



# **ABC DAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS**

**Mário Ferreira Alves (malves@dee.isep.ipp.pt)**

**Departamento de Engenharia Electrotécnica**

**Março de 2003**

## Prefácio

Actualmente, podemos considerar as máquinas eléctricas (motores, geradores e transformadores) como parte integrante do nosso dia-a-dia. Os motores eléctricos, que podem utilizar-se tanto em aplicações de força motriz como em aplicações de tracção eléctrica, vulgarizaram-se de tal forma que podemos encontrá-los em aplicações tão diversas como uma máquina industrial de corte, um ascensor ou um aspirador.

Os geradores (alternadores e dínamos) podem encontrar-se nas centrais produtoras de energia eléctrica (hidroeléctricas, termoeléctricas (diesel, carvão, nucleares), eólicas, maremotrizes, etc.), hospitais e certos tipos de indústrias, ou mesmo num automóvel, mota ou bicicleta, por exemplo. Os transformadores são também largamente utilizados, tanto nos sistemas de transporte e distribuição de energia eléctrica, como em aplicações de domínio doméstico, tais como carregadores de bateria, telefones portáteis, candeeiros de lâmpadas de halogénio e muitas outras.

Também no domínio dos transportes, existem inúmeras aplicações das máquinas eléctricas. Como se sabe, os veículos cuja tracção resulta do movimento de um motor de combustão interna, necessitam, para o seu funcionamento, de máquinas eléctricas tais como o alternador, o motor de arranque e a “bobina” de ignição.

Sendo os veículos de tracção eléctrica uma realidade no que respeita aos transportes ferroviários, são também já uma grande aposta por parte dos fabricantes de veículos rodoviários, nomeadamente automóveis, motas e bicicletas. Esta tracção é obviamente obtida a partir do movimento de rotação de um motor eléctrico (corrente contínua ou alternada). Refira-se também que o transporte de materiais em ambiente industrial é quase totalmente constituído por veículos eléctricos, quer sejam guiados por um operador (empilhadores), guiados automaticamente (*AGV - Automatic Guided Vehicles*) ou autónomos (robôs).

O estudo das máquinas eléctricas mostra-se então de grande importância para os cursos de engenharia, desde a Engenharia Mecânica (nomeadamente o ramo de Transportes), até à Engenharia Electrotécnica, que lhes deve dedicar um estudo mais aprofundado.

Para se perceber o funcionamento das máquinas eléctricas, é fundamental que se compreendam os princípios do electromagnetismo. Esta sebenta começa por introduzir conceitos relacionados com os Campos Eléctricos e Magnéticos. Depois, são abordados a transformação de energia mecânica em energia eléctrica (princípio de funcionamento dos geradores), a transformação de tensão/corrente eléctrica (princípio de funcionamento dos transformadores) e a transformação de energia eléctrica em energia mecânica (princípio de funcionamento dos motores).

Neste contexto, é fundamental perceber as características principais das máquinas eléctricas, sendo estas classificadas quanto ao seu princípio de funcionamento e abordados conceitos como rotor/estator, indutor/induzido, número de pólos e perdas/rendimento (Capítulo 5). Os capítulos 6 e 7 endereçam os motores eléctricos mais comuns: o motor de corrente contínua e o motor de indução, respectivamente.

Actualmente, o controlo de velocidade de motores é efectuado utilizando dispositivos electrónicos, normalmente denominados de conversores electrónicos de potência. Desta forma, o Capítulo 8 descreve o princípio dos quatro grandes tipos de conversores electrónicos de potência - rectificadores, inversores, reguladores CC e reguladores AC.

## Índice

1. ALGUNS FENÓMENOS INTERESSANTES .....	6
1.1. Campos Gravítico, Eléctrico e Magnético.....	6
1.2. Geração de Campo Magnético por Íman Permanente.....	7
1.3. Geração de Campo Magnético por Corrente Eléctrica.....	9
1.4. Porquê Espiras e Bobinas? .....	11
1.5. O Fenómeno da Auto-indução.....	12
1.6. O Fenómeno da Indução Mútua .....	12
2. CONVERSÃO DE ENERGIA MECÂNICA EM ELÉCTRICA - GERADORES .....	13
2.1. Indução de Força Electromotriz.....	13
2.2. Princípio de Funcionamento do Gerador de Corrente Alternada (Alternador)..	16
2.3. Princípio de Funcionamento do Gerador de Corrente Contínua (Dínamo).....	19
3. TRANSFORMAÇÃO DE TENSÃO/CORRENTE ELÉCTRICA - TRANSFORMADORES.....	21
2.4 Relação entre Tensões e Correntes Primárias e Secundárias.....	21
3.1. Enrolamentos Primário e Secundário .....	22
3.2. Núcleo .....	23
3.3. Transformadores Monofásicos e Trifásicos .....	24
4. TRANSFORMAÇÃO DE ENERGIA ELÉCTRICA EM ENERGIA MECÂNICA - MOTORES ...	25
4.1. Força Electromagnética .....	25
4.2. Princípio de Funcionamento do Motor de Corrente Contínua .....	26
4.3. Princípio de Funcionamento do Motor de Indução .....	26
4.4. Princípio de Funcionamento do Motor Síncrono .....	27
5. CARACTERÍSTICAS DAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS.....	28
5.1. Classificação das Máquinas Eléctricas .....	28
5.2. Rotor/Estator e Indutor/Induzido.....	28
5.3. Sincronismo e Número de Pólos .....	29
5.4. Perdas e Rendimento .....	30
5.5. Características Nominais.....	31
6. MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA .....	32
6.1. Algumas Considerações.....	32
6.2. Motor de excitação separada (derivação).....	32
6.3. Motor de excitação série .....	34
6.4. Dinâmica do movimento num motor DC .....	34
7. MOTOR DE INDUÇÃO.....	36

7.1. Princípio de Funcionamento .....	36
7.2. Arranque .....	40
7.3. Controlo de Velocidade.....	41
7.4. Travagem Regenerativa .....	42
7.5. Aplicação em Veículos - Automóvel Eléctrico (EV1).....	43
8. CONVERSORES ELECTRÓNICOS DE POTÊNCIA.....	45
8.1. Dispositivos Semicondutores de Potência .....	46
8.2. Conversores CA/CC - Rectificadores .....	48
8.3. Conversores CC/CA - Inversores .....	53
8.4. Conversores CC/CC - Reguladores CC .....	55
8.5. Conversores CA/CA - Reguladores CA .....	57
9. REFERÊNCIAS .....	59

# 1. ALGUNS FENÓMENOS INTERESSANTES

## 1.1. Campos Gravítico, Eléctrico e Magnético

Campo é uma região do espaço onde se observam determinadas propriedades. A existência ou não de um campo numa determinada região do espaço é verificada através dos seus efeitos.

Por exemplo, se numa dada região um corpo de massa  $m$  lá colocado ficar sujeito a uma força, diz-se que nessa região existe um **Campo Gravítico**, definindo-se intensidade do campo gravítico -  $\vec{G}$ , como a força a que fica sujeito um corpo no seio de um Campo Gravítico, por unidade de massa. A força de atracção entre massas é proporcional ao valor dessas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre elas:

$$F \propto \frac{M.m}{d^2} \wedge \vec{G} = \frac{\vec{F}}{m} \quad (\text{não entrando com correcções relativistas})$$

A existência de Campo Gravítico numa dada região do espaço acarreta a existência de energia armazenada nessa região (energia potencial gravítica).

Um **Campo Eléctrico**, analogamente, é uma região do espaço onde se lá colocado um corpo carregado electricamente, este fica sujeito a uma força (Força de Coulomb - a força é directamente proporcional ao valor das cargas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre elas). De forma análoga ao Campo Gravítico, Campo Eléctrico define-se como a força a que fica sujeita uma dada carga eléctrica, por unidade de carga, quando imersa nesse Campo Eléctrico:

$$F \propto \frac{Q.q}{d^2} \wedge \vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

De facto, da propriedade conhecida de que dois corpos electricamente carregados, na proximidade um do outro, provocam uma força de atracção se as cargas forem de sinal contrário e de repulsão se forem do mesmo sinal. Ligando este facto experimental com a definição anterior, pode afirmar-se que uma das cargas “produz” o Campo Eléctrico e a outra (desde que de dimensões e de carga suficientemente pequenas para não produzir alterações sensíveis nas propriedades do espaço do Campo Eléctrico, isto é, desde que seja uma carga pontual e de pequeno valor), fica sujeita à acção desse Campo Eléctrico.

Podemos então deduzir que um Campo Eléctrico pode ser criado por uma distribuição de cargas eléctricas (algures no espaço e no tempo).

Sob o ponto de vista energético, a definição de Campo leva-nos à conclusão que a existência de um Campo Eléctrico numa dada região do espaço corresponde à existência de energia armazenada. Trata-se de energia eléctrica armazenada.

Quando uma carga livre (não sujeita a qualquer força de ligação com as partículas do meio) é colocada no meio de um Campo Eléctrico, ela adquire movimento, pois está sujeita à Força de Coulomb. Adquire assim energia cinética que lhe é transmitida pelo Campo (oriunda portanto de energia potencial eléctrica armazenada no espaço).

É de notar que num átomo, os electrões, ao se deslocarem a grande velocidade em movimento circular à volta do núcleo, teriam tendência a ser projectados para o exterior, devido à força centrífuga. Esta “fuga” não acontece pois existe uma força de atracção, de

igual intensidade, exercida pelos prótons no núcleo, que contrabalança a primeira, mantendo os electrões nas suas orbitas em redor do núcleo. Este fenómeno é equivalente ao verificado nos satélites artificiais geostacionários, que têm de girar à mesma velocidade da terra para que permaneçam na mesma posição relativa (altura de cerca de 36000 Km para que a força gravítica equilibre a força centrífuga). Se não existisse uma força de atracção gravítica por parte da terra, estes satélites sairiam das suas órbitas.

Pode portanto afirmar-se que sempre que existe Campo existe energia armazenada, e vice-versa, isto é, confunde-se a existência de Campo Eléctrico numa dada região do espaço com a existência de energia eléctrica armazenada nessa região do espaço.

Tal como para o Campo Gravítico e para o Campo Eléctrico, a existência do **Campo Magnético** manifesta-se pelos seus efeitos. Um Campo Magnético pode ser criado por cargas em movimento (corrente eléctrica) ou por um material (ferromagnético) magnetizado, provocando, por exemplo, que dois condutores na proximidade um do outro estejam sujeitos a uma força de atracção ou de repulsão, conforme o sentido da corrente que os percorre é o mesmo ou oposto, respectivamente.

## 1.2. Geração de Campo Magnético por Íman Permanente

O primeiro fenómeno magnético a ser observado foi o associado ao íman ou magneto “natural”:

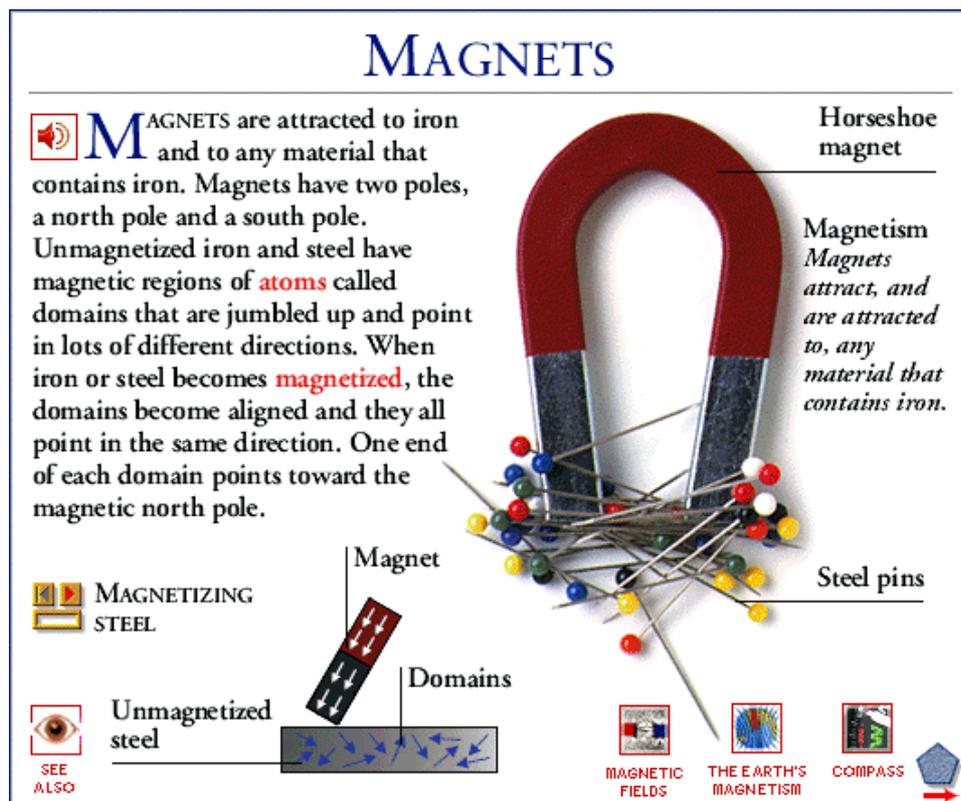


Figura 1: Íman ou magneto “natural” ([2])

Estes magnetos naturais têm a propriedade de atrair o ferro não magnetizado. Nota-se ainda que a força de atracção é mais forte em duas regiões do magneto, denominadas pólos - Polo Norte e Polo Sul. Os materiais que depois de magnetizados mantêm essa

propriedade têm características de “magnetização permanente”. De facto, a ocorrência deste fenómeno deve-se à existência de um Campo Magnético, de natureza similar aos Campo Gravítico e Campo Eléctrico referidos atrás.

O planeta Terra comporta-se como um íman gigante com um Polo Norte e um Polo Sul, ligeiramente desfasados (15°) dos respectivos pólos geográficos:

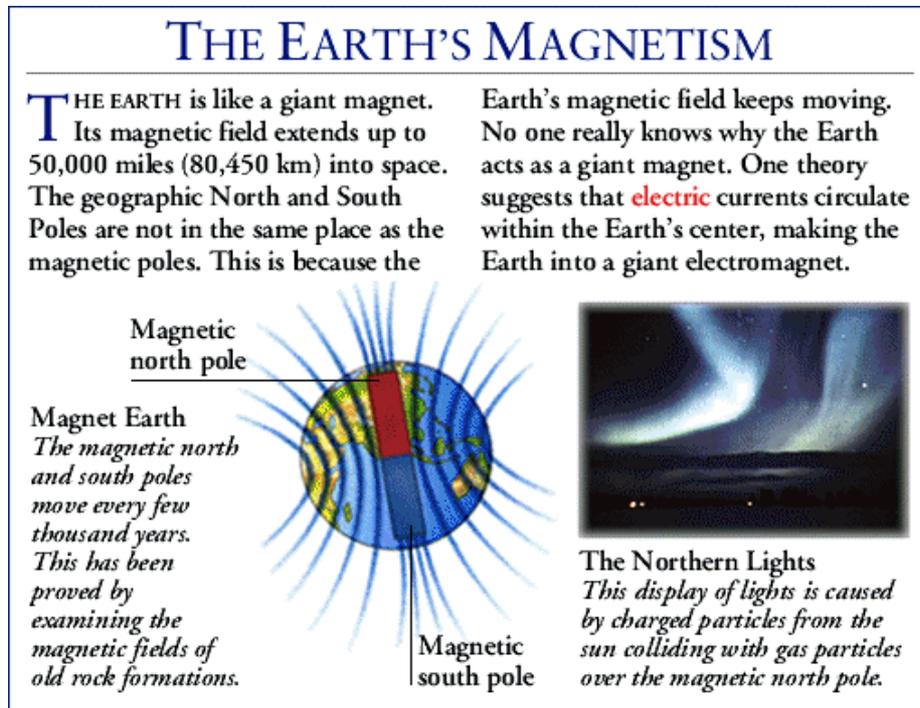


Figura 2: O Campo Magnético terrestre ([2])

A existência do Campo Magnético terrestre permite a utilização de bússolas, que não passam de pequenos ímans suspensos que se orientam segundo o magnetismo terrestre:



Figura 3: A bússola ([2])

Saliente-se que, se considerarmos que o Polo Norte Magnético corresponde ao Polo Norte Geográfico, a extremidade do íman que aponta para o Polo Norte é na realidade o seu Polo Sul, visto que pólos do mesmo nome se repelem e pólos de nomes diferentes se atraem. As linhas de força do Campo Magnético podem ser visualizadas com o auxílio de limalha de ferro:

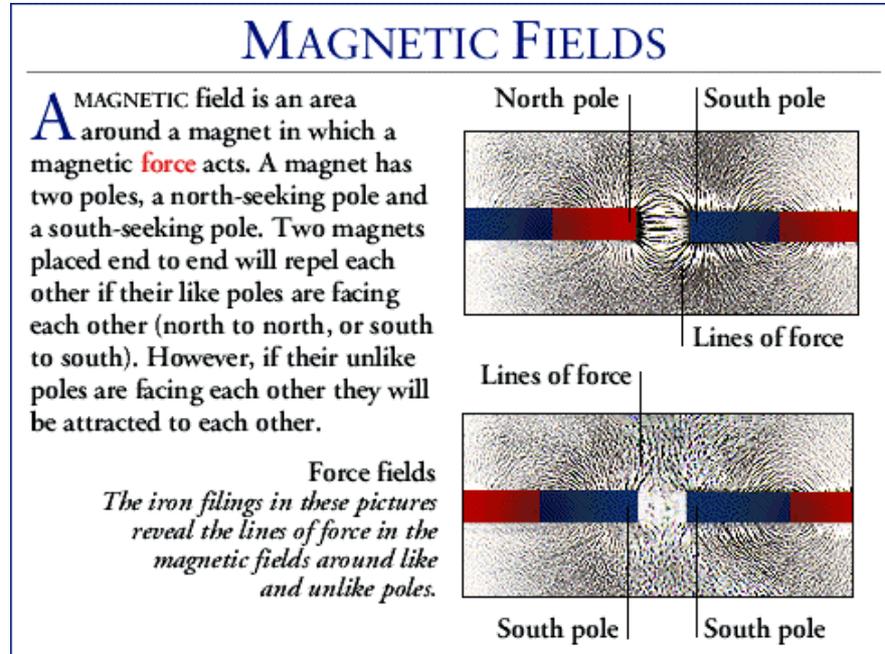


Figura 4: Linhas de força do Campo Magnético criado por magneto ([2])

Note-se que, ao contrário do Campo Gravítico e do Campo Eléctrico, as linhas de força do Campo Magnético fecham-se sobre si próprias, isto é, formam circuitos fechados.

### 1.3. Geração de Campo Magnético por Corrente Eléctrica

A deslocação orientada de cargas (corrente eléctrica) também produz um Campo Magnético. De facto, diversas experiências efectuadas no século passado demonstram que a passagem de corrente eléctrica provoca o aparecimento de um Campo Magnético:

- Quando colocamos em proximidade dois condutores percorridos por corrente eléctrica, eles ficam sujeitos a forças de atracção ou repulsão (*Força de Laplace*), dependendo do sentido das correntes
- Se aproximarmos uma bússola de um condutor em condução, ela será sujeita a um desvio dependendo do sentido da corrente eléctrica
- Se dispusermos limalha de ferro numa superfície perpendicular a um condutor percorrido por uma corrente eléctrica, essa limalha reposiciona-se de acordo com as linhas de força do Campo Magnético ()

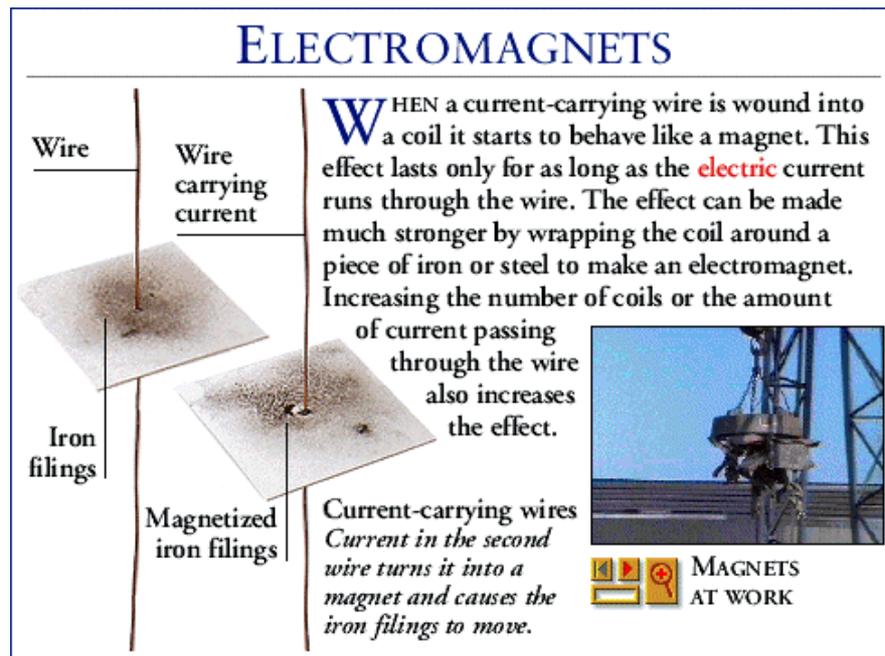


Figura 5: Linhas de força do Campo Magnético criado por corrente eléctrica ([2])

O sentido da corrente no condutor e o sentido do fluxo do Campo Magnético estão relacionados. Partindo do sentido da corrente eléctrica e utilizando a *Regra da Mão Direita de Ampère* ou a *Regra do Saca-Rolhas*, obtém-se o sentido das linhas de força do Campo Magnético.

Na *Regra da Mão Direita de Ampère*, abraçamos o condutor com a nossa mão direita, com o polegar a indicar o sentido da corrente. Os outros dedos indicam o sentido das linhas de força.

Na *Regra do Saca-Rolhas*, o sentido de rotação do saca-rolhas quando tenta acompanhar o sentido da corrente, dá-nos o sentido das linhas de força.

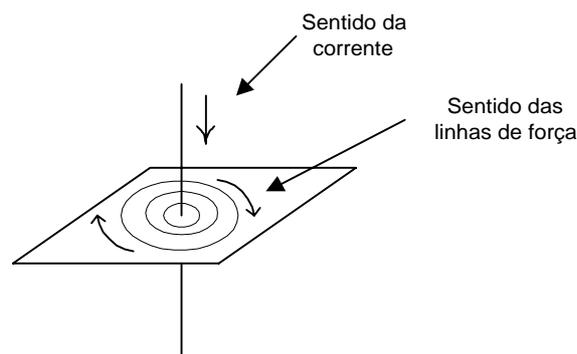


Figura 6: Sentido das linhas de força do Campo Magnético criado por corrente

Pode ainda afirmar-se que o Campo Magnético se torna mais fraco quando:

- Nos afastamos do condutor
- Diminui a corrente eléctrica

#### 1.4. Porquê Espiras e Bobinas?

Se dobrarmos um condutor em forma de **espira**, o Campo Magnético vai reforçar-se, criando-se um Polo Norte dum dos lados da espira e um Polo Sul do outro lado:

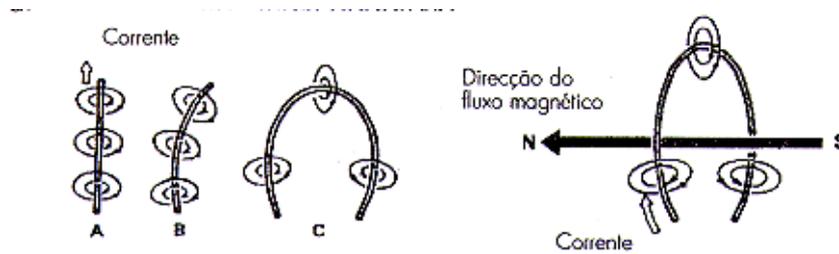


Figura 7: Condutor em espira gera Polo Norte e Polo Sul ([1])

Se enrolarmos um condutor em forma de **bobina** (conjunto de espiras), o efeito do Campo Magnético criado é ainda maior. De facto, o Campo Magnético gerado por cada uma das espiras vai acrescentar-se ao Campo Magnético global (da bobina), tornando-se muito mais forte.

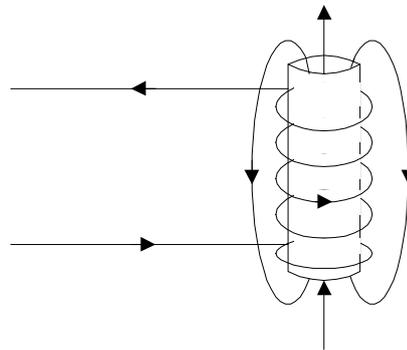


Figura 8: Sentido das linhas de força do Campo Magnético criado por corrente numa bobina ([1])

Quando um pedaço de metal facilmente magnetizável é colocado perto de uma bobina em corrente, o pedaço de metal desloca-se na direção da bobina. Isto porque o pedaço de metal é magnetizado e atraído pelo Campo Magnético gerado pela bobina.

A força do Campo Magnético, quando uma corrente atravessa a bobina, é proporcional à quantidade de espiras e à intensidade dessa corrente:

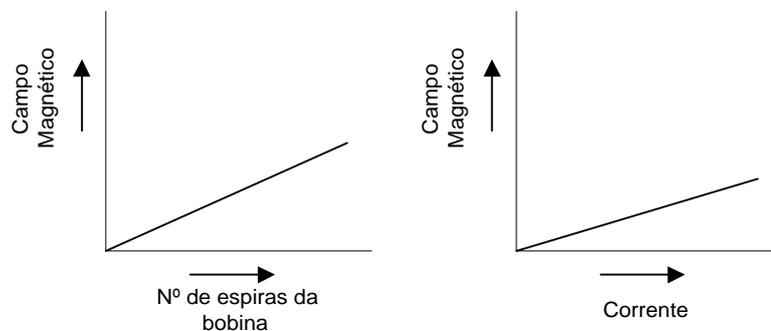


Figura 9: Sentido das linhas de força do Campo Magnético criado por corrente ([1])

A força de atracção é também consideravelmente aumentada se um **núcleo de ferro** for introduzido na bobina, pois o fluxo magnético aumenta significativamente (muito mais linhas de força). Na *Figura 5*, a força de atracção de um electroímã (bobina) é utilizada para transportar ferro velho.

### 1.5. O Fenómeno da Auto-indução

Quando a corrente que percorre uma bobina varia no tempo, varia também o fluxo magnético por ela gerado. Segundo a Lei de Lenz, é induzida na própria bobina uma f.e.m. contrária à causa que lhe deu origem. Trata-se de um fenómeno de **auto-indução**. Com esta f.e.m. é induzida de modo a opor-se às alterações (aumentos ou reduções) na corrente que atravessa a bobina, denomina-se de **força contra-electromotriz** (f.c.e.m.).

A grandeza da f.c.e.m. que surge numa bobina é proporcional à variação da corrente (fluxo magnético), aparecendo uma constante de multiplicação denominada de **coeficiente de auto-indução - L**. Este coeficiente mede-se em *Henry* (H) e depende no número de espiras, secção e tipo de núcleo da bobina, etc.:

$$E = -L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Qualquer receptor indutivo apresenta um problema derivado deste fenómeno, que é o facto de quando se interrompe a sua corrente de alimentação, gera-se um pico de tensão (f.e.m.) aos terminais do elemento que efectua a interrupção (interruptor, relé de comando, transístor, etc.). Por exemplo, nos automóveis, um dos problemas do sistema de ignição é a f.c.e.m. gerada sempre que o interruptor (ou platinados) fecham ou abrem o circuito primário da bobina de ignição. Esta f.c.e.m. cria problemas tais como o aparecimento de sobretensões nos circuitos, arcos eléctricos nos interruptores, ruídos no rádio, etc. Para os evitar, podem ser utilizados condensadores ou díodos em paralelo com estes contactos, de modo a “descarregar” a f.c.e.m. gerada em regimes transitórios.

### 1.6. O Fenómeno da Indução Mútua

Se dispusermos de duas bobinas, em que o campo magnético gerado por uma delas atravesse a outra, verifica-se que nesta última aparece uma tensão (força electromotriz). Se houver variação da corrente na primeira bobina (fluxo magnético variável), é induzida na outra bobina uma f.c.e.m. Este fenómeno denomina-se de **indução mútua** (indução mútua entre duas bobinas com o mesmo núcleo).

A grandeza da f.e.m. (f.c.e.m.) de indução mútua varia proporcionalmente às variações na corrente (ou no fluxo magnético) por unidade de tempo, multiplicado por uma constante (conhecida por constante de indução mútua e simbolizada por M), determinada pelo número de espiras em cada bobina, a distância entre elas e a orientação entre elas e das características ferromagnéticas do núcleo.

A f.e.m. gerada no secundário por indução mútua, quando na bobina primária existe uma variação de corrente no tempo é:

$$E \propto M \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

O transformador baseia o seu funcionamento neste fenómeno.

## 2. CONVERSÃO DE ENERGIA MECÂNICA EM ELÉCTRICA - GERADORES

Um dos primeiros fenómenos do electromagnetismo a ser conhecido, em meados do século passado, foi o facto de num circuito eléctrico aparecer uma corrente momentânea quando um íman se aproximava ou afastava deste, ou quando noutra circuito próximo se iniciava ou interrompia a passagem de corrente (experiências de Faraday).

### 2.1. Indução de Força Electromotriz

#### Indução Electromagnética - Barra Magnetizada em Movimento no Interior de Bobina

Quando uma barra magnetizada se movimenta no interior de uma bobina, **induz-se** nesta última uma corrente eléctrica.

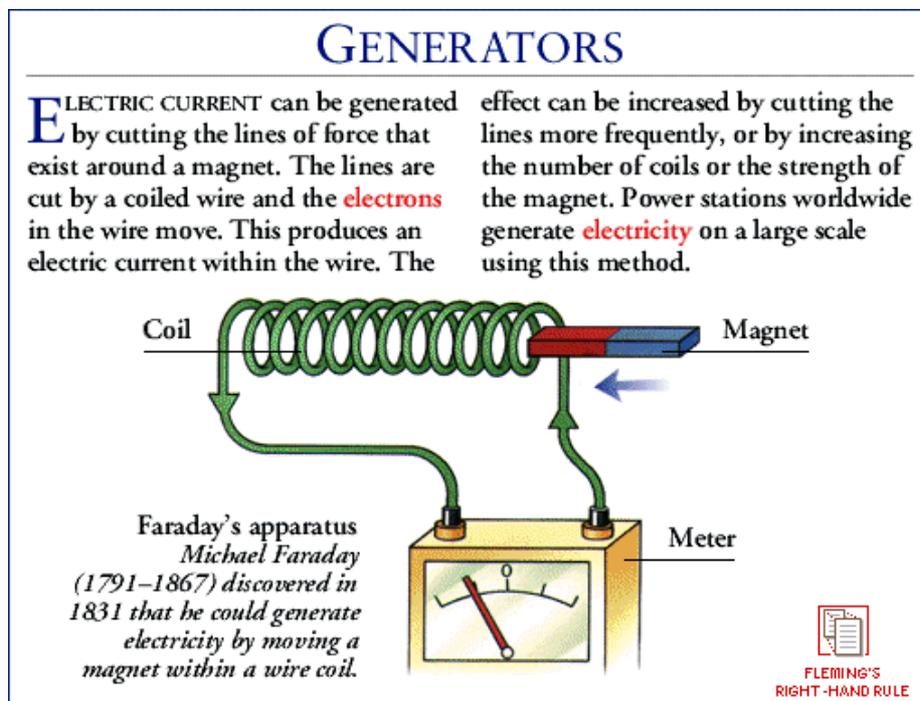


Figura 10: Indução de uma f.e.m. por deslocação de um ímã relativamente a uma bobina ([2])

De experiências efectuadas pode concluir-se o seguinte:

- Quando o ímã é deslocado para mais próximo da bobina, a agulha do galvanómetro (instrumento que mede correntes muito pequenas) deflecte num sentido. Quando o ímã se afasta da bobina, em contraste, a agulha deflecte no sentido oposto, o que prova que o sentido da força electromotriz (f.e.m.) gerada na bobina se inverte.
- Quando o ímã se aproxima e afasta da bobina, a agulha do galvanómetro deflecte muito se o ímã for deslocado rapidamente, mas apenas deflecte um pouco se o ímã for deslocado lentamente. Prova isto que uma maior f.e.m. é gerada quando o ímã se desloca mais rapidamente.

- Quando o magneto se aproxima da bobina e é mantido nessa posição, a agulha do galvanómetro volta à sua posição neutra, logo que o magneto para, mesmo que a bobina se mantenha no campo magnético do magneto. Isto demonstra que não é gerada f.e.m. a menos que a força do campo magnético se altere.
- A agulha deflecte mais quanto mais forte for o magneto. Conclui-se então que um campo magnético mais forte gera uma maior f.e.m.
- Obviamente, e por que o que interessa é o movimento relativo, a agulha do galvanómetro também se desloca se for a bobina a movimentar-se em relação a um magneto fixo.

Os fenómenos acima descritos, onde uma f.e.m. é induzida a partir da variação de um campo magnético, resultam da existência de **Indução Electromagnética**.

### **Grandeza da F.E.M. Induzida**

A grandeza da f.e.m. induzida numa bobina, por indução electromagnética, varia proporcionalmente à quantidade de linhas de fluxo magnético do magneto cortadas pela bobina num dado período de tempo e ao número de espiras da bobina.

Se o número de espiras de uma bobina é  $N$ , a variação do fluxo magnético com o tempo é  $\Delta\Phi / \Delta t$  e a f.e.m. induzida é  $E$ , a seguinte relação é verdadeira:

$$E \propto N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

### **Sentido da F.E.M. Induzida - Lei de Lenz**

Verifica-se que, quando o fluxo magnético produzido pelo magneto atravessa a bobina, é gerada uma f.e.m. que, por sua vez, cria um fluxo magnético orientado num sentido que **contraria** o fluxo magnético do magneto (tenta repelir o magneto se este se aproxima ou atraí-lo se este se afasta).

Este fenómeno é materializado pela Lei de Lenz:

*O sentido de uma f.e.m induzida é tal que ela se **opõe** à causa que lhe deu origem.*

No caso do magneto e da bobina, a f.e.m induzida na bobina tenta contrariar a causa que lhe deu origem - a variação de fluxo provocada pelo movimento do magneto.

Suponhamos que o polo norte do magneto se aproxima da bobina. Neste caso, a f.e.m. induzida na bobina terá o sentido necessário para gerar um polo norte do lado onde o magneto está a entrar:

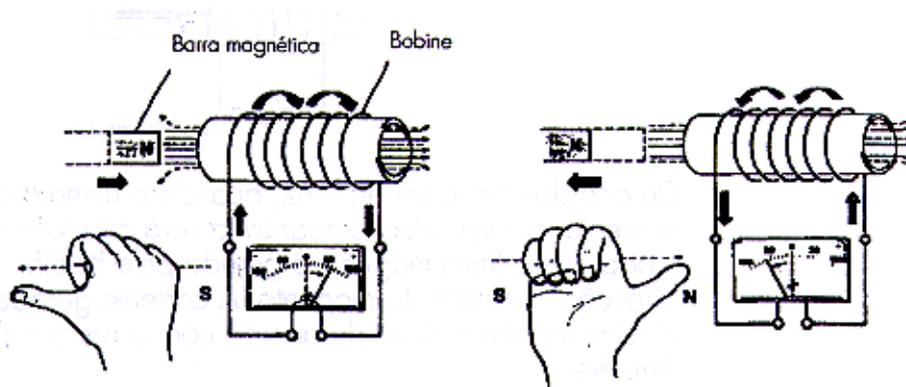


Figura 11: Sentido da f.e.m. induzida por deslocação de um magneto relativamente a uma bobina (11)

Para determinar o sentido da f.e.m. (ou da corrente), recorre-se à *Regra da Mão Direita de Ampère* ou à *Regra do Saca-Rolhas*.

### Indução Electromagnética - Condutor em Movimento no Interior de Campo Magnético

Se, ao contrário da experiência anterior, mantivermos fixa a fonte do Campo Magnético e deslocarmos um condutor no seu seio, também é induzida nesse condutor uma f.e.m.

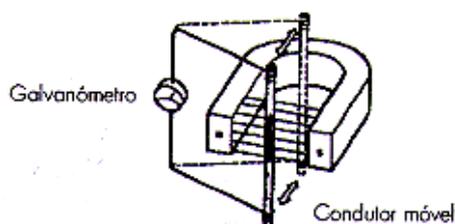


Figura 12: Indução de f.e.m. por deslocação de um condutor dentro de um Campo Magnético (11)

### Grandeza da F.E.M. Induzida

A grandeza da f.e.m. gerada quando um condutor “corta” o fluxo magnético, no interior de um Campo Magnético, é proporcional à quantidade de linhas de força que são cortadas por unidade de tempo. Por exemplo, se  $N$  for o número de linhas de força cortadas num dado intervalo de tempo  $t$ , e a f.e.m. for  $E$ , a seguinte relação é verdadeira:

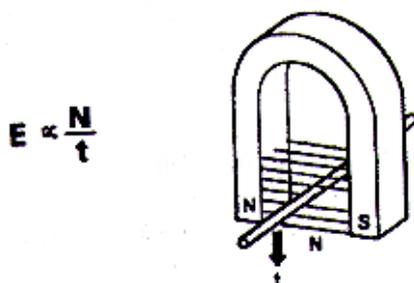


Figura 13: Grandeza da f.e.m. induzida por deslocação de um condutor dentro de um Campo Magnético (11)

### Sentido da F.E.M. Induzida - *Regra da Mão Direita de Fleming*

A direcção e sentido da f.e.m. gerada num condutor em movimento dentro de um Campo Magnético varia com:

- A direcção e sentido do fluxo magnético
- A direcção, sentido e velocidade de deslocamento do condutor

Para determinar a direcção e sentido da f.e.m. induzida no condutor, podemos recorrer à *Regra da Mão Direita de Fleming*.

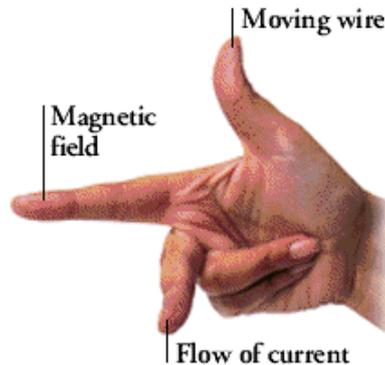


Figura 14: Sentido da f.e.m. induzida num condutor em movimento no seio de um campo magnético ([2])

### 2.2. Princípio de Funcionamento do Gerador de Corrente Alternada (Alternador)

Apenas é induzida f.e.m. num condutor se o seu movimento for normal às linhas de força do Campo Magnético, isto é:

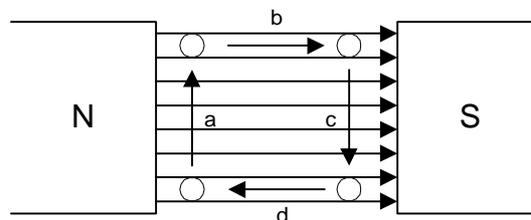


Figura 15: F.e.m. induzida depende da direcção e sentido do movimento ([1])

Apenas nos movimentos *a* e *c* é gerada f.e.m. Nos movimentos *b* e *d* não são “cortadas” nenhuma das linhas de força, não havendo portanto indução de f.e.m.

Se o condutor tiver uma trajectória circular, o valor da f.e.m. mudará constantemente. Analogamente ao caso anterior, as zonas em que a f.e.m. terá o seu valor máximo (em módulo) são as zonas *a* e *c*. Nas zonas *b* e *d*, a f.e.m. induzida atingirá o seu mínimo valor.

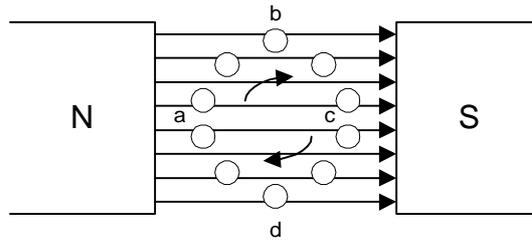


Figura 16: Condutor com trajetória circular ([1])

O resultado é uma corrente (f.e.m.) que tem uma variação **sinusoidal**:

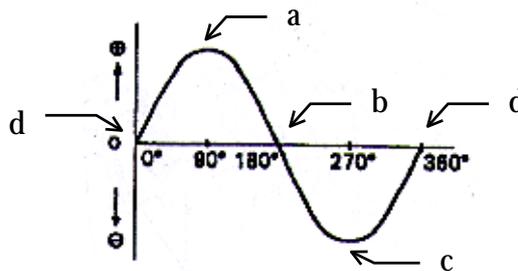


Figura 17: F.e.m. induzida em função do tempo ([1])

Se em vez de termos um condutor rectilíneo em movimento dentro de um Campo Magnético, tivermos uma espira em rotação em torno do seu eixo, as f.e.ms. induzidas em ambos os lados da espira vão adicionar-se:

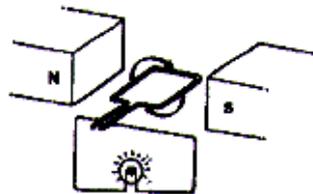


Figura 18: Espira em rotação dentro de Campo Magnético ([1])

A captação da energia eléctrica gerada pode ser feita através duas superfícies condutoras em forma de anel - **anéis colectores**, uma para cada terminal da espira. Dado o movimento de rotação destes anéis, é necessário que existam dois mecanismos de contacto eléctrico para ligar este sistema com o exterior. Este contacto é feito através de **escovas** condutoras que fazem o contacto eléctrico com os anéis colectores:

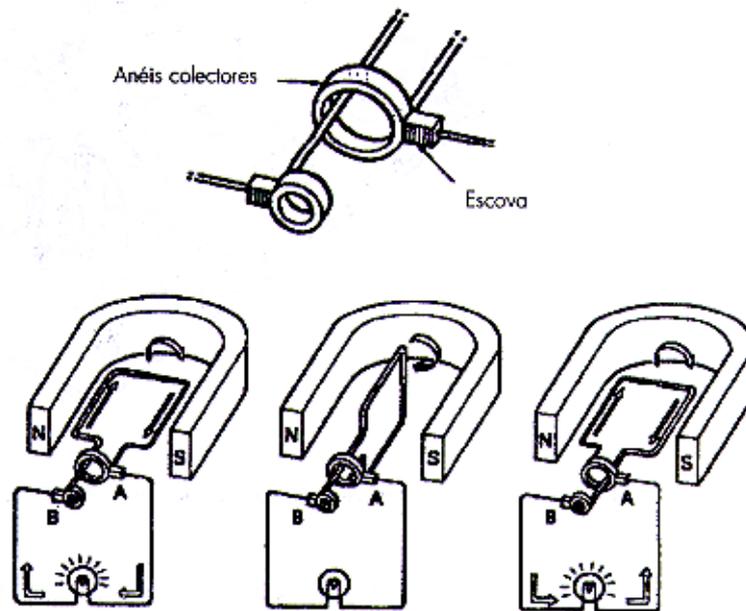


Figura 19: Geração de corrente alternada sinusoidal (11)

Dado que para a geração de f.e.m. o que interessa é o movimento relativo entre condutores e Campo Magnético, se em vez de serem os condutores (espira) a rodar com o magneto parado, for o magneto a rodar com a espira parada, o efeito será similar.

O sentido da f.e.m. induzida poderá ser determinado através da *Regra da Mão Direita de Fleming*, já referida anteriormente:

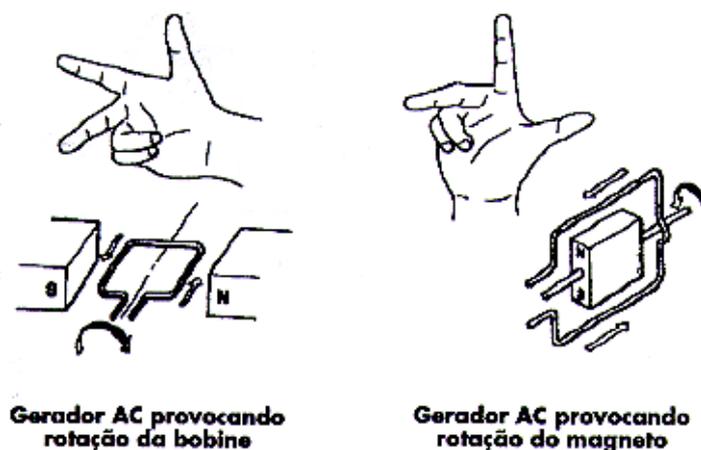


Figura 20: Sentido da f.e.m. induzida: Espira em rotação ou Magneto em rotação (11)

Na figura seguinte podem constatar-se as várias posições de rotação do magneto, correspondendo a diferentes valores da f.e.m. induzida na espira:

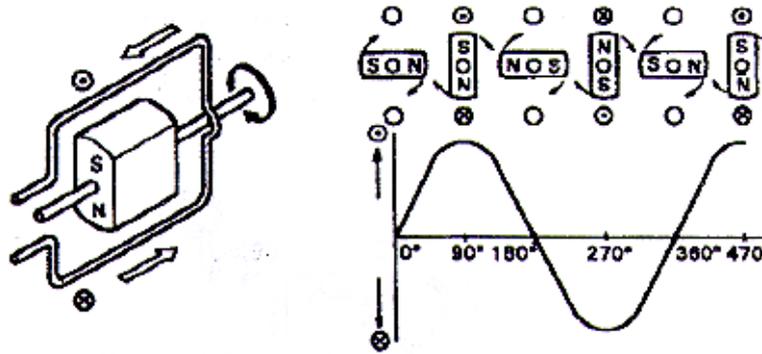


Figura 21: Magneto em rotação dentro de espira estática (11)

### 2.3. Princípio de Funcionamento do Gerador de Corrente Contínua (Dinamo)

A f.e.m. gerada, naturalmente, por rotação de uma espira dentro de um Campo Magnético ou por rotação de um magneto em relação a uma espira, tem uma forma sinusoidal. No entanto, podemos tornar essa f.e.m. unidireccional se invertermos os terminais do condutor sempre que a f.e.m. inverte o seu sinal:

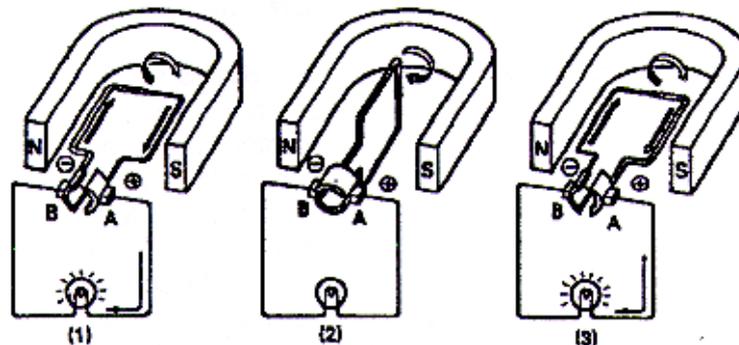


Figura 22: Conversão da corrente **bidireccional** em **unidireccional** (11)

Isto é, se a f.e.m. gerada na espira for captada por duas escovas condutoras, cada uma delas em contacto com um segmento (semi-anel) de colecter, a corrente na lâmpada terá sempre o mesmo sentido, embora o seu valor não seja constante. Isto é, conseguimos converter uma corrente **bidireccional** numa corrente **unidireccional**:

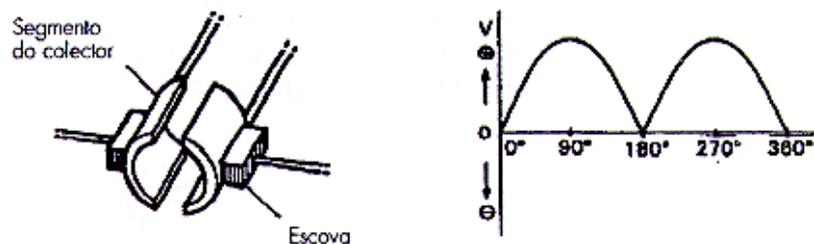


Figura 23: Conversão da corrente **bidireccional** em **unidireccional** (11)

É este o princípio de funcionamento do **gerador de corrente contínua**.

Nos geradores actuais existem **várias bobinas** (enrolamentos) dispostas na circunferência que produzem f.e.ms. independentes umas das outras, utilizando-se a f.e.m. de cada uma delas apenas quando esta está na zona de valor mais elevado. A **f.e.m. resultante** é, portanto, **praticamente constante**, característica fundamental de um gerador de corrente contínua:

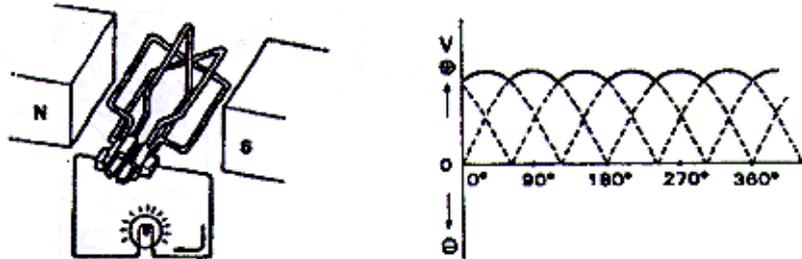


Figura 24: Conversão da corrente **bidireccional** em **unidireccional** (1)

### 3. TRANSFORMAÇÃO DE TENSÃO/CORRENTE ELÉCTRICA - TRANSFORMADORES

O transformador é uma máquina estática, isto é, não tem peças em movimento, que baseia o seu funcionamento na indução magnética. Este aparelho destina-se a elevar ou baixar o valor de uma tensão ou de uma corrente e poderá ter o aspecto da *Figura 27* (transformador trifásico de uma subestação):



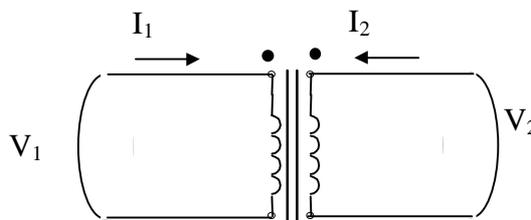
*Figura 25: Transformador ([2])*

#### 2.4 Relação entre Tensões e Correntes Primárias e Secundárias

Existem dois circuitos eléctricos distintos - o primário e o secundário - que, apesar de estarem isolados electricamente, estão “ligados” magneticamente, pois o fluxo magnético gerado pela bobina primária vai percorrer também o interior da bobina secundária.

A energia eléctrica (tensão/corrente) é introduzida no primário, que por sua vez gera um campo magnético (variável) que, influenciando o enrolamento secundário, provoca o aparecimento neste de uma força electromotriz induzida.

O transformador pode-se ser representado electricamente da seguinte forma:



*Fig. 2.1 - Esquema eléctrico de um transformador*

Notar que foram colocados pontos “.” nos enrolamentos da figura anterior. Isto significa que as correntes que entram nos terminais com “.” resultam em fluxos com a mesma direcção.

Em que  $V_1$  é a tensão aplicada ao primário,  $I_1$  a corrente consumida no primário,  $V_2$  a tensão que aparece no secundário.  $I_2$  a corrente consumida no secundário.  $N_1$ ,  $N_2$  o número de “voltas”, espiras, na bobina do primário e do secundário, respectivamente.

Se for considerado  $\phi$  como o fluxo que circula no material ferromagnético (núcleo). Segundo a lei de Faraday

$$E_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt} \qquad E_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt}$$

Combinando as duas equações,

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Um parâmetro muito importante do transformador é então a sua razão de transformação:

$$a = \frac{N_1}{N_2}$$

No caso das correntes verifica-se que:

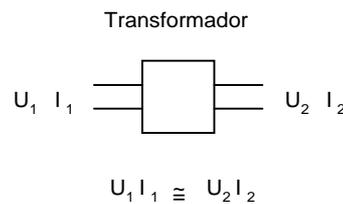
$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2}$$

A partir da relação entre o número de espiras dos enrolamentos primário e secundário, conseguem obter-se transformadores elevadores/abaixadores de tensão/corrente.

### 3.1. Enrolamentos Primário e Secundário

Os enrolamentos que constituem o primário e o secundário são realizados com fio de cobre sólido ou multifilado.

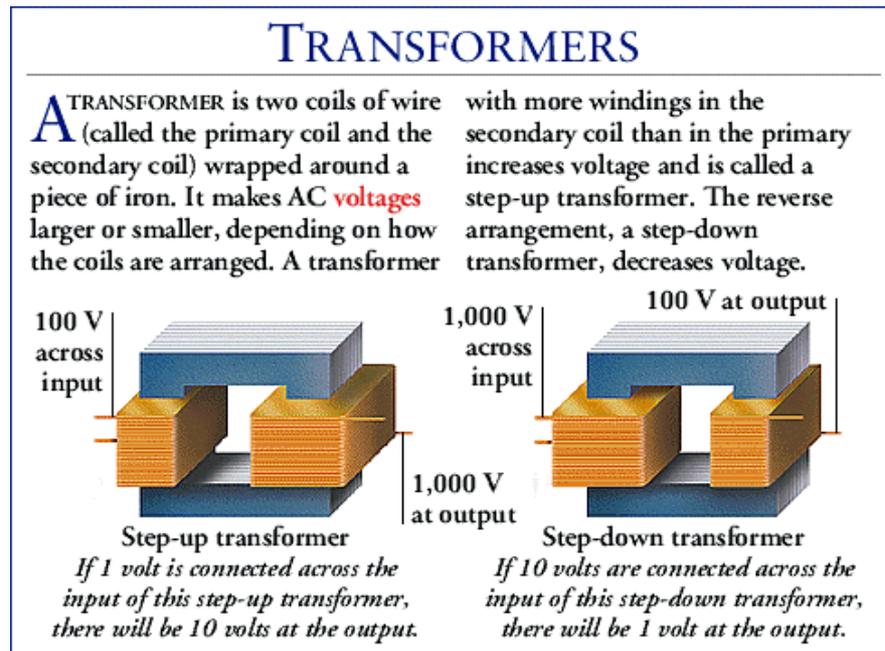
Pode visualizar-se na um diagrama de blocos de um transformador.



*Figura 26: Transformador*

O valor da intensidade da corrente, como já foi referido, varia de uma forma inversamente proporcional à tensão. Por exemplo, um transformador abaixador de tensão, com uma razão de transformação de 100, que tenha aplicados à sua entrada uma tensão de 230 V e uma corrente de 0.1 A, tem, na sua saída, 2.3 V e 10 A (desprezando as perdas).

A *Figura 27* pode também servir como exemplo destas relações:



*Figura 27: Transformadores elevador (esquerda) e abaixador (direita)*

É importante também analisar a relação entre o isolamento e a secção do condutor utilizado, dependendo do enrolamento. Por exemplo, num transformador abaixador (tensão secundária inferior à primária), vamos ter uma tensão grande e uma corrente pequena no primário e uma tensão pequena e uma corrente grande no secundário. Isso implica que, no primário teremos de ter um isolamento mais eficaz (por causa de uma possível quebra de dieléctrico), mas condutores de menor secção, enquanto que no secundário teremos menor isolamento, mas condutores mais grossos (para reduzir as perdas caloríficas).

### 3.2. Núcleo

Já que o ar não é o meio que melhor conduz as linhas de força do campo magnético, para facilitar a passagem das linhas de força, utiliza-se um material ferromagnético (bom condutor deste campo) a que se dá o nome de núcleo.

Refira-se que o núcleo dos transformadores é normalmente laminado, isto é, o núcleo é constituído por chapas de material ferromagnético que são isoladas entre si por um isolante (verniz, por exemplo):

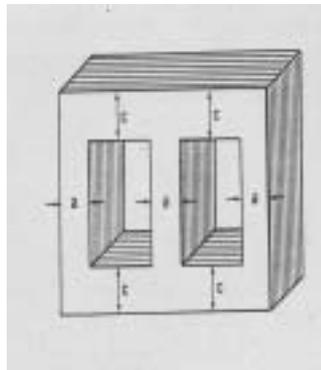


Figura 28: Núcleo laminado de um transformador ([4])

Este processo construtivo reduz a formação de correntes induzidas no núcleo ferromagnético (*Correntes de Foucault*) reduzindo consequentemente as perdas caloríficas no núcleo do transformador.

Em muitos transformadores, tanto o núcleo como os enrolamentos são imersos num fluido não condutor, como óleo. Esta técnica é utilizada para melhorar a dissipação do calor gerado pelo transformador.

### 3.3. Transformadores Monofásicos e Trifásicos

No caso de transformadores monofásicos, existe somente uma bobina primária e uma bobina secundária. Para um transformador trifásico, existirão três bobinas primárias e três bobinas secundárias:

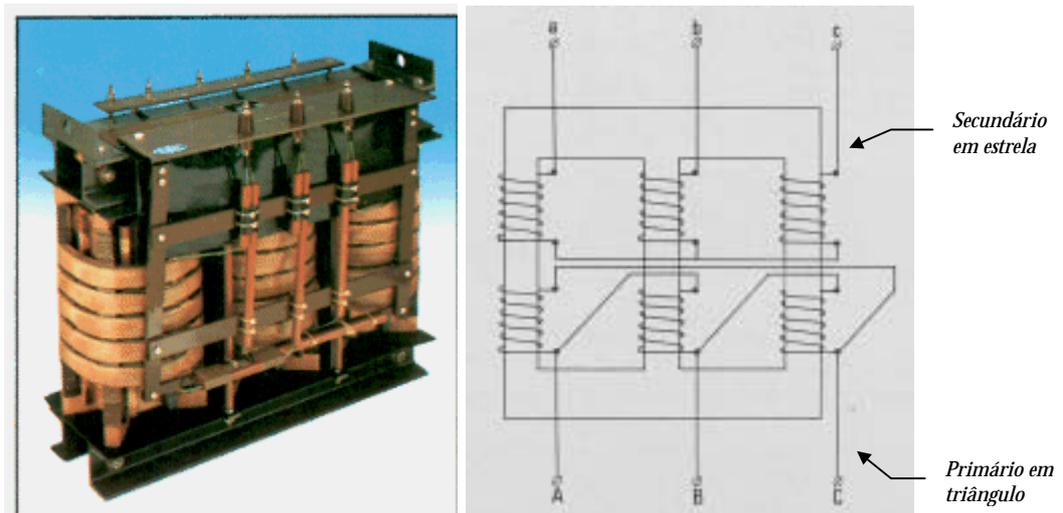


Figura 29: Transformador trifásico e esquema eléctrico ([4])

## 4. TRANSFORMAÇÃO DE ENERGIA ELÉCTRICA EM ENERGIA MECÂNICA - MOTORES

### 4.1. Força Electromagnética

A interacção entre dois campos magnéticos provoca o aparecimento de uma força. Se um condutor em condução for introduzido no seio de um outro campo magnético, este condutor vai ficar sujeito a uma força.

A grandeza da força electromagnética  $F$  é proporcional à densidade do campo magnético  $B$  (quantidade de linhas de força por área), à corrente  $I$  que atravessa o condutor e ao comprimento  $l$  do condutor, como se representa a seguir:

$$F \propto B \cdot I \cdot l$$

Por outras palavras, a força electromagnética que surge é tanto maior quanto mais forte for o campo magnético, mais corrente atravessar o condutor ou maior for o comprimento do condutor.

O sentido da força electromagnética que se produz pode ser determinado pela *Regra da Mão Esquerda de Fleming*:

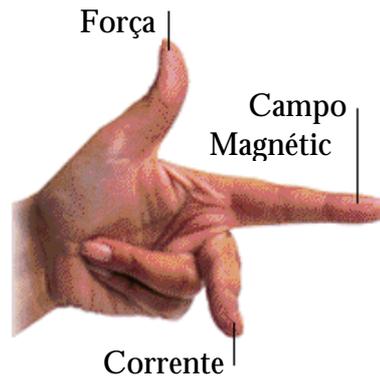


Figura 30: Regra da Mão Esquerda de Fleming ([2])

Por exemplo:

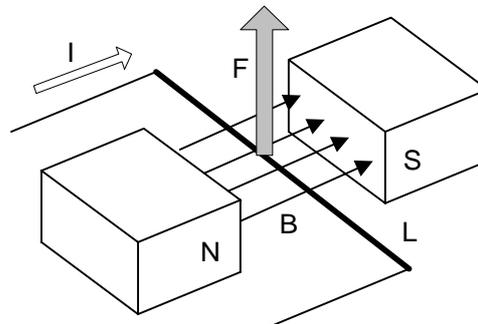


Figura 31: Sentido da força electromagnética num condutor em condução no seio de um campo magnético ([1])

## 4.2. Princípio de Funcionamento do Motor de Corrente Contínua

O fenómeno anterior serve de base ao funcionamento do motor de corrente contínua (Motor CC), cujo princípio de funcionamento é o indicado na *Figura 32*. É de salientar que o Motor CC e o Gerador CC (dínamo) têm funcionamento **reversível**, isto é, a mesma máquina pode funcionar como um dínamo ou como um motor CC (só para as máquinas que funcionam com íman permanente e não com electroíman).

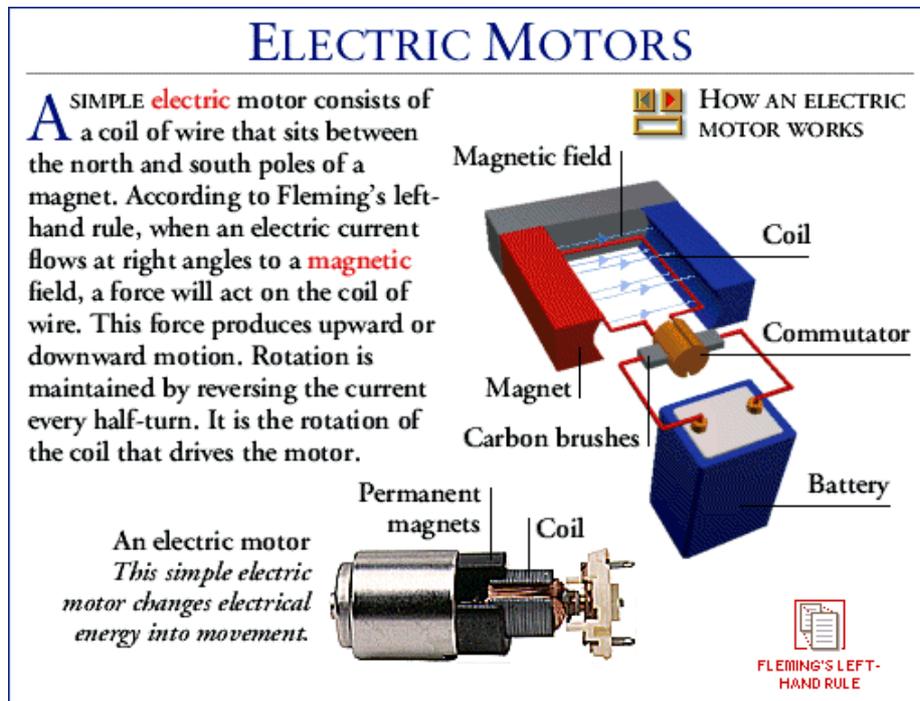


Figura 32: Princípio de Funcionamento do Motor CC ([2])

Um condutor com a forma de enrolamento quadrado, é colocado entre os pólos norte e sul de um magneto. Dois segmentos de colecto são adaptados, um para cada extremidade do enrolamento. A corrente flui do terminal positivo da bateria para o segmento do colecto, através do enrolamento, para o outro segmento e, por fim, para o terminal negativo da bateria.

A força electromagnética provoca a rotação do enrolamento em torno do seu eixo, havendo a inversão da polaridade da tensão aplicada para garantir a continuidade do movimento no mesmo sentido de rotação (em termos equivalentes ao que acontecia no Gerador CC, para gerar corrente unidireccional)

## 4.3. Princípio de Funcionamento do Motor de Indução

O motor de indução é um motor que baseia o seu princípio de funcionamento na criação de um campo magnético rotativo. A partir da aplicação de tensão alternada (trifásica ou monofásica) no estator, consegue-se produzir um campo magnético rotativo - **campo girante** - que atravessa os condutores do rotor. Este campo magnético variável induz no rotor f.e.ms. que, por sua vez, criam o seu próprio campo magnético girante. Este campo magnético girante criado pelo rotor, ao tender a alinhar-se com o campo girante do estator, produz um movimento de rotação no rotor.

A velocidade de rotação do rotor é ligeiramente inferior à velocidade de rotação do campo girante do estator, não estando por isso o rotor sincronizado com esse campo girante. Por esta razão este tipo de motor é também chamado de **motor assíncrono** (de indução).

O seu funcionamento vai ser desenvolvido mais à frente.

#### **4.4. Princípio de Funcionamento do Motor Síncrono**

A construção do motor síncrono é idêntica à do alternador. Na realidade, podemos pensar na máquina eléctrica síncrona como um gerador ou como um motor, dependendo do tipo de energia fornecida à máquina e do tipo de energia obtida da máquina:

- No gerador síncrono (alternador)

Fornece-se energia mecânica e energia eléctrica ao enrolamento do rotor

Obtém-se energia eléctrica (alternada trifásica) nos enrolamentos do estator

- No motor síncrono

Fornece-se energia eléctrica (alternada trifásica) nos enrolamentos do estator e energia eléctrica ao enrolamento do rotor

Obtém-se energia mecânica

Portanto, um alternador pode também funcionar com um motor.

Embora com o aparecimento dos dispositivos electrónicos de potência se comece a utilizar cada vez mais o motor de indução (motor assíncrono), o motor síncrono é ainda muito utilizado a nível de tracção eléctrica, nomeadamente nos comboios (normais e de alta velocidade), devido a diversas razões, nomeadamente porque a ausência de deslizamento ( $f = p \cdot n$ ) permite obter uma velocidade rigorosa para uma dada frequência de alimentação

## 5. CARACTERÍSTICAS DAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

### 5.1. Classificação das Máquinas Eléctricas

As máquinas eléctricas podem ser classificadas quanto à função que exercem:

- Transformação de energia mecânica em energia eléctrica - **Geradores** | máquinas rotativas
- Transformação de energia eléctrica em energia mecânica - **Motores** | máquinas rotativas
- Transformação de tensão/corrente eléctrica – **Transformadores** (máquina estática)

Considerando o seu princípio de funcionamento, podemos dividir as **máquinas rotativas** da seguinte maneira ([3]):

<b>Corrente Alternada</b>	<b>Síncronas</b>	<b>Gerador (síncrono) ou Alternador</b> <b>Motor (síncrono)</b>	Reversíveis
	<b>Assíncronas</b>	<b>Gerador (assíncrono de indução)</b> <b>Motor (assíncrono de indução)</b>	Reversíveis
<b>Corrente Contínua</b>	<b>Gerador (dínamo)</b> <b>Motor</b>		Reversíveis

### 5.2. Rotor/Estator e Indutor/Induzido

Nas máquinas rotativas, existe sempre uma parte fixa - **estator** - e uma parte móvel - **rotor**. Nos geradores, o movimento de rotação do rotor provoca o aparecimento de uma f.e.m. no estator. Nos motores, a aplicação de uma f.e.m. ao estator provoca o movimento de rotação do rotor.

Costumam também utilizar-se os termos **indutor** e **induzido** para representar a causa e o efeito, respectivamente, de um gerador ou de um motor. No caso dos motores, o indutor é o estator, provocando uma força de rotação induzida no rotor (sendo este o induzido).

Na figura seguinte podem observar-se o estator e o rotor de um motor de corrente contínua de um “Carro Eléctrico” do Porto ([6]). O estator funciona como indutor e o rotor com induzido:

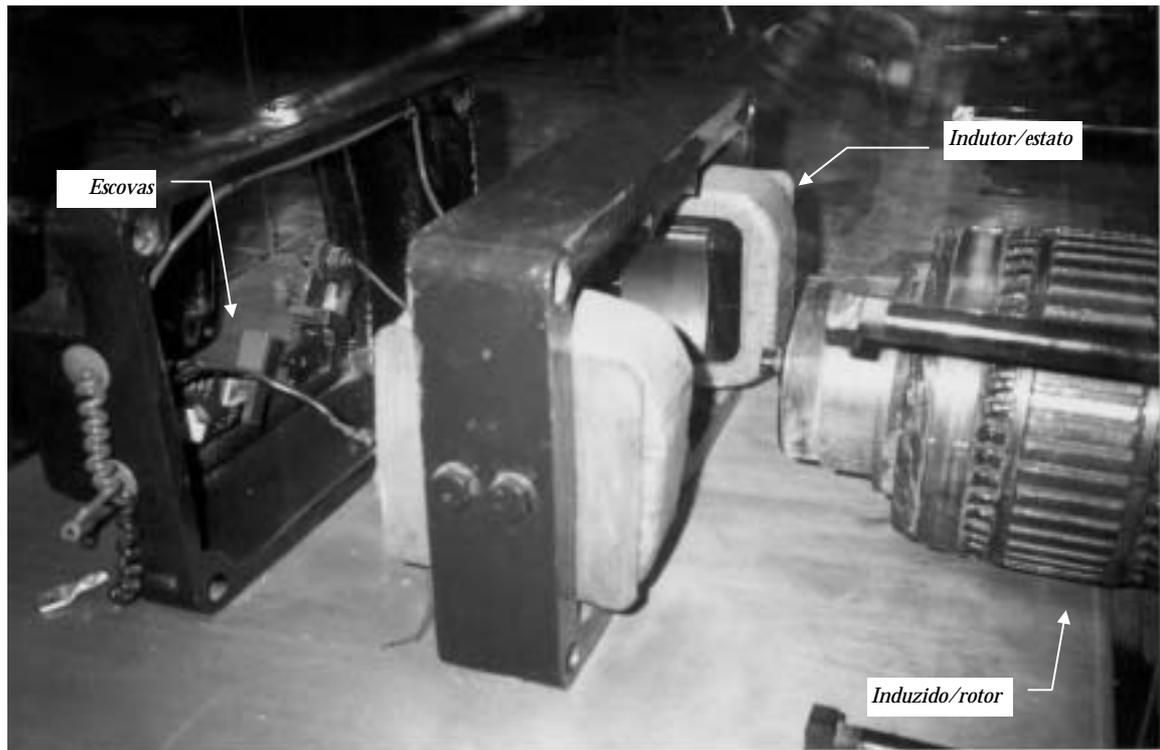


Figura 33: Motor de "Carro Eléctrico" (desmontado)

Para os geradores, o estator é normalmente onde é induzida a f.e.m., por movimento do rotor (indutor):

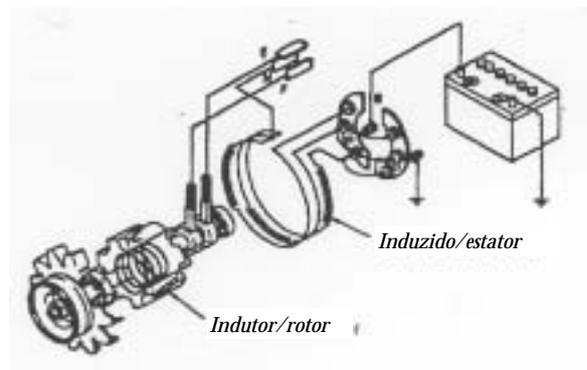


Figura 34: Estrutura básica do alternador de um automóvel (1)

No caso do transformador, pode considerar-se o primário como o indutor e o secundário como o induzido.

### 5.3. Sincronismo e Número de Pólos

Todas as máquinas rotativas de corrente alternada têm uma relação entre a frequência da tensão de alimentação e a sua velocidade de rotação. Porém, as máquinas síncronas possuem uma velocidade de rotação fixa, que está relacionada, de uma forma rígida, com aquela frequência. Essa relação é dada pela equação:

$$f = p.n$$

em que  $f$  é a frequência,  $n$  é a velocidade de rotação (em rotações por segundo) e  $p$  é o número de pares de pólos da máquina.

Como o número de pares de pólos  $p$  é constante para uma dada máquina, verificamos que a velocidade de rotação  $n$  depende directamente da frequência  $f$  da f.e.m. de alimentação.

#### 5.4. Perdas e Rendimento

A potência útil é igual à potência absorvida menos as perdas. O rendimento  $\eta$  é definido como a potência útil  $P_u$  a dividir pela potência absorvida  $P_a$ :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a}$$

As perdas poderão ser as seguintes:

- **Perdas Eléctricas**

Perdas por *Efeito de Joule* nos enrolamentos - os condutores das bobinas têm uma resistência não nula, logo, a passagem de corrente vai provocar perdas caloríficas.

⇒ Escolher materiais de baixas resistividades

Limitar o comprimento dos condutores

Aumentar a secção dos condutores

Limitar a intensidade da corrente

- **Perdas Magnéticas**

Perdas inerentes ao meio ferromagnético - perdas por *Correntes de Foucault*, perdas histeréticas, perdas por fluxo de fugas, etc.

⇒ Escolher materiais com boas características ferromagnéticas

Escolher materiais com elevada resistividade (ferro com 3% de silício)

Laminar os núcleos ferromagnéticos (lâminas finas e isoladas entre si)

- **Perdas Mecânicas** (apenas para as máquinas rotativas)

Perdas por Atrito - perdas por atrito nos apoios e rolamentos.

⇒ Boa manutenção - rolamentos e lubrificação

Perdas por Arrastamento - as peças móveis em rotação provocam um arrastamento do meio envolvente (ar), produzindo um binário resistente.

Pretende-se que o rendimento de uma máquina seja o mais próximo possível da unidade (100%). A maioria das máquinas eléctricas tem um rendimento superior a 80%.

## 5.5. Características Nominais

As características nominais de uma máquina eléctrica representam valores de determinadas grandezas para os quais a máquina foi concebida para trabalhar. Dentro dos mais usuais podem destacar-se:

- **Tensão Nominal**

Valor de tensão que se supõe existir entre os terminais de uma dada máquina aquando do seu projecto.

- **Corrente Nominal**

Corrente que percorre a máquina, cuja existência é prevista no projecto e que pode ser suportada sem problemas.

- **Velocidade Nominal**

Velocidade alcançada quando a máquina é percorrida pela corrente nominal.

- **Carga**

Em Vazio - quando a potência útil (eléctrica ou mecânica) é nula

Plena Carga - quando a potência útil é a nominal

- **Binário**

Motor - binário desenvolvido pela máquina (rotativa)

Resistente - binário que a carga impõe à máquina (rotativa)

Nota: Se os dois binários não forem iguais, aparece uma aceleração angular proporcional.

## 6. MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA

### 6.1. Algumas Considerações

Na prática, enquanto os pequenos motores utilizam um íman permanente (ou magneto) para produzir o campo, em motores de maior potência o campo é produzido recorrendo a um electroímã.

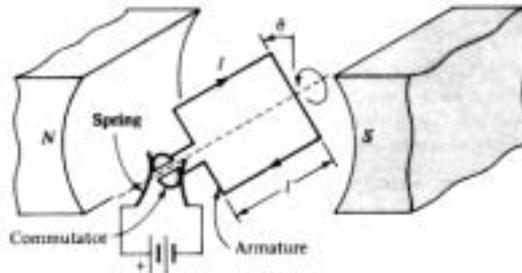


Figura 35: Princípio de funcionamento de um motor de corrente contínua

O rotor é ligado a um comutador (colector) que está dividido em dois semi-anéis (segmentos de colector). O propósito do comutador é o de inverter a corrente na apropriada fase de rotação de forma a que o binário desenvolvido seja sempre na mesma direcção. A corrente é fornecida, recorrendo a uma bateria, aos segmentos de colector, recorrendo a um par de escovas que estão encostadas ao colector por intermédio de molas.

O binário fornecido pelo motor vai ser proporcional à corrente no rotor, ao campo magnético e ao seno do ângulo entre os dois. Desta forma quando o ângulo entre a corrente e o campo é zero o motor fica momentaneamente sem binário sendo a inércia a responsável pela continuação do movimento.

### 6.2. Motor de excitação separada (derivação)

Estes motores têm a particularidade de ter uma **velocidade pouco variável com a carga**. Esta propriedade torna-os adequados para o accionamento de máquinas. A figura seguinte apresenta o seu esquema:

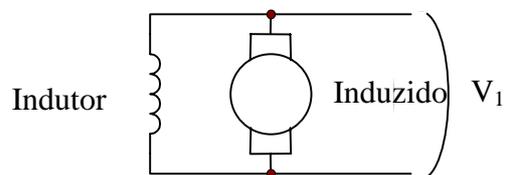


Figura 36: Esquema eléctrico do motor de excitação separada

A f.e.m. desenvolvida pela máquina é

$$E = K\phi\omega$$

Esta f.e.m. como tem o sinal contrário à passagem da corrente, recebe o nome de força contra electromotriz. Esta f.e.m. é de baixo valor no arranque do motor, e para prevenir uma alta corrente no induzido é usual a colocação de uma resistência variável em série.

O valor da resistência vai diminuindo à medida que a velocidade aumenta implicando um aumento da f.e.m. logo uma diminuição da corrente.

O indutor irá produzir um campo magnético, pois existe uma corrente a atravessá-lo. Se no induzido passar uma corrente aparecerá uma força ou binário dado por:

$$VI = T\omega$$

Em que V é a tensão induzida no induzido e I a corrente que o percorre.

A potência mecânica é por definição

$$P_m = T\omega$$

A potência eléctrica é por definição

$$P_e = VI + P_f$$

Em que  $P_f$  é a potência do indutor. O rendimento é neste caso:

$$\eta = \frac{P_m}{P_e} = \frac{T\omega}{VI + P_f}$$

### 6.2.1. Variação da velocidade com a carga

Como a equação do induzido é:

$$V = k\phi\omega + R_l I$$

Em que  $R_l$  é a resistência do induzido Obtemos uma relação entre a velocidade e a corrente que expressa graficamente

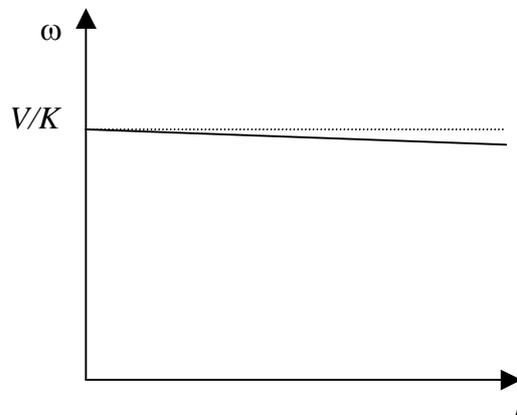


Figura 37: Variação da velocidade com a carga

Nesta situação a velocidade varia pouco com a carga do motor. Para se poder variar a velocidade pode colocar-se uma resistência em série com o indutor ou utilizar um dispositivo electrónico de controlo. Para se inverter a marcha basta trocar as ligações num dos enrolamento.

### 6.3. Motor de excitação série

O seu esquema de montagem é o seguinte:

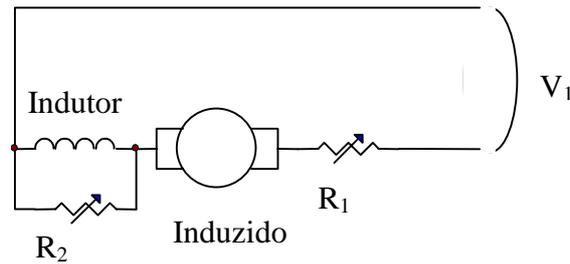


Figura 38: Esquema eléctrico do motor série

O motor série é utilizado em potências não muito baixas e necessita também à semelhança do motor anterior de ser equipado com uma resistência variável de arranque colocado em série com o respectivo induzido ( $R_1$ ). O ajuste de velocidade consegue-se com uma outra resistência colocada em paralelo com a bobina indutora ( $R_2$ ).

Um motor série é capaz de operar em corrente contínua ou alternada. Esta razão leva a denomina-lo de motor universal. Esta universalidade deve-se ao facto de como o indutor e o induzido se encontrarem em série uma inversão na corrente resulta em uma inversão no fluxo, esta dupla inversão mantém o binário constante. Esta característica torna-o ideal para os electrodomésticos.

### 6.4. Dinâmica do movimento num motor DC

Suponha-se um motor de excitação separada

A equação do induzido é

$$V_a = E + R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt}$$

A equação do movimento

$$E = K I_f \omega_m$$

A equação do indutor

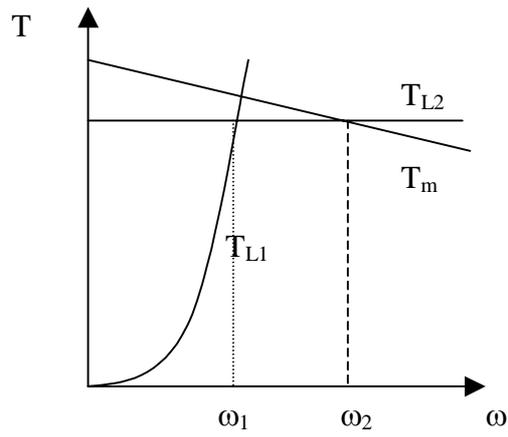
$$V_f = I_f R_f + L_f \frac{dI_f}{dt}$$

A equação mecânica é:

$$T_m = T_l + D\omega_m + J \frac{d\omega_m}{dt}$$

Em que  $T_m$  é o binário motor,  $T_l$  o binário resistente,  $D$  a viscosidade,  $J$  o momento de inércia.

Verifique-se o funcionamento do motor. O arranque do motor só é possível se  $T_M$  for superior a  $T_L + D\omega_M$ . Nesta situação o motor irá acelerar, até que  $T_M$  seja superior ao somatório da direita. Neste ponto o motor fixa a sua velocidade. Note-se a seguinte figura numa situação em que o  $D=J=0$ .

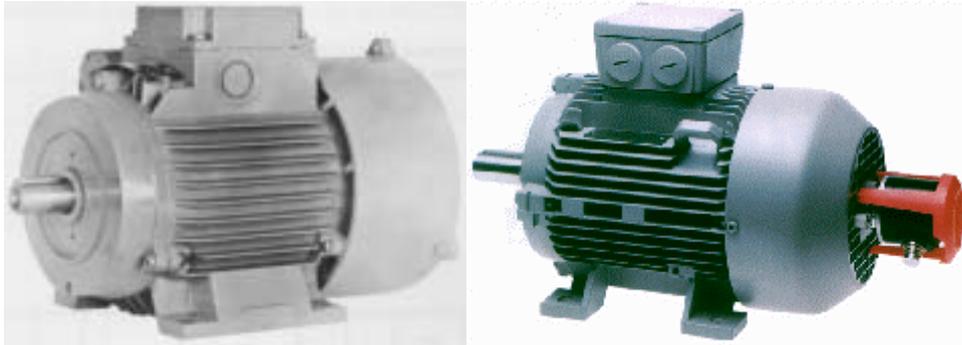


*Figura 39: Calculo do ponto de funcionamento de um motor de excitação separada*

O motor irá estabilizar para um binário de carga  $T_{L1}$ ,  $T_{L2}$  em  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  respectivamente.

## 7. MOTOR DE INDUÇÃO

O motor eléctrico mais utilizado, em termos globais é, sem sombra de dúvida, o motor assíncrono trifásico, mais conhecido como **motor de indução** (*Figura 40*).



*Figura 40: Motores de indução*

O termo **assíncrono** utiliza-se pois a velocidade de rotação do rotor não é igual à velocidade de rotação do campo girante criado pelo estator, isto é, o movimento do rotor não é síncrono com o movimento do campo girante do estator.

O termo **indução** utiliza-se pois o movimento de rotação do rotor é o resultado do aparecimento de f.e.ms. induzidas no rotor.

### 7.1. Princípio de Funcionamento

#### **Campo Girante**

O motor de indução é um motor que baseia o seu princípio de funcionamento na criação de um campo magnético rotativo. A partir da aplicação de tensão alternada (trifásica, usualmente) no estator, consegue produzir-se um campo magnético rotativo - **campo girante** - que atravessa os condutores do rotor. Este campo magnético variável induz no rotor f.e.ms. que, por sua vez, criam o seu próprio campo magnético girante. Este campo magnético girante criado pelo rotor, ao tender a alinhar-se com o campo girante do estator, produz um movimento de rotação no rotor.

A velocidade de rotação do rotor é ligeiramente inferior à velocidade de rotação do campo girante do estator, não estando por isso o rotor sincronizado com esse campo girante.

## Estatore e Rotor

Este motor tem um **estator** do tipo do alternador (já abordado) e que constitui o **indutor**. O **rotor**, que será o **induzido**, pode apresentar-se de duas formas:

- **Rotor em Curto-Circuito (ou em Gaiola de Esquilo)**

O enrolamento do rotor consiste em barras condutoras dispostas ao longo do rotor e em todo o seu perímetro, curto-circuitadas nas extremidades por anéis condutores. Utiliza-se o termo Gaiola de Esquilo pois o rotor assemelha-se às gaiolas em que os esquilos brincam, quando em cativeiro. Estas barras são geralmente de alumínio mas podem também ser de cobre ou outro condutor. Este **é o motor mais comum** hoje em dia pois tem diversas vantagens relativamente ao motor de rotor bobinado e aos motores de corrente contínua, nomeadamente o facto de **não ter anéis colectores nem escovas**.

- Rotor Bobinado

O enrolamento do rotor é similar ao enrolamento do estator. Este tipo de motor tem também anéis colectores e escovas que, ao conduzirem a corrente gerada no rotor para o exterior, permitem, através de resistências variáveis, limitar a corrente no arranque e controlar a velocidade de rotação do motor.

O aparecimento dos conversores electrónicos de potência veio permitir controlar o arranque e a velocidade do motor mais simples - o motor de indução com rotor em curto-circuito. Desta forma, consegue evitar-se em muitos casos a utilização do motor de indução de rotor bobinado e do motor síncrono.

O rotor em curto-circuito (gaiola de esquilo) tem o seguinte aspecto:

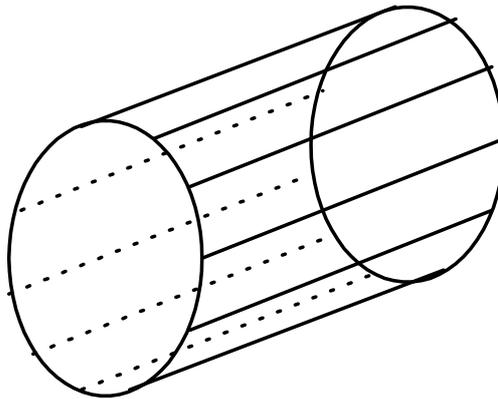


Figura 41: Rotor em gaiola de esquilo ou em curto-circuito ([5])

Na figura seguinte visualizam-se as várias componentes que podem constituir um motor de indução de rotor em curto-circuito, nomeadamente o estator e o rotor:

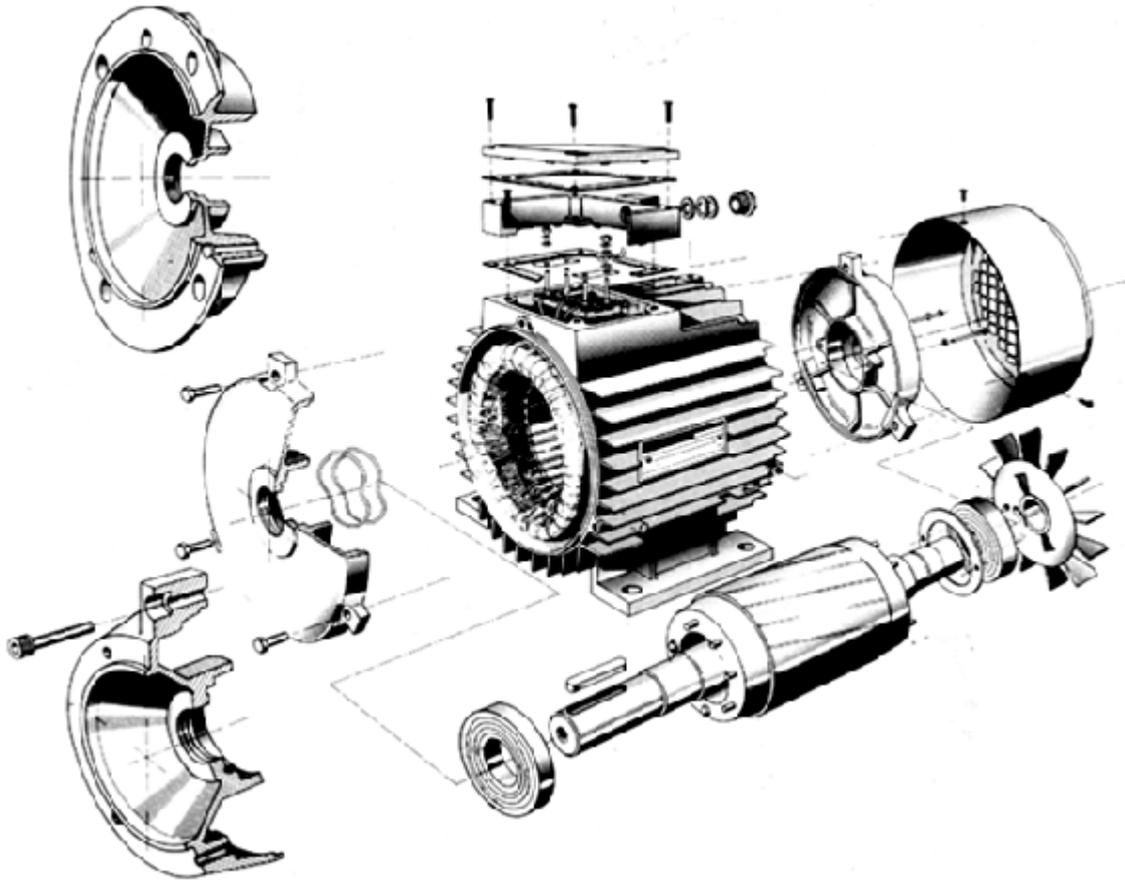


Figura 42: Constituição interna de um motor de indução ([5])

### Número de Pólos, Velocidade de Sincronismo

As bobinas do estator estão dispostas de tal forma, que o campo magnético criado gira ao longo do estator. A velocidade de rotação do campo girante é constante e é denominada velocidade de sincronismo. Se o rotor girasse síncrono com o campo, a sua velocidade seria:

$$n = \frac{120f}{p} \text{ (rpm)}$$

em que **f** é a frequência da tensão de alimentação e **p** é o número de pólos do motor.

Da expressão anterior, quanto maior for o número de pólos magnéticos (sempre em número par) - **p**, tanto menor será a frequência do campo girante, diminuindo por isso a velocidade de sincronismo - **n**.

Deduz-se então que a maior velocidade possível de atingir com um motor de indução, alimentado por uma fonte trifásica de 50 Hz é de 3000 rpm, pois o menor número possível de pólos é 2.

É possível arranjar os enrolamentos do estator de modo a obter motores de 2, 4, 6, 8, 10, 12 pólos, etc. Motores de mais de 12 pólos não são normalmente utilizados:

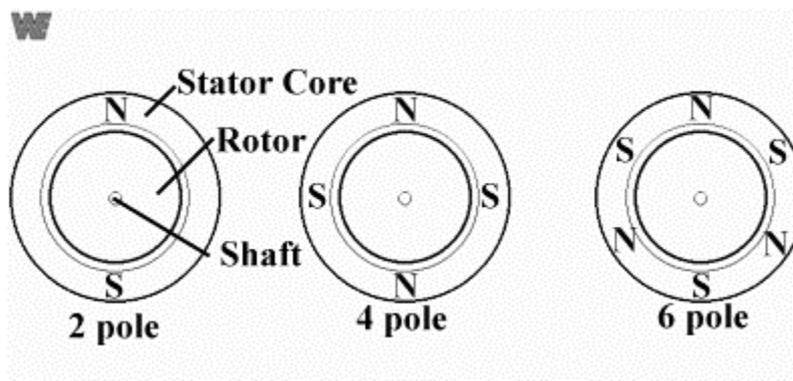


Figura 43: Localização dos pólos de um motor de indução ([5])

### Deslizamento

Num motor de indução, a velocidade de rotação do rotor é diferente da velocidade de sincronismo. Este facto deve-se a que tem de existir uma diferença de velocidades entre o rotor e o campo girante do estator. Se o rotor girar à mesma velocidade do campo girante, deixaria de existir movimento relativo, deixando de existir correntes induzidas no rotor, o que implicaria a não existência de força (binário) induzida no rotor.

A esta diferença de velocidades dá-se o nome de **deslizamento - s** (ou escorregamento) e pode ser calculado por:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \times 100\%$$

em que  $n_s$  é a velocidade de sincronismo e  $n$  é a velocidade de rotação do rotor.

O deslizamento do motor dependerá de:

- Perdas mecânicas por atrito (apoios e rolamentos) e arrastamento (ar)
- Carga imposta

Quando o motor roda em vazio, o deslizamento é muito pequeno, pois o binário necessário é mínimo (apenas o suficiente para suportar as perdas mecânicas). À medida que o pedido de carga vai aumentando, o deslizamento vai aumentando, até que no limite o binário (resistente) é tanto que o motor não roda e  $s = 1$ .

Quando maior o motor, menos deslizamento ele tem. Valores típicos para o deslizamento são da ordem de 0.5% em vazio e entre 3% a 5% à sua carga nominal (plena carga), dependendo do tipo de motor. Para dar uma ideia das velocidades envolvidas, apresenta-se a seguinte tabela para um deslizamento de 5% à plena carga:

Nº de Pólos	Velocidade de Sincronismo	Velocidade à Plena Carga
2	3000	2850
4	1500	1375
6	1000	950

## Rendimento

É também muito importante referir que **o deslizamento está intimamente relacionado com o rendimento** do motor. De facto, quanto maior o deslizamento, maiores as perdas, sendo menor o rendimento do motor. O deslizamento à plena carga dá uma ideia do rendimento do motor ( $\eta \leq 100\% - s$ ).

O rendimento de um motor é tanto maior quanto maior a sua potência (o deslizamento diminui com a potência). Valores típicos de rendimento para motores de indução trifásicos de rotor em curto-circuito são de 80% para um motor de 0.75 kW, 95% para potências de 100 kW e mais de 98% para motores de grandes potências.

Obviamente que quanto mais a velocidade de rotação se aproximar da velocidade de sincronismo, melhor será o rendimento do motor (menor é o deslizamento).

## Binário

O binário motor à plena carga pode ser conhecido, se forem conhecidas a potência e a velocidade à plena carga, pela seguinte expressão:

$$T = \frac{P}{n} \times 9550$$

em que a unidade do binário **T** é o Newton.Metro (**N.m**), a unidade da potência **P** é o KiloWatt (**KW**) e a unidade da velocidade de rotação **n** é rotações por minuto (**rpm**).

Quando o motor roda à plena carga, o binário desenvolvido pelo motor será igual ao binário necessário para manter a carga a rodar àquela velocidade.

Durante o arranque, contudo, o binário desenvolvido pelo motor terá de ser superior ao imposto pela carga, caso contrário o motor não acelera.

## 7.2. Arranque

A maior parte dos motores de indução são suficientemente robustos para arrancarem directamente da rede, isto é, acelerarem a carga desde parado até à velocidade nominal, estando aplicada a tensão nominal. No entanto, durante a fase inicial de arranque, o **arranque directo** implica um consumo de corrente **cinco a sete vezes superior à corrente nominal** do motor.

A elevada corrente no arranque directo poderá ter efeitos nocivos:

- Para o motor
  - O excesso de corrente causa sobreaquecimento, podendo deteriorar os isolamentos.
- Para a instalação eléctrica.
  - Ou é dimensionada para estes valores de corrente, ou poderão “disparar” os dispositivos de protecção (relês ou fusíveis). Uma apreciável queda de tensão na linha poderá afectar o funcionamento de outros equipamentos alimentados pela mesma linha.

Poderão então existir casos em que é necessário um **método de arranque alternativo**, baseando-se todos na redução da tensão de alimentação:

- **Arranque por reóstato**

Uma resistência variável é introduzida em série com o enrolamento do estator. Método antieconómico, devido às perdas por *Efeito de Joule* no reóstato.

- **Arranque por transformador ou autotransformador**

É utilizado um transformador ou um autotransformador trifásico para auxiliar o arranque por variação da tensão de alimentação. Dispendioso, dado o preço do transformador.

- **Arranque estrela-triângulo**

Um comutador liga o estator em estrela, inicialmente e, após uma certa velocidade, comuta a ligação para triângulo, aumentando a tensão aplicada a cada um dos enrolamentos. Antes da utilização dos conversores electrónicos era o método de arranque mais comum.

- **Arranque por conversor electrónico de potência**

O mesmo equipamento de controlo controla a velocidade e o arranque do motor.

Os motores de rotor bobinado tem também a possibilidade de poderem ser arrancados (e controlar a velocidade) por introdução de uma resistência rotórica, na fase de arranque.

### 7.3. Controlo de Velocidade

O controlo de velocidade dos motores de indução (de rotor em curto-circuito) poderá ser efectuado por diversos métodos:

- **Variação do número de pólos (do estator)**

Neste método, os enrolamentos do estator são projectados de forma que, alterando as ligações das bobinas, o número de pólos possa ser alterado nas relações 2:1, 4:1, etc. Recapitulando que a velocidade de sincronismo pode ser calculada por:

$$n = \frac{120f}{p} \text{ (rpm)}$$

podem obter-se várias velocidades. Apesar de ser um **método robusto e eficiente**, tem as desvantagens de só se poderem obter **velocidades discretas** e de que o **estator é mais complexo**, aumentando o custo do motor.

- **Variação da frequência**

Ao observar a expressão da velocidade de sincronismo, verifica-se que esta é proporcional à frequência da tensão de alimentação. Para a tensão da rede eléctrica nacional, esta frequência é fixa (50 Hz), exigindo um dispositivo electrónico que forneça uma tensão com frequência variável -

um conversor electrónico de potência. Estes dispositivos normalmente fornecem uma tensão proporcional à variação da frequência por forma a manter o binário constante.

Com a ajuda de um inversor (conversor CC/CA) é também possível obter uma tensão/frequência variável a partir de uma fonte de alimentação contínua, como é o caso das baterias dos automóveis eléctricos, permitindo assim a utilização de um motor de indução num automóvel.

- **Variação da tensão de alimentação**

A variação da tensão de alimentação poderá ser feita por um **autotransformador** ou por um **conversor electrónico de potência**. Sendo o binário motor proporcional ao quadrado da tensão aplicada, variando a tensão varia-se o binário disponível, logo a velocidade vai ser diferente. Este facto encontra-se descrito na figura seguinte. O motor ao ser alimentado por duas tensões ( $V_1, V_2$ ) desenvolve duas curvas de binário ( $T_{M1}, T_{M2}$ ). A intercepção das curvas com a carga dá o ponto de funcionamento do motor, o que corresponde a duas velocidades diferentes ( $N_1, N_2$ ):

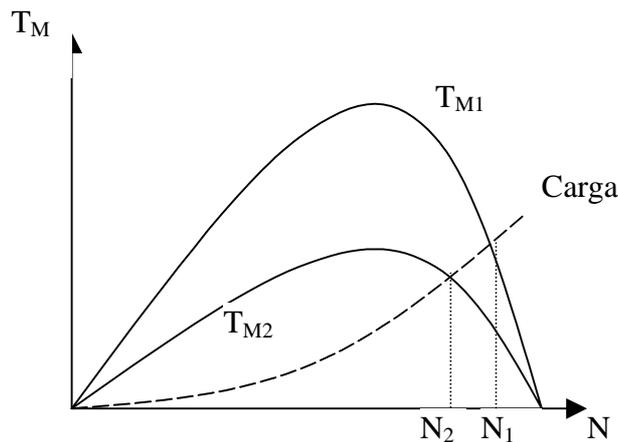


Figura 44: Variação da velocidade por variação da tensão

- **Variação da tensão e da frequência de alimentação**

Os sistemas modernos de controlo de velocidade baseados em conversores electrónicos de potência permitem controlar ao mesmo tempo a tensão e a frequência de alimentação, permitindo um **mais adequado arranque e controlo de velocidade** dos motores de indução.

#### 7.4. Travagem Regenerativa

Embora possa parecer estranho à primeira vista, o motor de indução de rotor em curto-circuito pode também funcionar como um gerador, mesmo sabendo que o rotor não recebe qualquer energia eléctrica do exterior. Este fenómeno acontece pois, mesmo deixando de alimentar os enrolamentos do estator (caso da travagem), existe um **magnetismo remanescente** (campo magnético que permanece no núcleo

ferromagnético do rotor) que, dado que o rotor está em rotação, induz uma f.e.m. nos enrolamentos do estator. O aparecimento desta f.e.m. faz com que o motor passe a fornecer energia ao sistema que antes lhe fornecia (carregando as baterias no caso dos automóveis ou dando energia à rede no caso de outros veículos ligados à rede eléctrica).

A f.e.m. induzida no estator é proporcional à velocidade de rotação do motor. Com a diminuição da velocidade, diminui o valor desta f.e.m., diminuindo o binário de travagem. Por este motivo, na fase final da travagem regenerativa **é necessário ajudar esta “travagem eléctrica” com uma travagem mecânica.**

### 7.5. Aplicação em Veículos - Automóvel Eléctrico (EV1)

O aparecimento dos conversores electrónicos de potência levou ao aparecimento dos motores de indução na tracção eléctrica de veículos de transporte. Este tipo de motor eléctrico tem algumas vantagens relativamente aos outros tipos, quer ao motor de corrente contínua quer ao motor síncrono, nomeadamente:

- É **simples e robusto** e está praticamente isento de manutenção pois não tem escovas para inspeccionar ou para substituir, possuindo uma **fiabilidade elevada**.
- Para a mesma potência é **menos volumoso e pesado** e tem **grande capacidade de suportar sobrecargas**.
- A ausência de anéis colectores (caso do motor síncrono) ou de segmentos de colector (motor de corrente contínua) permite uma **velocidade de rotação mais elevada**.
- Por simples troca de duas fases permite efectuar a inversão de marcha, o **que reduz a complexidade da aparelhagem de controlo**.
- Toleram bem **ambientes severos e fortes vibrações**, dado que não tem contactos deslizantes na parte rotórica da máquina.
- Pode **integrar-se directamente no sistema de transmissão mecânico**, pois é um motor robusto e fiável.

O exemplo aqui dado revela um dos mais recentes automóveis eléctricos, já em comercialização nos EUA - o EV1 da General Motors. As suas especificações eléctricas são as seguintes ([9]):

- Motor

Tipo: motor de indução trifásico

Potência: 102 kW (137 cavalos) entre as 7000 e as 13000 rpm

Binário: 150 N.m, entre as 0 e as 7000 rpm

Aceleração 0-100 Km/h: 9 segundos (aproximadamente)

Velocidade máxima: 130 Km/h (limitada)

- Bateria

Tipo: Ácido-chumbo (26 módulos, 533 Kg)

F.e.m.: 26 módulos x 12 V = 312 V

Energia: 16.3 KW.h (53 A.h cada)

Autonomia: 125 Km (aproximadamente)

Carregador: Indutivo (3-4 h a 230 V)

- Controlador de Potência (Velocidade)

Tipo: Inversor trifásico (conversor de potência) baseado em 6 IGBT (transistor de potência)

Recuperação de energia na travagem (travagem regenerativa): permite ganhar até 15% em autonomia.

## 8. CONVERSORES ELECTRÓNICOS DE POTÊNCIA

Os conversores electrónicos de potência são sistemas baseados em dispositivos semicondutores de potência (díodos, transístores, tirístores) que permitem fazer transformações de energia eléctrica:

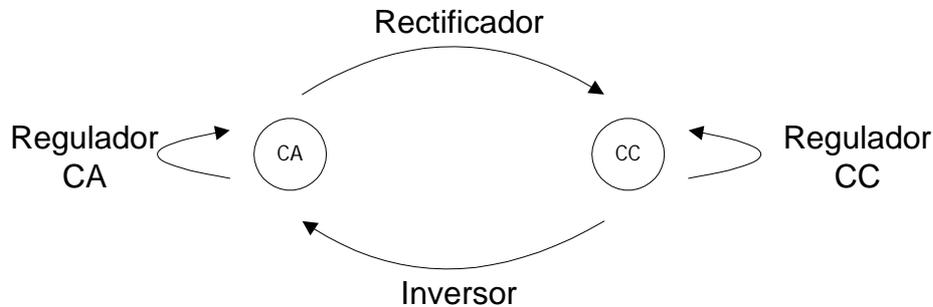


Figura 45: Tipos de conversores electrónicos de potência

Embora este tipo de conversores se aplique a uma vasta gama de aplicações, vai aqui dar-se mais ênfase às aplicações relacionadas com a engenharia de transportes, nomeadamente no controlo de velocidade de motores.

Cada um dos conversores electrónicos tem um equivalente electromecânico, isto é, é possível fazer a mesma conversão de energia eléctrica recorrendo a máquinas eléctricas. Antes de aparecerem os semicondutores de potência, a conversão de energia era feita através de agrupamentos de máquinas eléctricas. Assim, podemos ter as seguintes conversões electromecânicas de energia:

- Rectificação  
Motor CA + Gerador CC
- Inversão  
Motor CC + Gerador CA
- Regulação CC  
Motor CC + Gerador CC
- Regulação CA  
Motor CA + Gerador CA  
Transformador ou autotransformador (mesma frequência)

São inúmeras as vantagens dos conversores electrónicos de potência face aos seus equivalentes electromecânicos, nomeadamente:

- Perdas muito reduzidas
- Consumo muito reduzido
- Muito menor manutenção
- Tamanho e peso muito reduzido
- Custo muito menor

- Maior facilidade de controlo (de nível de tensão e de frequência)

### 8.1. Dispositivos Semicondutores de Potência

É a seguir feita uma descrição funcional dos diversos dispositivos semicondutores de potência utilizados nos conversores electrónicos de potência.

#### Díodos

Os díodos têm a característica fundamental de conduzirem a corrente num sentido e obstruírem a corrente em sentido contrário. Por não se poder controlar a sua condução/corte, o díodo é conhecido por **dispositivo não controlado**. À primeira vista parece que este dispositivo só permite a rectificação de corrente, com já foi referido no alternador. Na realidade, são a seguir descritas algumas outras funções dos díodos:

- Rectificação

A utilização dos díodos em ponte permite a rectificação de corrente alternada, tanto monofásica (2 ou 4 díodos), quer trifásica (3 ou 6 díodos). É o caso da “placa” de díodos do alternador, no sistema de carga do automóvel.

- Protecção

Um circuito onde a corrente deve circular apenas num determinado sentido e nunca em sentido contrário, pode ser protegido pela presença de um díodo. Por exemplo, o caso de um gerador em série com uma bateria, onde se pretende que a corrente possa passar do gerador para a bateria, mas nunca da bateria para o gerador. Utiliza-se um díodo em série, ligado entre o gerador e a bateria no sentido da bateria.

O díodo pode tanto servir para proteger um dado circuito com características indutivas, quando colocado em anti-paralelo com o elemento indutivo. Quando o circuito está ligado, o díodo não deixa passar corrente, comportando-se como um circuito aberto. Quando se interrompe o circuito, a f.c.e.m. que surge aos terminais do elemento indutivo vai descarregar-se pelo díodo, não aparecendo aos terminais do interruptor, evitando o aparecimento de um arco eléctrico (caso dos platinados).

- Regulação de Tensão

O díodo *Zener* comporta-se como um díodo normal quando polarizado directamente, mas a sua característica inversa permite-lhe conduzir a partir de um dado valor de tensão, chamado *Tensão de Zener*. Este fenómeno é utilizado em inúmeros sistemas electrónicos, dando como exemplo a utilização nos reguladores do sistema de carga do automóvel.

- Emissão de Luz

Os díodos emissores de luz (LED - Light Emitting Diode) funcionam como um díodo normal, com a funcionalidade adicional de emitirem luz quando conduzem. O seu baixo consumo e grande durabilidade leva a que

sejam preferidos às lâmpadas, em aplicações onde apenas uma luz indicadora é necessária, como é o caso dos painéis de instrumentos dos automóveis, por exemplo.

- Sensor de Luz

Os fotodíodos têm um funcionamento semelhante aos díodos Zener, só que a corrente inversa aumenta com o fluxo de luz. Aplicações no domínio automóvel incluem ignições electrónicas sem platinados e alarmes anti-roubo.

### Transístores e Tirístores

Os transístores e os tirístores são utilizados na maior parte dos conversores electrónicos de potência como relés electrónicos.

O funcionamento do **transístor** como relê já foi abordado quando se descreveu o funcionamento dos reguladores electrónicos. Basicamente, é possível controlar o corte/condução de uma corrente de grande potência com uma pequena corrente aplicada à base. É por isso denominado de **dispositivo totalmente controlado**.

O **tirístor** comporta-se como um diodo controlado, isto é, ele impede a passagem de corrente inversa, mas permite a passagem de corrente directa, desde que aplicado um impulso de tensão à sua porta. No entanto, o tirístor só deixa de conduzir quando a corrente se anula (excepto os GTO). Chama-se por isso um **dispositivo semi-controlado**. O tirístor é também conhecido como Diodo Rectificador Controlado de Silício (SCR - Silicon Controlled Rectifier). Por esta razão, o SCR é mais adequado para os conversores que têm como entrada sinais alternados (AC/DC ou AC/AC), pois a passagem da tensão por zero facilita a comutação (corte) do tirístor. O SCR utiliza-se, por exemplo, na regulação de tensão dos alternadores de ímans permanentes (em alguns motociclos).

Apresentam-se na tabela seguinte os tipos de transístores e tirístores mais utilizados nos conversores electrónicos de potência, bem como as suas características de consumo, velocidade e potência:

Dispositivo	Consumo	Velocidade	Potência
BJT (Bipolar Junction Transistor)	Médio	Média	Elevada ( $< 300$ A)
MOSFET (Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor)	Reduzido	Alta	Média ( $< 50$ A)
IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)	Reduzido	Média	Elevada
SCR - Silicon Controlled Rectifier	Elevado	Baixa	Muito elevada (mais de 400)

GTO (Gate-Turn-Off Thyristor)	Elevado	Baixa	A) Muito elevada
MCT (MOS-Controlled Thyristor)	Reduzido	Alta	Elevada

O **consumo** corresponde à energia consumida pelo circuito de comando e pela queda de tensão no elemento na passagem corte/condução e condução/corte. A **velocidade** representa a maior ou menor rapidez comutação (que influencia o consumo). A **potência** representa a maior ou menor potência suportada pelo dispositivo e que este consegue controlar.

Para evitar a utilização de dois tirístores na rectificação de onda completa, utiliza-se o *Triac (Triode AC Switch)*, constituído basicamente por dois tirístores em anti-paralelo. Este dispositivo tem larga aplicação nos reguladores de iluminação doméstica, conhecidos como *dimmers*.

Os objectivos a atingir quer nos tirístores quer nos transístores são:

- Rapidez de actuação (caracteriza a frequência de funcionamento máxima)
- Potência elevada (centenas de Ampère, centenas de Volt)
- Baixo consumo (perdas energéticas)

## 8.2. Conversores CA/CC - Rectificadores

A conversão de CA para CC poderá ser de onda completa ou de meia onda, consoante se utilizam as duas alternâncias ou apenas uma alternância da tensão alternada sinusoidal, respectivamente. Dependendo dos dispositivos semicondutores utilizados (diodos, transístores/tirístores), o rectificador poderá ter maior ou menor grau de controlo - rectificador totalmente controlado, semi-controlado ou não controlado. Estas variantes de sistemas rectificadores são descritas a seguir.

### Rectificação de Onda Completa

A rectificação chama-se de onda completa quando ambas as alternâncias (positivas e negativas) do sinal sinusoidal são rectificadas.

Os casos mais comuns de rectificação são os que têm como entrada sistemas monofásicos e trifásicos. No caso da rectificação de um sistema monofásico, são necessários quatro elementos semicondutores. Para rectificar um sistema trifásico, são necessários seis desses elementos.

Para um sistema monofásico à entrada, apresenta-se na *Figura 46* um rectificador não controlado de onda completa:

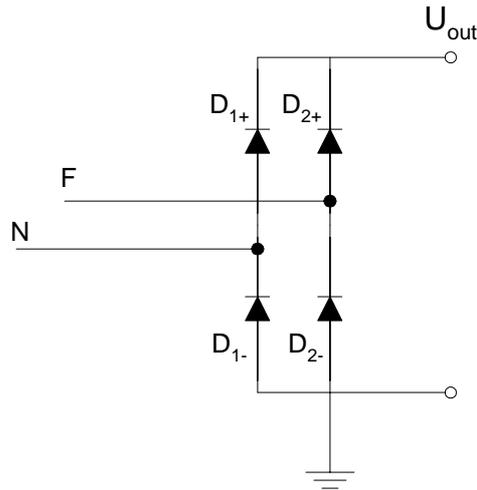


Figura 46: Rectificação monofásica de onda completa, não controlada

O formato das tensões de entrada e de saída serão do tipo:

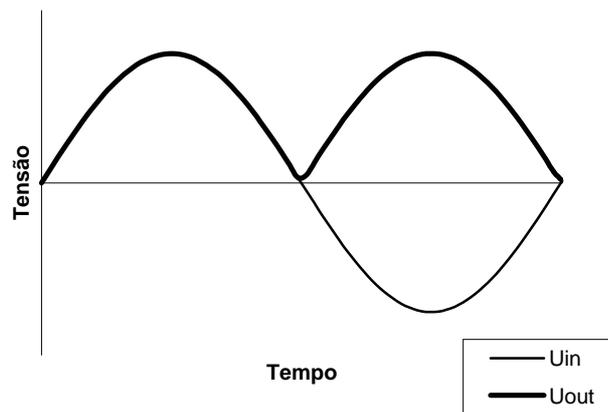


Figura 47: Formas da tensão de entrada e de saída

### Rectificação de Meia Onda

Em determinadas aplicações, nomeadamente aquelas que não envolvem potências muito elevadas, pode não ser necessária a rectificação de onda completa. Recorre-se então à rectificação de meia onda onde só metade das alternâncias são transmitidas à carga. Poupa-se assim na quantidade dos dispositivos semicondutores utilizados, bem como nos dispositivos auxiliares para protecção e comando desses semicondutores, no caso de estes serem controlados.

No caso da rectificação de um sistema monofásico, é suficiente apenas um elemento semicondutor. Para rectificar um sistema trifásico, são necessários três desses elementos.

Veja-se o exemplo da rectificação de meia onda, não controlada, para um sistema monofásico:

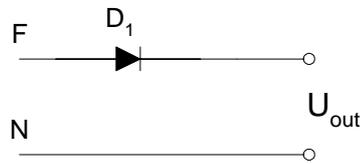


Figura 48: Rectificação monofásica de meia onda, não controlada

Em termos de sinais de entrada e de saída, o resultado é o seguinte:

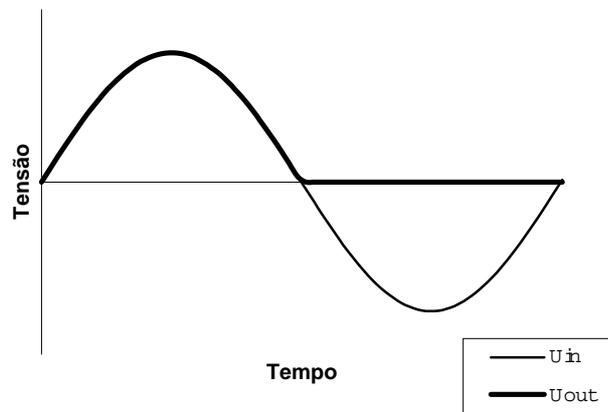


Figura 49: Formas da tensão de entrada e de saída

Obviamente que rectificação de meia onda tem a vantagem de utilizar menos componentes, resultando nomeadamente em menores custos iniciais, menores perdas energéticas, menor manutenção. No entanto, apenas metade da potência disponível é aproveitada e o sinal rectificado apresenta maiores oscilações (é menos constante), implicando que esta técnica poderá não ser adequada para determinadas aplicações.

A rectificação também poderá ser não controlada, controlada ou semi-controlada, consoante é ou não necessário controlar a potência do sinal rectificado. São a seguir descritos estes tipos de rectificadores

### Rectificadores Não Controlados

Os rectificadores totalmente baseados em díodos dizem-se não controlados pois não é possível controlar a entrada em condução destes dispositivos semicondutores. Os rectificadores não controlados têm duas limitações:

- É impossível controlar a potência do sinal rectificado
- A transformação é irreversível, isto é, não é possível a recuperação de energia (passar de contínua para alternada).

O caso já apresentado do sistema de carga da maior parte dos automóveis actuais, onde a carcaça do alternador incorpora uma “placa” de díodos é um exemplo de um rectificador trifásico não controlado.

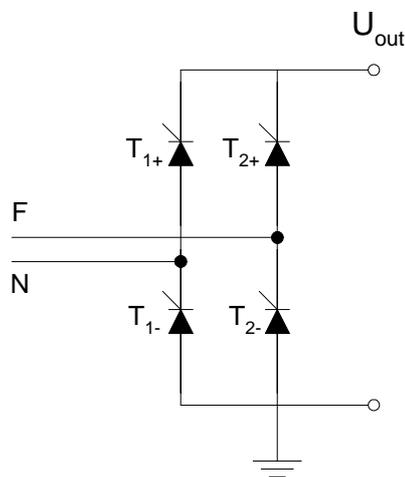
## Rectificadores Controlados (Totalmente)

Quando se torna necessário controlar a potência (nível de tensão) do sinal rectificado, é necessário incorporar dispositivos semicondutores controlados, tirístores ou transístores.

No caso dos sistemas de carga de alguns motociclos, por exemplo, o alternador tem excitação por íman permanente ([7]). Um alternador deste tipo impede que a regulação da tensão de saída seja feita regulando a alimentação da bobina de excitação, pois ela não existe (mas sim um íman permanente). Uma das soluções utilizadas é a recorrer a uma ponte rectificadora controlada, onde a regulação de tensão é feita através da colocação em condução/corte dos elementos semicondutores, de uma forma “inteligente”.

Para conseguir controlar a transmissão de potência tanto nas alternâncias positivas como negativas, todos os elementos semicondutores têm de ser controlados (tirístores/transístores).

Veja-se o exemplo da rectificação de onda completa, controlada, para um sistema monofásico:



*Figura 50: Rectificação monofásica de onda completa, totalmente controlada*

Os circuitos de comando dos semicondutores controlados (tirístores, neste caso) bem como os circuitos de auxílio à comutação, não representados na figura anterior, não se inserem no contexto desta disciplina.

Em termos dos sinais de entrada e de saída, o resultado depende do instante em que os tirístores entram em condução. A figura seguinte representa a saída de tensão para um ângulo de disparo de  $30^\circ$ :

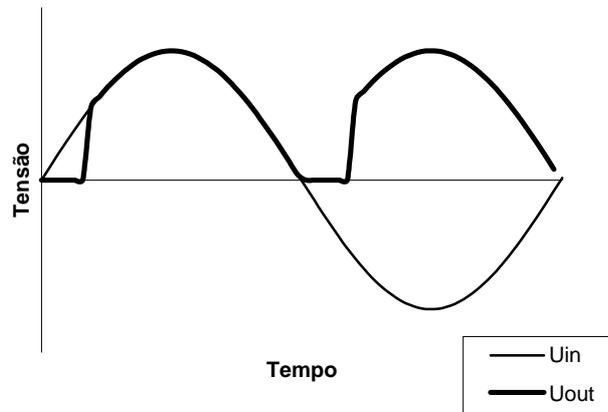


Figura 51: Formas da tensão de entrada e de saída - ângulo de  $30^\circ$

Se o ângulo de disparo for aumentado, a potência transmitida é menor. A figura seguinte representa a saída de tensão para um ângulo de disparo de  $90^\circ$ :

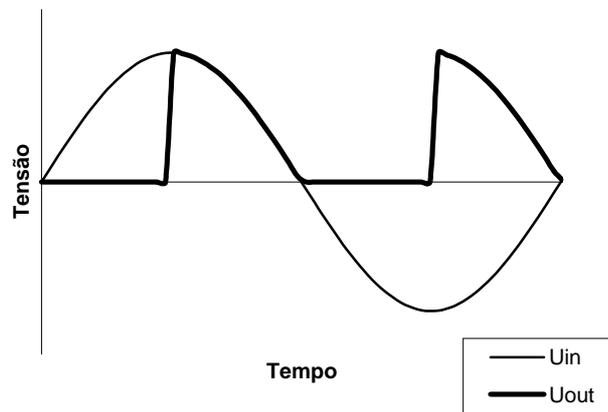


Figura 52: Formas da tensão de entrada e de saída - ângulo de  $90^\circ$

No caso limite, se os tirístores não forem disparados, eles nunca vão conduzir, levando a que a potência transmitida seja nula. É portanto possível controlar totalmente a potência do sinal rectificado, desde zero até ao valor máximo do sinal de entrada.

É possível a recuperação de energia por parte da fonte alternada, desde que o receptor seja indutivo (caso de um motor) e que o disparo dos dispositivos semicondutores seja feito a partir de um ângulo de  $90^\circ$ .

### Rectificadores Semi-Controlados

Nestes rectificadores, metade dos elementos semicondutores são tirístores ou transístores e a outra metade são díodos. É possível controlar apenas parcialmente a potência do sinal rectificado (metade das alternâncias).

### Aplicação em Veículos - Sistema de Carga no Automóvel

Um exemplo de um rectificador trifásico não controlado é o da maior parte dos sistemas de carga nos automóveis, onde existe uma ponte rectificadora com 6 díodos. No entanto, em alguns motociclos, o alternador tem a excitação por íman permanente [7, 8], o que inviabiliza a regulação da tensão por controlo da corrente de excitação do alternador. Uma possível solução é utilizar uma ponte rectificadora controlada, de modo a poder regular-se a tensão à saída do alternador.

### 8.3. Conversores CC/CA - Inversores

A partir de uma fonte CC é possível obter uma fonte CA com valores de frequência e tensão variáveis, através de uma ponte de tirístores/transístores. Os inversores podem classificar-se em:

- Inversores de onda quadrada (*choppers*)
- Inversores de Modulação de Largura de Impulsos (MLI)

consoante o sinal gerado à sua saída.

O conversor da Figura XX permite implementar tanto um inversor de onda quadrada como um inversor de MLI. Refira-se que a única diferença entre estes dois tipos de inversores é o modo como se comandam a interrupção/condução dos dispositivos semicondutores.

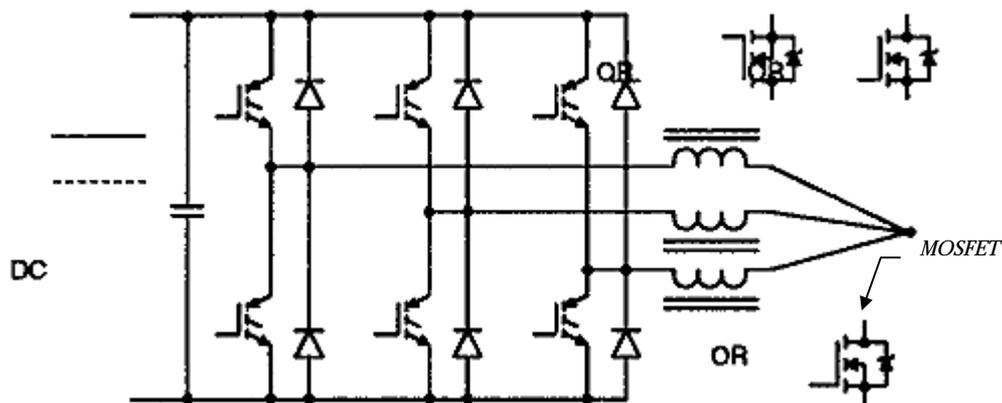


Figura 53: Inversor trifásico baseado em IGBTs

Em nenhum dos dois tipos de inversores o sinal de saída é alternado sinusoidal. A vantagem dos inversores MLI relativamente aos primeiros é que o sinal de MLI é muito mais fácil de “transformar” num sinal sinusoidal do que um sinal quadrado (filtragem muito mais simples).

Apresenta-se a seguir um exemplo de um sinal MLI (monofásico) bem como a sinusóide da sua frequência fundamental:

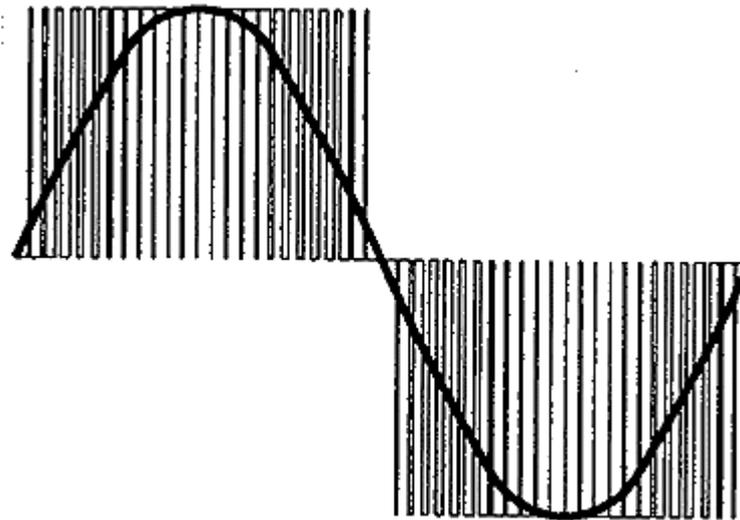


Figura 54: Forma de um sinal em Modulação de Largura de Impulsos

Um sinal MLI, apesar de não ser sinusoidal, pode ser facilmente transformado num sinal sinusoidal através de uma filtragem passa-baixo.

*Nota: A componente mais significativa de um sinal MLI é a frequência fundamental (a da sinusóide representada na figura atrás. A frequência mais próxima é muito mais atenuada e fica bastante “distante” da primeira (frequência de comutação é 10 vezes maior), também é visível na figura atrás. Portanto, é extremamente simples a filtragem passa-baixo do sinal MLI, de modo a obter um sinal sinusoidal. No caso de estarmos a controlar um motor, como ele é um receptor indutivo, ele vai conduzir melhor as frequências baixas do que as baixas ( $X_L = \omega.L$ ), comportando-se como um filtro passa-baixo. Portanto, a forma da tensão aplicada ao motor seja MLI, a corrente vai ser aproximadamente alternada sinusoidal, condição necessária e suficiente ao bom funcionamento do motor.*

### **Aplicação em Veículos - Controlador de Velocidade de Motor CA em Automóvel Eléctrico**

Foi já referido, no capítulo referente ao motor de indução, o exemplo do veículo eléctrico EV1, da General Motors. O controlo do motor de indução trifásico utilizado para a tracção é feito por um inversor trifásico baseado em 6 IGBT. Estes dispositivos têm de ser capazes de comutar 600 V, 750 A.

É também implementada a recuperação de energia na travagem (travagem regenerativa), que permite ganhar até 15% em autonomia.

Em [11] é dado um exemplo de um sistema típico de controlo de um motor de indução:

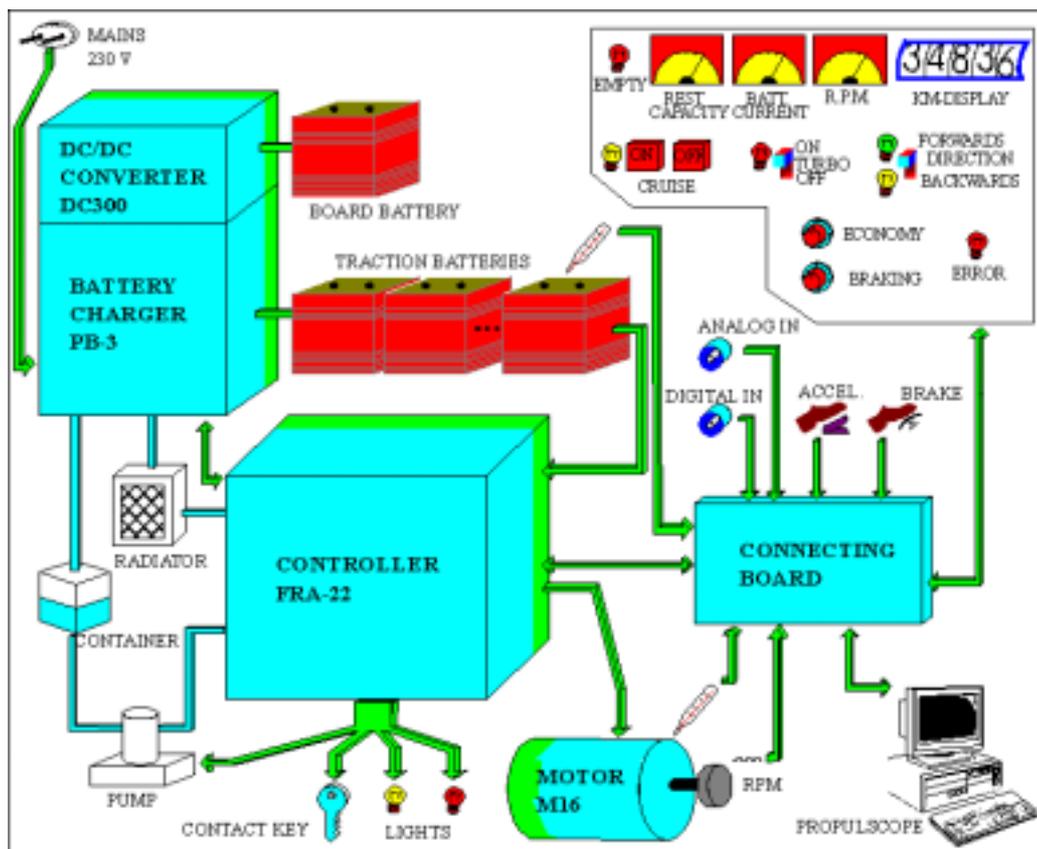


Figura 55: Sistema de controlo de motor com todos os componentes ([11])

O controlador (FRA-22) converte tensão contínua das baterias (total de 200 V) em tensão alternada trifásica adequada para o controlo de um motor de indução trifásico num veículo eléctrico. Também é sua função monitorizar e controlar o funcionamento da maior parte dos componentes periféricos deste sistema.

Por exemplo, o controlador monitoriza a temperatura das baterias, armazena informação sobre energias consumida e recuperada e calcula a capacidade restante das baterias. Este controlador também armazena separadamente a energia recuperada em travagens regenerativas ou em condução em descida.

A possibilidade de alterar determinados parâmetros do sistema (programáveis por *software*) alternando o comportamento do sistema de controlo, permite satisfazendo as especificidades de cada fabricante de veículos eléctricos.

#### 8.4. Conversores CC/CC - Reguladores CC

Um regulador CC, também denominado de *chopper* (cortador), funciona muito simplesmente interrompendo periodicamente a corrente fornecida por uma fonte CC.

Um circuito possível para implementar um regulador CC é o seguinte:

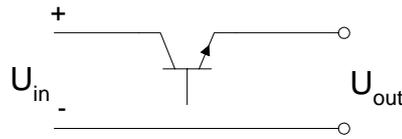


Figura 56: Regulador CC

Consegue controlar-se a potência transmitida variando o tempo em que o transistor está em condução. Isto é feito através da variação do *duty cycle*, isto é, da relação entre o tempo em que a ponte está em condução e o tempo em que está em não condução.

Na figura seguinte apresenta-se formas de onda exemplificativas da entrada e da saída de um regulador CC:

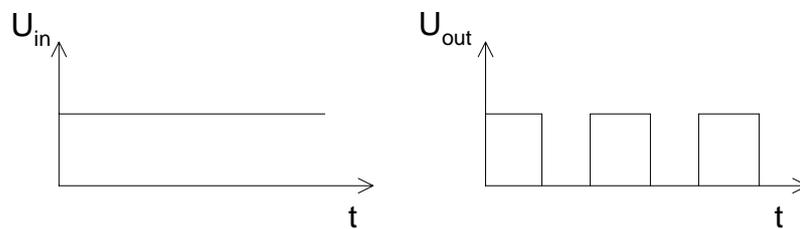


Figura 57: Exemplo de tensão de entrada e de saída do regulador

Desta forma, este regulador controla o valor médio da tensão de saída, desde um valor igual ao da tensão de entrada (nunca corta) até zero (nunca conduz).

### Aplicação em Veículos - Controlador de Velocidade de Motor CC em Automóvel Eléctrico

Um outro veículo eléctrico que deverá aparecer a qualquer momento nos circuitos comerciais é o Toyota RAV4-EV. Este, ao contrário do EV1, utiliza um motor CC de excitação por íman permanente:

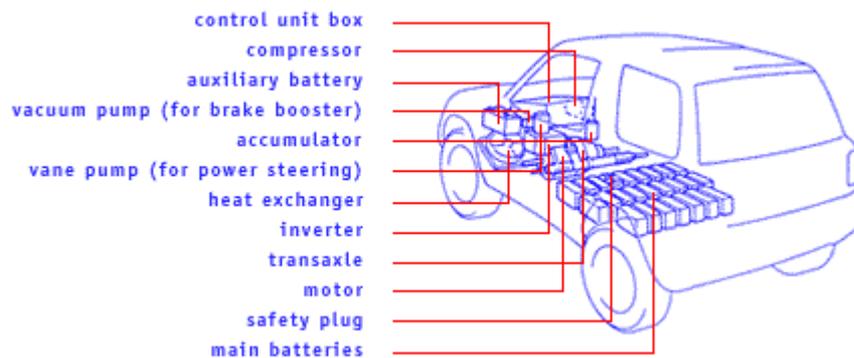


Figura 58: Componentes de um Toyota RAV4-EV

O tipo de regulador, tem de regular a tensão de saída das baterias (24 baterias de 12 V, correspondendo a 288 V) para controlar a velocidade do motor de 45 KW (60 cv). Este veículo também suporta recuperação de energia na travagem (travagem regenerativa).

## 8.5. Conversores CA/CA - Reguladores CA

A regulação de corrente alternada, pode ser efectuada de duas maneiras distintas consoante...

- se pretende variar apenas a potência
- se pretende variar a potência e a frequência

No primeiro caso, utiliza-se uma ponte de tirístores para efectuar uma ligação intermitente entre a fonte de CA e a carga (tipo Triac, no caso monofásico), conseguindo-se desta forma regular a potência fornecida à carga.

No segundo caso, o que se faz normalmente é primeiro efectuar uma rectificação (controlada ou não controlada) e depois uma inversão para os valores de potência e frequência pretendidos. Um exemplo de um conversor deste tipo, adequado ao controlo de um motor de indução trifásico por MLI, é o apresentado na figura seguinte:

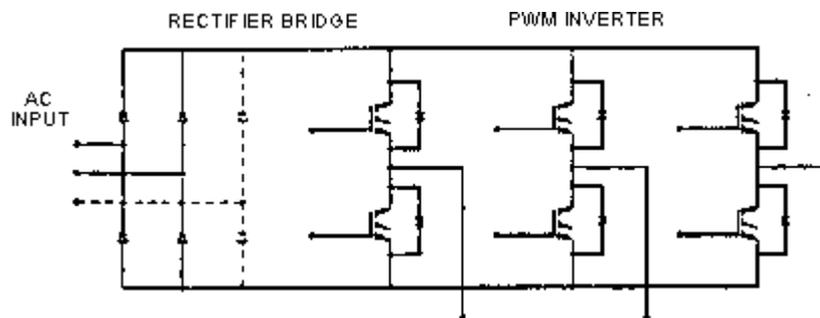


Figura 59: Regulador CA baseado em IGBTs

Normalmente entre a rectificação e a inversão é comum inserir-se um filtro passa-baixo para suavizar (tornar mais constante) a forma do sinal.

## Aplicação em Veículos - Controlador de Velocidade em TGV

Um excelente exemplo da aplicação de um conversor CA/CA à tracção eléctrica é o do TGV Atlantique 24000 (comboio de alta velocidade):

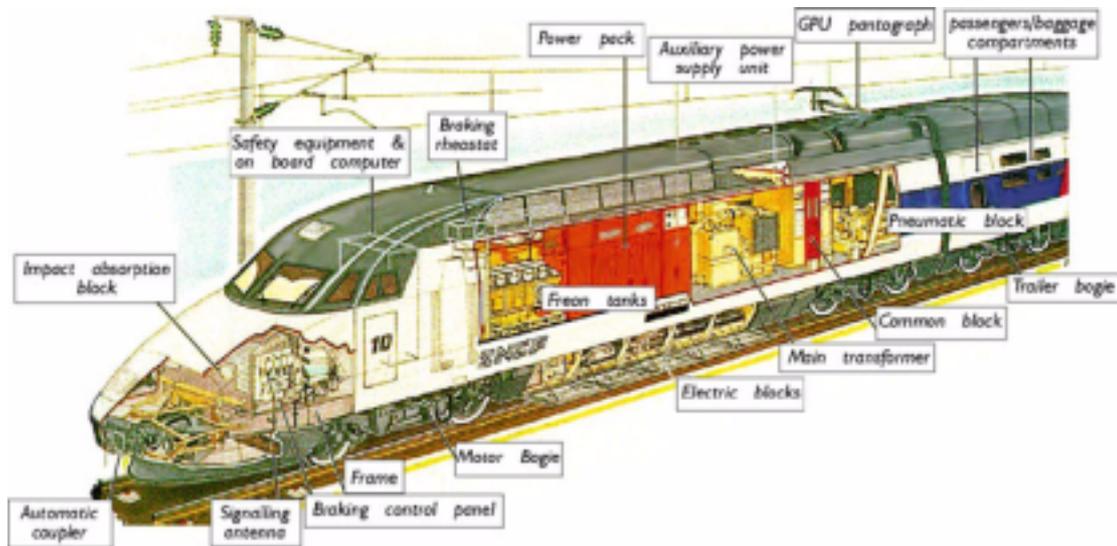


Figura 60: Componentes de um TGV (10)

Entre o pantógrafo (dispositivo de captação da energia que circula na linha aérea, mais conhecida como catenária) e os motores de tracção existe um sistema de electrónica de potência com o objectivo de controlar a corrente alternada sinusoidal monofásica da catenária de modo a poder variar a velocidade do comboio.

A cadeia de potência é constituída pelos seguintes módulos:

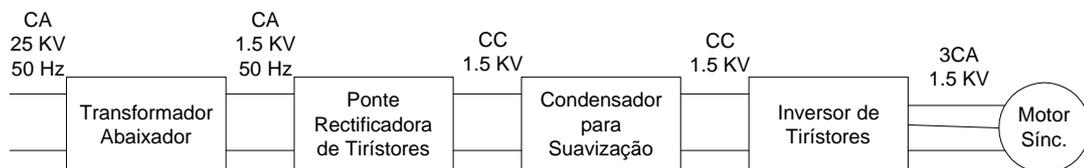


Figura 61: Módulos de potência de um TGV (10)

A tracção é conseguida através de dois motores síncronos trifásicos de 1100 KW (cada), com uma rotação máxima de 4000 rpm e um peso de 1440 Kg (cada). Todos os módulos excepto o transformador são em número de dois (um para cada motor). Cada unidade de potência pesa 68 toneladas!

## 9. REFERÊNCIAS

- [1] Toyota, *Módulo de Electromagnetismo*, Salvador Caetano - I.M.V.T. S.A., Portugal, 1995. 
- [2] Dorling Kidersley Multimedia, *Encyclopedia of Cience*, Dorling Kidersley Multimedia, United Kingdom, 1994-1995. 
- [3] Carlos Ferreira, *Máquinas Eléctricas II - Alternadores*, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal.  
- [4] Carlos Ferreira, *Máquinas Eléctricas I - Transformadores*, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal.  
- [5] Western Electric Australia, <http://www.westernelectric.com.au/Help/howdoes.html>, Australia, 1997.
- [6] S.T.C.P., *Motor de carro eléctrico (fotografia tirada pelo autor)*, Museu do Carro Eléctrico, Porto, Portugal, 1996. 
- [7] A. Tranter, *Manual de Electricidade das Motos*, Edições CETOP, Portugal, 1995. 
- [8] Miguel de Castro, *Manual do Alternador, Bateria e Motor de Arranque*, Plátano Edições Técnicas, Portugal, 1991. 
- [9] General Motors, <http://www.gmev.com/evsite/go/specs.htm>, EUA, 1997.
- [10] University of Pisa, <http://mercurio.iet.unipi.it/tgv/motrice.html>, Italy, 1997.
- [11] Propulse, <http://www2.arnes.si/~ljprop1/fra22det.html>, , 1997.

 - do autor

 - disponível no ISEP