

CAPÍTULO 1

Corrente alternada monofásica

«Errar é próprio do homem.

Persistir no erro é próprio dos loucos!» (Cícero)

Grandezas variáveis

Os circuitos elétricos analisados no volume anterior eram todos alimentados em corrente contínua, isto é, com corrente unidirecional (com um só sentido) e de valor constante. Esta corrente tem, conforme vimos, as suas aplicações próprias. As **grandezas variáveis ou bidirecionais** (correntes, tensões, etc.) são, no entanto, as mais utilizadas na generalidade das aplicações. Elas podem assumir diferentes formas, consoante a aplicação que se pretende dar-lhes.

Classifiquemos então as grandezas variáveis!

Uma **grandeza variável** ou bidirecional é uma grandeza (corrente, tensão, etc.) que muda de sentido ao longo do tempo. Se tivermos um condutor (com as extremidades A e B) alimentado com corrente variável, a corrente ora flui de A para B ora flui de B para A.

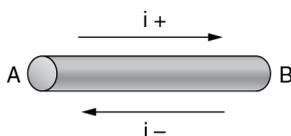


Figura 1 – Corrente variável: ora flui de A para B, ora flui de B para A.

As grandezas variáveis **podem ser classificadas** em:

- grandezas alternadas
- grandezas «não alternadas»

Uma **grandeza** diz-se **alternada** quando, tendo dois sentidos, é periódica e tem um valor algébrico médio nulo.

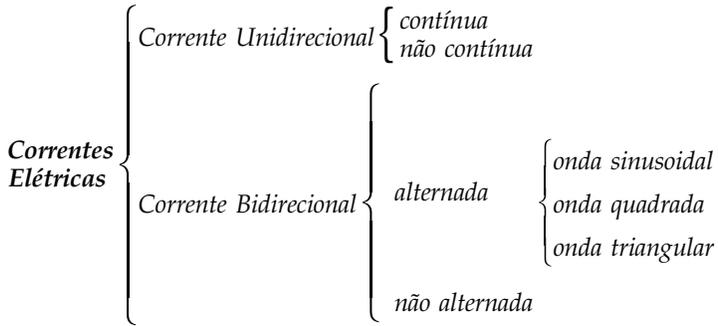
Uma **grandeza** diz-se «**não alternada**» quando, tendo os dois sentidos, não é periódica ou tem um valor algébrico médio diferente de zero.

Uma corrente diz-se **periódica** quando repete periodicamente os mesmos valores, isto é, ao fim de um determinado tempo (período), volta a ter os mesmos valores positivos e os mesmos valores negativos.

Uma corrente com **valor algébrico médio nulo** é uma corrente em que os valores positivos são iguais, em módulo, aos valores negativos; isto é, há simetria no gráfico – portanto, a soma dos valores é zero.

As **correntes alternadas** podem ainda classificar-se em:

- **onda sinusoidal**
- **onda quadrada**
- **onda triangular**



Na figura, representam-se alguns gráficos de **correntes variáveis**.

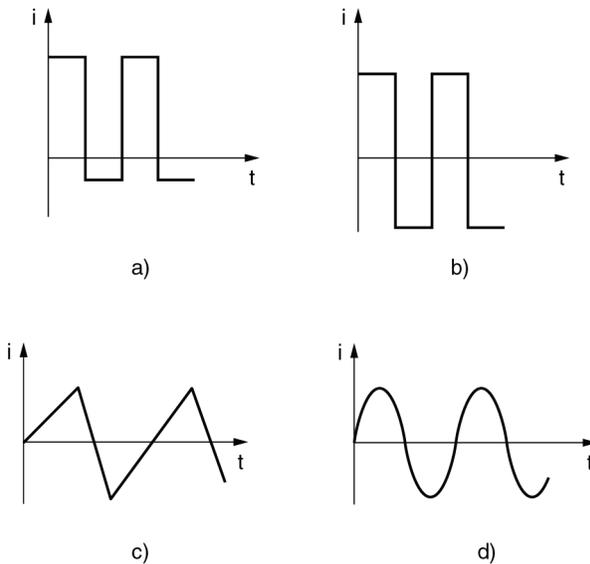


Figura 2 – Diferentes formas de corrente: a) Corrente bidirecional não alternada; b), c), d) Correntes bidirecionais alternadas

De entre os diferentes tipos de correntes variáveis, temos como mais usuais a corrente alternada sinusoidal e a corrente alternada «onda quadrada». A **corrente alternada sinusoidal** é representada, matematicamente, pela **função seno**, conforme estudaremos mais adiante.

1. Gerador Elementar

A corrente alternada sinusoidal é, conforme dissemos, uma corrente com os dois sentidos (positivo e negativo), periódica e com um valor algébrico médio nulo, conforme se representa na figura. As nossas casas, bem como a indústria e o comércio, são alimentadas por tensão alternada sinusoidal.

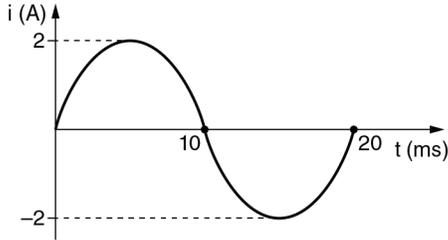


Figura 3 – Corrente alternada sinusoidal

Como chega a nossas casas uma corrente deste tipo?

É o que vamos ver de seguida.

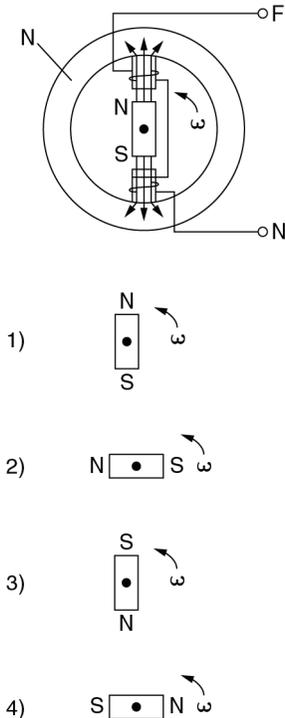


Figura 4 – Alternador monofásico elementar

O **alternador** é o gerador que produz aos seus terminais uma tensão alternada sinusoidal. Na figura representamos um alternador monofásico elementar, isto é, um alternador que produz apenas uma tensão (há alternadores trifásicos, que produzem três tensões), dita monofásica (uma só fase).

O alternador representado é constituído por um núcleo ferromagnético N (fechado) com duas extremidades polares envolvidas por um enrolamento com terminais F (Fase) e N (Neutro). A esta parte do alternador dá-se o nome de **estator** (parte fixa). No centro do alternador, apoiado num veio, existe outro núcleo com um enrolamento, alimentado por corrente contínua de forma a criar dois polos magnéticos fixos N e S. A esta parte do alternador dá-se o nome de rotor (parte que roda). Na figura, o rotor está representado, simbolicamente, por um íman (N-S), para simplificar o desenho e o raciocínio.

Para que o alternador possa produzir energia elétrica, é necessário que lhe seja fornecida energia mecânica. Essa energia é fornecida por um motor cujo veio é ligado ao veio do rotor do alternador. Assim, quando os veios começam a rodar, o íman do rotor do alternador vai ocupar sucessivamente diferentes posições, das quais selecionámos as quatro que representamos na figura.

Observe a posição 1) do íman. O fluxo magnético produzido pelo íman vai atravessar as bobinas do estator. Visto que o íman gira, então o fluxo que atravessa a bobina vai variando no tempo. Deste modo, quando o íman está na posição 1), o **fluxo** através das bobinas é **máximo positivo**, pois os polos encontram-se em frente destas.

Quando o **íman** está **na posição 2)**, o **fluxo** através das bobinas é praticamente **nulo**, dada a sua posição horizontal.

Quando o **íman** está **na posição 3)**, o **fluxo** através das bobinas volta a ser **máximo**, mas **negativo** (o polo N foi substituído pelo polo S).

Quando o **íman** está **na posição 4)**, o **fluxo** volta a ser **nulo** e, de seguida, volta à posição 1).

Recordemos agora as **leis de Faraday e de Lenz**.

A **variação do fluxo magnético** (produzido pelo núcleo magnetizado N-S) através de uma bobina gera nesta uma f.e.m. induzida que é dada por:

$$E = -N \cdot \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

com: E – f.e.m. induzida na bobina (volt)

N – número de espiras da bobina

$\Delta\Phi$ – variação de fluxo no intervalo de tempo Δt (weber)

Δt – intervalo de tempo (segundos) em que dá a variação $\Delta\Phi$

Isto é, à medida que o íman (rotor) vai rodando, vai-se criando uma f.e.m. aos terminais dos enrolamentos, cujo valor varia com a variação de fluxo verificada, na unidade de tempo, bem como com o número de espiras do enrolamento do estator. Na figura representam-se as curvas do fluxo Φ e da f.e.m. E que se obtêm no alternador.

Demonstra-se, matematicamente e experimentalmente, que ambas as curvas são sinusoidais e que estão relacionadas da forma que se apresenta no gráfico, isto é, quando o fluxo é máximo, a f.e.m. produzida é nula e, quando o fluxo é nulo, a f.e.m. é máxima (positiva ou negativa).

Sendo assim, ambas são representadas pela **função seno**, embora com uma pequena diferença entre si, pois estão «desfasadas» no tempo, correspondente a um ângulo de 90° .

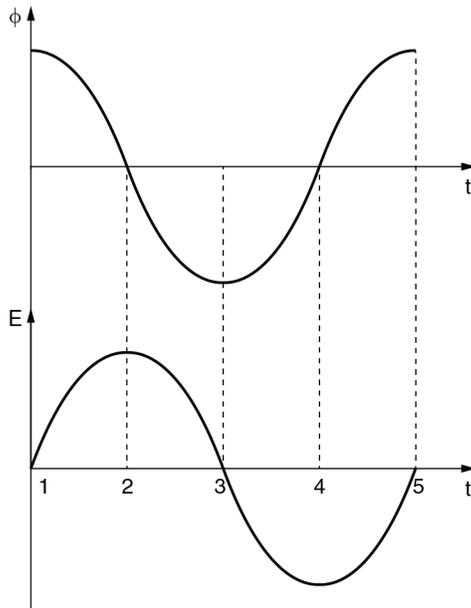


Figura 5 – Fluxo e f.e.m. sinusoidais produzidos no alternador

CAPÍTULO 2

Sistemas Trifásicos

«Quando apontares um dedo, lembra-te de que há três dedos virados para ti!». - (Provérbio inglês)

1. Introdução

Nos capítulos anteriores, estudámos a corrente alternada monofásica aplicada a diferentes tipos de circuitos, usuais na generalidade dos recetores utilizados pelo consumidor. Isto é, a generalidade dos recetores de uso doméstico necessita apenas da corrente monofásica, ou seja, de uma fase e do neutro. Só na indústria são utilizados, com bastante frequência, os recetores trifásicos (três fases + neutro), por motivos essencialmente económicos (mais tarde, veremos melhor este assunto).

Por esse motivo, **a produção, transporte e distribuição de energia deve ser feita em sistema trifásico** e não em monofásico, tornando assim o sistema mais económico e permitindo ainda alimentar, não só os recetores monofásicos, como também os trifásicos ou mesmo os bifásicos, utilizando o número de condutores necessários.

Podemos ter, portanto, instalações só com recetores monofásicos, instalações só com recetores trifásicos e instalações onde haja necessidade de ligar recetores monofásicos (lâmpadas, irradiadores, ventoinhas, etc.) e também recetores trifásicos (motores elétricos, estufas, etc.). A generalidade dos recetores domésticos é monofásica; quanto aos recetores existentes em fábricas e no comércio, tanto podem ser monofásicos como trifásicos.

Verificámos já, durante o estudo da corrente alternada monofásica, que a tensão entre uma qualquer fase e o neutro é em Portugal de 230 V. Vamos ver, no seguimento, que a tensão entre quaisquer duas fases é em Portugal de 400 V.

Conclui-se, portanto, que não podemos ligar um recetor monofásico ($U = 230$ V) entre duas fases de uma instalação trifásica ($U = 400$ V), visto que o recetor queimar-se-ia certamente.

Embora mais tarde expliquemos melhor o assunto, queremos deixar aqui, desde já, as seguintes ideias: os recetores monofásicos são de baixa potência (centenas de watts ou, no máximo, até 2 a 3 kW – caso das máquinas de lavar); os recetores trifásicos são de maior potência que os monofásicos, desde alguns quilowatts até várias centenas de quilowatts – caso dos motores elétricos da indústria.

Vejamos então **o que é um Sistema Trifásico e como se produz.**

2. Produção de um sistema trifásico de tensões. O alternador trifásico

Nas centrais elétricas existem **alternadores trifásicos**, isto é, alternadores que produzem simultaneamente três tensões alternadas monofásicas e desfasadas entre si, no tempo, de $1/3$ de período.

Vejamos o seu princípio de funcionamento.

É semelhante ao princípio de funcionamento do alternador monofásico. É constituído por um rotor bobinado, com dois polos (N e S), o qual vamos simbolizar através de um íman (ver figura 1), e ainda por um estator no qual se encontram três enrolamentos iguais, deslocados entre si de 120° ao longo da periferia do estator. No caso do alternador monofásico, tínhamos apenas um enrolamento.

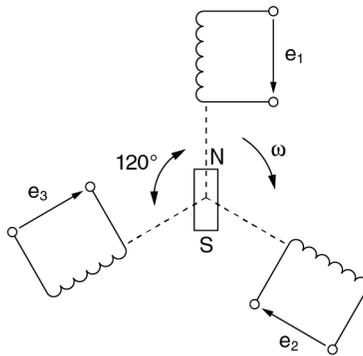


Figura 1 – Princípio de funcionamento do alternador trifásico

Tal como acontecia no alternador monofásico, ao fazermos rodar o íman com uma dada velocidade constante, vai aparecer sucessivamente, aos terminais de cada enrolamento, uma f.e.m. induzida, a qual tende a opor-se à variação do fluxo magnético provocado pela rotação do íman.

Visto que as bobinas são iguais, as forças eletromotrizes induzidas em cada uma delas também o serão. Pelo facto de se encontrarem, entre si, a uma distância angular de 120° , as forças eletromotrizes (e_1 , e_2 , e_3) vão ficar desfasadas no tempo de $1/3$ do período T , em que T é o tempo correspondente a uma rotação completa do íman. Na figura 2 representam-se as três forças eletromotrizes referidas.

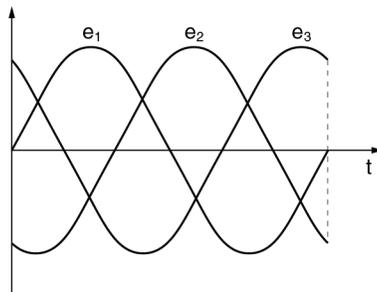


Figura 2 – Sistema trifásico de forças eletromotrizes induzidas nos enrolamentos do alternador trifásico

Um **sistema trifásico de tensões** (ou de f.e.m.) é um sistema constituído por três tensões (ou f.e.m.) iguais e desfasadas entre si de 120° . A máquina elétrica que produz este sistema é o alternador trifásico.

Note que o sistema representado na figura 2 tem a **seguinte sequência de fases**: $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$; esta sequência é considerada positiva. Com efeito, poderíamos ter $1 \rightarrow 3 \rightarrow 2$, a qual era considerada negativa. As duas sequências correspondem aos dois sentidos de rotação do rotor do alternador. O alternador é geralmente construído e posto a funcionar de forma a obtermos a sequência positiva de fases, para assim se evitarem erros de ligações ou outros problemas de funcionamento.

3. Representação matemática de um sistema trifásico de tensões

Como se sabe, a f.e.m. de um gerador é, por definição, a tensão em vazio do gerador. Vamos, por isso, considerar as tensões u_1, u_2, u_3 , correspondentes às forças eletromotrizes referidas.

Assim, considerando que, em vez de e_1, e_2, e_3 , temos na figura 2 as tensões u_1, u_2, u_3 , o **sistema trifásico de tensões** terá então a seguinte **expressão matemática**:

$$u_1 = \sqrt{2} U_1 \text{ sen } (\omega t)$$

$$u_2 = \sqrt{2} U_2 \text{ sen } (\omega t - 2 \pi / 3)$$

$$u_3 = \sqrt{2} U_3 \text{ sen } (\omega t - 4 \pi / 3)$$

A este sistema de equações corresponderá o diagrama vetorial representado na figura 3.

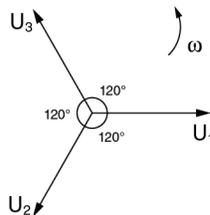


Figura 3 – Diagrama vetorial de um sistema trifásico de tensões

4. Alimentação das cargas pelo sistema trifásico

Conforme se pode verificar por análise da figura 1, o alternador trifásico é constituído por três enrolamentos, a que correspondem seis condutores. Ora,

cada um destes enrolamentos pode alimentar individualmente uma ou mais cargas, tal como se representa na figura 4.

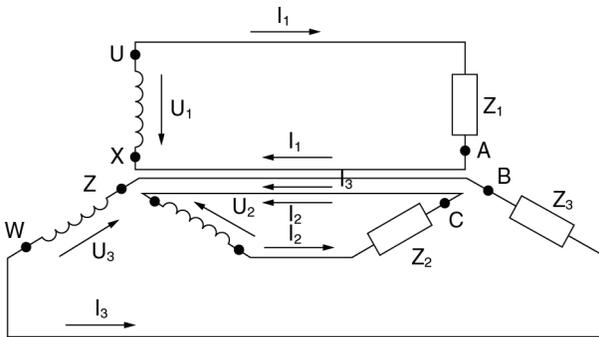


Figura 4 – Alimentação trifásica, feita com seis condutores

Nesta situação, temos três circuitos independentes, constituídos, cada um deles, por um enrolamento que alimenta a carga respetiva. Evidentemente que esta não é a solução mais adequada para a alimentação das cargas, visto necessitar de muitos condutores (seis) para fornecer uma determinada potência total. Houve, por isso, necessidade de se pensar em soluções mais económicas e tecnicamente mais favoráveis.

Foi assim que nasceram as **ligações em estrela e em triângulo**, seja dos enrolamentos do alternador, seja das cargas entre si.

Vejamos então em que consistem estas duas ligações.

A partir do esquema da figura 4, podemos «shuntar» entre si os terminais X, Y, Z, originando o terminal N, que tem o nome de **ponto neutro do gerador**; podemos «shuntar» também entre si os terminais A, B, C, originando o ponto N', que tem o nome de **ponto neutro da carga trifásica**. Desta forma, em vez de termos três condutores de retorno da corrente, passamos a ter apenas um condutor de retorno, o qual tem o nome de **condutor neutro**, por onde passa a corrente total de retorno $I_N = I_1 + I_2 + I_3$. Os outros três condutores têm o nome de **condutores de fase ou fases**. A este tipo de ligação dos enrolamentos ou das cargas dá-se o nome de ligação em estrela, representada na figura 5 a).

Podemos ligar ainda os enrolamentos ou as cargas de uma outra forma, tal como se sugere na figura 5 b). A este outro tipo de ligação dá-se o nome de **ligação em triângulo**. O alternador é constituído pelos três enrolamentos UX, VY, WZ, em que U, V, W são as saídas e X, Y, Z são as entradas respetivas. A ligação em triângulo é feita de tal forma que a entrada de um enrolamento é «shuntada» com a saída de outro enrolamento e assim sucessivamente, até se fecharem entre

si, como se fosse um triângulo. Neste caso, partem do alternador apenas três condutores (três fases), que vão alimentar os recetores que também foram ligados em triângulo (no exemplo representado na figura 5 b). Não existe, portanto, condutor neutro.

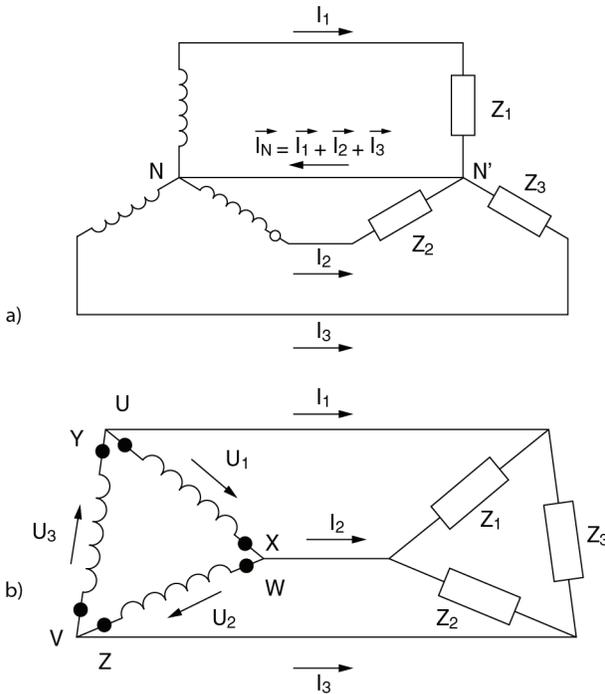


Figura 5 a) – Ligação em estrela, com alimentação trifásica feita a quatro condutores. O retorno é feito pelo condutor neutro.
b) Ligação em triângulo, necessitando apenas de três condutores (três fases)

Cada um dos tipos de ligação referidos será estudado em pormenor nos pontos seguintes. Veremos ainda que as cargas não têm de ter o mesmo tipo de ligação dos enrolamentos do alternador.