

4- O AEROGERADOR

4.1- Introdução

Para uma melhor compreensão do funcionamento de um aerogerador, primeiramente, precisamos saber que um aerogerador é um equipamento utilizado para converter a energia cinética do vento em energia elétrica. Essa conversão se dá pela movimentação da turbina, produzindo energia mecânica que é transmitida ao gerador, que por sua vez converte em energia elétrica. Os aerogeradores têm-se tornado populares rapidamente por ser uma fonte de energia renovável e não poluente.

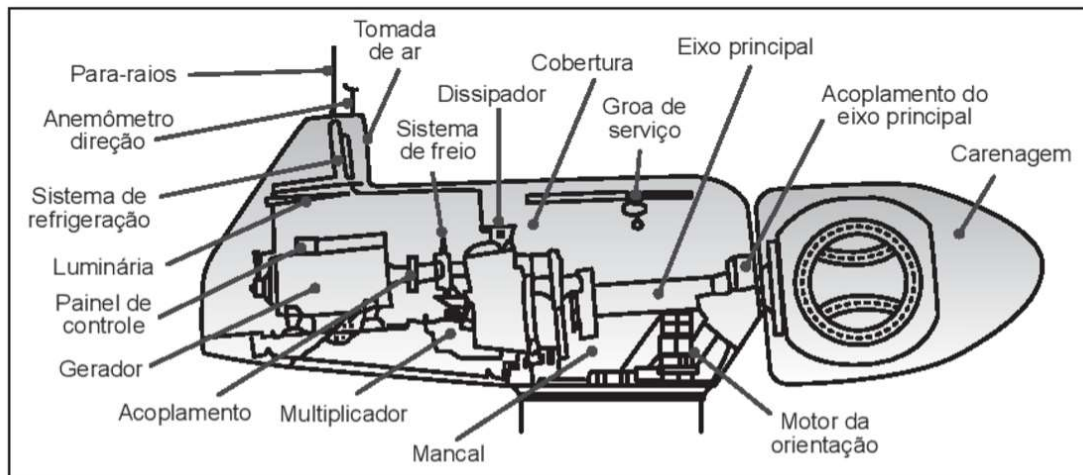
Neste capítulo os estudantes terão conhecimentos: dos principais componentes de um aerogerador utilizado em fazendas eólicas; do princípio de funcionamento de geradores elétricos e dos principais geradores utilizado em um aerogerador; de como é adequada a frequência da tensão gerada com a frequência da rede de energia elétrica com o uso de conversores eletrônicos de frequência; e por fim, o estudante conhecerá as principais classificações de um aerogerador segundo a operação de velocidade, tipos de gerador elétrico e conversor eletrônico de potência.

O conceito e a necessidade de descentralização na geração de energia elétrica, denominada geração distribuída, tem motivado as pesquisas para novas soluções de geração com ênfase para as energias limpas e renováveis, como é o caso da geração de energia elétrica a partir da energia eólica.

A evolução das técnicas utilizadas para a conversão da energia eólica em energia elétrica devido aos vastos trabalhos de pesquisa finalizados e em andamento, associada com o aumento anual do uso de energia elétrica em complexos industriais e nas expansões das áreas urbanas, direciona este tipo de geração de energia elétrica para uma das principais alternativas para a estabilidade do sistema elétrico brasileiro.

O equipamento responsável pela transformação da energia do vento em energia mecânica rotativa e posterior conversão em energia elétrica é o aerogerador. Destaca-se o conjunto denominado turbina eólica e o gerador de energia elétrica como sendo os componentes de maior destaque. Além destes, há outros componentes e subsistemas essenciais para a concepção de um aerogerador, conforme ilustrado na Fig. 26.

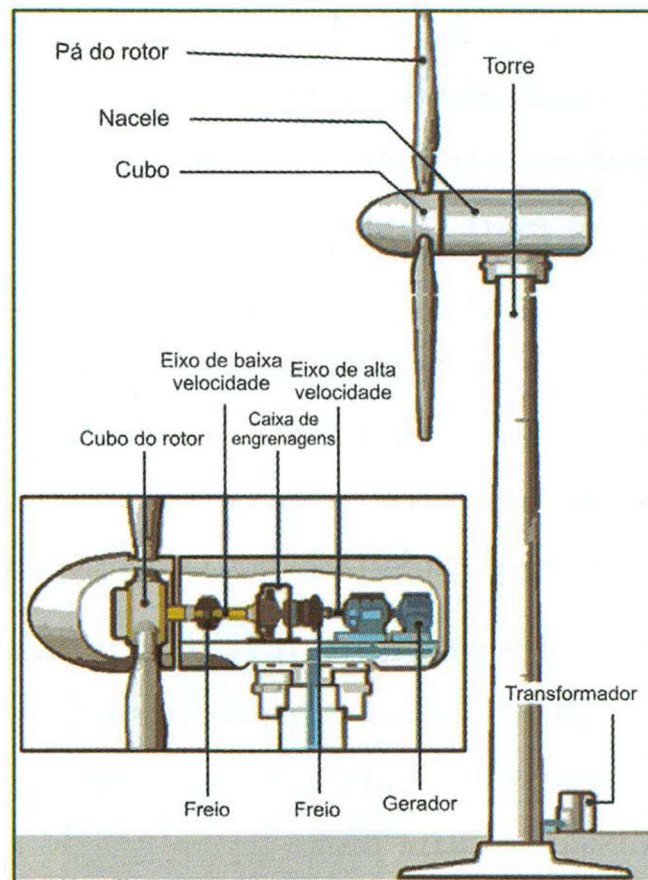
Fig. 26- Componentes e subsistemas de um aerogerador de eixo horizontal, em detalhes



Fonte: Macedo (2002).

Conforme mencionado, há outros componentes essenciais para a montagem de um aerogerador, veja ilustração da Fig. 27. Com o intuito de sistematizar o conteúdo descritivo desses componentes, na seção seguinte é subdividida em dois temas: o sistema mecânico e estrutural, e o sistema elétrico e de controle.

Fig. 27- Ilustração dos principais componentes de um aerogerador



Fonte: Energia Eólica, Ricardo Aldabó Lopes

4.2- Componentes do aerogerador

a. Sistema mecânico e estrutural

- Rotor – responsável por captar a energia presente nos ventos e iniciar as transformações de energias (cinética - mecânica - elétrica) com o auxílio de outros componentes. Se o rotor for de eixo horizontal, pode ser também denominado de rotor hélice, de pás múltiplas ou holandês. Caso contrário, o eixo é vertical e, neste caso, podem ser denominados como rotor Savonius e Darrieus. Atualmente, estima-se que as velocidades de operação destes rotores variam de 15 rpm a 200 rpm.
- Transmissão – após a captação da energia do vento é necessário transmiti-la mecanicamente para o gerador de energia elétrica e é exatamente esta a função do sistema de transmissão. Porém, esta transmissão não é direta na maioria das aplicações, uma vez que a maioria dos geradores opera com uma rotação de 1800 rpm. Deste modo, além da transmissão este mecanismo também é responsável pela multiplicação de velocidade no eixo do gerador de energia elétrica.
- Unidade hidráulica – composta por bombas e trocadores de calor tem a função de refrigerar e lubrificar o conjunto de transmissão, quando acionada pelo sistema de controle.
- Cubo – fabricado com material resistente e no formato de cubo, é a extremidade frontal do eixo da turbina. Nele são instaladas as pás.
- Pás – converte a energia cinética do vento em movimento rotacional através de seu perfil aerodinâmico apropriado para tal produção de energia mecânica. Através do controle de passo a aerodinâmica das pás, em relação ao vento, pode ser alterada, auxiliando no controle de velocidade.
- Nacele - estrutura externa para alocação e proteção dos elementos que constituem o aerogerador, tais como o mecanismo de transmissão e seus respectivos eixos de alta e de baixa rotação, o freio, o gerador e o controlador. Em função da potência do aerogerador, a nacele pode ter dimensões que possibilitam acesso de pessoas especializadas em seu interior.
- Freio – dispositivo de segurança que é acionado em condições emergenciais por dispositivos elétricos, mecânicos ou hidráulicos. São fabricados com material resistente, como o aço, e mantém o aerogerador parado caso não esteja em operação.
- Torre – designada para fixação e elevação do aerogerador para uma altitude na qual a velocidade e força do vento são maiores, pois estão livres de barreiras.

b. Sistema elétrico e de controle

- Gerador – atua na conversão da energia mecânica em energia elétrica. Os geradores mais comuns nas aplicações para o aproveitamento da energia eólica são: a máquina síncrona e a de rotor bobinado (conhecida como máquina duplamente alimentada). No caso de aplicações isoladas a máquina síncrona (gerador síncrono) é a mais comum e para aplicações com conexões na rede elétrica a máquina de indução assíncrona (gerador com rotor bobinado) é a mais comum.
- Medidores de vento – constituído de instrumentos que medem a direção e a velocidade do vento como, por exemplo, o anemômetro e a biruta. A montagem desses instrumentos é sobre a nacele e além de realimentar o controlador tais informações também são utilizadas para acompanhar o desempenho do aerogerador.
- Controle – a supervisão de todas as variáveis envolvidas no procedimento de aproveitamento da energia eólica é realizada pelo sistema de controle. As leituras das variáveis tais como a carga da bateria, o vento e rotação do motor são realizadas por sensores específicos. Além de simplesmente prevenir o excesso de velocidade (acima de 29 m/s) e de vibração quando ocorrem rajadas de ventos muito fortes, os controladores atuais têm a capacidade de aperfeiçoar a operação do aerogerador no que diz respeito à potência gerada, desgastes, vida útil e segurança, ao analisar constantemente as condições de operação do aerogerador.
- Orientação (yaw) – atuador responsável em manter a máxima incidência de vento na frente do cubo. O sistema de controle verifica o sentido do vento e aciona o motor que gira a nacele. Este movimento rotacional, na ausência de contatos deslizantes, deve ser lento, monitorado e limitado para que os cabos de alimentação e de sinais não se danifiquem, ou seja, a nacele pode ser acionada para girar nos dois sentidos.
- Transformador – dispositivo que compatibiliza ou ajusta o valor da tensão gerada com a rede elétrica de conexão do aerogerador e, neste caso, é aplicado o transformador elevador de tensão.

4.3- Geração de energia elétrica

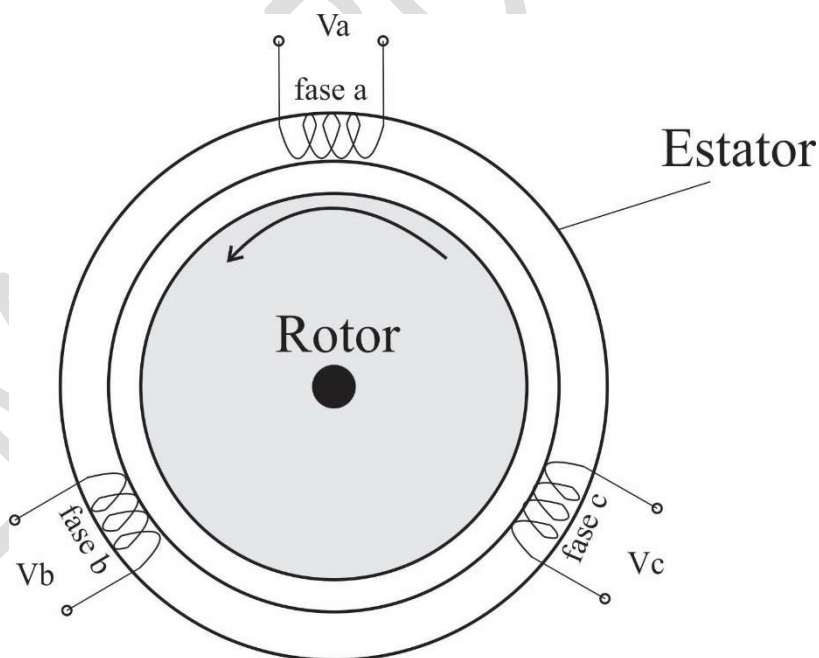
Os geradores são máquinas utilizadas para gerar eletricidade a partir da conversão da energia mecânica da turbina eólica em energia elétrica. O princípio físico de funcionamento de qualquer gerador elétrico (ou máquinas elétricas) é a força eletromotriz produzida pela variação de um campo magnético, conforme explicado pela lei de indução de Faraday. Em aerogeradores, o eixo do gerador elétrico pode ser acoplado diretamente ao rotor do aerogerador ou na saída da caixa de engrenagem, caso seja necessário aumentar a velocidade. Na maioria das tecnologias é necessário o uso da caixa de transmissão para adequação da velocidade entre

o eixo da turbina, que gira em baixa velocidade e o eixo do gerador que necessita de uma rotação maior. No entanto, as tecnologias baseadas em aerogeradores com geradores síncronos de ímãs permanentes podem eliminar a necessidade da utilização de uma caixa de transmissão, pois permite uma construção com maiores números de polos, e com isso necessita de uma rotação menor no seu eixo.

a. Princípio de Funcionamento

O princípio de funcionamento da geração de energia elétrica está na interação entre o campo magnético variável produzido pelo rotor com as bobinas do estator. Ao girar o rotor do gerador, a intensidade do campo magnético, que inicialmente é estacionário, irá variar no tempo entre os enrolamentos do estator, que por sua vez induz tensão alternada aos seus terminais. O valor dessa tensão depende basicamente do número de espiras das bobinas e do fluxo magnético do campo. A Fig. 28 apresenta uma ilustração da ligação das bobinas para geração das tensões trifásicas que é mais comum nos aerogeradores, independentemente do tamanho.

Fig. 28- Ligação das bobinas para geração das tensões trifásicas



Fonte: Autor

Há duas maneiras de produzir campo magnético no rotor: aplicando uma tensão de excitação nas bobinas do rotor, caso o rotor seja construído por bobinas em conjunto de anéis coletores e escovas, ou, produzido por conjuntos de ímãs permanentes (o que é mais comum

em geradores de pequeno e médio porte). A produção de campo magnético com bobinas, é mais comum nos geradores de grande potência

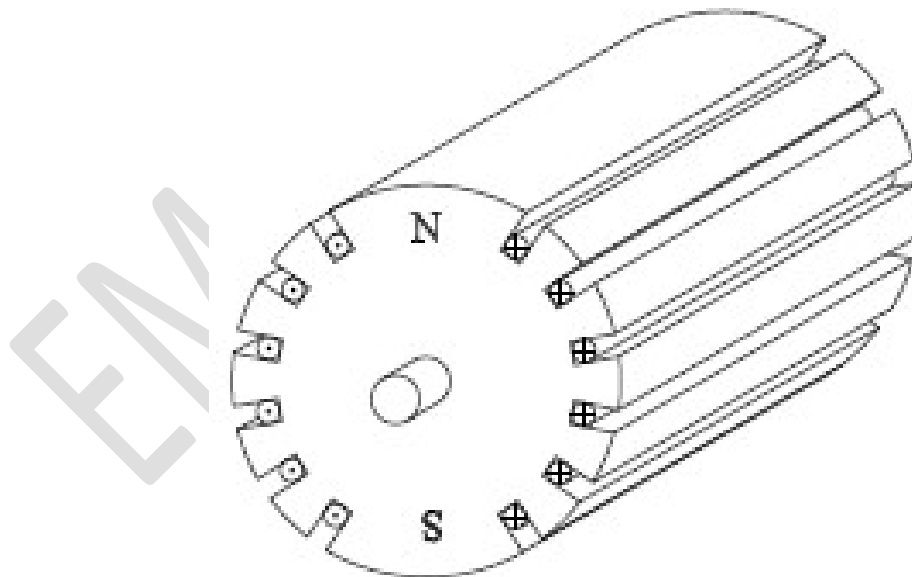
Hoje em dia, a conversão da potência mecânica da turbina eólica em elétrica é realizada por dois principais tipos de geradores elétricos:

- Geradores síncrono;
 - Com rotor de ímãs permanentes
 - Com rotor de bobinas de excitação alimentado com tensão contínua;
- Geradores assíncronos.
 - Com rotor gaiola de esquilo;
 - Com rotor bobinado alimentado com tensão alternada;

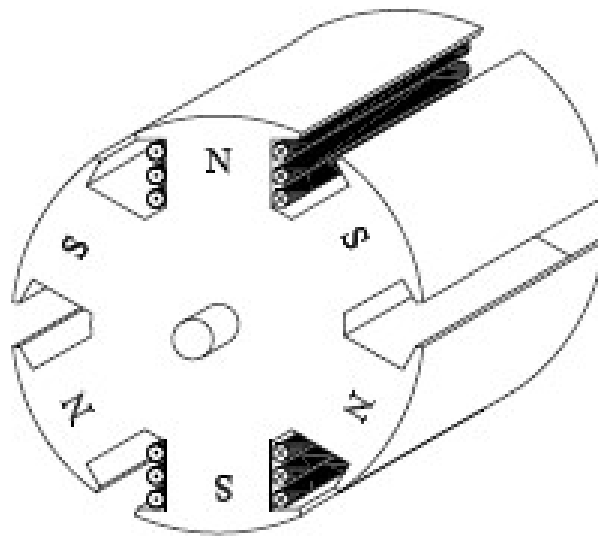
4.3.1- Gerador síncrono

A construção dos enrolamentos do estator dos geradores síncrono e de indução são idênticos, no entanto os seus rotores diferem entre si tanto na forma geométrica quanto no tipo de enrolamento: o rotor do gerador de indução é cilíndrico com enrolamento polifásico; já o rotor do gerador síncrono com bobinas de excitação pode ser de pólos lisos ou de pólos salientes, conforme ilustrada na Fig. 29.

Fig. 29- Rotor do gerador síncrono



(a) Pólos lisos



(b) Pólos salientes

Fonte: Máquinas elétricas e acionamento, Edson Bim

O gerador síncrono produz energia elétrica nos enrolamentos do estator através de campo magnético criado pelo rotor através de ímãs permanentes ou de excitação com corrente contínua nas bobinas. O nome síncrono é devido sua velocidade de rotação do eixo ser fixa e sincronizada com a frequência da tensão de alimentação da rede. A frequência em Hz (Hertz) da tensão gerada depende do número de pares de bobinas do estator, normalmente denominado por polos “P” e, da velocidade que o rotor do gerador “ N_r ” é submetido. A sua expressão é a seguinte:

$$f = \frac{P N_r}{2 \cdot 60} \quad (43)$$

Onde:

P é o número de pólos;

N_r é a velocidade do rotor em RMP.

Exemplo 4.1

Abaixo é apresentado uma tabela exemplificando uma situação em que a rede é de 60 Hz e a partir de um numero de polos qual a velocidade de operação do gerador.

Resposta:

Nº Polos	4	8	12	24	48	72
N_r (rpm)	1800	900	600	300	150	100

Portanto, antes de fazer a conexão à rede é necessário gerar uma tensão de mesma amplitude da rede e com mesma frequência. Para isso, como já são conhecidos o número de pares de polos e a frequência da rede que o gerador irá se conectar, é fundamental controlar a velocidade do rotor para gerar uma frequência de sincronismo.

Geradores síncronos com rotor de ímãs permanentes

Em um gerador síncrono com ímãs permanentes apresenta uma eficiência maior que as máquinas em que o rotor bobinado ou gaiola de esquilo, uma vez que a excitação do rotor não é fornecida por nenhuma fonte ou por indução. No entanto, há algumas desvantagens, como: sua aplicação exigir o uso de um conversor eletrônico de potência para ajustar a tensão e frequência do gerador para a tensão da rede elétrica, pois, isso exige gasto adicional; uma máquina a ímã permanente são mais caras e os materiais magnéticos são sensíveis à temperatura, o que faz perder suas qualidades magnéticas a altas temperaturas, assim, a temperatura tem que ser supervisionada e é necessário um sistema de resfriamento.

Um dos benefícios é que a potência pode ser gerada a qualquer velocidade, pelo fato de usar o conversor eletrônico de potência, ao ajustar as condições das correntes. Outro benefício importante é o fato de ser projetado com polos salientes e com elevado número de polos, permitindo assim a operação do gerador em baixa velocidade.

Geradores síncronos com rotor de bobinas de excitação alimentado com tensão contínua

O Gerador síncrono possui um estator com enrolamento trifásico, denominado enrolamento de armadura. O rotor é construído por bobinas de excitação e de anéis coletores usados para permitir a passagem da corrente elétrica que é fornecida por um excitador polifásico, esse tipo de gerador é muito aplicado em usinas hidroelétricas.

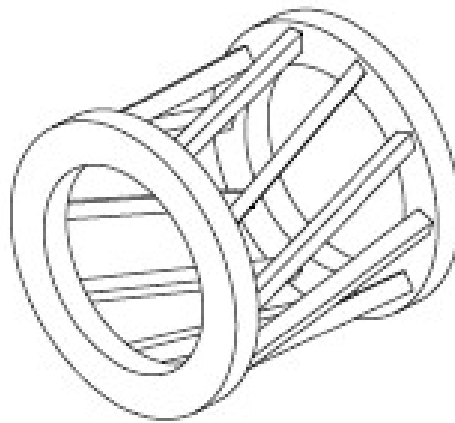
Pelo fato de controlar a corrente elétrica que flui pelo enrolamento do rotor é possível gerar um campo excitador que gira com velocidade síncrona, permitindo assim um controle do fator de potência e com isso não há necessidade de nenhum sistema de compensação de potência reativa, diferentemente do gerador de indução gaiola de esquilo.

4.3.2- Gerador assíncrono

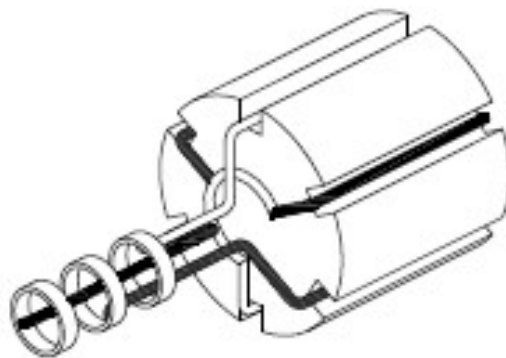
Há dois tipos de gerador de indução:

- Gaiola de esquilo: o rotor é composto de barras de material condutor localizados em volta do conjunto de chapas do rotor que são curto-circuitadas por anéis metálicos nas extremidades, Fig. 30 (a);
- Rotor bobinado: o rotor é composto de um enrolamento trifásico distribuído em torno do conjunto de chapas do rotor, Fig. 30 (b).

Fig. 30- Rotor do gerador de indução



(a) Rotor gaiola de esquilo



(b) Rotor com enrolamento trifásico bobinado

Fonte: Máquinas elétricas e acionamento, Edson Bim

Gerador assíncrono com rotor gaiola de esquilo

O gerador assíncrono ou de indução com rotor gaiola de esquilo, como também é conhecido, só produz energia elétrica quando a velocidade do rotor é mais rápida que a velocidade síncrona (velocidade do campo girante do estator). Para um gerador típico de quatro polos (dois pares de polos no estator) operando em uma rede elétrica de 60 Hz, sua velocidade síncrona é de 1800 rotações por minuto. Na operação do gerador, uma turbina deve acionar o rotor do gerador acima da velocidade síncrona. Nesta condição, o fluxo do estator induz

correntes no rotor, mas como o fluxo de rotor que se opõem está cortando as bobinas do estator, uma potência ativa é produzida nas bobinas do estator, assim se produz energia elétrica enviando à rede elétrica.

A diferença da velocidade síncrona com a velocidade do rotor é conhecida como escorregamento, que opera numa pequena faixa negativa entre 0,2 e 0,5% para diferentes potências dos geradores comerciais. A expressão que estabelecida para o escorregamento é a seguinte:

$$s_{\%} = \frac{(\omega_s - \omega_N)}{\omega_s} \cdot 100 \quad (44)$$

Onde:

ω_s : é a velocidade do campo girante em rpm

ω_N : é a velocidade de rotação do eixo do rotor em rpm

A velocidade síncrona do rotor de um gerador de indução depende da frequência da rede e dos números de polos, dado por:

$$\omega_N = \frac{120f}{P} \quad (45)$$

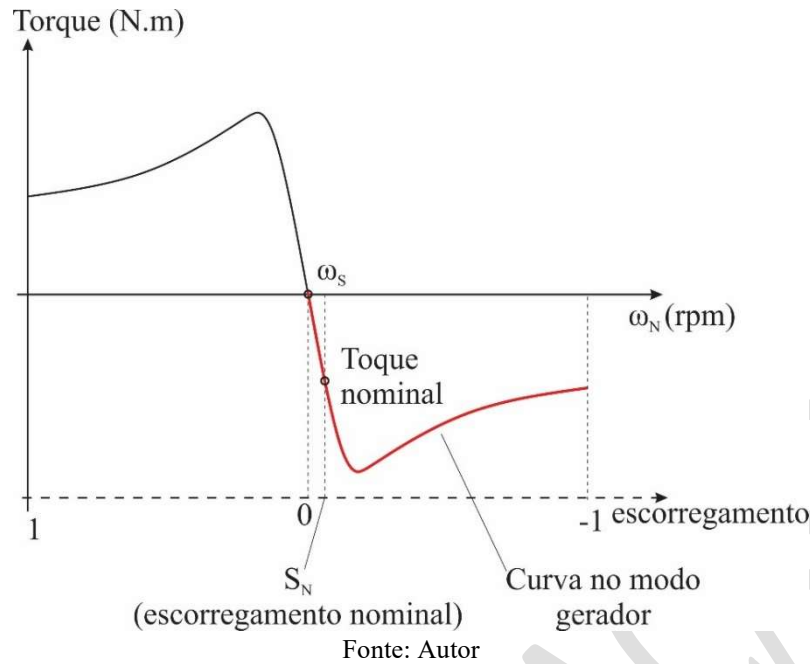
Onde:

f : é a frequência da rede em Hz;

P : é o número de par de polos.

A potência gerada pelo gerador é proporcional ao torque de um gerador de indução que é função da velocidade (escorregamento). Na Fig. 30 apresenta esta característica. Verifica-se que para escorregamento zero o gerador não produz torque, só irá produzir em uma faixa linear de escorregamento que fica entre 0 e 0,5%. Em grande potência o escorregamento pode chegar a 1%. Uma característica importante a eficiência elétrica ser em função do escorregamento.

Fig. 31- Rotor do gerador de indução



Exemplo 4.2

Sabendo que a frequência da tensão gerada de um gerador elétrico assíncrono gaiola de esquilo é de 60 Hz e o número de pares de polos de bobinas do estator é 36 opera com escorregamento de 1%, qual é sua velocidade síncrona e a velocidade de rotação de operação?

Resposta

- velocidade síncrona

$$\omega_N = 120 \frac{f}{P} = 120 \times \frac{60}{36} = 200 \text{ rpm}$$

- velocidade de rotação de operação

A partir da eq. (44), obtemos a seguinte equação para determinar a velocidade de rotação de operação.

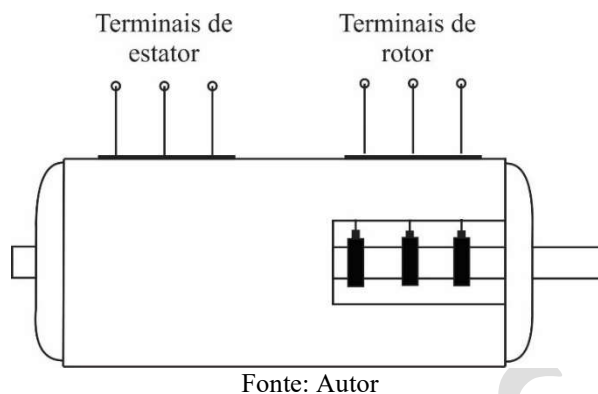
$$\omega_N = \omega_s - \frac{s(\%) \omega_s}{100} = 198 \text{ rpm}$$

Gerador assíncrono com rotor bobinado

A estrutura desse gerador como ilustrada na Fig. 32 consiste em enrolamento trifásicos tanto no estator como no rotor, e pelo fato de aplicarmos tensão em ambos enrolamentos o gerador é conhecido como gerador de indução duplamente alimentado. O fato da corrente e frequência do rotor ser controla possibilita a operação como gerador nas velocidades abaixo da síncrona, acima da síncrona e na velocidade síncrona, diferentemente do gerador de indução gaiola de esquilo que a operação é apenas na velocidade acima da síncrona. Além dessa vantagem, o uso do gerador de indução duplamente alimentado vem ganhando espaço em

aplicação em turbinas de velocidade variável, pelo fato da alimentação nas bobinas do rotor amplia possibilidade do controle das potências ativa e do fator de potência.

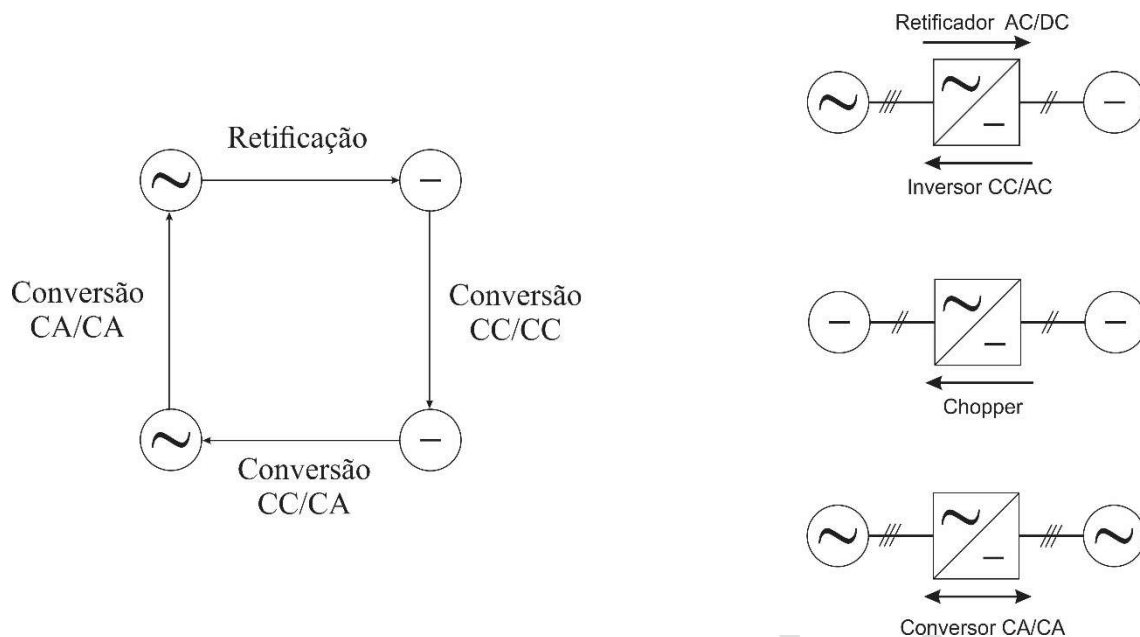
Fig. 32- Gerador assíncrono com rotor bobinado



4.4- Condicionamento de potência

Devido ao aumento das turbinas eólicas de velocidade variável instalada em sistemas de distribuição de energia elétrica, surgiu várias tecnologias de conversores eletrônicos de potências para melhorar a eficiência e o controle do fluxo de energia do gerador para a rede de energia elétrica. Como a frequência elétrica da tensão gerada varia com a rotação do gerador elétrico, na qual varia com a rotação da turbina eólica que por sua vez com a velocidade do vento. Assim, é preciso adequar a frequência da tensão gerada com a frequência da rede de energia elétrica. Tornando, necessário um controle da frequência elétrica. Além disso, como é possível o controle da amplitude da tensão/corrente de saída e do fator de potência, controla-se essas variáveis para melhorar a performance e eficiência do aerogerador. Para esta finalidade mencionada, várias configurações de conversores de potência foram desenvolvidas por fabricantes de turbinas eólicas e suas empresas de suporte de conversão de energia. A classificação de conversores de potência de última geração é de um assunto complexo e não é possível classificar todos os conversores baseados em um parâmetro/operação. Para diferentes aplicações necessitam de diferentes configurações de conversores, a Fig. 33 ilustra as tarefas realizada pelos conversores:

Fig. 33- Tarefas realizada pelos conversores



Fonte: Autor

Os conversores eletrônicos de potência possuem dispositivos semicondutores que funcionam em comutação, ou seja, se estiver alternadamente em cada um dos dois estados: estado de condução (ON, ou estado ligado) ou; estado de corte (OFF, ou estado desligado). A comutação pode ser controlada ou não: são controladas caso os dispositivos sejam os tiristores, transistores bipolares IGBTs etc.; não controlada caso do diodo.

4.5- Classificação dos aerogeradores

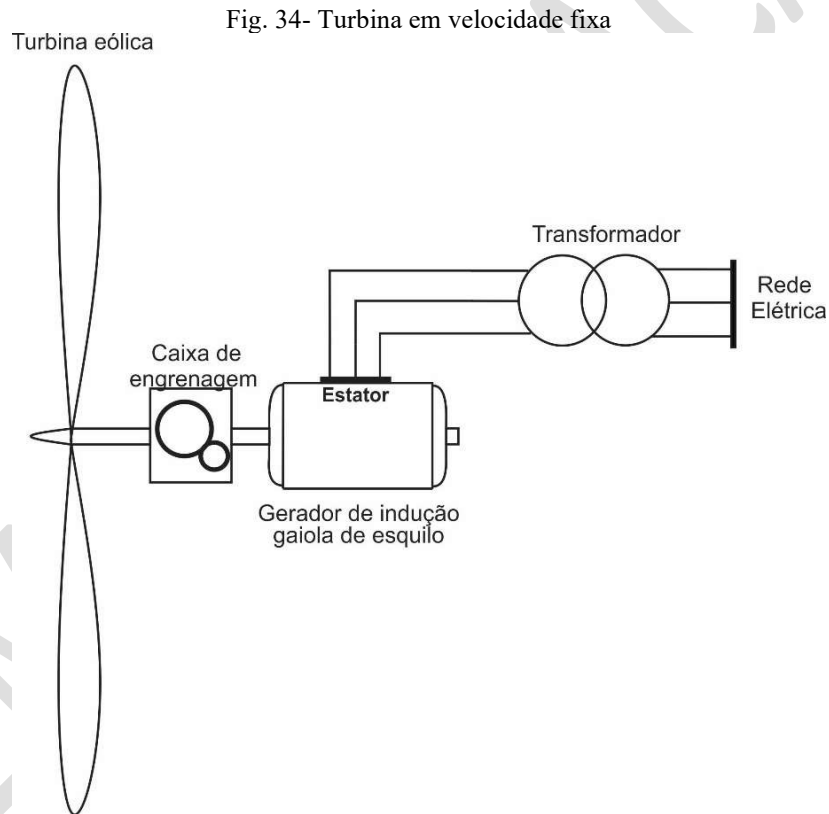
Os aerogeradores podem ser classificados em dois tipos segundo sua operação de velocidade -- turbina de velocidade fixa e velocidade variável -- e subdivididas nos tipos do gerador elétrico apresentado, e também, no tamanho associado aos conversores eletrônicos de potências -- conversores operando com potência total ou parcial do gerador --, abaixo são apresentados os principais conceitos existentes atualmente no mercado:

- Aerogeradores de velocidade fixa, com:
 - I. Gerador de indução sem conversor eletrônico de potência;
- Aerogeradores de velocidade variável, com:
 - II. Gerador síncrono de excitação na bobina com conversor eletrônico de potência operando com a potência total do gerador;
 - III. Gerador síncrono de ímã permanentes com conversor eletrônico de potência operando com a potência total do gerador;
 - IV. Gerador de indução gaiola de esquilo com conversor eletrônico de potência operando com a potência total do gerador;

- V. Gerador de indução duplamente alimentado com conversor eletrônico de potência operando com a potência parcial do gerador;

4.5.1- Aerogeradores de velocidade fixa

Este tipo de turbina se baseia no conceito inicial dinamarquês que operava a turbina em velocidade fixa, sendo esta a mais antiga. Sua construção, utiliza-se uma caixa de transmissão acoplada a um gerador de indução em gaiola de esquilo conectado diretamente a rede de energia elétrica através de um transformador, como ilustrado na Fig. 34. A conexão direta do gerador à rede elétrica é fixada a velocidade do gerador que é determinada pela frequência da rede e seu número de polos. Portanto, a velocidade do eixo da turbina é mantida fixa, podendo variar estreitamente na faixa de escorregamento da região linear de torque da máquina de indução.



Fonte: Autor

Em operação de velocidade fixa ocorre uma perda de eficiência durante o funcionamento da turbina nas diferentes velocidades do vento além de surgimento de oscilações de conjugados que causa estresse mecânico em todo o sistema e problemas de qualidade de energia. No entanto, esse tipo de aerogerador possui vantagens por possuir baixo custo e ser relativamente robusto.

4.5.2- Aerogeradores de velocidade variável

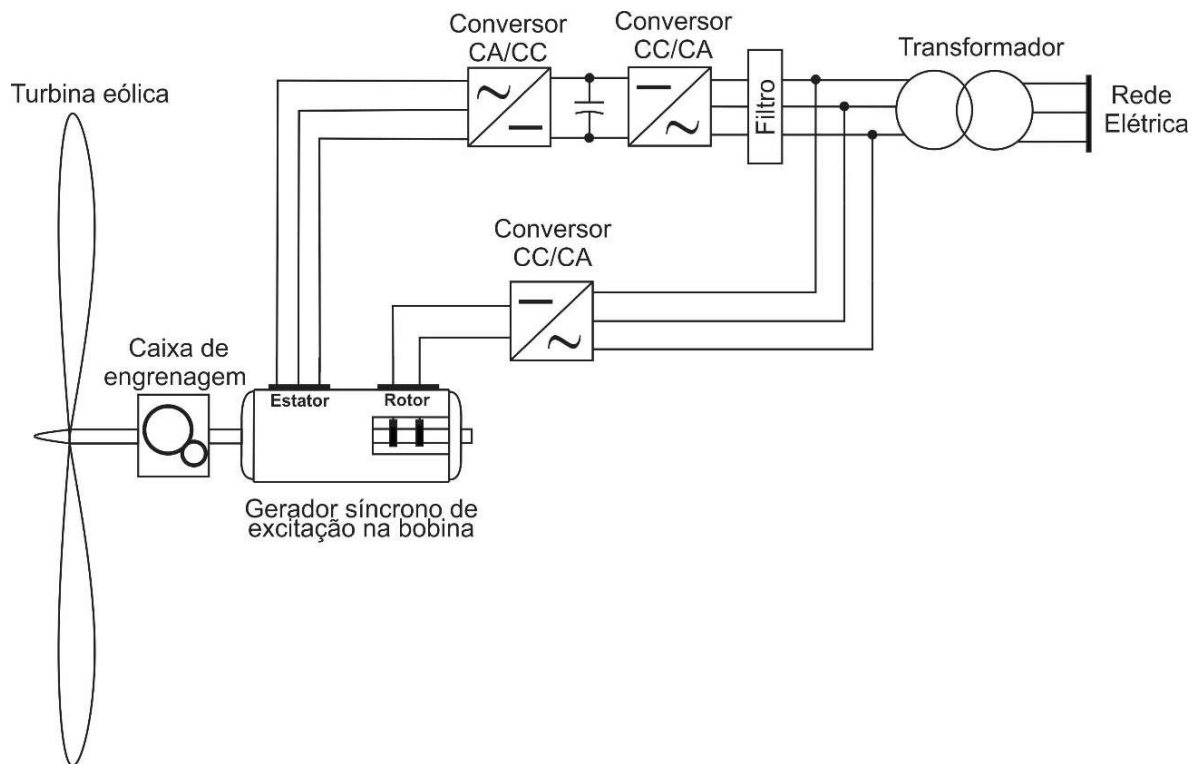
As turbinas de velocidade variável hoje em dia são os mais utilizados e representam a grande maioria no mercado. Esse tipo de turbina utiliza, predominantemente, geradores síncrono ou assíncrono, já que permite projetos para operar com a máxima eficiência em função de uma faixa ampla de variação da velocidade do vento. Assim, é possível um aproveitamento da energia gerada em cerca de 20% a 30% a mais, quando comparada com turbina de velocidade fixa. Portanto, as vantagens das turbinas eólicas projetadas com o conceito de velocidade variável são:

- Minimização dos estresses mecânicos causados pelas variações de velocidades do vento, pois são absorvidos pela inércia mecânica da turbina;
- Maior eficiência na extração da potência do vento, proporcionado pelo ajuste contínuo da velocidade rotacional da turbina;
- Possibilidade de operar em baixas velocidades, o que reduz o nível de ruídos acústicos.

Gerador síncrono de excitação na bobina com conversor eletrônico de potência operando com a potência total do gerador

Nessa classificação, o gerador é conectado à rede elétrica através de um conversor eletrônico de potência CA-CC-CA e também de uma excitatriz por conversor CA-CC controlado que permite o controle do fator de potência, sua topologia é ilustrada na Fig. 35.

Fig. 35- Gerador síncrono de excitação na bobina com conversor eletrônico de potência operando com a potência total do gerador



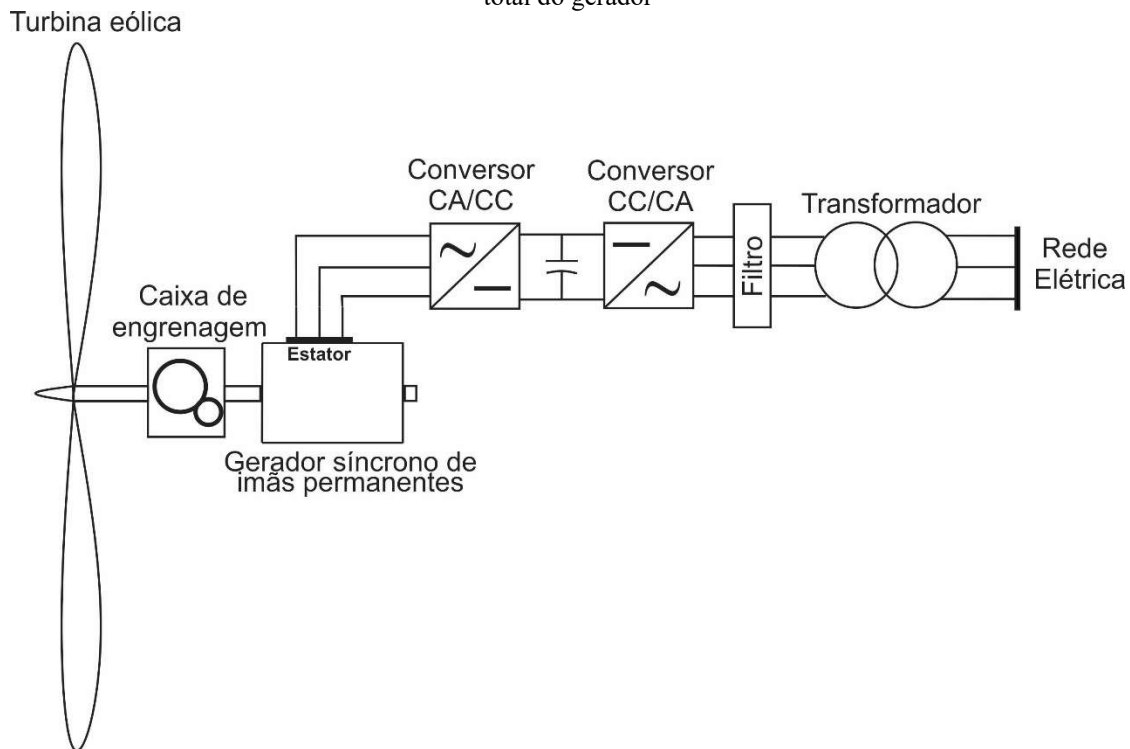
Fonte: Autor

Esse tipo de gerador também permite ser projetado com grandes números de polos, evitando assim o uso de caixas de engrenagens. No entanto, com o aumento do tamanho da turbina, a dimensão de sua dimensão e estrutura de montagem aumenta consideravelmente, além disso há necessidade da manutenção dos anéis e escovas coletoras, o que caracteriza uma desvantagem em relação aos geradores projetados com menos números de polos e sem excitação no rotor.

Gerador síncrono de imã permanentes com conversor eletrônico de potência operando com a potência total do gerador

O Gerador Síncrono a imãs Permanentes, é conectado à rede elétrica através de um conversor eletrônico de potência CA-CC-CA utilizando sistemas de controles avançados, conforme apresentado na Fig. 36. Este tipo de gerador, por poder ser projetado com elevados números de polos, que permite a conexão do eixo da turbina diretamente ao gerador síncrono, evitando, assim, o uso da transmissão de caixas de engrenagens, minimizando assim problemas e manutenção de origem mecânicas.

Fig. 36- Gerador síncrono de imã permanentes com conversor eletrônico de potência operando com a potência total do gerador

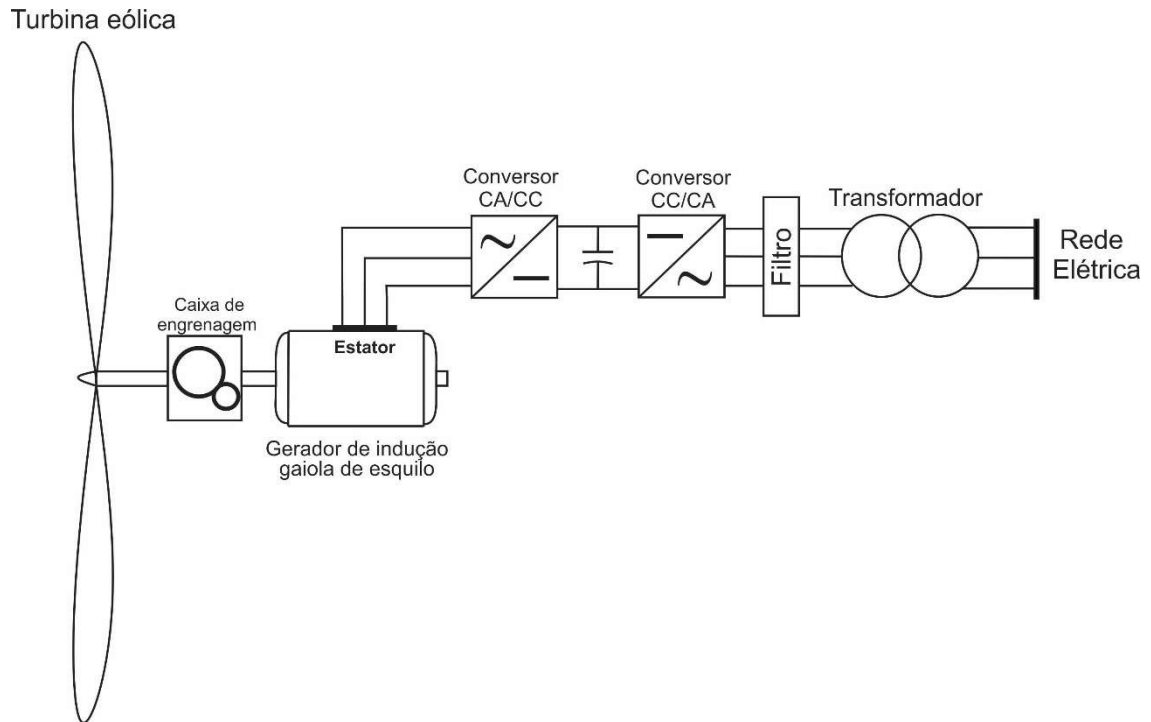


Fonte: Autor

Gerador de indução gaiola de esquilo com conversor eletrônico de potência operando com a potência total do gerador

Como nos Gerador Síncrono a ímãs Permanentes, o gerador de indução é conectado à rede elétrica através de um conversor eletrônico de potência CA-CC-CA utilizando sistemas de controles avançados. O gerador de indução tem como vantagem com relação aos anteriores, de ser mais robusto e de baixo custo pois não necessita de excitação de campo devido a produção do campo do rotor ser por indução. A Fig. 37 apresenta sua configuração.

Fig. 37- Gerador indução gaiola de esquilo com conversor eletrônico de potência operando com a potência total do gerador

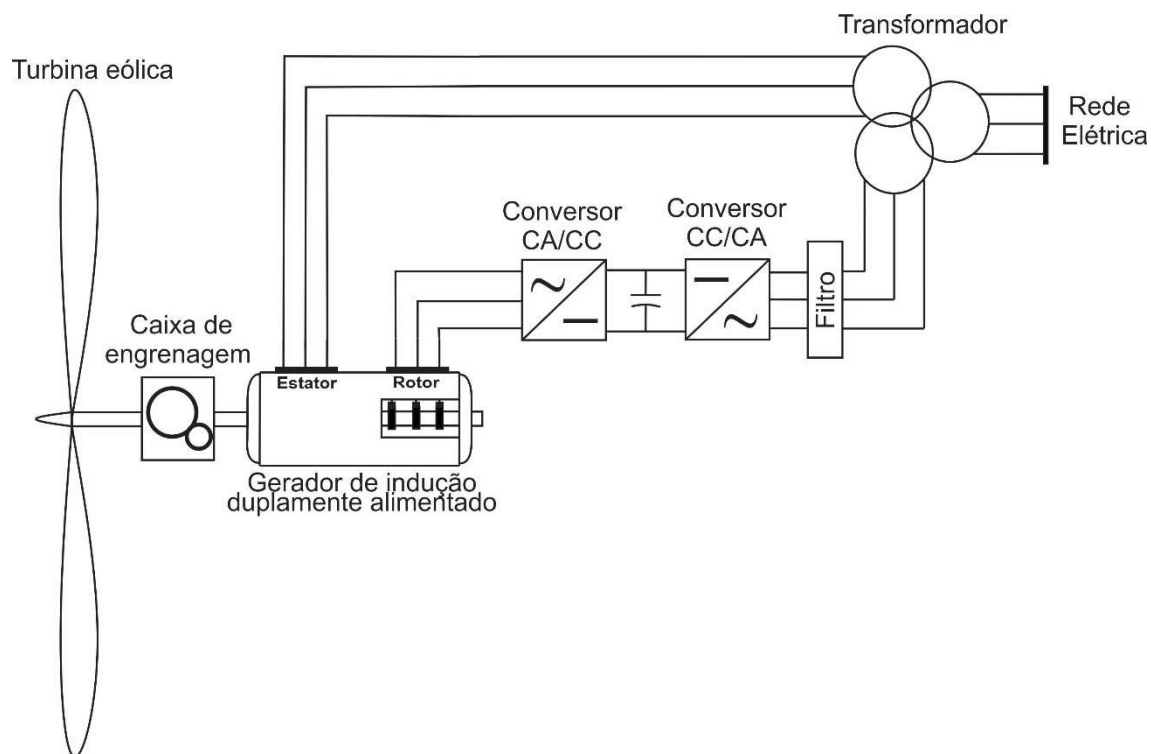


Fonte: Autor

Gerador de indução duplamente alimentado com conversor eletrônico de potência operando com a potência parcial do gerador

O Gerador de indução duplamente alimentado tem se tornado um dos geradores mais utilizados no mercado em aplicações de turbina eólica de grande potência por operar com velocidade variável e por possibilitar o controle das potências ativa e reativa do estator a partir de uma pequena potência no circuito de rotor. Nesta configuração, os enrolamentos do estator são conectados diretamente à rede trifásica enquanto os enrolamentos de rotor são alimentados por um conversor de potência bidirecional (normalmente usa um conversor back-to-back) que é projetado para suportar aproximadamente $\pm 30\%$ da potência nominal da máquina. Assim o custo do conversor torna baixo comparado aos sistemas onde o conversor tem que suportar a potência total da máquina. A Fig. 38 apresenta sua configuração.

Fig. 38- Gerador de indução duplamente alimentado com conversor eletrônico de potência operando com a potência parcial do gerador



Fonte: Autor

Resumo das classificações de aerogeradores

As principais vantagens e desvantagens dos cinco conceitos apresentados neste tópico, são resumidas na Tabela a seguir:

Tabela 9. Vantagens e desvantagens dos principais conceitos de aerogerador existente no mercado.

Conceito	Vantagens	Desvantagens
I	<ul style="list-style-type: none"> - Fácil de projetar; - Operação robusta; - Baixo custo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Baixo aproveitamento de energia; - Sem controle das potências ativa e reativa; - Alto stress mecânico; - Alta perda mecânica nas engrenagens.
II	<ul style="list-style-type: none"> - Apresenta o melhor rendimento de todas tecnologias; - Controle das potências ativa e reativa; - Ausência de escovas/enrolamento no rotor; - Sem caixa de engrenagem; - Baixo estresse mecânico; 	<ul style="list-style-type: none"> - Elevado custo do material magnético; - Desmagnetização do ímã permanente com o tempo; - Processo complexo de construção; - Maior custo e perdas dos conversores de potência;
III	<ul style="list-style-type: none"> - Alto rendimento de energia; - Controle das potências ativa e reativa; - Sem caixa de engrenagem; - Baixo estresse mecânico; 	<ul style="list-style-type: none"> - Maior custo do enrolamento do cobre; - Maior custo e perdas dos conversores de potência; - Manutenção dos anéis e escovas dos enrolamentos do rotor; - Maior custo e perdas dos conversores de potência; - Tamanho grande do gerador.
IV	<ul style="list-style-type: none"> - Alto rendimento de energia; - Controle das potências ativa e reativa; - Operação robusta; 	<ul style="list-style-type: none"> - Maior custo e perdas dos conversores de potência; - Alta perda mecânica nas engrenagens.

	- Baixo estresse mecânico;	
V	-Alto rendimento de energia; -Controle das potências ativa e reativa; -Baixo custo dos conversores de potência; -Baixa perda nos conversores de potência; -Menos estresse mecânico;	- Maior custo do enrolamento do cobre; -Manutenção dos anéis e escovas dos enrolamentos do rotor; - Alta perda mecânica nas engrenagens. -Tamanho grande do gerador.

EM ELABORAÇÃO

Exercícios

- 4.1 - O aerogerador é um equipamento para qual finalidade? Quais os seus componentes de maior destaque?
- 4.2 - Descreva os componentes e subsistemas essenciais para a concepção de uma aerogerador?
- 4.3 - Descreva qual a utilidade de um gerador elétrico? No aerogerador, onde é acoplado o gerador elétrico?
- 4.4 - Qual a funcionalidade da caixa de engrenagem?
- 4.5 - Quais são os dois principais tipos de geradores elétricos?
- 4.6 - Qual a velocidade de operação do gerador elétrico do exercício anterior, caso a quantidade de números de pares de polos de uma bobina mude de 72 para 4.
- 4.7 - Descreve as vantagens e desvantagens do gerador síncrono com rotor de ímãs permanente em relação ao gerador de indução gaiola de esquilo.
- 4.8 - Como é conhecida a diferença da velocidade síncrona com a velocidade do rotor?
- 4.9 - Qual é a faixa de escorregamento que um gerador de indução gaiola de esquilo produz torque/potência?
- 4.10- Qual a necessidade da utilização de conversores eletrônicos de potências? Cite quais as configurações de conversores.
- 4.11 Cite os tipos de turbina eólica para classificação de aerogeradores, segundo sua operação de velocidade.
- 4.12- Cite os principais conceitos existentes atualmente no mercado de aerogeradores, segundo a operação de velocidade, geradores elétricos e conversores eletrônicos de potência.

Para pensar um pouco mais

1. Sabendo que a frequência da tensão gerada de um gerador elétrico de indução gaiola de esquilo é de 60 Hz e o número de pares de polos de bobinas do estator é 72, operando com escorregamento de 0,5%, determine qual a velocidade de operação.

2. O objetivo do aerogerador é converter a energia mecânica do vento em energia elétrica. Neste exercício, vai estudar-se o gerador assíncrono de um aerogerador instalado no seio de um parque eólico de 7,5 MW de potência total. Os aerogeradores funcionam a velocidade constante, o gerador está ligado à rede. Vai determinar-se a potência, a velocidade de rotação do gerador e o seu esquema equivalente. Os aerogeradores estão equipados com multiplicadores. Calcular a potência elétrica à saída do gerador e a velocidade de rotação do gerador, sabendo que o multiplicador utilizado tem uma relação de 46,48 e um rendimento de 96% e que as pás da turbina rodam a 32,5 rpm. As perdas associadas ao gerador são desprezáveis.

Admitem-se os seguintes dados:

$V = 15$ m/s, velocidade nominal do vento, admitida constante
 $N = 32,8$ rpm, velocidade nominal da turbina do aerogerador
, massa do ar
 $C_p = 0,27$, coeficiente aerodinâmico
 $R = 21,7$ m, raio das pás

5- REFERÊNCIAS

1. [Dewi] DEUTSCHES WINDENERGIE – INSTITUT GMBH. **Curso Informativo de Energia Eólica**. Rio de Janeiro, 2001.
2. ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. Agência Nacional de Energia Elétrica, 2 ed., Brasília, 2005.
3. BARROS, Pedro Körner de Souza. **Metodologia para cálculo de perdas elétricas em sistemas com geração eólica**. 2016. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
4. BIM, Edson. **Máquinas elétricas e acionamento**. 3. ed. Elsevier – Campus, 2014.
5. BRACKMANN, R. et al. Avaliação do potencial eólico do sul do Brasil. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO INPE (SICINPE), 2. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 88. CD-ROM; Papel; On-line. IBI: 8JMKD3MGP8W/35S9P5H. (INPE-16457-PRE/11035). Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/35S9P5H>>. Acesso em: 05 maio 2018.
6. BURTON, Tony et al. **Wind Energy Handbook**. Londres: John Wiley & Sons, 2001.

7. CAVALARI, Gabriel Margato. **Avaliação de perdas elétricas devido ao ponto de interconexão do sistema de geração eólica na rede elétrica**. Juiz de Fora, Universidade Federal de Juiz de Fora. 2016.
8. ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **MECÂNICA DOS FLUIDOS: FUNDAMENTOS E APLICAÇÕES**. 7. ed. São Paulo: Mc Graw Hill, 2011.
9. COGO, João Roberto; JÚNIOR, Ângelo Stano; PONZETTO, Evandro Santos. Análise e determinação das perdas no ferro do estator em motores de indução trifásico. **Revista Eletricidade Moderna**. Ano XXVI, nº295 – Outubro de 1998 – páginas 191 à 197.
10. COSTA, G. B.; LYRA, R. F. D. F. Análise dos padrões do vento no estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, n. 1, p. 31-38, 2012. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbmet/v27n1/a04v27n1>>. Acesso em: 08 abr. 2018.
11. CUSTÓDIO, R. D. S. O vento. In: CUSTÓDIO, R. D. S. **ENERGIA EÓLICA PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**. 1. ed. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2009. p. 17-39.
12. DANISH WIND INDUSTRY ASSOCIATION. **Wind Energy Reference Manual**. Disponível em <http://guidedtour.windpower.org/en/tour/wres/variab.htm>. Acessado em: mar. 2010.
13. ESTUDO dos ventos. **Micro Eólica**. Disponível em: <<https://microeolica.weebly.com/vento.html>>. Acesso em: 15 abril 2018.
14. FADIGAS, Eliane A. Faria Amaral. **Energia eólica**. Manole, 2011.
15. GARCÍA, F. H. **Análise Experimental e Simulação de Sistemas Híbridos Eólico-Fotovoltaicos**. Porto Alegre: UFRGS, 2004. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/4569>>.
16. GURIT, WE HANDBOOK – 3. **Wind Turbine Blade Structural Engineering**. 2013a.
17. HANSEN, Martin O. L. **Aerodynamics of Wind Turbines**. Earthscan, 2 ed, UK, 2008.
18. HEMANE, Ahmad. **Wind Turbine Technology**. Cengage Learning, 2012.
19. Lopez, Ricardo A. **Energia Eólica**. Artliber Editora, 2. ed., 2012.
20. MACEDO, Wilson Negrão. **Estudo de sistemas de geração de eletricidade utilizando as energias solar fotovoltaica e eólica**. Belém, PA. Dissertação de Mestrado em

- Engenharia Elétrica. Campus Universitário do Guamá. Universidade Federal do Pará-UFPA. Fevereiro, 2002.
21. MANWELL, James F. et al. **Wind energy explained: theory, design and application**. Londres: John Wiley & Sons, 2004.
22. MARTINS, F. R.; GUARNIERI, R. A. P. E. B. O aproveitamento da energia eólica. **Revista Brasileira de Ensino da Física**, v. 30, n. 1, 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172008000100005>. Acesso em: 08 Abril 2018.
23. MASTERS, G. M. Renewable and Efficient Electric Power Systems. In: MASTERS, G. M. **WIND POWER SYSTEMS**. 1. ed. New Jersey: Wiley-IEEE Press, 2004. Cap. 6, p. 306-323. ISBN ISBN 0-471-28060-7.
24. NATIONAL Aeronautics and Space Administration – NASA. **Earth's Atmospheric Layers**, 2017. Disponível em: <https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/science/atmosphere-layers2.html>. Acesso em: 05 Maio 2018.
25. PICOLOI, A. P.; RÜHLER, A. J.; RAMPINELLI, G. A. Uma abordagem sobre a energia eólica como alternativa de ensino de tópicos de física clássica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 36, n. 4, p. 1-13, Dez 2014. ISSN ISSN 1806-1117.
26. PINTO, M. O vento. In: PINTO, M. D. O. **Fundamentos de Energia Eólica**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. p. 47-66.
27. REBOITA, M. S. et al. Entendendo o Tempo e o Clima na América do Sul. **Terra e Didática**, v. 8, n. 1, p. 34-50, 2012. Disponível em: <<http://repositorio.furg.br/bitstream/handle/1/4742/Entendendo%20o%20tempo%20e%20o%20clima%20na%20Am%C3%A9rica%20do%20Sul.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 8 abril 2018.
28. SILVA, M. A. V. **Meteorologia e Climatologia**. 2. ed. Recife: LTC, 2006. Disponível em: <http://www.icat.ufal.br/laboratorio/clima/data/uploads/pdf/METEOROLOGIA_E_Climatologia_VD2_Mar_2006.pdf>.

29. TALAIA, M. A. R.; FERNANDES, R. DIAGNÓSTICO DE VENTO DE UMA REGIÃO USANDO UMA CARTA METEOROLÓGICA DE SUPERFÍCIE. I Congresso Internacional de Riscos, 1, 2009, Coimbra. **Anais...**, Coimbra: Universidade de Coimbra, 2009. 63-69.
30. TOMÁS, Perales Benito. **Práticas de Energia Eólica**. Editora Publindústria, 2010.

EM ELABORAÇÃO