

ELECTRÓNICA E INSTRUMENTAÇÃO

Sebenta de apoio

1. Electricidade	2
1.1 O que é a Electricidade?	2
1.2 De onde vem esta energia?	4
1.3 Primeiro circuito eléctrico	7
1.3.1 Teoria das bandas de energia (parte 1)	7
1.3.2 Corrente eléctrica	8
1.4 Analogias entre a electricidade e outros fenómenos físicos	10
1.5 Lei de Ohm	12
1.6 Já compreendemos a electricidade – mas como a utilizar?	14
1.7 Objectivos e organização do documento	16
2. Análise de Circuitos Resistivos	17
2.1 Introdução	17
2.1 Resistências em série e paralelo	17
2.3 O potencial ‘terra’	22
2.2 Leis de Kirchhoff	23
2.3 Método de Thevenin	25
3. Semicondutores	27
3.1 Teoria das bandas de energia (parte 2)	27
3.1.1 Semicondutores dopados	27
3.1.2 junções p-n	28
3.2 díodos	29
3.3 Transístores	32
3.3.1 Electricidade que controla electricidade	32
3.3.2 Transistor bipolar	35
3.3.3 Circuitos Integrados	37
4. Condicionamento de Sinal Analógico	38
4.1 Componentes dinâmicos – Condensadores e Bobines	38
4.1.1 Condensadores	38
4.1.2 Bobines	43
4.1.3 Resistência, Condensador e Bobine - perspectiva dos três componentes passivos	46
4.1.4 Corrente Alternada	48
4.1.4 Filtros	50
4.2 Amplificadores Operacionais	57
4.2.1 Princípios de funcionamento	57
4.2.2 Circuitos com Ampops	59
5. Condicionamento de Sinal Digital	62
(Pendente)	62
Bibliografia	62

1. Electricidade

1.1 O que é a Electricidade?

A palavra electricidade parece ser uma palavra onde ‘cabe tudo’, pois é frequentemente usada com diferentes sentidos, causando confusão e ambiguidade. O significado mais impreciso, embora muito comum e ‘prático’, é o que se refere ao ‘fluido’ que é transportado pelos cabos eléctricos e faz activar os dispositivos eléctricos – o termo mais adequado para este ‘fluido’ é o de ‘corrente eléctrica, a qual será definida mais adiante. A definição mais correcta para electricidade é a que se refere a todos os fenómenos que resultam das forças de atracção e repulsão entre cargas eléctricas. Qual será a origem destas cargas eléctricas?

A electricidade é um fenómeno natural que tem origem nas propriedades eléctricas das partículas sub-atómicas. A matéria é constituída por átomos que, por sua vez são compostos por neutrões, protões e electrões. Estas partículas têm uma propriedade, designada por carga eléctrica, que é semelhante à propriedade magnética de alguns materiais, e que se manifesta por:

Entre protões gera-se uma força de repulsão

Entre electrões gera-se uma força de repulsão

Entre electrões e protões gera-se uma força de atracção

Entre neutrões e outras partículas não se gera força eléctrica.

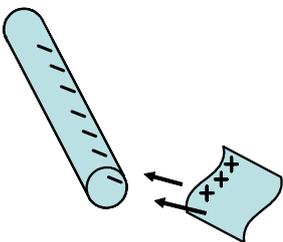
Estes comportamentos explicam-se pelo tipo de carga eléctrica associada a cada umas das partículas sub atómicas:

Protões têm carga positiva (+)

Electrões têm carga negativa (-)

Neutrões têm carga neutra.

Tendo em conta estes dados, as observações mencionadas acima podem generalizar-se como: ‘partículas com carga do mesmo sinal repelem-se, enquanto partículas com cargas de sinal contrário atraem-se’. As propriedades eléctricas estendem-se das partículas sub atómicas aos átomos. Assim, um átomo que possua o mesmo número de protões e electrões apresenta carga eléctrica neutra. Os electrões são as únicas partículas que podem abandonar ou unir-se a um átomo. Devido à saída de electrões pode existir um défice de cargas negativas, tornando o átomo eléctricamente positivo (ião positivo). Ao contrário, a entrada de electrões pode originar um excesso de electrões, tornando o átomo eléctricamente negativo (ião negativo).



A electricidade manifesta-se no nosso dia-a-dia desde as formas mais simples, como o estalar de um relâmpago nos céus, às mais complexas, como o processamento de informação por um PC. Um dos fenómenos eléctricos mais simples que podemos observar ocorre quando esfregamos uma caneta de plástico num tecido de lã. Depois dessa operação, a caneta, se colocada junto a pequenos pedaços de papel atrai-los-á para si. Nesse processo os dois materiais (plástico e lã) foram forçados a juntar-se e afastar-se, o que origina a transferência de electrões entre os dois objectos. Em resultado disso, a caneta ficou com excesso de electrões, enquanto a lã com défice destes. Se de seguida se aproximar a caneta de pequenos pedaços de papel, estes, sob influência das cargas negativas vêm os seus electrões afastarem-se na direcção oposta da caneta, originando átomos electricamente positivos nas extremidades mais

próximas da caneta. Estes são atraídos pelas cargas negativas da caneta, o que explica a força macroscópica de atracção que verificamos entre os dois objectos.

A este tipo de electricidade é comum chamar-se **electricidade estática**. Esta designação usa-se quando se estuda fenómenos eléctricos em que não há condução de cargas entre objectos. Com esta designação não se pretende sugerir que as partículas com carga eléctrica estão paradas. Na verdade, os electrões estão em permanente movimento, mesmo quando permanecem associados a um átomo, uma vez que orbitam em torno dele.

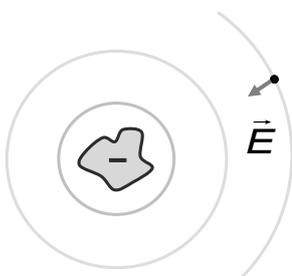
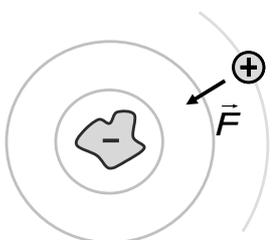
Vamos tentar perceber a origem dos fenómenos que observamos na experiência com a caneta e os pedaços de papel.

Se esfregarmos a caneta contra a lã durante mais tempo ou com mais força verificaremos que esta vai atrair os pedaços de papel com mais vigor. Ao intensificarmos o contacto entre os dois materiais produzimos uma maior troca de electrões e em resultado disso a caneta passou a ter um maior excesso de electrões, induzindo maior força eléctrica sobre os papéis. Como quantificar a ‘electricidade’ existente na caneta? Esta quantidade é medida pela grandeza **carga eléctrica**. Os prótons e electrões possuem a mesma quantidade de carga eléctrica, embora de sinal contrário. A essa carga eléctrica chamamos **carga eléctrica elementar**, e designamos por e . A unidade SI de carga eléctrica corresponde a um número extremamente grande de electrões. Esta unidade é o **coulomb** e corresponde a

<p>Carga Eléctrica: q [C] coulomb = $6.24 \times 10^{18} e$</p>
--

O elevado factor de conversão não é de estranhar uma vez que os fenómenos eléctricos envolvem normalmente um número elevadíssimo de electrões.

Objectos com carga eléctrica exercem uma influência no espaço em seu redor, designada por **campo eléctrico**. Esse efeito sobre o espaço em torno do objecto manifesta-se quando outro objecto com carga eléctrica entra na área de influência do campo eléctrico. Nessas circunstâncias, os objectos atraem-se mutuamente, caso possuam cargas opostas, ou repelem-se, caso possuam cargas com mesmo sinal. O valor dessas forças depende das cargas eléctricas dos objectos, da distância a que eles se encontram e das propriedades do meio envolvente, segundo a expressão da **força eléctrica**:



$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{r}$$

Onde ϵ é a permissividade do meio e r o versor radial que aponta no sentido do afastamento do objecto que produz o campo eléctrico.

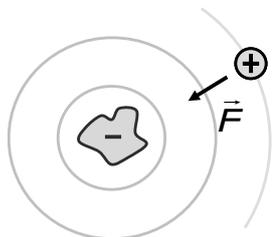
O campo eléctrico é a grandeza que nos diz com que intensidade é que um ponto no espaço está electricamente afectado. Essa grandeza é independente da carga que se pode colocar nesse ponto. A força resultante depende da carga que se coloca no ponto, se ela é positiva ou negativa, por exemplo, mas o campo eléctrico é independente da carga. Assim o campo eléctrico, E , será dado por toda a expressão que calcula a força, excluindo a carga q_2 .

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{q_1}{r^2} \vec{r}$$

Sem surpresa, as unidades de E são $[N/C]$. Uma unidade equivalente a esta é o $[V/m]$ - mais à frente iremos falar da unidade V (volt).

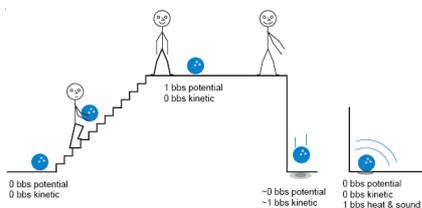
1.2 De onde vem esta energia?

Diariamente usamos energia eléctrica de formas úteis como o transporte de pessoas em comboios, ou simplesmente em actividades lúdicas, como jogar numa *xbox*. Em qualquer dos casos, convertemos energia eléctrica de uma forma que nos é útil. Mas de onde vem esta energia?

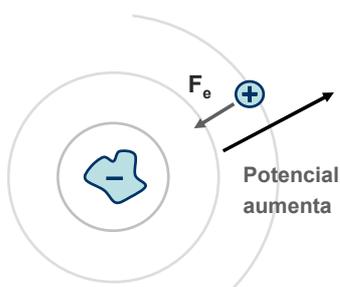


Concentremo-nos na figura ao lado. A atracção que existe entre cargas contrárias significa que, para as afastarmos, precisamos de realizar trabalho, isto é, transmitir energia. Esta energia é recuperada quando as cargas voltam a unir-se, por acção da força eléctrica. Entre estes dois tempos a energia existiu na forma de **energia potencial eléctrica**. Dizemos energia potencial, porque o conjunto das duas cargas afastadas tem o potencial para realizar trabalho (o mesmo que libertar energia), o trabalho que é necessário para deslocar as cargas até elas se encontrarem.

Este não é o único tipo de energia potencial que conhecemos – mais familiar ainda é o tipo de energia com que lidamos a todo o momento: a **energia potencial gravítica**. As semelhanças com a energia potencial eléctrica são óbvias: devido à força de atracção entre os corpos e a terra, precisamos de despendar energia para elevar um objecto. Essa energia fica retida na forma de energia potencial gravítica, enquanto o objecto é mantido a essa altura. Quando o objecto é libertado ele rapidamente cai, e a energia potencial é recuperada na forma de energia cinética.



Esta é ainda mais rapidamente convertida noutras formas de energia - se a queda não for amparada produz-se um estrondo e/ou a quebra do objecto! A energia potencial retida pelo conjunto objecto+terra depende de duas variáveis: da massa do objecto e da altura a que ele se encontra. Para caracterizar a segunda dependência definimos uma grandeza, designada por **potencial gravítico**, que descreve a capacidade de armazenar energia em diferentes alturas. O potencial gravítico é a grandeza que nos permite exprimir que uma altura superior ‘tem’ mais energia que uma altura inferior, se esquecermos a influência da massa. Quanto maior for a altura maior é o potencial gravítico, pois maior será a energia potencial, para o mesmo objecto. O potencial gravítico é a energia por unidade de massa associada a cada ponto¹. Todos os dias lidamos intuitivamente com diferentes potenciais gravíticos... todos nós preferimos cair de uma altura de 20 cm do que de uma altura de 1 m – no segundo caso a energia libertada irá certamente magoar-nos.

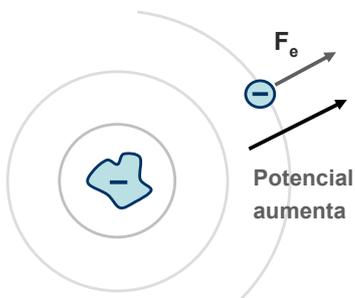
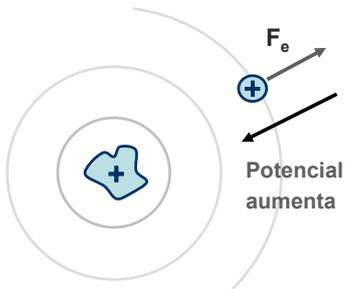


Será que estes conceitos se aplicam ao campo eléctrico? Sim, mas com algumas particularidades, que veremos mais à frente. Voltando ao exemplo das duas cargas de sinal contrário, diremos que quanto mais afastada se encontrar a carga (+), maior será a sua energia potencial, que é o mesmo que dizer que a carga se encontra num ponto de maior potencial eléctrico. Tal como no caso da gravidade, maior potencial eléctrico significa maior energia potencial armazenada.

O potencial eléctrico (V) indica a energia disponível num ponto dentro de um campo eléctrico, por unidade de carga (energia específica). A unidade de medida é o *volt* e corresponde a energia por unidade de carga: $volt = joule/coulomb$.

¹ Não se apresentam aqui expressões explícitas para calcular o potencial gravítico ou o potencial eléctrico, pretende-se apenas transmitir a noção de como evoluem num campo gravítico/eléctrico e como se relacionam com a energia potencial.

Potencial Eléctrico: $V[V]$ $volt=joule/coulomb$

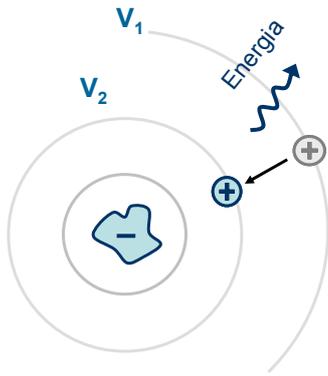


O campo eléctrico distingue-se do campo gravítico pelo facto de a propriedade que gera o campo gravítico – a massa – ser sempre positiva, enquanto as cargas eléctricas podem ser positivas ou negativas. Assim, enquanto no caso do campo gravítico o potencial é sempre mais baixo quando nos aproximamos do corpo que o cria, no caso do campo eléctrico o potencial eléctrico diminui quando nos aproximamos de uma carga negativa e aumenta quando nos aproximamos de uma carga positiva.

Outra característica um pouco perturbadora dos fenómenos eléctricos é o facto de que a energia disponível não é, em todos os casos, maior quando o potencial eléctrico é maior. Isto não se verifica se a carga de teste for negativa. No exemplo inicial, se substituirmos a carga de teste por uma carga negativa, a força eléctrica tende a afastá-la do objecto electrizado negativamente e levá-la para infinito. Neste, caso a energia potencial é máxima quando as cargas estão juntas, isto é, quando colocamos a carga no valor mais baixo de potencial – repare-se que o potencial não depende da carga de teste, apenas da carga que cria o campo eléctrico. Este exemplo serve para demonstrar que, enquanto as cargas positivas se deslocam dos potenciais mais altos para os mais baixos, as cargas negativas deslocam-se dos mais baixos para os mais altos. Em qualquer dos casos, as cargas deslocam-se no sentido em que se liberta energia potencial.

Disse-se atrás que o potencial eléctrico descreve a energia por unidade de carga existente num ponto dentro de um campo eléctrico. Pode colocar-se agora uma questão provocadora: qual será a relevância prática desse valor? Será que conseguimos extrair toda a energia descrita por esse valor de potencial? Extrair essa energia significaria levar os corpos a estados de energia nula. Para tal teríamos de levar todas as cargas de sinais iguais do universo a afastarem-se infinitamente... então teríamos extraído toda a energia e os corpos teriam energia nula. Naturalmente, isso não é alcançável nem especialmente interessante para as aplicações que estudamos. Com este argumento queremos demonstrar que os processos físicos com que lidamos tratam de levar os corpos entre diferentes níveis de energia, mas o nível zero nunca é alcançado. Consequentemente, estamos pouco interessados nos valores absolutos de potencial, e mais nas **diferenças de potencial** que existem entre os níveis energéticos com que trabalhamos². O valor absoluto do potencial, só por si, tem pouca importância útil. Na prática, ao estudarmos fenómenos eléctricos adoptamos o potencial de um corpo como sendo um potencial referência (potencial zero) e descrevemos o potencial de todos os outros pontos relativamente a esse. A análise correcta de um fenómeno eléctrico depende de mantermos essa coerência. O corpo que mais comumente é usado como referência para a análise de circuitos eléctricos é a própria terra, por ser aquele que garante um valor mais estável de potencial (é difícil imaginar que podemos electrificar toda a terra positiva ou negativamente!). Em suma, como não estarmos interessados nos valores de potencial absoluto, quando usamos a grandeza **potencial** estamos

² Também aqui a analogia com a gravidade pode ajudar a clarificar estas ideias. O valor do potencial gravítico indica a energia que é possível libertar de um corpo se o deslocarmos até ao centro da terra, posição em que ele terá energia potencial nula. Obviamente, esse cenário é pouco interessante, porque deslocamos objectos entre posições muito distantes dessa.



normalmente a referir-nos ao potencial relativo a um potencial de referência, por exemplo o da terra. Em circuitos eléctricos é comum usar também a expressão *tensão* para esse potencial.

Quando nos referimos à diferença entre dois potenciais onde nenhum deles é o de referência usamos a expressão ‘diferença de potencial’ ou, em circuitos eléctricos, ‘queda de tensão’. A diferença de potencial num campo eléctrico é a medida da energia que pode ser extraída entre dois pontos. O valor efectivo da energia dependerá do valor e sinal da carga deslocada. A diferença de potencial é o trabalho realizado ao deslocar uma carga de $+1C$ entre os dois pontos. No caso genérico de uma carga Q , o trabalho realizado ao deslocá-la será: $w=Q(V_1-V_2)$.

Em resumo: ao analisarmos circuitos eléctricos vamos estar a medir a diferença de potencial entre diversos pontos do circuito. Ao detectarmos uma diferença de potencial devemos entender esse valor como uma capacidade de libertar energia, através do movimento de cargas eléctricas. No caso das cargas negativas a energia máxima é obtida quando ela se desloca do potencial mais baixo para o mais alto. No caso das cargas positivas, obtém-se toda a energia disponível quando elas se deslocam do potencial mais alto para o mais baixo.

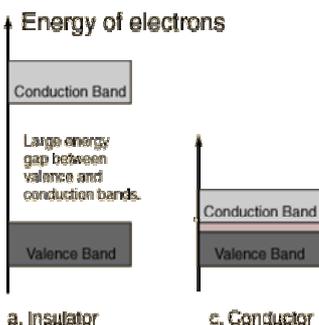
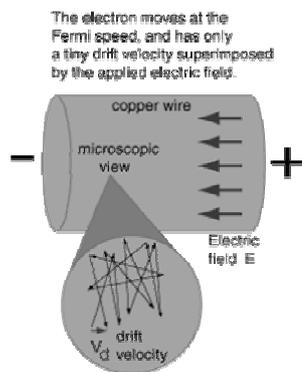
1.3 Primeiro circuito eléctrico

Aquilo a que se convencionou designar electricidade estática tem pouca utilidade para fins práticos. Dificilmente conseguimos encontrar uma finalidade para a electricidade criada nas nossas camisolas de lã num dia de Inverno, ou num pente após escovar o cabelo, que não seja a da simples demonstração dos fenómenos eléctricos. Nestes exemplos, as cargas eléctricas foram de alguma forma separadas, dando origem a objectos electrificados – com excesso ou défice de electrões. Quando estes objectos tocam num material condutor há uma breve passagem de electrões (por vezes produzindo faísca) que repõe o equilíbrio eléctrico. A passagem de electrões só passa a ter relevância prática quando é possível manter um fluxo de electrões contínuo no tempo. Nos aparelhos eléctricos que usamos no dia a dia há um fluxo permanente de cargas eléctricas, a que chamamos **corrente eléctrica**.

1.3.1 Teoria das bandas de energia (parte 1)

Como é que conseguimos gerar esse fluxo contínuo de electrões? É preciso antes de mais nada descrever os materiais em que esse fluxo se dá. Estes materiais são designados por materiais condutores, de que os metais são os mais importantes representantes.

Eis uma explicação sistemática do porquê da condução de corrente eléctrica nos metais.



- Os electrões gravitam em torno do núcleo do átomo, um pouco como satélites em volta da terra.
- Quanto maior for a energia do electrão, mais longínqua é a órbita. Se atirmos uma pedra ao ar conseguimos colocá-la em órbita? Não, é preciso imprimir-lhe mais energia. Quanto maior for essa energia, maior é o raio da sua órbita.
- Os níveis de energia que os electrões podem tomar estão sujeitos a restrições. No caso de átomos isolados, os níveis são discretos, e definem os raios das órbitas que os electrões podem ocupar.
- A matéria tende a tomar os estados energéticos mais baixos. No caso dos átomos, isto corresponde a preencher as órbitas dos electrões das mais interiores (menor energia) para as exteriores (maior energia).
- Quando os átomos dos metais se juntam para formar uma estrutura cristalina (estado sólido), os níveis de energia admissíveis para os electrões passam a definir-se em bandas (não contíguas), ao contrário dos níveis discretos dos átomos isolados.
- Os electrões podem mudar o seu estado e subir na hierarquia de energia (afastando-se do núcleo), se receberem energia adicional. Isto pode acontecer, por exemplo, por meio de calor, luz ou tensão eléctrica. Este 'salto' de um electrão deixa um lugar livre no nível de energia que ele ocupava.
- Se levarmos um metal à temperatura de 0°K a energia dos electrões é mínima. Neste caso, os electrões ocupam os níveis energéticos mais baixos. À banda de energia mais alta que contém electrões chamamos banda de valência.
- À banda de energia imediatamente acima da banda de valência chamamos banda de condução. Quando um electrão ocupa este nível de energia ele liberta-se da influência dos átomos em volta e passa a ter movimentos de grande amplitude, que lhe permite deslocar-se através da estrutura cristalina do metal. A estes electrões é costume chamar **electrões livres**. O seu movimento é extremamente aleatório e caracterizado por colisões frequentes com os núcleos dos átomos e impurezas do metal.
- Os electrões livres são responsáveis pela condução de corrente eléctrica nos metais.

Apesar do seu movimento aleatório, quando é aplicada uma diferença de potencial no metal passa a existir uma componente no movimento dos electrões que dá origem a um ‘deslize’ regular no sentido do potencial positivo.

- No caso dos materiais condutores (metais), a banda de valência e a banda de condução são contíguas. Isto significa que, à temperatura ambiente, a energia transmitida na forma de calor é suficiente para excitar os electrões para a banda de condução. Por esta razão os metais contêm, permanentemente, electrões livres, que lhes conferem a capacidade de conduzir corrente eléctrica.
- Em materiais isoladores a banda de valência e a banda de condução estão separadas. Neste caso, a temperatura ambiente não é suficiente para promover electrões à banda de condução. Para que houvesse electrões subindo à banda de condução seria necessário aplicar temperaturas ou diferenças de potencial extremamente elevadas.



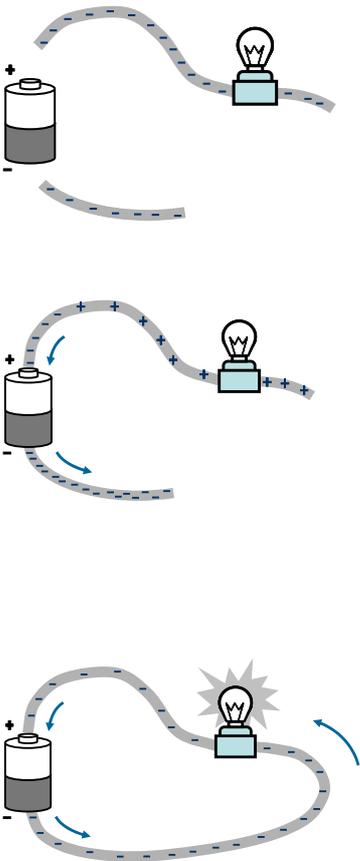
Apesar dos átomos individuais perderem estes electrões, o sólido no seu conjunto permanece neutro, uma vez que continua a existir um equilíbrio de cargas. Se não existir qualquer influência exterior, os electrões livres deslocam-se de forma desordenada e aleatória – devido à total liberdade de movimento destas partículas, os electrões livres num metal são comparáveis a um fluido, muitas vezes designado por ‘mar de electrões’ ou ‘nuvem de electrões’.

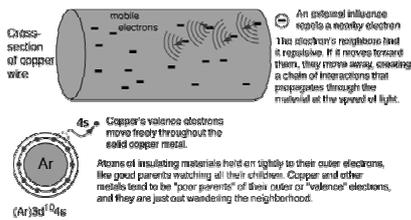
1.3.2 Corrente eléctrica

Se objectos como uma camisola de lã ou um pente electrificados não têm a capacidade de fornecer um fluxo contínuo de cargas eléctricas, outros componentes mais sofisticados têm de ser usados. A esses objectos que são capazes de fornecer continuamente cargas eléctricas e ao mesmo tempo manter uma diferença de potencial entre dois pontos chamamos **fontes de tensão**. Uma pilha é um exemplo comum de uma fonte de tensão: ela mantém uma diferença de potencial constante entre os seus pólos e ao mesmo tempo é capaz de fornecer um fluxo de electrões, para alimentar um dispositivo eléctrico.

Na figura ao lado apresenta-se o estado de um circuito eléctrico nas suas diferentes fases. Inicialmente o fio condutor não está em contacto com os pólos da pilha, pelo que apresenta os seus electrões livres em movimento desordenado e em potencial neutro. Quando cada troço do condutor é ligado a um dos pólos da pilha, os electrões movem-se, sob o efeito dos seus potenciais. O potencial positivo da pilha é caracterizado por um défice de cargas negativas, pelo que absorve electrões livres do condutor. Em resultado disso esse condutor passa a ter também potencial positivo, igual ao da pilha. O potencial negativo é caracterizado por um excesso de cargas negativas, pelo que, quando um troço do condutor é aí ligado este recebe electrões, adquirindo o potencial negativo igual ao do pólo negativo da pilha. Nesta fase observamos que o potencial positivo e negativo da pilha instantaneamente se expandem pelo fio condutor. Em resultado disso passamos a mesma diferença de potencial nas extremidades dos fios que se encontrava nos pólos da pilha.

Na terceira fase os dois condutores são ligados entre si. Agora, o movimento que observamos há pouco em cada condutor vai realizar-se de forma continuada, pois o excesso de electrões no pólo positivo da pilha alimenta o défice de electrões no pólo positivo. O movimento agora é contínuo uma vez que há um caminho de material condutor que liga os dois pólos. Com este exemplo pretende-se demonstrar em que condições é que existe corrente eléctrica. Para isso há simplesmente dois requisitos: diferença de potencial e um meio de condução da corrente – material condutor





Diferença de potencial
 + Meio de condução \Rightarrow
 Corrente eléctrica

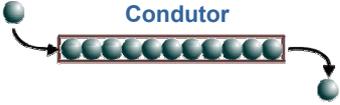
Por definição a corrente eléctrica, I , mede a quantidade de carga que atravessa uma secção de um material condutor, por unidade de tempo. É assim calculada como

Corrente Eléctrica - I
 $I = \Delta Q / \Delta t$ [A]
ampere=coulomb/s

A unidade é o ampere que corresponde a 1 coulomb por segundo: 1A=1C/s.

Há algumas características da corrente eléctrica que é importante realçar. O movimento de electrões que constitui a corrente eléctrica é muito ordenado e uniforme. O movimento de electrões num condutor pode ser comparado ao movimento de berlindes num tubo, que rolam à mesma velocidade e mantendo as mesmas distancias (ver figura ao lado). Outro facto pouco conhecido é o de que a velocidade dos electrões é muito baixa, contrariamente ao que talvez fosse de esperar, dado os fenómenos eléctricos acontecerem quase instantaneamente. Na verdade, a velocidade dos electrões é da ordem dos cm/s, mas o efeito da corrente eléctrica é transmitido a uma velocidade muito superior (próxima da velocidade da luz). Isto explica-se também através do exemplo do tubo de berlindes: ao ‘empurrarmos’ um berlinde para o início do tubo, mesmo que o façamos a uma velocidade muito lenta, o efeito é sentido de imediato na outra extremidade do tubo, causando a saída do último berlinde. Da mesma forma, ao fecharmos um circuito eléctrico, vemos acender um candeeiro de forma imediata, apesar de o interruptor estar longe da lâmpada. O movimento dos electrões é transmitido como um efeito de dominós (o movimento de um dominó propaga-se aos seguintes), e rapidamente atinge as maiores distâncias.

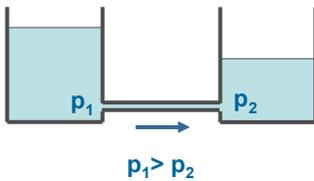
Nos circuitos eléctricos que estudamos a corrente eléctrica deve-se ao fluxo de electrões em fios condutores. Ao sentido do fluxo desses electrões chamamos o **sentido real da corrente eléctrica**. No entanto, no estudo de circuitos eléctricos, não é esse o sentido que se atribui à grandeza corrente eléctrica. Qual a razão de ser dessa peculiaridade, que parece ir contra o bom-senso? A explicação é simples e está relacionada com a procura de uma interpretação mais intuitiva dos circuitos. Se interpretarmos a corrente eléctrica no sentido contrário ao movimento dos electrões, ela realiza-se dos potenciais superiores para os inferiores. Dessa forma é possível estabelecer um paralelismo com a gravidade, fenómeno que nos é próximo, onde os corpos se deslocam das alturas elevadas para as baixas. A esse sentido da corrente, dos potenciais superiores para os inferiores, chamamos **sentido convencional da corrente eléctrica** e é aquele que será usado doravante na análise de circuitos. Interpretar circuitos eléctricos segundo esta convenção corresponde a admitir que existem cargas eléctricas positivas que se deslocam dos potenciais mais altos para os mais baixos, gerando a corrente eléctrica. Embora fisicamente isso não seja verdade, para o efeito da análise de circuitos, esta interpretação produz as mesmas conclusões que se obteriam usando o sentido real da corrente.



1.4 Analogias entre a electricidade e outros fenómenos físicos

Analogia com a gravidade – A analogia com a gravidade, usada nos pontos anteriores é útil para nos lembrar que o potencial está relacionado com energia. Onde existe potencial eléctrico pode-se extrair energia eléctrica, tal como se pode extrair energia da água numa barragem. Neste caso usa-se o potencial existente na altura de líquido para obter energia. Onde existe potencial existe energia e extraímos essa energia quando colocamos cargas em movimento, tal como extraímos energia da água na barragem, quando a escoamos. Assim, onde existe potencial, existe a possibilidade de fazer escoar cargas... E consequentemente, criar corrente eléctrica! A analogia consiste em olhar para a diferença de potencial como olhamos para um desnível, por exemplo o desnível num escorrega de crianças: se colocarmos lá uma carga/massa, ela desce.

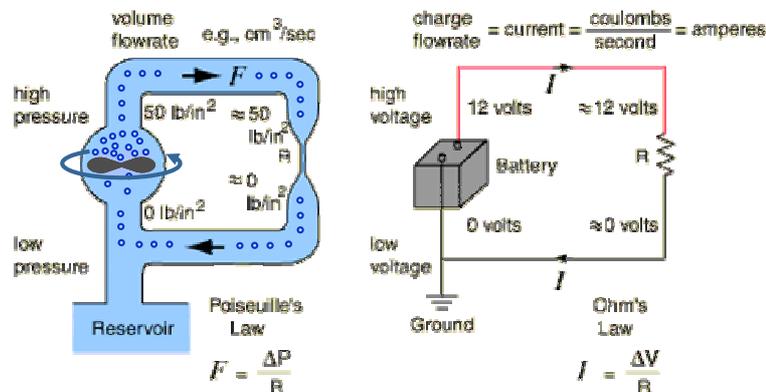
Analogia hidráulica. Um circuito hidráulico é constituído por um reservatório, um conjunto de tubagens e outros componentes hidráulicos que são montados de maneira a formar um circuito fechado. Dentro de um circuito hidráulico há escoamento de água motivado por diferenças de pressão entre diferentes zonas do circuito. As diferenças de pressão que mais intuitivamente reconhecemos são as originadas por diferentes alturas de líquido. Observando a figura ao lado, facilmente reconhecemos o sentido do escoamento, gerado pela altura maior a montante da tubagem. No entanto, se pensarmos apenas nas duas extremidades do tubo, diremos que o escoamento se faz devido a uma pressão maior na extremidade a montante (pressão essa devida à coluna de líquido).



Na maioria dos circuitos hidráulicos, a diferença de pressão que origina o escoamento de água deve-se à acção de uma bomba. Uma bomba é um componente hidráulico cuja acção leva à diminuição de pressão a montante e aumento de pressão a jusante deste componente, criando desta forma um diferencial de pressão que alimenta o circuito hidráulico.

De que forma é que isto se relaciona com a electricidade? A analogia nasce de um dado simples: a diferença de potencial num circuito eléctrico é perfeitamente equivalente à diferença de pressão num circuito hidráulico – a primeira dá origem ao movimento de electrões, a segunda ao movimento de água.

A figura abaixo evidencia o paralelo que existe entre os dois circuitos. Observe-o atentamente, e descubra analogia entre as diferentes variáveis e componentes.



Vale a pena determo-nos mais um pouco sobre o papel da pressão no circuito hidráulico para compreender melhor o papel da diferença de potencial no seu

análogo eléctrico. No circuito hidráulico toda a acção é motivada pelo aumento de pressão a jusante da bomba. Quais as consequências desse aumento de pressão? Por que é que o aumento de pressão origina movimento? As partículas de água sob uma pressão maior estão sujeitas a forças maiores. O aumento dessas forças dá origem o movimento da água, e, por exemplo, também ao aumento de força contra as paredes da tubagem. O aumento de pressão significa também que se introduziu energia no circuito, sob a forma da pressão do líquido. A energia que se gastou para mover a bomba foi transformada na forma de pressão do líquido. O aumento de pressão significa aumento de energia (por que é que rebentar um saco de plástico fechado com uma pancada produz som? Porque o ar está sob pressão antes do saco rebentar). Sintetizando:

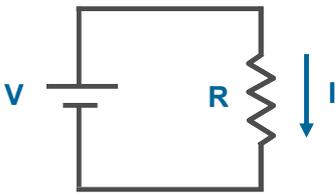
Pressão ↑ ⇒ Força ↑ nas partículas de água ⇒ Energia ↑
--

A diferença de potencial pode também ser entendida como a 'força' a que os electrões estão sujeitos, sendo responsável pelo seu movimento. Quanto maior for a diferença de potencial, maior essa força. A relação com a energia já foi mencionada atrás. Aumentar o potencial significa não só aumentar a força sobre os electrões mas também colocá-los num patamar de energia superior, o que significa que, no seu movimento em torno do circuito, conseguimos extrair maior energia. Então

Diferença de Potencial ↑ ⇒ 'Força' ↑ nos electrões ⇒ Energia ↑
--

1.5 Lei de Ohm

Já sabemos que na presença de uma fonte de tensão (pilha, por exemplo) temos dois pontos entre os quais há uma diferença de potencial. Essa diferença de potencial significa que os electrões em cada um dos pontos apresentam diferentes níveis de energia – uns estão mais ‘elevados’ do que outros. Se unirmos esses dois pontos com um condutor estamos a abrir caminho para que os electrões no nível energético superior (tratando-se de cargas negativas isto acontece no potencial -) para o nível energético inferior (potencial +). Assim, ao ligarmos os dois terminais de uma pilha, permitimos o fluxo de electrões entre o pólo negativo e o positivo. Será que esse fluxo se faz de forma completamente livre, sem qualquer oposição? A resposta é não. Mesmo os materiais condutores apresentam alguma oposição ao fluxo de electrões, porque no seu movimento, os electrões chocam entre si ou com os átomos que compõem o material condutor. Este tipo de oposição limita a velocidade com que os electrões se deslocam no condutor. À propriedade de um material que determina a oposição à passagem de corrente eléctrica chamamos **resistência eléctrica**.



Para a mesma diferença de potencial (‘força eléctrica’ que empurra os electrões) que é aplicada num condutor, a corrente (quantidade de electrões por unidade de tempo) que conseguimos fazer passar por esse condutor depende da resistência eléctrica, de forma inversamente proporcional:

$$V/R=I$$

Esta expressão é mais comumente escrita como

$$V=R \times I$$

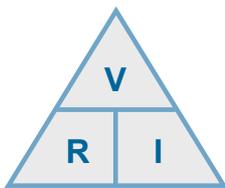
que se designa por lei de Ohm. A unidade de resistência eléctrica é o *ohm* (Ω), que corresponde, de acordo com a expressão anterior, a $1\Omega=1\text{V/A}$.

Resistência Eléctrica – R [Ω] <i>ohm=volt/ampere</i>
--

É preciso realçar que a lei de Ohm calcula o valor absoluto da queda de tensão aos terminais de uma resistência, mas nada indica sobre o sentido dessa queda de tensão. Apesar de isso não ser expresso pela lei de Ohm, sabemos que a corrente ‘entra’ no pólo da resistência onde o potencial é mais elevado e ‘sai’ no pólo de potencial mais baixo. Na verdade, se a lei de Ohm exprimisse a variação do potencial na resistência, o mais natural seria escrever-se $V=-R \times I$, uma vez que o potencial decresce no sentido em que a corrente é dirigida.

A resistência de um condutor depende de vários factores, sendo os mais relevantes o tipo de material, secção e comprimento do condutor e a temperatura.

A analogia hidráulica pode ser útil para intuir melhor o comportamento de uma resistência. Uma resistência eléctrica é análoga a uma válvula de um circuito hidráulico. Num sistema hidráulico, uma válvula introduz uma resistência ao escoamento. Considere-se o caso de uma torneira: a montante temos a pressão da rede, a jusante a pressão atmosférica. Esta diferença de pressões é equivalente à diferença de potencial. Aumentando ou diminuindo a abertura da torneira (resistência) aumentamos ou diminuimos o fluxo de água (corrente) que escoar. Este comportamento é em tudo idêntico à lei de Ohm.



O estudo de circuitos resistivos trata simplesmente das relações entre queda de tensão, resistência e corrente, onde a lei de ohm tem naturalmente uma importância fundadora. Esta lei é por vezes apresentada de forma gráfica pelo diagrama ao lado.

Quando se faz passar uma corrente eléctrica por qualquer componente – resistência ou outro – que provoca uma queda de tensão, há transferência de energia eléctrica para outra forma de energia – calor, no caso de uma resistência. A energia transferida por unidade de tempo é designada **potência eléctrica**, P , e é calculada como

$$P=V \times I$$

que, no caso de se tratar da energia dissipada numa resistência, também pode ser expressa por

$$P=R \times I^2, \text{ ou } P=V^2/R$$

A unidade de medição da potência é o *watt*, que corresponde a energia por unidade de tempo:

tensão - V	volt (V)
corrente - I	ampere (A)
resistência-R	ohm (Ω)

Potência Eléctrica – P [W]
watt=joule/segundo

1.6 Já compreendemos a electricidade – mas como a utilizar?

Neste capítulo falou-se das leis físicas que regem a interacção entre cargas eléctricas e que explicam os fenómenos eléctricos. Em particular, focámo-nos sobre a electricidade estática, que pode ser considerado um fenómeno momentâneo e volátil, e sobre a condução de corrente eléctrica, que ocorre quando temos uma fonte de tensão e um circuito condutor entre os seus pólos. A perspectiva que adoptámos foi a da procura da origem destes fenómenos eléctricos e da criação de alguma intuição para descrevê-los. Pode dizer-se que tivemos uma abordagem desinteressada, pois apenas procurámos explicar e descrever os fenómenos eléctricos, sem pensarmos conscientemente na forma como podemos torná-los úteis. Na secção 1.5 apresentámos a lei de ohm, dando a entender que o fenómeno da condução num circuito eléctrico é completamente descrito pela relação entre duas variáveis fundamentais: a tensão V e a corrente eléctrica I .

Nos capítulos seguintes vamos passar à fase seguinte do nosso estudo. Nesses capítulos vamos ver como podemos usar o fenómeno da condução eléctrica de formas que nos são úteis. A função de (ou parte de) um circuito eléctrico pode ter duas motivações distintas, pelo que é costume distinguir dois campos da electrónica: a electrónica de potência e a electrónica de sinais.

Na electrónica de potência construímos circuitos que visam accionar dispositivos como motores eléctricos, lâmpadas, aquecedores, altifalantes, etc.

São circuitos que comandam dispositivos que produzem acções para além do próprio circuito eléctrico – podem produzir movimento, luz, som, etc.

Na electrónica de sinais utilizamos os fenómenos eléctricos para transmitir e processar informação.

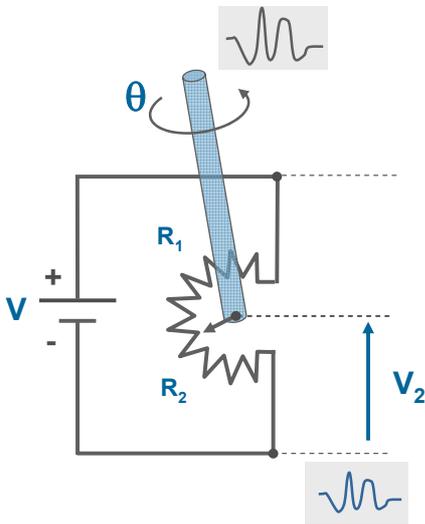
O que é que entendemos por ‘sinal’? Sinal é a evolução temporal de uma variável física que representa informação, seja da própria grandeza física ou de outra grandeza que está a ser representada. Uma vez que tratamos aqui de circuitos eléctricos, as variáveis em causa são, naturalmente, variáveis eléctricas – corrente e tensão.

Na electrónica de sinais não estamos interessados em produzir qualquer efeito fisico imediato para além do circuito eléctrico. Procuramos sim, circuitos que representem correctamente determinada informação através das suas variáveis e realizem correctamente as operações desejadas sobre essa informação. Este tipo de aplicação não é assim tão estranha para nós. Afinal, esta definição aplica-se perfeitamente a uma calculadora, um computador, um telemóvel, a um rádio, etc. Em todos estes aparelhos há processamento de informação por via da electrónica.

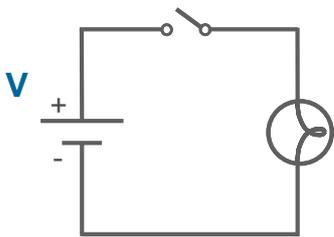
Pode dizer-se que o campo da electrónica de potência e da electrónica de sinais se distinguem por terem preocupações diferentes: na primeira há uma preocupação acrescida na transmissão de energia - para accionar um motor, fazer brilhar uma lâmpada ou aquecer a resistência de um aquecedor o circuito eléctrico deve transmitir a energia necessária para produzir esse efeito fisico. No caso da electrónica de sinais, há uma preocupação acrescida na correcção e precisão dos sinais presentes no circuito. Para transmitir e processar informação por via

electrónica, é necessária uma quantidade de energia mínima, pelo que nestes circuitos a preocupação fundamental é a da correcção das operações e não a da energia transferida.

Exemplo de aplicação de electrónica de sinais - medição do ângulo de um cata-vento

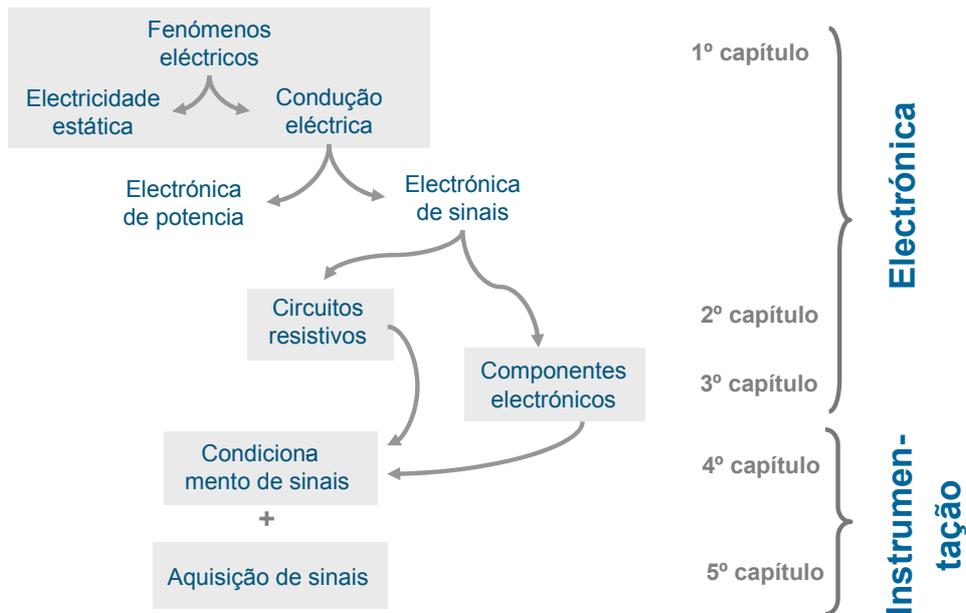


Um potenciómetro é um instrumento constituído por uma resistência com dois pólos terminais sobre a qual é montado um ponteiro, ligado a um terceiro pólo, intermédio. Esse ponteiro desloca-se sobre a resistência, permitindo que, no pólo intermédio, observemos uma resistência variável. O ponteiro pode ser manipulado como um botão, ou associado a algum tipo de movimento que queiramos medir. Imagine-se que queremos medir o ângulo em que se encontra um cata-vento. Para isso, o eixo do cata-vento foi unido ao eixo do potenciómetro e os seus pólos ligados a uma fonte de tensão V . Ao longo do comprimento da resistência o potencial vai decrescendo desde V até 0. O pólo intermédio, ligado ao ponteiro, permite detectar o potencial na resistência do ponto onde se estabelece o contacto. Ao variarmos o ângulo θ , o ponteiro desloca-se sobre a resistência, permitindo a leitura de um potencial, V_2 , que é variável e é função desse ângulo. Criámos assim um circuito eléctrico onde existe um sinal, $V_2(t)$, que tem um significado que vai para além de um simples potencial eléctrico - ele é uma medida de uma variável de interesse, o ângulo do cata-vento. Este é o objectivo da electrónica de sinais: criar circuitos eléctricos que geram tensões ou correntes que representam informação de interesse. Essa representação deve ser fíável, precisa, correcta e estável.



Exemplo de aplicação de electrónica de potência - circuito de iluminação

Um exemplo simples de um circuito de potência pode ser simplesmente o circuito de alimentação de uma lâmpada. Aqui a tensão e corrente criadas no circuito não têm por objectivo representar qualquer informação relevante, pretende-se antes transmitir energia suficiente para fazer brilhar a lâmpada tanto quanto desejado.



1.7 Objectivos e organização do documento

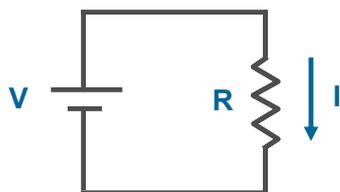
Esta disciplina tem dois objectivos fundamentais. O primeiro é o de fornecer as ferramentas essenciais para abordar circuitos eléctricos. Este objectivo é visado na primeira parte da disciplina, dedicada à electricidade e electrónica. Nesta parte pretende-se derrubar preconceitos sobre a electricidade e estimular o interesse e a curiosidade pelo tema, ao mesmo tempo que se transmitem os conhecimentos necessários para analisar circuitos eléctricos. Nesta parte faz-se também a introdução à electrónica, embora de forma incipiente. O segundo objectivo da disciplina, a que a segunda parte é dedicada, é o de transmitir os conhecimentos necessários para desenvolver circuitos electrónicos para instrumentação. Esses circuitos destinam-se a fazer o tratamento de sinais eléctricos produzidos por sensores, de maneira a poderem ser utilizados para variados fins, nomeadamente a leitura por computadores.

2. Análise de Circuitos Resistivos

2.1 Introdução

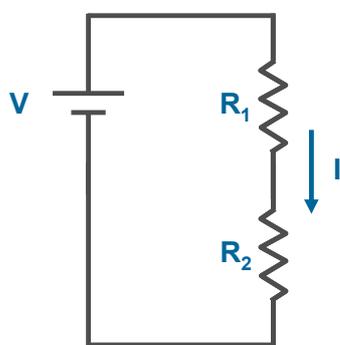
Ao projectarmos ou analisarmos um circuito eléctrico pretendemos saber os valores das variáveis que descrevem o seu comportamento. Isso significa determinar as variáveis eléctricas (corrente e tensão) em todos os pontos. Em alguns casos, podemos estar interessados em conhecer aqueles valores num só componente mas, de uma forma geral, precisamos de conhecer as ferramentas que nos permitam determinar esses valores em qualquer ponto de um circuito.

Neste capítulo vamos abordar circuitos resistivos, isto é, circuitos constituídos por fontes de tensão e por resistências eléctricas. Começamos por apresentar as duas tipologias elementares de associação de resistências – série e paralelo – e a forma de análise destes circuitos. Prosseguiremos com a apresentação das leis de Kirchhoff, que constituem a base para um método mais genérico, que permitirá resolver também circuitos que não se enquadram nas tipologias série e paralelo. Finalmente, apresentaremos o método de Thevenin, o qual pode constituir um método expedito para a determinação das variáveis eléctricas em pontos de especial interesse de um circuito. Aplicado de forma sistemática, pode ser uma alternativa às leis de Kirchhoff, para uma análise mais transparente de um circuito.



2.1 Resistências em série e paralelo

Considere-se o circuito da figura ao lado. Será que o conhecimento adquirido até ao momento nos permite fazer a análise completa deste circuito? Na verdade sim, uma vez que se trata de um circuito com apenas uma resistência e uma fonte de tensão. Neste caso sabemos relacionar todas as variáveis que estão em jogo, V e I , relação essa que é descrita pela lei de Ohm, $V=R \times I$.

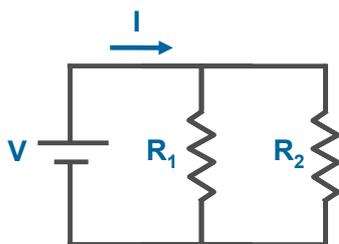


Resistências em série

E no caso da figura que se segue, será que sabemos já fazer a análise completa deste circuito? Para podermos determinar o comportamento deste circuito necessitamos de conhecer o comportamento de duas (ou mais) resistências quando são unidas em sequência – a este tipo de ligação chamamos **ligação em série**. A análise deste circuito é simplificada de forma decisiva porque podemos interpretá-lo como o circuito anterior, desde que saibamos o valor de uma resistência que faça as vezes das duas resistências em série. A esse valor chamamos **resistência equivalente**, que é, no caso de resistências em série, dado por:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

Assim sendo, dado o valor da tensão V podemos determinar a corrente que atravessa o circuito. Repare-se que a corrente é a mesma nas duas resistências, visto que não há ramificações. **Dois ou mais resistências encontram-se associadas em série quando são atravessadas pela mesma corrente eléctrica**. A corrente será então dada resolvendo $V = R_{eq} \times I$.



Resistências em paralelo

No caso da terceira figura, as resistências estão dispostas diferentemente, agora lado a lado. Neste caso diz-se que as resistências estão em **paralelo**, o que acontece quando **duas ou mais resistências partilham a mesma diferença de potencial nos seus terminais** (repare-se que as duas resistências têm as suas extremidades ligadas ao pólo positivo e negativo da fonte de tensão - partilham a mesma diferença de potencial). Também nesta situação podemos transformar o circuito no modelo inicial, desde que saibamos qual o valor de uma resistência que substitua aquelas em

paralelo, resultando no mesmo comportamento. A resistência equivalente às duas resistências em paralelo é obtida resolvendo:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

Uma vez conhecida R_{eq} , a corrente que é fornecida para o circuito pode mais uma vez ser determinada pela lei de Ohm, $V=R_{eq} \times I$.

Mas não é só...

Será que os argumentos apresentados acima nos satisfazem na análise dos circuitos de resistências em série e em paralelo? Há algo que falta, pois até aqui apenas conseguimos determinar a corrente e tensão globais do circuito (isto é, aquelas medidas nos terminais da pilha). Ficaram por determinar as variáveis que afectam cada uma das resistências em particular. Para fazer essa determinação vamos usar argumentos adicionais e desenvolver mais intuição para a compreensão de circuitos resistivos.

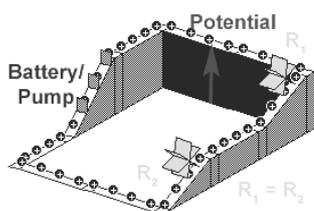
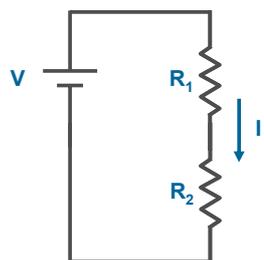
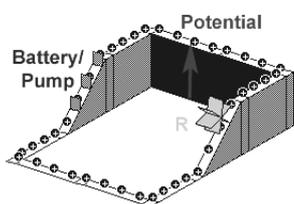
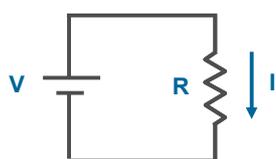
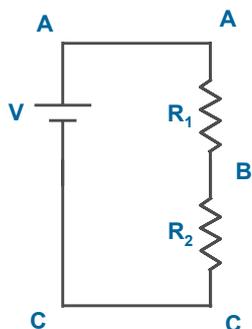
Considere-se o caso das resistências em série. Através delas passa a mesma corrente, I , mas a diferença de potencial aos terminais de cada uma delas é desconhecido. Estes valores podem ser calculados utilizando de novo a lei de Ohm, admitindo que a corrente I já foi calculada, como demonstrado acima. As diferenças de potencial serão assim dadas por $V_1=R_1 \times I$ e $V_2=R_2 \times I$. Estes cálculos dão-nos os valores desejados mas não criam maior intuição sobre o circuito. Admita-se que ao longo de um fio condutor (que assumimos um perfeito condutor) não há variação do potencial. Então, o potencial num terminal de um componente é igual ao potencial do terminal do componente seguinte. Tendo isto em consideração, vamos percorrer o circuito em causa e observar as variações de potencial presentes. A pilha aplica um aumento de potencial V_{CA} , a primeira resistência origina uma queda de potencial V_{BC} , e a segunda resistência uma queda de potencial V_{BC} . Podemos escrever as expressões destas quedas de tensão e provar um facto simples sobre este circuito:

$$\begin{aligned} V_{AB} &= V_B - V_A \\ V_{BC} &= V_C - V_B \quad \Leftrightarrow \quad V_{AB} + V_{BC} + V_{CA} = 0 \\ V_{CA} &= V_A - V_C \end{aligned}$$

Concluindo, ao percorrermos um circuito fechado, observamos que as quedas (e ‘subidas’) de potencial realizadas pelos componentes que encontramos ao longo desse percurso se anulam. As figuras ao lado ilustram a maneira como o potencial evolui ao longo de um circuito simples e um circuito em série.

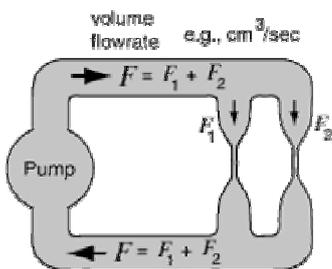
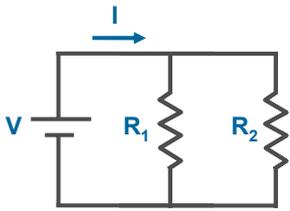
Outro tipo de conclusão que importa conhecer diz respeito à maneira como V_1 e V_2 dependem dos valores das resistências. Por outras palavras, se tivermos $R_1 > R_2$, como se relacionam V_1 e V_2 ? Vamos aqui usar argumentos energéticos. Uma carga que atravessa sucessivamente as duas resistências irá libertar mais energia na maior ou menor resistência? Por simples intuição concluímos que é necessário despendar mais energia para atravessar a resistência mais elevada. Uma vez que energia é sinónimo de diferença de potencial, concluímos que é na maior resistência que vamos observar a maior queda de tensão.

Estes argumentos permitem-nos ter uma compreensão mais profunda do circuito em série, que vão para além do cálculo ‘cego’ dos valores das variáveis. Ficamos a saber que a queda de potencial nas resistências é contrabalançada pela elevação de



potencial na pilha, e que a queda de potencial se distribui de forma desigual pelas resistências, sendo superior naquela que tiver maior valor de resistência.

Consideremos agora o caso do circuito de resistências em paralelo. Ao contrário do anterior, em que as resistências partilhavam o mesmo valor de corrente, aqui ambas as resistências estão sujeitas à mesma queda de tensão, e são as correntes em cada uma que são desconhecidas. Se quisermos obter o valor da corrente em cada um dos troços não temos mais do que aplicar a lei de Ohm em cada resistência e resolver as equações $V=R_1 \times I_1$ e $V=R_2 \times I_2$ em ordem às correntes. Estas expressões permitem-nos determinar os valores das correntes mas não nos dão maior compreensão sobre a relação entre elas.



Vamos recorrer à analogia com os circuitos hidráulicos para obter mais compreensão sobre este circuito. Num circuito hidráulico fechado a quantidade de água em circulação é sempre a mesma, isto é, não há desaparecimento nem criação de massa. Assim, na presença de ramificações, o fluxo de água divide-se, mantendo o fluxo total constante. O mesmo se passa no caso da corrente eléctrica. Onde existem nós que unem três ou mais condutores, as correntes relacionam-se observando a não criação ou desaparecimento de carga. Em suma, a soma das correntes tem de se anular. No caso do circuito em paralelo teremos $I=I_1+I_2$. Esta expressão traduz o facto de que a corrente total debitada pela pilha se divide pelos dois troços das resistências. A soma das correntes no nó (considerando as correntes que saem como negativas) é nula. O cálculo das correntes pela lei de Ohm permite-nos determinar os seus valores, mas não obvia um dado fundamental, de que a soma das correntes é igual à corrente total.

Exemplo: divisor de tensão

Um dos circuitos eléctricos fundamentais em electrónica é o divisor de tensão. Este circuito é formado por duas resistências em série sujeitas a uma diferença de potencial fixa. No fundo, não difere do circuito de resistências em série que temos vindo a usar nos pontos anteriores. Este circuito é designado por divisor de tensão porque o potencial a que as resistências estão sujeitas é dividido entre elas. Por outras palavras, é possível modular o potencial no terminal entre as duas resistências através da escolha dos seus valores. As expressões da queda de tensão em cada uma das resistências serão, tendo em conta tudo o que ficou dito atrás, calculadas como:

$$R_{eq} = R_1 + R_2$$

$$I = V / R_{eq}$$

$$V_1 = R_1 \times I = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V$$

$$V_2 = R_2 \times I = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V$$

As últimas expressões são de tal modo comuns nos circuitos que estudamos que é recomendável que sejam memorizadas.

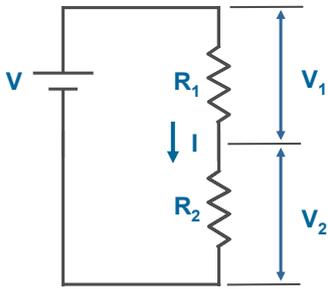
Exemplo: Ponte de Wheastone

A ponte de Wheastone é um circuito que tem extrema importância em instrumentação. É um dos circuitos mais usados para medir grandezas físicas, produzindo um potencial eléctrico representativo da grandeza medida - temperatura, deslocamento, pressão, etc. Neste circuito, apresentado na figura ao lado, existe uma ou mais resistências que são sensíveis à grandeza a medir, ou seja, cujo valor de resistência varia em função da temperatura, pressão ou outra variável. A queda de tensão de interesse no circuito é a que existe entre os terminais A e B. A expressão que descreve essa tensão pode ser obtida considerando que cada conjunto de duas resistências em série, R_1 e R_3 de um lado e R_2 e R_4 do outro, funcionam como divisores de tensão. Então, a expressão deduzida acima pode ser usada para determinar a diferença de potencial entre A e B. A queda de tensão entre esses pontos não será mais do que a diferença entre as duas expressões.

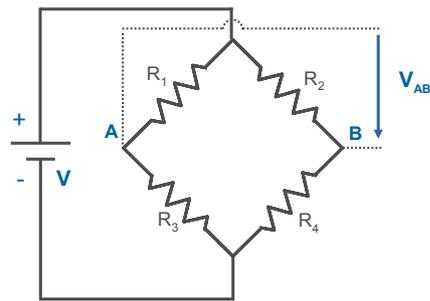
$$V_A = \frac{R_3}{R_1 + R_3} V$$

$$V_B = \frac{R_4}{R_2 + R_4} V$$

$$V_{AB} = \left(\frac{R_3}{R_1 + R_3} - \frac{R_4}{R_2 + R_4} \right) V$$



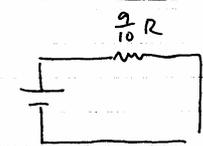
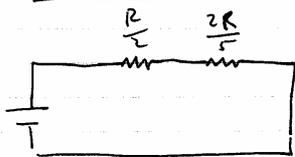
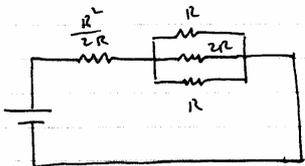
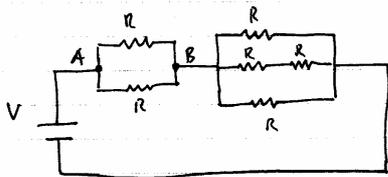
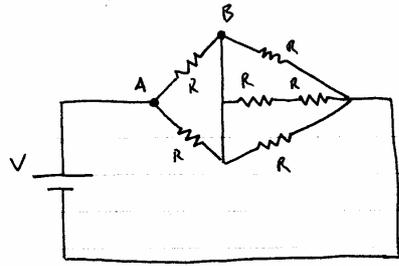
Divisor de Tensão



Ponte de Wheatstone

Exercício: combinação de resistências em série e paralelo

Na análise de circuitos eléctricos, o método de simplificação por substituição de várias resistências por uma resistência equivalente deve ser o primeiro método a ser considerado, dada a sua simplicidade. É importante sublinhar que em alguns casos o tipo de associação das resistências pode não ser evidente, mesmo quando estas se encontram em série, paralelo ou combinações destas tipologias. Observe-se o caso ao lado: a forma de apresentação do circuito não obvia o tipo de associação das resistências. No entanto, quando apresentado nas formas seguintes, o tipo de associação é evidente e a resolução do circuito é imediata. Determine-se a tensão V_{AB} .



Para determinar a queda de tensão entre A e B, precisamos de saber qual a corrente que atravessa as duas resistências em paralelo que se encontram entre esses terminais. Sabendo o valor dessa corrente e a resistência equivalente às duas resistências em paralelo, basta fazer $V_{AB} = R_{eqAB} \times I$. A corrente que procuramos não é mais do que a corrente que atravessa todo o circuito. Para a determinar, calcula-se a resistência equivalente a todo o circuito, como indicado nas figuras.

Então teremos:

$$I = \frac{V}{\frac{9}{10}R}$$

$$V_{AB} = R_{eqAB} \times I = \frac{R}{2} \times \frac{V}{\frac{9}{10}R} = \frac{5}{9}V$$

2.3 O potencial 'terra'

Já foi mencionado no primeiro capítulo que a grandeza 'potencial' não tem relevância em termos absolutos mas sim relativos. É a diferença de potencial que serve de força motriz aos circuitos eléctricos, por isso são as diferenças de potencial que nos interessam. No entanto, em circuitos mais complexos, há necessidade de estabelecer um potencial que sirva de referência. Esses circuitos podem resultar da junção de diferentes partes (sub circuitos) que, ao serem ligados entre si, devem criar um todo coerente. Para que essa coerência exista é necessário que haja coerência entre os valores de tensão das várias partes. Para isso, estabelece-se um valor de potencial como referência, designado por 'comum' ou por 'terra'. Este potencial é normalmente escolhido como a tensão mais baixa presente no circuito, no caso de o circuito usar apenas tensões positivas, ou uma tensão intermédia, dando origem a tensões no circuito com valores positivos e negativos. Para além de estabelecer uma referência de potencial, o potencial 'terra' pode ter outra finalidade, a de escoar o excesso de cargas produzidas pelo circuito, condição que pode causar a danificação do circuito e ferimentos em pessoas, se não for acautelada. Na prática, este potencial é encontrado em qualquer objecto que tenha dimensão suficiente para receber uma quantidade de cargas eléctricas sem modificar o seu potencial. Ora, o objecto físico com melhor capacidade para o fazer é a terra, o maior objecto que nos é acessível. Assim, todos os pontos de um circuito que devem apresentar este potencial devem ser ligados a uma estrutura metálica suficientemente embebida na terra – por exemplo, canalizações de um edifício. Em aplicações que processam valores de carga mais baixos qualquer objecto metálico suficientemente grande pode fazer o efeito de terra – nesses casos o objectivo deste objecto é promover a estabilidade do circuito, remover ruído, etc, para o que a ligação à terra propriamente dita pode ser dispensado.

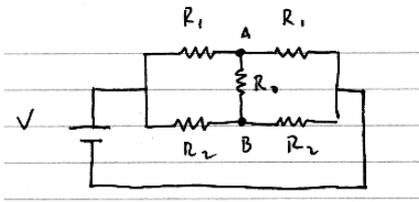
A introdução do potencial terra em circuitos eléctricos sugere também um outro tipo de representação para estes circuitos. O potencial terra é identificado com um símbolo formado por três linhas horizontais sucessivamente mais pequenas. Utilizando esta simbologia, o circuito de resistências em paralelo pode ser representado segundo o esquema ao lado.

Que alterações encontramos relativamente ao tipo de representação utilizada até aqui? Os terminais ligados ao potencial terra encontram-se na verdade conectados entre si (de outro modo não estariam ao mesmo potencial), no entanto essa ligação não é representada. Em vez disso apresenta-se cada terminal ligado ao símbolo do potencial terra. A segunda alteração diz respeito ao potencial imposto por fontes. Uma fonte eléctrica recolhe electrões a um potencial baixo e disponibiliza-os a um potencial mais elevado. No entanto neste tipo de representação apenas se mostra o potencial mais alto, sem apresentar expressamente que existe uma ligação através da qual os electrões são recuperados de um potencial baixo (terra). Nesta representação o símbolo da fonte de tensão desaparece por completo. É de notar que o potencial assim expresso tanto pode ser produzido por uma fonte eléctrica como por outro circuito eléctrico não representado.

As alterações acima mencionadas levam a que o tipo de representação de que falamos se assemelhe menos a um circuito, pois não se vêem caminhos fechados para a circulação da corrente eléctrica – no entanto eles existem. Este tipo de representação sugere que olhemos para um circuito eléctrico como uma cascata, onde as cargas eléctricas descem do potencial mais elevado para o potencial mais

baixo, o da terra. É uma forma de representação que apela ao tipo de intuição que compara o potencial eléctrico com o potencial gravítico.

2.2 Leis de Kirchhoff



Os exercícios resolvidos na secção anterior poderiam sugerir que a simplificação de resistências em série e em paralelo permite resolver qualquer circuito resistivo, por mais complexo que ele seja. Na verdade isso não é assim, pois as resistências eléctricas podem estar associadas de formas distintas das tipologias série e paralelo. Considere-se o circuito ao lado: será que encontramos aqui algumas resistências em condições de serem substituídas por equivalentes mais simples? A resposta é negativa. Neste circuito não existem resistências em série, o que pode ser comprovado quando constatamos que não há resistências que sejam atravessadas pela mesma corrente eléctrica. Por outro lado, não existem também resistências em paralelo, pois não encontramos aqui duas resistências sujeitas à mesma queda de tensão nos seus terminais. Este exemplo motiva-nos para estudar métodos alternativos ao da simplificação através de resistências equivalentes.

No caso de circuitos mais complexos pode ser necessário recorrer a métodos sistemáticos, de que a aplicação das leis de Kirchhoff são um exemplo. As leis de Kirchhoff não são mais do que uma generalização das regras de intuição de que falamos atrás, a propósito dos circuitos em série e paralelo.

Lei das malhas – Reflecte o principio da conservação de energia, enunciando que:

A soma das quedas de tensão observadas ao percorrer uma malha fechada é nula.

Lei dos nós – Reflecte o principio da conservação de carga, enunciando que:

O balanço de correntes em qualquer nó do circuito é nulo.

O método de resolução associado às leis de Kirchhoff consiste em construir um sistema de equações onde cada uma das equações resulta da aplicação destas leis. De uma forma sistemática, o método pode ser descrito como:

1. arbitrar sentidos para as correntes no circuito
2. escrever a lei dos nós para todos os nós do circuito
3. aplicar a lei das malhas tantas vezes quantas as necessárias por forma a cobrir todos os componentes do circuito
4. resolver o sistema de equações.

Ao resolver um circuito eléctrico desta forma verificamos que este método é o que mais recorre à ‘força bruta’, em detrimento da resolução por intuição. Aqui, o cálculo das variáveis do circuito é obtido pela resolução de um sistema de equações, onde é mais útil a capacidade de calculo sistemático e repetitivo do que o apelo à intuição. Este método presta-se ao cálculo computacional, já que manualmente se torna bastante fastidioso.

Exercício: Determine a queda de tensão V_{AB} , pela aplicação das leis de Kirchhoff

Lei dos nós

$$\begin{cases} i = i_1 + i_2 \\ i_1 = i_3 + i_5 \\ i_2 + i_5 = i_4 \text{ *} \\ i_3 + i_4 = i \end{cases}$$

lei das malhas

$$\begin{cases} -R_2 i_2 - R_1 i_4 + V = 0 \\ -R_1 i_1 - R_0 i_5 + R_2 i_2 = 0 \\ -R_2 i_3 + R_1 i_4 + R_0 i_5 = 0 \end{cases}$$

desenvolvendo as equações das leis das malhas...

$$\begin{cases} -R_2 i_2 - R_1 i_4 + V = 0 \\ i_1 = \frac{R_2 i_2 - R_0 i_5}{R_1} \Leftrightarrow \text{*} \\ i_3 = \frac{R_1 i_4 + R_0 i_5}{R_2} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} -R_2 i_2 - R_1 (i_2 + i_5) + V = 0 \\ i_1 = \frac{R_2 i_2 - R_0 i_5}{R_1} \Leftrightarrow \text{*} \\ i_3 = \frac{R_1 i_4 + R_0 i_5}{R_2} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} i_2 = \frac{V - R_1 i_5}{R_1 + R_2} \text{****} \\ i_1 = \frac{R_2 i_2 - R_0 i_5}{R_1} \text{**} \\ i_3 = \frac{R_1 i_4 + R_0 i_5}{R_2} \text{***} \end{cases}$$

desenvolvendo as equações das leis dos nós

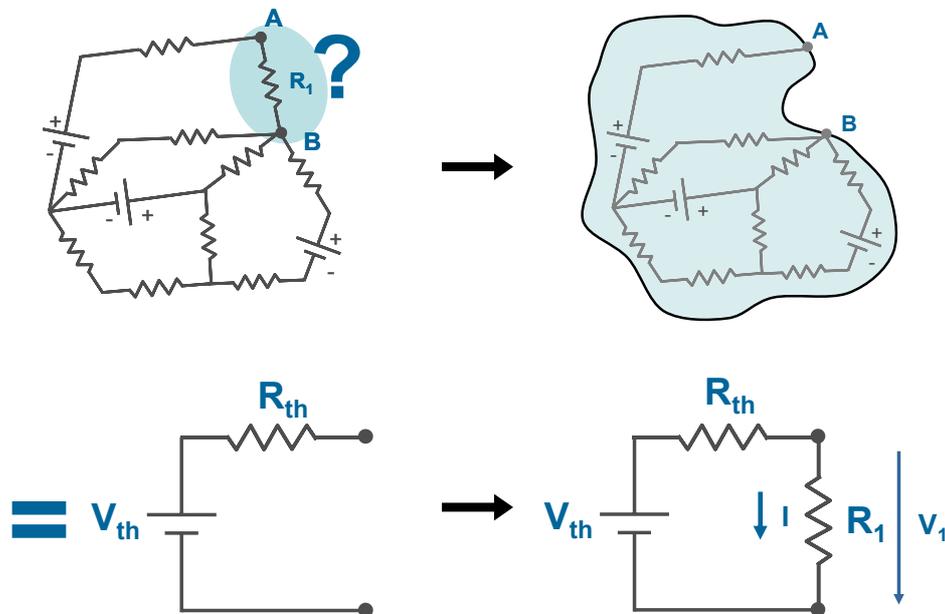
$$\begin{cases} \text{**} & i = i_1 + i_2 \\ \text{***} & \frac{R_2 i_2 - R_0 i_5}{R_1} = \frac{R_1 i_4 + R_0 i_5}{R_2} + i_5 \Leftrightarrow R_2^2 i_2 = R_1^2 i_4 + R_2 R_0 i_5 + R_1 R_0 i_5 + R_1 R_2 i_5 \Leftrightarrow \\ & i_2 + i_5 = i_4 \\ & i_3 + i_4 = i \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow R_2^2 i_2 = R_1^2 (i_2 + i_5) + R_2 R_0 i_5 + R_1 R_0 i_5 + R_1 R_2 i_5 \Leftrightarrow (R_2^2 - R_1^2) i_2 = (R_1^2 + R_2 R_0 + R_1 R_0 + R_1 R_2) i_5$$

$$\Leftrightarrow \text{****} (R_2^2 - R_1^2) \cdot \frac{V - R_1 i_5}{R_1 + R_2} = (R_1^2 + R_2 R_0 + R_1 R_0 + R_1 R_2) i_5 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow (R_2 - R_1) \cdot (V - R_1 i_5) = (R_1^2 + R_2 R_0 + R_1 R_0 + R_1 R_2) i_5 \Leftrightarrow (R_2 - R_1) \cdot V = (R_2 R_0 + R_1 R_0 + 2R_1 R_2) i_5 \Leftrightarrow$$

$$i_5 = \frac{R_2 - R_1}{(R_2 + R_1) R_0 + 2R_1 R_2} V$$



2.3 Método de Thevenin

O método de Thevenin é um método alternativo às leis de Kirchhoff para o cálculo de variáveis eléctricas específicas num circuito. Imagine-se que deparamos com um circuito de estrutura bastante complexa, com inúmeras resistências e fontes de tensão, e pretendíamos conhecer apenas as variáveis eléctricas num componente em particular, R_I , na figura. A complexidade do circuito que envolve R_I pode ser de uma complexidade assustadora, o que nos demove da aplicação das leis de Kirchhoff, se os cálculos tiverem de ser feitos manualmente.

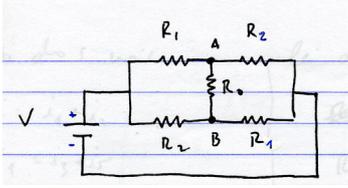
Uma característica simpática do método de Thevenin, é que ele leva a que todo o circuito externo ao componente de interesse, independentemente da sua complexidade seja substituído por um circuito básico, de uma resistência e uma fonte de tensão. Assim, o método passa por extrair (não necessariamente de modo físico, na prática basta desligar os seus terminais) o componente de interesse e encarar o circuito remanescente. O **teorema de Thevenin** diz-nos que esse circuito pode ser substituído por uma fonte de tensão e uma resistência colocados em série. Essa fonte de tensão e resistência são elementos abstractos, não estão relacionados com nenhuma fonte de tensão ou resistência do circuito em particular, mas são calculados com base nesse circuito, pois devem representá-lo. A fonte de tensão tem uma diferença de potencial designada por tensão de Thevenin, V_{th} que é simplesmente a tensão medida nos terminais de interesse, quando o componente de interesse foi extraído. A resistência de substituição tem um valor designado por resistência de Thevenin, R_{th} , que é o valor de resistência medido entre os terminais de interesse, mais uma vez, com o componente extraído. Nessa medição todas as fontes de tensão são retiradas, e as respectivas ligações curto-circuitadas.

Uma vez conhecidos V_{th} e R_{th} , o circuito remanescente pode ser substituído pelo circuito equivalente, e o circuito total pode ser analisado como sendo um circuito série com uma fonte de tensão de valor V_{th} e duas resistências, R_{th} e R_I . Então, as variáveis eléctricas em R_I serão dadas por:

$$I = V_{th} / (R_{th} + R_I)$$

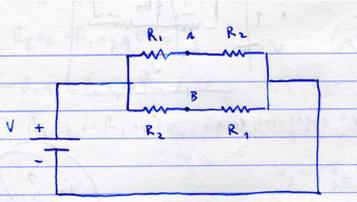
$$V_I = R_I \times I$$

Exercício: Determine a queda de tensão V_{AB} , utilizando o teorema de Thevenin



1º passo: determinar a tensão de thevenin. Para isso retira-se a resistência e calcula-se a queda de tensão entre os terminais (notar que se trata de dois divisores de tensão)

$$V_{th} = \left(\frac{R_1}{R_2 + R_1} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V = \frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} V$$



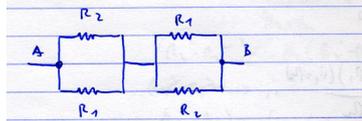
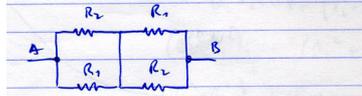
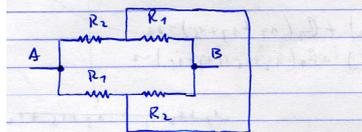
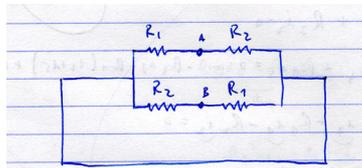
2º passo: determinar a resistência de thevenin: retira-se a fonte de tensão e manipula-se o diagrama de forma a evidenciar as ligações entre as resistências.

$$R_{th} = \frac{R_2 R_1}{R_2 + R_1} + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{2R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

3º passo: calcula-se a corrente e tensão desejadas tendo em conta que o circuito total é equivalente a uma fonte de V_{th} com R_{th} e R_0 em série.

$$I_{AB} = V_{th} / (R_{th} + R_0) = \frac{\frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} V}{\frac{2R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_0} = \frac{R_1 - R_2}{2R_1 R_2 + (R_1 + R_2)R_0} V$$

$$V_{AB} = R_0 \times I_{AB} = \frac{R_0 (R_1 - R_2)}{2R_1 R_2 + (R_1 + R_2)R_0} V$$



3. Semicondutores

Como o nome sugere, os materiais semicondutores têm propriedades que estão a meio caminho entre as dos condutores e as dos isoladores. Os materiais semicondutores permitem conduzir a corrente eléctrica apenas em determinadas condições, ao contrário dos materiais condutores.

As propriedades de condução de corrente eléctrica em semicondutores podem ser explicadas também pela teoria das bandas de energia, que foi usada na abordagem à condução em metais.

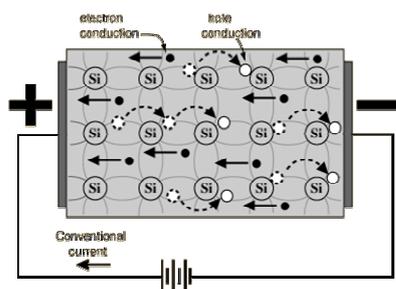
3.1 Teoria das bandas de energia (parte 2)

Nos materiais semicondutores existe uma separação entre as bandas de valência e de condução, no entanto essa separação é consideravelmente menor do que a dos materiais isoladores. Isto significa que, a energia disponível à temperatura ambiente é suficiente para fazer alguns electrões ‘saltar’ o espaço entre as bandas e atingir a banda de condução. Esse número de electrões é necessariamente pequeno quando comparado com o dos metais, em que as bandas de valência e condução são contíguas. Quando um electrão atinge a banda de condução deixa um nível de energia livre na banda de valência, o qual pode ser ocupado por outro electrão. A esse ‘espaço livre’ chamamos lacunas. Repare-se que a passagem de um electrão para um nível de energia superior não desfaz o equilíbrio eléctrico. Os electrões permanecem na estrutura cristalina, compensando as cargas positivas dos núcleos dos átomos. A única diferença é que estes electrões têm mais energia, e podem mover-se – electrões livres –, e na banda de energia de valência existe um nível de energia por ocupar – lacuna. A lacuna não tem carga eléctrica.

Quando um material semiconductor é sujeito a um potencial eléctrico, ocorrem dois fenómenos de condução. O primeiro é o já esperado movimento dos electrões livres, no sentido do potencial positivo. O segundo ocorre não na banda de condução, mas na banda de valência. A energia transmitida pela diferença de potencial pode não ser suficiente para transferir mais electrões para a banda de condução, mas é suficiente para promover movimentos dentro desta banda. Por acção da diferença de potencial alguns electrões podem deixar a banda de valência de um átomo para ocupar uma lacuna na banda de valência de outro. Então, deixa atrás uma lacuna no átomo que ocupava anteriormente. Também aqui o electrão se desloca na direcção do potencial positivo, o que leva a que, se nos concentrarmos antes na posição da lacuna, verificamos que esta se desloca no sentido do potencial negativo. Diz-se então que, em semicondutores, a condução se faz através do movimento de electrões livres e do movimento de lacunas.

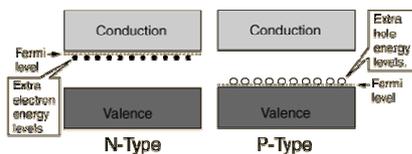
3.1.1 Semicondutores dopados

Quando usados na sua forma pura para conduzir electricidade, os semicondutores são designados por semicondutores intrínsecos. Neste caso, a corrente que é possível gerar é muito reduzida, devido ao reduzido número de electrões livres e de lacunas. As propriedades de condução eléctrica dos semicondutores podem no entanto ser melhoradas se estes forem ‘dopados’. A dopagem de semicondutores consiste na combinação destes elementos com outros elementos, numa percentagem reduzida, mas que tem consequências importantes. Repare-se: a limitação dos semicondutores intrínsecos é o reduzido número de ‘partículas’ (as aspas devem-se ao facto de as lacunas não serem partículas, mas antes uma ausência de partículas)



condutoras de corrente. O objectivo da combinação com outros elementos é o de aumentar o número dessas partículas. Podemos então ter dois casos.

O primeiro caso corresponde ao aumento do número de electrões livres – isto acontece quando se dopa com elementos como o arsénio, fósforo ou antimónio. Quando se combinam estes elementos com um semiconductor, obtemos uma estrutura cristalina onde existem electrões imediatamente abaixo da banda de condução. Estes electrões podem ser encarados como electrões livres, pois uma pequena diferença de potencial, ou mesmo a temperatura ambiente, é suficiente para os levar à banda de condução.

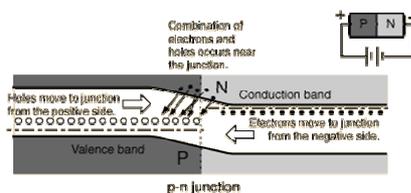


No segundo caso, criam-se lacunas extra – isto acontece quando se dopa com materiais como o bório. Neste caso, passam a existir níveis de energia livres imediatamente acima da banda de valência. Também aqui, uma pequena diferença de potencial é suficiente para levar os electrões a ocuparem estes níveis (fazendo deslocar as lacunas).

Em resumo: para conduzir corrente é necessário que existam electrões em condições de se deslocarem quando o material é sujeito a uma diferença de potencial. Nos metais existem electrões livres; nos semicondutores tipo n existem electrões que facilmente se tornam electrões livres sob efeito de um potencial, ficando disponíveis para conduzir corrente. No caso dos semicondutores temos ainda a condução através de lacunas. Também aqui temos o movimento de electrões sujeitos a um potencial. A diferença em relação aos anteriores (electrões livres) é de que neste caso são electrões com baixa energia, pois existem na banda de valência. A condição para existir condução, neste caso, não é de que os electrões tenham energia suficiente para se moverem livremente, mas que existam níveis de energia por preencher. Esses espaços por preencher são as lacunas, resultantes da dopagem do semiconductor. Se elas existirem, os electrões podem deslocar-se, ocupando-as, sem aumentarem o seu nível energético – uma pequena diferença de potencial é suficiente. Este é o tipo de condução que ocorre em semicondutores p.

3.1.2 junções p-n

O comportamento de materiais semicondutores é especialmente interessante e útil quando se faz a combinação de algumas porções de material do tipo p e n. Na figura ao lado apresentam-se as bandas de energia e as partículas que se encontram numa junção típica, de materiais p e n. Em resultado da junção dos dois materiais, as bandas de energia das duas partes tornaram-se desniveladas – fenómeno que não é aprofundado aqui. A análise daquela figura permite-nos tirar a principal conclusão sobre junções de materiais semicondutores.



Na figura apresenta-se o caso em que se aplica potencial positivo na parte p e negativo na parte n. Neste caso, a transferência de electrões na fronteira dos materiais far-se-á naturalmente da parte n para a p. Os electrões responsáveis por essa condução eléctrica são os electrões livres da parte n. Estes movem-se para zona p e, como aqui a banda de condução tem maior nível de energia, eles descem o seu nível energético para combinar com as lacunas (libertando energia –os semicondutores aquecem!).

Imagine-se que se aplicava o potencial no sentido inverso. Neste caso a passagem de electrões seria observada da parte p para a parte n. Que electrões podem ser responsáveis por esta condução? No caso do material p, os electrões livres são reduzidos, pelo que a condução efectuada por eles é desprezável. Do mesmo modo, o número de lacunas no material n é reduzido, pelo que a condução por electrões de

valência do material p para lacunas no material n é insignificante. Estes argumentos permitem-nos concluir que na junção pn a condução de electrões no sentido $p \rightarrow n$ é muito inferior à condução que é possível realizar no sentido oposto. Como regra geral, podemos dizer que em junções entre materiais n e p a porção n apenas pode funcionar como emissor de electrões e o material p como receptor de electrões.

3.2 díodos

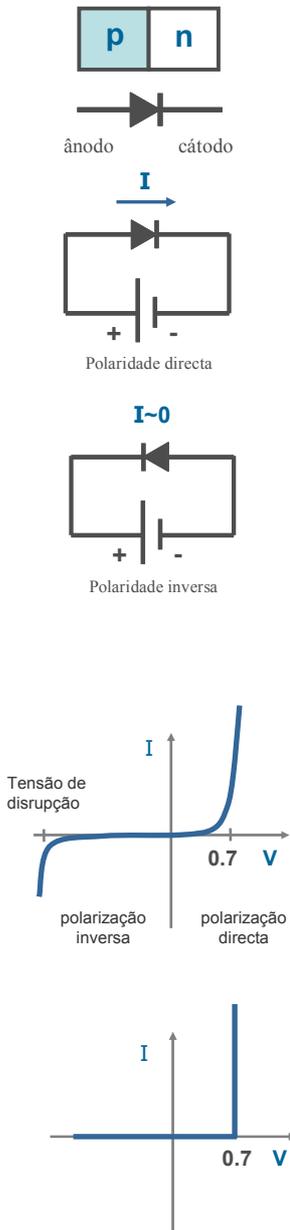
Um díodo é um componente electrónico formado simplesmente por uma junção p-n, cujo comportamento estudámos atrás. À parte p do semiconductor chama-se ânodo e à parte n cátodo. De acordo com as características da junção p-n, o díodo conduzirá corrente quando o ânodo está sujeito ao potencial positivo e o cátodo ao negativo. Nestas condições diz-se que o díodo está **polarizado directamente**. No caso contrário, o díodo está **polarizado inversamente** e não conduz corrente.

Em linhas gerais, um díodo pode ser considerado como uma válvula unidireccional: permite a passagem de corrente no sentido do ânodo para o cátodo (ou, em termos reais, de electrões do cátodo para o ânodo), e bloqueia a corrente no sentido inverso. Este comportamento simplificado, que muitas vezes se adopta para descrever o díodo, é designado por **comportamento ideal**. Dentro desta hipótese, o díodo comporta-se como um interruptor, que estará aberto, se ele for inversamente polarizado e fechado, se ele for directamente polarizado.

No entanto, a passagem de corrente na polarização directa não se faz sem oposição pelo díodo. Observando a figura da junção p-n em 3.2.1, verifica-se que os electrões livres necessitam de vencer um desnível energético para atravessar a junção. Isso significa que é necessário uma diferença de potencial não desprezável para gerar a passagem de corrente – no caso de díodos de Silício esta tensão é aproximadamente 0.7V. A essa diferença de potencial mínima necessária para gerar passagem de corrente vamos chamar **tensão limite**. Ao lado apresenta-se a relação corrente-tensão de um díodo. Esta figura mostra que o início da passagem de corrente não se faz abruptamente. Em vez disso, a transição fez-se gradualmente, nas tensões em torno da tensão limite. Acima da tensão limite a resistência não é nula, pois a corrente continua a depender da tensão aplicada (de forma aproximadamente linear) – isto deve-se à resistência intrínseca dos materiais que compõem o díodo. Naquela figura é possível observar também que o díodo não impede a passagem de corrente para quaisquer valores de tensão em polaridade inversa. Se a tensão inversa for demasiado elevada, o díodo inicia a passagem de corrente no sentido inverso, o que acontece a par com a danificação do díodo. Em termos práticos, o comportamento do díodo pode ser idealizado, segundo a relação corrente-tensão da figura seguinte. A este modelo vamos chamar **modelo de tensão constante**, já que não considera a dependência entre a corrente e tensão que existe para valores superiores a 0.7 V. Ali, considera-se que só há passagem de corrente a partir da tensão limite e que a partir desse valor a corrente não depende da tensão – a resistência é zero. Neste modelo não se considera também o caso da disrupção do díodo para tensões inversas excessivas.

Os díodos apresentam algumas características adicionais, que são normalmente apresentados nas suas especificações, e que importa conhecer.

- quando polarizado inversamente, há alguma passagem de corrente, embora mínima, na ordem dos nanoA
- existe um limite máximo para a corrente que é possível conduzir no sentido directo.



Análise de Circuitos com díodos

Os díodos são componentes intrinsecamente diferentes dos que vimos até agora – as resistências – por apresentarem uma relação tensão-corrente não linear. Em particular, no modelo de tensão constante, estes são descritos por uma função definida por troços:

$$I = 0 \text{ se } V < 0.7 \text{ V}$$

$$I = \infty \text{ se } V \geq 0.7 \text{ V}$$

Devido a esta definição, não é possível usar directamente o método das leis de Kirchhoff na análise de circuitos com díodos visto que, à partida, não sabemos em que zona de funcionamento (se o primeiro ou o segundo troço) o díodo se vai encontrar. Consoante o valor da queda de tensão que o circuito gera nos terminais do díodo, este será descrito por uma ou outra expressão. Por outro lado, o próprio díodo influencia o funcionamento do circuito em que está inserido e por isso pode não ser possível, de imediato, prever o tipo de polarização a que ele está sujeito.

Para analisar um circuito com um díodo podemos assumir que ele se encontra polarizado directamente, e a conduzir corrente. A partir dessa hipótese, determinamos as restantes variáveis do circuito. Neste momento, podemos estar perante alguns cenários distintos.

Se as fontes de tensão do circuito forem constantes, a resolução do circuito conduz a uma solução possível ou impossível. No caso de a solução ser impossível, significa que a hipótese era falsa, ou seja, o díodo não se encontra a conduzir corrente (está polarizado inversamente, ou sob tensão inferior a 0.7 V).

Se a fontes de tensão não for constante (tensão alternada, ou tensão constante mas ainda por definir) então a resolução do circuito irá dar-nos a condição para a tensão da fonte que inicia a passagem de corrente no díodo. Essa condição diz-nos quando é que o circuito apresenta o díodo a conduzir corrente ou no estado de ‘aberto’.

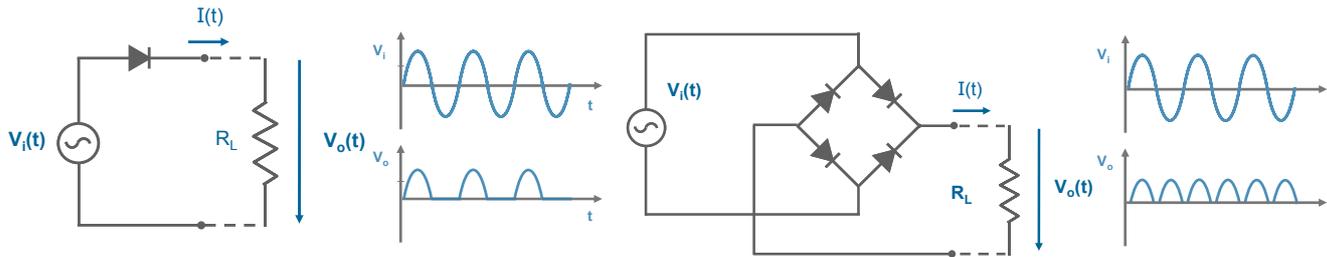
No caso de existirem vários díodos no mesmo circuito será necessário testar as diferentes combinações dos seus estados.

Como se apresentam

Os díodos para correntes baixas têm forma cilíndrica e duas pontas terminais de material condutor. Díodos usados na condução de correntes elevadas têm a forma de uma cápsula que se monta verticalmente sobre um dissipador de calor.

Em qualquer caso, o ânodo e o cátodo têm de ser distinguidos inequivocamente. Nos díodos de corrente baixa, o cátodo é identificado com uma faixa junto a esse terminal. Em díodos de correntes elevadas, o cátodo corresponde à extremidade roscada do componente.





Em que circuitos participam

Circuitos rectificadores

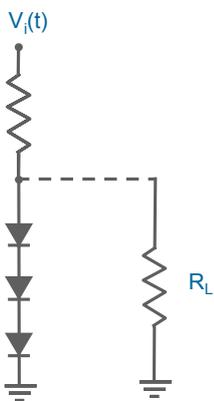
Rectificador de meia onda – Neste circuito um diodo é inserido à saída de uma fonte de tensão alternada, impedindo a passagem de corrente no sentido anti-horário. Assim, a tensão disponível na carga corresponde apenas à parte positiva da tensão da fonte.

Rectificador de onda completa – neste circuito 4 díodos são montados em forma de ponte (à maneira da ponte de Wheatstone), levando a que todas as oscilações da tensão gerada sejam fornecidas à resistência, mas com a mesma polaridade, positiva.

Em qualquer um dos rectificadores, a tensão disponível tem valores inferiores à tensão da fonte, devido à queda de tensão imposta pelos díodos, de 0.7 V

Regulação de tensão

Nestas aplicações, os díodos são inseridos em circuitos com o objectivo de introduzir quedas de tensão de valor fixo: 0.7V. Quando são desejados valores superiores de quedas de tensão, vários díodos são montados em série.



Especificações

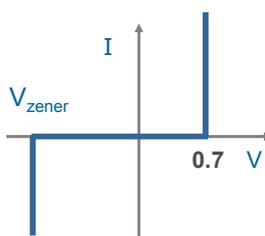
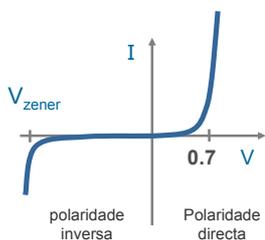
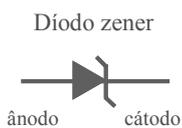
Corrente inversa (reverse current, I_R) – idealmente os díodos não permitem a passagem de corrente quando são polarizados inversamente. No entanto, existe alguma passagem de corrente, embora mínima. Este parâmetro caracteriza o seu valor.

Tensão inversa de pico (peak inverse voltage, PIV) - este parâmetro caracteriza a tensão inversa que originará a passagem de corrente no sentido inverso e a danificação do componente.

Corrente máxima (maximum forward current, I_F) – este parâmetro indica a corrente máxima que o diodo pode escoar, no sentido directo.

Díodos de Zener

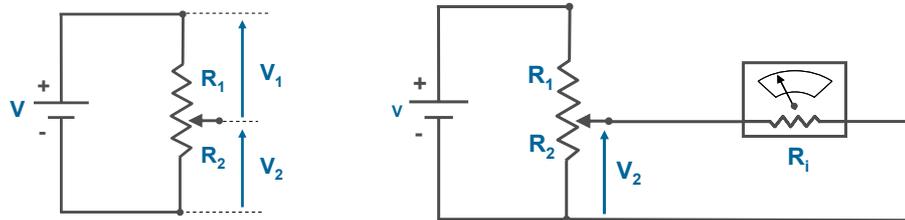
Os díodos de Zener comportam-se como díodos comuns quando polarizados directamente mas, quando polarizados inversamente podem conduzir corrente se a tensão ultrapassar um valor especificado, V_z . Ao contrário dos díodos comuns, o modo de funcionamento de interesse no caso dos díodos de zener é a polaridade inversa. Os díodos de zener são uma alternativa aos díodos comuns em aplicações de regulação de tensão onde os últimos podem constituir uma solução pouco elegante. Se forem desejados níveis de tensão fixa acima de alguns volts, será necessário um grande número de díodos comuns para produzir essa queda de tensão.



3.3 Transístores

Os transístores surgiram nos finais da década de 1940 provocando uma verdadeira revolução na electrónica. Antes do seu aparecimento, a sua função era desempenhada por válvulas catódicas, menos eficientes e mais dispendiosas. A introdução desta tecnologia num circuito eléctrico confere uma nova dimensão ao tipo de processamento que é possível realizar por meio da electricidade. As novas funções que o transístor introduz num circuito têm consequências de tal modo importantes que levam a que se substitua a expressão ‘circuito eléctrico’ para estes circuitos por ‘circuito electrónico’. De seguida veremos as razões que motivam o uso de transístores e a forma como os transístores respondem a essas necessidades.

3.3.1 Electricidade que controla electricidade



Exemplo 1 – leitura da tensão produzida por um potenciómetro.

Imaginemos que pretendemos fazer a leitura do sinal de tensão V_2 gerado por um potenciómetro. É sabido que esse valor de tensão é dado por

$$V_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V$$

Para fazer essa leitura vamos usar um indicador analógico que tem uma resistência interna R_i . A introdução desse instrumento modificou a configuração do circuito, que agora passou a ter a resistência R_i em paralelo com R_2 . Se designarmos por R_{eq} a resistência equivalente ao conjunto das duas,

$$R_{eq} = \frac{R_2 R_i}{R_2 + R_i}$$

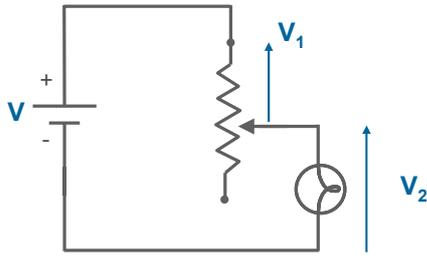
então a tensão em V_2 será agora

$$V_2 = \frac{R_{eq}}{R_1 + R_{eq}} V,$$

diferente do valor inicial. Este exemplo realça o seguinte problema: o instrumento de leitura que estamos a usar interfere com o circuito que produz o sinal de tensão a medir. Isto acontece porque o próprio instrumento de leitura usa a corrente que passa nesse circuito, logo passa a fazer parte integrante dele. Ao ligarmos o instrumento de leitura, abrimos outro canal para a passagem de corrente e teremos no divisor de tensão uma resistência equivalente na parte inferior menor do que a inicial. Por consequência, o valor de tensão intermédia, que queríamos medir, já não é a mesma que tínhamos inicialmente – o instrumento de leitura interferiu com a variável a medir.

Este exemplo pretende demonstrar que, com os componentes eléctricos que conhecemos até agora, estamos sujeitos a um problema incontornável: não

conseguimos criar um circuito eléctrico que seja capaz de medir um sinal de tensão sem interferir (modificar) esse sinal.



Exemplo 2 - controlo da luminosidade de uma lâmpada

O controlo da luminosidade de uma lâmpada pode ser realizado através de um circuito como o da figura ao lado. Neste circuito utiliza-se um reóstato – uma resistência variável – em série com a lâmpada, dando origem a um circuito divisor de tensão. Aumentando a resistência do reóstato a tensão disponível aos terminais da lâmpada vai ser menor e o seu brilho diminui. Com este circuito obtém-se o objectivo desejado, mas com alguns inconvenientes, especialmente relevantes se a tensão e corrente que a lâmpada usa forem elevadas. Esses inconvenientes são:

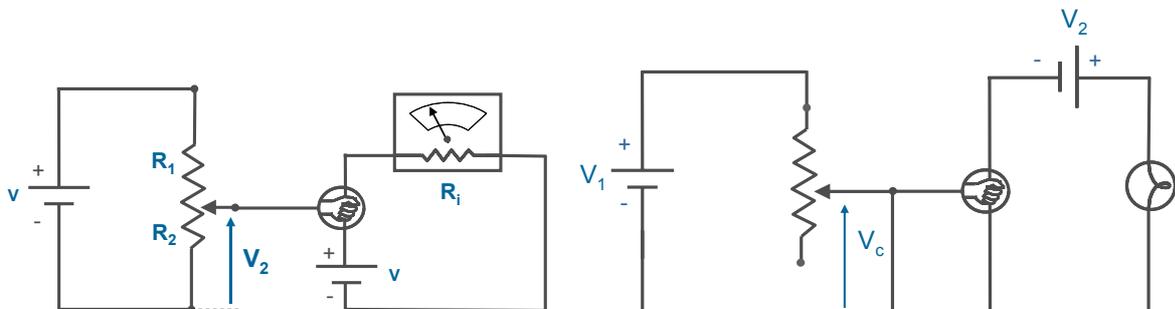
- a corrente usada para fazer brilhar a lâmpada é a mesma que passa no reóstato: se essa corrente for elevada, há dissipação de energia no reóstato que é significativa;
- essa dissipação de energia toma a forma de calor, podendo causar a danificação da resistência e causar perigo;
- o componente de controlo, que é manipulado pelo utilizador, está sujeito a tensões elevadas, podendo originar perigo humano.

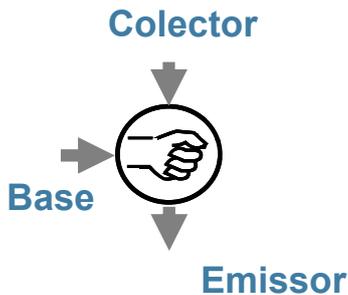
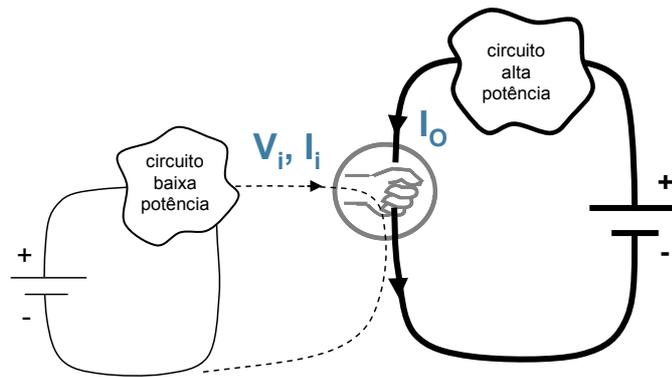
Os problemas evocados nos exemplos anteriores poderiam ser eliminados se conseguíssemos criar uma configuração para aqueles circuitos onde tivéssemos dois circuitos distintos, mas relacionados entre si.

No primeiro caso teríamos o divisor de tensão e o aparelho de leitura em circuitos independentes, mas com um sinal de tensão do primeiro a modular o fluxo de cargas no segundo. Desta forma conseguiríamos isolar o circuito divisor de tensão do circuito do aparelho de leitura, e o sinal medido já não seria corrompido.

No segundo caso teríamos o reóstato a produzir também um sinal de tensão que comandaria a tensão aplicada na lâmpada, que seria alimentada por uma fonte distinta. O segundo circuito seria alimentado por uma tensão elevada, enquanto o primeiro utilizaria tensões e correntes reduzidas. Desta forma teríamos o componente de controlo isolado das tensões elevadas e não existiria desperdício de energia.

Para que estes cenários sejam possíveis é necessário que possamos dispor de um componente que faça a interface entre dois circuitos eléctricos. Um componente que permita que um circuito influencie o funcionamento de outro. Esse componente é o **transistor**.





O transistor é um componente de três terminais que representaremos simplificadaamente como na figura ao lado. Consoante o tipo de transistor, estes terminais têm diferentes designações, mas aqui adoptaremos as do transistor original (transistor bipolar) com os termos 'base', 'emissor' e 'colector'.

Se o transistor faz a interface entre dois circuitos, como pode ter apenas três terminais? O mais óbvio seria termos 4 terminais, com um par pólo+ / pólo- para cada circuito. A figura acima mostra como o transistor é inserido entre 2 circuitos e procura clarificar o seu funcionamento.

À esquerda na figura temos o circuito de baixa potência (por exemplo, um divisor de tensão) o qual cria um sinal de comando, normalmente uma tensão, que deve controlar o circuito de alta potência. Para transmitir esse sinal ao transistor, um ramo deste circuito (marcado a traço interrompido) atravessa o transistor. Assim, no terminal base temos uma tensão V_i e uma corrente I_i , com as quais pretendemos controlar o circuito de alta potência. O circuito de alta potência atravessa o transistor entre o terminal colector e o terminal emissor. A razão de termos apenas três terminais deve-se ao facto de os terminais de saída dos dois circuitos serem de facto o mesmo: as duas correntes I_i e I_o juntam-se no terminal de saída, o emissor.

O papel de interface que o transistor desempenha consiste na modulação da corrente do circuito de alta potência I_o , em função das características do fluxo de baixa corrente. Os diferentes tipos de transistores diferem no tipo de relação que estabelecem: em alguns a corrente I_o é função da corrente I_i , noutros é função da tensão V_i .

Atrás deu-se a entender que um dos benefícios do transistor seria permitir comandar um circuito a partir de outro, mas sem interferir no primeiro. No entanto, agora vemos que de facto o transistor consome corrente do circuito de baixa potência, pois existe um fluxo de cargas desse circuito que o atravessa. No entanto, os benefícios do transistor mantêm-se, pois este fluxo é normalmente bastante baixo, não influenciando significativamente o circuito de baixa potência. Mais uma vez, os diferentes tipos de transistores apresentam desempenhos diferentes neste aspecto - alguns consomem mais corrente que outros.

Foquemo-nos agora um pouco mais no papel dos transistores e na repercussão que produzem na electrotecnia. Os transistores, ao permitirem o interface entre dois fluxos distintos de cargas eléctricas, introduzem duas funcionalidades fundamentais nos circuitos eléctricos:

O **isolamento** – através de um transistor podemos ter dois circuitos onde o comportamento do segundo está dependente do primeiro, mas o primeiro não é afectado por essa relação. É de notar que, quando usamos apenas componentes passivos, qualquer novo componente que é introduzido no circuito, seja em que

configuração for, tem repercussões em todo o circuito. Apenas os transístores permitem ultrapassar esse constrangimento.

A **amplificação** – através de um transístor podemos ter um circuito de baixa potencia a comandar um circuito de potência superior. O segundo circuito produz sinais em corrente e tensão que podem ser entendidos como uma réplica dos sinais medidos no primeiro, mas com potência superior. A esta operação que multiplica a potência de sinais podemos chamar de amplificação.

$$I_O I_i V_i$$

Os transístores são designados por **componentes activos**, em contraste com as resistências (e outros componentes estudados mais à frente) que são **componentes passivos**. Os componentes passivos estabelecem uma relação entre a tensão e corrente (por exemplo, a lei de Ohm, no caso das resistências) nos fluxos de cargas que os atravessam, mas não introduzem energia no circuito. Em que é que os transístores se distinguem disto? Os transístores modulam a corrente de saída I_O em função da tensão ou corrente de entrada, V_i / I_i . Se interpretarmos V_i / I_i como a entrada do transístor e I_O como a sua saída, observaremos à saída uma réplica do sinal de entrada, mas com potência muito superior. É como se o transístor fornecesse energia ao sinal de entrada. Obviamente, o transístor não produz magia, essa energia vem de algum lado. A verdade é que a corrente que observamos à saída pertence a um circuito eléctrico distinto, que utiliza potencia superior ao primeiro circuito - mas o resultado observável pode ser interpretado como se a potencia do sinal aumentasse! Estes componentes, que introduzem energia num circuito, são designados componentes activos.

Os transístores, ao introduzirem as funcionalidades de isolamento e amplificação, trazem novas possibilidades de processamento a um circuito eléctrico, o que leva a que se chame aos circuitos que usam este tipo de tecnologia, **circuitos electrónicos**.

3.3.2 Transístor bipolar

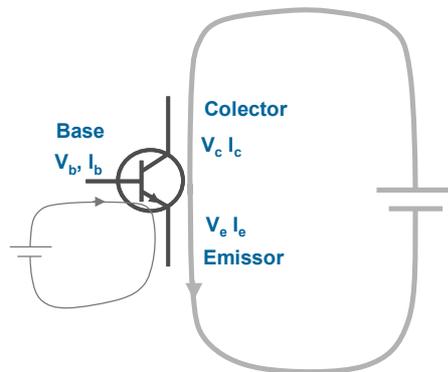
O transístor bipolar é construído como uma sanduíche de materiais semicondutores, podendo existir na configuração npn (feita de material p entre duas de material n) ou pnp (material n entre duas fatias de material p). O terminal de controlo é designado base e está conectado à fatia intermédia. Os terminais emissor e colector estão ligados à fatias exteriores.

Nos transístores bipolares existe corrente eléctrica entre a base e o emissor e entre o colector e o emissor. À saída do emissor teremos então a sobreposição daquelas duas correntes. O princípio de funcionamento do transístor bipolar baseia-se na seguinte propriedade: a corrente que entra no colector é controlada pela corrente que entra na base (noutro tipo de transístores será controlada pela tensão no terminal de controlo, não pela corrente).

A utilização de um transístor bipolar num circuito não é trivial: exige que se conheçam as suas características de funcionamento e que se conheçam as configurações de circuitos adequadas para atingir os efeitos desejados. O funcionamento de um transístor bipolar obedece aos seguintes ‘mandamentos’

- A junção base-emissor tem de estar polarizada directamente: $V_{be}=0.7V$
- Deve existir uma tensão no colector superior à do emissor
- A corrente no colector é dada por $I_c = h \times I_b$

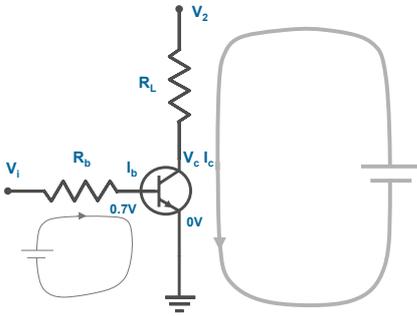
Na última regra, h é um factor de amplificação e é característico do transístor.



Existem duas tipologias mais importantes para a integração de um transistor bipolar num circuito electrónico.

Emissor comum

Nesta configuração o emissor encontra-se ligado à terra. Pelo facto de a tensão no emissor ser fixa, enquanto a tensão no colector é variável, chama-se a esta configuração emissor comum. Nesta configuração, a carga – componente ao qual queremos aplicar uma tensão e corrente moduladas – está ligado entre o potencial superior, de alimentação, e o colector. A análise deste circuito tem por objectivo determinar os valores da corrente e tensão a que a carga está sujeita, e como se relacionam com a tensão de controlo, V_i . Nesta configuração, a tensão na base não é arbitrária, pelo que se torna necessário interpor uma resistência entre a tensão de controlo, V_i , e a base.



Análise do circuito

Por a queda de tensão entre a base e o emissor ser 0.7V e este ultimo estar ligado à terra, podemos concluir que $V_b=0.7V$.

A corrente que entra na base é $I_b=(V_i-0.7)/R_b$.

A corrente no colector é dada pelo terceiro 'mandamento' $I_c=I_b \times h$.

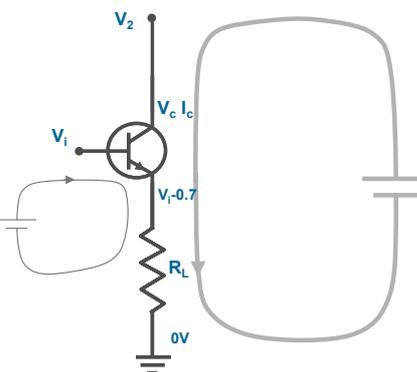
A queda de tensão na carga pode ser calculada por $V_2-V_c=I_c \times R_L \Leftrightarrow$

$$V_c=I_c \times R_L- V_2$$

Esta configuração apresenta uma desvantagem significativa pelo facto de o ganho h não ser um parâmetro fiável. Este parâmetro é muito variável dentro do mesmo modelo de transistor e é dependente das gamas de corrente em causa. Por essa razão, os valores de corrente no colector (e por consequência de tensão) não podem ser previstos com grande precisão.

Colector comum

Nesta configuração, a carga é conectada ao emissor do transistor. Neste caso a tensão ao colector é constante, daí o nome dado a esta configuração. Mais uma vez, o objectivo da análise desta configuração é de determinar a tensão e corrente na carga.



A aplicação do 1º 'mandamento' leva-nos a concluir que a tensão no emissor será $V_e=V_i-0.7$

A corrente que atravessa a carga será $I_e=(V_i-0.7)/R_L$.

Uma característica fundamental desta configuração é a tensão no emissor: qualquer que seja a carga acoplada ao transistor este mantém um potencial de $V_e=V_i-0.7$ no seu terminal. Para isso, o transistor garante que faz passar pela carga a corrente necessária para manter a tensão desejada. Aqui está presente a essência da amplificação/isolamento- o transistor fornece um sinal de tensão idêntico ao sinal de entrada, mas com a corrente necessária para conduzir qualquer carga (dentro dos seus limites de operação). Neste caso, a corrente que atravessa a carga não está dependente do ganho h , apenas depende da tensão aplicada e do valor de resistência

da própria carga. Isto é importante como vantagem desta configuração: neste caso, o comportamento do circuito é previsível.

Pelo facto de esta configuração garantir uma tensão na carga igual à tensão de controlo, a menos de um offset de 0.7V, esta configuração é por vezes designada por ‘seguidor de tensão’.

3.3.3 Circuitos Integrados

Na maioria das situações não se espera usar transístores na sua forma simples, mas na forma de componentes especializados, designados por **circuitos integrados**. Os circuitos integrados existem para tornar a vida mais fácil a quem projecta e implementa circuitos electrónicos. Consoante o tipo de aplicação, seja amplificação de som, realização de operações lógicas, comutação, etc, os transístores têm de ser associados a outros componentes de forma a realizarem a função desejada. Uma vez que o tipo de circuitos mais bem sucedidos para cada fim já é bem conhecido, porquê comprar os componentes em separado e dar-se ao trabalho de construir circuitos que são repetidos vezes sem conta? Com vista a responder a esta necessidade, desenvolve-se actualmente uma imensa variedade de circuitos miniatura que integram um conjunto de componentes necessários para aplicações especializadas. Esses circuitos são constituídos por componentes de dimensões muito reduzidas e envolvidos em cápsulas de material isolador (cerâmico, plástico ou epóxico), onde apenas os terminais de ligação são expostos – é a esses circuitos que chamamos circuitos integrados.

4. Condicionamento de Sinal Analógico

4.1 Componentes dinâmicos – Condensadores e Bobines

Este capítulo faz a introdução aos componentes eléctricos com comportamento dinâmico. Todos os componentes de que falámos atrás caracterizam-se por imporem relações entre as variáveis eléctricas que só dependem dos valores instantâneos dessas variáveis. Por exemplo, no caso de uma resistência temos: $V(t)=R \times I(t)$. Esta pode ser uma descrição um pouco idealizada do comportamento de uma resistência (o valor da resistência pode, por exemplo, variar com o seu historial de funcionamento, pois a sua temperatura influencia este parâmetro), mas, para a maioria das aplicações, é um modelo suficientemente preciso deste componente. Os componentes de que falaremos neste capítulo são designados por **componentes dinâmicos**, porque impõem relações entre as variáveis eléctricas que não dependem apenas dos seus valores instantâneos, mas também do seu historial passado. Em termos matemáticos, as relações dinâmicas são expressas pelos operadores *derivada* e *integral*.

A abordagem que vai ser usada para explicar o comportamento dos componentes condensador e bobine vai basear-se na analogia com os seus equivalentes mecânicos. Com este método pretende-se construir uma compreensão clara do que é o comportamento físico destes componentes e dessa forma suscitar uma compreensão fundamentada da sua influência em diferentes circuitos eléctricos. A analogia com os equivalentes mecânicos constitui um poderoso instrumento para a compreensão destes componentes pois permite fazer um paralelo entre um sistema físico não quotidiano, não manipulável e não observável (o circuito eléctrico), com um tipo de sistemas físicos com os quais interagimos diariamente (os objectos do mundo físico). Esse paralelo irá permitir criar uma forte intuição para compreender estes componentes eléctricos.

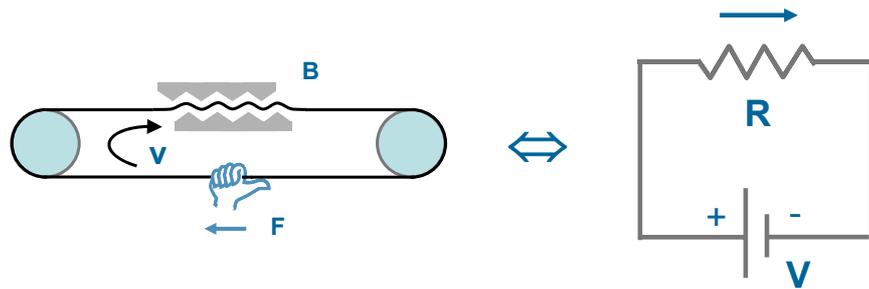
4.1.1 Condensadores

Na análise que iremos desenvolver ao longo desta secção vamos estabelecer uma comparação entre circuitos eléctricos e sistemas mecânicos. Esta comparação é possível porque existe uma equivalência entre os papéis das variáveis eléctricas e as variáveis mecânicas em cada um dos seus domínios físicos. A diferença de potencial (V) é equivalente à força (F) e a corrente (I) à velocidade (v). A diferença de potencial tem o papel de um ‘força’ que gera o movimento de electrões, daí a correspondência entre as variáveis. As variáveis I e v representam ambas um fluxo: a primeira representa um fluxo de cargas (nº de cargas conduzidas por unidade de tempo-C/s), enquanto a segunda representa um fluxo de posição (nº de metros percorridos por unidade de tempo-m/s).

Equivalência entre sistemas mecânicos e eléctricos

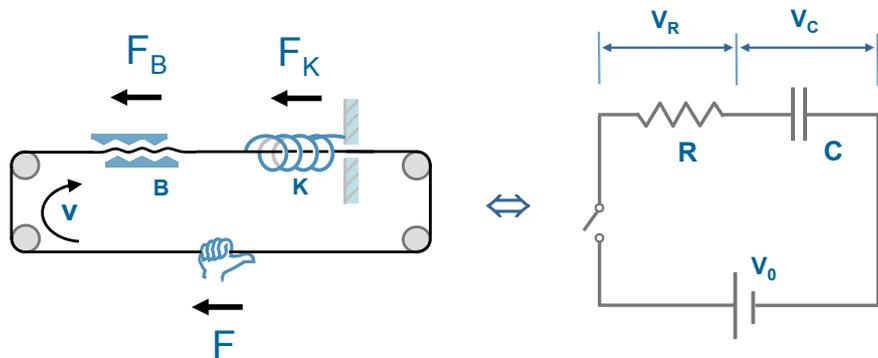
$$V \Leftrightarrow F$$

$$I \Leftrightarrow v$$



Antes de avançarmos com o estudo do condensador, vamos dar um passo atrás e interpretar a lei de Ohm à luz do seu equivalente mecânico. Sabemos que esta lei é expressa como $V=R \times I$. Tendo em conta a equivalência entre os dois domínios, a lei de Ohm, será expressa, no domínio mecânico por uma relação do tipo como $F=K \times v$. Esta relação permite-nos concluir que a resistência eléctrica é equivalente ao amortecedor mecânico, o qual impõe uma relação linear entre força e velocidade – a constante de proporcionalidade é o coeficiente de atrito. A figura acima apresenta esta equivalência na forma dos respectivos sistemas físicos: um circuito composto por uma resistência é equivalente a um sistema mecânico onde apenas está o componente de atrito. O componente de atrito limita a velocidade de deslocamento do sistema mecânico, tal como a resistência limita a corrente presente no circuito eléctrico.

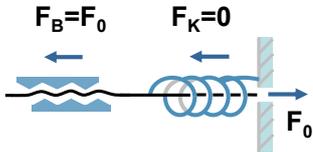
$$V=R \times I \Leftrightarrow F=B \times v$$



Estamos agora em condições de introduzir o equivalente mecânico do condensador eléctrico. Esse equivalente é um elemento fundamental em qualquer sistema mecânico – é o componente elástico, tipicamente representado por uma mola. A figura acima apresenta um sistema mecânico idealizado, que é constituído por uma mola e um amortecedor em série e que está sujeito a uma fonte de força constante. Este é o sistema mecânico equivalente a um circuito eléctrico composto por uma resistência e um condensador - circuito RC. A interpretação do papel da mola neste sistema vai revelar-nos o comportamento de um condensador num circuito eléctrico.

O tipo de situação que nos vai ocupar de momento é o comportamento do condensador em corrente contínua ou seja, quando o circuito está sujeito a tensões de valor constante salvo variações instantâneas de um patamar para outro. Do mesmo modo, vamos estudar o sistema mecânico quando se encontra sob uma força constante mas sujeita a variações instantâneas. Analisemos então o caso do sistema mecânico da figura, quando a força aplicada varia de um valor inicial (por exemplo,

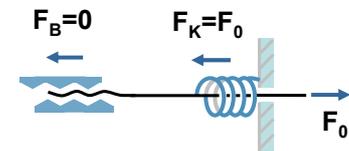
força nula) para um valor superior, F_0 . Imediatamente após essa variação teremos as seguintes condições:



$t=0$ (primeira figura)

$F_K=0$ – no instante inicial a mola não se encontra ainda comprimida, pelo que a força por ela produzida é nula.

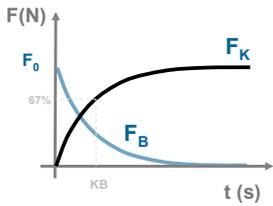
$F_B=F_0$ – Como a reacção da mola é nula, é a força do amortecedor que equilibra a força aplicada (consideramos que a massa do sistema é desprezável). O sistema irá mover-se a uma velocidade que resulta da relação $F=B \times v$.



$t \gg 0$ (segunda figura)

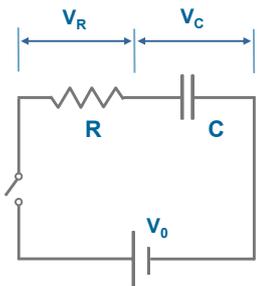
$F_K=F$ – Com o passar do tempo, o sistema move-se, contraindo a mola e suscitando uma reacção desta. Quanto maior é esse deslocamento, maior será a reacção. Em determinada posição a reacção será tal que anula completamente a força exterior aplicada. O estado do sistema converge então para uma situação estacionária – o sistema pára.

$F_B=0$ – Encontrando-se o sistema em repouso, o amortecedor não gera qualquer reacção – a força que produz é nula.

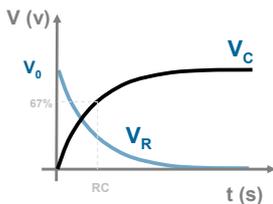


O comportamento retratado atrás é descrito no gráfico da evolução de F_B e F_K , apresentado na figura ao lado. Este gráfico evidencia como as duas variáveis evoluem inversamente, primeiro com F_B a tomar o valor de F_0 e, mais tarde, F_K crescendo até atingir também o valor F_0 .

Em termos energéticos, o amortecedor é um elemento dissipador de energia, enquanto a mola é um elemento que acumula energia potencial elástica. A compressão (ou distensão) de uma mola representa energia em potência, que pode ser recuperada quando a mola é libertada. Se a força exterior for cessada, a energia acumulada na mola liberta-se, através do seu movimento para a posição de equilíbrio inicial.



O sistema mecânico estudado é fisicamente equivalente ao circuito eléctrico constituído por uma resistência e um condensador, apresentado na figura ao lado. Sejam os mais objectivos nessa equivalência: a diferença de potencial gerada pela bateria é equivalente à força exterior; a queda de tensão na resistência é equivalente à força de reacção do amortecedor e a queda de tensão no condensador é equivalente à força produzida pela mola.

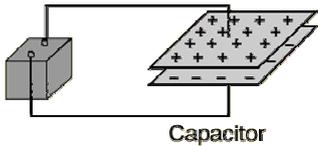


$V_0 \Leftrightarrow F_0$
$V_B \Leftrightarrow F_R$
$V_C \Leftrightarrow F_K$

A situação que pretendemos analisar é despoletada pelo fechar do circuito RC, que dá origem à aplicação da tensão V_0 , da bateria, no circuito. Inicialmente a tensão aos terminais do condensador é nula, enquanto $V_R=V_0$. Com a passagem de corrente através do circuito, há um progressivo acumular de cargas eléctricas no

condensador, o qual produz uma tensão crescente. O circuito acaba por atingir uma situação estacionária, quando a queda de tensão no condensador equilibra a tensão criada na bateria. Então, a queda de tensão na resistência é obviamente nula, pois não há passagem de corrente. O condensador assume, tal como a mola no sistema mecânico, o papel do componente que acumula energia potencial, que pode ser recuperada quando lhe é permitido libertar as cargas eléctricas acumuladas. Enquanto a mola absorve energia com a acumulação de deslocamento, o condensador absorve energia com a acumulação de cargas eléctricas.

Que componente é este que acumula cargas eléctricas, em lugar de permitir o seu fluxo pelo circuito eléctrico? Se este componente acumula as cargas eléctricas, como é possível que inicialmente se observe passagem de corrente?

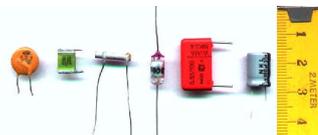


Na *wikipedia* (adaptado da versão brasileira) um condensador é descrito como:

‘Os formatos típicos consistem em dois eléctrodos ou placas que armazenam cargas opostas. Estas duas placas são condutoras e estão separadas por um isolante ou por um dieléctrico. A carga é armazenada na superfície das placas, junto ao dieléctrico. Devido ao facto de cada placa armazenar cargas iguais, porém opostas, a carga total no dispositivo é sempre zero. A propriedade que estes dispositivos têm de armazenar energia eléctrica sob a forma de um campo electrostático é chamada de capacitância (C) e é medida pelo quociente da quantidade de carga (Q) armazenada pela diferença de potencial ou tensão (V) que existe entre as placas:

$$C=Q/V$$

Pelo Sistema Internacional (SI), um condensador tem a capacitância de um Farad (F) quando um Coulomb de carga causa uma diferença de potencial de um Volt (V) entre as placas. O Farad é uma unidade de medida considerada muito grande para circuitos práticos, por isso, são utilizados valores de capacitâncias expressos em microfarads (μF), nanofarads (nF) ou picofarads (pF).



Os electrões não podem passar directamente através do dieléctrico de uma placa do condensador para a outra. Quando uma queda de tensão é aplicada a um condensador, através de um circuito externo, a corrente flui para uma das placas, carregando-a, enquanto flui da outra placa, carregando-a, inversamente. Por outras palavras, quando a diferença de tensão aplicada num condensador muda, o ele será carregado ou descarregado. A fórmula para a corrente é dada por

$$I=dQ/dt=C.dV/dt$$

Onde I é a corrente fluindo na direcção convencional, e dV/dt é a derivada da diferença de tensão, em relação ao tempo.

No caso de uma tensão contínua logo um equilíbrio é encontrado, onde a carga das placas corresponde à tensão aplicada pela relação $Q=CV$, e mais nenhuma corrente poderá fluir pelo circuito. Logo a corrente contínua não pode passar. Entretanto, correntes alternadas (AC) podem: cada mudança de tensão ocasiona carga ou descarga do condensador, permitindo desta forma que a corrente flua.’

Este excerto apresenta as características essenciais de um condensador e ilumina o tipo de comportamento que descrevemos atrás. Um condensador não é senão um par de placas condutoras isoladas separadas entre si. Esta construção distingue-se de outros componentes eléctricos por não permitir a passagem de corrente (as placas estão isoladas) e por compreender um volume de material condutor, nas suas placas, capaz de acomodar ou fornecer um número significativo de cargas.

Macroscopicamente, aquilo que detectamos aos terminais de um condensador, quando aplicamos uma tensão é, de facto, uma corrente eléctrica. No entanto, os electrões que entram num pólo não são os mesmos que saem no outro. Uma das placas do condensador recebe electrões, enquanto a outra liberta electrões para o circuito – este comportamento simula uma corrente eléctrica. Obviamente, a quantidade de electrões que uma das placas pode acomodar e a quantidade que a outra pode libertar é limitada, pelo que a corrente que ‘atravessa’ um condensador está também limitada: só pode ocorrer durante um período de tempo finito, o que significa que um condensador não permite o fluxo de corrente contínua.

Características essenciais do condensador:

O condensador tem um comportamento equivalente ao de uma mola num sistema mecânico.

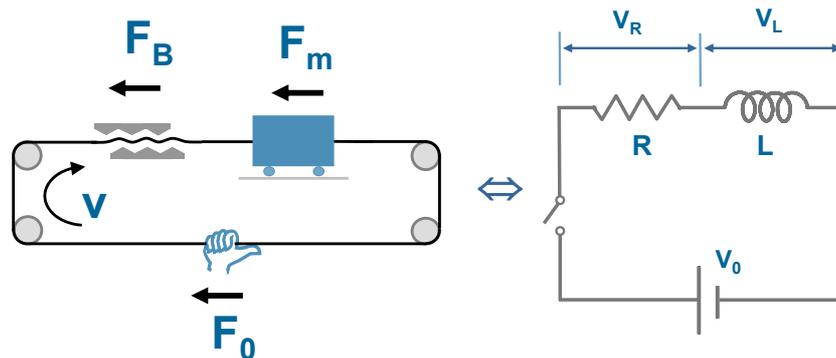
O condensador armazena cargas eléctricas, quando sujeito a uma diferença de potencial aplicada.

A capacidade de acumulação de cargas é quantificada pela propriedade capacitância, C [farad].

O condensador opõe uma queda de tensão como reacção à acumulação de cargas, descrita pela relação

$$V=1/C \int Idt$$

O condensador armazena energia na forma de energia potencial.



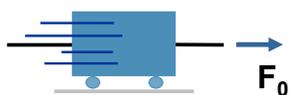
4.1.2 Bobines

A bobine é um componente eléctrico que se obtém do enrolamento de um grande comprimento de fio condutor em torno de um núcleo oco ou um núcleo de material ferromagnético. Tal como o condensador, a bobine também encontra equivalente no campo da mecânica, neste caso no componente massa. Vamos recordar a forma como uma massa intervém num sistema mecânico, para percebermos o papel de uma bobine num circuito eléctrico.

Se quisermos descrever o comportamento de uma massa em poucas palavras, podemos afirmar que uma massa é um elemento mecânico que ‘não gosta’ de mudar a sua velocidade. Esta é uma conclusão directa da primeira Lei de Newton (lei da Inércia): *Objects in motion tend to stay in motion, and objects at rest tend to stay at rest unless an outside force acts upon them*³. Se uma massa não gosta de mudar a sua velocidade, de que forma reage quando isso acontece? A segunda lei de Newton responde a esta pergunta: o valor da força de reacção de uma massa com aceleração a é dado por $F_m = m \times a$.

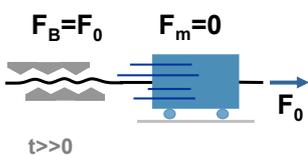
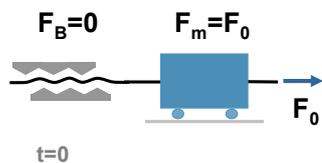
O sistema mecânico da figura acima é o que nos vai servir de modelo para compreender um circuito eléctrico com uma bobine e uma resistência (circuito RL). Nesse circuito temos a massa, o equivalente à bobine, e ainda um amortecedor e uma fonte de força constante. Pensemos antes de mais no que aconteceria se não existisse atrito no sistema (se eliminássemos o amortecedor). Nesse caso, a força aplicada ao sistema era transmitida por completo à massa, que iria apresentar uma aceleração dada por $F_0 = m \times a$. A aceleração constante e o decorrer do tempo iria levar a massa a atingir uma velocidade infinita! Na realidade existe sempre atrito mecânico (a menos que estejamos no vácuo) o que impede que isto aconteça. Na presença de atrito estamos no caso das figuras ao lado. Vejamos o que acontece quando variamos a força aplicada instantaneamente de zero para F_0 .

$$F = m \cdot a \Rightarrow a \rightarrow \infty !$$



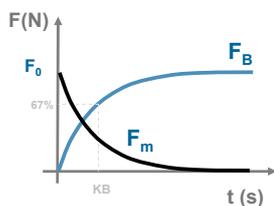
Se não houvesse atrito

³ http://en.wikipedia.org/wiki/Newtons_laws



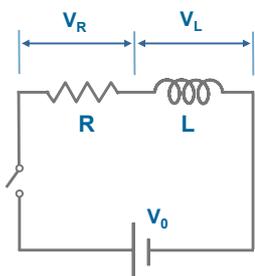
$t=0$ (primeira figura)
 $F_m=F_0$ – A força exterior aplicada leva a que a massa passe do repouso para o movimento. Esta contraria essa mudança de estado com uma força com o mesmo valor, designada por força de inércia. A massa acelera com uma aceleração dada por $F_0=m \times a$.
 $F_B=0$ – Como no instante inicial a velocidade é nula, a força de atrito é também nula.

$t \gg 0$ (segunda figura)
 $F_B=F$ – Com o passar do tempo, a velocidade do movimento cresce, e a força de atrito aumenta proporcionalmente. Em determinada altura a força de atrito será tal que equilibra completamente a força exterior aplicada. O estado do sistema converge então para uma situação de velocidade constante.
 $F_m=0$ – A força de atrito equilibra completamente a força exterior aplicada. Nestas condições, nenhuma porção da força exterior é aplicada para acelerar da massa. Em resultado, a massa não intervém com qualquer força de reacção – a sua velocidade é constante.

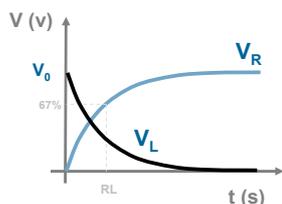


O gráfico da evolução da força na massa e no amortecedor expressa bem o comportamento descrito acima. A força de reacção da massa iguala a força exterior no instante inicial e posteriormente tende para zero, à medida que a força de atrito cresce. Ao contrário da situação onde não existe atrito, aqui a velocidade é limitada superiormente (não cresce para infinito), uma vez que a força exterior é progressivamente equilibrada pelo atrito, deixando de ser usada na aceleração da massa.

Em termos energéticos, a massa é um elemento que retém energia na forma de movimento – energia cinética. O sistema mecânico estudado é fisicamente equivalente a um circuito eléctrico constituído por uma resistência e uma bobine, apresentado na figura ao lado. A força de reacção da massa corresponde à queda de tensão verificada na bobine, V_L .



Naquele circuito tudo se passa de forma similar ao sistema mecânico equivalente. Quando o circuito é fechado a bobine reage opondo-se ao crescimento da corrente eléctrica no circuito. Nesse momento, a queda de tensão na bobine é máxima e igual à tensão aplicada V_0 . À medida que a corrente cresce, a queda de tensão na resistência aumenta, de acordo com a lei de Ohm. A resistência eléctrica limita o crescimento da corrente, que tende para um valor constante. Com a estabilização da corrente, a queda de tensão na bobine desaparece. A bobine funciona como a massa: tal como a massa não gosta de mudar a sua velocidade, a bobine não gosta de variar a corrente que a atravessa, opondo queda de potencial apenas quando a corrente muda.



Por que razão este componente constituído por um enrolamento de um longo fio condutor em torno de um núcleo dá origem a este comportamento, semelhante ao de uma massa? O comportamento de uma bobine é explicado por fenómenos electromagnéticos. A construção de uma bobine é idêntica ao de um

electromagneto, isto é, um dispositivo destinado a produzir um campo magnético alimentado por energia eléctrica. Quando se faz passar uma corrente eléctrica através do enrolamento de uma bobine (ou um electromagneto), produz-se um campo magnético, especialmente forte no seu núcleo, que é proporcional a essa corrente. Quando dizemos que a bobine não gosta de variar a corrente que a atravessa, o que está subjacente é a resistência do campo magnético em variar a sua intensidade. Quando aumentamos ou diminuimos a corrente que atravessa a bobine vamos provocar o aumento/diminuição do campo magnético criado. Ao mesmo tempo, os fenómenos electromagnéticos que ocorrem na bobine produzem uma resistência à variação do campo magnético, na forma de queda de tensão aos seus terminais.

Tal como uma massa retém energia na forma de movimento – energia cinética – uma bobine retém também energia, na forma de um campo magnético que é gerado no seu núcleo. Para criar esse campo magnético (colocar a corrente a fluir) é preciso aplicar energia, a qual é necessária para vencer a resistência da bobine à modificação desse campo. Quando esse campo magnético é destruído (cessação da corrente eléctrica), essa energia é recuperada.

O comportamento dinâmico de uma bobine é caracterizado através de uma propriedade designada por indutância. A indutância de uma bobine quantifica a tensão gerada aos seus terminais por unidade de variação da corrente. Esta relação é formalizada na expressão

$$V_L(t) = L \times dI(t)/dt$$

A unidade utilizada na medição de indutância é o henry, que corresponde a $H = V/(A/s)$. Repare-se como a equação acima é perfeitamente equivalente à expressão $F = m \times a$. A indutância L toma o papel do parâmetro massa do sistema mecânico. Ambos os parâmetros representam a inércia do componente à variação do seu estado (num caso, o estado é caracterizado pela corrente que atravessa a bobine, no outro, pela velocidade é a velocidade da massa).

Em resumo, podemos sintetizar as características de uma bobine da seguinte forma:

A bobine tem um comportamento equivalente ao de uma massa num sistema mecânico.

Uma bobine cria um campo electromagnético proporcional à corrente que a atravessa.

Quando se varia a corrente que a atravessa (e consequentemente o campo electromagnético) a bobine produz uma queda de tensão resistente.

A resistência à variação da corrente é caracterizada pela propriedade indutância, L [henry].

A bobine opõe uma queda de tensão como reacção à variação de corrente, descrita pela relação

$$V_L(t) = L \times dI(t)/dt.$$

A bobine armazena energia na forma de um campo electromagnético.

4.1.3 Resistência, Condensador e Bobine - perspectiva dos três componentes passivos

A secção 1.5, onde se apresentou a lei de Ohm, juntamente com as secções anteriores, introduziram os três componentes passivos que intervêm em circuitos eléctricos – a Resistência, o Condensador e a Bobine. Nesta secção vamos apresentar uma visão geral destes componentes, comparando-os entre si.

Estes componentes podem, em primeiro lugar, distinguir-se segundo a forma como transformam a energia. Quando inseridos num circuito eléctrico todos eles recebem energia com origem numa fonte, mas como convertem ou transmitem essa energia?

A resistência é um elemento dissipador de energia. Este componente opõe-se à passagem de corrente, transformando energia eléctrica em calor. Este é o único componente que ‘desperdiça’ energia – na verdade, a energia eléctrica não é eliminada, apenas transferida para outra forma de energia (calor) que não é recuperável pelo circuito.

O condensador é um componente que armazena energia eléctrica na forma de energia potencial. Ao acumular cargas nas suas placas, cria-se um campo eléctrico entre elas que contém a energia acumulada. A energia é recuperada quando as cargas são libertadas para o circuito.

A bobine é um elemento que absorve energia na forma de um campo electromagnético. Uma vez que este campo electromagnético se deve à corrente que atravessa a Bobine, podemos, por abuso de linguagem, designar esta forma de energia como ‘energia cinética’ – energia contida no movimento de electrões. A energia é recuperada quando se extingue esse movimento.

Os três elementos passivos também se distinguem pelas suas diferentes propriedades dinâmicas. Pelo comportamento dinâmico de um componente entende-se o tipo de relação temporal que esse elemento estabelece entre as variáveis eléctricas tensão e corrente. A este respeito, pode dizer-se que a resistência é um componente estático, porque na relação que impõe, $V=R \times I$, só depende dos valores das variáveis num único instante de tempo, o momento presente. Ao contrário, nas relações que caracterizam o condensador e a bobine intervêm os valores das variáveis não só no instante actual, mas também em instantes passados – o seu historial. Vejamos como.

A queda de tensão imposta pelo condensador é dada por $V=1/C \times \int I dt$. Isto significa que, conhecendo apenas o valor da corrente no instante presente não conseguimos determinar a tensão, porque precisamos de conhecer os seus valores passados, que intervêm na operação de integração. O que está implícito nesta operação é que só conhecendo o historial da corrente que entrou no condensador podemos conhecer a carga que ele contém – a qual é calculada pelo integral –, é essa carga que por sua vez determina a tensão no condensador.

A queda de tensão na bobine é dada por $V_L(t)=L \times dI(t)/dt$. Também neste caso não estamos perante uma relação estática entre as variáveis. A variável corrente não aparece na forma do seu valor actual, mas da sua derivada. A derivada é uma operação que calcula a taxa de variação de uma variável, logo faz uso, não só do seu valor actual, mas também do seu valor no instante anterior (pode mesmo usar-se mais do que um valor de instantes passados, nesse cálculo).

Resumidamente podemos sintetizar o que foi dito como: a tensão aos terminais dos componentes passivos depende de

$\int i dt$ - integral da corrente (carga), no caso do condensador;

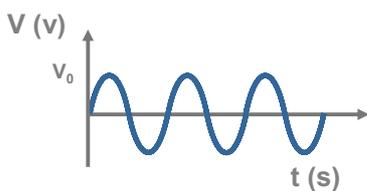
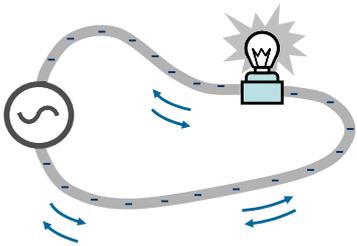
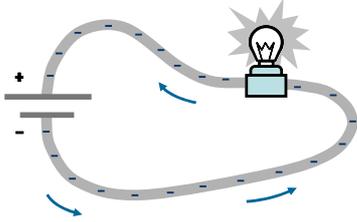
$I(t)$ - valor da corrente, no caso da resistência;

$dI(t)/dt$ – derivada da corrente, no caso da bobine.

	Relação dinâmica	Energia
Condensador	$V=1/C \times \int i dt$	Energia potencial
Resistência	$V=R \times I$	Dissipação de energia
Bobine	$V_L(t)=L \times dI(t)/dt$	Energia 'cinética'

4.1.4 Corrente Alternada

Nas secções 4.1 e 4.2, onde apresentámos o condensador e a bobine pudemos observar o comportamento destes componentes numa situação muito particular, a da transição abrupta entre dois patamares de tensão (de 0 para V_0). Tentemos fazer agora uma análise crítica do papel destes componentes nesta situação. Em ambos os casos, a tensão produzida pelos componentes apresenta um curto período transitório, durante o qual varia, e um regime estacionário, mais significativo - por ser mais duradouro -, em que a tensão é constante. Nesse regime, o condensador impede a passagem de corrente - funciona como um interruptor aberto - enquanto a bobine opõe tensão nula, isto é, não opõe resistência à passagem de corrente - funciona como um interruptor fechado. Estas considerações sugerem que o papel do condensador e bobine em corrente contínua é pouco significativo, à parte os regimes transientes. Assim sendo, em que casos é que estes componentes são mais importantes e assumem permanentemente uma influência sobre o circuito? Os comportamentos observados nas secções 4.1 e 4.2 fornecem algumas pistas sobre isso. Estes componentes só tiveram influência nos circuitos (para além de um simples interruptor aberto ou fechado) logo após a variação da tensão aplicada. **Estes componentes são especialmente importantes quando as tensões e correntes no circuito variam continuamente.**



Os casos de circuitos eléctricos onde temos tensões e correntes variáveis estão longe de nos serem estranhos. Um exemplo incontornável é o da Corrente Alternada (Alternated Current, AC), a forma de corrente que nos é disponibilizada nas nossas casas e em toda a rede de distribuição de electricidade. Os geradores de electricidade rotativos produzem corrente eléctrica na forma de Corrente Alternada, daí a ubiquidade desta forma de corrente. A Corrente Alternada não é uma forma diferente de electricidade. Trata-se, tal como a corrente contínua, do fluxo de electrões. A diferença que existe entre as duas formas de corrente é que, enquanto na corrente DC (Corrente Contínua) os electrões flúem sempre no mesmo sentido e à mesma razão, no caso da corrente AC os electrões flúem ciclicamente num sentido e no outro - não apresentam deslocamento efectivo! A corrente alternada é mais habitualmente descrita em termos da tensão que lhe dá origem, que naturalmente tem também a forma alternada. Se representarmos a evolução de uma tensão alternada de amplitude V_0 , ao longo do tempo, obtemos uma linha sinusoidal, como a da figura ao lado.

Outro fenómeno físico de interesse onde, tal como na corrente AC, uma variável física oscila continuamente é o som. O som resulta da variação da pressão a que o ar está sujeito - ou outro meio físico, no caso de o som não se propagar no ar. Essa modulação da pressão do ar é detectada por sensores, como os nossos ouvidos ou um microfone, e interpretada como som. Se observássemos a evolução da pressão num ponto do ar próximo de um altifalante emitindo uma nota musical, o que iríamos observar seria uma função como aquela que foi apresentada atrás para a tensão alternada - uma sinusóide pura. Cada nota musical é codificada por uma função daquele tipo, onde a frequência de oscilação determina a nota em causa. Os sons mais graves correspondem a frequências baixas, enquanto os mais agudos correspondem a frequências elevadas. No entanto, quando falamos ou colocamos música a tocar estamos a criar uma variação de pressão que se afasta daquela sinusóide, pois estamos a produzir uma combinação de várias notas - frequências - em simultâneo. Qual a razão para nos alongarmos no exemplo do som como fenómeno oscilatório? O som é um exemplo paradigmático para nos mostrar que um

sinal – por ‘sinal’ referimo-nos à evolução temporal de uma variável – ser descrito em termos das frequências que o compõem. Pensemos por exemplo na temperatura numa casa. A temperatura varia naturalmente com a transição do período diurno para o nocturno – é uma variação com períodos de 24h. Entretanto, há outras variações que ocorrem durante o dia, devido à entrada de pessoas, abertura de portas e janelas, etc. São variações com períodos mais curtos, de minutos, ou horas. À semelhança do sinal sonoro, embora não de forma tão óbvia, essa variável pode também ser descrita pela sobreposição de sinusóides de diferentes frequências. Na realidade, qualquer sinal, seja qual for a sua forma, pode ser decomposto na sobreposição de um número (eventualmente infinito) de sinusóides. Este é um resultado matemático que não vamos desenvolver, apenas considerar as suas implicações.

A utilização do exemplo do som como sinal em frequência num texto sobre electrónica também não é totalmente inocente, já que uma das mais importantes aplicações da electrónica é precisamente no processamento de som. Nessas aplicações os componentes condensador e bobine têm naturalmente uma importância crucial. Voltemos então ao que motivou esta secção. As bobines e os condensadores têm especial influência sobre um circuito eléctrico quando este está sujeito a correntes e tensões que variam continuamente. Agora sabemos que qualquer sinal – evolução de uma variável no tempo – pode ser descrito como a sobreposição de várias frequências. Assim, uma abordagem natural para estudarmos a influência dos componentes eléctricos dinâmicos num circuito de tensão variável passa pela pergunta: como é que cada um destes componentes afecta as diferentes frequências de um sinal? Esse será o ponto de partida para a secção seguinte.

4.1.4 Filtros

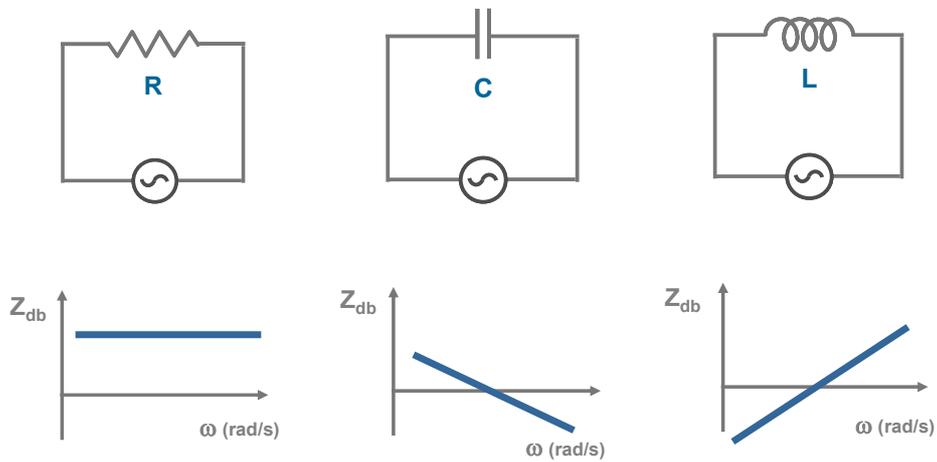
Na secção anterior introduzimos um resultado matemático que nos diz que qualquer sinal pode ser decomposto numa sobreposição de um número (eventualmente infinito) de sinusóides. Quando falamos estamos a produzir um sinal sonoro que resulta da combinação das sinusóides correspondentes a cada nota que produzimos. No silêncio, o sinal sonoro tem a frequência mais baixa possível, frequência zero; os morcegos emitem sinais sonoros a frequências elevadíssimas, os ultra-sons.

A tensão e corrente variáveis que aplicamos num circuito eléctrico, seja proveniente de um microfone, de um sensor de movimento ou de um alternador, devem ser analisadas com base nas frequências que as compõem. Assim sendo, se pretendermos compreender a influência das bobines e condensadores nestes circuitos, devemos procurar compreender como estes componentes influenciam cada componente de frequência.

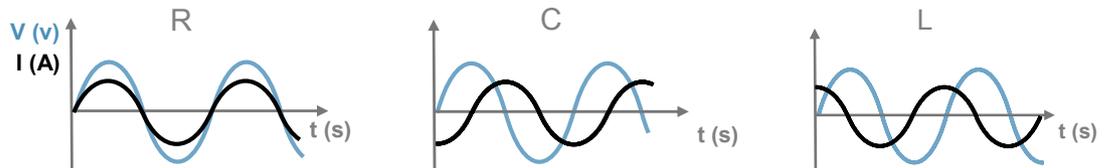
Já sabemos que os componentes passivos são caracterizados pela relação que impõem entre a tensão aos seus terminais e a corrente que escoam. Devemos então procurar saber que relação é essa para cada frequência. Mais uma vez, os fenómenos descritos na secção 4.1 e 4.2 apontam pistas para clarificar essa dependência. O condensador apresenta a tensão mais elevada, obstruindo a passagem de corrente, em regime estacionário, isto é, na frequência zero. Por outro lado, a tensão que opõe é mínima em regime transitório, quando a tensão aplicada teve variação abrupta. Podemos dizer que quando a frequência da tensão aplicada é máxima, o condensador permite a passagem de corrente. Em suma, o condensador é permeável à passagem de corrente quando a tensão aplicada apresenta frequências elevadas.

No caso da bobine, a situação inverte-se. A bobine opõe tensão nula quando se encontra em regime estacionário – frequência nula –, e impede a passagem de corrente nos instantes imediatamente após a variação instantânea de tensão. Neste caso, dizemos que a bobine é permeável à passagem de corrente quando a tensão aplicada tem componentes de frequência baixa.

Podemos dizer que os componentes dinâmicos, quando sujeitos a tensões sinusoidais, comportam-se como se de resistências se tratasse, com valores de resistência que dependem da frequência do sinal de tensão. Essa propriedade de resistência que é função da frequência é designada por **Impedância**. A forma mais clara de observar a evolução da ‘resistência’ dos componentes dinâmicos em função da frequência é de forma gráfica. Nestes gráficos, designados por diagramas de Bode, a impedância é representada na unidade Decibel, calculada como $20 \cdot \log(\text{Impedancia})$. No eixo das abcissas temos a frequência, marcada em escala logarítmica. A impedância de cada um dos componentes passivos terá um diagrama de Bode como os das figuras seguintes.



A influência dos elementos dinâmicos num circuito eléctrico não se resume a apresentarem uma ‘resistência’ variável, função da frequência. Estes componentes dão também origem ao desfasamento da corrente eléctrica que os atravessa relativamente à tensão aplicada. Se desenharmos a evolução da corrente em função do tempo, para cada um dos componentes obteríamos gráficos como:



Estes gráficos mostram que os componentes passivos introduzem os desfasamentos na corrente:

Para a resistência (elemento estático), desfasamento nulo

Para o condensador, atraso de $\frac{1}{4} P$ (P- período)

Para a bobine, avanço de $\frac{1}{4} P$

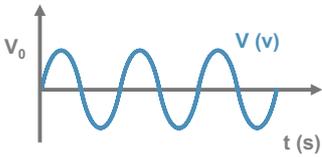
Não é de estranhar que os componentes dinâmicos introduzam desfasamento entre as variáveis. Estes elementos, por imporem relações entre V e I que dependem do histórico das variáveis, introduzem ‘memória’ no circuito eléctrico. Essa capacidade de ter ‘memória’ permite que algumas variáveis estejam atrasadas relativamente às outras.

No capítulo 2 estudámos métodos para analisar circuitos em corrente DC. Com esses métodos procurávamos saber calcular os valores das correntes e tensões em qualquer ponto de um circuito eléctrico, valores esses que eram constantes. No caso dos circuitos com sinais variáveis, como é de esperar, os resultados não serão tão directos – neste caso as variáveis eléctricas que procuramos nem sequer tomam valores constantes. No entanto, os métodos que precisamos de usar no estudo destes circuitos são também de grande simplicidade. Há duas razões fundamentais para a simplicidade dessa análise:

Um sinal pode ser descrito pelas frequências que o compõem. Logo, para saber como um circuito se comporta perante um dado sinal, apenas precisamos de conhecer o seu comportamento isolado perante as sinusóides com aquelas frequências.

Quando o sinal que introduz oscilação num circuito tem forma sinusoidal, todas as variáveis do circuito (ao fim de algum tempo) oscilam segundo sinusóides com a mesma frequência.

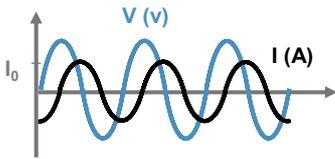
Dos dados anteriores podemos concluir que o estudo de circuitos com sinais variáveis simplifica-se e concentra-se no estudo de circuitos com sinais sinusoidais simples.



Para avançar com esse estudo temos, antes de mais, de encontrar uma representação para os sinais sinusoidais. A representação mais óbvia é a descrição temporal da variável, através da função seno. Por exemplo

$$V(t) = V_0 \cdot \text{sen}(\omega t)$$

pode representar a tensão descrita no gráfico ao lado. Naquela expressão V_0 designa a amplitude da função e ω representa a frequência de oscilação, em radianos. Se o período de oscilação for P , ω será dada por $2\pi/P$. Imagine-se que um segundo sinal de interesse no circuito era uma corrente eléctrica, representada na segunda figura. Se o sinal de tensão anterior for aceite como a referência para o desfaseamento de todos os outros sinais do circuito, $I(t)$ será descrita como



$$I(t) = I_0 \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi)$$

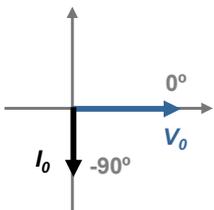
Nesta expressão I_0 representa a amplitude da corrente e φ designa o desfaseamento, em radianos, relativamente ao sinal de referência. No caso da figura verifica-se que a evolução corrente está $\frac{1}{4}$ de ciclo atrás da tensão, logo φ seria $-\pi/2$ (1 ciclo = 2π).

Uma vez que todos os sinais do circuito irão oscilar à mesma frequência, podemos usar uma notação para descrever estes sinais onde a frequência não seja incluída. Então, teremos uma notação como a seguinte:

$$I = I_0 \angle \varphi^\circ$$

Nesta notação, I_0 continua a representar a amplitude do sinal e φ o ângulo de desfaseamento – nesta notação é usual usar a unidade $^\circ$ para representar o ângulo. Repare-se que nesta notação omitimos o facto de a função ser sinusoidal e omitimos também a sua frequência – esses dados estão implícitos na interpretação deste tipo de expressões.

Este tipo de notação sugere que os sinais sinusoidais podem ser representados por um vector no plano – temos uma amplitude e um ângulo, que definem completamente um vector. Esta constatação permite-nos introduzir a ferramenta matemática que está na base de toda a análise dos circuitos de sinais variáveis: os números complexos. Um número complexo permite uma representação geométrica no plano na forma de um vector, por isso é uma ferramenta atraente para representar sinais sinusoidais. Apesar disso, a utilização dos números complexos não se justifica apenas por ser uma representação válida. Verifica-se que os números complexos têm propriedades matemáticas que permitem a resolução simples de circuitos de sinais sinusoidais. Essas propriedades permitem que:



Todas as propriedades válidas para circuitos em corrente DC são ainda válidas para circuitos AC desde que todos os sinais e componentes sejam representados por números complexos, e as operações algébricas de números complexos sejam usadas, em lugar das operações entre números reais.

Este postulado prevê que os componentes de um circuito sejam também representados no plano complexo. No início desta secção referiu-se que a bobine e o condensador impunham uma relação entre a tensão e corrente, designada por

impedância, que é equivalente a uma resistência dependente da frequência dos sinais. É talvez altura de apresentar uma definição mais correcta de impedância:

A impedância é a relação imposta entre tensão e corrente, descritas no plano complexo, por um ou mais componentes passivos, e é também um número complexo.

Repare-se que a definição de impedância como uma resistência dependente da frequência é insuficiente para descrever a influência dos componentes dinâmicos, pois não contempla o desfasamento que estes introduzem. Quando representada por um número complexo, a impedância descreve o factor de amplificação entre a tensão e corrente, Z_0 , e o ângulo entre elas, φ :

$$a) Z = Z_0 \cos(\varphi) + Z_0 \sin(\varphi) i$$

ou, na forma vectorial

$$b) Z = Z_0 \angle \varphi^\circ.$$

Tentemos então escrever as expressões para a impedância de cada um dos componentes passivos que conhecemos, recordando as figuras apresentadas no início desta secção.

No caso da resistência, não existe desfasamento entre as variáveis eléctricas e a razão entre elas é R . Assim teremos:

$$Z_R = R$$

No caso do condensador, a razão entre tensão e corrente é variável, inversamente proporcional à frequência dos sinais. Quanto ao desfasamento, este é de um atraso de $\frac{1}{4}$ de ciclo, ou seja, -90° . A expressão da sua impedância será

$$Z_C = 1/(\omega C) \angle -90^\circ \Leftrightarrow Z_C = 1/(\omega C) i$$

No caso da bobine, a razão entre tensão e corrente também é variável, directamente proporcional à frequência dos sinais. Quanto ao desfasamento, este é de avanço de $\frac{1}{4}$ de ciclo, ou seja, 90° . A correspondente expressão de impedância é

$$Z_L = \omega L \angle 90^\circ \Leftrightarrow Z_L = \omega L i$$

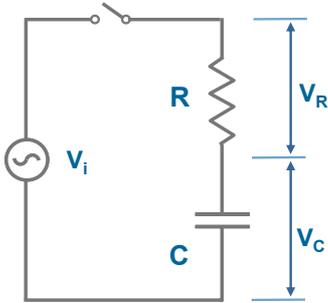
Munidos destas expressões e conhecendo as regras de resolução de circuitos DC, tais como a simplificação por resistências equivalentes, leis de Kirchhoff etc, podemos resolver circuitos sujeitos a oscilações sinusoidais. Um requisito para o fazer é, naturalmente, conhecer as operações entre números complexos, já que as operações entre números reais são substituídas por operações naquele domínio.

Se designarmos a representação do tipo a) acima como representação complexa e a a representação b) como representação vectorial, podemos dizer que a representação complexa é especialmente indicada para realizar as operações de adição e subtracção, enquanto a representação vectorial se adequa melhor às operações de multiplicação e divisão. De seguida veremos exemplos de aplicação dos métodos que acabámos de propor para a resolução dos circuitos com sinais sinusoidais.

Exemplos

1. Filtro passa-baixo

Determine a tensão V_C , quando a tensão de entrada V_i , é um sinal sinusoidal puro, de frequência ω e amplitude V_0 .



$$Z_{eq} = Z_R + Z_C$$

$$I = \frac{V}{Z_{eq}}$$

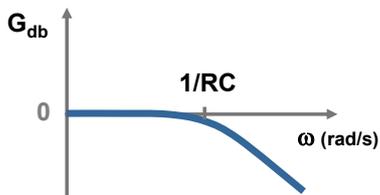
$$V_R = Z_R \times I = \frac{Z_R}{Z_R + Z_C} V_i$$

$$V_C = Z_C \times I = \frac{Z_C}{Z_R + Z_C} V_i$$

$$V_C = \frac{\frac{1}{\omega C i}}{R + \frac{1}{\omega C i}} V = \frac{1}{\omega C R i + 1} V$$

$$V_C = \frac{1}{\sqrt{(\omega C R)^2 + 1}} \angle -a \tan\left(\frac{1}{\omega C R}\right) \times V_0 \angle \mathcal{O}$$

$$V_C = \frac{1}{\sqrt{(\omega C R)^2 + 1}} V_0 \angle -\left(a \tan\left(\frac{1}{\omega C R}\right) + 0\right)$$

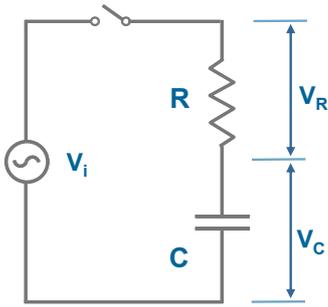


Admita-se que vamos interpretar V_C como sendo a saída do circuito e que chamamos Função de transferência, G , à relação entre a saída e entrada do circuito. Podemos desenhar o diagrama de bode dessa função, que é o gráfico do factor de amplificação (expresso em db) entre as duas tensões – designado por *ganho* - em função da frequência. Este gráfico mostra que o circuito não aplica qualquer amplificação quando a frequência é baixa (um valor 0 em db corresponde a um ganho de 1), e atenua o sinal, se a frequência for elevada (valor inferior a 0 em db corresponde a um ganho inferior a 1). A frequência a partir da qual o ganho desce significativamente é designada por frequência de corte e tem o valor $1/RC$.

Pelo facto de este circuito atenuar sinais de alta frequência, ele é designado por **filtro passa-baixo**.

2. Filtro RC passa-alto

Determine a tensão V_R , quando a tensão de entrada V_i , é um sinal sinusoidal puro. Qual a gama de frequências que é transmitida por este circuito?



Da página anterior tínhamos que

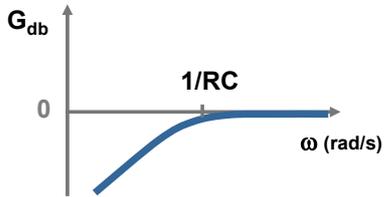
$$V_R = Z_R \times I = \frac{Z_R}{Z_R + Z_C} V_i$$

Substituindo as expressões de impedância, teremos

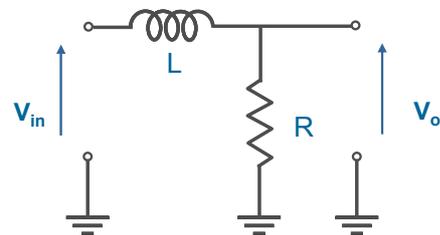
$$V_R = \frac{R}{R + 1/\omega C i} V_i = \frac{\omega C R i}{\omega C R i + 1} V_i$$

que podemos escrever na forma vectorial como

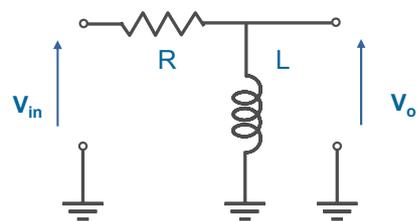
$$V_R = \underbrace{\frac{\omega C R}{\sqrt{(\omega C R)^2 + 1}}}_{\text{Ganho}} \angle \underbrace{(90^\circ - \arctan(\frac{1}{\omega C R}))}_{\text{Desfasamento}} \times V_i$$



Se desenharmos o diagrama de bode do ganho, teremos um gráfico como da figura ao lado. Aqui as frequências baixas são atenuadas, enquanto para frequências altas temos ganho 1. A frequência de corte, a partir da qual o ganho é próximo de 1 é de $1/RC$ rad/s



3. Exercício - determine a expressão do ganho do filtro da figura ao lado. Trata-se de que tipo de filtro?



4. Exercício - determine a expressão do ganho do filtro da figura ao lado. Trata-se de que tipo de filtro?

Resumo

filtro	ganho	
RC passa-baixo	$\frac{1}{\sqrt{(\omega CR)^2 + 1}}$	
RC passa-alto	$\frac{\omega CR}{\sqrt{(\omega CR)^2 + 1}}$	
LC passa-baixo	$\frac{1}{\sqrt{1 + (\omega L / R)^2}}$	
LC passa-alto	$\frac{1}{\sqrt{1 + (R / \omega L)^2}}$	

4.2 Amplificadores Operacionais

4.2.1 Princípios de funcionamento

Os amplificadores operacionais (de forma simplificada, AmpOp's) são talvez os circuitos integrados mais utilizados em instrumentação. São estes os componentes a que se recorre para a implementação de operações algébricas entre sinais e operações de derivação e integração, entre outras.

Este componente apresenta 5 ligações fundamentais: dois sinais de entrada (V_{in}^+ e V_{in}^-), dois sinais de alimentação (tensão positiva, V_+ e tensão negativa, V_-) e um sinal de saída (V_o)

A lei de funcionamento de um ampop é simples:

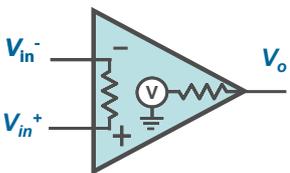
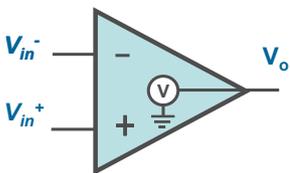
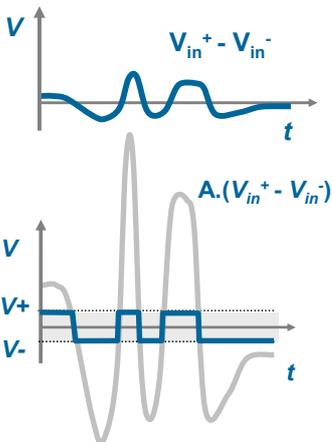
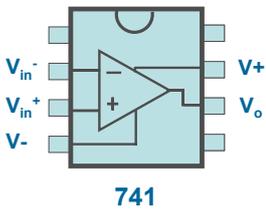
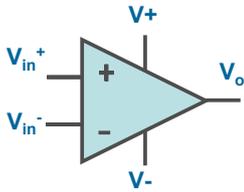
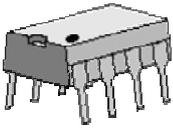
$$V_o = A (V_{in}^+ - V_{in}^-)$$

Esta expressão diz-nos que a saída do componente é igual à diferença entre os sinais de entrada, amplificada por um factor de amplificação A . Este factor de amplificação tem um valor elevado, pelo que, quando é detectada uma diferença, mesmo que pequena, entre os sinais de entrada, V_o cresce de forma esmagadora. No entanto, a tensão de saída do ampop não pode ultrapassar os limites das tensões de alimentação, pelo que rapidamente satura naqueles valores (ver gráficos ao lado). Assim, quando usado na sua forma mais simples, o ampop faz simplesmente uma comparação entre sinais, produzindo à saída uma tensão igual a V_+ se $V_{in}^+ > V_{in}^-$ ou igual a V_- se $V_{in}^+ < V_{in}^-$. Dado que a tensão de saída tende a diminuir quando V_{in}^+ aumenta e a diminuir quando V_{in}^- aumenta, estes sinais de entrada são vulgarmente designados respectivamente por entrada não inversora e entrada inversora.

Uma aplicação do ampop como comparador é, por exemplo, a transformação de uma onda sinusoidal numa onda quadrada (figura ao lado).

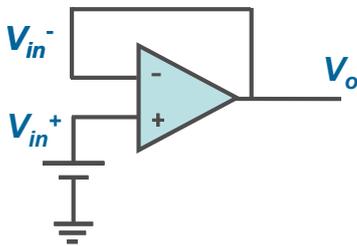
Tal como acontece com outros componentes electrónicos, as características reais de funcionamento de um ampop são idealizadas, de maneira a facilitar o seu estudo. É necessário conhecermos essas características ideais, para podermos analisar os circuitos com ampops, e também as características reais, que determinam os limites de validade das conclusões obtidas com base nas relações ideais.

Idealmente, admite-se que não existe passagem de corrente entre os terminais de entrada do ampop. Isso corresponde a encarar o valor da resistência entre estes pólos infinita. Na realidade, essa resistência tem um valor finito, embora seja suficientemente elevado para que possamos desprezar a corrente que atravessa aqueles terminais. Note-se que esta é a condição para que o ampop possa ser utilizado para amplificação de sinais sem interferir nos circuitos onde as tensões são extraídas – quanto maior for a corrente escoada desses circuitos, maior é o grau de interferência com eles. A ordem grandeza da resistência entre os terminais de entrada depende do tipo de tecnologia usada na construção do ampop, sendo da ordem de $10^6 \Omega$ quando é baseado em transístores bipolares, e $10^{12} \Omega$ no caso de se usar JFETs. Idealmente, admite-se também a resistência de saída é nula. Na realidade, ela tem valores suficientemente baixos, entre 10 a 1000 Ω . É também comum admitir que a o ganho de amplificação é infinito. Na verdade, ele é geralmente da ordem de 200000.



Comportamento ideal	Comportamento real
Resistência de entrada ∞	Resistência de entrada superior a $10^6 \Omega$
Resistência de saída 0Ω	Resistência de saída ~ 10 a 1000Ω
Ganho $A = \infty$	Ganho $A \sim 200000$

A utilização dos ampops não se limita à simples comparação de sinais. As aplicações mais complexas em que eles intervêm fazem uso de uma configuração de ligações designada por realimentação negativa (*negative feedback*)



O circuito mais simples que utiliza realimentação negativa é o descrito na figura ao lado. A realimentação negativa consiste numa ligação, directa ou por intermédio de uma resistência, entre a saída do ampop e a entrada inversora. Aplicando a lei de funcionamento de um ampop podemos tirar as conclusões fundamentais sobre o efeito da realimentação:

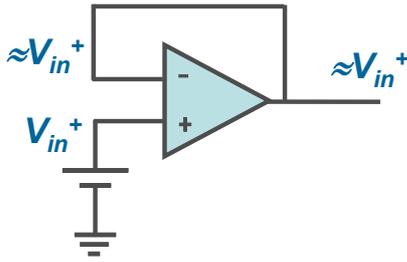
$$\begin{aligned}
 V_o &= A (V_{in}^+ - V_{in}^-) \quad \wedge \quad V_{in}^- = V_o \\
 \Leftrightarrow V_o &= A (V_{in}^+ - V_o) \Leftrightarrow (1+A)V_o = A.V_{in}^+ \\
 \Leftrightarrow V_o &= \frac{A}{1+A} V_{in}^+ \\
 \Leftrightarrow V_o &= V_{in}^+
 \end{aligned}$$

Na última equivalência, usou-se a idealização que considera A igual a infinito. Estes simples cálculos permitem-nos afirmar que, neste caso de realimentação negativa, a saída do ampop e a entrada inversora, V_o e V_{in}^- , são iguais - aproximadamente, já que A não é infinito - à entrada não inversora, V_{in}^+ . Repare-se na transformação crucial que se dá na saída do ampop quando se utiliza a realimentação: em lugar de termos valores amplificados por A , dando origem a valores infinitos e necessariamente saturados pelos limites V^+ e V^- , passamos a ter um valor não amplificado, um valor finito. Este valor finito só é possível pelo facto de V_{in}^+ e V_{in}^- serem muito próximos: a sua diferença é aproximadamente zero e quando multiplicada por um ganho infinito produz um valor finito.

Em todos os casos em que existe realimentação negativa, essa ligação leva a que a entrada inversora, V_{in}^- , assuma um valor de tensão igual ao da entrada não inversora, V_{in}^+ . Quanto ao valor de V_o , apenas neste caso ele é igual a V_{in}^+ , facto que dá o nome a este tipo de configuração: seguidor de tensão. No caso geral, este valor depende da configuração em que o ampop com realimentação estiver inserido. É importante repetir que o efeito fundamental da ligação de realimentação é de levar a que a entrada inversora seja (aproximadamente) igual ao da entrada não inversora, e conseqüentemente que a saída do ampop seja 'finita'.

Realimentação negativa:

$$V_{in}^- = V_{in}^+$$



A realimentação negativa é a base para a criação de circuitos electrónicos que implementam várias operações algébricas e dinâmicas com Ampops. A expressão ‘operacional’ na designação destes componentes deve-se a terem como finalidade fundamental a realização de operações matemáticas. De seguida analisam-se os circuitos electrónicos que são mais usados em instrumentação.

4.2.2 Circuitos com Ampops

Tendo como ponto de partida o Ampop, é possível construir circuitos para implementar as seguintes operações matemáticas:

Operação	Circuito
\times constante	Amplificador Inversor, Amplif. não inversor
+	Amplif. somador
-	Amplif. diferencial
d/dt	Amplif. derivador
\int dt	Amplif. integrador

Amplificador inversor

A análise deste circuito é baseada na observação de que entre a entrada V_{in} e a saída, V_o temos um divisor de tensão, onde a tensão intermédia é também a entrada inversora do ampop. Esta observação permite-nos escrever

$$V^- = R_2 / (R_1 + R_2) (V_{in} - V_o) + V_o$$

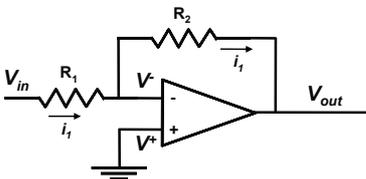
Relembrando que, na presença de feedback negativo, a entrada inversora iguala-se à entrada não inversora, e constatando que esta está ligada à terra, podemos escrever

$$V^- = V^+ = 0 \Rightarrow$$

$$0 = R_2 / (R_1 + R_2) (V_{in} - V_o) + V_o$$

$$\Leftrightarrow 0 = R_2 (V_{in} - V_o) + (R_1 + R_2) V_o$$

$$\Leftrightarrow -R_2 V_{in} = R_1 V_o \Leftrightarrow V_o = -R_2 / R_1 V_{in}$$



Amplificador inversor

A configuração deste circuito é idêntica ao anterior mas, neste caso, a entrada do circuito está ligada à entrada não inversora do ampop, e o ramo da entrada inversora ligado à terra.

Observando também aqui que temos um divisor de tensão em torno da entrada inversora, podemos escrever

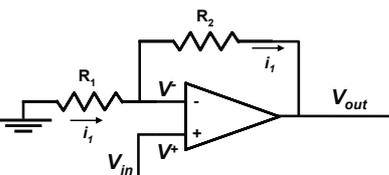
$$V^- = R_2 / (R_1 + R_2) (0 - V_o) + V_o$$

Tendo em conta que a entrada inversora é igual à entrada não inversora, devido à realimentação negativa, teremos

$$V^- = V^+ = V_{in} \Rightarrow$$

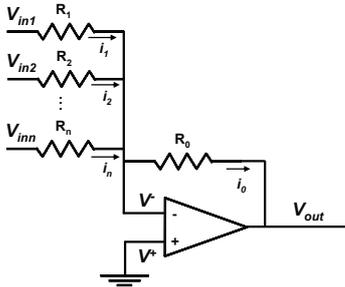
$$V_{in} = R_2 / (R_1 + R_2) (0 - V_o) + V_o$$

$$\Leftrightarrow V_{in} = R_2 / (R_1 + R_2) (-V_o) + V_o \Leftrightarrow V_{in} = R_1 / (R_1 + R_2) (V_o)$$



$$\Leftrightarrow V_o = (1 + R_2/R_1)V_{in}$$

Amplificador somador



Neste circuito existem n tensões de entrada, cujos ramos estão ligados à entrada inversora do ampop, através das resistências R1 a Rn. A entrada não inversora está ligada à terra, logo podemos dizer que

$$V^- = V^+ = 0$$

Assim, todos os ramos de entrada partilham a tensão num terminal, com valor 0V. As correntes que atravessam esses ramos podem ser calculadas pela lei de Ohm.

$$i_1 = (0 - V_{in1})/R_1 \dots i_n = (0 - V_{inn})/R_n$$

Considerando o comportamento ideal do ampop, em que não há escoamento de corrente nas do ampop, a corrente i_0 é igual à soma das correntes i_1 a i_n .

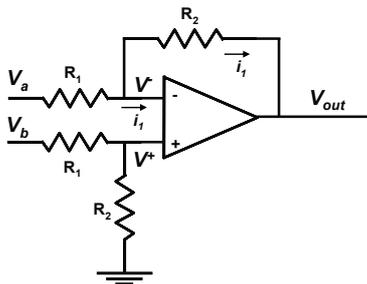
$$i_0 = -\frac{V_{in1}}{R_1} + \dots - \frac{V_{inn}}{R_n}$$

Assim, a tensão de saída do ampop será:

$$(V_o - 0) = R_0(-V_{in1}/R_1 + \dots - V_{inn}/R_n) \Leftrightarrow$$

$$V_o = -R_0(V_{in1}/R_1 + \dots + V_{inn})/R_n$$

Amplificador Diferencial



Este circuito tem duas entradas, ambas ligadas a divisores de tensão com resistências R1 e R2. O segundo pólo dos divisores de tensão é, num caso, a saída do ampop e, no outro, a terra. As tensões intermédias dos divisores de tensão estão ligadas às duas entradas do ampop, V^- e V^+ . Assim, podemos escrever:

$$V^- = R_2/(R_1 + R_2)(V_a - V_o) + V_o$$

$$V^+ = R_2/(R_1 + R_2)(V_b - 0)$$

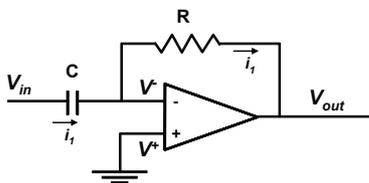
A realimentação negativa leva a que ambas as entradas do ampop atinjam o mesmo valor, pelo que as expressões anteriores podem ser igualadas:

$$R_2/(R_1 + R_2)(V_a - V_o) + V_o = R_2/(R_1 + R_2)(V_b - 0) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow R_1/(R_1 + R_2) V_o = R_2/(R_1 + R_2)(V_b - V_a) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow V_o = R_2/R_1(V_b - V_a)$$

Amplificador Derivador



Através da introdução de um condensador num circuito amplificador, é possível realizar operações dinâmicas, isto, operações que envolvem o factor *tempo*. Este é um exemplo, onde se realiza a operação de derivação. Tendo em conta o comportamento ideal do ampop e a ligação à terra da entrada não inversora, teremos $V^- = V^+ = 0$. Assim, a queda de tensão aos terminais do condensador depende apenas de V_{in} e relaciona-se como a corrente que o atravessa pela expressão geral:

$$0 - V_{in} = \frac{1}{C} \int i_1 dt \Leftrightarrow$$

$$i_1 = -C \frac{dV_{in}}{dt}$$

Esta corrente é a mesma que atravessa a resistência R. pela lei de Ohm podemos obter a tensão de saída:

$$V_o - 0 = R \cdot i_1 \Leftrightarrow$$

$$V_o = -RC \frac{dV_{in}}{dt}$$

Amplificador Integrador

Neste circuito realiza-se a operação de integração pela utilização de um condensador, que é para esse efeito introduzido no ramo de realimentação.

De acordo com o comportamento ideal do ampop, teremos mais uma vez $V^- = V^+ = 0$. Então, a corrente que atravessa a resistência R será, pela lei de Ohm

$$0 - V_{in} = R \cdot i_1 \Leftrightarrow i_1 = -V_{in} / R$$

Esta corrente é na totalidade enviada ao condensador, já que não há entrada ou saída de corrente no ampop pelas suas entradas. Utilizando de novo a expressão da queda de tensão aos terminais de um condensador, teremos

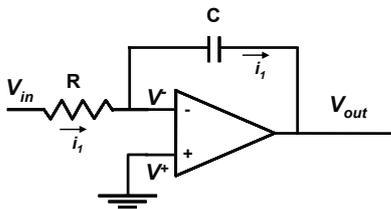
$$V_o - 0 = \frac{1}{C} \int i_1 dt \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow V_o = \frac{1}{C} \int \frac{V_{in}}{R} dt \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow V_o = -\frac{1}{RC} \int V_{in} dt$$

Seguidor de tensão

Apesar de este circuito já ter sido referido atrás, vale a pena sublinhar a sua importância como circuito que garante o isolamento entre circuitos amplificadores e circuitos de medição. Este é o circuito que garante que não há escoamento de corrente do circuito de medição para o circuito de amplificação. Este circuito produz uma saída igual à entrada, mas cuja corrente não é extraída ao circuito de medição. Este circuito deve ser utilizado à entrada que qualquer circuito de amplificação, de maneira a garantir o isolamento entre os circuitos de medição e amplificação.



5. Condicionamento de Sinal Digital

(Pendente)

Bibliografia

Bibliografia ordenada por: do mais recomendável para a cadeira para o menos relevante.

Lessons In Electric Circuits, Tony R. Kuphaldt, disponível em <http://www.ibiblio.org/obp/electricCircuits/>, 2006.

Electronics for inventors, Paul Schrez, McGraw-Hill, 2000.

Instrumentation for Engineerig Measurements, James Dally, William Riley, Keneth McConnel, John Wiley and Sons, Inc, 1993.

Princípios de Electrónica, Albert Malvino, McGraw-Hill, 2000

Recursos na Internet

Lessons In Electric Circuits, Tony R. Kuphaldt, disponível em <http://www.ibiblio.org/obp/electricCircuits/>

<http://www.wikipedia.org>

http://en.wikibooks.org/wiki/Circuit_Theory

<http://ocw.mit.edu/OcwWeb/Electrical-Engineering-and-Computer-Science/6-002Circuits-and-ElectronicsFall2000/CourseHome/index.htm>