

1 – GERADORES DE CORRENTE ALTERNADA

1.1 – PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DOS ALTERNADORES

O gerador de CA é o meio mais importante para a produção da energia elétrica que usamos atualmente. Como sabemos, a tensão CA é usada na maioria das aplicações, devido à facilidade com que o seu valor pode ser modificado com o auxílio de transformadores.

O tamanho dos geradores CA, ou alternadores, depende muito da energia que eles devem fornecer. Por exemplo, um dos 20 geradores existentes na usina hidrelétrica de Itaipu gera 700 MW (capacidade instalada = 14.000 MW). Por outro lado, os alternadores empregados nos modernos automóveis geram comumente menos de 500 W.

Entretanto, independentemente do tamanho, todos os geradores, sejam de CC ou de CA, dependem para seu funcionamento da ação de um condutor (ou bobina) cortando um campo magnético. Desde que haja movimento *relativo* entre um condutor e um campo magnético, será gerada uma tensão.

Como você sabe, para que exista a condição acima, todos os geradores são formados por duas partes mecânicas: um rotor (parte móvel – rotativa) e um estator (parte fixa – estática).

Os geradores elementares de CA e de CC têm o mesmo princípio de funcionamento, diferenciando-se apenas na forma como coletam a tensão induzida na armadura (que é sempre alternada).

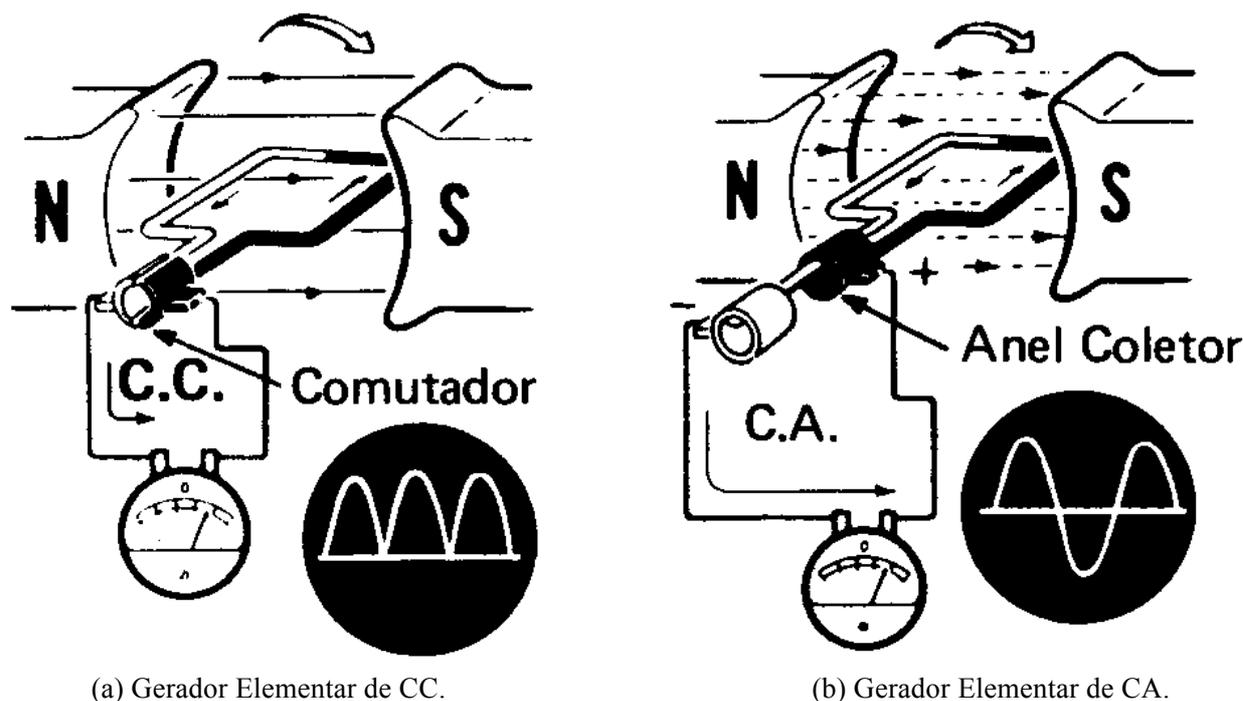


Fig. 1-1 : A forma da tensão no comutador do gerador CC e nos anéis coletores do gerador CA.

Conforme estudado nos geradores de CC, a saída do gerador é proporcional à intensidade do campo e à velocidade com que as bobinas e o campo interagem. Como os geradores de CA trabalham normalmente com velocidade constante para manter a frequência constante, o controle da tensão de saída é realizado por meio da variação da intensidade do campo.

Aprendemos que no gerador de CC (dínamo) a parte rotativa é sempre a armadura. Contudo, em um gerador de CA (alternadores) isto não é o comum. Nos geradores CA o enrolamento da armadura – que é o enrolamento onde a tensão elétrica vai ser induzida – pode estar posicionado tanto no rotor quanto no estator, sendo a configuração mais comum a de armadura estacionária e campo rotativo.

Um gerador elementar consiste de uma espira de fio disposta de tal modo que pode ser girada em um campo magnético uniforme. Este movimento causa a indução de uma tensão na espira. Para ligar a espira (fonte) a um circuito externo (carga) que aproveite a *fem* induzida, são usados contatos deslizantes.

Os pólos norte e sul do ímã que proporciona o campo magnético são as *peças polares*. A espira de fio que gira dentro do campo é chamada de *armadura*. As extremidades da espira são ligadas a anéis, chamados *anéis coletores*, que giram com a armadura. *Escovas* fazem contato com os anéis coletores e ligam a armadura ao circuito externo.

Na descrição do funcionamento do gerador, abaixo, imagine a espira girando dentro do campo magnético (contudo, é bom lembrar que, com a mesma facilidade, poderíamos fazer o *ímã* girar). À medida que os lados da espira cortam as linhas de força do campo, há produção de uma *fem* induzida que provoca a circulação de corrente através da espira, anéis coletores, escovas, amperímetro de zero central e resistor de carga – tudo ligado em série. O valor da *fem* induzida que é gerada na espira e, portanto, da corrente produzida, depende da posição instantânea da espira em relação às linhas de fluxo do campo magnético.

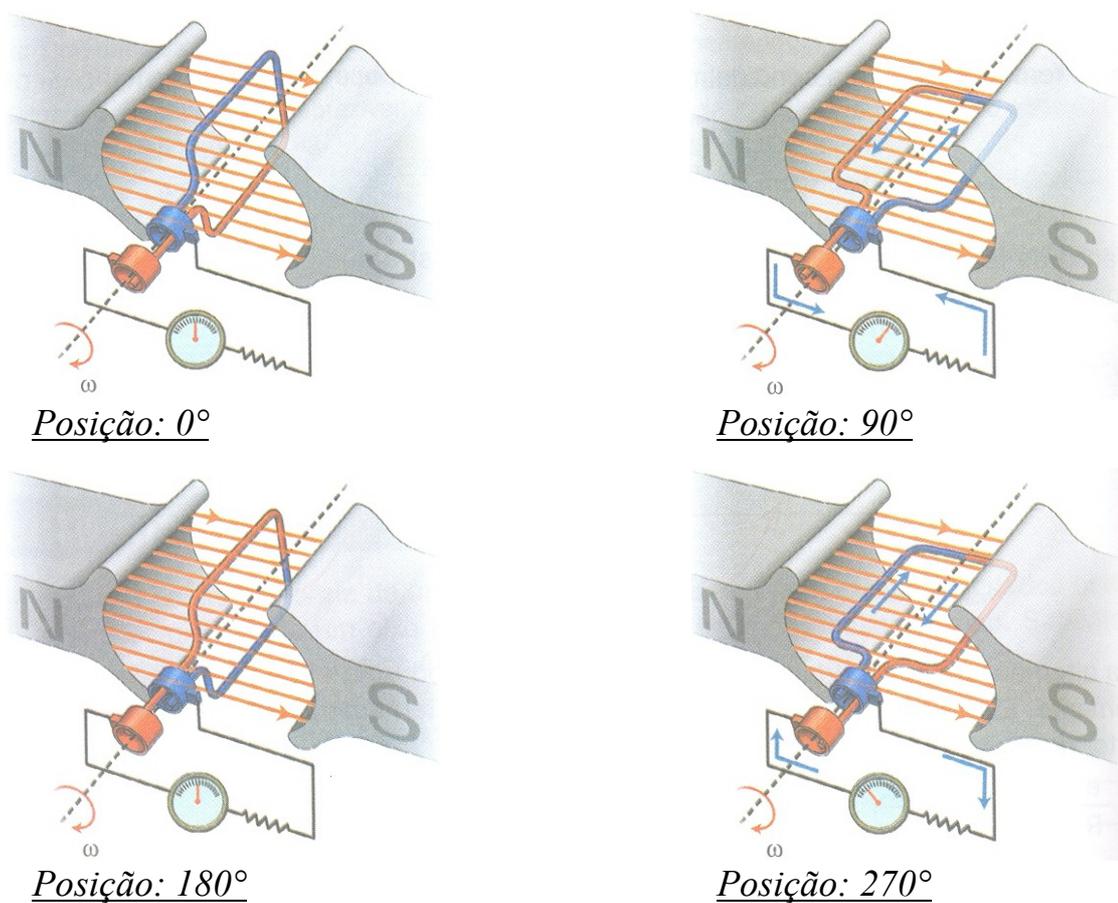


Fig. 1-2 : Geração de 1 ciclo de tensão CA com um alternador de uma única espira.

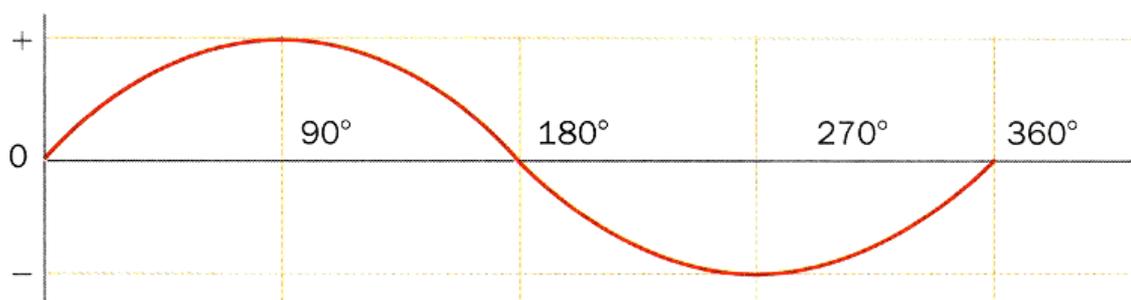


Fig. 1-3 : Forma de onda da tensão de saída correspondente a uma rotação completa da espira.

1.2 – TIPOS DE ALTERNADORES

Os geradores de corrente alternada também são chamados de *alternadores*. Praticamente toda energia elétrica consumida nas residências e indústrias é fornecida pelos alternadores das usinas que produzem eletricidade. Um alternador simples é formado por: (1) um campo magnético forte e constante; (2) condutores que giram através do campo magnético; e (3) alguma forma de se manter uma ligação contínua dos condutores à medida que eles giram (Fig. 1-4). O campo magnético é produzido pela corrente que flui pela bobina de campo estacionário ou estator. A excitação para a bobina de campo é fornecida por uma bateria ou qualquer outra fonte CC.

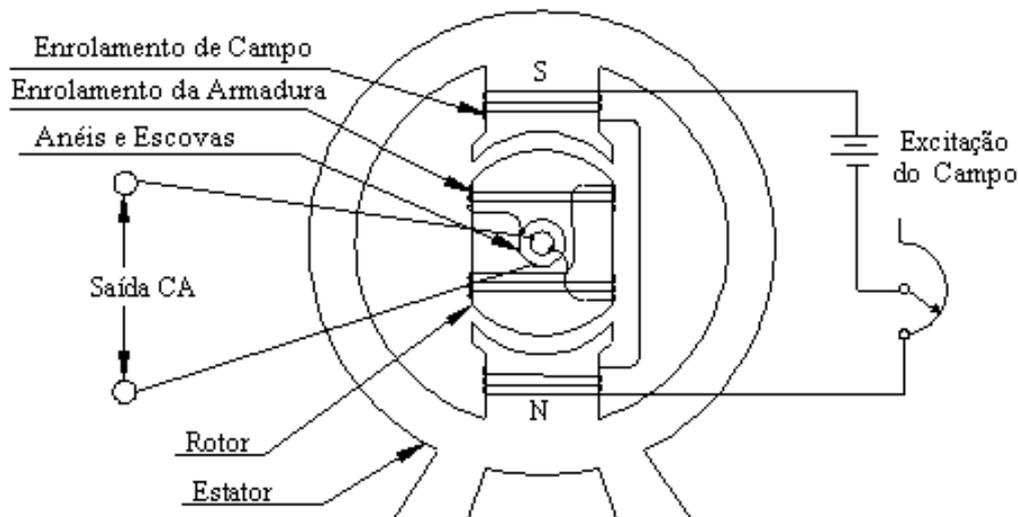


Fig. 1-4 : Alternador monofásico na configuração de armadura rotativa e campo estacionário.

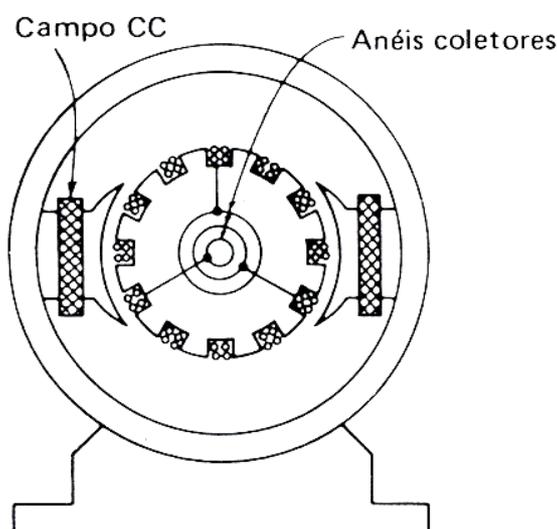


Fig. 1-5 : Alternador 3ϕ (2 pólos) com estator de pólos salientes (campo) e rotor ranhurado (armadura).

A armadura, ou rotor, gira dentro do campo magnético. Para uma única espira em volta do rotor, cada extremidade é ligada a anéis coletores separados, isolados do eixo. Cada vez que o rotor gira e se completa uma rotação, processa-se um ciclo completo de corrente alternada (no caso de 2 pólos). Na prática, um alternador contém várias centenas de espiras enroladas nas fendas (ranhuras) do rotor. Duas escovas são pressionadas através de molas contra os anéis coletores de modo a manter uma ligação contínua entre a corrente alternada induzida no rotor (bobina da armadura) e o circuito externo (carga).

O pequeno gerador CA, baixas potências, geralmente é de armadura rotativa e campo estacionário (Fig. 1-4). Uma desvantagem, desta configuração, é que os contatos entre os anéis coletores e as escovas estão em série com a carga, ou seja, a corrente da carga passa pelas escovas. Se essas partes se desgastarem ou ficarem sujas, o fluxo de corrente pode ser interrompido.

Entretanto, se a excitação do campo for ligada ao rotor, as espiras do estator terão uma corrente alternada induzida passando por elas (Fig. 1-6). Pode-se ligar uma carga através dessas bobinas da armadura estacionária sem ser necessário nenhum contato móvel no circuito (anel coletor e escova). A corrente de excitação é fornecida ao campo rotativo através dos anéis coletores e das escovas. Uma outra vantagem do gerador CA de armadura estacionária e campo rotativo está na grande facilidade de se isolar as bobinas do estator, comparada com a isolamento das bobinas do rotor. Como são freqüentemente geradas tensões altas, da ordem de 18.000 a 20.000 V, esta alta tensão não precisa ser trazida até os anéis de contato e as escovas, mas pode ser levada diretamente para a carga através de condutores isolados a partir da armadura estacionária. Outro fator importante é a maior facilidade na troca de calor entre o enrolamento da armadura (no estator) e o ar ambiente, uma vez que se a armadura estiver posicionada no rotor a dissipação de calor será bem mais difícil.

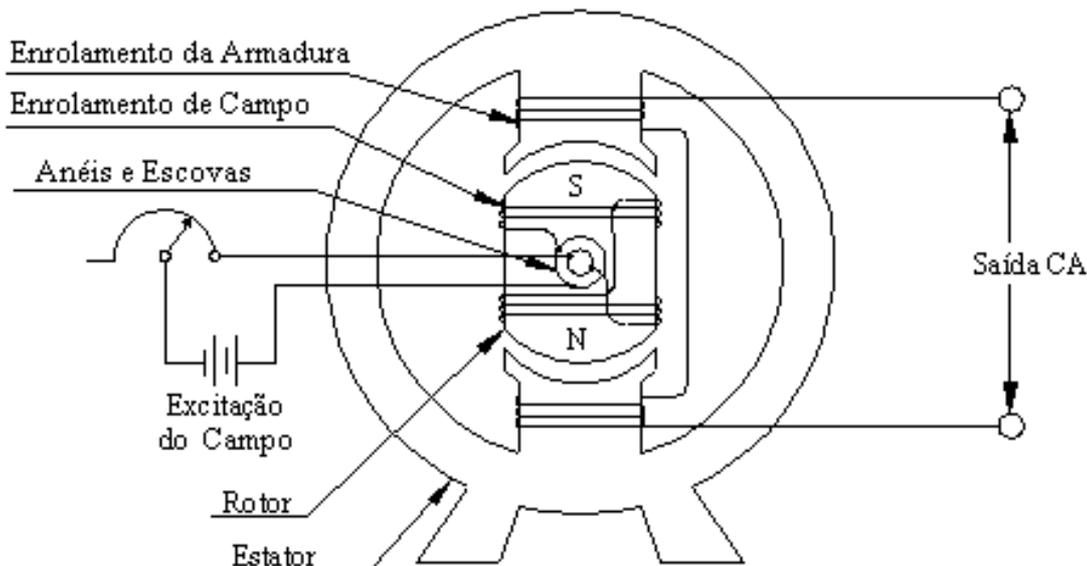


Fig. 1-6 : Alternador monofásico na configuração de armadura estacionária e campo rotativo.

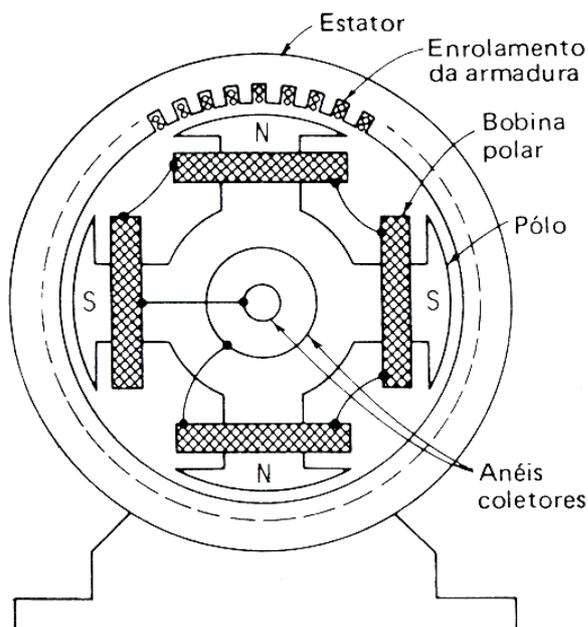


Fig. 1-7 : Alternador 1ϕ ou 3ϕ (4 pólos) com estator ranhurado (armadura) e rotor de pólos salientes (campo).

Nos geradores CA de armadura estacionária e campo rotativo (Fig. 1-6) a tensão gerada é retirada diretamente do enrolamento de armadura (neste caso o estator) sem passar pelas escovas. A potência de excitação destes geradores normalmente é inferior a 5% da potência nominal. Por este motivo, o tipo de gerador CA mais utilizado é o de armadura estacionária e campo rotativo.

1.3 – FREQUÊNCIA DA TENSÃO GERADA

O valor da tensão gerada por um gerador CA depende da intensidade do campo e da velocidade do rotor. Como a maioria dos geradores funciona com velocidade constante (geradores síncronos), o valor da *fem* induzida (ou tensão gerada) é controlado através da excitação do campo.

A frequência da *fem* gerada depende do número de pólos do campo e da velocidade do rotor, como mostra a equação abaixo:

$$f = \frac{p \cdot n}{120} \quad (1.1)$$

onde: f → frequência da tensão gerada, Hz
 p → número total de pólos da máquina
 n → velocidade do rotor, rotações por minuto (rpm)

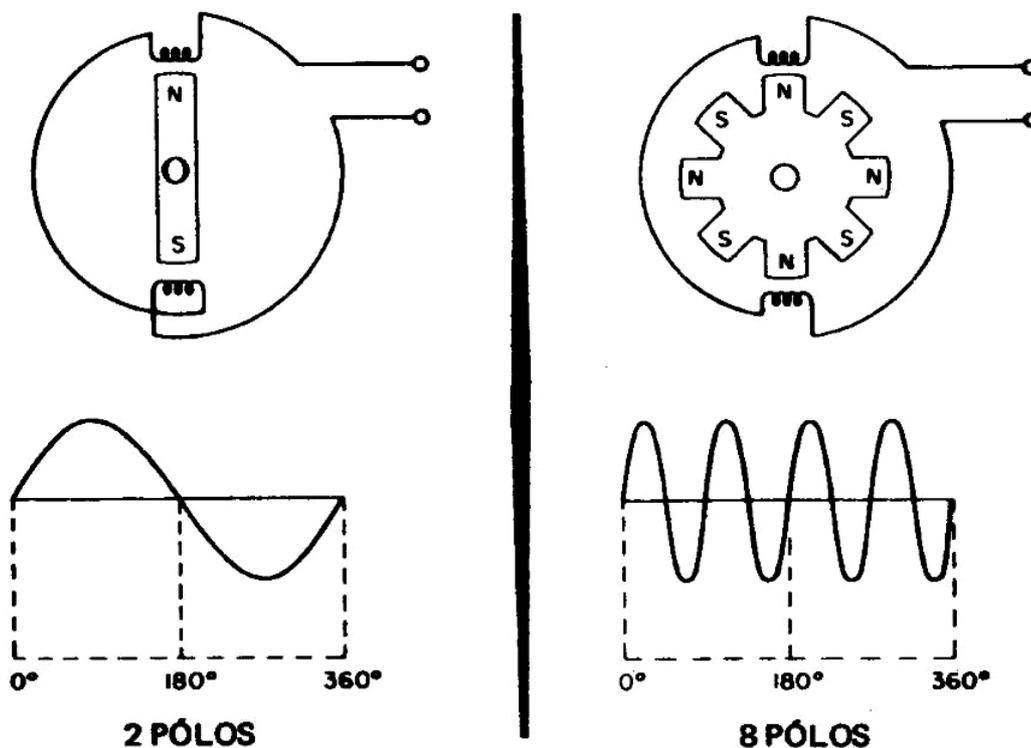


Fig. 1-8 : Alternadores monofásicos com números de pólos diferentes e mesma velocidade do rotor.

Para uma máquina de um par de pólos, a cada giro das espiras teremos um ciclo completo da tensão gerada. Os enrolamentos podem ser construídos com um número maior de pares de pólos, que se distribuirão alternadamente (um norte e um sul). Neste caso, teremos um ciclo a cada par de pólos. Os geradores da usina hidrelétrica de Itaipu possuem 78 pólos e giram a uma velocidade de 92,3 rpm.

Note que o número de pólos da máquina terá que ser sempre par, para formar os pares de pólos. Na Tabela 1-1, são mostradas as velocidades síncronas correspondentes para as frequências e polaridades mais utilizadas.

Tabela 1-1 : Velocidades síncronas em rotações por minuto.

Número de Pólos	$f = 60 \text{ Hz}$	$f = 50 \text{ Hz}$
2	3.600 rpm	3.000 rpm
4	1.800 rpm	1.500 rpm
6	1.200 rpm	1.000 rpm
8	900 rpm	750 rpm
10	720 rpm	600 rpm

1.4 – ASPECTOS CONSTRUTIVOS DOS ALTERNADORES (TIPOS DE ROTOR)

Quando a máquina primária (do gerador) é essencialmente um acionador de *baixa velocidade*, como no caso de uma *turbina hidráulica* (usada em usinas hidrelétricas), requerer-se-á um *grande* número de pólos. Como a ventilação não é um problema a baixas velocidades, pode-se utilizar um rotor de pólos *salientes*. Da mesma forma, se a máquina primária for um *motor a gasolina, óleo diesel, gás ou vapor*, ou seja, numa máquina primária de velocidade essencialmente *moderada*, utilizar-se-ão pólos *lisos* (ou não-salientes) em número de 4 a 12. No caso de máquinas primárias de *velocidade elevada*, como *turbinas a vapor ou a gás* (o vapor podendo ser obtido a partir de caldeiras convencionais a carvão ou a óleo, ou a partir de reatores nucleares), usualmente utilizam-se pólos *lisos*. Em grande parte, a determinação do tipo de construção de campo do gerador CA a ser utilizado é feita a partir da espécie de combustível ou fonte de energia disponível no local geográfico onde se irá gerar eletricidade.

Geradores CA de *baixa velocidade* e de *pólos salientes* requerem um estator de *grande* circunferência, no qual possam ser inseridos muitos condutores. Tais estatores requerem condutores, para os enrolamentos de campo e da armadura, que tenham *pequeno comprimento axial*. Por outro lado, geradores CA de *alta velocidade* e de *pólos lisos (ranhurados)* têm uma *pequena* circunferência, requerendo condutores para os enrolamentos de campo e da armadura de *grande comprimento axial*. Assim, pela diferença marcante na aparência externa, podemos distinguir facilmente as máquinas síncronas de pólos salientes e de pólos lisos, mesmo sem observar o seu rotor como mostra a Fig. 1-9.

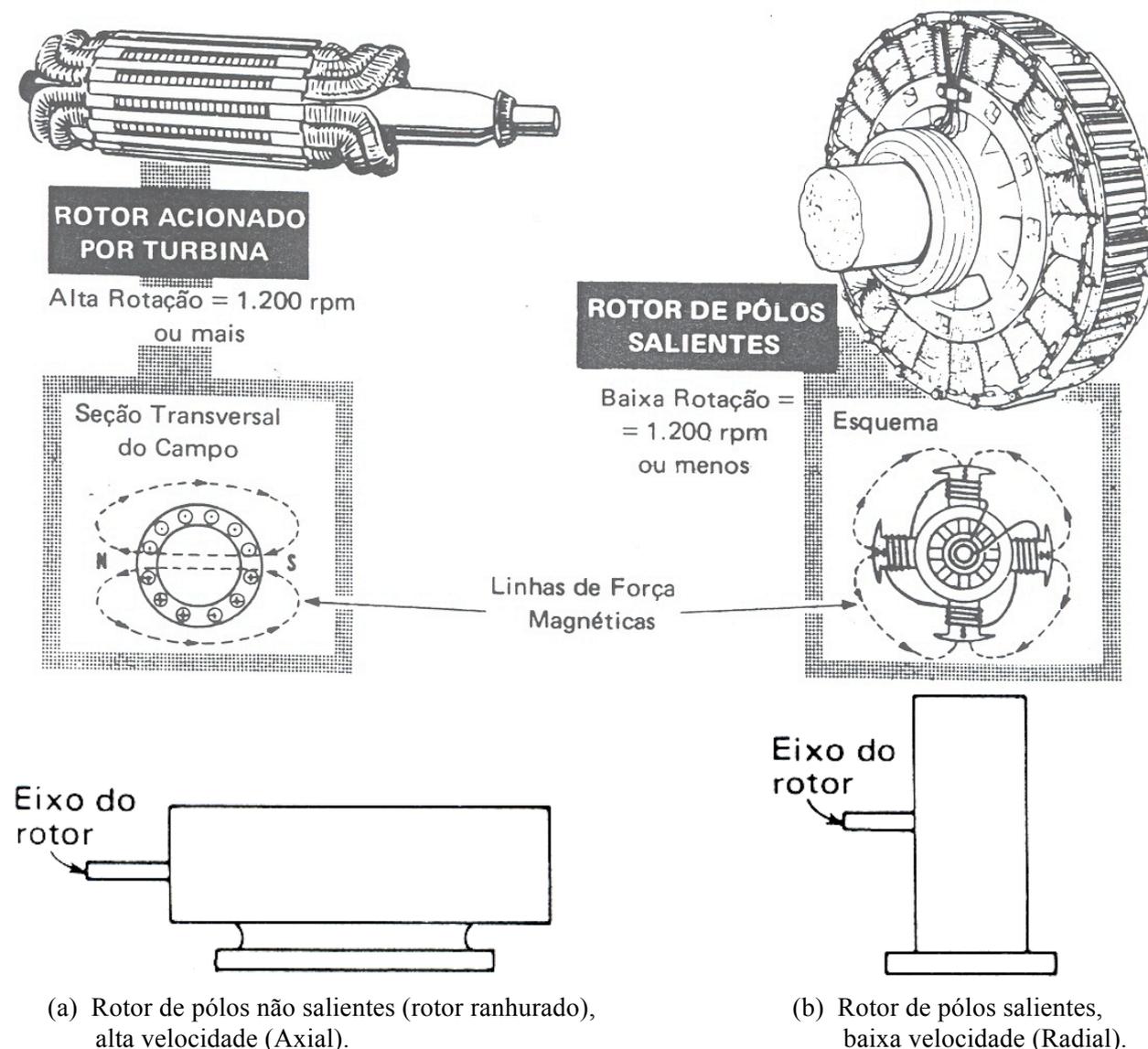


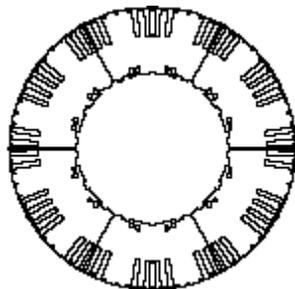
Fig. 1-9 : Aspecto geral das máquinas síncronas (geradores CA).

1.4.1 – Rotores de Pólos Lisos e de Pólos Salientes

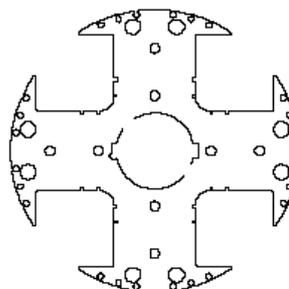
Os geradores síncronos são construídos com rotores de pólos lisos ou salientes.

PÓLOS LISOS: São rotores nos quais o entreferro é constante ao longo de toda a periferia do núcleo de ferro.

PÓLOS SALIENTES: São rotores que apresentam uma descontinuidade no entreferro ao longo da periferia do núcleo de ferro. Nestes casos, existem as chamadas regiões interpolares, onde o entreferro é muito grande, tornando visível a saliência dos pólos.



(a) Rotor de pólos lisos.



(b) Rotor de pólos salientes.

Fig. 1-10 : Perfil das chapas laminadas utilizadas nos núcleos magnéticos de rotores.

1.5 – CARACTERÍSTICAS DA TENSÃO NOS TERMINAIS DO GERADOR CA

A tensão de saída de um gerador CA é semelhante à de um gerador CC. No gerador CC, há *duas* causas para a queda de tensão interna: (1) a resistência da armadura; e (2) a reação da armadura. A Fig. 1-11 e a Eq. (1.2) indicam que há agora *três* causas para a “queda” de tensão interna no gerador CA, que são: (1) a resistência da armadura; (2) a reatância da armadura; e (3) a reação da armadura. Além disso, para um alternador, enquanto os dois primeiros fatores sempre tendem a reduzir a tensão, o terceiro (reação da armadura) pode tender a diminuí-la ou aumentá-la. Assim, a regulação de tensão do gerador CA difere da do gerador CC, em dois aspectos importantes: (1) há uma queda de tensão devida à reatância da armadura; e (2) o efeito de reação da armadura (dependendo do fator de potência da carga) pode produzir um aumento da tensão gerada que tende a tornar mais elevada a tensão nos terminais.

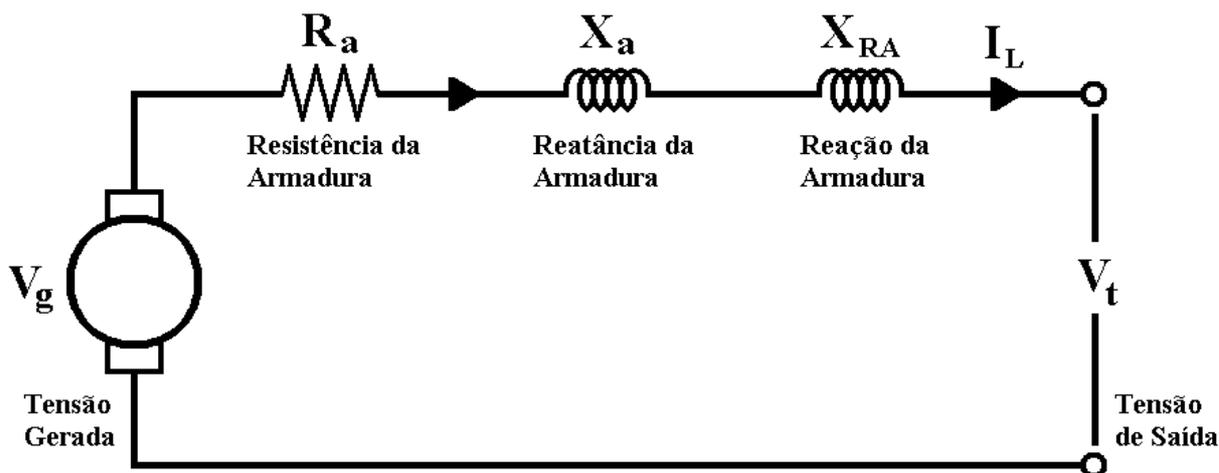


Fig. 1-11 : A tensão nos terminais de saída do gerador CA é afetada por três fatores (R_a , X_a e X_{RA}).

$$V_g = V_t - R_a \cdot I_L - X_a \cdot I_L \pm X_{RA} \cdot I_L \quad (1.2)$$

A variação de tensão causada pela reação da armadura depende do fator de potência da carga, se é indutivo ou capacitivo. A reação da armadura afeta a intensidade do campo CC de modo que, quando a carga é indutiva ela enfraquece o campo, e quando é capacitiva ela fortalece o campo aumentando V_g .

1.6 – REAÇÃO DA ARMADURA NO GERADOR CA

Em vazio (com rotação constante), a tensão de armadura depende do fluxo magnético gerado pelos pólos de excitação, ou ainda da corrente que circula pelo enrolamento de campo (rotor). Isto porque o estator não é percorrido por corrente, portanto é nula a reação da armadura, cujo efeito é alterar o fluxo total. A relação entre tensão gerada e a corrente de excitação chamamos de característica a vazio (Fig. 1-12), onde podemos observar o estado de saturação da máquina (máximo fluxo e máxima tensão).

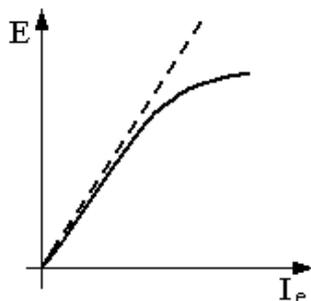
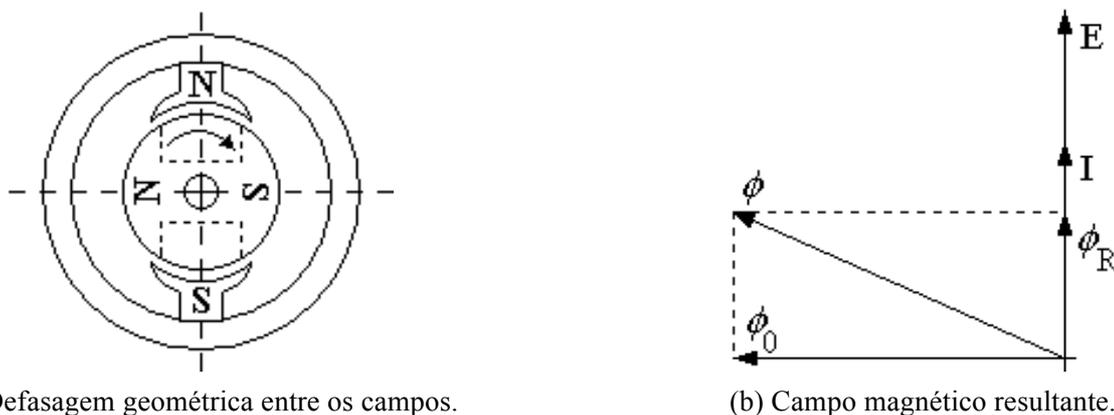


Fig. 1-12 : Característica a vazio (*tensão gerada x corrente de excitação*).

Em carga, a corrente que atravessa os condutores da armadura cria um campo magnético, causando alterações na intensidade e distribuição do campo magnético principal. Esta alteração depende da corrente, do $\cos \phi$ e das características da carga, conforme veremos a seguir:

1.6.1 – Carga Puramente Resistiva

Se o gerador alimenta um circuito puramente resistivo, é gerado pela corrente de carga um campo magnético próprio. O campo magnético da armadura (rotor) produz dois pólos, ver Fig. 1-13 (a), defasados de 90° geométricos (em atraso) em relação aos pólos principais (estator), e estes exercem sobre os pólos da armadura uma força contrária ao movimento, gastando-se potência mecânica para se manter o rotor girando. O diagrama da Fig. 1-13 (b) mostra a alteração do fluxo principal em vazio (ϕ_0) em relação ao fluxo de reação da armadura (ϕ_R). A alteração de ϕ_0 é pequena, não produzindo uma variação muito grande em relação ao fluxo resultante ϕ . Devido a queda de tensão nos enrolamentos da armadura será necessário aumentar a corrente de excitação para manter a tensão nominal (Fig. 1-16).



(a) Defasagem geométrica entre os campos.

(b) Campo magnético resultante.

Fig. 1-13 : Reação da armadura para uma carga puramente resistiva.

1.6.2 – Carga Puramente Indutiva

Neste caso, a corrente de carga (I) está defasada em 90° elétricos (atrasada) em relação à tensão (E), e o campo de reação da armadura (ϕ_R) estará conseqüentemente na mesma direção do campo principal (ϕ_0), mas em polaridade oposta. O efeito da carga indutiva é desmagnetizante, ver Figs. 1-14 (a) e 1-14 (b). As cargas indutivas armazenam energia em seu campo magnético e a devolvem totalmente ao gerador, não exercendo nenhum conjugado frenante sobre a armadura (rotor). Neste caso, só será necessário energia mecânica para compensar as perdas. Devido ao efeito desmagnetizante será necessário um grande aumento da corrente de excitação para se manter a tensão nominal (Fig. 1-16).

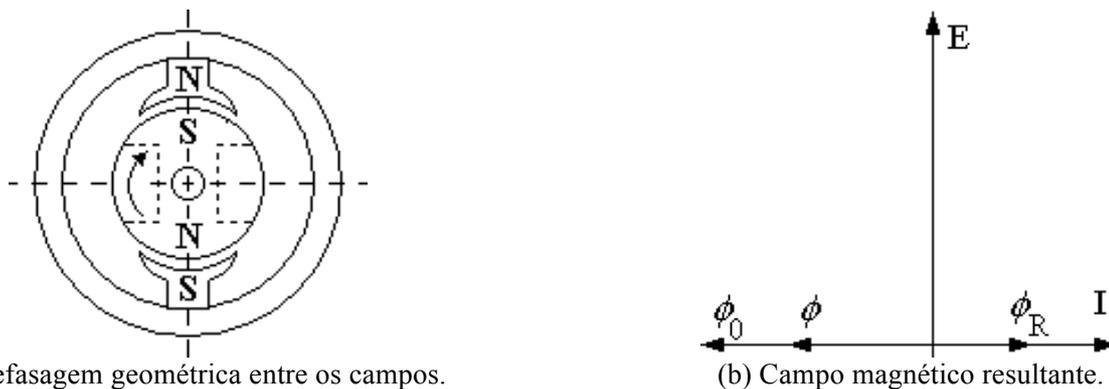


Fig. 1-14 : Reação da armadura para uma carga puramente indutiva.

1.6.3 – Carga Puramente Capacitiva

A corrente da armadura (I) para uma carga puramente capacitiva está defasada de 90° elétricos (adiantada) em relação à tensão (E). O campo de reação da armadura (ϕ_R) conseqüentemente estará na mesma direção do campo principal (ϕ) e com a mesma polaridade. O campo da armadura (rotor), neste caso, tem um efeito magnetizante, ver Figs. 1-15 (a) e 1-15 (b). As cargas capacitivas armazenam energia em seu campo elétrico e a devolvem totalmente ao gerador, não exercendo também, como nas cargas indutivas, nenhum conjugado frenante sobre a armadura (rotor). Devido ao efeito magnetizante será necessário reduzir a corrente de excitação para manter a tensão nominal (Fig. 1-16).

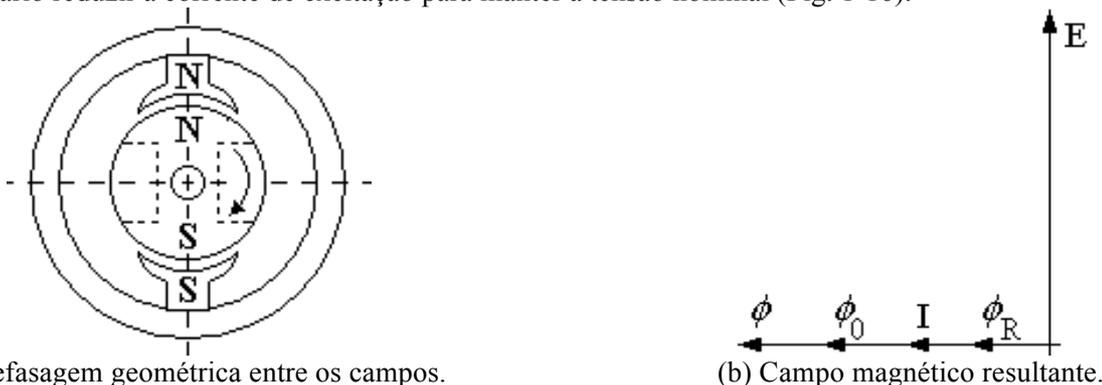


Fig. 1-15 : Reação da armadura para uma carga puramente capacitiva.

1.6.4 – Cargas Intermediárias

Na prática, o que encontramos são cargas com defasagem intermediária, entre totalmente indutiva ou capacitiva e resistiva. Nestes casos o campo de reação da armadura pode ser decomposto em dois campos, um transversal e outro desmagnetizante (carga indutiva) ou magnetizante (carga capacitiva). Somente o campo transversal tem um efeito frenante, consumindo desta forma potência mecânica da máquina acionante. O efeito magnetizante ou desmagnetizante é compensado alterando-se a corrente de excitação.

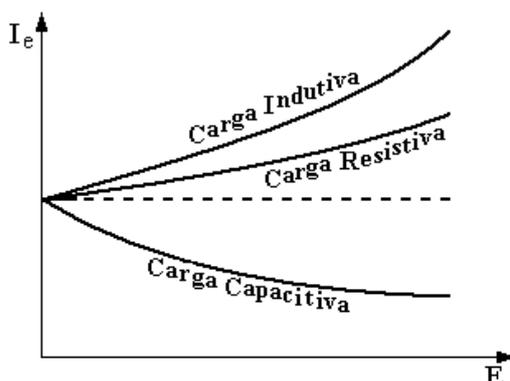


Fig. 1-16 : Característica a vazio (*tensão gerada x corrente de excitação*).

1.7 – GERADORES TRIFÁSICOS

O alternador trifásico, como seu nome sugere, possui três enrolamentos monofásicos dispostos de forma que as tensões induzidas fiquem defasadas de 120°. Um diagrama esquemático de um estator trifásico, mostrando todas as bobinas, fica muito complicado, tornando-se difícil ver o que realmente acontece. O diagrama esquemático simplificado mostrado na Fig. 1-17 (a), mostra todas as bobinas de uma fase concentradas numa só. Nas Figs. 1-17 (b) e 1-17 (c), temos a representação de um alternador trifásico com os enrolamentos do estator ligados em estrela e em triângulo, respectivamente. Não se representa o rotor para maior simplicidade.

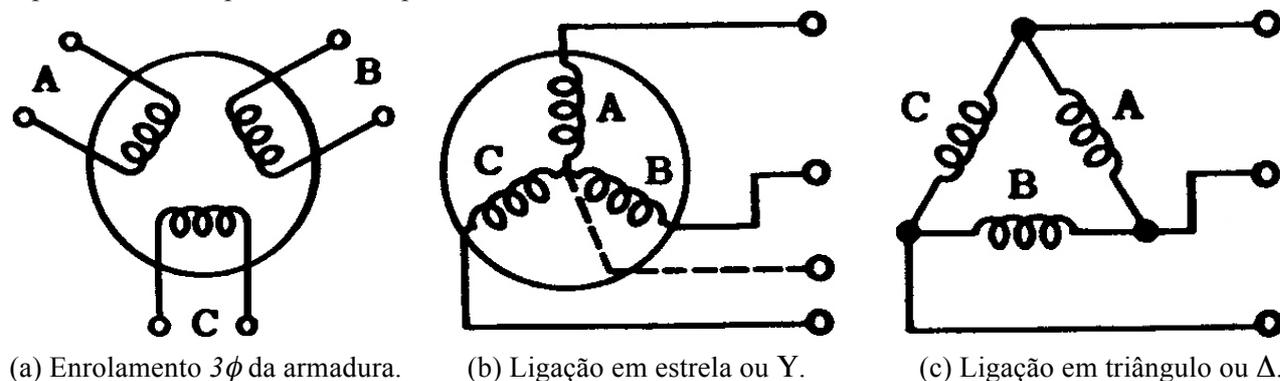


Fig. 1-17: Principais ligações dos enrolamentos da armadura para alternadores trifásicos.

As formas de onda das tensões geradas em cada fase estão representadas na Fig. 1-18, defasadas de 120° elétricos no tempo. O alternador trifásico mostrado nos esquemas acima corresponde essencialmente a três alternadores monofásicos cujas tensões estão defasadas de 120°. As três fases são independentes entre si.

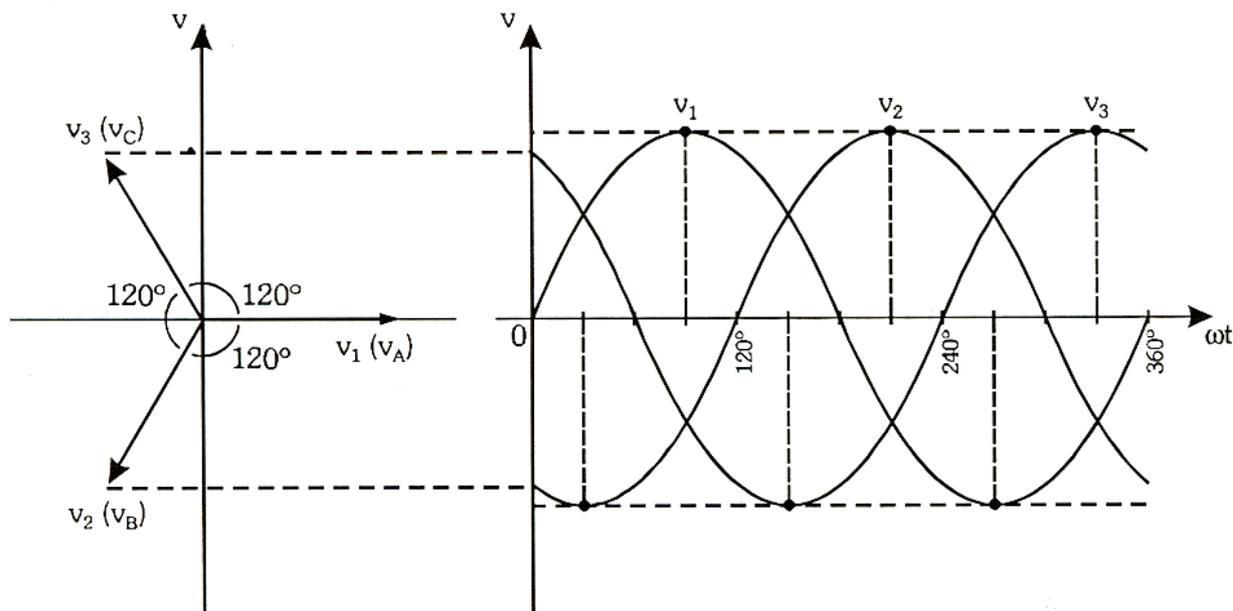


Fig. 1-18: Tensões nos enrolamentos das três fases de um alternador 3φ (defasadas de 120° elétricos).

O tipo de ligação mais comum nos geradores trifásicos é a ligação em estrela ou Y, pois neste tipo de ligação podemos alimentar facilmente as cargas monofásicas, devido à existência do fio neutro.

Tabela 1-2 : Tensões, correntes e potência para os principais tipos de ligações trifásicas.

LIGAÇÃO	TENSÃO DE LINHA	CORRENTE DE LINHA	POTÊNCIA TRIFÁSICA (VA)
Y	$V_L = \sqrt{3} \times V_F$	$I_L = I_F$	$S = 3 \times V_F \times I_F$
Δ	$V_L = V_F$	$I_L = \sqrt{3} \times I_F$	$S = \sqrt{3} \times V_L \times I_L$

1.8 – TIPOS DE EXCITAÇÃO DO CAMPO (POR ESCOVAS OU SEM ESCOVAS)

Os enrolamentos de campo são ligados em série ou a ligação é mista. Em ambos os casos, os terminais extremos dos enrolamentos são ligados geralmente a anéis coletores montados no eixo do rotor. Independentemente do tipo de campo do rotor, usa-se a excitação independente, antigamente proporcionada por um gerador CC e atualmente proporcionada por um gerador CA, ambos com a função de *excitatriz*. Nos grandes geradores CA a *excitatriz* é montada no mesmo eixo do gerador principal e fornecem corrente contínua para a excitação do campo da máquina principal. Entretanto, em alguns geradores CA muito pequenos, o campo do rotor é produzido por um ímã permanente.

Basicamente, podemos ter três situações para a excitação do enrolamento de campo nos geradores síncronos CA de armadura estacionária e campo rotativo, que são:

1. Gerador CC montado no próprio eixo do rotor da máquina principal (excitação com escovas e comutador);
2. Conversor estático CA/CC ou retificador (excitação com escovas e anéis coletores);
3. Gerador CA, de armadura rotativa e campo estacionário, montado no próprio eixo do rotor da máquina principal (excitação sem escovas e com ponte de diodos, sistema “*Brushless*”);

1.8.1 – Geradores com Excitação por Escovas

Nestes geradores o campo no rotor é alimentado em corrente contínua através das escovas e anéis coletores e a tensão alternada de saída, para alimentação das cargas, é retirada do estator (armadura) (Fig. 1-19). Neste sistema normalmente o campo é alimentado por uma excitatriz chamada de excitatriz estática. A tensão de saída do gerador é mantida constante dentro de suas características nominais através do regulador de tensão, que verifica constantemente a tensão de saída e atua na excitatriz estática. Quando acionado na rotação nominal e com a excitatriz desconectada do rotor, o processo de escorvamento inicia-se pela pequena tensão residual do gerador.

Algumas vantagens e desvantagens desse tipo de excitação:

VANTAGENS: Menor tempo de resposta “ t_a ” na recuperação de tensão (aplicação direta de corrente contínua no rotor).

DESvantagens: Exige manutenção periódica no conjunto escovas e porta escovas. Não é aconselhável a utilização em cargas sensíveis e de telecomunicações, devido à possibilidade de gerar rádio interferência em função do contato das escovas e anéis (possível faiscamento). Por isso também não pode ser utilizado em atmosferas explosivas.

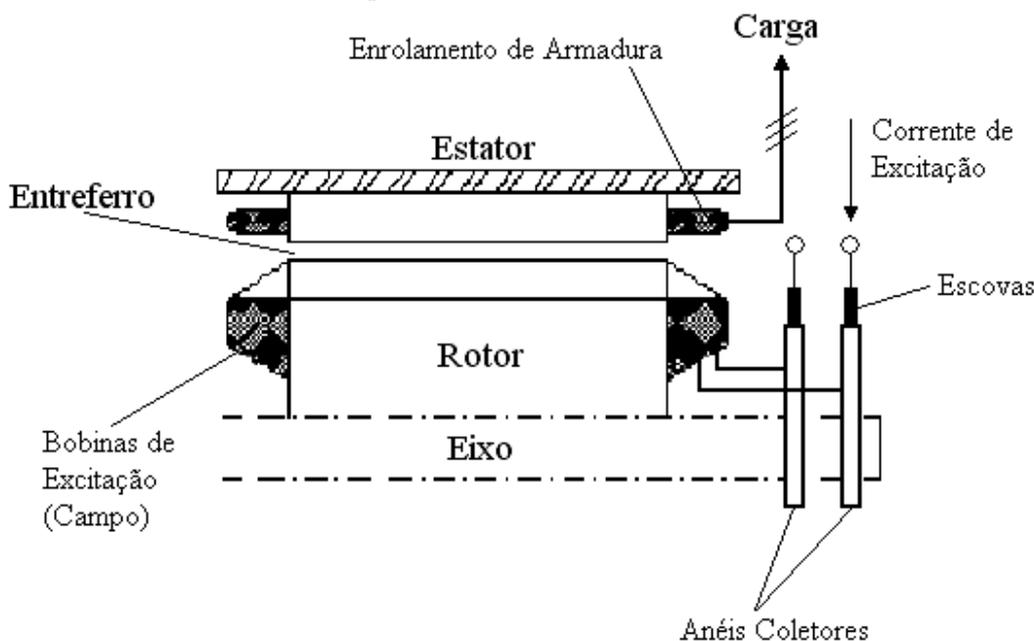


Fig. 1-19 : Excitação do campo realizada através de escovas e excitatriz estática (conversor CA/CC).

1.8.2 – Geradores com Excitação sem Escovas (*Brushless*)

Nesses geradores a corrente contínua para alimentação do campo é obtida sem a utilização de escovas e anéis coletores, utilizando somente indução magnética. Para isso o gerador possui um componente chamado excitatriz principal, com armadura rotativa e campo estacionário. A armadura dessa excitatriz é montada no próprio eixo do gerador. Possui também um conjunto de diodos girantes (circuito retificador), também montado no eixo do gerador, para alimentação do campo principal em corrente contínua. Este conjunto de diodos recebe tensão alternada do rotor da excitatriz principal (armadura da excitatriz), tensão esta induzida pelo estator da excitatriz principal (campo da excitatriz), que é alimentado em corrente contínua proveniente do regulador de tensão (automático). Um esquema dos componentes montados no rotor de uma máquina com excitação brushless é mostrado na Fig. 1-20.

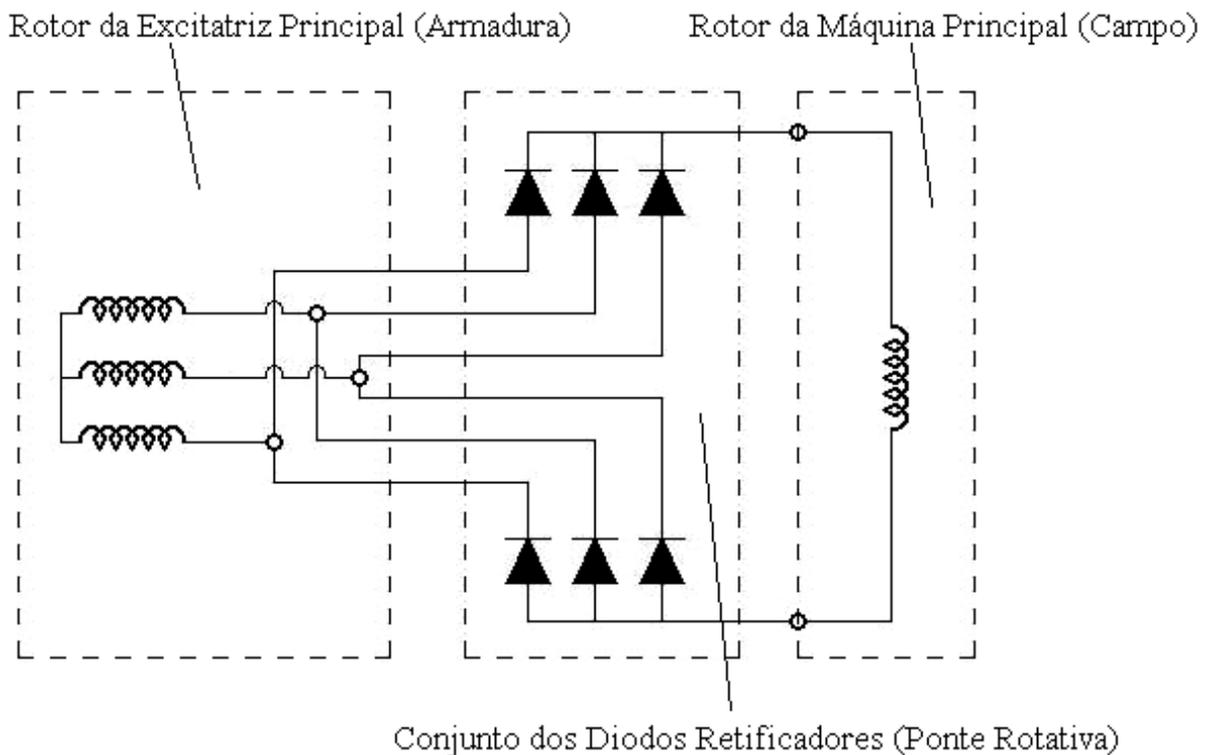


Fig. 1-20 : Esquema de excitação sem escovas “*Brushless*” (componentes do rotor).

O regulador de tensão monitora constantemente a tensão de saída do gerador e atua no estator da excitatriz. Com isso mantém a tensão de saída do gerador constante. A tensão alternada de saída do gerador, para alimentação das cargas, é retirada do seu estator principal (armadura) (Fig. 1-21).

Nos geradores brushless, a potência para a excitação (alimentação do regulador de tensão) pode ser obtida de diferentes maneiras, as quais definem o tipo de excitação da máquina. Esses tipos de excitação podem ser das seguintes formas:

- Alimentação através de bobina auxiliar (ver Fig. 1-21), um conjunto auxiliar de bobinas, independente, alojado em algumas ranhuras do estator principal da máquina (armadura principal). Funciona como uma fonte de potência independente para o regulador de tensão, não sujeita aos efeitos que acontecem no estator principal da máquina. O regulador recebe tensão alternada dessa fonte e alimenta o campo da excitatriz principal com tensão retificada e regulada. Em condições normais de operação, na bobina auxiliar é produzida uma tensão monofásica na frequência nominal do gerador, sofrendo pequenas distorções na forma de onda dependendo do tipo de carga (resistiva, indutiva ou capacitiva).

Gerador Modelo GTA com Bobina Auxiliar (padrão)

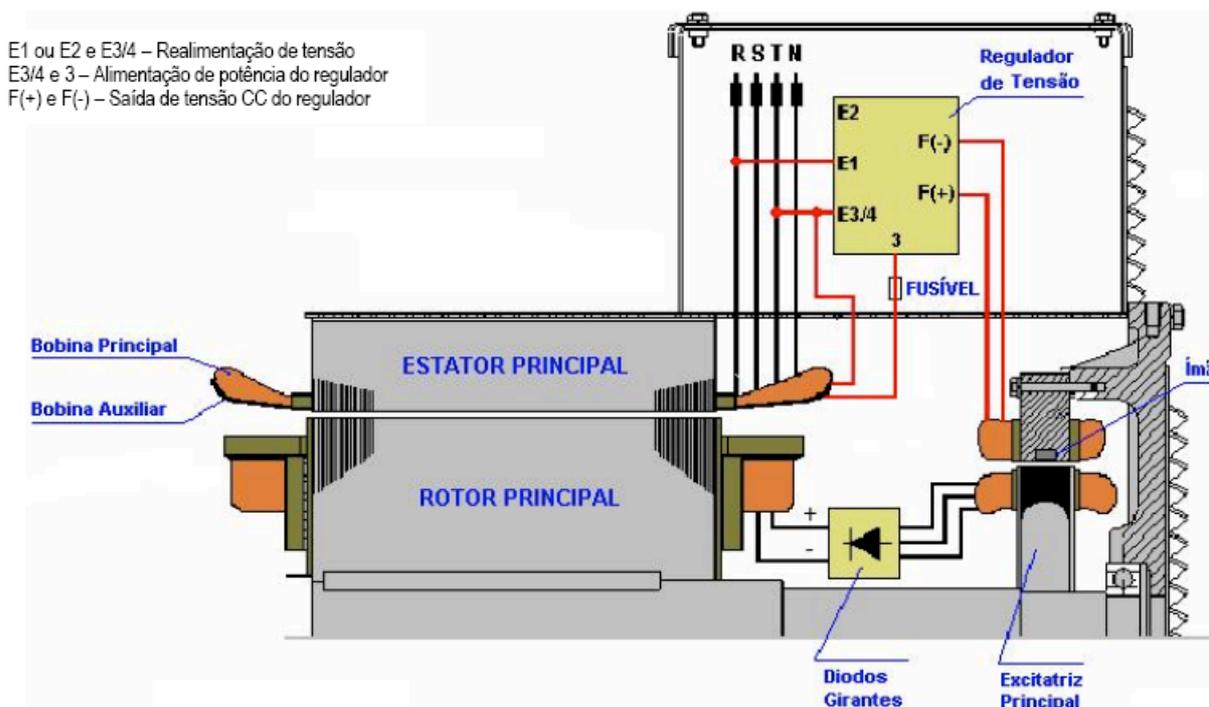


Fig. 1-21 : A alimentação de potência do regulador de tensão é feita pela bobina auxiliar.

- Alimentação através de excitatriz auxiliar a ímãs permanentes (ou PMG - “*Permanent Magnets Generator*”), que possui campo no rotor, a ímãs, montado no próprio eixo do gerador, e estator (armadura) fixado na tampa traseira do gerador ou na base, em compartimento separado do estator principal da máquina (ver Fig. 1-22). A excitatriz auxiliar também funciona como uma fonte de potência independente para o regulador de tensão. O regulador recebe a tensão trifásica alternada gerada no estator da excitatriz auxiliar (armadura da excitatriz auxiliar), retifica, regula e aplica-a no estator da excitatriz principal do gerador (campo da excitatriz principal).

Gerador Modelo GPA com Excitatriz Auxiliar

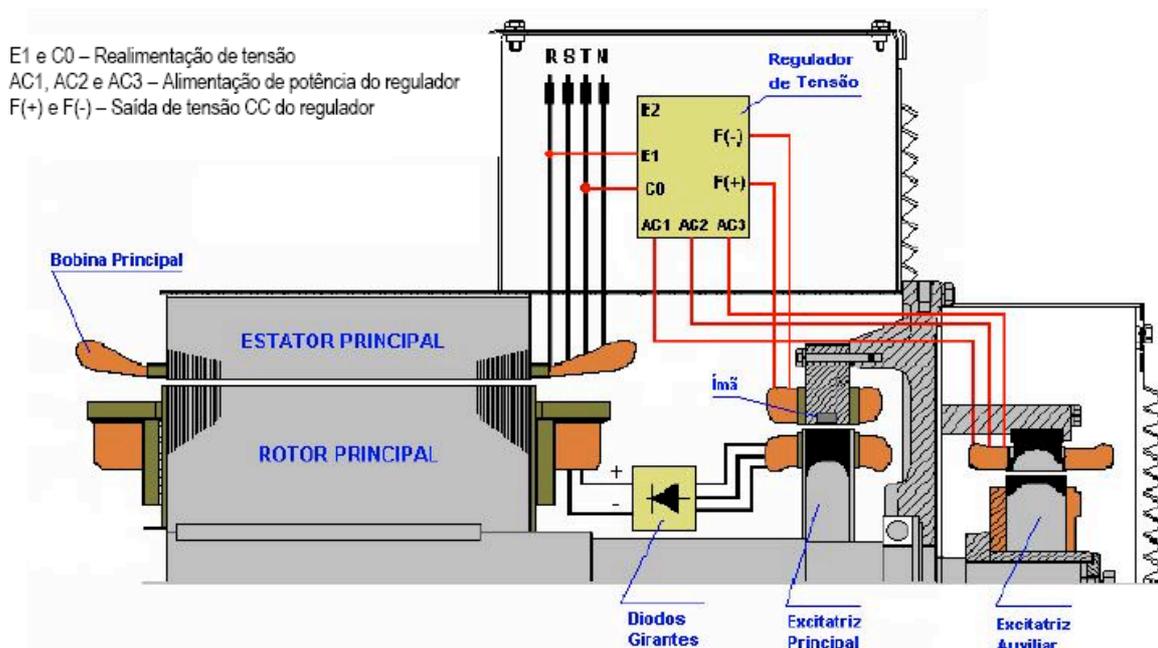


Fig. 1-22 : A alimentação de potência do regulador de tensão é feita pela excitatriz auxiliar.

- Alimentação sem excitatriz auxiliar pelo próprio enrolamento de armadura da máquina, através de tap's (para baixa tensão) ou via TP's (para alta tensão), ou ainda, alimentação externa em locais onde há presença de rede (ver Fig. 1-23). O regulador de tensão recebe tensão alternada de uma dessas fontes, retifica, regula e aplica-a no estator da excitatriz principal do gerador (campo da excitatriz principal).

Gerador Modelo GSA sem excitatriz auxiliar e sem bobina auxiliar

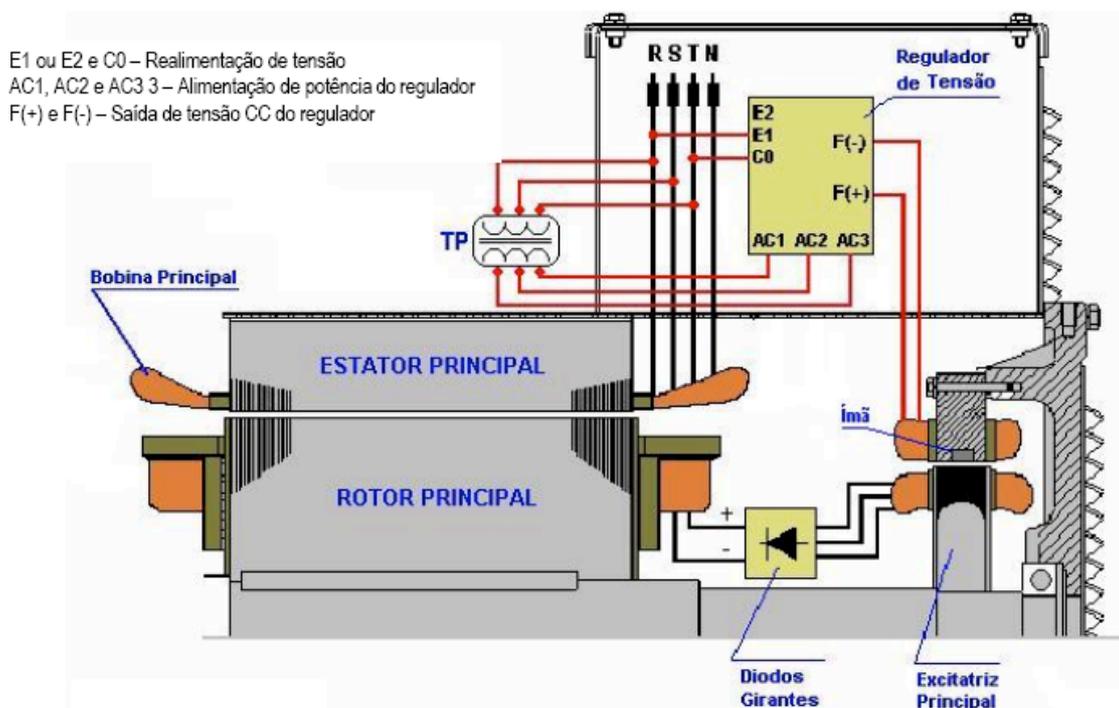


Fig. 1-23 : A alimentação de potência do regulador de tensão é feita pela tensão de saída do gerador que é conectada a um transformador, no caso de AT, para adequar à tensão de entrada do regulador de tensão.

No gerador modelo GTA da WEG, a auto-excitação inicia-se pela tensão residual no estator e bobina auxiliar do gerador que é garantida pelos ímãs permanentes inseridos nos pólos do estator da excitatriz principal. O valor da tensão residual varia de gerador para gerador. A bobina auxiliar é responsável pelo fornecimento de potência para o regulador de tensão, independentemente da tensão de saída do gerador ou de variações de carga que possam ocorrer. O regulador de tensão, alimentado pela bobina auxiliar (Fig. 1-21), fornece potência para a excitatriz principal da máquina. Através da comparação entre um valor teórico (ajustado) e a tensão de referência (realimentação), o regulador controla a excitação do gerador mantendo a tensão de saída no valor desejado (ajustado).

1.9 – REGULAÇÃO DE TENSÃO NOS GERADORES CA

A regulação de tensão de um gerador CA é o aumento percentual na tensão dos terminais à medida que a carga vai sendo reduzida, desde o valor da corrente de carga máxima até zero, mantendo-se a velocidade e a excitação do campo constante, ou:

$$RT(\%) = \frac{V_{SC} - V_{CM}}{V_{CM}} \times 100\% = \frac{V_0 - V_{nom}}{V_{nom}} \times 100\% \quad (1.3)$$

Quando a tensão de saída não é constante, ocorre um pisca-pisca nas lâmpadas e a televisão não funcionará corretamente. São necessários então, aparelhos de regulação de tensão automáticos para minimizar as quedas na tensão de saída aumentando-se a corrente de campo. A regulação da tensão é geralmente uma função externa do gerador.

1.9.1 – Regulador de Tensão Automático

O regulador de tensão é eletrônico e automático. Tem por finalidade monitorar a tensão terminal do gerador e mantê-la constante no valor ajustado, independente das variações da carga. Ele retifica uma tensão trifásica proveniente da bobina auxiliar, da excitatriz auxiliar, de TAP's da armadura da máquina principal ou até da rede, levando-a através de um transistor de potência ao enrolamento de campo da excitatriz principal. Possui também circuitos de ajustes e proteções para assegurar um controle confiável do gerador.

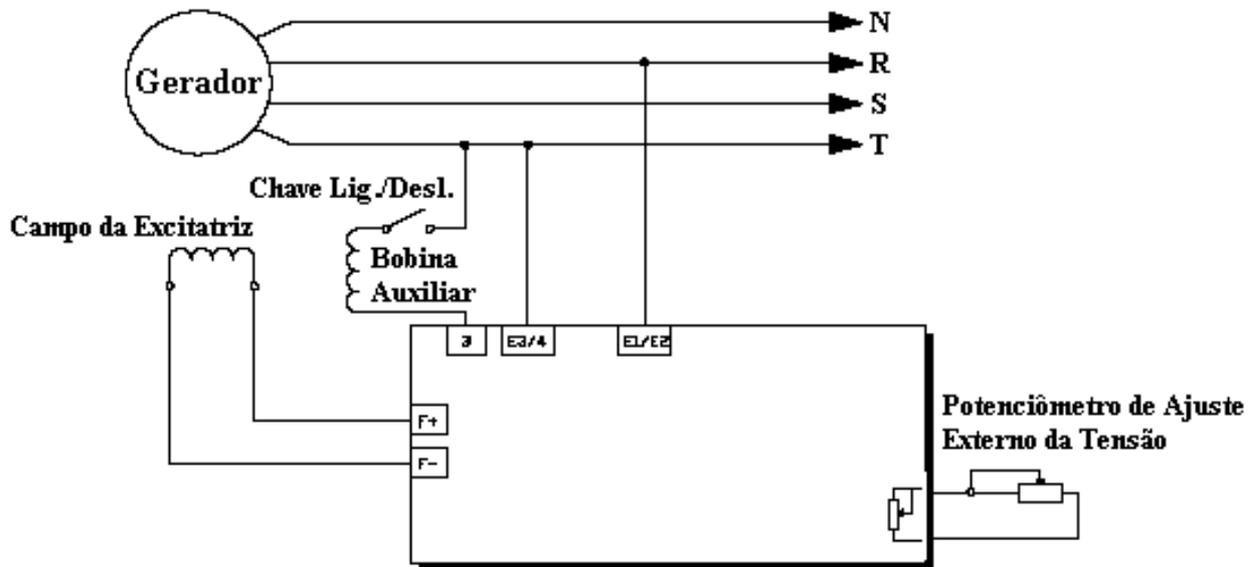


Fig. 1-24 : Esquema de ligação do regulador de tensão sendo alimentado pela bobina auxiliar.

Como tempo de regulagem entende-se o tempo transcorrido desde o início de uma queda de tensão até o momento em que a tensão volta ao intervalo de tolerância estacionária (por exemplo $\pm 0,5\%$) e permanece estável (t_a , ver Fig. 1-25). O tempo exato de regulagem depende na prática de inúmeros fatores, portanto só pode ser indicado aproximadamente.

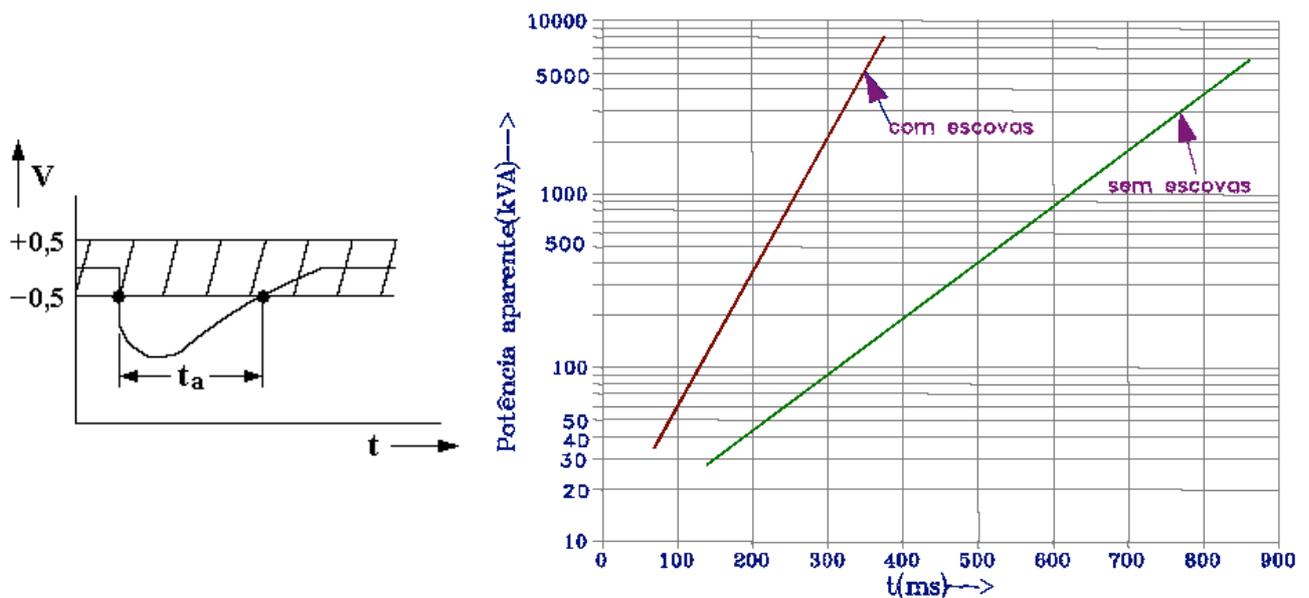


Fig. 1-25 : Intervalo de tolerância e tempo de regulagem aproximado para excitação com e sem escovas.

1.10 – PRINCIPAIS COMPONENTES DO GERADOR SÍNCRONO

O gerador completo pode ser dividido em uma série de unidades funcionais. As principais são mostradas a seguir.

1.10.1 – Estator da Máquina Principal

As carcaças das máquinas da linha G são fabricadas em chapas de aço calandradas (formato tubular). Para a linha S, as carcaças são fabricadas em chapas de aço soldadas através de solda tipo “MIG”. Todo o conjunto da carcaça recebe um tratamento de normalização para alívio de tensões provocadas pelas soldas. O pacote de chapas do estator (ou núcleo do estator), com seu respectivo enrolamento, é assentado sobre as nervuras da carcaça (linha S) ou prensado na carcaça (linha G). As máquinas de baixa tensão são produzidas com fios circulares e as de média tensão com fios retangulares.

O isolamento padrão das máquinas da linha S é classe F e para a linha G é classe H. As bobinas são fixadas às ranhuras por cunhas de fechamento, normalmente compostas de material isolante, e as cabeças dos enrolamentos são fortalecidas para que possam resistir a vibrações. As máquinas de baixa tensão da linha G são impregnadas por gotejamento e da linha S por imersão. Máquinas de alta tensão são impregnadas pelo sistema VPI (*Vacuum Pressure Impregnation*).

1.10.2 – Rotor da Máquina Principal

O rotor acomoda o enrolamento de campo, cujos pólos são formados por pacotes de chapas. Uma gaiola de amortecimento também é montada no rotor para compensação nos serviços em paralelo e nas variações de carga.

1.10.3 – Estator da Excitatriz Principal

A excitatriz principal é um gerador trifásico de pólos salientes. Na linha G seu estator é fixado na tampa traseira do gerador e dentro dele (Fig. 1-26). Na linha S é posicionado fora da máquina e é fixado na tampa traseira ou na base do gerador, dependendo da sua forma construtiva. Os pólos salientes acomodam as bobinas de campo, que são ligadas em série, sendo as suas extremidades conectadas ao regulador de tensão diretamente (linha G) ou através de bornes na caixa de ligação da excitatriz (linha S).

1.10.4 – Rotor da Excitatriz Principal e Diodos Retificadores Girantes

O rotor da excitatriz principal é montado sobre o eixo da máquina principal. O rotor é laminado e suas ranhuras abrigam um enrolamento trifásico ligado em estrela. O ponto comum desta ligação estrela é inacessível. De cada ponto da ligação estrela saem dois fios para os retificadores girantes, assentados nos suportes dissipadores. Dos dois fios, um é ligado ao retificador sobre o suporte positivo e o segundo, ao mesmo retificador sobre o suporte negativo.

1.10.5 – Excitatriz Auxiliar

A excitatriz auxiliar ou PMG (*Permanent Magnets Generator*) é um gerador trifásico com rotor constituído por ímãs, que são seus pólos de excitação, acoplado ao eixo da máquina principal. O estator, constituído de chapas, possui um enrolamento trifásico para alimentação do regulador de tensão. Na linha G a excitatriz auxiliar é oferecida como opcional (sob pedido) e encontra-se no exterior da máquina, no lado não acionado, fixada na tampa do gerador. Na linha S é utilizada ou não dependendo da aplicação ou especificação do cliente e é fixada na tampa ou na base, dependendo da forma construtiva da máquina. Na linha G é conectada diretamente ao regulador de tensão e na linha S, através de bornes na caixa de ligação da excitatriz auxiliar.

1.10.6 – Bobina Auxiliar (ou Enrolamento Auxiliar)

Padrão na linha G é um conjunto auxiliar de bobinas, monofásico, que fica alojado em algumas ranhuras do estator principal da máquina, junto com as bobinas de armadura, porém totalmente isolado delas. Sua função é fornecer potência para o regulador de tensão alimentar o campo da excitatriz principal, potência essa retificada e controlada pelo regulador de tensão.

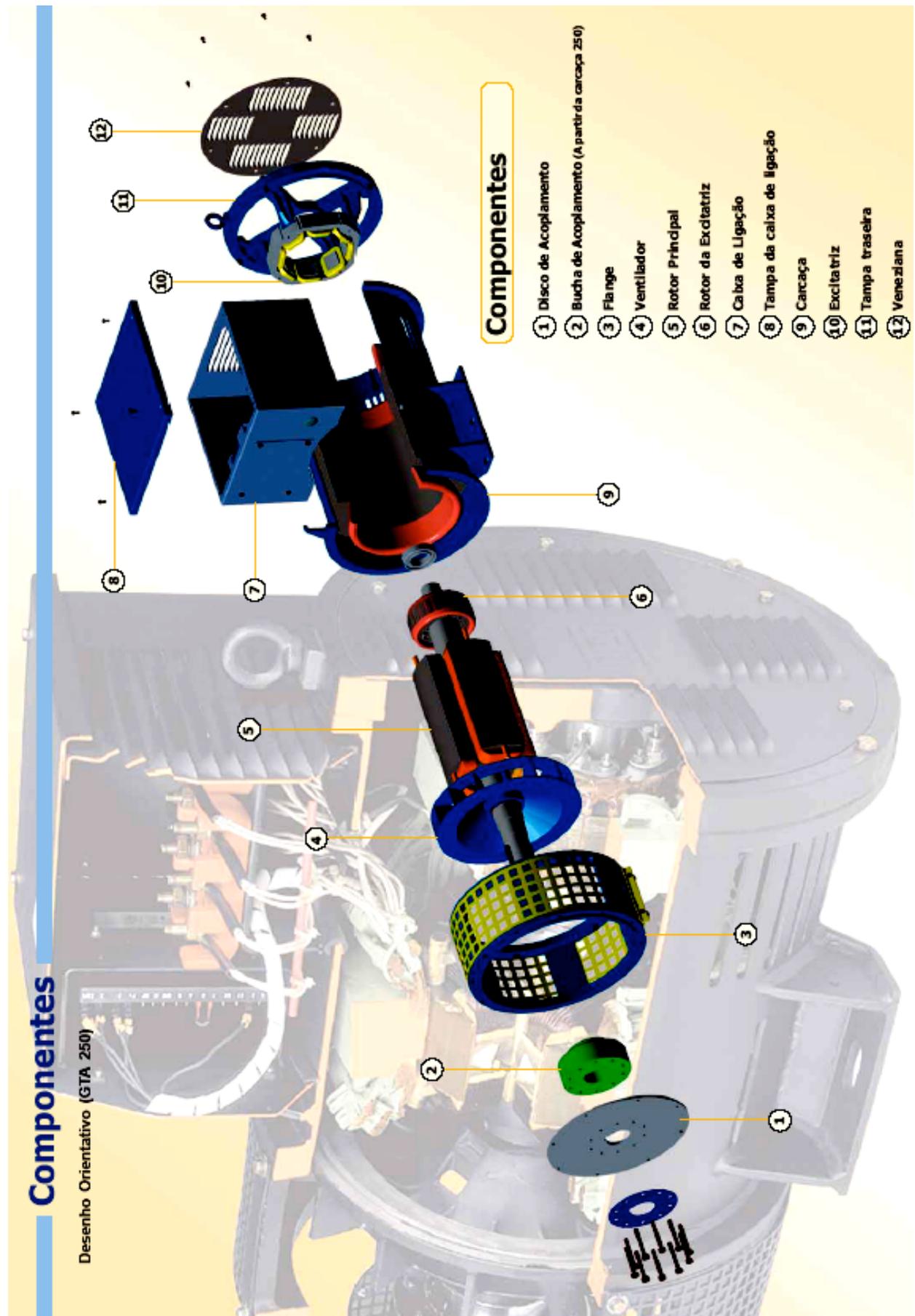


Fig. 1-26 : Os principais componentes de um gerador síncrono (Fabricante WEG).

1.11 – PERDAS E EFICIÊNCIA

As perdas de um gerador CA são análogas às do gerador CC, e incluem:

1. As perdas no circuito elétrico: (a) as perdas no cobre do enrolamento da armadura;
(b) as perdas no cobre do enrolamento de campo.
2. As perdas no circuito magnético: (a) as perdas no ferro do núcleo do estator;
(b) as perdas no ferro do núcleo do rotor.
3. As perdas mecânicas (rotacionais): (a) as perdas por atrito nos mancais;
(b) as perdas por atrito nas escovas;
(c) as perdas por atrito com o ar.

A eficiência (E_f) é a razão entre a potência útil de saída e a potência total de entrada:

$$Eficiência(\%) = \frac{Potência\ de\ Saída}{Potência\ de\ Entrada} \times 100\% \quad (1.4)$$

1.12 – ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA E CLASSE DE ISOLAMENTO

1.12.1 – Aquecimento do Enrolamento

A potência útil fornecida pelo gerador é menor que a potência acionante, isto é, o rendimento do gerador é sempre inferior a 100%. A diferença entre essas duas potências representa as perdas, que são transformadas em calor, o qual aquece o enrolamento e deve ser dissipado para fora do gerador, para evitar que a elevação de temperatura seja excessiva.

1.12.2 – Vida Útil das Máquinas Elétricas Rotativas

Se não considerarmos as peças que se desgastam devido ao uso, como escovas e rolamentos, a vida útil da máquina elétrica é determinada pelo material isolante.

Este material é afetado por muitos fatores como umidade, vibrações, ambientes corrosivos e outros. Dentre todos os fatores o mais importante é, sem dúvida, a temperatura de trabalho dos materiais isolantes empregados. Quando falamos em diminuição da vida útil da máquina não nos referimos às temperaturas elevadas, quando o isolante se queima e o enrolamento é destruído de repente. Vida útil da isolação, em termos de temperatura de trabalho, bem abaixo daquela em que o material se queima, refere-se ao envelhecimento gradual do isolante, que vai se tornando ressecado, perdendo o poder isolante, até que não suporte mais a tensão aplicada e produza um curto-circuito.

A experiência mostra que a isolação tem uma duração praticamente ilimitada se a sua temperatura for mantida abaixo de um certo limite. Acima deste valor, a vida útil da isolação vai se tornando cada vez mais curta, à medida que a temperatura de trabalho é mais alta. Este limite de temperatura é muito mais baixo que a temperatura de "queima" do isolante e depende do tipo de material empregado.

Das curvas de variação das características dos materiais em dependência da temperatura determina-se a vida útil, que é reduzida pela metade a cada 8°C a 10°C de operação acima da temperatura nominal da classe. Esta limitação de temperatura se refere ao ponto mais quente da isolação e não necessariamente ao enrolamento todo. Evidentemente, basta um ponto fraco no interior da bobina para que o enrolamento fique inutilizado.

1.12.3 – Classes de Isolamento

Como foi visto acima, o limite de temperatura depende do tipo de material empregado. Para fins de normalização, os materiais isolantes e os sistemas de isolamento (cada um formado pela combinação de vários materiais) são agrupados em Classes de Isolamento, cada qual definida pelo respectivo limite de temperatura, ou seja, pela maior temperatura que o material pode suportar continuamente sem que seja afetada sua vida útil.

As classes de isolamento utilizadas em máquinas elétricas e os respectivos limites de temperatura conforme a Norma NBR 7094 são as seguintes:

- Classe A (105°C);
- Classe E (120°C);
- Classe B (130°C);
- Classe F (155°C);
- Classe H (180°C).

As classes B e F são as comumente utilizadas em motores normais. Já para geradores as mais comuns são a F e H.

A Fig. 1-27 ilustra a elevação de temperatura no enrolamento sobre a temperatura do ar ambiente. Esta diferença total, comumente chamada de “Elevação de Temperatura” ou simplesmente “ ΔT ”, é a soma da queda de temperatura interna com a queda externa.

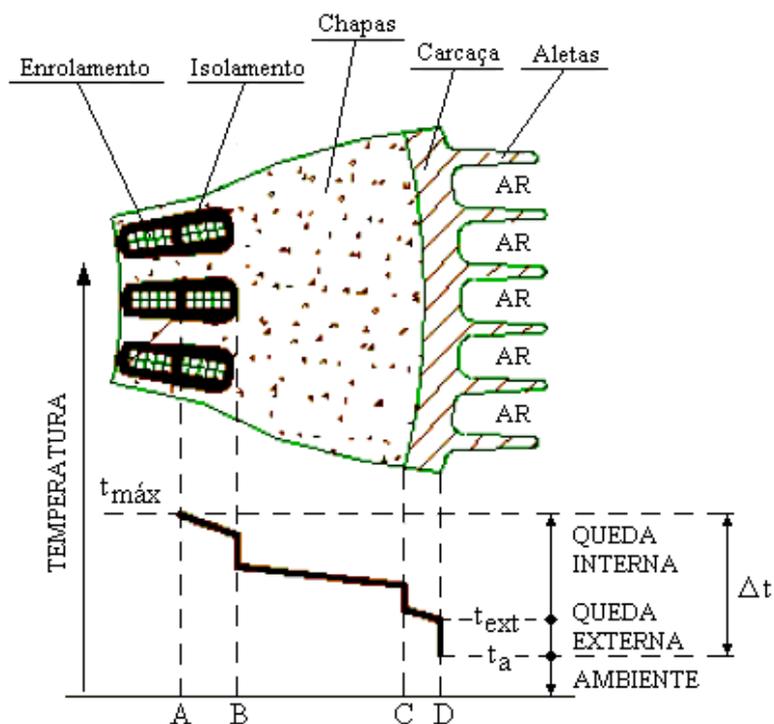


Fig. 1-27 : Ilustração da elevação de temperatura em um gerador ou motor.

O projeto da máquina visa reduzir a queda interna (melhorar a transferência de calor) para poder ter uma queda externa maior possível, pois esta é que realmente ajuda a dissipar o calor. A queda interna de temperatura depende de diversos fatores. As relações dos pontos representados na figura acima com a temperatura, são explicadas a seguir:

- A** Ponto mais quente do enrolamento, no interior da ranhura, onde é gerado o calor proveniente das perdas nos condutores;
- AB** Queda de temperatura na transferência de calor do ponto mais quente (interior da bobina) até a parte externa da bobina. Como o ar é um péssimo condutor de calor, é importante que não haja "vazios" no interior da ranhura, isto é, as bobinas devem ser compactas e a impregnação deve ser perfeita;
- B** Queda através do isolamento da ranhura e do contato deste com os condutores de um lado e com as chapas do núcleo do outro. O emprego de materiais modernos melhora a transmissão de calor através do isolante. A perfeita impregnação melhora o contato do lado interno, eliminando os espaços vazios. O bom alinhamento das chapas estampadas melhora o contato do lado externo, eliminando camadas de ar que prejudicam a transferência de calor;
- BC** Queda de temperatura por transmissão através do material das chapas do núcleo;
- C** Queda no contato entre o núcleo e a carcaça;
- CD** Queda de temperatura por transmissão através da espessura da carcaça.

1.13 – FUNCIONAMENTO DE GERADORES EM PARALELO

Um sistema útil normalmente consiste de várias **estações centrais geradoras** (*usinas*), todas operando em paralelo. Em cada estação central pode haver vários geradores CA operando em paralelo. Há numerosas vantagens na subdivisão de um sistema gerador em várias centrais menores, tanto do ponto de vista econômico quanto do ponto de vista estratégico. Estas vantagens também se aplicam ao uso de várias **unidades geradoras** (*geradores*) menores, em lugar de uma única máquina maior, embora esta última tenha um rendimento maior quando carregada à sua capacidade nominal.

As principais vantagens da operação de geradores em paralelo são:

1. Se um único gerador de grande potência constitui uma estação geradora e, por uma razão qualquer, deixa de funcionar, com isto deixará de funcionar também a estação geradora; enquanto que, se um dos vários geradores menores necessitar de um reparo, os demais ainda estarão disponíveis para fornecer o serviço necessário.
2. Um único gerador, para operar com rendimento máximo, deverá ser carregado até sua capacidade nominal. É antieconômico operar-se um grande gerador se as cargas supridas são pequenas. Vários geradores menores, operando em paralelo, podem ser removidos ou adicionados, de forma a atender as flutuações da demanda; cada gerador pode ser operado à sua capacidade nominal ou próximo dela, funcionando assim a estação no seu rendimento máximo.
3. Se há necessidade de um reparo ou de uma parada geral para manutenção, os geradores menores facilitam as operações, do ponto de vista de peças de reposição ou reserva, bem como dos serviços a executar.
4. Quando aumentar a demanda média do sistema ou da estação geradora, instalar-se-ão unidades adicionais para acompanhar o acréscimo da demanda. O capital empregado inicialmente será menor e o seu crescimento corresponderá ao crescimento da demanda média.
5. Há limites físicos e econômicos para a capacidade possível de uma única máquina. Por exemplo, em uma determinada estação geradora, a carga pode chegar a 10 milhões de kVA. Embora existam operando geradores de até centenas de milhares de kVA, não se constroem máquinas com capacidade suficiente para suprir toda demanda da estação geradora ou do sistema.

A maioria das usinas elétricas possui vários geradores CA funcionando em paralelo a fim de aumentar a potência disponível.

Antes de dois geradores serem ligados em paralelo é preciso que:

- A) as tensões dos geradores sejam iguais;
- B) os ângulos de fase das tensões dos geradores sejam iguais;
- C) as frequências das tensões dos geradores sejam iguais; e
- D) a ordem de seqüência das fases nos pontos da conexão seja a mesma.

Quando forem atingidas estas condições, os dois geradores estarão funcionando em sincronismo. A operação de se colocar os geradores em sincronismo chama-se *sincronização*. Estas observações também são válidas para a conexão de geradores em paralelo com a rede da concessionária.

Ligando-se geradores em paralelo, a distribuição da potência ativa depende do conjugado acionante (máquina primária), enquanto que a distribuição da potência reativa depende da excitação do campo de cada gerador.

As máquinas acionantes mostram uma tendência de queda na rotação com o aumento da potência ativa (carga). Isto é necessário para termos uma distribuição estável da potência ativa.

1.14 – PLACA DE IDENTIFICAÇÃO E ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

Quando o fabricante projeta um gerador e o oferece à venda, ele tem que partir de certos valores adotados para características da carga a ser alimentada e condições em que o gerador irá operar.

O conjunto desses valores constitui as "características nominais" do gerador. A maneira pela qual o fabricante comunica estas informações ao cliente é através da placa de identificação (Fig. 1-28).

Evidentemente é impossível colocar na placa de identificação todas as informações por extenso, de modo que é preciso recorrer a certas abreviações. Além disso, é preciso que os valores apresentados sejam objetivos e não dêem margens diversas sobre seu significado ou limites de variação. Para isto, o fabricante recorre a Normas Técnicas que padronizam as abreviações e símbolos e também estabelecem de uma só maneira o significado e os limites dos valores declarados.

Os geradores WEG normais são fabricados segundo as normas ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), IEC (*International Electrotechnical Commission*), VDE (*Verband Der Elektrotechnik*), Nema (*National Electrical Manufacturers Association*) e mediante consulta prévia podem ser fabricados conforme outras normas.

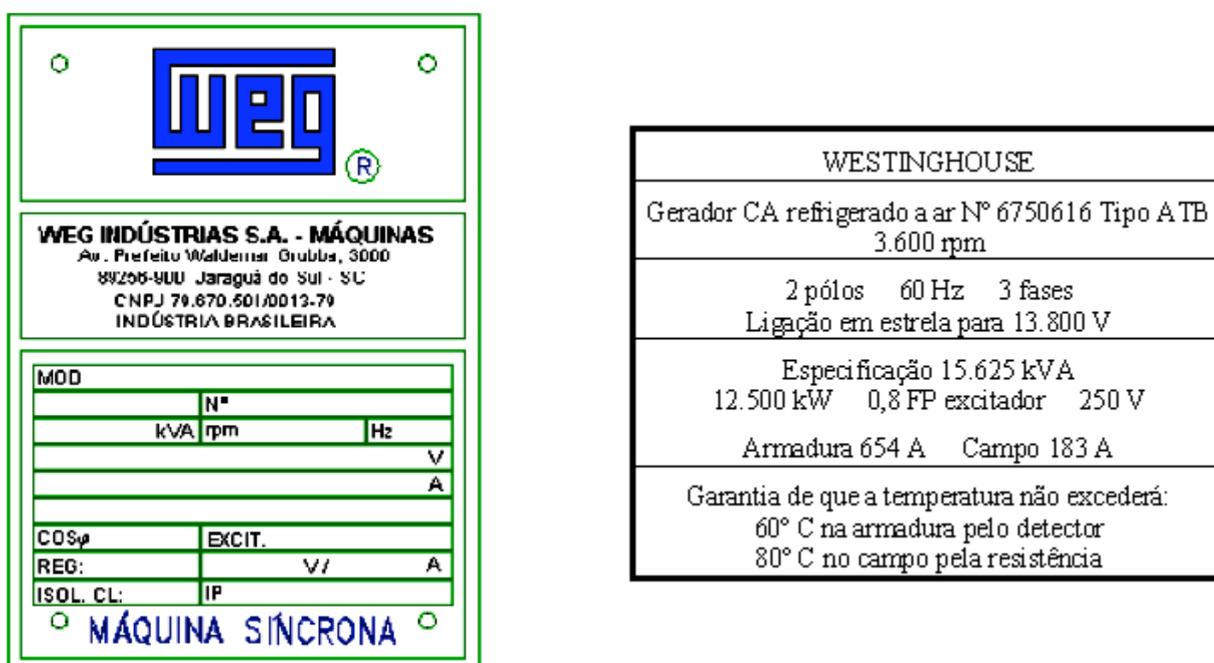


Fig. 1-28 : Exemplos da placa de identificação para geradores CA.

Dentre as informações padronizadas por norma que não precisam ser declaradas por extenso na placa de identificação, estão as condições sob as quais o gerador foi feito para funcionar, ou seja, as "condições usuais de serviço". Se o gerador for adquirido para trabalhar em condições especiais, o fato deve ser claramente indicado na especificação e pedido de compra do mesmo.

As condições usuais de serviço são:

- Meio refrigerante (na maioria dos casos o meio ambiente) de temperatura não superior a 40°C e isento de elementos prejudiciais ao gerador;
- Localização à sombra;
- Altitude não superior a 1000 m sobre o nível do mar.

Os dados da plaqueta de identificação de um gerador CA típico incluem o nome do fabricante, a série e o número do tipo; rotação (rpm), número de pólos, freqüência da tensão de saída, número de fases e tensão máxima fornecida; especificação da capacidade em *quilovolt.ampères* e em *quilowatts* para um fator de potência específico e uma tensão máxima de saída; corrente do campo e da armadura por fase; e aumento máximo de temperatura nos enrolamentos da armadura e do campo.