

CAPÍTULO 2

Geração de energia elétrica e sistemas inteligentes

2.1 GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA INTELIGENTE

Quando falamos em geração de energia elétrica inteligente, é válido lembrar os conceitos previamente explorados sobre o que significa ser inteligente no âmbito dos sistemas elétricos.

Levando-se em consideração a definição feita na Seção 1.2 do Capítulo 1 e restringindo-a para a geração de energia elétrica, a palavra inteligente está relacionada à capacidade da integração da geração de energia por meio de fontes renováveis (sol e vento, por exemplo), atentando-se para as necessidades de consumidores e companhias elétricas. Nesse sentido, a geração elétrica inteligente está muito mais relacionada com a geração distribuída por meio dessas fontes do que com a geração centralizada por meio de grandes usinas.

No entanto, para essas plantas centralizadas, como hidrelétricas e termelétricas, também é possível aplicar conceitos e tecnologias inteligentes. Porém, esse processo se limita quase que exclusivamente à disponibilização e à proteção de dados. A digitalização de usinas hidrelétricas vem ao encontro dessa ideia.

Algumas das áreas de maior interesse na geração de energia elétrica inteligente são:

- Digitalização de plantas de geração centralizada.

- Digitalização da geração com fontes renováveis de energia.
- Proteção contra ataques cibernéticos (do inglês *cyberattack*).
- Variações de tensão em regime permanente devido à geração com fontes renováveis de energia.
- Variações de frequência devido à geração com fontes renováveis de energia.

Além das áreas supracitadas, a combinação entre mais de uma fonte geradora, sendo pelo menos uma delas por geração com fontes renováveis de energia, a chamada cogeração, também faz parte de estratégias inteligentes aplicadas em sistemas elétricos de potência.

2.2 DIGITALIZAÇÃO DE PLANTAS DE GERAÇÃO CENTRALIZADAS

Em razão da grande disponibilidade de recursos naturais encontrados no território nacional, a matriz energética brasileira se constitui majoritariamente por usinas hidrelétricas. Dessa maneira, esse tipo de planta de geração possui grande impacto no sistema elétrico brasileiro, com uma capacidade total instalada correspondente a 61,93% do total de plantas de geração, divididas entre usinas hidrelétricas (UHE), centrais geradoras hidrelétricas (CGH) e pequenas centrais hidrelétricas (PCH) (Aneel, 2021c).

De acordo com Vagnoni *et al.* (2021), dada a intermitência característica das gerações fotovoltaicas e eólicas, as plantas hidrelétricas, além de proverem regulação de frequência ao sistema elétrico, estão enfrentando grandes desafios. Como exemplo, estarem preparadas para a modernização dos sistemas de potência, por meio da implementação de tecnologias a fim de forçar as turbinas hidráulicas e máquinas elétricas no sentido de estender os limites e as horas de operação. Para que essa modernização venha a ter sucesso, um conhecimento profundo dos limites de operações críticas se faz necessário para otimizar o processo de manutenção preditiva, com o objetivo de explorar os limites das máquinas, porém, garantindo sua disponibilidade e segurança.

Salienta-se que os processos de manutenção realizados em usinas hidrelétricas, até o presente momento, são feitos majoritariamente por meio de períodos pré-determinados e de maneira arbitrária, sem saber a necessidade real da manutenção agendada. Esse processo resulta em paradas, totais ou parciais, desnecessárias da planta e, conseqüentemente, no aumento dos custos de geração. No entanto, desde que a filosofia da manutenção 4.0¹ surgiu, diversas ferramentas têm sido desenvolvidas para que o processo de manutenção seja feito de maneira preditiva e mais assertiva, aumentando a eficiência de geração da planta.

1 A manutenção 4.0 é o conceito segundo o qual o foco é a redução da carga de trabalho humano nas operações de manutenção (Kandemir; Celik, 2020).

Com investimentos em pesquisas e aplicações de processos de digitalização na geração hidrelétrica, é possível realizar diagnósticos preventivos por meio de técnicas estatísticas de análise de dados e da utilização de ferramentas de inteligência artificial (IA), por exemplo. Dadas a versatilidade e a rapidez na detecção e na classificação de dados por meio de IA, é possível realizar diagnósticos em tempo real.

Dentre os problemas encontrados em turbinas hidráulicas a serem analisados e previstos, pode-se citar (Vagnoni *et al.*, 2021):

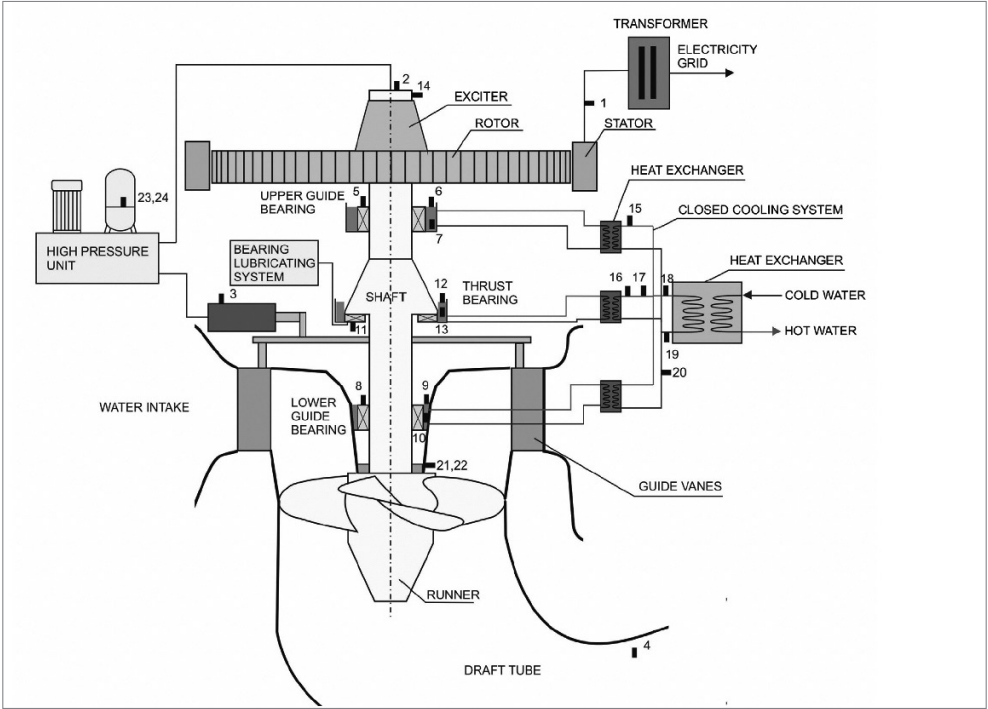
- Vazamentos de óleo.
- Cavitação por erosão.
- Fadigas.
- Falhas em turbinas.

A previsão desses defeitos pode ser feita pela análise de dados, como (Selak; Butala; Sluga, 2014):

- Potência de saída.
- Frequência de rotação.
- Temperatura dos rolamentos.
- Nível do óleo.
- Temperatura do óleo.
- Velocidade R.M.S.²

A Figura 2.1 mostra alguns dos possíveis parâmetros que podem ser medidos em uma turbina do tipo Kaplan (Selak; Butala; Sluga, 2014).

2 Velocidade R.M.S., ou velocidade média quadrática, é o valor da raiz quadrada da soma média dos quadrados da velocidade. Pode ser utilizada para calcular a energia cinética média de moléculas de gás.



Legenda	
1. Potência de saída	13. Temperatura do óleo do rolamento de impulso
2. Entrada do regulador de distribuição de óleo	14. Velocidade de rotação
3. Entrada das palhetas do servomotor	15. Temperatura da água de resfriamento do rolamento guia superior
4. Sensores de pressão	16. Temperatura da água de resfriamento do rolamento de impulso
5. Temperatura do mancal guia superior	17. Fluxo da água de resfriamento do rolamento de impulso
6. Nível de óleo do mancal guia superior	18. Temperatura da água na entrada do trocador de calor
7. Temperatura de óleo do mancal guia superior	19. Temperatura da água na saída do trocador de calor
8. Temperatura de óleo do mancal inferior	20. Pressão da água de resfriamento
9. Nível de temperatura do óleo do rolamento inferior	21. Fluxo de água no anel de vedação
10. Temperatura do óleo do rolamento inferior	22. Pressão da água no anel de vedação
11. Temperatura do rolamento de impulso	23. Pressão do óleo na unidade de alta pressão
12. Nível de óleo do rolamento de impulso	24. Nível de óleo na unidade de alta pressão

Figura 2.1 Pontos de medidas da turbina e dos sistemas suportes.
Fonte: Selak; Butala; Sluga, 2014.

Dessa maneira, o processo de digitalização em plantas hidrelétricas, como exemplificado nesta seção, tem o objetivo de aumentar a eficiência do processo, resultando em diminuições de custos e de paradas desnecessárias. Isso se reflete, em um sentido

mais amplo, na disponibilização de energia elétrica gerada por um maior tempo, consequentemente postergando a necessidade da implementação de novas usinas geradoras, o que, no final, está diretamente ligado ao aumento da eficiência energética e à redução de impactos ambientais. Por esses motivos, pode-se justificar que a digitalização aqui citada faz parte de um processo inteligente.

2.3 DIGITALIZAÇÃO DA GERAÇÃO DE FONTES RENOVÁVEIS DE ENERGIA

Na geração com fontes renováveis de energia, dentre as que mais têm aplicações de processos de digitalização em seus sistemas, citam-se a eólica e a fotovoltaica. Isto se justifica pelas grandes facilidades de instalação e comercialização dessas tecnologias, o que proporciona a aceleração do desenvolvimento, por parte dos fabricantes, de sistemas com custo-benefício cada vez maior, mais eficientes e que atendam as exigências e os limites encontrados nas redes de transmissão e/ou distribuição.

2.3.1 Sistemas eólicos de geração

A aplicação da digitalização nos sistemas eólicos, por meio de tecnologias de informação e comunicação (TIC), tem seu maior destaque nas aplicações em turbinas eólicas, em conversores de potência e em outras aplicações relacionadas à energia e que não se enquadram nas duas anteriores (Kangas *et al.*, 2021).

Por meio das TIC, pode-se programar despachos econômicos de energia elétrica, auxiliando nas ações de proteção, controle de energia reativa da rede, entre outros. Variações de frequência, controle de potência ativa gerada e, por consequência, nível de tensão de geração podem ser monitorados em tempo real e controlados para que se obtenha uma operação da qual se extraia o máximo que o gerador pode entregar de potência ativa e/ou reativa, dentro dos padrões normatizados da rede, resultando em um processo de geração com maior confiabilidade e eficiência. A Tabela 2.1 mostra alguns exemplos de aplicações de TIC e seus objetivos para sistemas eólicos de geração de energia elétrica.

Tabela 2.1 Exemplos de TIC aplicados a sistemas eólicos de geração

Método de obtenção de dados	Sistema de aplicação	Descrição da aplicação
Sistema óptico e métodos de dados de ar	Turbinas	Sistemas e métodos de sensoriamento de velocidade, temperatura e pressão do ar.
Previsão de energia gerada de uma fazenda eólica	Turbinas	Métodos e equipamentos para a previsão da energia gerada de uma fazenda eólica.
Sistema de sensoriamento de turbulência e condições das pás	Turbinas	Sistemas de sensoriamento que detecta materiais acumulados, como sujeira e gelo, nas turbinas eólicas.
Método e equipamentos para o controle da alimentação de energia reativa em um sistema de geração eólico	Turbinas	Método e equipamentos para controlar a potência do vento na geração. O sistema é conectado à rede elétrica e planejado para alimentar a rede com energia reativa, com o objetivo de melhorar a estabilidade do sistema.
Sistema atmosférico de medição	Turbinas	Um método de medição das condições do vento na atmosfera de maneira a prever o limite superior de capacidade de geração de cada turbina de uma fazenda eólica.
Extrator de potência condicionado à mudança de potência gerada	Conversão	Extrator de potência que permite à fonte fornecer uma quantidade otimizada de transferência de potência que é maior do que seria sem realizar casamento de impedância.
Sistema de controle e método de bateria de backup para controle de passo	Conversão	Método e bateria de backup para controle de passo em uma turbina de um sistema eólico de geração.
Sistema e métodos para monitoramento e gerenciamento do desempenho energético	Conversão	Sistema e método para monitoramento em tempo real das operações da geração e informações de energia, utilizados para o gerenciamento e a operação, em tempo real, do desempenho da planta.

Fonte: traduzida de Kangas *et al.*, 2021.

Alguns dos métodos que têm tido maiores interesses em seus desenvolvimentos serão explorados com mais detalhes na Seção 2.4.

2.3.2 Sistemas de geração fotovoltaicos

Diferentemente dos sistemas de geração eólicos, os sistemas fotovoltaicos são, em sua característica construtiva, muito mais simples. Não se constituem de partes girantes, sujeitas a fadigas por esforços mecânicos, necessitando de menos manutenção, o que leva a um sistema simples e de limitados parâmetros para controle. Por essas características, sistemas fotovoltaicos são de menor custo e, por isso, majoritariamente utilizados na geração distribuída.

Outro fator que limita o uso de sistemas eólicos na geração distribuída, em larga escala como o fotovoltaico, está relacionado aos ventos. Em grandes centros urbanos, as correntes de ar são consideravelmente modificadas pelas mudanças na arquitetura urbana. Grandes edifícios servem como barreiras e acabam reduzindo a velocidade dessas correntes de ar, muitas vezes inviabilizando a instalação de sistemas eólicos.

Por meio de TIC, pode-se controlar em sistemas fotovoltaicos, em tempo real, parâmetros como tensão gerada, quantidade de potência ativa e reativa injetada na

rede, fator de potência do sistema de geração de corrente elétrica injetada na rede, por exemplo.

As maiores aplicações de TIC em sistema fotovoltaicos estão relacionadas à parte da eletrônica de potência presente no sistema (conversores e inversores de frequência), ao controle do ponto de extração de máxima potência (MPPT, do inglês *maximum power point tracking*) e a tecnologias relacionadas à energia que não se enquadram nas duas classificações anteriores. A Tabela 2.2 mostra alguns exemplos de aplicações de TIC e seus objetivos para sistemas de geração de energia elétrica fotovoltaicos.

Tabela 2.2 Exemplos de TIC aplicados a sistemas de geração fotovoltaicos.

Método de obtenção de dados	Sistema de aplicação	Descrição da aplicação
Controle de circuito para o chaveamento de conversores CC-CC	Energia	Circuito de controle para maximizar a produção do sistema fotovoltaico por meio de conversores CC-CC.
Regulação de chaveamento de fonte fotovoltaica com máxima transferência de potência sem alteração da tensão do sistema	Energia	Regula e melhora a eficiência da conversão CC-AC.
Método de rastreamento do ponto de máxima potência	MPPT	Um método de MPPT e um sistema de controle fotovoltaico que podem extrair a máxima potência de um sistema fotovoltaico.
Módulo fotovoltaico inteligente	MPPT	Módulo fotovoltaico que rastreia o ponto de máxima potência individual de cada painel e conecta com outros painéis para aumentar a eficiência da produção.
Otimização de ponto de potência de um arranjo solar	Conversão	Método e equipamentos que controlam a energia produzida por arranjo de placas solares, possibilitando a produção máxima do arranjo.

Fonte: traduzida de Kangas *et al.*, 2021.

Alguns dos métodos cujo desenvolvimento é de maior interesse serão explorados com mais detalhes na Seção 2.4.

2.4 PRINCIPAIS ESTRATÉGIAS E PROBLEMAS ENCONTRADOS NAS GERAÇÕES EÓLICA E SOLAR NO CONTEXTO DA QUALIDADE DA ENERGIA E DAS REDES INTELIGENTES

A conhecida volatilidade da geração por sistemas eólicos e fotovoltaicos pode resultar na alteração de parâmetros dos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica. Essas alterações têm a ver com problemas relacionados à qualidade da energia.

O termo “qualidade da energia elétrica” está relacionado a qualquer desvio que possa ocorrer na magnitude, forma de onda ou frequência da tensão ou corrente elétrica de um sistema elétrico.

No Brasil, os Procedimentos de Distribuição (Prodist), em seu módulo 8 – Qualidade da energia elétrica (Aneel, 2021b), definem os limites dos parâmetros de ten-

são, frequência e corrente em que um sistema pode operar, por meio de indicadores numéricos. É dividida entre indicadores relacionados à qualidade do produto e à qualidade do serviço. Nesta seção, estamos interessados somente na qualidade do produto, que é definida pela norma como:

O conjunto de definições de terminologias que caracterizam os fenômenos e estabelece os indicadores limites ou valores de referência relativos à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão (Aneel, 2021b).

Os seguintes fenômenos são tratados na qualidade do produto (Aneel, 2021b):

- Tensão em regime permanente.
- Fator de potência.
- Harmônicos.
- Desequilíbrio de tensão.
- Flutuação de tensão.
- Variação de frequência.
- Variação de tensão de curta duração.

Neste capítulo, estamos interessados em apenas dois fenômenos: tensão em regime permanente e variação de frequência.

De acordo com a Aneel (2021b), os limites superior e inferior de tensão para redes com operação superior a 1 kV devem ser de 105% (1,05 pu) e 95% (0,95 pu) do valor da tensão nominal do sistema, respectivamente. Neste caso, estamos falando de redes de distribuição e transmissão. Para as redes de distribuição em baixa tensão, dividem-se os níveis de tensão em faixas, a saber: faixa adequada; faixa precária; e faixa crítica. As Tabelas 2.3 e 2.4 mostram essas faixas para os níveis em baixa tensão padronizados no Brasil (Aneel, 2021b).

Tabela 2.3 Pontos de conexão em tensão nominal igual ou inferior a 1 kV (220/127)

Tensão de atendimento (TA)	Faixa de variação de tensão de leitura (volts)
Adequada	$(202 \leq TL \leq 231) / (117 \leq TL \leq 133)$
Precária	$(191 \leq TL \leq 202)$ ou $(231 \leq TL \leq 233)$ $(110 \leq TL < 117)$ ou $(133 < TL \leq 135)$
Crítica	$(TL < 191$ ou $TL > 233) / (TL \leq 110$ ou $TL > 135)$

Fonte: Aneel, 2021b.

Tabela 2.4 Pontos de conexão em tensão nominal igual ou inferior a 1 kV (380/220)

Tensão de atendimento (TA)	Faixa de variação de tensão de leitura (volts)
Adequada	$(350 \leq TL \leq 399) / (220 \leq TL \leq 231)$
Precária	$(331 \leq TL < 350) \text{ ou } (399 < TL \leq 403) /$ $(191 \leq TL < 202) \text{ ou } (231 < TL \leq 233)$
Crítica	$(TL < 331 \text{ ou } TL > 403) / (TL \leq 191 \text{ ou } TL > 233)$

Fonte: Aneel, 2021b.

Já para a variação de frequência, os indicadores da Aneel (2021b) normatizam que, em condições normais de operação e em regime permanente, o sistema deve operar dentro dos limites de frequência situados entre 59,9 Hz e 60,1 Hz. No entanto, na ocorrência de distúrbios no sistema, os sistemas de geração devem garantir que a frequência retorne, 30 segundos após a transgressão, para a faixa de 59,5 Hz a 60,5 Hz.

2.4.1 Qualidade da energia e sistemas de geração eólicos

Nos sistemas de geração eólicos, a inconstância dos ventos que fazem as pás acopladas às turbinas eólicas girarem acaba ocasionando uma variação no torque e na velocidade que são entregues e desenvolvidas entre a turbina e o rotor da máquina elétrica (gerador). Essa variação de torque está diretamente relacionada à potência ativa gerada, e a variação de velocidade está diretamente ligada à frequência da tensão gerada pelo conjunto turbina-gerador elétrico. Nesse sentido, é necessário desenvolver estratégias para lidar com a variação da velocidade do vento e para extrair a máxima potência e a frequência da tensão geradas constantes e dentro dos limites impostos pela regulamentação nacional.

Para o controle da potência gerada, três estratégias de controle podem ser encontradas: controle de passo, controle de estol e controle de estol ativo.

O controle de passo é um sistema ativo que, de acordo com sinais vindo do sistema de controle, mudam o ângulo das pás do rotor da turbina para manter a geração de potência ativa em um mesmo patamar. Sempre que a potência do gerador é ultrapassada em virtude da velocidade do vento, as pás mudam o seu ângulo, girando em torno do seu eixo longitudinal, para reduzir o ângulo de ataque. Essa redução diminui as forças aerodinâmicas atuantes nas pás do rotor e, conseqüentemente, o torque desenvolvido (Dutra, 2008).

Já para o controle de estol, as pás do rotor são fixas em seu ângulo de passo e não giram em torno do seu eixo longitudinal. São construídas de maneira que seu ângulo de passo é escolhido para que, em velocidades de ventos superiores a nominal, ocorre o estol³ e no rotor. Devido ao estol, ocorre uma diminuição do torque desenvolvido

3 Redução da força de sustentação e aumento das forças de arrasto.

e, conseqüentemente, da potência elétrica gerada pelo conjunto turbina – gerador elétrico. Para que não ocorram grandes perdas de potência em todas as posições radiais das pás ao mesmo tempo, reduzindo a potência elétrica gerada, uma pequena torção longitudinal é empregada às pás, que as levam a um suave desenvolvimento desse efeito (Dutra, 2008). A Figura 2.2 mostra as pás do rotor de uma turbina com deformações, para o caso do controle de estol, e sem deformações, para o caso do controle de passo.

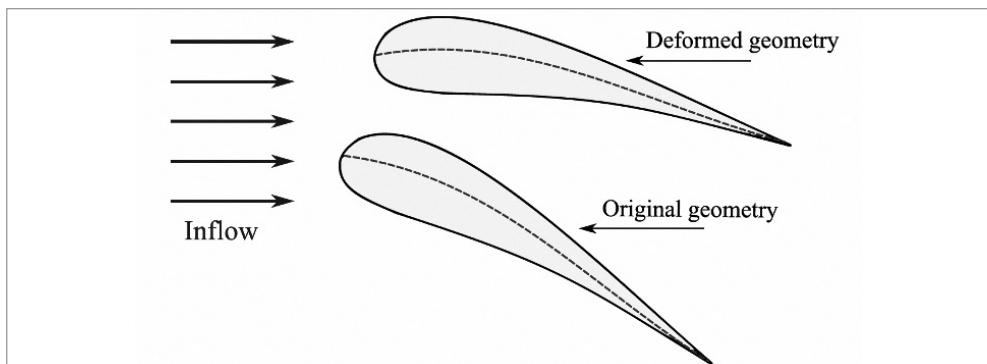


Figura 2.2 Pás do rotor de uma turbina com e sem deformação em seu eixo longitudinal.

Fonte: Barber e Motley, 2016.

Em sistemas mais modernos, uma mistura entre o controle de passo e de estol pode ser encontrada. A essa estratégia se dá o nome de controle de estol ativo.

O controle de estol ativo é provido de um mecanismo que gira as pás do rotor da turbina na direção de estol (do inglês *stall*) ou na direção de embandeiramento⁴ (do inglês *feather*). Dessa maneira, pequenas variações no ângulo de passo das pás garantem uma geração de potência elétrica ativa de acordo com a máxima capacidade que pode ser entregue pelo gerador eólico. Para ventos extremos e cargas pequenas, as pás giram na direção do embandeiramento. Para ventos superiores a velocidade nominal, as pás giram na direção do estol. Todas essas ações são feitas por um sistema de controle (MPPT) que, por meio de comparações com valores de referência, ajustam a variável de saída desejável (potência elétrica gerada ou torque desenvolvido) de acordo com a variável de entrada (ângulo das pás do rotor da turbina do gerador). A Figura 2.3 mostra uma pá de rotor e as direções supracitadas.

⁴ Condição em que as pás do rotor de uma turbina ou hélices de um avião giram paralelamente ao fluxo de ar para reduzir o arrasto.

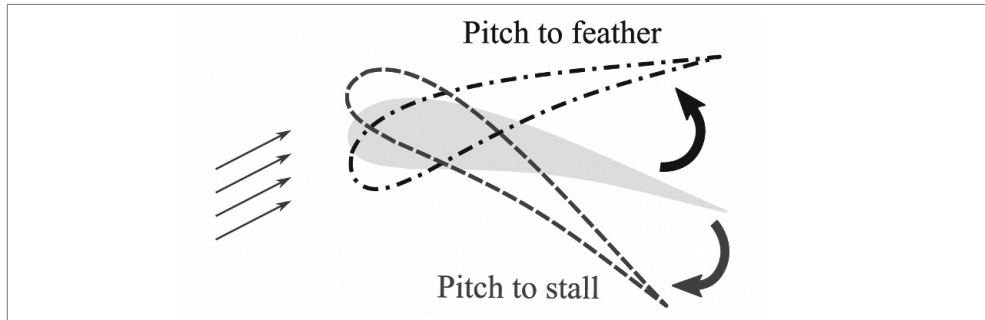


Figura 2.3 Controle de passo para o estol e para o embandeiramento.

Fonte: Barber e Motley, 2016.

A frequência elétrica gerada em um grupo gerador é a frequência da tensão elétrica gerada. Essa frequência elétrica em Hertz é proporcional à frequência de giro do campo magnético girante do rotor da máquina elétrica em corrente alternada.

Há dois tipos de máquinas elétricas empregadas no grupo gerador do sistema: máquinas síncronas e gerador de indução duplamente alimentado.

As máquinas síncronas, dadas as suas características construtivas, geram energia a uma frequência proporcional à velocidade de rotação do campo magnético girante, criado pelo enrolamento de campo da máquina e que se encontra na parte girante (rotor) dela. Por isso, é denominada síncrona, pois existe um sincronismo entre frequência da tensão gerada e velocidade de rotação do campo magnético girante. Assim, para que se entregue energia gerada a uma frequência constante, a velocidade da máquina deve ser constante. Aqui se chama o gerador de máquina sem prejuízos conceituais. Uma máquina elétrica pode funcionar tanto como motor elétrico, quanto como gerador elétrico.

Para que a frequência gerada seja constante, levando em consideração a variação dos ventos, não se conecta a máquina síncrona diretamente com a rede elétrica. Faz-se o uso, então, de um inversor de frequência.

Os inversores de frequência são dispositivos eletrônicos compostos de chaves automáticas feitas por material semicondutor. Os tipos mais comuns de chaves eletrônicas empregadas em inversores de frequência são os IGBT (*insulated gate bi-polar transistor*). Por meio de modulação por largura de pulso (PWM, do inglês *pulse width modulation*), os ângulos de disparo (atuação) dos IGBT são alterados para que a frequência de saída desse inversor de frequência seja a adequada para o sistema. Assim, apesar da velocidade do aerogerador ser variável, a frequência injetada na rede será constante. A Figura 2.4 ilustra um sistema desse tipo.

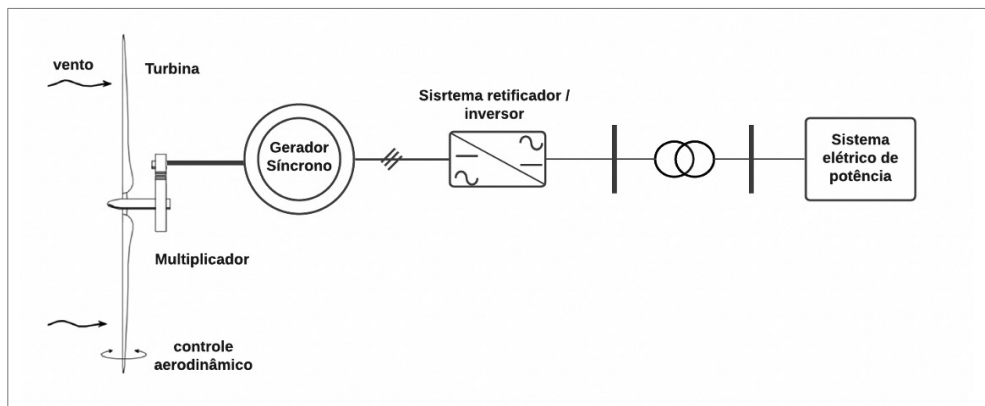


Figura 2.4 Diagrama elétrico de um sistema de geração eólica com gerador síncrono a velocidade variável.

Fonte: elaborada pelo autor.

O grande diferencial no emprego de gerador de indução duplamente alimentado (DFIG, do inglês *doubly fed induction generation*) é o conversor bidirecional utilizado em seu arranjo. O estator do DFIG é conectado de forma direta à rede, e o rotor é conectado por meio do conversor bidirecional. O sistema bidirecional controla a saída do aerogerador. O inversor conectado do lado do rotor tem a função de controlar a potência ativa e reativa gerada. O inversor conectado do lado da rede é responsável pelo controle da tensão do elo em corrente contínua e do conversor do lado da rede. A Figura 2.5 ilustra um sistema desse tipo.

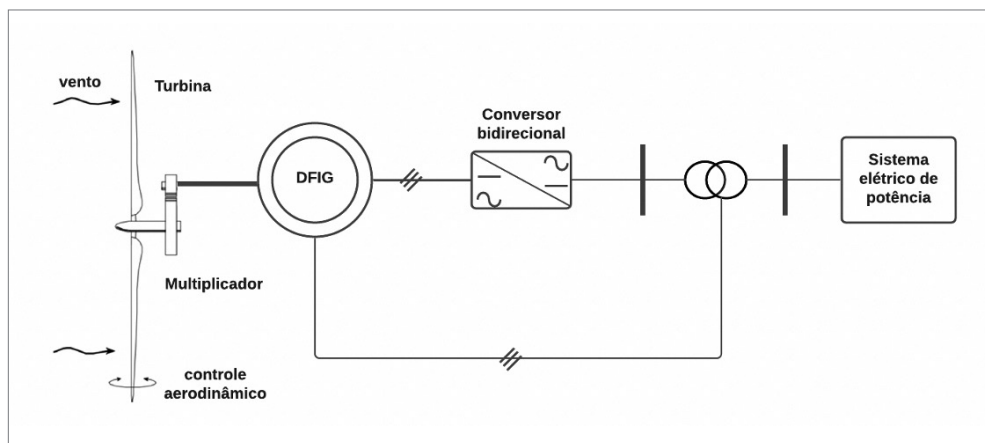


Figura 2.5 Diagrama elétrico de um sistema de geração eólica com gerador DFIG a velocidade variável.

Fonte: elaborada pelo autor.

A busca por soluções inovadoras para o controle dos parâmetros de geração, em atendimento às exigências do sistema elétrico de potência em que se encontram, faz parte dos conceitos das redes elétricas inteligentes.

2.4.2 Qualidade da energia e sistemas de geração fotovoltaicos

Os sistemas de geração fotovoltaicos, em sua maioria, estão localizados nas redes de distribuição. Como já citado, têm grande adesão dos consumidores que desejam gerar sua própria energia a ser consumida, devido a seu aspecto construtivo mais simples.

O perfil de demanda de consumidores residenciais não segue o perfil de geração fotovoltaica, ou seja, quando a geração fotovoltaica está no máximo, a demanda residencial encontra-se muito baixa. A justificativa para este fato já foi dada na Seção 1.1 do Capítulo 1.

Esse fato, aliado ao nível de penetração fotovoltaica, pode resultar em elevação no nível de tensão em regime permanente. Aliás, nos dias atuais, a maior preocupação das companhias que detêm concessões ou permissões sobre sistemas de distribuição no Brasil é em relação às sobretensões causadas pela penetração fotovoltaica. Muitas vezes, as companhias precisam interferir na geração distribuída dos consumidores e solicitar que ajustem sua geração para o controle dos níveis de tensão em regime permanente.

Como já foi dito no Capítulo 1, as placas fotovoltaicas, por meio de um processo químico da reação do material empregado com a irradiação solar, liberam energia em forma de energia elétrica. No entanto, essa energia liberada é condicionada em corrente contínua, não sendo possível injetá-la no sistema elétrico, uma vez que o sistema de distribuição de energia elétrica no Brasil é em corrente alternada. Faz-se necessário, então, utilizar inversores CC-AC para adequar a energia gerada e convertê-la de corrente contínua para corrente alternada. Porém, sabe-se que esses inversores eletrônicos possuem em sua composição chaves eletrônicas (transistores) que, devido às elevadas frequências de chaveamento (abrir e fechar) que operam, originam distorções harmônicas na forma de onda da tensão, o que pode ser prejudicial a outras cargas existentes no sistema em que essa distorção harmônica é inserida.

No entanto, os inversores fabricados nos dias de hoje já possuem filtros harmônicos e entregam as formas de onda de tensão e corrente praticamente senoidais e com baixa distorção. Dessa maneira, as distorções harmônicas geradas pelos sistemas fotovoltaicos, na geração distribuída, não têm sido motivo de preocupação para as companhias elétricas.

Dentre os filtros passivos de acoplamento utilizados nos sistemas fotovoltaicos, destaca-se o de maior uso, o LCL – indutivo-capacitivo-indutivo. São mais utilizados por diminuírem consideravelmente o volume dos indutores. Esse filtro reduz, ainda,

os transitórios de conexão, uma vez que é uma indutância que conecta o filtro à rede, e não um capacitor. A Figura 2.6 mostra um filtro LCL.

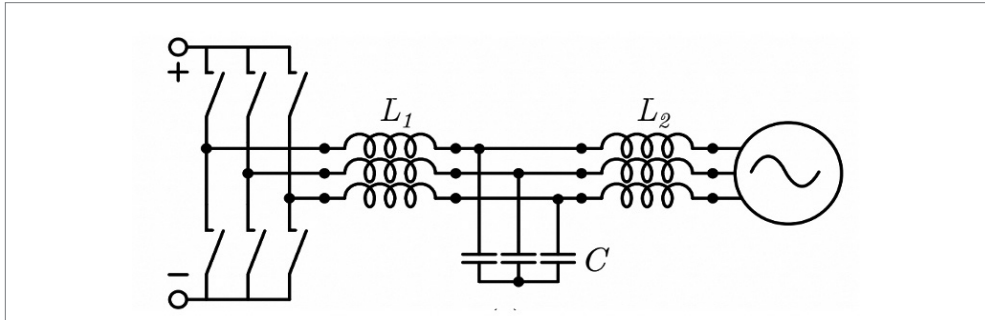


Figura 2.6 Filtro passivo de acoplamento LCL.

Fonte: elaborada pelo autor.

Outro aspecto amplamente investigado está relacionado aos sombreamentos parciais sofridos pelas placas dos sistemas fotovoltaicos em decorrência de nuvens, por exemplo. A intensidade da corrente elétrica produzida nas placas fotovoltaicas está diretamente ligada à intensidade da irradiação solar. A corrente de curto-circuito (I_{sc}) e a tensão de circuito aberto (V_{oc}) são diretamente proporcionais a essa irradiação. Existe, então, uma variação da tensão e corrente emitida por uma célula fotovoltaica de acordo com a variação da irradiação solar incidente nela.

Analisando uma placa fotovoltaica onde se tem um conjunto de células fotovoltaicas, o efeito do sombreamento parcial é uma diminuição na potência gerada pelo painel. A Figura 2.7 mostra essa relação.

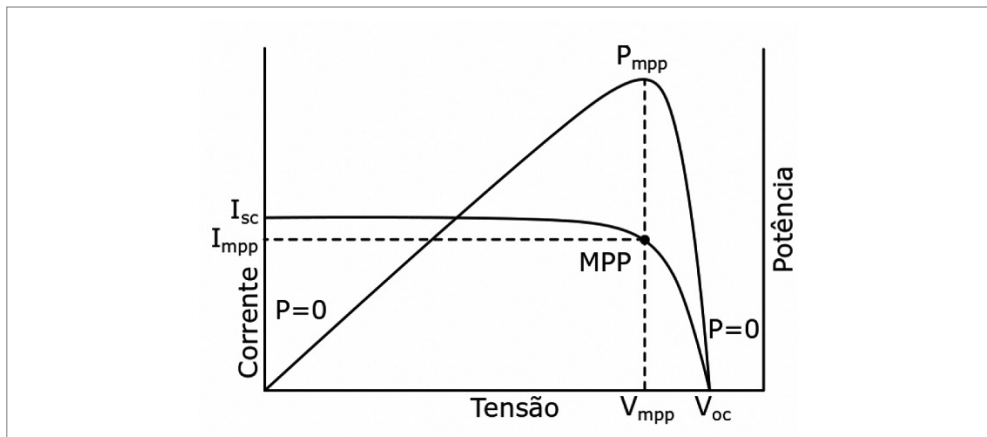


Figura 2.7 Curva corrente versus tensão em um módulo fotovoltaico.

Fonte: elaborada pelo autor.

Como pode ser visto na Figura 2.7, existe, porém, um ponto em que a máxima potência gerada (MPP) pode ser alcançada. Para isso, lança-se mão do MPPT e de técnicas para atingir esse ponto de máxima potência. Dentre as técnicas aplicadas, pode-se citar o uso de redes neurais artificiais, algoritmos de otimização, método perturba e observa, e condutância incremental.

Em determinadas situações, nas quais ocorre o sombreamento total do sistema, não há como o MPPT atuar e, portanto, o sistema deixa de gerar energia e, por consequência, deixando de injetá-la no sistema elétrico. Mas, geralmente, esses sombreamentos totais são momentâneos, pois as nuvens se deslocam de acordo com os ventos.

Em razão das características do sistema fotovoltaico, a injeção de potência ativa na rede elétrica é instantânea. Da mesma maneira, quando ocorre um sombreamento total do sistema, a retirada de potência ativa injetada por este também se dá de maneira instantânea. Dessa forma, essas entradas e saídas bruscas e instantâneas dos sistemas fotovoltaicos na geração distribuída podem ocasionar variações de frequência nos referidos sistemas elétricos. Outra preocupação relacionada à variação de frequência são as perdas de cargas no sistema.

Se analisarmos pelo ponto de vista de geradores síncronos, de acordo com o balanço entre a potência mecânica e a potência elétrica gerada, os geradores síncronos aceleram em caso de perda de carga em um sistema. No entanto, pela inércia característica do rotor das máquinas síncronas, essa aceleração que resulta em um aumento da frequência do sistema pode ser detectada em tempo hábil por controladores de velocidade e, então, ajustada aos limites de frequência nominal do sistema. Em um sistema fotovoltaico, caso haja uma perda de carga, o sistema continua injetando a máxima potência na rede elétrica por meio do seu MPPT. Esse fato pode ocasionar uma instabilidade na frequência da rede. Os problemas relacionados à inércia na geração fotovoltaica também são encontrados na geração eólica.

Uma maneira de se tentar contornar esse efeito é a simulação de uma inércia nos sistemas fotovoltaicos, tanto para a sua saída quanto para a sua entrada nos sistemas. Essa estratégia de simulação de inércia tem como referência os sistemas de geração de energia elétrica que se utilizam de máquinas elétricas rotativas síncronas.

A estrutura básica de um sistema de conversão de energia em um sistema de geração renovável possui basicamente um capacitor, um inversor de fonte de tensão (VSI, do inglês *voltage source inverter*) e um filtro de acoplamento à rede. A Figura 2.8 mostra a relação dos elementos básicos de um sistema renovável e de uma máquina síncrona.

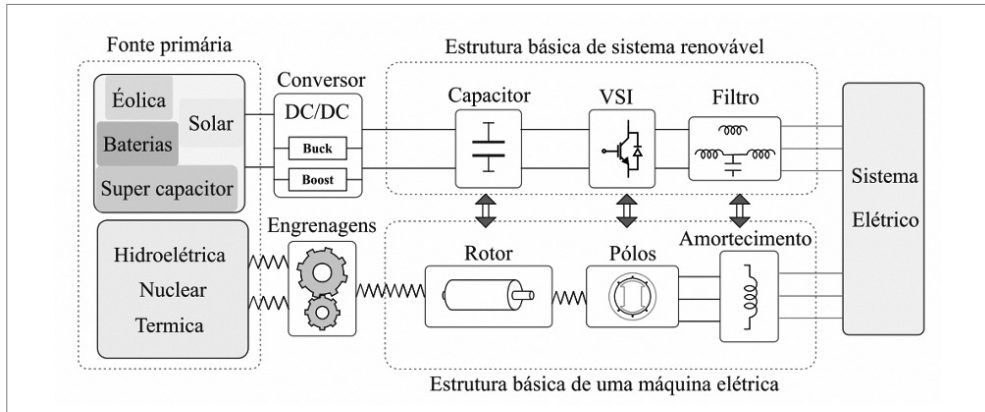


Figura 2.8 Estruturas básicas de um sistema renovável e de uma máquina síncrona.

Fonte: Dantas, 2018.

É possível a análise de que os principais elementos contribuintes para a inércia característica de uma máquina síncrona podem ser relacionados em um sistema renovável. Dessa maneira, surge a estratégia da simulação de uma máquina síncrona virtual (MSV), por meio dos elementos de controle de um sistema renovável. Assim como na máquina síncrona, esse controle é feito por meio da estratégia de controle por decaimento (do inglês *droop control*). Simula-se então o controle por decaimento da máquina síncrona no controle eletrônico dos sistemas de geração eólicos e fotovoltaicos, com o objetivo de prover ao sistema elétrico uma maior estabilidade.

2.5 SEGURANÇA CONTRA ATAQUES CIBERNÉTICOS (CYBERATTACKS)

Se, por um lado, o emprego de tecnologias inteligentes na geração de energia elétrica para monitoramento e controle eficientes contribui para um sistema elétrico confiável e diminui os custos de operação, por outro lado, tais tecnologias tornam-se suscetíveis a operações indesejadas e provocadas por ataques cibernéticos, uma vez que entre o monitoramento e o controle são empregados meios de transmissão de dados por meio de comunicação sem fio.

A frequência de um sistema elétrico deve ser monitorada e controlada, uma vez que desvios do valor nominal da frequência do sistema podem afetar diretamente sua operação, segurança e confiabilidade. O desbalanço entre potência demandada pelas cargas e potência gerada faz com que a frequência de operação de um gerador síncrono saia do seu valor nominal. Existem três níveis de controle de frequência e vários métodos para seu controle podem ser utilizados. Os primeiros dois métodos estão relacionados ao controle das unidades geradoras, e o terceiro nível é implementado por meio das cargas, por exemplo, pelo sombreamento de carga (do

inglês *load shedding*). O primeiro nível de controle está relacionado ao controle de frequência pela unidade geradora por meio do seu controle primário ou governador de velocidade (do inglês *speed governor*). Esse controle atua diretamente no torque desenvolvido pela turbina presente na unidade de geração. O segundo nível está relacionado ao controle suplementar que atua obtendo auxílio de outras unidades geradoras para o controle de frequência do sistema em desconformidade. O terceiro nível utiliza-se de mudanças implementadas por meio de controle direto de cargas ou sombreamento de cargas, despacho econômico de energia e tirando ou inserindo mais potência no sistema.

Apesar dessas estratégias garantirem a confiabilidade e a estabilidade do sistema, elas estão sujeitas a ataques cibernéticos por meio de ações maliciosas. Sistemas de potência modernos utilizam infraestrutura de comunicação aberta, que, por sua vez, utilizam canais de comunicação dedicados à transmissão de sinais entre unidades de terminal remoto (RTU, do inglês *remote terminal units*), centros de controle e unidades geradoras. Além do mais, em razão da rapidez com que os sinais de controle devem ser gerados para o controle da frequência do sistema, não podem ser utilizados algoritmos de validação de dados complexos para a validação e a estimação dos dados medidos. Os maliciosos podem tirar vantagem desse fato manipulando dados de medição com uma matemática não muito complexa.

Um sistema de transmissão de dados inteligente é geralmente bidirecional, ou seja, transmite e recebe dados. As propriedades de segurança desse sistema devem possuir os três atributos seguintes (Mohan; Meskin; Mehrjerdi, 2020):

1. Disponibilidade: asseguramento da oportuna e confiável disponibilidade da informação na rede de transmissão de dados do sistema.
2. Integridade: capacidade de se atingir objetivos operacionais por meio de prevenção e detecção de ataques nos canais de comunicação entre atuadores, sensores e controladores.
3. Confidencialidade: habilidade do sistema em manter inacessíveis as informações a pessoas não autorizadas.

Os tipos de ataques cibernéticos em sistemas de geração de energia elétrica são resumidos na Figura 2.9.

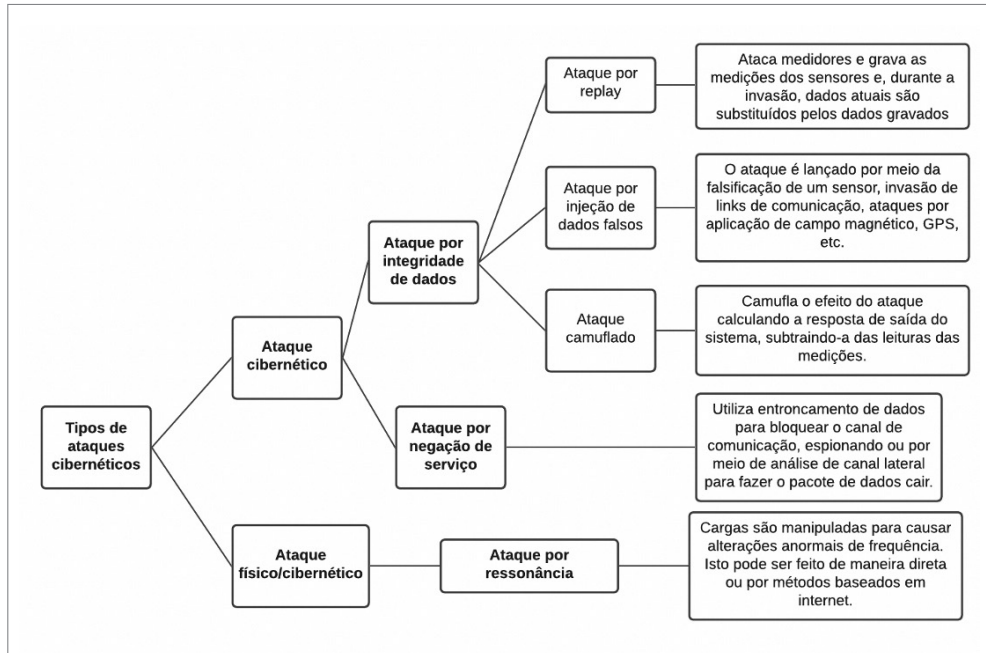


Figura 2.9 Diversos tipos de ataques ao sistema.

Fonte: traduzida de Mohan; Meskin; Mehrjerdi, 2020.

A integração de geração por fontes renováveis de energia, sejam distribuídas ou centralizadas, com usinas de geração a máquinas síncronas também pode ser alvo de ataques maliciosos. A Figura 2.10 mostra o esquema de uma microrrede em que uma unidade geradora síncrona, uma fotovoltaica e uma eólica fazem parte, hipoteticamente.

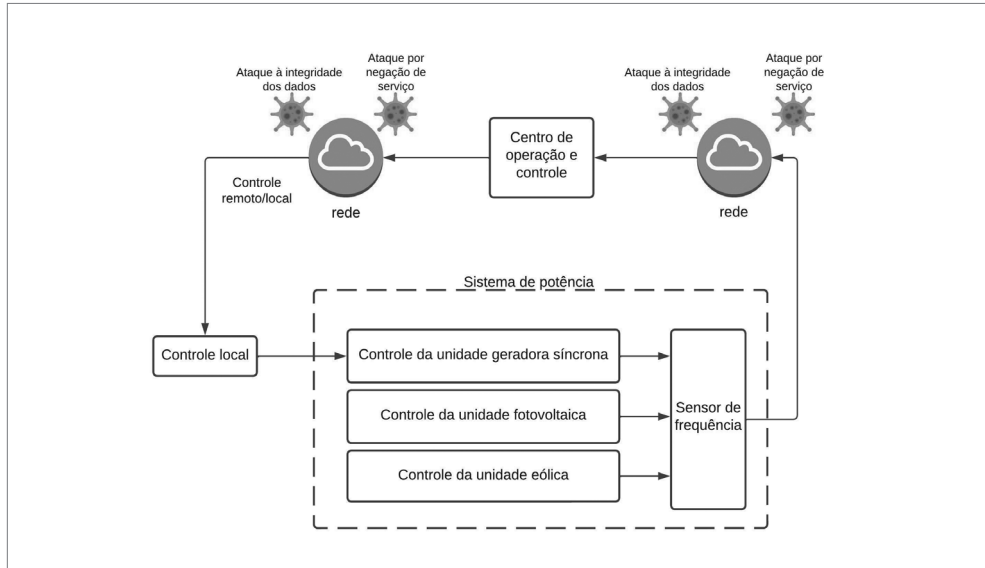


Figura 2.10 Esquema de pontos de ataque em uma área de controle de frequência.

Fonte: elaborada pelo autor.

Nesse caso, pela falta de inércia nas unidades com fontes renováveis, a unidade síncrona é a responsável por controlar e regular a frequência do sistema dentro dos limites permitidos por regulamentação do órgão fiscalizador. Vamos analisar a dinâmica de transmissão de dados da Figura 2.10:

1. Um sensor, que verifica a frequência do sistema em tempo real, informa ao centro de operação e controle, por meio de telemetria (comunicação sem fio), qual o desvio de frequência em relação ao seu valor nominal.
2. É feita uma análise de dados, que, muitas vezes, envolve algum algoritmo matemático para calcular o ajuste da velocidade de rotação da unidade síncrona.
3. A variável de ajuste (variável de controle) é enviada via comunicação sem fio para o controle local que se encontra no centro de controle e operação da usina geradora.
4. O controle local, então, faz o ajuste da velocidade da unidade síncrona por meio do controle primário ou *speed governor*.
5. Enquanto a variação de frequência não atingir o limite máximo estipulado pela central de operação do sistema, os passos de 1 a 4 se repetem.

Os ataques cibernéticos podem ocorrer nas etapas 1 e 3, pois são as etapas em que ocorrem as transmissões de dados. Os dados podem ser alterados, por exemplo, se o valor da variação da frequência, na realidade, estiver fora dos limites, pode-se modi-

ficá-los para estarem dentro dos limites. Somente este ataque pode contribuir para que o sistema entre em colapso e se torne instável do ponto de vista da frequência. A negação de dados também pode ocasionar o mesmo efeito. Caso as informações não sejam transmitidas nas etapas 1 ou 3, o controle de velocidade da unidade síncrona não atuará, o que também pode levar o sistema a colapsar.

Técnicas como classificação de dados por reconhecimento de padrões e estimadores de estados podem ser utilizadas para detecção e defesa contra esses ataques. Os controles aqui mencionados são tradicionalmente supervisionados por meio do supervisão SCADA (do inglês *supervisory control and data acquisition*) e, geralmente é esse supervisão que recebe a maior parte dos ataques cibernéticos. Um detalhamento maior do SCADA e medidas para aumentar sua segurança contra acessos não autorizados será dado no Capítulo 3.

2.6 COGERAÇÃO COM FONTES RENOVÁVEIS DE ENERGIA

A Aneel, por meio de sua Resolução Normativa n. 235, de 14 de novembro de 2006, define a cogeração da seguinte maneira:

processo operado numa instalação específica para fins da produção combinada das utilidades calor e energia mecânica, esta geralmente convertida total ou parcialmente em energia elétrica, a partir da energia disponibilizada por uma fonte primária (Aneel, 2006).

A cogeração consiste na produção simultânea de duas ou mais utilidades. Essas utilidades podem ser o calor do processo e potência mecânica e/ou elétrica, a partir da energia disponibilizada por uma ou mais fontes combustíveis.

Levando-se em consideração o conceito fundamental das redes inteligentes, tomam-se aqui somente processos de cogeração com fontes de energia renováveis. Podemos citar as seguintes aplicações no Brasil: usinas termelétricas a combustão de biomassa; turbinas a gás acionadas por biogás; e sistema de cogeração em ciclo combinado.

As vantagens da operação por meio da cogeração com fontes combustíveis renováveis estão na alta eficiência que essas plantas podem oferecer, com baixas perdas de energia.

A utilização do biogás oferece duas grandes vantagens relacionadas ao conceito de redes inteligentes:

1. Materiais biológicos contêm energia derivada diretamente da fotossíntese. As plantas convertem dióxido de carbono e água em carboidratos e oxigênio. No

entanto, na combustão desse material, dióxido de carbono é liberado na atmosfera. Porém, se um ciclo fechado de carbono for realizado de maneira correta, as plantas replantadas para serem utilizadas como combustível de biomassa reabsorverão esse dióxido de carbono e liberarão oxigênio na atmosfera.

2. O biocombustível, ou biogás, é a única fonte de energia renovável que não depende do clima, como a eólica e a solar, e que garante a contínua geração de energia.

De acordo com a Aneel, existiam no Brasil, em 2021, 588 empreendimentos em operação que utilizavam biomassa como fonte de energia para a geração de energia elétrica. Para se ter uma ideia, essa quantidade representa 8,84% dos empreendimentos e a geração com fonte eólica a 10,64%. A Tabela 2.5 mostra a relação dos tipos de biocombustíveis e sua representação no setor elétrico brasileiro (Aneel, 2021).

Tabela 2.5 Representatividade da geração por biomassa no setor elétrico brasileiro

Origem	Tipo	Combustível	Quantidade	Potência outorgada (kW)	% potência outorgada
Biomassa	Agroindustriais	Bagaço de cana-de-açúcar	412	12.010.314,20	76,16%
Biomassa	Floresta	Licor negro	18	2.538.634	16,1%
Biomassa	Floresta	Resíduos florestais	63	603.010	3,82%
Biomassa	Resíduos sólidos urbanos	Biogás – RU	22	189.195,60	1,20%
Biomassa	Floresta	Gás de alto forno – biomassa	12	127.705,05	0,81%
Biomassa	Floresta	Lenha	8	104.575	0,66%
Biomassa	Agroindustriais	Casca de arroz	13	53.333	0,34%
Biomassa	Floresta	Carvão vegetal	7	38.197	0,24%
Biomassa	Agroindustriais	Biogás – AGR	4	31.867	0,2%
Biomassa	Agroindustriais	Capim elefante	2	31.700	0,2%
Biomassa	Resíduos sólidos urbanos	Resíduos sólidos urbanos – RU	5	19.608	0,12%
Biomassa	Resíduos sólidos urbanos	Carvão – RU	3	8.250	0,05%
Biomassa	Floresta	Biogás – Floresta	1	5.000	0,03%
Biomassa	Resíduos animais	Biogás – RA	15	4.741,20	0,03%
Biomassa	Biocombustíveis líquidos	Óleos vegetais	2	4.350,40	0,03%
Biomassa	Biocombustíveis líquidos	Etanol	1	320	0%
Total			588	15.770.800,45	100%

Fonte: Aneel, 2021.

Como pode ser visto na Tabela 2.5, o biogás não deriva apenas de plantas, mas também de resíduos animais (gases expelidos na suinocultura, por exemplo) e resíduos sólidos urbanos, entre outros.

Para o caso da cogeração com ciclo combinado, na geração de energia elétrica é feita a combinação do calor gerado por uma unidade geradora como fonte para outra unidade, extraindo mais energia do processo, consequentemente, aumentando sua eficiência. A eficiência de plantas de cogeração com ciclo combinado pode chegar a 85%.

A Figura 2.11 mostra a cogeração com uma unidade que gera calor pela combustão do biogás, e esse calor é aproveitado para o processo de vaporização da água, que servirá para o acionamento de uma turbina a vapor em uma segunda unidade geradora.

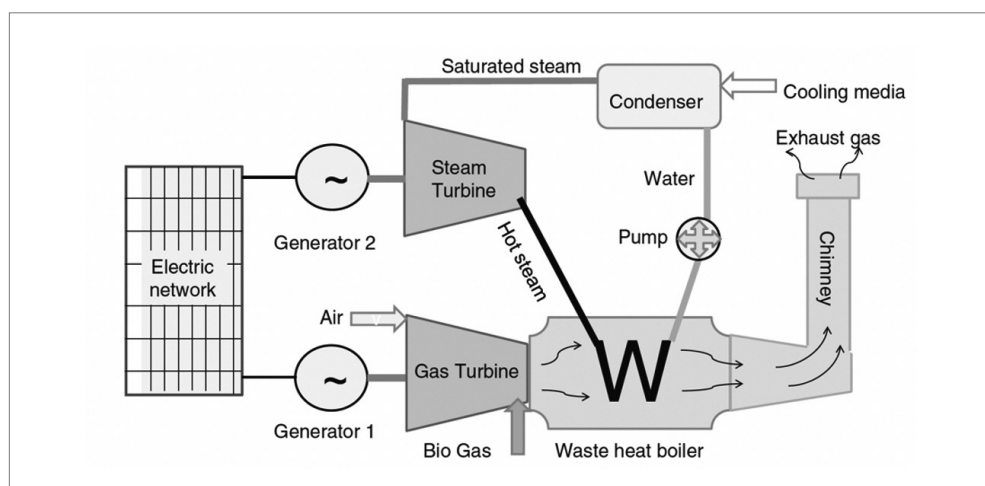


Figura 2.11 Cogeração com ciclo combinado.

Fonte: Buchholz, 2014.

A busca por processos de geração mais ambientalmente amigáveis tem levado pesquisadores a desenvolverem métodos que cada vez mais aproveitam os diversos tipos de energia transformados nos sistemas de geração para que se alcance um maior rendimento e maior eficiência. No Brasil, a cogeração tem como enfoque o biogás. Processos que envolvem energia geotérmica e células combustíveis não recebem atenção no país, pois não se encontram no território brasileiro fontes geotérmicas próprias para a geração, e porque o custo das células combustíveis ainda é alto.