de entrada com 1/15 de V_{cc} ; o segundo comparador compara o sinal de entrada com 2/15 de V_{cc} ; e assim por diante. A desvantagem é o grande número de comparadores utilizados.
- Conversão por aproximação sucessiva. Uma série de tensões é gerada digitalmente, até atingir a tensão de entrada. Esse será o método utilizado nessa experiência e será detalhado adiante.
- Existem métodos baseados na geração de rampas de tensão (rampa simples, dupla rampa). Em geral, a conversão por rampa funciona com a geração de uma rampa de tensão cuja inclinação é proporcional ao sinal de entrada. Um contador digital conta quantos períodos de clock são necessários para esta rampa de tensão ir de um valor V_{min} a um valor V_{max} . O valor do contador quando esse tempo passa é proporcional à tensão de entrada. Conversão AD por rampa é um método relativamente complexo, mas tem vantagens em termos de precisão e velocidade. Para uma determinada precisão, um conversor por rampa em geral é mais veloz que o conversor por aproximações sucessivas correspondente.

O diagrama de blocos de um conversor AD por aproximações sucessivas está na figura abaixo.



O circuito é conceitualmente bastante simples. Para um dado sinal de entrada, o contador inicia contagem em zero (binário) e prossegue até o valor máximo binário. Cada valor do contador é transformado em um valor analógico (por um conversor digital-analógico) e comparado com o sinal de entrada. Quando o sinal de entrada é igual ao sinal do conversor digital-analógico, o conteúdo do contador é exatamente a conversão digital do sinal de entrada.

O diagrama de blocos contém:

- Um contador binário e um conversor digital-analógico que devem ter números de bits correspondentes; se o contador conta 4 bits, o DAC tem que converter 4 bits.
- O circuito de *latch* garante que a saída contém a conversão mais recente, e impede que a saída receba os sinais da contagem produzida pelo contador. Produza o latch de 4 bits usando 4 flip-flops tipo D (com o circuito integrado 7474, cuja pinagem já foi mostrada).
- A lógica de controle deve garantir duas coisas: quando o sinal de entrada é igual ao sinal do conversor digital-analógico (ou seja, na borda de subida do comparador), o latch deve segurar o sinal do contador e o contador deve zerar. Faça a lógica de controle verificando se o contador e os flip-flops obedecem à borda de subida ou à borda de descida.

O circuito acima demora no máximo 16 períodos de clock para “encontrar” o valor de saída em um conversor AD de 4 bits. A conversão de k bits em um conversor por aproximações sucessivas pode demorar até 2^k períodos de clock, o que pode ser proibitivo em uma aplicação prática. Por isso, circuitos profissionais de aproximações sucessivas (e circuitos implementados em circuitos integrados) utilizam uma outra técnica de aproximações sucessivas. A idéia é executar uma “busca binária” para encontrar o sinal de entrada. Em lugar de um contador, uma lógica de busca binária é construída. Inicialmente, todos os bits de entrada do DAC são colocados em 0. Então, a partir do bit mais significativo, cada bit é colocado em 1. Caso a saída do DAC não exceda o sinal de entrada, o bit é deixado em 1; caso contrário o bit volta a ser zero. Dessa forma, a busca pelo sinal de entrada nunca demora mais que k períodos de clock para um conversor de k bits. Convença-se que o esquema descrito faz busca binária!

Conversores AD por aproximação sucessiva são relativamente precisos e rápidos, sendo bastante comuns em circuitos integrados.

Monte o conversor AD projetado no pré-relatório. Utilize o circuito como um voltímetro digital simplificado, medindo entradas contínuas fornecidas pela fonte regulável.

Leitura Adicional

Para entender mais sobre a interface entre circuitos digitais e analógicos, bem como sobre vários tipos de conversores, o livro mais completo e acessível é *The Art of Electronics*, Paul Horowitz e Winfield Hill, Cambridge University Press, 2ª. edição 1989. Infelizmente esse livro não está traduzido para português.