

Recursos Energéticos Distribuídos e Redes Eléctricas Inteligentes

Guia de conteúdo para docentes



Publicado por
Profissionais do Futuro: Competências para a Economia Verde

**Ministério da Educação
(MEC)**

Ministro
Camilo Santana

**Secretário de Educação Profissional e
Tecnológica**
Getúlio Marques

**Deutsche Gesellschaft für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH**

Diretor Nacional
Michael Rosenauer

**Diretor de Energias Renováveis e Eficiência
Energética**
Johannes Kissel

Diretora do Projeto Profissionais do Futuro
Julia Giebeler Santos

Coordenação e revisão técnica da publicação
Caroline Luciane Broering Dutra – GIZ
Roberta Hessmann Knopki – GIZ

Coordenação da diagramação
Lucas Tolentino – GIZ

Autor
Diogo Vinícius João
Marcos Izumida (coordenação geral dos autores)

Projeto gráfico e diagramação
João Bosco Gouvea Ramos

Revisão e edição de texto
Ismael Danilo Lima Freitas – GIZ
Luis Felipe Jaber – GIZ

AVISO LEGAL O conteúdo deste ebook reflete apenas a opinião do autor. A GIZ não é responsável pelo uso que possa ser feito das informações nele contidas. Ele foi elaborado apenas para fins didáticos, distribuído de maneira gratuita, sendo expressamente proibida sua comercialização. É vedada a reprodução total ou parcial deste material, por qualquer meio ou processo, sem autorização expressa da GIZ. Conteúdos visuais e textuais, quando de terceiros estão devidamente creditados e mencionados citando fontes e créditos. A violação de direitos autorais constitui crime (Código Penal, art. 184 e §§, e Lei nº 10.695, de 1º/07/2003), sujeitando-se a busca e apreensão e indenizações diversas (Lei nº 9.610/98).

Brasil, janeiro de 2023

Sumário

Abertura	6
Objetivos	8
Capítulo 1: O Sistema de Energia e a Introdução da Geração Distribuída	10
1.1. Panorama do Sistema Elétrico	10
1.2. Padrões de Consumo e Geração de Energia	14
1.3. Geração Distribuída e Sustentável	18
1.4. Previsão de Cargas	21
1.5. Transitórios de Tensão e Corrente	23
1.6. Recapitulando	25
Capítulo 2: Sistemas de Armazenamento e Integrações com o Sistema Elétrico	28
2.1. Caracterização de Sistemas de Armazenamento e seus benefícios	28
2.2. Sistemas de Armazenamento de Energia Elétrica	30
2.3. Integração ao Sistema Elétrico	32
2.4. Curvas e Comportamento Elétrico	34
2.5. Recapitulando	38
Capítulo 3: Infraestrutura das Redes Elétricas Inteligentes	40
3.1. Características e Peculiaridades da Rede	40
3.2. Infraestrutura de Redes Inteligentes	43
3.3. Protocolos de Comunicação	48
3.4. Infraestrutura Avançada de Medição e Medidores Inteligentes	52
3.5. Cidades Inteligentes e Mobilidade Elétrica	53
3.6. Segurança Cibernética	55
3.7. Recapitulando	56

Capítulo 4: Prestação de Serviços e Suporte à Rede com Geração Distribuída	58
4.1. Qualidade de Energia e Intermitência	58
4.2. Prosumidor e Participação por Incentivo e Resposta ao Preço	59
4.3. Serviços Ancilares	62
4.4. Eficiência Energética, Smart Home e IoT	64
4.5. Modelos de Resposta à Demanda	68
4.6. Recapitulando	70
Capítulo 5: Regulação e Modelos de Negócios	72
5.1. Histórico da Regulação da Geração Distribuída	72
5.2. Avaliação Técnica e Econômica	74
5.3. Modelos de Negócios	76
5.4. Recapitulando	80
Casos de Sucesso	82
Roteiro para projetos com RED no contexto de REI	87
Entidades a consultar sobre o tema de RED e REI	88
Fechamento	91
Glossário	92
Referências	94
Respostas das Avaliações	96



Abertura

Apesar de muito divulgado em noticiários e apresentados como solução para vários problemas da matriz energética (que de fato podem ser), os Recursos Energéticos Distribuídos (RED), principalmente aqueles derivados de fontes intermitentes como o sol e o vento, ainda hoje apresentam enormes desafios técnicos, bloqueios regulatórios e ineficiência em incentivos e subsídios para grandes projetos. Entretanto, é inegável os enormes avanços vistos nos últimos anos em cada uma destas áreas.

A implantação de sistemas fotovoltaicos e eólicos traz desafios à rede elétrica em aspectos que tangem a imprevisibilidade da geração e a necessidade de garantir a qualidade do suprimento de energia mesmo com intermitência de sua fonte primária. Assim, faz-se necessário o interfaceamento destes recursos por conversores eletrônicos, utilizando controle baseado em eletrônica de potência. Tais controles mitigam os problemas de intermitência e qualidade energética estática, porém adiciona questões de qualidade dinâmica do sinal elétrico gerado, ou seja, é possível verificar alto teor de harmônicas ou efeitos de instabilidade pós-transitório na rede. Estas questões dinâmicas são pontos de atenção ao se projetar os conversores necessários para se implantar sistemas de Geração Distribuída (GD) conectados à rede.

A efetivação da implementação de GD na rede elétrica é o primeiro passo no caminho da formação de uma rede elétrica mais inteligente. Recentemente, pudemos notar uma maior adesão aos sistemas de armazenamento de energia e programas de resposta à demanda. É importante destacar que o termo “inteligente” aplicado no conceito de Redes Elétricas Inteligentes (REI) se refere a aumentar a inteligência da rede elétrica tradicional, que em termos de controle, operação, proteção e supervisão já apresenta uma comunicação complexa.

Este aumento da inteligência é alcançado pela busca de uma visão sustentável das fontes primárias de energia e pela alta interoperabilidade entre equipamentos, serviços e sistemas pertinentes ao sistema elétrico. O fato de a geração ser realizada próxima ao consumidor final colabora com este aumento de inteligência, reduzindo as perdas na transmissão de energia e disponibilizando suporte local à rede mediante faltas ou falhas de serviços, podendo ainda promover suporte por meio de serviços ancilares.

Dentro de todo este contexto que envolve desde a identificação e avaliação de fontes primárias renováveis até a formação topológica de redes inteligentes, este ebook visa trazer ao/a professor/a que ministra disciplinas sobre REI o caminho a ser trilhado tecnicamente e operacionalmente rumo à modernização do setor elétrico. Esta caminhada terá curvas bem acentuadas em aspectos de comunicação, em sistemas de armazenamento e curvas moderadas em aspectos históricos, regulatórios e econômicos.

Este ebook se inicia com a apresentação do panorama do sistema elétrico, no qual o/a professor/a será guiado/a no contexto da verticalização do sistema elétrico tendendo à uma horizontalização. Ainda no primeiro capítulo os requisitos básicos de interconexão, proteção e estabilidade das GDs são apresentados. No segundo capítulo são apresentadas as características dos sistemas de armazenamento, bem como sua relevância para as REI com uma visão de curvas e comportamento elétrico. O terceiro capítulo apresenta um foco exclusivo em sistemas de comunicação, sendo apresentados aspectos de infraestrutura e topologia de rede, além dos principais protocolos de comunicação. É neste momento que são apresentados os medidores inteligentes, mobilidade elétrica e o conceito de casas e cidades inteligentes. O capítulo 4, por sua vez, é focado em serviços que os REDs e as REI podem prover à rede elétrica, apresentando o conceito de “prosumidor”, serviços de resposta à demanda e a utilização de GD para serviços ancilares. O último capítulo apresenta o histórico da regulação da GD no Brasil, avalia aspectos técnicos e econômicos em projetos envolvendo o interfaceamento de eletrônica de potência e fecha com a apresentação de modelos de negócios relacionados a RED existentes no Brasil e no mundo. Todos os conteúdos são trazidos na forma de insumos para que o/a docente complemente e aprofunde cada tópico da maneira que melhor se adaptar a seu/sua curso/disciplina.



Objetivos

A aplicação de RED é uma realidade que começa a ser presenciada no setor elétrico. Embora sua aplicação massiva seja feita de maneira isolada da rede, versões chamadas de *on-grid* começam a receber incentivos, principalmente em termos de regulamentação, apontando para uma aceitação técnica dos órgãos regulatórios e operacionais. Destes avanços, as REI se alinham com os avanços na digitalização da rede elétrica e aplicações de conceitos, como a Internet das Coisas (*Internet of Things* ou IoT), e das diversas metodologias de Inteligência Artificial. É com base neste contexto que se encontra a motivação dos estudos apresentados neste ebook. Para que a trilha do conhecimento seja bem traçada pelo/a docente que ministra disciplinas nessa área, são delineados cinco macro objetivos, descritos da seguinte forma:

- 1. Identificar os componentes de um sistema de energia elétrica considerando a introdução de geração distribuída.** Pretende-se neste capítulo familiarizar o/a aluno/a com os principais conceitos presentes no setor elétrico que são relevantes para a compreensão sobre as mudanças que os RED trazem para o setor elétrico. Dentro deste objetivo, são apresentados o padrão de consumo da rede e as formas de geração energética que agregam valor às Gerações Distribuída (GD). Uma breve ponderação de aspectos técnicos também faz parte do escopo deste capítulo, o que inclui perspectivas de proteção, previsão de carga e análise de transitório.
- 2. Identificar os tipos de sistemas de armazenamento e suas formas de integração com o sistema elétrico, considerando aspectos técnicos.** Propõe-se neste capítulo, levar o/a aluno/a ao entendimento dos sistemas de armazenamento, haja visto que tais sistemas são importantes para garantir, quando chegarmos a patamares mais elevados, a viabilidade técnica da implantação de GDs. Com este capítulo, busca-se o a compreensão básica do dimensionamento de um sistema de baterias e a avaliação de seus benefícios tanto para GDs quanto para REIs. Há dois enfoques que o objetivo deste capítulo se centra, sendo o primeiro a integração destes sistemas ao setor elétrico por meio de conversores eletrônicos e o segundo a avaliação das principais curvas presentes no sistema e comportamento elétrico visando o entendimento da operação dos sistemas de armazenamento para REI.

- 3. Entender os conceitos de diferentes topologias de rede elétrica.** A intenção deste capítulo é mergulhar o/a aluno/a nos aspectos base de comunicação voltados para as REI. Questões relacionadas à interoperabilidade de dados de equipamentos e ativos, manipulação de grande quantidade de dados e questões de intermitências das variáveis são o enfoque introdutório. Neste capítulo, é apresentada a estrutura das redes inteligentes em diversas versões e suas infraestruturas de comunicação em um contexto que engloba *Smart Homes* (Casas Inteligentes), *Smart Buildings* (Prédios Inteligentes) e *Smart Cities* (Cidades Inteligentes), bem como a apresentação da Infraestrutura Avançada de Medição (AMI - *Advanced Metering Infrastructure*) e a mobilidade elétrica. Uma maior relevância conceitual para as REI é vista ao se discutir os protocolos de comunicação e aspectos de cibersegurança.
- 4. Avaliar e aplicar os modelos de resposta à demanda na análise de sistemas de geração distribuída.** Objetiva-se neste capítulo a apresentação dos serviços para os quais tanto as GDs quanto as REI se mostram potencialmente vantajosas. Dois aspectos são de grande relevância para se galgar o objetivo deste capítulo: a definição e a função do Prosumidor na rede elétrica e a apresentação do conceito de Resposta à Demanda (RD). Estas definições são apresentadas em um viés de serviços ancilares da rede e eficiência energética.
- 5. Compreender a regulação vigente e os novos modelos de negócios do setor elétrico.** Completa-se os objetivos deste ebook com a apresentação histórica da regulamentação pertinente à GD que culminou no estado regulatório atual. Este é um objetivo de grande importância, principalmente devido às tendências atuais voltadas para a transformação das regulamentações existentes em legislações de fomento ao uso de RED e renováveis. Ademais, este capítulo tem o objetivo de apresentar os modelos de negócios existentes que envolvem GD e os modelos baseados em sistemas.



Capítulo 1: O Sistema de Energia e a Introdução da Geração Distribuída



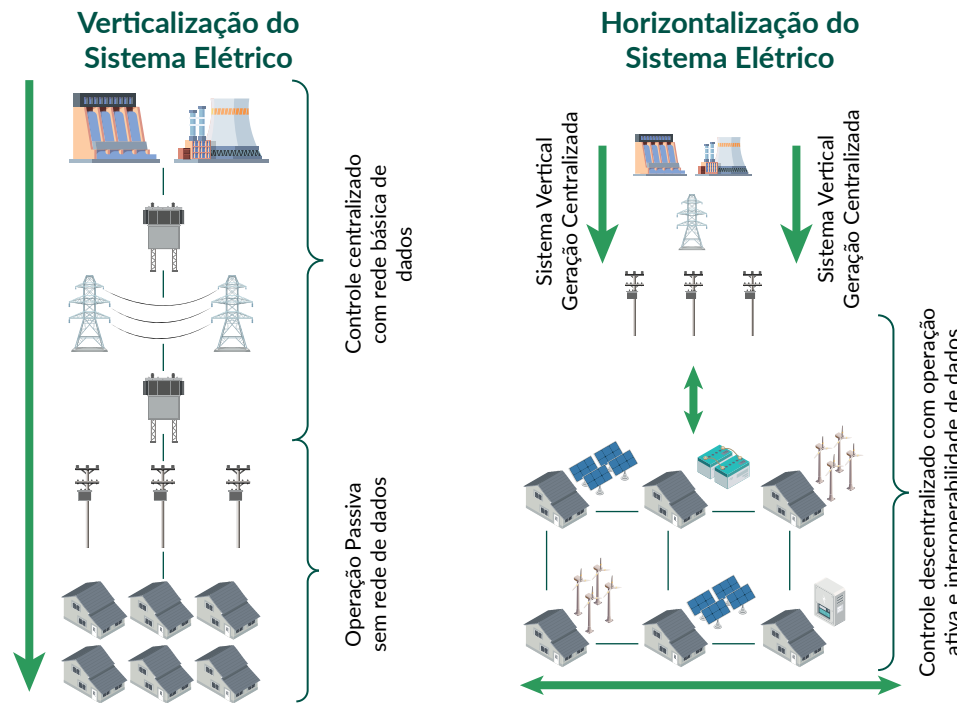
Nota para o/a professor/a – Este capítulo visa identificar e apresentar aos/as alunos/as os componentes de um sistema de energia elétrica, considerando a introdução da geração distribuída na rede elétrica.

1.1. Panorama do Sistema Elétrico

O sistema elétrico apresenta uma estrutura vertical para o transporte de energia. Isto significa que a energia é gerada em uma entidade geradora que despacha a energia para um sistema de transmissão, que por sua vez entrega a energia para as distribuidoras que alimentam os consumidores finais de energia elétrica.

Esta verticalização é a base do sistema elétrico tradicional. Entretanto, esta estrutura vem sendo reconfigurada com a introdução de geração distribuída ao longo da cadeia de distribuição da rede. Assim, estrutura-se a horizontalização do sistema elétrico. A Figura 1 ilustra uma rede verticalizada e outra horizontalizada.

Figura 1. Verticalização e Horizontalização da rede elétrica¹.



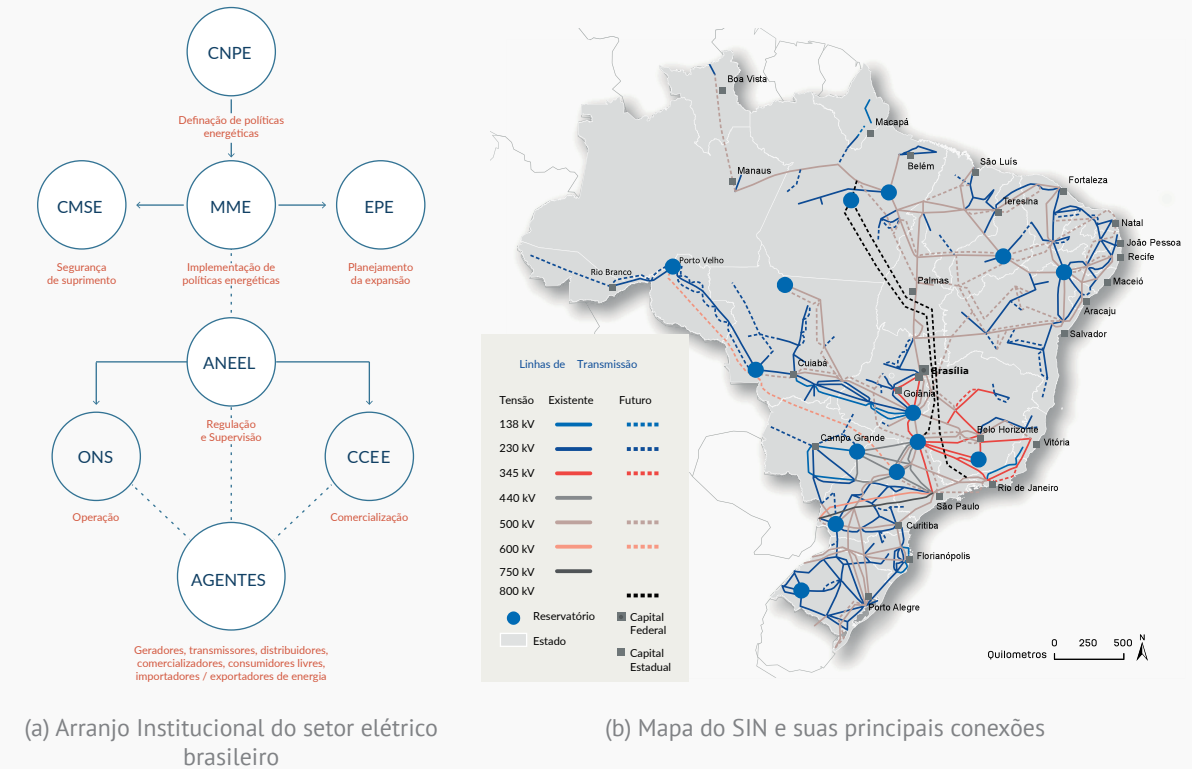
1. Fonte: Elaboração própria

A operação da rede elétrica do país é realizada pelo Operador Nacional do Sistema (ONS), que controla o Sistema Interligado Nacional (SIN). Com todo o sistema interligado, é possível estabelecer intercâmbio de energia entre as regiões do país, mitigando problemas regionais como seca, e eventuais altas de demanda localizada.

Apesar da interligação do sistema operada pelo ONS, há regiões isoladas que o operador atua indiretamente. Atualmente são 122 pontos de carga isolada que somadas representam menos de 1% de toda a carga do país. A demanda destas regiões é suprida principalmente por geradores térmicos a óleo diesel. A maior parte dos pontos de carga isolada está na região Norte, nos estados de Rondônia, Acre, Amazonas, Roraima, Amapá e Pará. A ilha de Fernando de Noronha, em Pernambuco, e algumas localidades de Mato Grosso completam a lista. Entre as capitais, Boa Vista (RR) é a única que ainda é atendida por um sistema isolado.

No Brasil, o ONS é fiscalizado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a qual também fiscaliza a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE). A ANEEL responde diretamente ao Ministério de Minas e Energia (MME), o qual segue as diretrizes do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), do Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE) e da Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Sob todas estas instituições, os Agentes de Geração, Transmissão e Distribuição atuam na rede elétrica do país. A Figura 2 ilustra o panorama do setor elétrico brasileiro.

Figura 2. Panorama do setor elétrico Brasileiro².

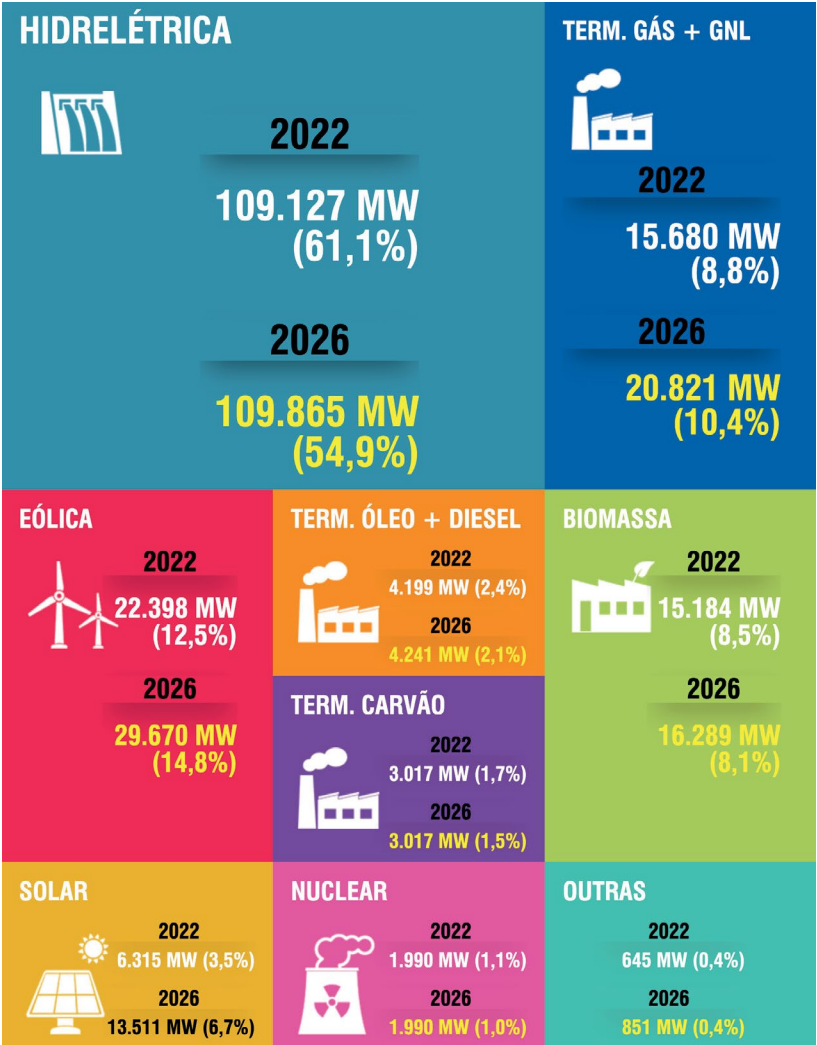


2. Fonte: (Carola Griebenow, 2019)



No Brasil, a maior fonte de geração elétrica é a hidráulica, seguida pela geração térmica. Por este motivo, o sistema de geração brasileiro é definido como hidrotérmico. Contudo, é visto um crescimento das fontes eólicas e fotovoltaicas no país. Este crescimento é devido a diversos fatores, como políticas de descarbonização das empresas do setor e por incentivos governamentais. A Figura 3 apresenta a evolução da capacidade instalada por fonte de geração no Brasil de 2022, projetando para até 2026.

Figura 3. Evolução da capacidade Instalada de Geração por Fonte no Brasil (dados ONS - Dez/2021)³.



Futuro: A perspectiva de descarbonização é foco dos países desenvolvidos e em desenvolvimento, onde as grandes empresas exercem papel fundamental. Por esta perspectiva, é visto muito incentivo para os avanços em energias renováveis, além da promoção da descarbonização e descentralização (horizontalização) da matriz energética. Mesmo no Brasil, onde mais de 85% de sua capacidade provém de fontes renováveis, majoritariamente pelas hidrelétricas, seu potencial em geração solar, eólico e mesmo maremotriz é algo a ser ainda muito explorado.

<https://origoenergia.com.br/blog/energia/brasil-tem-vantagem-competitiva-em-setor-de-energia/>

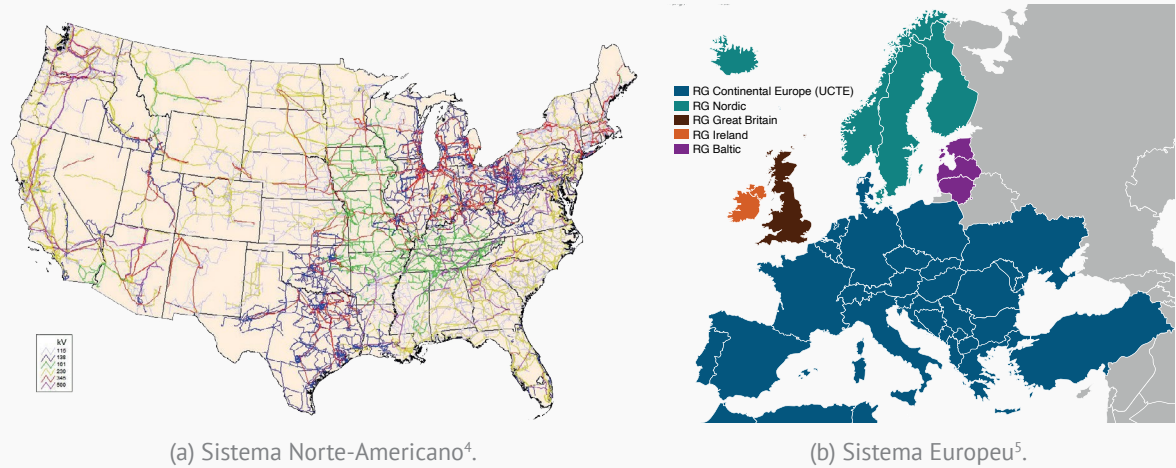
3. Fonte <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>

Diferentemente do que é presenciado no Brasil, em outros países, como os Estados Unidos (EUA), a operação e controle do sistema elétrico contam com múltiplos operadores, sendo os Operadores da Costa Leste e o da Costa Oeste os maiores do país. Há ainda outros dois operadores menores responsáveis pelas regiões do Texas e do Alaska. Os Operadores das Costa Leste, Oeste e Texas são interconectados através de linhas de Corrente Contínua (CC), permitindo uma leve interconexão entre as regiões. O órgão responsável por estabelecer e melhorar a qualidade e segurança da rede estadunidense é a Corporação de Confiabilidade Elétrica Norte-Americana (NERC - *North American Electric Reliability Corporation*).

Na Europa, a operação dos sistemas de transmissão é realizada pelos Operadores formados pela União para Coordenação de Transmissão de Eletricidade (UCTE - *Union for the Coordination of Transmission of Electricity*). A UCTE é parte da Rede Europeia de Operadores de Sistemas de Transmissão para Eletricidade (ENTSO-E - *European Network of Transmission System Operators*). O sistema britânico e a região Nórdica dispõem de linhas CC entre os países. No caso do sistema da Irlanda, não há conexão alguma com a rede continental europeia, contudo realiza conexões com a Inglaterra. A região Báltica é conectada à região Nórdica através de linhas CC e conectada à rede europeia pela Polônia. Os sistemas da Islândia e de Chipre são regiões totalmente desconectadas da rede continental europeia.

A Figura 4 ilustra o sistema de operação norte-americano e o sistema europeu.

Figura 4. Principais sistemas de operadores do mundo.



Saiba mais: Conheça a evolução da capacidade instalada do SIN em números pelo mapa do ONS disponibilizado em:

<http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>

4. Fonte: Adaptado de https://en.wikipedia.org/wiki/North_American_power_transmission_grid

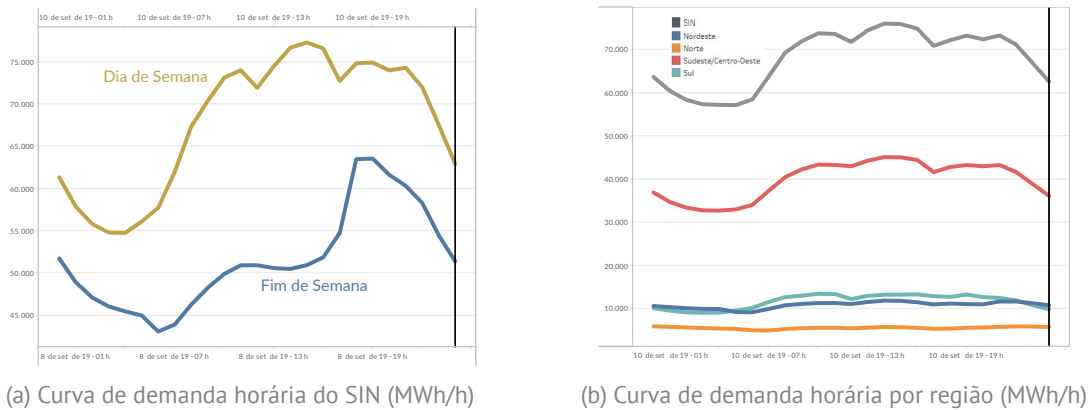
5. Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/Synchronous_grid_of_Continental_Europe



1.2. Padrões de Consumo e Geração de Energia

Os padrões de consumo da rede elétrica são representados por curvas horárias, que demonstram o perfil de demanda da rede. Estas curvas apresentam picos e vales que direcionam as diretrizes de despacho da geração e da operação da rede. Geralmente durante o período noturno, a demanda energética diminui e durante horários comerciais a demanda aumenta. Entretanto, este perfil varia dependendo da estação do ano, dia da semana, climatologia local e temporal, feriados e recessos, etc. A Figura 5 lustra o perfil de carga da rede elétrica brasileira.

Figura 5. Perfil de carga brasileiro segundo ONS⁶

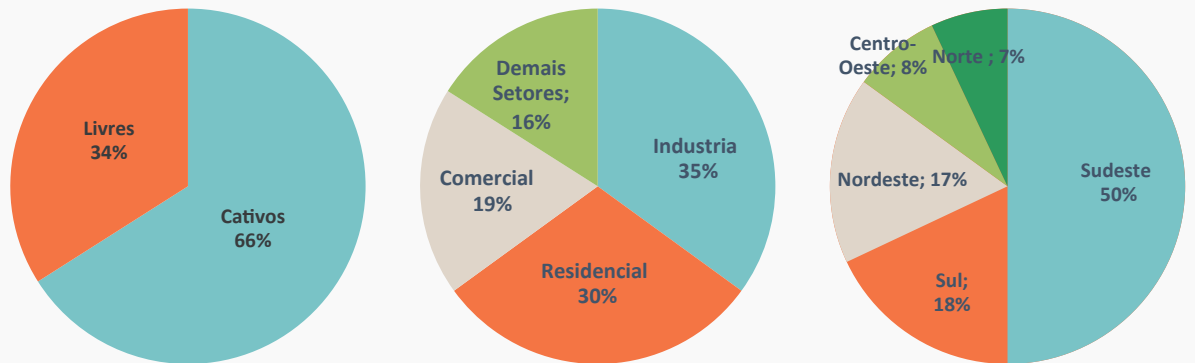


Futuro: Com a alta penetração de recursos energéticos distribuídos na rede elétrica, é previsto uma alteração no perfil de carga, tendendo a deixá-la mais plana. Isto será possível com a utilização de geração distribuída na forma de prestadora de serviços ancilares e para a elevação dos conceitos de resposta à demanda.

<https://www.linkedin.com/pulse/gera%C3%A7%C3%A3o-distribu%C3%ADa-e-sua-rela%C3%A7%C3%A3o-com-tarifa-de-servi%C3%A7os-freitas/?originalSubdomain=pt>

O setor elétrico brasileiro segrega seus consumidores em cativos e livres. De acordo com dados da EPE/2020, os consumidores cativos representam 66% da demanda da rede, sendo os demais 34% de consumidores livres. Em termos setoriais, a indústria consome 35% da energia gerada no país, enquanto a área residencial consome 30% e a comercial 19%. Verifica-se ainda, que 50% da energia gerada no país é consumida na região Sudeste. A região sul consome 18%, seguindo as regiões nordeste, 17%, centro-oeste 8% e norte 7%. A Figura 6 mostra tais números em forma de gráfico.

Figura 6. Estatística de consumo de energia elétrica no Brasil – Segregação mercadológica, setorização e regionalização⁷.

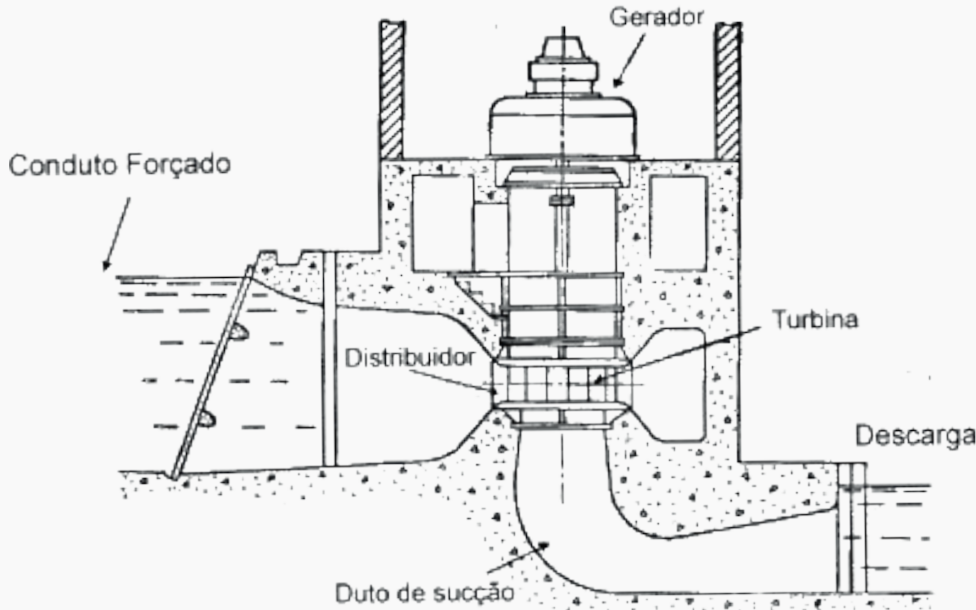


A geração de energia envolve a conversão energética de um insumo em eletricidade, como água represada, irradiação solar, cinética dos ventos ou pressão térmica. Tais insumos realizam, respectivamente, conversões energéticas resultando em: geração hidrelétrica; geração solar; geração eólica e; geração térmica.

a. Geração Hidrelétrica

No caso da geração hidrelétrica, a energia potencial da água represada é usada para movimentar turbinas acopladas em geradores. Há três tipos principais de hidro turbinas: Pelton, Francis e Kaplan. Cada uma destas turbinas tem propósitos e aplicações que variam com situações locais e intenções de geração. A água nesse sistema é conduzida até a turbina através de uma tubulação, conhecida como conduto forçado, e então a água é descarregada via conduto de sucção em um curso de água abaixo da turbina. A Figura 7 ilustra um sistema de geração hídrico.

Figura 7. Ilustração de um sistema de geração Hidrelétrica com turbina Francis⁸.



7. Fonte: Adaptado de <http://shinyepe.brazilsouth.cloudapp.azure.com:3838/anuario>

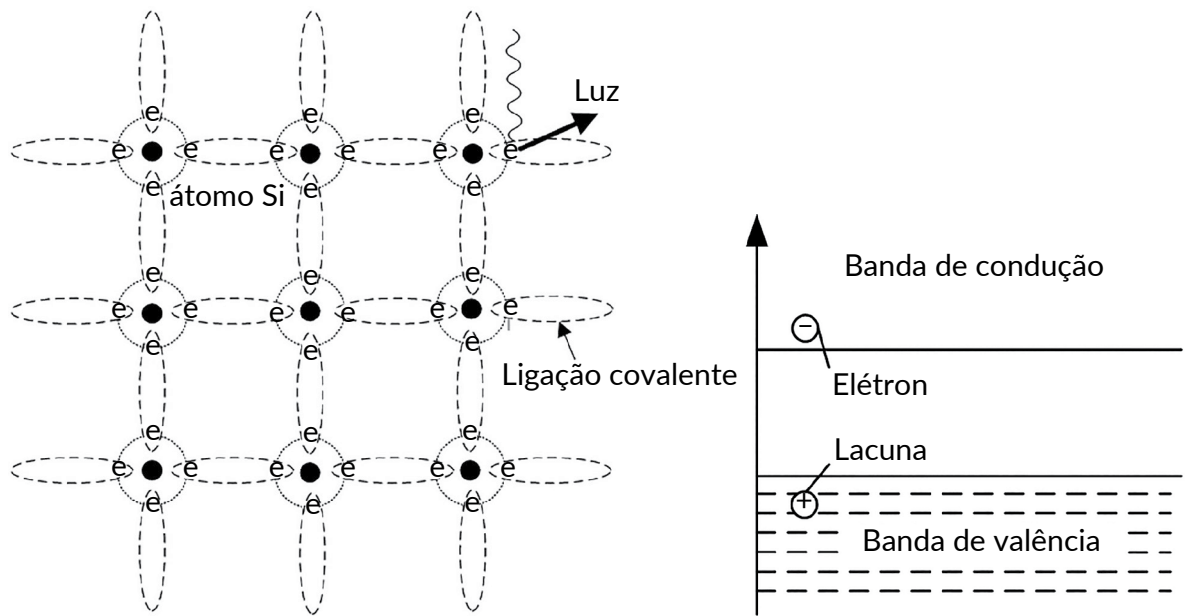
8. Fonte: https://nupet.daelt.ct.utfpr.edu.br/tcc/engenharia/doc-equipe/2012_1_05/2012_1_05_monografia.pdf



b. Geração Solar

O processo para se gerar energia por meio da irradiação solar consiste no fenômeno de excitação de elétrons que se encontram em camadas de valência. Esta excitação ocorre através da incidência de raios solares que cedem energia aos átomos que compõem um painel fotovoltaico. O silício é o material tradicionalmente utilizado para conversão de energia solar em energia elétrica. Com a excitação do elétron causada pela irradiação, criam-se lacunas nas camadas do átomo que geram uma movimentação de elétrons entre as camadas de valência e as camadas de condução, gerando assim corrente elétrica. A Figura 8 ilustra o comportamento de elétrons em átomos de silício.

Figura 8. Ilustração de átomos de silício em contato com luz solar e suas camadas⁹.

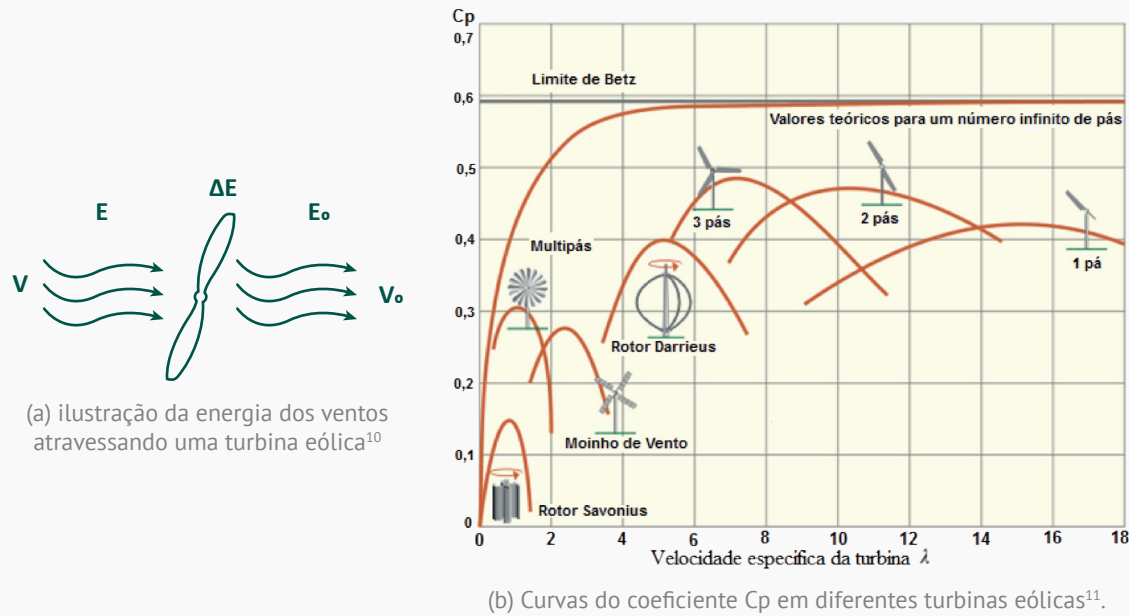


c. Geração Eólica

A movimentação cinética de massas de ar que atravessam um sistema aerogerador move suas pás. Estas pás são acopladas a geradores elétricos que convertem energia cinética em elétrica. A potência gerada por este sistema é diretamente proporcional ao cubo da velocidade momentânea do vento, e diretamente proporcional a um fator, C_p , relacionado ao sistema de pás do aerogerador. A Figura 9 apresenta as características de um sistema eólico.

9. Fonte: (Wang, 2017)

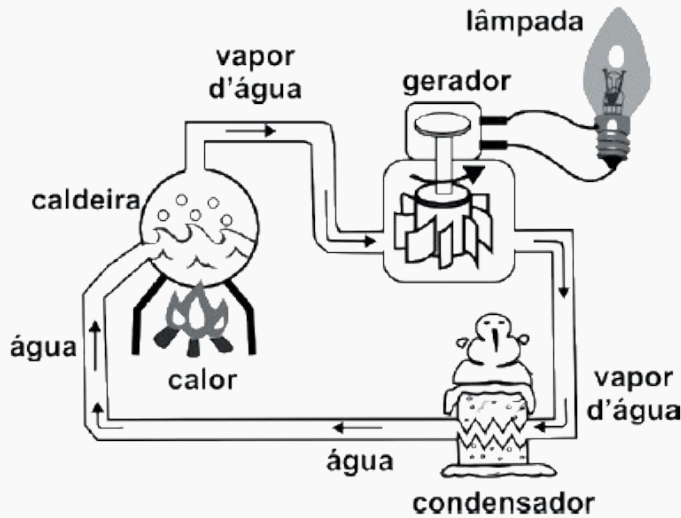
Figura 9. Características de um sistema eólico.



d. Geração Térmica

As fontes de geração térmica representam grande relevância no setor elétrico. Sua base de operação utiliza a queima de algum combustível (como o carvão, diesel ou gás) que, aquecido em uma caldeira, gera vapor em um sistema hidráulico que atravessa a caldeira. Este vapor gerado é responsável por criar diferenças de pressão em turbinas térmicas que as movimentam. Com o acoplamento de geradores elétricos a estas turbinas, gera-se energia elétrica. A Figura 10 ilustra um sistema de geração térmica.

Figura 10. Ilustração de um sistema de geração térmica¹²



10. Fonte: Elaboração própria

11. Fonte: (Bazzo, 2017)

12. Fonte: <https://www.qconcur.com/questoes-de-concursos/questoes/bb24cd2a-dc>



Saiba mais: Se aprofunde sobre turbinas hidráulicas, eólicas e a vapor pelos links:

www.maxwell.vrac.puc-rio.br/19308/19308_3.PDF

<https://oakenergia.com.br/turbinas-eolicas/>

<https://turbivap.com.br/funcionamento-turbina-a-vapor/>

1.3. Geração Distribuída e Sustentável

Geração Distribuída (GD) é um conceito que envolve a disseminação de pequenos sistemas de geração de energia que são instalados junto ao consumidor na rede de distribuição. Isso significa que o consumidor pode se tornar um produtor de energia, agindo ativamente no balanço energético da rede. A Figura 11 mostra um bairro modelo de geração distribuída na Alemanha.

Figura 11. Bairro modelo da Alemanha com grande disseminação de GD¹³



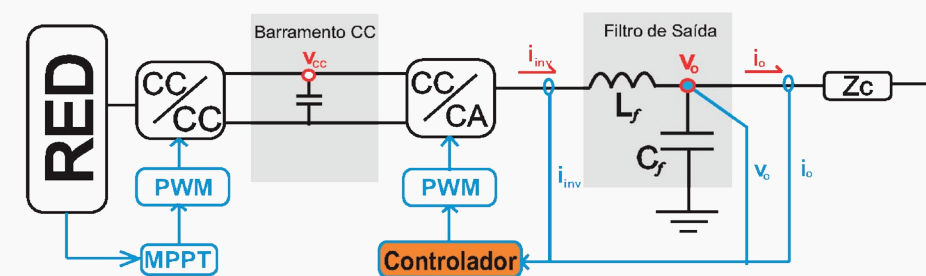
Futuro: A produção de energia é realizada por diversas fontes primárias (urânio, petróleo, carvão, vento, água e sol), porém cada vez mais se busca o uso de fontes renováveis, como nos sistemas fotovoltaicos e eólicos. Esta tendência segue diretrizes e metas globais para descarbonizar a matriz energética mundial e vem sendo reforçada por meio de políticas públicas rigorosas, principalmente em países com dependência energética de fontes não-renováveis. Exemplos são vistos no acordo de Paris e nas metas estabelecidas mundialmente para 2030 e anos posteriores.

<https://www.portalsolar.com.br/geracao-distribuida-de-energia.html>

13. Fonte: <https://www.portalsolar.com.br/geracao-distribuida-de-energia.html>

Sistemas de GD são constituídos por Recursos Energéticos Distribuídos (RED), ou seja, fontes primárias de energia distribuídas ao longo da rede de tal sorte que possam ser utilizadas para geração de energia no local de consumo. Além dos RED, os sistemas de GD também são constituídos por sistema de geração, conversores de energia, filtros de sinais e sistemas de controle local. No entanto, o interfaceamento da geração distribuída à rede é realizado pelos conversores eletrônicos, os quais são controlados por algoritmos especializados como Modulação por Largura de Pulso (*Pulse-Width Modulation* – PWM) e estratégias de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (*Maximum Power Point Tracking* – MPPT). À frente dos conversores se encontram filtros de sinal que garantem a confiabilidade de um perfil de onda senoidal adequado para a rede. A Figura 12 ilustra uma visão genérica de um interfaceamento de uma GD.

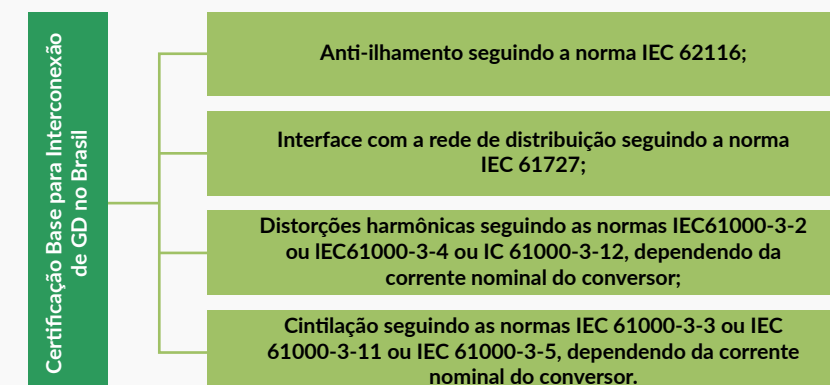
Figura 12. Estrutura genérica de uma GD¹⁴



Para que as GDs possam ser conectadas à rede elétrica, é necessário o cumprimento de alguns requisitos técnicos. Estes requisitos têm o objetivo de garantir a confiabilidade e qualidade da rede básica, uma vez que as GDs podem injetar alto teor de harmônicos na rede, provocar afundamento de tensão, além de energizar indevidamente trechos da rede, etc.

No Brasil, regimentos locais estabelecidos pelos agentes de distribuição regionais definem os requisitos para as interconexões das GDs na rede. Estes agentes, por sua vez, seguem diretrizes da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), garantindo assim o cumprimento de requisitos técnicos mínimos para todas as interconexões. Como exemplo, destaca-se a necessidade de homologação dos conversores eletrônicos utilizados no sistema por meio de certificações estipuladas pelas concessionárias locais. Estas certificações variam de acordo com porte da GD, nível de tensão, tipo de sistemas, etc. De maneira geral, estas certificações estão descritas na Figura 13.

Figura 13. Certificações básicas para interconexão de GD à rede elétrica¹⁵



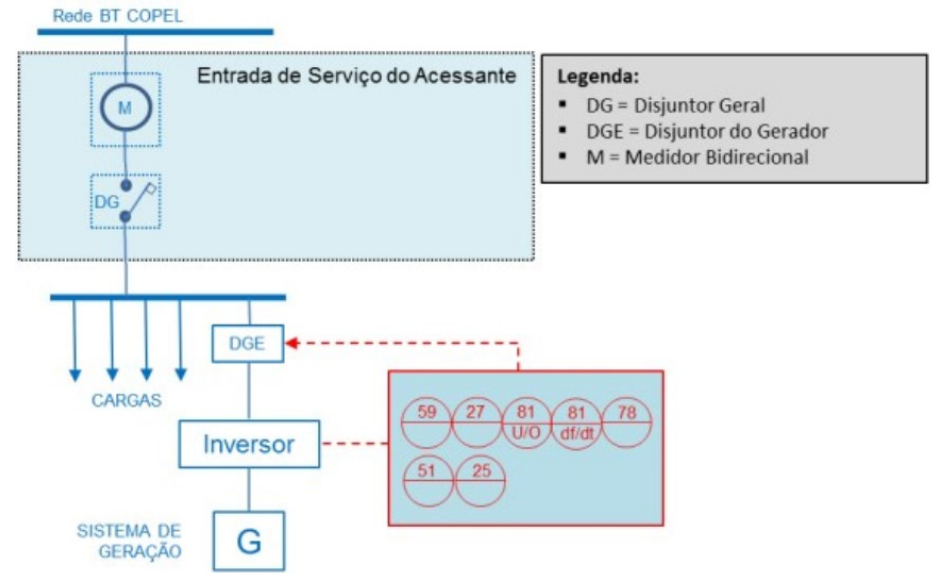
14. Fonte: (João, 2019)

15. Fonte: Elaboração própria



Um destaque para os requisitos de interconexão é a exigência de um sistema de proteção robusto. A regulamentação nacional exige a desconexão da GD mediante falta de qualquer natureza, sendo necessário garantir a proteção local com funções mínimas do tipo subtensão (ANSI 27), Sobretensão (ANSI 59), Subfrequência (ANSI 81U), Sobre frequência (ANSI 81), Sincronismo (ANSI 25) e Anti-Ilhamento (ANSI 78). Um exemplo de diagrama de proteção para GD de Baixa Tensão (BT) exigida pela concessionária Copel (Companhia Paranaense de Energia) é visto na Figura 14.

Figura 14. Exemplo de diagrama unifilar de GD na baixa tensão (BT), considerando sistemas de proteção¹⁶



Saiba mais: Aprofunde-se sobre os requisitos de cada concessionária sobre os aspectos de interconexões de GD à Rede elétrica básica nos links abaixo:

CELESC: www.celesc.com.br/micro-mini-geracao#solicitacao-de-acesso

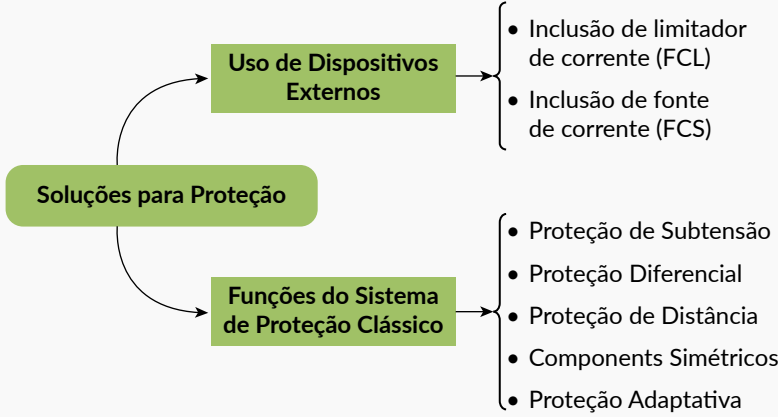
CEMIG: www.cemig.com.br/search/Manual+de+Geração+Distribuída

ENEL: www.enel.com.br/pt-saopaulo/Corporativo_e_Governo/Geracao_Distribuida

Com a presença de GDs na rede, a forma tradicional dos sistemas de proteção das redes de distribuição não consegue garantir assertividade ou seletividade adequada. Em geral, isto se deve pelo fluxo bidirecional que as GDs impõem à rede e ao limite de corrente de falta em torno de 2 vezes a sua corrente nominal, o que dificulta a detecção das faltas por meio de funções de sobrecorrente. Além disto, cada tipo de sistema de geração apresenta reações distintas perante uma falta. A literatura sobre sistemas de proteção de geração distribuída, principalmente para microrredes nos modos de operação ilhado ou conectado, apresenta uma gama de possibilidades. A Figura 15 resume alguns métodos que envolvem desde a adição de novos dispositivos até a união de várias funções tradicionais atuando em conjunto.

16. Fonte: [https://www.copel.com/hpcopel/root/ntcarquivos.nsf/E00A539C1F08DF2003257F69004DF8BC/\\$FILE/NTC%20905200%20Acesso%20de%20Micro%20e%20Minigera%C3%A7%C3%A3o%20Distribu%C3%ADa.pdf](https://www.copel.com/hpcopel/root/ntcarquivos.nsf/E00A539C1F08DF2003257F69004DF8BC/$FILE/NTC%20905200%20Acesso%20de%20Micro%20e%20Minigera%C3%A7%C3%A3o%20Distribu%C3%ADa.pdf)

Figura 15. Resumo de soluções para proteção com GDs¹⁷.



Além de sistemas de proteção, a análise de estabilidade é relevante para a implementação de GDs em grande escala na rede elétrica. Isso porque a inclusão de GDs impactam nas margens de estabilidade do sistema. De modo geral, estes impactos são positivos, melhorando e aumentando suas margens de estabilidade. Porém, devido a intermitência das fontes de geração e o perfil de carga adaptado para compor estas gerações, a análise de estabilidade tradicional se torna complexa e volátil. Este fato é relevante para situações em que há grande inserção de GDs, do contrário, a rede elétrica convencional tem a capacidade de absorver as perturbações locais da rede por meio de seus grandes geradores. Em um cenário onde há alta inserção de GDs, recomenda-se que o estudo de estabilidade contemple mudanças na modelagem da rede conforme proposto na Tabela 1, comparando-a com a forma tradicional de estudos de estabilidade.

Tabela 1. Comparativo entre metodologias para estudo de estabilidade¹⁸.

Método	Tradicional	Alta penetração GD
Modelo de carga	Estático	Dinâmico
Recursos de geração	Determinístico	Estocástico
Dispositivos Flexíveis de Transmissão em Corrente Alternada (Flexible Alternating Current Transmission – FACTS)	Específico	Adaptativo
Gerenciamento de riscos	Determinístico	Randômico
Plataforma de proteção	Definido	Adaptativo

1.4. Previsão de Cargas

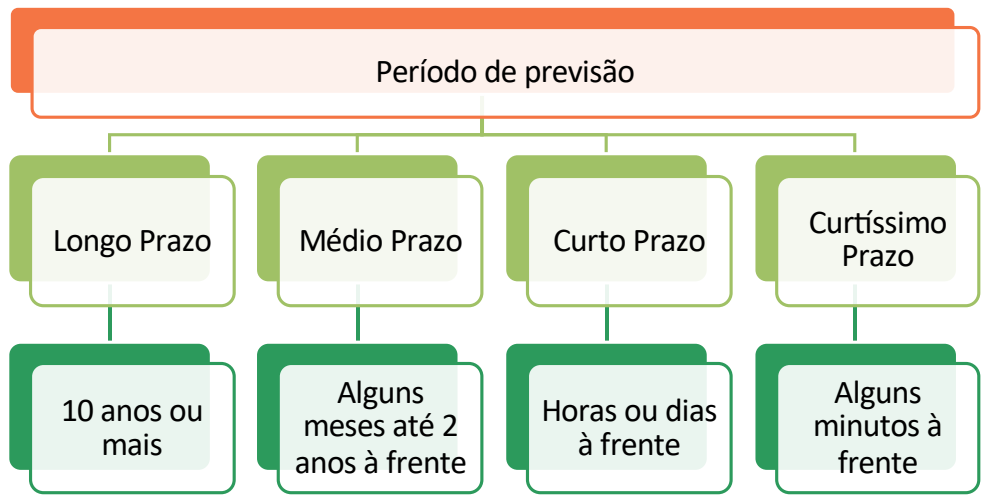
O sistema elétrico como um todo necessita estabelecer o balanço energético constantemente. Isto significa que a quantidade de energia gerada no sistema deve ser igual a demanda de carga. Disto surge a necessidade de uma sistemática para promover previsões de carga na rede elétrica. Tradicionalmente no setor elétrico brasileiro, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) realiza estimativa de carga em 4 níveis de horizontes temporais. Estes horizontes abrangem o Curtíssimo Prazo, o Curto Prazo, o Médio Prazo e o Longo Prazo. Além de servir para o balanço de carga no sistema de geração, a previsão de carga é utilizada para a formação do preço no mercado de energia e do Custo Marginal de Operação (CMO), responsável por balizar a tarifação da energia aos consumidores da rede. A Figura 16 mostra os períodos de previsão de carga típicos.

17. Fonte (João, 2019)

18. Fonte: (Momoh, 2012)



Figura 16. Períodos de Previsão de Carga¹⁹.



As possibilidades para se estimar a carga variam entre métodos estatísticos, como uso de modelos matemáticos de regressão linear e métodos de aprendizagem de máquinas, como por exemplo as redes neurais e máquinas de vetor de suporte. Com a incorporação de RED e a formação de GD, o perfil de carga na visão do sistema elétrico apresenta um comportamento randômico, no qual a previsão da carga necessita ser realizada por meio de métodos estocásticos. Esta randomização da demanda na rede é relacionada à intermitência das fontes de geração típica das GDs, como a energia solar e a eólica.

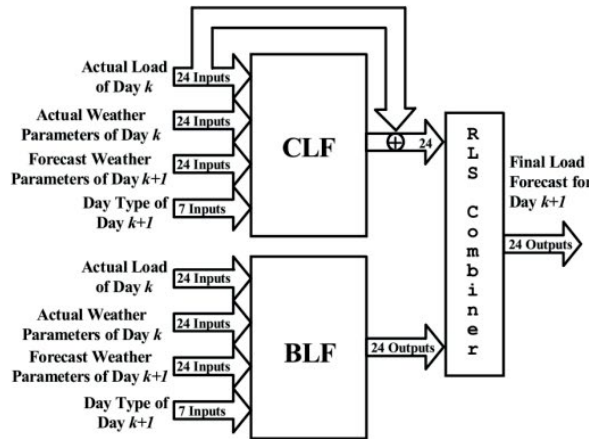
O sistema elétrico brasileiro utiliza um sistema previsor constituído de três módulos, sendo dois suportados por Redes Neurais Artificiais (RNAs) para previsão de carga e um módulo para combinação de previsões usando algoritmo recursivo de mínimos quadrados. A Figura 17 ilustra este sistema.

Figura 17. Lógica de previsão de carga do sistema ANNSTLF (Artificial Neural Network Short Term Load Forecast)²⁰.

Base Load Forecaster (BLF)
RNA que prevê a carga horária para o dia seguinte (24 valores)

Change Load Forecaster (CLF)
RNA que prevê a variação horária da carga de um dia K para o outro para o dia K+1

Recursive Least Squares (RLS)
Combinação linear das saídas das RNAs: BLF e CLF



De modo geral, os métodos empregados para previsão de carga podem ser classificados em (1) Métodos Intuitivos, (2) Métodos Autônomos e (3) Métodos causais.

19. Fonte: Elaboração própria
20. Fonte: (A. Khotanzad, 1998)

1. **Métodos intuitivos** – não usam um modelo matemático formal para descrever o comportamento da carga.
2. **Métodos autônomos** – usam modelos baseados somente na extrapolação de observações passadas da carga, ou seja, é uma técnica dependente do tempo.
3. **Métodos causais** – assumem que a carga exibe uma relação de causa e efeito com uma ou mais variáveis independentes, que irão descrever seu comportamento.

Em termos de evolução no tempo, divide-se ainda em Estacionária e Não Estacionária.

- A. **Estacionária** - os dados da carga mantêm uma média constante no tempo.
- B. **Não-Estacionária** - os dados da carga variam com o tempo.

As técnicas para realizar a previsão de carga são classificadas de duas formas:

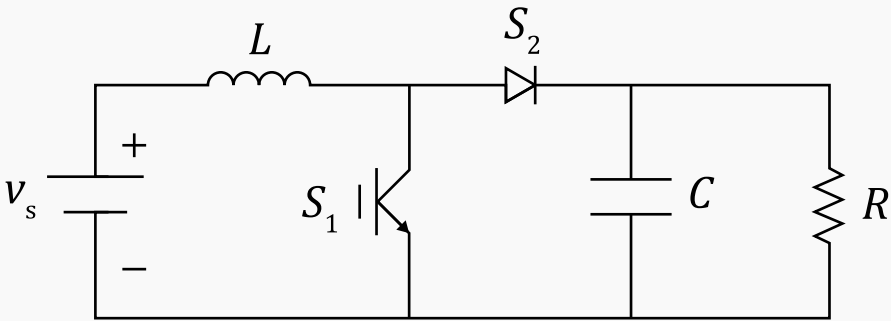
- **Modelos não-dinâmicos** – a carga é expressa como uma série temporal discreta consistida de valores previstos para cada hora durante um período.
- **Modelos dinâmicos** – a carga é identificada não apenas como uma função de tempo do dia, mas também de seus comportamentos mais recentes. Por essa razão, para que se faça a previsão em determinada hora, é necessário que tenham sido realizadas previsões em horas anteriores.

1.5. Transitórios de Tensão e Corrente

Transitórios na rede elétrica são manifestações ou respostas elétricas locais ou nas adjacências de um equipamento, originárias de alterações súbitas nas condições do sistema de energia. Geralmente, a duração de um transitório é muito pequena, mas apresenta alta relevância devido à necessidade do sistema na solicitação de tensão e corrente de qualidade.

O principal componente a ser analisado ao considerar GDs é o conversor eletrônico, isto devido ao fato destes componentes serem os maiores responsáveis pela resposta dinâmica do sistema. Assim, para realizar a análise de transitório dos conversores, simula-se a resposta do modelo para sinais de degraus, pulsos ou rampas de corrente e tensão para o modelo esquemático deste conversor. Um exemplo de modelo elétrico de um conversor é ilustrado na Figura 18, tendo a função de aumentar a tensão CC através da abertura e fechamento da chave S1.

Figura 18. Exemplo de circuito de um conversor monofásico²¹.

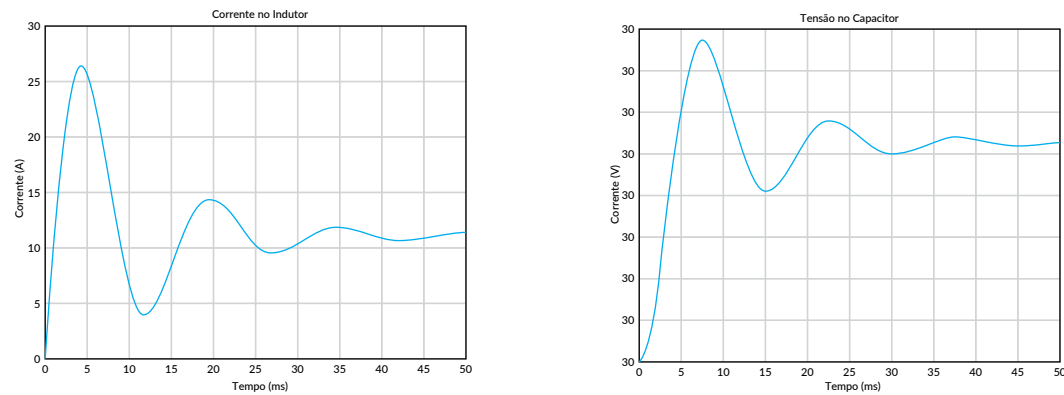


21. Fonte: Elaboração própria



Através da função de transferência do circuito da Figura 18 é possível avaliar o comportamento do conversor em várias situações transitórias. Como exemplo, a Figura 19 apresenta a resposta da corrente do indutor e a tensão do capacitor do modelo que inicia em zero e busca o estado estacionário de regime permanente. A partir das curvas de simulação, o desempenho do circuito (como o tempo de subida, a taxa de sobressinal e as ondulações de estado estacionário na carga) pode ser medido quantitativamente.

Figura 19. Resposta do Transiente para tensão e corrente do conversor Boost.²²



As curvas obtidas e apresentadas na Figura 19 representam a dinâmica de um conversor Boost. Em estudos de análise transitória, busca-se alterar os parâmetros do sistema como os parâmetros R, L e C para avaliação do comportamento do sistema perante perturbações da rede e da resposta do conversor para que não haja instabilidade na rede.



Saiba mais: Se aprofunde sobre transitórios eletromagnéticos da rede elétrica através de um artigo da revista "O Setor Elétrico" no link a seguir:

http://www.osetoelettrico.com.br/wp-content/uploads/2013/12/ed-94_Fasciculo_Cap-XI-Qualidade-de-energia.pdf

22. Fonte: Elaboração própria

1.6. Recapitulando

Este capítulo apresenta a base de conhecimento para os conceitos de Redes Elétricas Inteligentes (REI). Também são apresentados componentes do setor elétrico e o conceito de Geração Distribuída (GD).

Ao final desta(s) aula(s), o/a aluno/a deverá ser capaz de:

- Entender o panorama do setor elétrico e a tendência de sua horizontalização mediante a inclusão de geração distribuída na rede;
- Entender o comportamento aleatório de consumo e o perfil de carga horária da rede elétrica;
- Compreender o sistema de geração e as tecnologias para uma matriz energética renovável e sustentável;
- Entender sobre geração distribuída e seu impacto na rede elétrica;
- Compreender aspectos de interconexões, proteção, instabilidade e interfaces dos sistemas de GD perante a rede elétrica;
- Entender a importância de análise transitória e sua aplicação em sistemas de GD;
- Ponderar os impactos técnicos da penetração de GD na rede elétrica;
- Avaliar a importância de técnicas de previsão de carga no sistema elétrico.

Atividades Sugeridas:

1. Montar uma tabela comparativa com as vantagens e desvantagens entre um sistema elétrico com estrutura vertical e um com estrutura horizontal. Nesta tabela, poderá ser visto que a horizontalidade permitirá que a geração de energia seja realizada mais próximo ao consumidor. Assim, mediante falha da rede externa, uma porção da rede poderá manter sua geração de forma autônoma, garantindo que seus consumidores ainda recebam energia apropriadamente. Além disso, haverá redução das perdas nos sistemas de transmissão, aumentando a eficiência do setor elétrico no que tange aspectos de garantia da continuidade do serviço de energia.
2. Realize uma pesquisa rápida através dos links sugeridos neste capítulo para entender os requisitos básicos da concessionária local para a implantação de GD. Veja a questão de marca e modelo de conversores homologados, bem como as normas necessárias para suas certificações. Você verá nesta pesquisa que há restrição de liberação de harmônicas, e a necessidade da elaboração de uma vasta documentação que envolve a apresentação de diagramas unifilares do sistema de GD e dos sistemas de proteção e controle.



Algumas fontes interessantes:

- A elaboração deste capítulo se baseou em referências da literatura, citadas a seguir como sugestão de leitura para o/a docente:
- D. V. João. **Proteção adaptativa em microrredes de média tensão formadas exclusivamente por conversores eletrônicos: uma abordagem baseada em medição centralizada de tensão**. Dissertação - (2019). (João, 2019);
- N. Hatziargyriou, *Microgrids: Architectures and Control*. 2013. (Hatziargyriou, 2013)
- J. Momoh, *Smart Grid: Fundamentals of Design and analysis*. 2012. (Momoh, 2012)
- T. Sato; D. Kammen; B. Duan; M Macuha; Z. Zhou; J. Wu; M. Tariq; S. Asfaw, *Smart Grid Standards: Specification, Requeriments, and technologies*. 2015 (Sato, et al., 2015)
- Q. Huang, S. Jing, J. Yi, and W. Zhen, *Innovative Testing and Measurement Solutions for Smart Grid*. 2014. (Q. Huang, 2014.)
- N. de Castro, A. Lima, and G. Pereira, **Perspectivas da tecnologia blockchain no Setor Elétrico: Aplicações na Europa, na Austrália e nos Estados Unidos**, *CanalEnergia.com.br*, p. 7, 2018. (N. de Castro, 2018.)
- <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=427&t=3>
- <https://www.iea.org/countries>
- <http://shinyepe.brazilsouth.cloudapp.azure.com:3838/anuario/>
- http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/curva_carga_horaria.aspx

Avaliação:

1. Você foi indicado/a como responsável técnico/a de um novo projeto que visará promover a Horizontalização de uma porção da rede elétrica. Atualmente esta parte da rede apresenta características verticais em um sistema radial de média e baixa tensão, bem como operação centralizada pela empresa de distribuição local. Esta porção da rede terá a possibilidade de se isolar do restante da rede elétrica e deverá manter a prestação de serviços de energia com a garantia de continuidade. Você, como responsável, tem a missão de apresentar a sua gerência as vantagens e benefícios que este projeto trará para as empresas locais, para o setor elétrico e para a população consumidora de energia local. Quais seriam seus argumentos?
2. Conhecendo o perfil de carga padrão da rede elétrica, em um caso hipotético sem considerar aspectos econômicos, qual seria o melhor horário para se despachar energias de fontes fotovoltaicas sem sistemas de armazenamento e energias de termelétricas a base de carvão, sabendo que há a necessidade de despacho destas duas fontes no intervalo de 24 horas.



Capítulo 2: Sistemas de Armazenamento e Integrações com o Sistema Elétrico

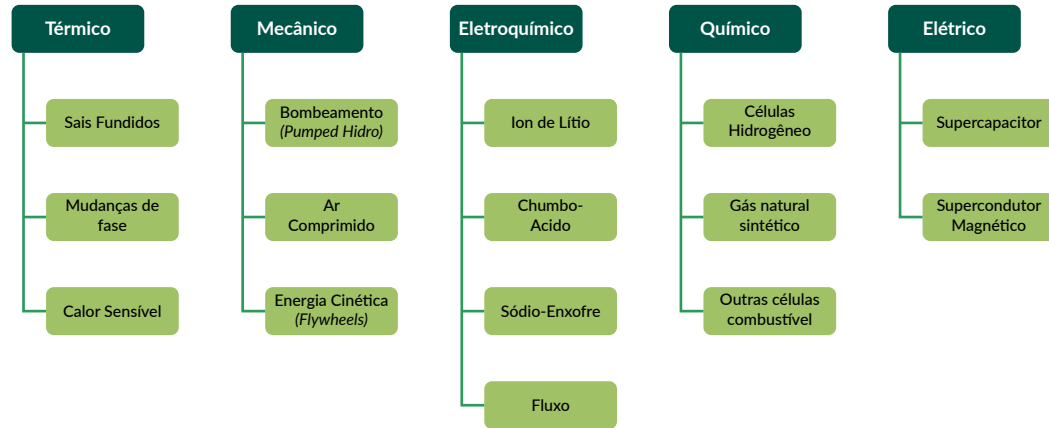


Nota para o/a professor/a - Neste capítulo o/a professor/a conduzirá o/a aluno/a à identificação dos tipos de sistemas de armazenamento e suas formas de integração com o sistema elétrico, considerando aspectos técnicos.

2.1. Caracterização de Sistemas de Armazenamento e seus benefícios

Atualmente as tecnologias para sistemas de armazenamento contemplam técnicas em armazenamento químico, elétrico, mecânico, eletroquímico e térmico. Tais técnicas são apresentadas de maneira generalizada na Figura 20.

Figura 20. Tecnologias empregadas para sistemas de armazenamento²³



A escolha do sistema de armazenamento apropriado para cada aplicação deve se basear nas características de aplicação. Alguns itens de escolha são relacionados à portabilidade do sistema, momento de uso e potência da aplicação. Outros parâmetros podem ser levantados considerando os seguintes itens:

- **Tamanho da unidade:** Escala da tecnologia;
- **Capacidade de Armazenamento:** Energia total disponível depois do carregamento;
- **Capacidade de disponibilidade:** Valor médio da energia com base no estado de carga/profundidade de descarga;
- **Tempo de autodescarga:** Tempo necessário para que um dispositivo de armazenamento totalmente carregado e não interconectado alcance uma certa profundidade de descarga (*Depth of Discharge* ou DOD);

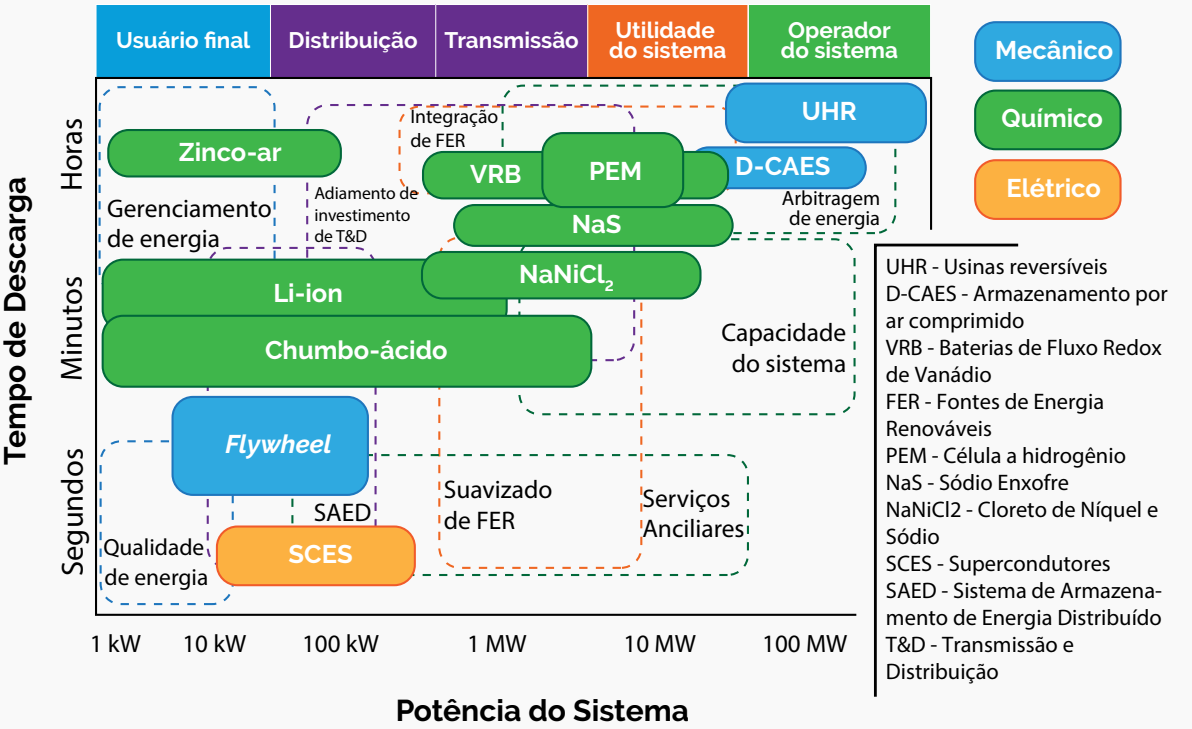
23. Fonte: Elaboração própria

- **Eficiência:** Relação entre a saída de energia do dispositivo e a entrada de energia da tecnologia de conversão;
- **Durabilidade:** Quantidade de ciclos de carga e descarga que mantém o sistema dentro de sua faixa de limites impostos na especificação;
- **Autonomia:** Relação entre a capacidade energética e a potência máxima de carga;
- **Custo:** Custo de instalação, operação e manutenção da tecnologia;
- **Viabilidade:** Grau de adaptabilidade às aplicações de armazenamento;
- **Confiabilidade:** Garantia de serviço.

Características adicionais incluem os limites operacionais, monitoramento e controle dos equipamentos, flexibilidade de operação, impactos ambientais, sistema de manutenção, entre outras questões específicas de projeto.

Para cada tipo de aplicação, pode ser avaliado a melhor tecnologia de armazenamento. Assim, o diagrama apresentado na Figura 21 mostra as tecnologias recomendadas para aplicações de acordo com a potência e autonomia esperada pelo sistema e sua eficiência típica.

Figura 21. Relação de aplicação de sistemas de armazenamento por tecnologia, autonomia, potência e aplicação²⁴



Saiba mais: Veja exemplos de estações de baterias no mundo através do link a seguir:

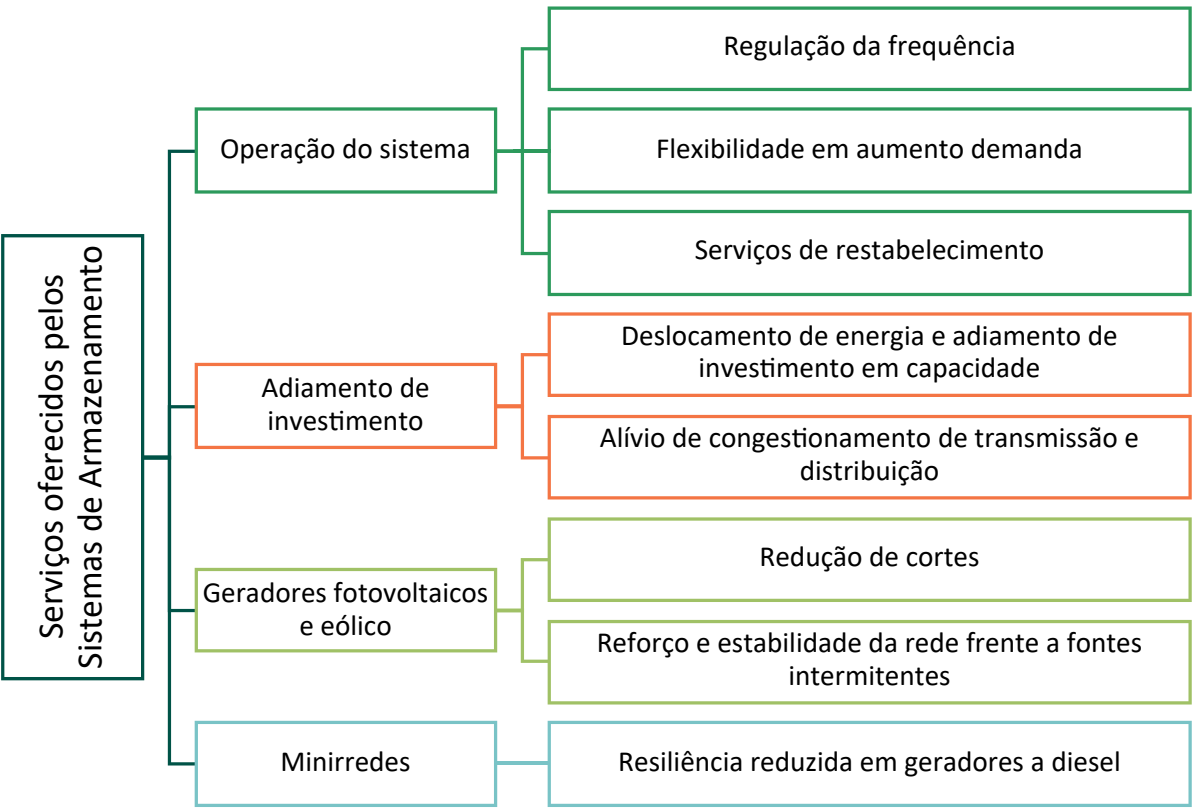
https://en.wikipedia.org/wiki/Battery_storage_power_station

24.



Os sistemas de armazenamento trazem muitos benefícios para o setor elétrico, principalmente quando se tem alta penetração de fontes de geração intermitentes. Para a operação do sistema elétrico, por exemplo, sistemas de baterias podem prover serviços à rede como o controle na resposta da frequência, serviços de regulação da rede, etc. Além de benefícios operacionais, sistemas de armazenamento podem contribuir com adiamentos de investimento no setor elétrico. Ademais, as baterias ajudam a fornecer eletricidade confiável e mais barata em redes isoladas para comunidades fora da rede. A Figura 22 resume os principais e mais notórios benefícios em serviços aplicados no setor elétrico.

Figura 22. Serviços oferecidos através de sistemas de armazenamento.²⁵



Futuro: Há uma grande discussão sobre o uso de hidrogênio para modelos de armazenamento de energia, pois a utilização desta tecnologia para prestação de serviços é uma grande oportunidade no setor elétrico. A ideia é utilizar energia excedente de fontes renováveis para promover a eletrólise da água. Embora uma teoria muito promissora e com muitos incentivos para sua promoção, é válido uma avaliação e ponderação de todos os seus benefícios alinhados com os desafios tecnológicos que esta tecnologia apresenta atualmente e como tais desafios poderão ser superados no futuro.

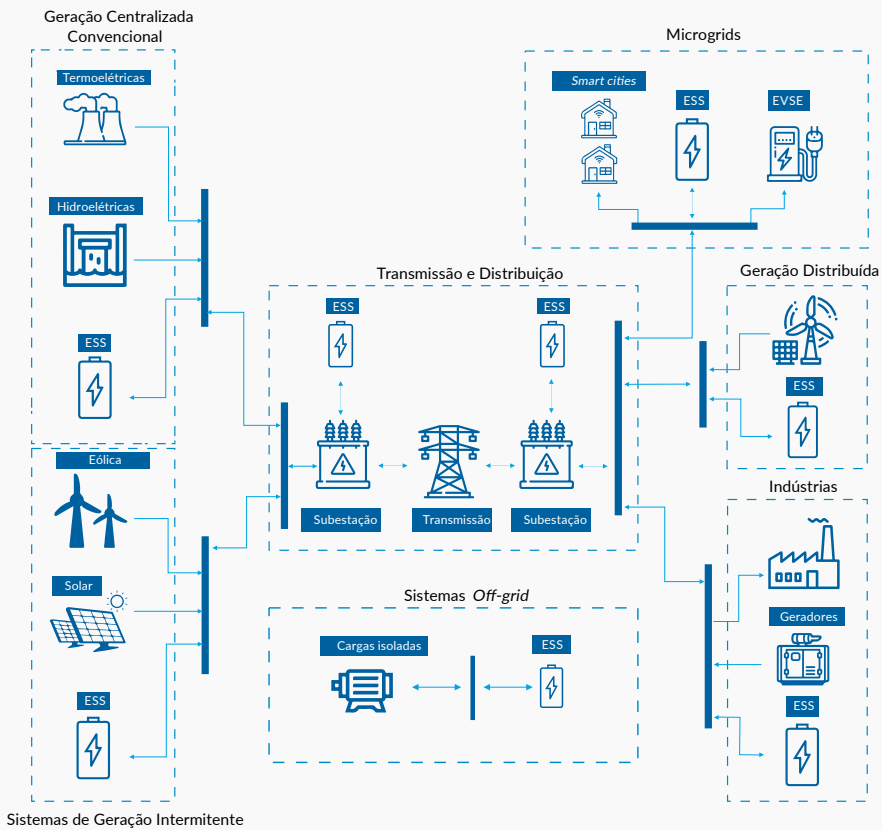
<https://www.migalhas.com.br/depeso/356659/hidrogenio-verde-o-proximo-grande-acontecimento-na-energia-do-brasil>

25. Fonte: Traduzido de (IRENA, 2019)

2.2. Sistemas de Armazenamento de Energia Elétrica

Através das várias tecnologias existentes e emergentes para o armazenamento de energia, as aplicações no setor elétrico são factíveis em vários segmentos. Para cada segmento, os sistemas de armazenamento trazem benefícios locais e proporcionam melhorias na qualidade do serviço de geração, transmissão e distribuição de energia. A Figura 23 apresenta uma visão sistêmica dos pontos de aplicação dos sistemas de armazenamento na rede elétrica.

Figura 23. Aplicações de sistemas de armazenamento ao longo da rede elétrica²⁶



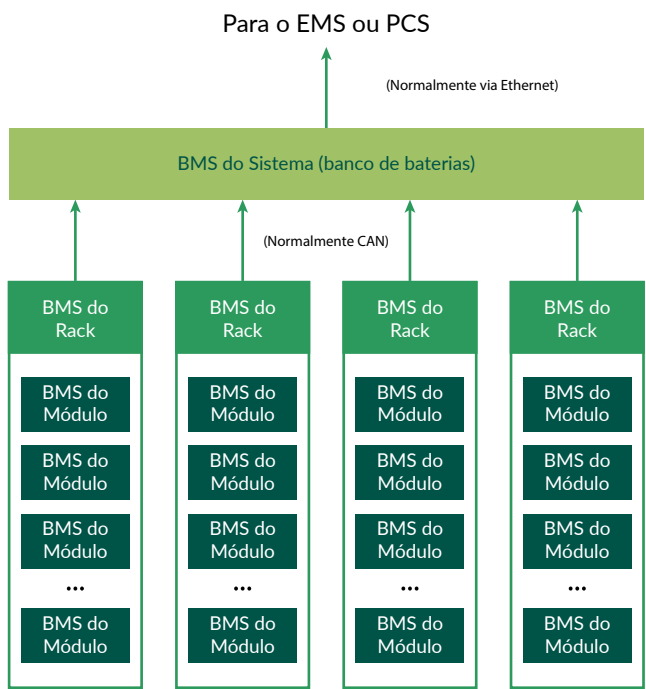
De modo geral, o ESS (Energy Storage System) é um grupo de sistemas aplicados de forma conjunta para prover o armazenamento e o despacho de energia. Uma representação dedicada do ESS focada em sistemas de armazenamento eletroquímico é definida como BESS (Battery Energy Storage System). Os BESS são geralmente implantados em contêineres modularizados e apresentam menores restrições geográficas quando comparados a outros tipos de ESS.

Tipicamente, o BESS é constituído por três subsistemas definidos como: BMS (Battery Management System); PCS (Power Conversion System); e EMS (Energy Management System). Destes subsistemas, o BMS é o núcleo do sistema de armazenamento, sendo responsável pelas principais funções, como por exemplo a proteção, controle e monitoramento das células das baterias. A Figura 24 ilustra três níveis de aplicação do BMS, sendo segregado em níveis de módulo, de rack e de sistema.

26. Fonte: Manual ESSW - WEG



Figura 24. Exemplo de BMS separador por nível de aplicação²⁷



- **Nível de Módulo:** Cada módulo de bateria monitora a tensão, a corrente e a temperatura do BMS.
- **Nível de Rack:** Monitora-se o conjunto de módulos, incluindo algoritmos de estado de carga (SOC - *State of charge*) e estado de saúde (SOH - *State of health*), além da proteção do Rack. Gerencia-se o balanceamento das células do rack monitorado.
- **Nível de Sistema:** Cada banco de baterias, assume a responsabilidade pelo agrupamento dos racks e comunicação com o controle do sistema, seja O PCS ou o EMS.

O sistema PCS é utilizado para controlar a operação bidirecional do fluxo de potência das baterias. Este sistema é necessário para que os conversores da bateria injetem energia do sistema para as baterias a fim de carregá-las, e para absorver energia das baterias para suprir demanda do sistema em momentos de picos ou prestações de serviços para a rede. Assim, o PCS controla as cargas e descargas do sistema de armazenamento.

Acima do BMS e do PCS, encontra-se hierarquicamente o EMS. Este sistema lida com o controle e coordenação do ESS. O EMS comunica-se diretamente com o PCS e o BMS, sendo responsável pela tomada de decisão de quando e como realizar o despacho de energia. Isto é ponderado ao considerar, por exemplo, aspectos econômicos, gerenciamento de demanda de carga do sistema, arbitragem de tempo de uso e autoconsumo de sistemas intermitentes de geração.

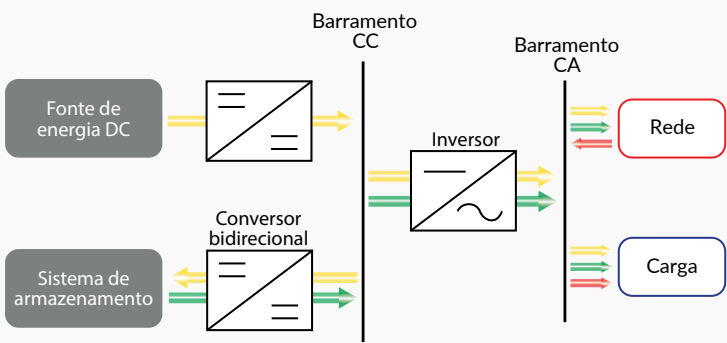
2.3. Integração ao Sistema Elétrico

De modo geral, a integração dos sistemas de bateria à rede pode ser realizada de três maneiras distintas: acoplamento CC; acoplamento CA; acoplamento híbrido CA/CC.

Em uma topologia de acoplamento CC, utiliza-se de um barramento de corrente contínua para conectar o sistema de armazenamento junto com a fonte de geração. Este barramento CC é então controlado por técnicas de MPPT e PWM para garantir a máxima operacionalidade do sistema, de modo a ser seguido por um conversor CC/CA, que é incumbido de realizar o mantimento da tensão e potência exigida pela rede. Este conversor CC/CA faz a ponte entre o barramento CC e o barramento CA da rede externa e neste caso permite apenas fluxo unidirecional de energia, conforme ilustrado na Figura 25.

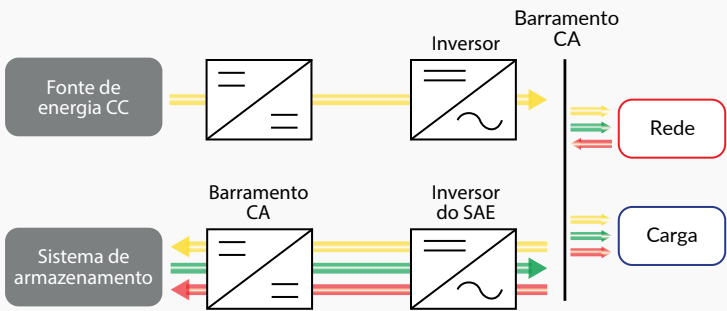
27. Fonte: Elaboração própria

Figura 25. Topologia com acoplamento CC²⁸



Apesar das vantagens no controle da topologia com acoplamento CC, o fato de apenas um conversor realizar a conexão da geração e do armazenamento à rede faz com que uma falha no conversor CC/CA desconecte o sistema da rede. Assim, uma alternativa para esta topologia é a ligação em paralelo dos conversores diretamente em um barramento CA, formando assim um acoplamento CA para o sistema de armazenamento. Esta topologia é ilustrada na Figura 26

Figura 26. Topologia com Acoplamento CA²⁹



A topologia com acoplamento CA traz muitas vantagens técnicas, como melhor desempenho, independência e flexibilidade para atender os requisitos da rede. Contudo, necessita de controles robustos para manter o sincronismo entre todos os conversores e a rede. Além disto, esta topologia requer um alto custo de investimento.

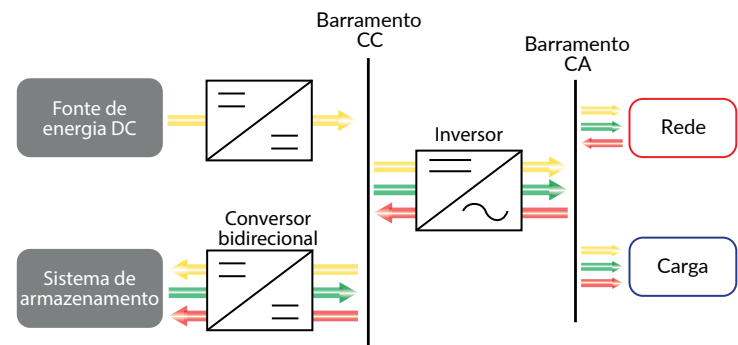
A terceira topologia utiliza um sistema híbrido CC/CA. Neste caso, segue-se uma estrutura semelhante ao caso de topologia CC, porém o conversor que faz a ponte entre os barramentos CC e CA tem característica de controle bidirecional. Com isto, o barramento CC tem a possibilidade de ser alimentado pela rede externa e promover a independência do sistema de armazenamento da fonte de geração local. Esta topologia é ilustrada na Figura 27.

28. Fonte: (Cantane, Junior, & Hamerschmidt, 2020)

29. Fonte: (Cantane, Junior, & Hamerschmidt, 2020)



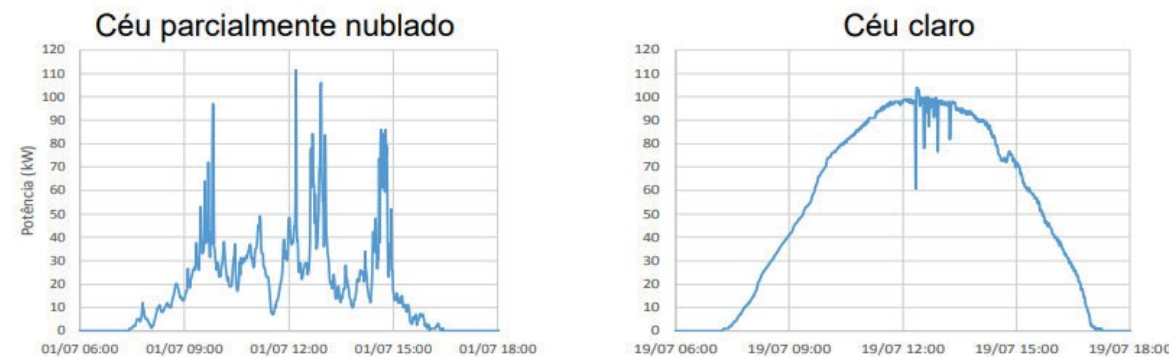
Figura 27. Topologia com Acoplamento Híbrido³⁰



2.4. Curvas e Comportamento Elétrico

A intermitência dos recursos primários de energia é um dos fatores mais relevantes quanto se trata do comportamento elétrico dos sistemas de armazenamento ao considerar GDs. Sistemas de geração fotovoltaicos, por exemplo, têm faixas fixas de horários possíveis para geração, e ainda têm sua eficiência alterada drasticamente com a presença de sombra nos painéis, dias chuvosos e nublados. A Figura 28 mostra duas curvas de uma planta fotovoltaica considerando um dia de céu parcialmente nublado e um dia de céu aberto.

Figura 28. Dados de uma planta solar em dias nublados e dias de céu claro³¹

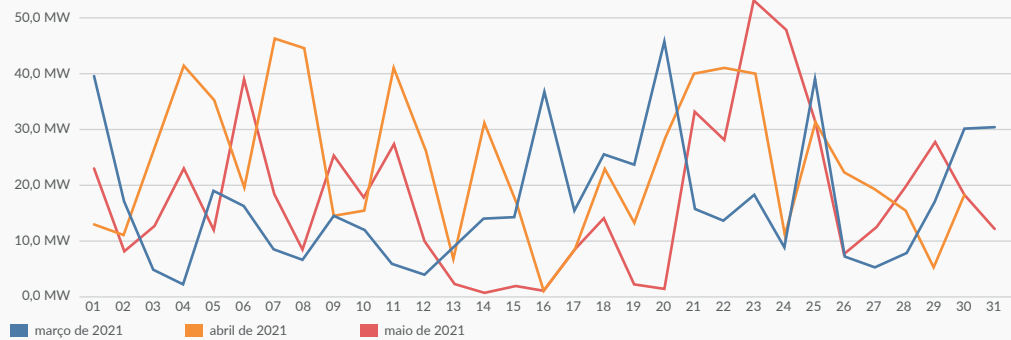


Para os sistemas eólicos, a intermitência de geração depende da velocidade do vento. A curva da Figura 29 representa o perfil de geração de uma planta eólica de 230kV do Sistema Interligado Nacional (SIN). A planta corresponde ao conjunto eólico de Viamão, medidas nos meses de março, abril e maio de 2021. É notória a intermitência da planta, e ainda mais a divergência entre os meses. É possível verificar também, que em determinados dias dos meses, a geração se aproximou de zero e em outros chegou a picos de geração da planta.

30. Fonte: (Cantane, Junior, & Hamerschmidt, 2020)

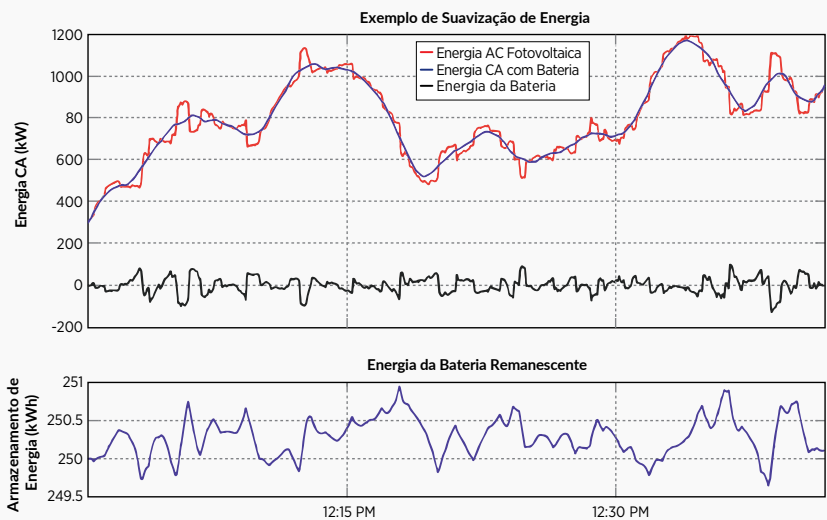
31. Fonte: Projeto ISA-CETEP nº 021/2016 – ANEEL

Figura 29. Dados de uma planta eólica de alta tensão (Conjunto eólico Viamão 3 - 230kV)³²



Devido às intermitências dos recursos fotovoltaicos e eólicos, o controle e operação para manter o sistema de geração integrado com qualidade é complexo. Os sistemas de armazenamento atuam mitigando estas intermitências e suavizando a geração de potência destas fontes. A Figura 30 apresenta um sistema de geração fotovoltaico tendo sua potência de saída amortizada por um sistema de baterias.

Figura 30. Ilustração da suavização de geração através de sistemas de armazenamento³³



Em termos de gestão do BMS, um fator relevante é a curva de recarga e sua consequência no sistema de armazenamento. Em geral, durante a recarga de uma bateria, o SOC (*State of Charge*) segue linearmente até aproximadamente 80% de sua capacidade, quando inicia um comportamento não-linear. A partir deste momento, as células das baterias começam a apresentar divergência na tensão e o BMS inicia o processo de balanceamento. A partir deste momento, o sistema limita a injeção de energia, interrompendo momentaneamente a carga de uma célula em função do seu nível de tensão. A célula que atinge a tensão limite superior é a que define a transição entre as etapas de recarga do módulo, ou seja, etapas de carga constante, equalização e carga completa. A tensão no módulo, sendo a soma da tensão nas células, define a atuação do limitador de carga pelo BMS. Estes processos são mostrados na Figura 31, que representa um sistema BMS de baterias de lítio.

32. Fonte: <http://www.ons.org.br/paginas/energia-agora/carga-e-geracao>

33. Fonte: (IRENA I. R., 2015)

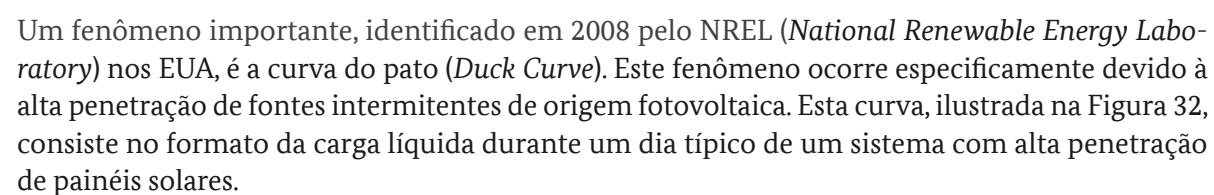
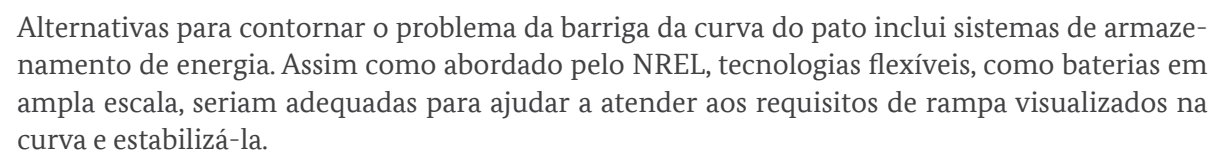


Figura 32. Curva do Pato, representando aspectos de planejamento de sistemas fotovoltaicos³⁵



34. Fonte: WEG Webinars

35. Fonte: (IRENA, Innovation landscape brief: Utility-scale batteries, 2019)

Ilustrativamente, benefícios presentes na implantação de sistemas de armazenamento de energia como o deslocamento da curva de geração solar e redução de picos de geração de energia são mostrados na Figura 33.


Figura 33. Ilustração de Deslocamento e picos de geração promovidos por sistemas de armazenamento³⁶



Saiba mais: Entenda mais sobre a Curva do Pato, sua origem e medições realizadas na Califórnia pelos links a seguir:

https://en.wikipedia.org/wiki/Duck_curve

<https://www.energy.gov/eere/articles/confronting-duck-curve-how-address-over-generation-solar-energy>



Futuro: Com os avanços na implementação de sistemas de geração renováveis e intermitentes, é natural que surjam desafios técnicos. A curva do pato identificada na rede elétrica norte americana é um exemplo. A utilização de sistemas de armazenamento é uma promessa para mitigar muitos destes desafios. Isto se pondera no contexto de estabilizar níveis de tensão e frequência por meio de controle de eletrônica de potência com despacho controlado da energia armazenada em horário fora de pico. Em outras palavras, há muito que ser explorado em termos de aplicação de armazenamento de energia e muitos modelos de negócios podem ser desenvolvidos.

<https://energiasroraima.com.br/baterias-sao-usadas-para-armazenamento-de-energias-renovaveis-e-podem-reduzir-oscilacoes-no-sistema/>

36. Fonte: (João, 2019)



2.5. Recapitulando

Neste capítulo foram apresentados conceitos básicos dos sistemas de armazenamento utilizados em complemento aos sistemas de geração distribuída. Sem estes sistemas, a formação de Redes Elétricas Inteligentes (REIs) da forma como é conceitualizada não se torna viável pois dificilmente trará um viés sustentável por meio de geração renovável. Além disto, são apresentados neste capítulo os aspectos operacionais e os comportamentos elétrico dos sistemas de armazenamento por baterias químicas, cujos aspectos são fundamentais para entender o futuro das REIs.

Ao final desta(s) aula(s), o/a aluno/a deverá ser capaz de:

- Identificar os diferentes tipos e formas de armazenamento de energia;
- Definir qual sistema de armazenamento é adequado para cada aplicação;
- Conhecer os benefícios dos sistemas de armazenamento para o setor elétrico;
- Entender os sistemas de gerenciamento dos sistemas de baterias;
- Compreender as principais topologias de acoplamento dos sistemas de baterias;
- Conhecer as principais curvas elétricas para operar a rede elétrica e os sistemas de armazenamento.

Atividades Sugeridas:

1. Pesquisar sobre cada tipo de sistema de armazenamento apresentado neste capítulo. Visualize tecnicamente como um se diferencia do outro e como estes sistemas são aplicados na prática. Uma grande contribuição para seus conhecimentos será uma breve pesquisa sobre o Hidrogênio Verde, uma tecnologia que vem crescendo tecnicamente e pode direcionar o futuro dos sistemas de armazenamento no sistema elétrico.
2. Descrever de maneira analítica e crítica as principais causas do efeito da curva do pato e como ela pode ser mitigada com uma implementação massiva de sistemas de armazenamento.

Algumas fontes interessantes:

A elaboração deste capítulo se baseou em referências na literatura, cujas fontes estão citadas a seguir para aprofundamento:

- WANG, Chengshan et al. (Ed.). *Smart electricity distribution networks*. CRC Press, 2017 (Wang, 2017)
- J. Momoh, *Smart Grid: Fundamentals of Design and analysis*. 2012. (Momoh, 2012)
- Ekanayake, Janaka B., et al. *Smart grid: technology and applications*. John Wiley & Sons, 2012. (Ekanayake, 2012)
- MOUFTAH, Hussein T.; EROL-KANTARCI, Melike; REHMANI, Mubashir Husain (Ed.). *Transportation and power grid in smart cities: communication networks and services*. John Wiley & Sons, 2018. (MOUFTAH, EROL-KANTARCI, & REHMANI, 2018)
- <https://www.irena.org/publications/2015/Jan/Battery-Storage-for-Renewables-Market-Status-and-Technology-Outlook>
- https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Utility-scale-batteries_2019.pdf

Avaliação:

Durante o desenvolvimento de um projeto de sistemas de armazenamento na rede elétrica, vários aspectos devem ser levados em consideração. Estes aspectos são relacionados com a aplicação desejada. Pela sua avaliação, que informações são essenciais para tal projeto? Além disso, avalie as curvas de comportamento elétrico apresentado neste capítulo.



Capítulo 3: Infraestrutura das Redes Elétricas Inteligentes

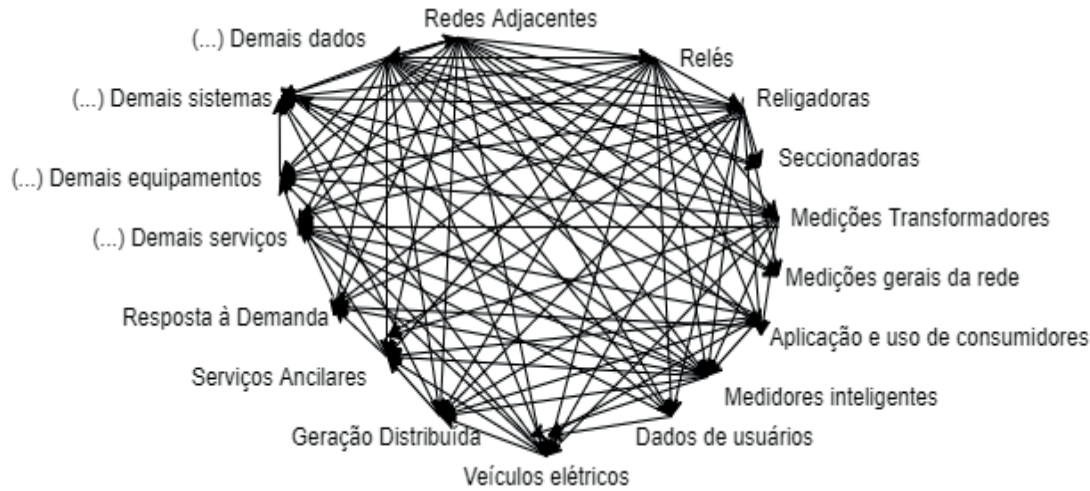


Nota para o/a professor/a – Este capítulo servirá para levar ao/à aluno/a a base de entendimento dos conceitos das diferentes topologias de redes elétricas. Ainda neste capítulo será apresentada uma breve visão dos conceitos de Plantas Virtuais, Redes inteligentes, e mini e micro redes.

3.1. Características e Peculiaridades da Rede

Um dos principais pontos que torna uma rede elétrica inteligente, ou ainda mais inteligente, é o seu poder de comunicação. Esta comunicação se estabelece na prática pela troca de mensagens entre os diversos equipamentos que compõem a rede. Assim, a principal característica que as REIs apresentam é a interoperabilidade entre dispositivos de diversos tipos, diversos fabricantes, diversas regiões, etc., que não se restringe apenas a equipamentos, mas se estende para sistemas e aplicações. A Figura 34 ilustra tal interoperabilidade em uma REI.

Figura 34. Ilustração de interoperabilidade entre pontos de comunicação de uma REI³⁷

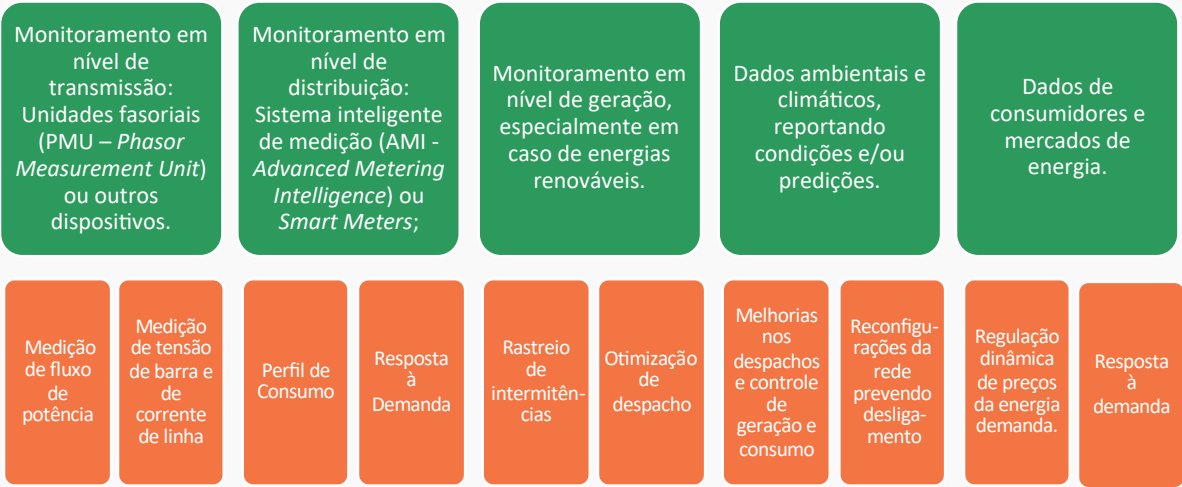


Na prática, a interoperabilidade é alcançada quando todos os equipamentos, sistemas, aplicações e serviços seguem uma mesma estrutura de protocolos de comunicação ou são intermediados por tradutores de mensagens que visam a unificação dos protocolos e dos formatos de envio e recebimento de mensagens.

Além da interoperabilidade, o gerenciamento destes dados é outra característica marcante das REIs. Este gerenciamento é necessário uma vez que as REIs agregam uma elevada quantidade de sensores e trafegam uma enorme quantidade de informações em tempo real. As principais fontes de dados e suas principais aplicações a serem gerenciadas estão descritas na Figura 35.

37. Fonte: Elaboração própria

Figura 35. Principais fontes e suas aplicações para gerenciamento de dados³⁸

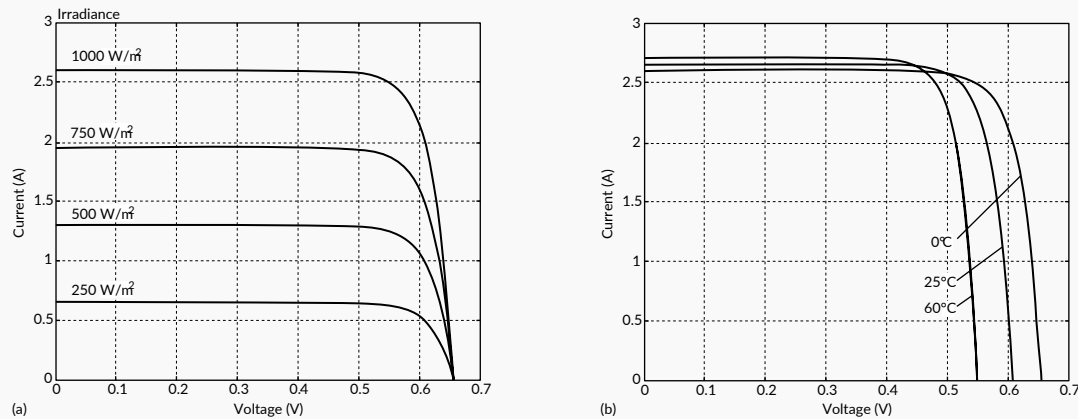


Saiba mais: Ouça o podcast sobre a digitalização do setor elétrico com comentários sobre a interoperabilidade de dados e aplicações de IoT (*Internet of Things* – Internet das Coisas):

https://open.spotify.com/episode/5Nc7HwtdEbmBVwGD4LvHkr?si=Qev5_aOtTFeTNjn2ChYcUw&nd=1

A intermitência de recursos é uma das peculiaridades em REIs mais visualizadas devido à alta penetração de recursos energéticos distribuídos renováveis, como por exemplo os sistemas de geração fotovoltaico e eólico. Nas curvas apresentadas na Figura 36 é possível constatar a variação da tensão e da corrente em função da irradiação e da temperatura em sistemas fotovoltaicos.

Figura 36. Curvas características de um sistema de energia solar³⁹.



(a) Perfil de tensão e corrente em função da Irradiação

(b) Perfil de tensão e corrente em função da temperatura

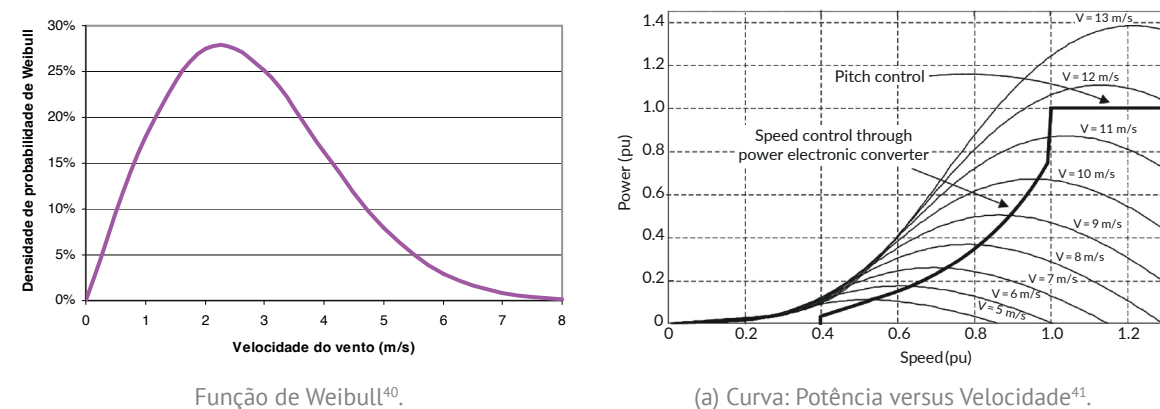
38. Fonte: Elaboração própria

39. Fonte: (Wang, 2017)



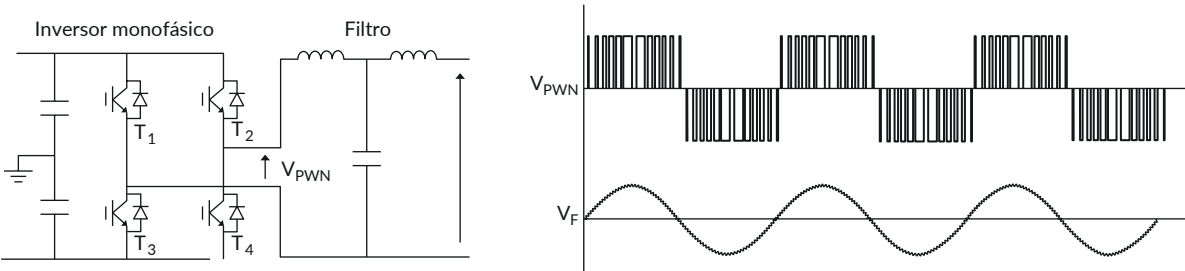
No caso da geração eólica, a velocidade do vento segue a curva de distribuição probabilística de Weibull, conforme apresentado na Figura 37(a). Isto faz com que a potência gerada neste sistema varie em função desta curva. Através deste conceito, é possível manipular certas variáveis do sistema para que a máxima potência seja mantida durante variações suaves da velocidade do vento. A Figura 37(b) apresenta um conjunto de curvas de velocidade do vento traçadas em função da velocidade das pás da turbina e da potência. Através de controle de posição das pás e da turbina, bem como com a adição de controle em eletrônica de potência, é possível a busca da máxima potência em consideração à intermitência do vento.

Figura 37. Curvas características de um sistema de geração eólica



Da possibilidade de se rastrear a máxima potência em sistemas de geração intermitentes por meio de eletrônica de potência, define-se a característica das REIs que as torna factíveis de serem implementadas na rede elétrica. Esta característica impõe a necessidade do interfaceamento das fontes de geração intermitentes à rede por intermédio de conversores eletrônicos.

Figura 38. Ilustração de conversor com modulação de pulso para controle das variáveis elétricas.⁴²



Além do rastreo da máxima potência, os conversores eletrônicos possibilitam a criação de barramentos de corrente contínua na rede, viabilizando a implantação de sistemas fotovoltaicos e a incorporação de baterias químicas, além de outros sistemas que geram ou trabalham com perfil de tensão contínua.

40. Fonte: (Filho, Cremasco, Seraphim, & Caneppele, 2011)

41. Fonte: (Wang, 2017)

42. Fonte: (Wang, 2017)



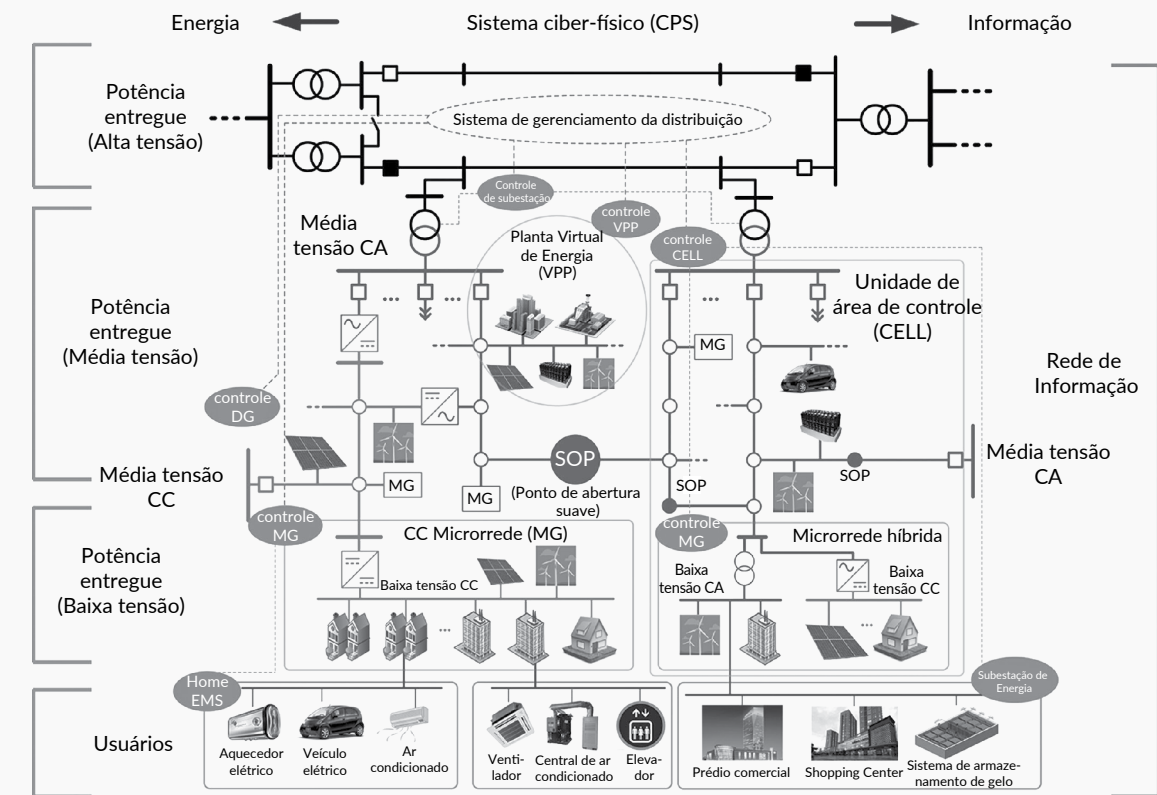
Saiba mais: Veja na reportagem como as energias eólicas e fotovoltaicas se complementam em uma rede integrada de geração distribuída:

<https://www.portal-energia.com/como-energia-solar-fotovoltaica-eolica-complementar/>

3.2. Infraestrutura de Redes Inteligentes

Uma REI é a integração de tecnologias avançadas para a automação da rede de distribuição, de sistemas de geração distribuída e de tecnologias pertinentes à Micro e Mini Redes (MMR). Tecnologias avançadas de informação, comunicação e computação são essenciais para apoiar o planejamento, a operação e o controle de uma rede elétrica inteligente. Com estas integrações, a REI torna-se um sistema *cyber-físico* complexo que conecta sistemas de energia e informação. Uma ilustração deste sistema *cyber-físico* é apresentada na Figura 39, na qual se visualiza a infraestrutura generalizada das cadeias de alta, média e baixa tensão, além da aplicação ao nível do usuário.

Figura 39. Ilustração geral de uma rede inteligente da alta à baixa tensão.⁴³



É interessante notar o conglomerado de sistemas que contemplam uma REI. Alguns destes são: Microrredes (MRs) CC, CA e híbrida; Plantas Virtuais (VPP – Virtual Power Plants); Células de Controle e Geração (CELL); armazenamento de energia e; casas inteligentes. Usando unidades terminais de medição inteligentes e a integração dos sistemas conglomerados, uma REI é capaz de garantir uma operação otimizada em condições normais de operação e autocorreção em eventos de falhas.

43. Fonte: (Wang, 2017)

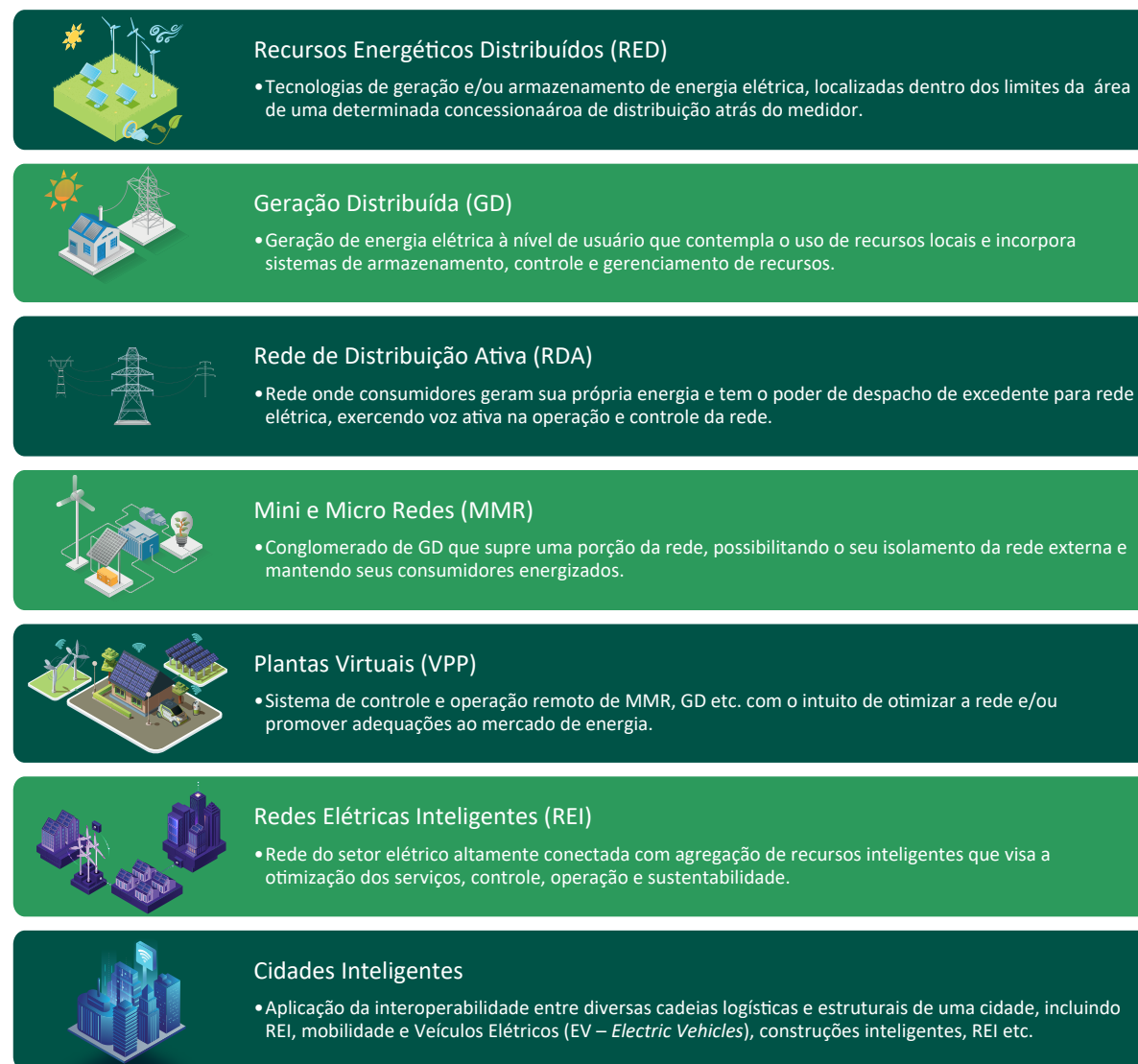


Futuro: O caminho que as redes elétricas seguem trilhando em sua infraestrutura levará a dois perfis que serão a base das REI. O primeiro diz respeito a interoperabilidade de dados que impõe a incipiência para um sistema inteligente. Tal interoperabilidade de dados, assim como de serviços, trará enormes possibilidades de novos serviços para o setor, principalmente ao alinhar tecnologias como o IoT e a Inteligência artificial. O segundo perfil diz respeito à alta penetração de dispositivos controlados por eletrônica de potência. O controle destes dispositivos tende cada vez mais a trazer benefícios na qualidade dos serviços e agir de forma mais inteligente nos despachos energéticos, principalmente em aspectos de integração de fontes intermitentes à rede.

<https://www.way2.com.br/blog/iot-na-gestao-de-energia/>

Os conceitos de uma estrutura de REI são muitos e podem gerar confusões em suas definições. O infográfico apresentado na Figura 40 traz uma breve descrição dos principais sistemas dentro de uma REI.

Figura 40. Definições gerais dos conceitos presentes no contexto de REI⁴⁴



44. Fonte: Elaboração própria

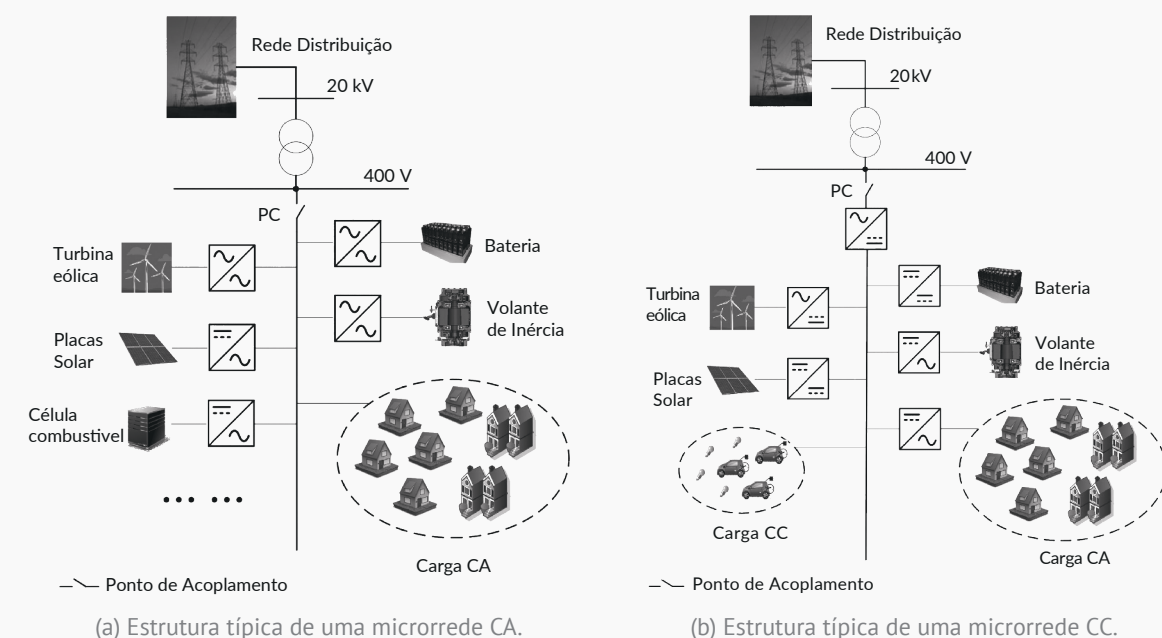


Saiba mais: Saiba mais sobre cidades inteligentes na carta disponível no link abaixo:

<https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/desenvolvimento-regional/projeto-andus/carta-brasileira-para-cidades-inteligentes/>

Em REI, sistemas de microrredes podem ser implementados como uma rede de corrente alternada, CA, ou de corrente contínua, CC, ou ainda de modo híbrido. Nas redes CA, geradores distribuídos e sistemas de armazenamento de energia são conectados a um barramento CA por meio de conversores eletrônicos ligado à rede externa. Já em redes CC, tal ligação é estabelecida por um barramento CC. Sistemas híbridos com redes CC e CA são realizáveis por meio de um novo estágio de acoplamento, realizado por um barramento CA. A Figura 41 ilustra a estrutura de uma rede CC e CA, onde pode ser visualizado a importância dos conversores eletrônicos. O ponto definido como PC (*Point Connection* – Ponto de Conexão) separa a rede externa da rede local.

Figura 41. Estrutura típica de redes CA e redes CC⁴⁵.

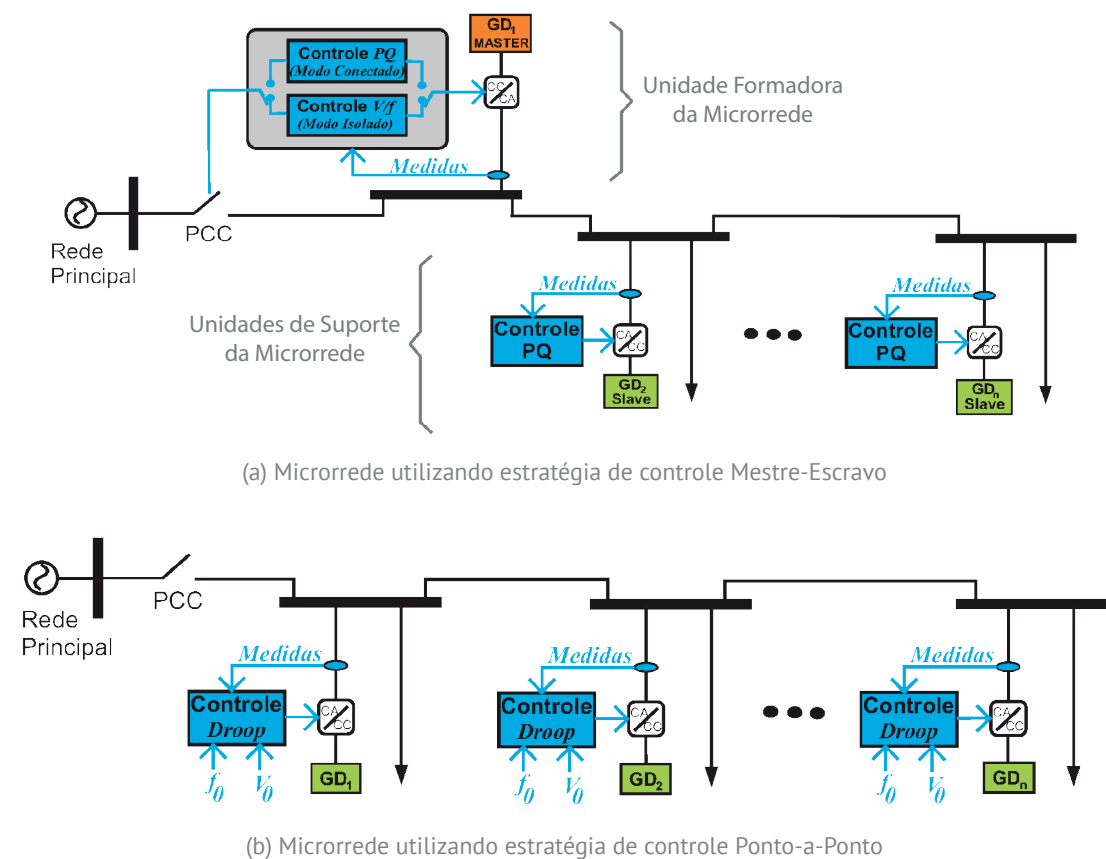


Microrredes locais, que possuem a capacidade de se isolar da rede externa, apresentam estrutura de controle diferenciada para cada modo de operação. Assim, para a operação em modo ilhado, os conversores eletrônicos seguem uma lógica de controle mestre-escravo, estabelecendo controle de frequência e de tensão na microrrede. Já para o modo de controle conectado, a lógica de controle é a de ponto-a-ponto, onde os conversores atuam seguindo as variáveis da rede e controlando apenas o despacho de potência ativa e reativa das microgerações. A Figura 42 apresenta a estrutura destes modos de operação.

45. Fonte: Traduzido de (Wang, 2017)



Figura 42. Estratégias de controle para operação de rede ilhada e conectada⁴⁶.



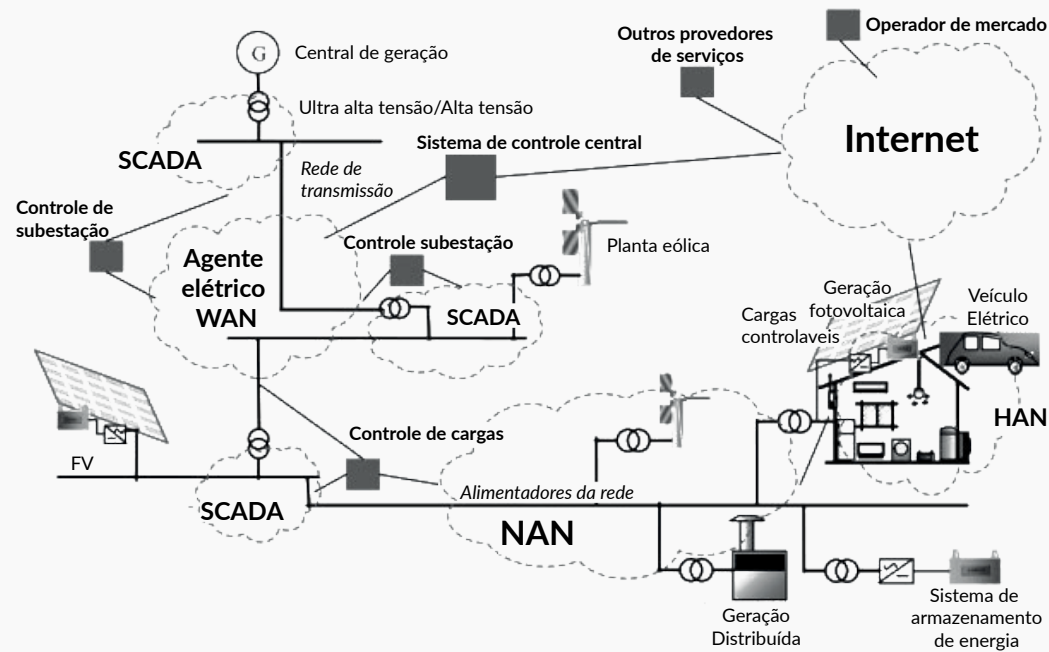
Em termos de infraestrutura de Comunicação, define-se:

- **HANs - Home Access Network (Rede de Acesso Residencial):** É uma rede confinada em uma residência. Ela habilita controle remoto de dispositivos digitais automáticos e aplicações na residência. Nesta rede são integrados Medidores Inteligentes, Aplicativos Inteligentes e Monitoramento baseado em Web.
- **NANs - Neighborhood Area Network (Rede de Área de Vizinhança):** É uma comunicação utilizada para distribuição local via rede sem fio, abrangendo uma área maior que as tradicionais Redes de Área Local (LAN - Local Area Network). Faz a interface dos dados da região com o Sistema Elétrico de Potência (SEP).
- **WAN - Wide Area Network (Rede de Área Ampla):** Aplicado no SEP, é uma rede que presta informações ao setor elétrico relacionadas à estabilidade e margens de segurança da operação em tempo real.

A ilustração da Figura 43 mostra a aplicação dos conceitos HAN, NAN e WAN aplicados em uma REI.

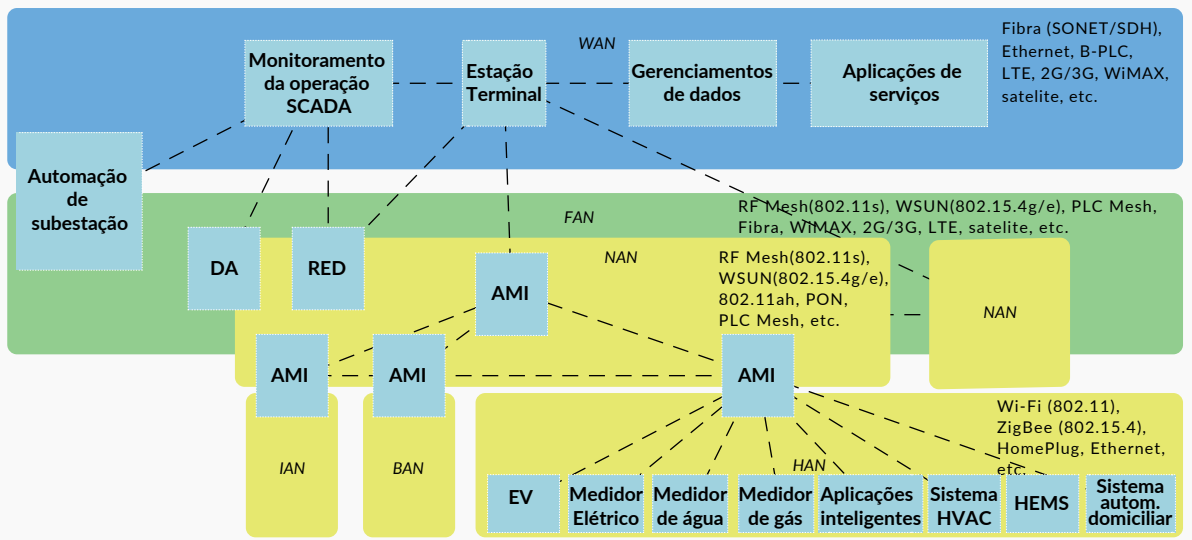
46. Fonte: (João, 2019)

Figura 43. Possível infraestrutura de comunicação em REI⁴⁷.



Uma representação da infraestrutura de comunicação pode ser apresentada em forma de camadas, conforme ilustrado na Figura 44. Nesta ilustração, o sistema de Infraestrutura de Medição Avançada (AMI - Advanced Measured Infrastructure) faz conexão entre a HAN e a NAN. A Rede de Área de Campo (FAN - Field Area Network) é formada ao englobar os recursos energéticos distribuídos e a automação da distribuição. Neste mesmo nível de camada verifica-se ainda a inclusão da Rede de Área Industrial (IAN - Industrial Area Network) e Rede de Área Predial (BAN - Building Area Network).

Figura 44. Arquitetura simplificada de camadas de comunicação em REI⁴⁸.



47. Fonte: (Ekanayake, 2012)

48. Fonte: (Sato, et al., 2015)



3.3. Protocolos de Comunicação

Protocolos de comunicação são as regras de como uma mensagem é transmitida e recebida em um sistema. Figurativamente pode-se dizer que os protocolos são as linguagens pelas quais os equipamentos estabelecem uma conversa, trocando mensagens que sejam entendíveis para ambos os lados. Sendo assim, o entendimento e definição destes protocolos é fundamental para se estabelecer interoperabilidade na rede e garantir um adequado fluxo de informações.



Saiba mais: Entender os protocolos de comunicação aplicados diretamente em REI pode se tornar um desafio se não há uma base em sistemas de comunicação. O principal modelo de estrutura de comunicação é o Sistema de Interconexão Aberto (OSI – *Open System Interconnection*). Visite o link a seguir para entender como funciona este modelo e suas camadas:

https://pt.wikipedia.org/wiki/Modelo_OSI.

De modo geral, existem tantos protocolos proprietários como protocolos não-proprietários. Protocolos não-proprietários são normalmente padronizados e normatizados para uso e aplicações gerais. Nos sistemas de energia relacionados à automação, principalmente no que concerne as REI, destacam-se os protocolos normatizados Modbus, DNP3, IEC 60870 e IEC61850.

O Modbus é um protocolo de mensagens na camada de aplicação e fornece comunicação entre dispositivos conectados em vários barramentos da rede. Existem duas maneiras de implementar este protocolo: serial ou via TCP/IP (*Transmission Control Protocol/ Internet Protocol*). Normalmente, as mensagens Modbus são do tipo consulta/ resposta e a comunicação é iniciada pelo cliente, com uma única solicitação a um determinado dispositivo, que responde de volta. A Figura 45 apresenta uma visualização das camadas Modbus com implementação TCP/IP e serial.

Figura 45. Visualização das camadas do Protocolo Modbus⁴⁹.

Modbus (TCP/IP)	Modbus (serial)	
Modbus application layer		Application (Layer 7)
Not used	Not used	Presentation (Layer 6)
		Session (Layer 5)
TCP/IP protocol suite		Transport (Layer 4)
		Network (Layer 3)
	Modbus serial line protocol	Link (Layer 2)
	RTU / ASCII RS-232 / RS-485	Physical (Layer 1)

49. Fonte: (MOUFTAH, EROL-KANTARCI, & REHMANI, 2018)

DNP3 (*Distributed Network Protocol*) é um conjunto de protocolos de comunicação desenvolvido para comunicações entre vários tipos de aquisição de dados e equipamentos de controle. Ele desempenha um papel crucial em sistemas SCADA (Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados), no qual é usado por Centros de Controle, UTR (*Unity Terminal Remote*) e IED (*Intelligent Electronic Device*).

A camada de usuário DNP pode ter entradas e saídas analógicas e binárias. Uma estação DNP3 mestre envia solicitações e, normalmente, as estações DNP3 escravas as respondem. No entanto, uma estação DNP3 escrava também pode transmitir uma mensagem sem uma solicitação. Diferente do Modbus, as mensagens DNP3 podem fornecer data, hora e qualidade de dados, e não estão restritas a transferir um único ponto de dados, uma vez que vários tipos de dados (por exemplo, booleano, ponto flutuante) podem ser encapsulados em uma única mensagem para reduzir o tráfego de dados. A Figura 46 apresenta uma visualização das camadas DNP3 com implementação TCP/IP e serial.

Figura 46. Visualização das camadas do protocolo DNP3⁵⁰.

DNP3 (TCP/IP)	DNP3 (Serial)	
DNP3 data object library		Application (Layer 7)
DNP3 application layer		
Not used		Presentation (Layer 6)
		Session (Layer 5)
DNP3 transport functions	DNP3 transport functions	Transport (Layer 4)
DNP3 data link functions		
TCP / UDP		
IP	Not used	Network (Layer 3)
IP	DNP3 data link layer	Link (Layer 2)
	Transmission procedures (IEC 60870-5-2 / balanced)	
	Frame formats (IEC 60870-5-1 / FT3)	
Ethernet (IEEE 802.3)	ITU-T interface specification (RS-232)	Physical (Layer 1)

O protocolo IEC 60870 tem alguns recursos atraentes, como classes de prioridade, classificação de dados em 16 grupos para comando de interrogação, atualização automática e sob demanda de dados e sincronização de tempo. A comunicação pode ser balanceada ou não balanceada e existem dois tipos de quadros: comprimento fixo (de uso restrito para quadros sem dados do usuário) e comprimento variável. Cada quadro pode transportar no máximo uma unidade de dados de serviço de aplicativo e a estrutura da mensagem é formada pela camada de enlace de dados. A Figura 47 apresenta uma visualização da IEC 60870 com implementação TCP/IP e serial.

50. Fonte: (MOUFTAH, EROL-KANTARCI, & REHMANI, 2018)

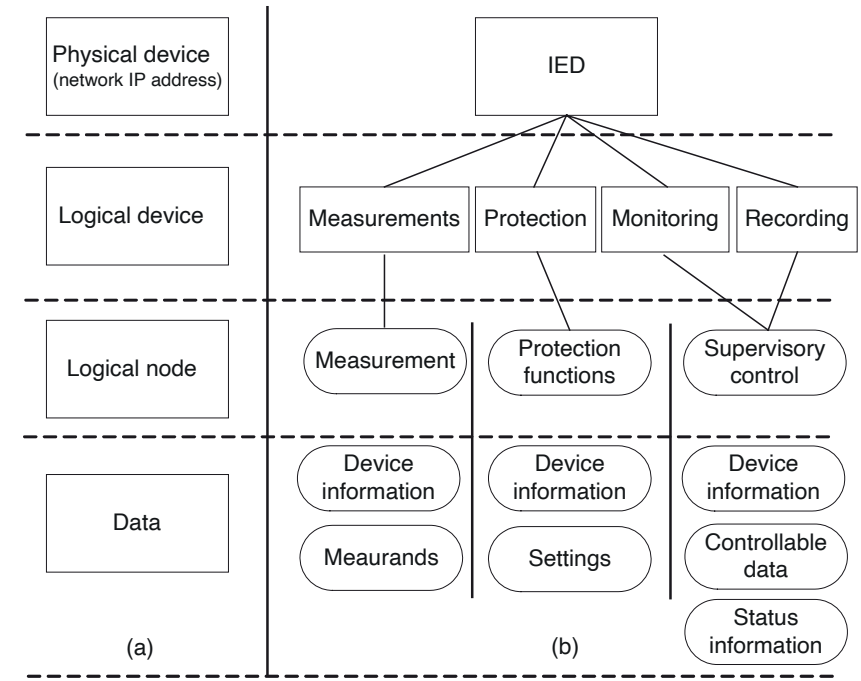


Figura 47. Visualização das camadas do protocolo IEC 60870⁵¹.

IEC 60870-5-104 (TCP/IP)	IEC 60870-5-101 (Serial)		
Application functions (IEC 60870-5-5)		User process	
Application information elements (IEC 60870-5-4)		Application (layer 7)	
ASDU (IEC 60870-5-3)			
Not used	Not used	Presentation (layer 6)	
		Session (Layer 5)	
TCP/IP protocol suite		Transport (Layer 4)	
		Network (Layer 3)	
Transmission procedures (IEC 60870-5-2)		Link (Layer 2)	
Frame formats (IEC 60870-5-1)			
ITU-T interface specification (RS-232 / RS-485)		Physical (Layer 1)	

A IEC 61850 é um padrão aberto para comunicação Ethernet em subestações. É um padrão baseado em função que garante a interoperabilidade dos equipamentos da subestação. A IEC 61850 usa um modelo de objeto para descrever as informações disponíveis dos diferentes equipamentos e do controlador da subestação. É possível entender a separação de camadas lógicas da norma aplicada às variáveis da rede elétrica através da Figura 48.

Figura 48. Estrutura de dados da norma IEC 61850⁵².



51. Fonte: (MOUFTAH, EROL-KANTARCI, & REHMANI, 2018)

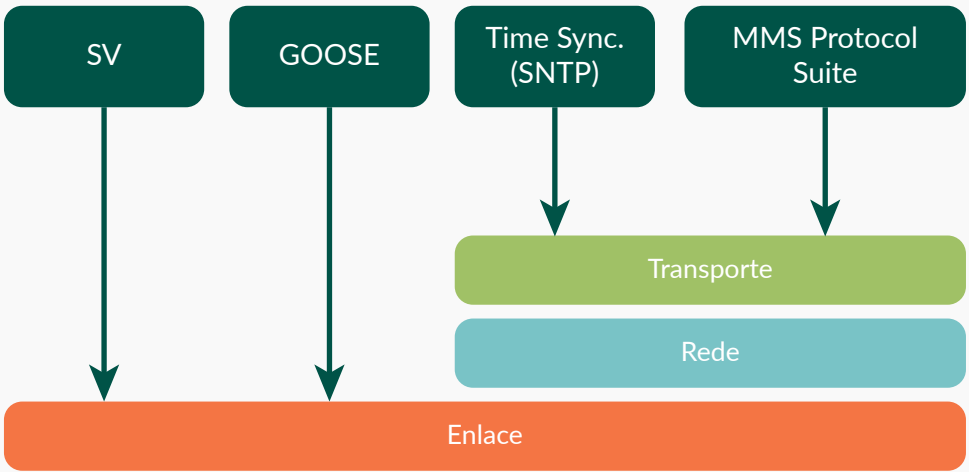
52. Fonte: (Ekanayake, 2012)

A norma IEC 61820 estabelece padrões de mensagens com aplicabilidades específicas. Estes padrões são: GOOSE, SV, MMS e Mensagens de sincronismo temporal do tipo SNTP e PTP.

- **GOOSE:** Mensagens GOOSE (*Generic Object Oriented Substation Event*) são mensagens de camada 2 e portando trafegam apenas dentro da LAN, não possuem IP (Apenas MAC) e não são roteáveis. O protocolo GOOSE publica a mensagem, mas não controla quem pode lê-la, caracterizando assim um sistema multicast com endereçamento MAC padronizado entre 01-0C-CD-01-00-00 e 01-0C-CD-01-FF.
- **SV:** Mensagens SV (*Sampled Value*) são mapeadas diretamente na camada 2, assim como o GOOSE, e endereçadas pelo MAC. A mensagem SV pode assumir tanto um modelo Unicast como Multicast. Para o modelo Multicast, os primeiros octetos são padronizados como 01-0C-CD-04. Neste protocolo trafegam valores amostrados no barramento de processo.
- **MMS:** Mensagens MMS (*Manufacturing Message Specification*) são destinadas para casos com restrições temporais menos críticas, com velocidade média de 100ms a maiores que 1000ms. Exemplo: Mensagens de informações de estado e valores de medidas com velocidade de 100ms; alterações de parâmetros, transmissão de eventos e comandos para IHM (Interface Homem-Máquina) com velocidade de 500ms; e transmissão de grandes arquivos com tempo maior que 1000ms. Mensagem MMS é unidirecional e o destino é especificado desde o início de sua publicação. Assim, uma mensagem MMS não necessita ser marcada com tags. Neste protocolo a comunicação é entre Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IEDs – *Intelligent Electronic Devices*) e concentradores ou sistemas SCADA.
- **SNTP:** Protocolo de sincronismo de tempo. Aceito na norma IEC 61850, mas com precisão questionável pois depende da carga da rede de dados.
- **PTP:** Proteção de sincronismo de tempo com precisão de milissegundos.

A Figura 49 apresenta os padrões de mensagens relacionando-os com as camadas de comunicação do sistema OSI.

Figura 49. Mecanismo de comunicação da norma IEC 61850⁵³.



53. Fonte: Elaboração própria



Futuro: A interoperabilidade de dados, principalmente entre ativos da rede, fará surgir a unificação dos sistemas e protocolos de comunicação. Essa perspectiva é a principal razão da norma IEC 61850. Por este motivo, se espera que este protocolo seja altamente difundido futuramente nos ativos e nos serviços de uma REI.

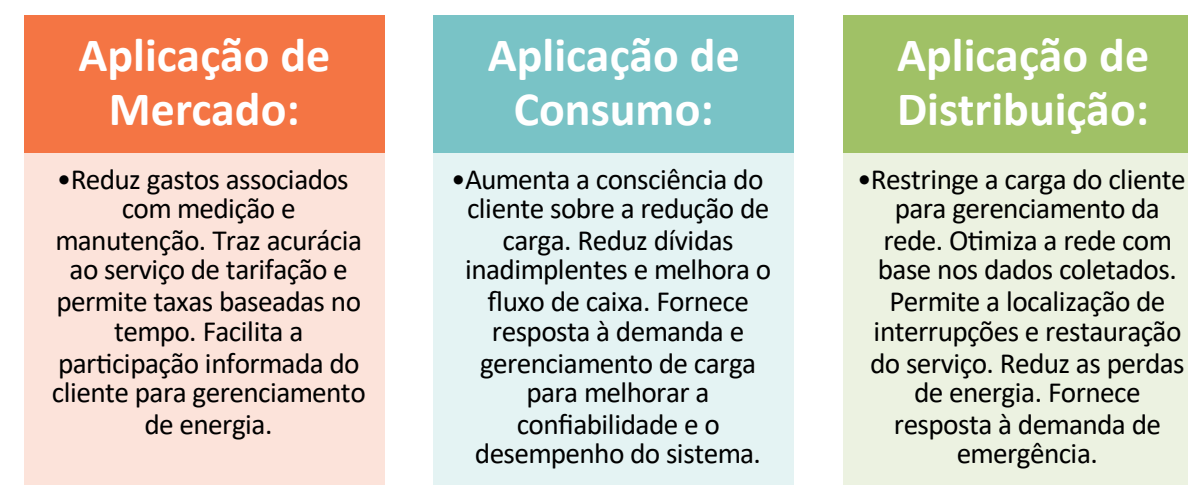
https://www.researchgate.net/publication/267626119_Smart_Grid_e_IEC_61850_Novos_Desafios_em_Redes_e_Telecomunicacoes_para_o_Sistema_Eletrico

3.4. Infraestrutura Avançada de Medição e Medidores Inteligentes

O produto dos sistemas de comunicação são as mensagens trocadas entre os equipamentos e serviços da rede. Estas mensagens em sua maioria são medições de variáveis da rede. Portanto, pode-se assumir que os sistemas de medição são parte fundamental para a implementação de REI. Neste sentido os medidores inteligentes, que visam substituir os medidores eletromecânicos instalados nas unidades consumidoras para aferir o consumo, habilitam a possibilidade de comunicação em tempo real, promovendo o monitoramento e automatização de serviços de leitura, dentre outros serviços. Além disto, possibilita o fluxo de energia bidirecional em situações nas quais se deseja injetar o excedente de energia gerada nas unidades.

Para garantir o adequado fluxo dos sistemas de medição, é estabelecido a Infraestrutura Avançada de Medição (AMI – *Advanced Metering Infrastructure*). A AMI é a convergência dos dados intercambiados na rede, da infraestrutura de comunicação e da infraestrutura de suporte à informação. A função da AMI pode ser dividida em 3 categorias, apresentadas na Figura 50.

Figura 50. Categorização das 3 principais funções da AMI⁵⁴.



AMI é um termo criado para representar a tecnologia de rede de sistemas de medidores, sendo que os medidores da AMI são referidos como medidores inteligentes. Estes medidores não se restringem à energia elétrica, podendo, por exemplo, se estender a medições do uso de gás e água dos clientes.

54. Fonte: Elaboração própria



Saiba mais: Se aprofunde nos conhecimentos sobre os medidores inteligentes com os links a seguir:

www.stringfixer.com/pt/Smart_meter

www.osetoreletrico.com.br/medicao-inteligente/

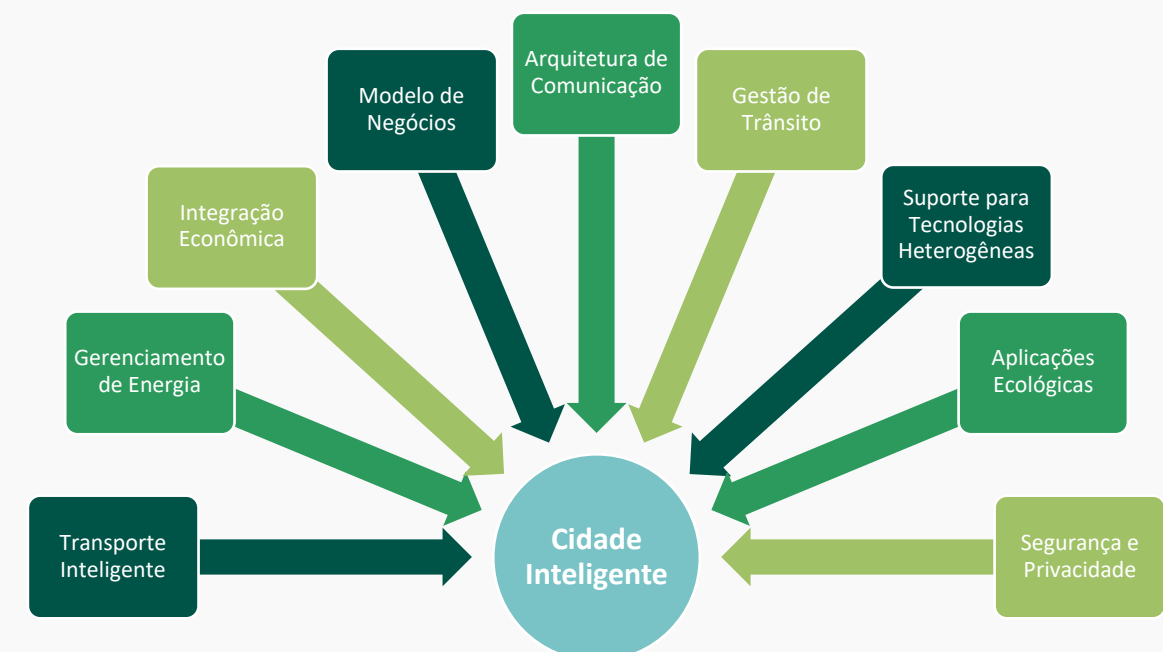
www.smartme.co.uk/how-they-work.html

3.5. Cidades Inteligentes e Mobilidade Elétrica

Enquanto uma REI é caracterizada basicamente por sua interconectividade e gerenciamento de grande quantidade de dados para a tomada de decisão na operação e controle através de técnicas de otimização de modo automatizado, uma cidade inteligente visa promover a interação de pessoas e o uso de energia renováveis, materiais sustentáveis, serviços e financiamento a fim de catalisar o desenvolvimento econômico e a melhora da qualidade de vida da população. Neste ponto, a inteligência reside na estratégia de infraestrutura e serviços prestados à comunidade, bem como planejamento e gestão urbana para satisfação das necessidades sociais e econômicas da sociedade.

Os principais pilares para se desenvolver tecnicamente uma cidade inteligente são apresentados na Figura 51.

Figura 51. Principais pilares para o desenvolvimento de uma cidade inteligente⁵⁵.



A perspectiva de transporte inteligente como um dos pilares das cidades inteligentes, inclui a mobilidade elétrica em sua base. Neste sentido, os veículos elétricos, além de uma infraestrutura de recarga elétrica e controle inteligente de trânsito, fundamenta a mobilidade elétrica dentro do conceito de cidades inteligentes.

55. Fonte: Elaboração própria



3.7. Recapitulando

Neste capítulo foram apresentadas as características de interoperabilidade e gestão de dados nas REI, bem como a necessidade do uso de conversores eletrônicos e um robusto sistema de comunicação. O capítulo se encerra com uma apresentação dos sistemas de medição avançado e medidores inteligentes, levando o/a leitor/a até uma apresentação das cidades inteligentes, mobilidade elétrica e a visão de cibersegurança.

Ao final desta(s) aula(s), o/a aluno/a deverá ser capaz de:

- Compreender o conceito de interoperabilidade nas REI e sua importância;
- Visualizar a grande quantidade de dados gerados em uma REI e a necessidade de sua gestão;
- Reafirmar o entendimento sobre a necessidade de conversores eletrônicos em REI;
- Visualizar o conglomerado de sistemas, serviços e aplicações em uma REI;
- Entender a infraestrutura base de comunicação em uma REI;
- Obter uma base dos protocolos de comunicação mais aplicados em REI;
- Ter uma base sobre o sistema de medição avançada;
- Entender os caminhos para o conceito de cidade inteligente;
- Ter uma prévia sobre o conceito de mobilidade elétrica;
- Compreender a preocupação com segurança cibernética.

Atividades Sugeridas:

1. Realizar uma pesquisa sobre os serviços e modelos de sistemas que uma REI pode prover ao consumidor. Esta pesquisa poderá passar pelos conceitos de microrredes, plantas virtuais, células combustíveis, etc., e ainda, em serviços de geração pelo lado da demanda, controle do perfil de tensão e frequência da rede em eventos de falta, mercado livre de energia etc. Com esta pesquisa, será possível visualizar o futuro da rede elétrica e como o consumidor será impactado com as REI. No intuito de simplificar e promover uma dinâmica entre alunos/as, propõe-se que o/a professor/a separe os temas entre grupos e proponha apresentações de seminários.
2. Montar uma planilha comparativa entre os protocolos de comunicação apresentado neste capítulo, criando uma coluna com suas principais aplicações. Procure incrementar esta planilha com dados obtidos em outras referências. Você chegará a compreender as vantagens da norma IEC 61850 e porque esta norma é a mais utilizada para se implementar em uma REI. Foque nos protocolos GOOSE, SV e MMS da IEC 61850.

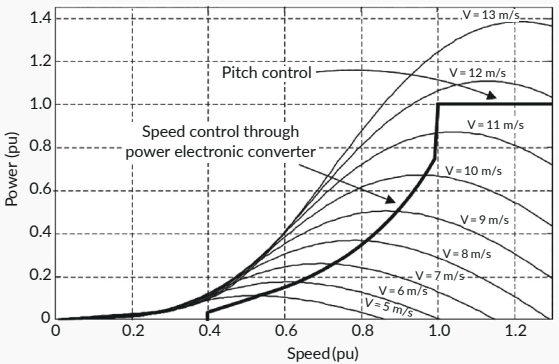
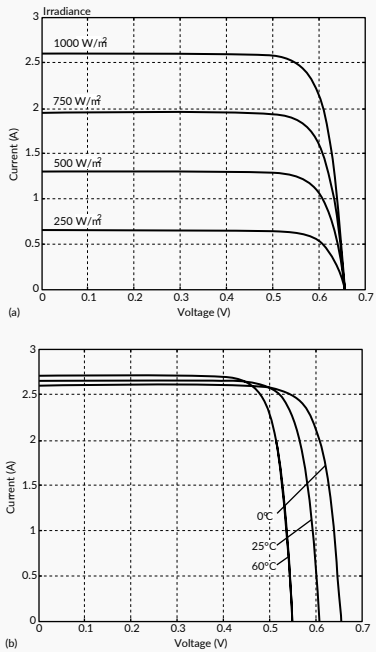
Algumas fontes interessantes:

A elaboração deste capítulo se baseou em referências na literatura, cujas fontes estão citadas a seguir:

- T. Sato; D. Kammen; B. Duan; M Macuha; Z. Zhou; J. Wu; M. Tariq; S. Asfaw, **Smart Grid Standards: Specification, Requeriments, and technologies**. 2015. (Sato, et al., 2015)
- WANG, Chengshan et al. (Ed.). **Smart electricity distribution networks**. CRC Press, 2017. (Wang, 2017)
- J. A. A. da Silva, B. P. de Alvarenga, S. P. Pimentel, and E. G. Marra, **Tratamento e Análise de Dados Solarimétricos da Estação Meteorológica da EMC/UFG**, *Energ. Sol. e eólica* 2, pp. 275–289, 2019. (J. A. A. da Silva, 2019)
- D. V. João. **Proteção adaptativa em microrredes de média tensão formadas exclusivamente por conversores eletrônicos: uma abordagem baseada em medição centralizada de tensão**. Dissertação – (2019). (João, 2019)
- J. Momoh, **Smart Grid: Fundamentals of Design and analysis**. 2012. (Momoh, 2012)
- Ekanayake, Janaka B., et al. **Smart grid: technology and applications**. John Wiley & Sons, 2012. (Ekanayake, 2012)
- <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/nova-edicao-de-caderno-sobre-geracao-distribuida-e-lancado-pela-aneel>

Avaliação:

Os gráficos abaixo representam o perfil de corrente e tensão de um painel de geração solar devido a radiação incidente e a curva de potência de um sistema eólico em razão da velocidade do vento. Com base nestes gráficos e no conteúdo apresentado neste capítulo, qual será a potência máxima gerada em um sistema de geração solar com 100 células fotovoltaicas recebendo 750W/m^2 de radiação, e um sistema eólico, com dois geradores eólicos com velocidade de 8m/s ? Utilizar a base pu (Base por unidade) de potência da geração eólica como 100W .





Capítulo 4: Prestação de Serviços e Suporte à Rede com Geração Distribuída



Nota para o/a professor/a – Neste capítulo, o/a professor/a guiará o/a aluno/a em aspectos básicos de qualidade de energia e definições de agentes envolvendo GDs. No entanto, o maior enfoque do capítulo é na avaliação e aplicação dos modelos de resposta à demanda na análise de sistema de geração distribuída.

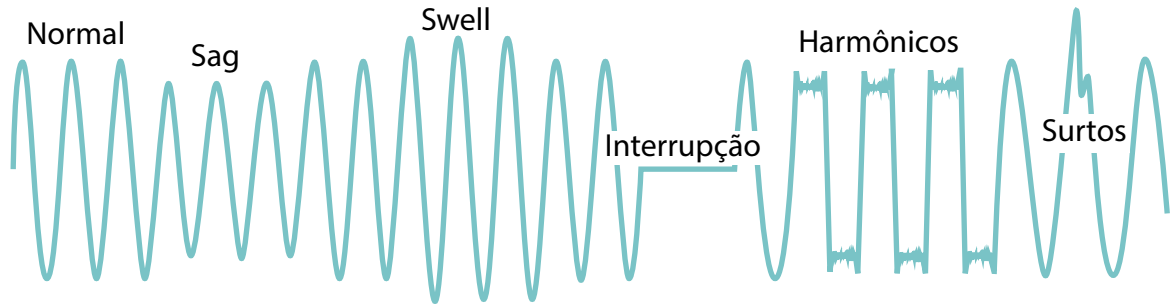
4.1. Qualidade de Energia e Intermitência

Medições relacionadas à qualidade de energia exercem papel fundamental na implantação das REI. Do ponto de vista de processamento de sinais, a qualidade da energia é dividida em qualidade do sinal de tensão e a qualidade do sinal de corrente da rede elétrica.

De modo geral, a qualidade do sinal é qualificada de acordo com suas variações em torno de uma referência, ou seja, avalia-se o desvio destas grandezas comparando-as com valores ideais e/ou padrões. A idealização destes valores se baseia em uma forma de onda sinusoidal pura, com amplitude e frequência constante. Já a padronização destes valores se refere aos valores nominais solicitados pela rede elétrica.

A Figura 54 apresenta um sinal senoidal inicialmente normal seguido por situações de afundamento (*sag*), elevação (*swell*), interrupção, harmônicos e surtos ou transientes. Além destes, há ainda os fenômenos de cintilação e desbalanços dos sinais trifásicos.

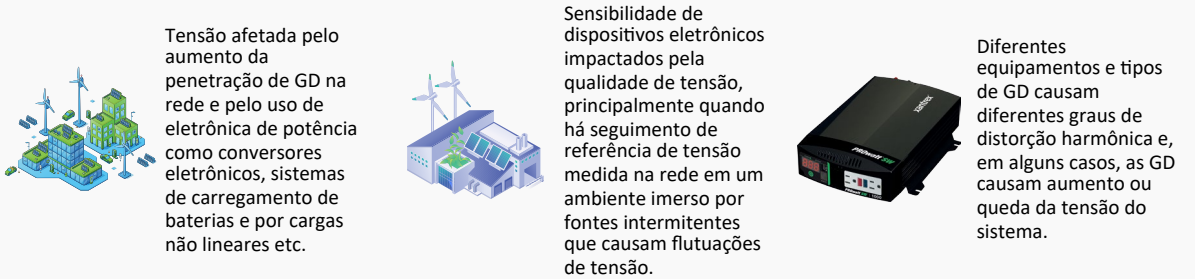
Figura 54 Ilustração de variações na qualidade do sinal de energia⁵⁸.



58. Fonte: Elaboração própria

Apesar das REI carregarem a expectativa de uma rede mais forte, flexível, resiliente, auto recuperável, totalmente controlável e eficiente, a qualidade da energia é comprometida com problemas que incluem a intermitência e imprevisibilidade das fontes de geração renováveis, participação ativa dos consumidores, aplicação intensiva de eletrônica de potência e aumento de cargas não-lineares pelos usuários finais. Os principais impactos das GDs na qualidade da energia são apresentados na Figura 55.

Figura 55. Impacto de GD na qualidade da energia⁵⁹.



A qualidade da energia elétrica não pode ser totalmente controlada pelos produtores locais em suas unidades consumidoras de modo simples. Por este motivo, se verifica a necessidade de monitoramento constante e uso de dispositivos para controle da qualidade da energia. Esta depende não só das condições de fornecimento, mas também do equipamento utilizado (imunidade a perturbações e emissões) e práticas de instalação.



Saiba mais: Entenda como o agente regulador nacional, a ANEEL, mede e quantifica a qualidade de energia da rede pelo link abaixo:

<https://memt.com.br/blog/?p=511#:~:text=Em%20rela%C3%A7%C3%A3o%20%C3%A0%20qualidade%20de,onda%20de%20tens%C3%A3o%20e%20os>

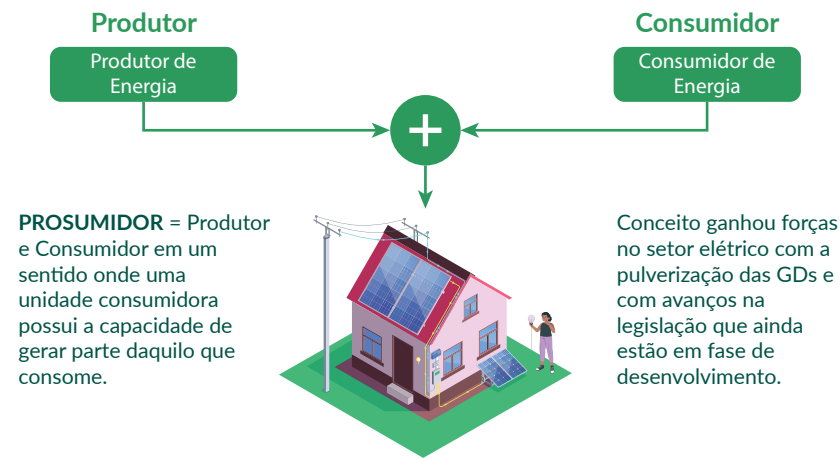
4.2. Prosumidor e Participação por Incentivo e Resposta ao Preço

Um *prosumidor* de energia envolve vários aspectos do sistema elétrico, levando a ideia de um consumidor que produz, vende, negocia, armazena e consome energia. De forma ampla, o uso de aparelhos inteligentes, tecnologias de comunicação, veículos elétricos e capacidades de armazenamento de bateria para serviços flexíveis são aspectos da descrição de um prosumidor. Além de gerarem energia para consumo, os prosumidores também fornecem serviços à rede elétrica. A Figura 56 apresenta uma ilustração do conceito de Prosumidor.

59. Fonte: Elaboração própria



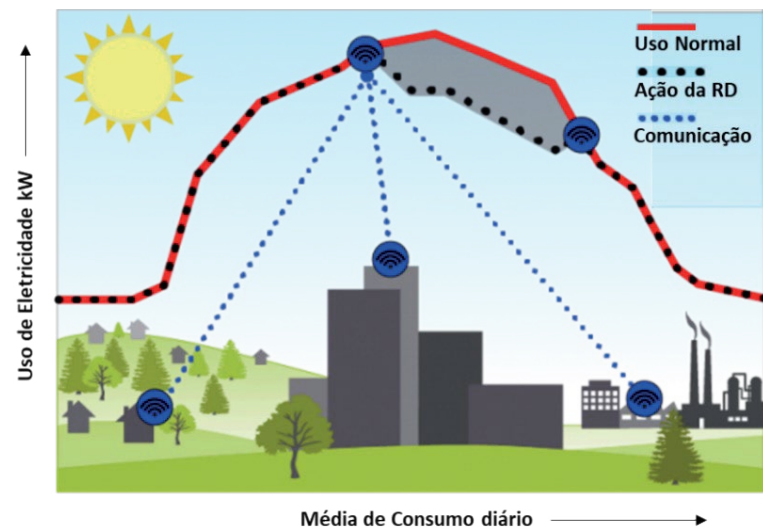
Figura 56. Visão ilustrativa do conceito Prosumidor e sua aplicação no setor elétrico⁶⁰.



Em termos de benefícios, os *prosumidores* promovem redução das emissões de carbono, aumento do uso de fontes de energia renováveis, novas oportunidades de negócios, melhor acesso à energia em áreas urbanas e maior resiliência para comunidades isoladas ou em desenvolvimento. Por outro lado, o *prosumerismo* abala os regimes existentes, impactando as partes interessadas do setor de energia e aumentando a participação na geração de energia intermitente e aleatória, podendo causar problemas comerciais, técnicos e operacionais ao sistema elétrico.

Prosumidores são vistos como acréscimos importantes ao sistema descentralizado de energia baseado em Recursos Energéticos Distribuídos (RED). Seus sistemas de armazenamentos de energia são vistos como potenciais recursos de flexibilidade para o sistema de Resposta à Demanda (RD), que são necessários para gerenciar a variabilidade crescente na geração de energia. A Figura 57 apresenta uma visão geral da aplicação do conceito de RD, onde os consumidores são incentivados a reduzir seus consumos em horários de pico de demanda.

Figura 57. Ilustração da aplicação do conceito de RD⁶¹.



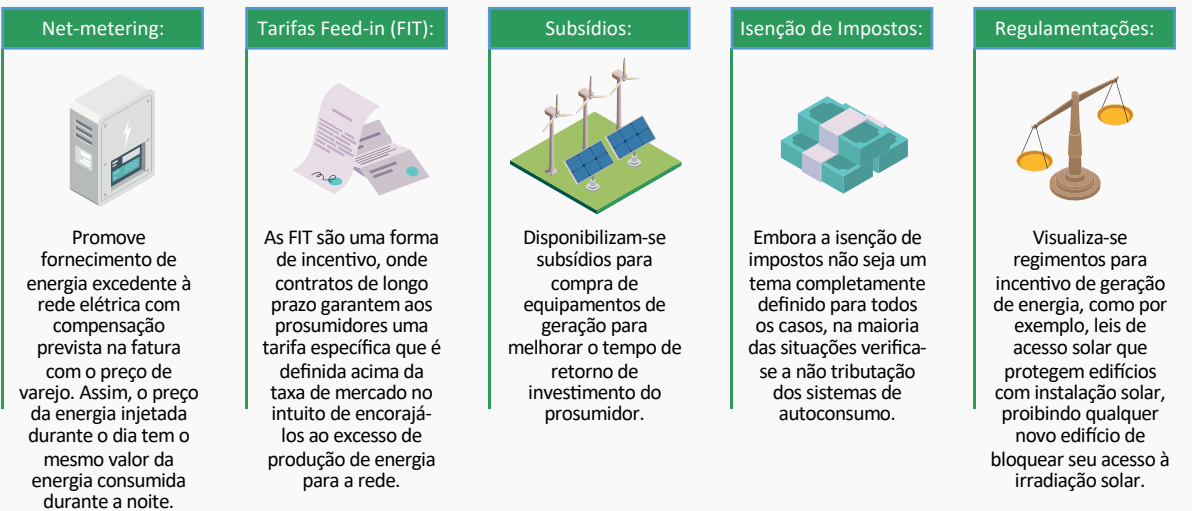
60. Fonte: Elaboração própria

61. Fonte: Adaptado de <https://energycentral.com/c/em/demand-response-contracts-being-signed>

Na Figura 57, o uso normal de consumo energético, representado pela linha vermelha, tem um momento de pico de geração onde o sistema de RD comunica com suas cargas solicitando ações de aumento das GDs ou redução de consumo por meio de incentivos. Assim, a curva normal segue o traço da linha pontilhada preta da Figura 57, reduzindo a curva de carga do sistema durante o período de maior criticidade de demanda da rede.

De modo geral, os incentivos para se promover a RD se baseiam em compensações e/ou planos de tarifação que se apresentam atraentes para os prosumidores. Alguns desses modelos são apresentados na Figura 58.

Figura 58. Exemplos de incentivos de RD considerando a resposta ao preço de prosumidores⁶².

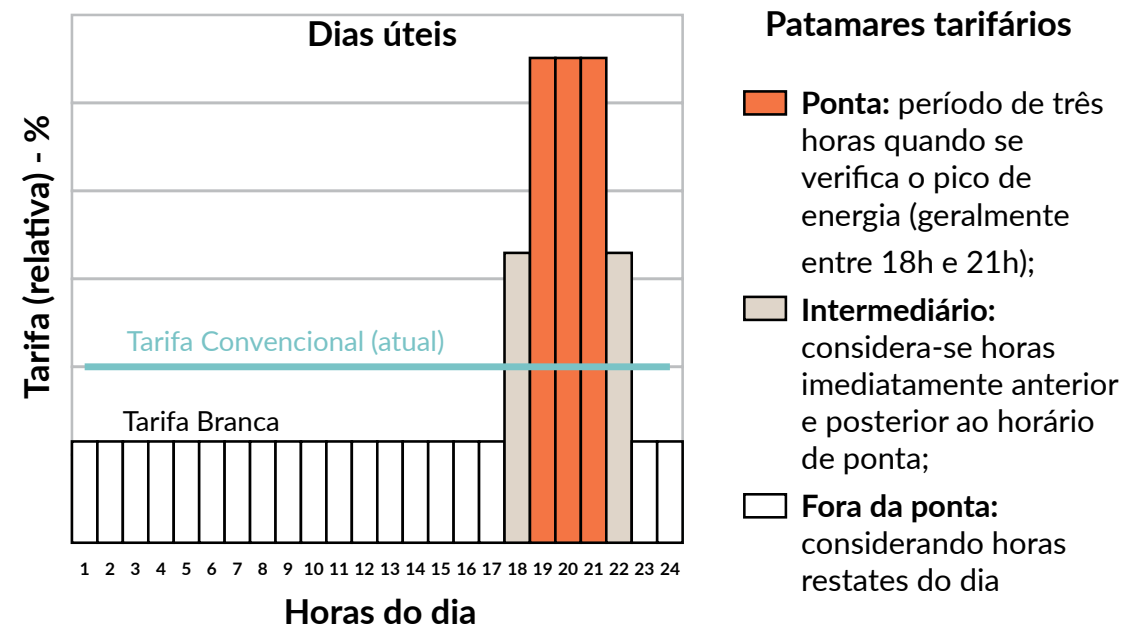


No Brasil, a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) regula as formas de compensação da energia elétrica gerada pelos prosumidores da rede. Em especial, os prosumidores residenciais, que interconectam à rede por meio de mini e micro redes, são beneficiados por um sistema de compensação trazido pela Resolução Normativa nº 482/2012. Através desta compensação, permite-se que o excedente de energia gerada pela unidade consumidora seja injetado na rede, a qual age como um sistema de armazenamento, “guardando” a energia produzida para posterior uso da unidade consumidora. Além deste tipo de compensação, a ANEEL disponibiliza em seu sistema de bandeiras tarifárias a tarifa de bandeira branca, que integra um sistema de tarifas dinâmicas. Este sistema busca distinguir o preço da energia em termos horários nos dias úteis. A Figura 59 ilustra a visão da bandeira branca e seus patamares tarifários comparados com a tarifa convencional.

62. Fonte: Elaboração própria



Figura 59. Ilustração do sistema de tarifação por bandeira branca comparada com convencional⁶³.



Saiba mais: Entenda sobre os benefícios e onde encontrar vantagens na aplicação da bandeira branca através da apresentação da ANEEL no link a seguir:

<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/tarifas/tarifa-branca>

4.3. Serviços Ancilares

Serviços ancilares são um conjunto de serviços que visa a garantia do fornecimento de energia com qualidade e confiabilidade. Em outras palavras, os serviços ancilares exercem funções junto a rede elétrica para garantir que o consumidor receba energia dentro dos padrões de qualidade definidos pelos agentes regulatórios do setor.

No Brasil, os serviços ancilares são estabelecidos pelo Módulo 14 dos Procedimentos de Rede do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), o qual tem a função de contratar e administrar estes serviços, de modo a providenciar a operação sistêmica do Sistema Interligado Nacional (SIN). Os aspectos e serviços prestados pelo ONS e pelos agentes de geração são regulamentados pela ANEEL.

Os principais serviços ancilares prestados à rede elétrica são apresentados na Figura 60.

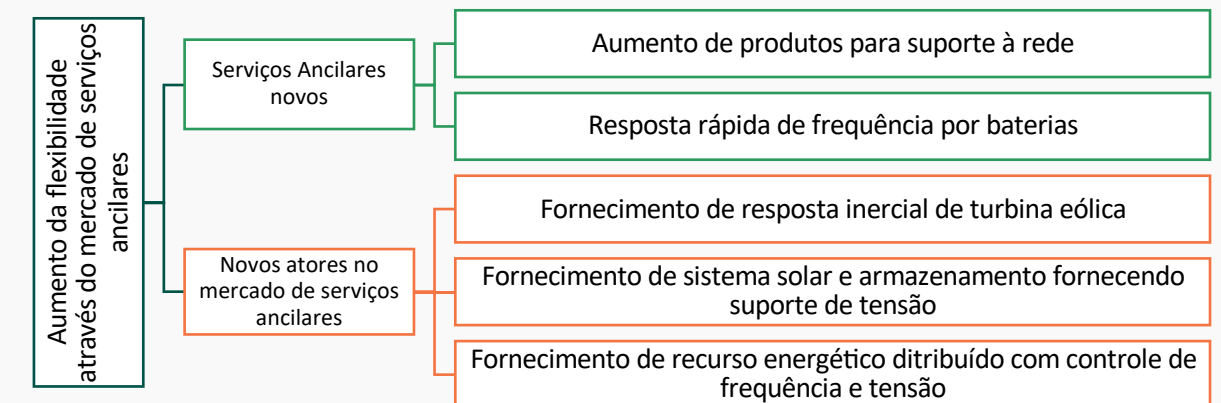
63. Fonte: Elaboração própria

Figura 60. Tipos de serviços ancilares⁶⁴.



Para aplicação dos serviços ancilares por meio da influência de tecnologias provenientes das Redes Elétricas Inteligentes (REI), dois grupos de aplicações e inovações podem ser endereçados. Um grupo é responsável pelos serviços prestados à rede, enquanto o outro grupo se relaciona aos atores para fornecimento no mercado. A Figura 61 segrega estes grupos considerando a aplicação para REI.

Figura 61. Formas de segregar serviços ancilares por meio da aplicação de REI⁶⁵.



A implantação do conceito de REI pode trazer vários benefícios para os consumidores através de serviços ancilares. Sistemas de baterias, por exemplo, são opções de prestação de serviços que compensam a variação da frequência devido a sua rápida resposta. Situação semelhante pode ser observada em sistemas eólicos conectados à rede através de eletrônica de potência, que permitem o controle da resposta inercial do sistema durante distúrbios de frequência. Mediante um surto de frequência, por exemplo, o controle dos conversores eletrônicos pode aplicar um retardo no torque da turbina e reduzir a geração. Em geral, os conversores em sistemas eólicos e fotovoltaicos podem ser programados para ajudar a controlar a frequência, bem como promover controle de tensão da rede.

64. Fonte: Elaboração própria

65. Fonte: Traduzido de (IRENA 2, 2019)



A tabela apresentada na Figura 62 traz uma visão de prospecção inovativa para novos serviços ancilares proporcionados pela formação de REIs, enquadrando-as em meio aos serviços ancilares tradicionalmente vistos no sistema elétrico de potência.

Figura 62. Visão geral de novos serviços ancilares comparados com tradicionais⁶⁶.

Serviços Ancilares	Produto	Descrição	Tempo de Resposta Típico
Regulação de Frequência	Regulação primária	Regulação local automática fornecida pelos reguladores de velocidade da unidade geradora. Este nível de regulação sustenta os níveis de frequência, evitando grandes desvios do valor programado.	Sub-segundos a segundos
		Inovações: <ul style="list-style-type: none">Resposta rápida em frequência é um novo produto projetado para remunerar o fornecimento de resposta rápida. As baterias são grandes fornecedores de tais serviços, criando a possibilidade de fontes de receita adicionais para operadores / proprietários de bateria;As turbinas eólicas podem fornecer resposta inercial por meio de conversores eletrônicos de potência;Instalações fotovoltaicas, sistemas de corrente contínua e baterias também podem fornecer resposta inercial sintética se o inversor estiver programado para i550. No entanto, como os inversores não estão presos às características de grandes massas giratórias e têm mais opções para fornecer estabilidade do sistema, este pode não ser o melhor uso deles;Se a regulamentação permitir, os DERs podem fornecer este serviço.	
		Regulação regional automática fornecida pelo controle automático de geração (CAG), envia sinais do centro de controle para determinados geradores para restabelecer o valor da frequência nominal e restaurar a capacidade de reserva primária.	5-15 minutos
	Regulação Secundária	<ul style="list-style-type: none">Se a regulamentação permitir, os DERs podem fornecer este serviço.	
	Regulação Terciária	Regulação regional manual fornecida pelas unidades geradoras e controladas pelo operador do sistema.	> 15 minutos
Regulação de Não-Frequência	Suporte de tensão	Injeção de energia reativa para manter a tensão do sistema dentro de uma faixa prescrita.	Segundos
		Inovações: <ul style="list-style-type: none">Controle de tensão por meio de potência reativa fornecida por recursos conectados ao sistema de potência por meio de inversores, como solar fotovoltaico e acumulador de bateria;Se a regulamentação permitir, os DERs podem fornecer este serviço.	
	Black start	A capacidade de reiniciar uma grade após um apagão.	Minutos
	Inovações: <ul style="list-style-type: none">Aumento de produtos	Recursos de rampa rápida que podem responder a grandes variações de carga líquida em um curto período de tempo. Este produto remunera adequadamente a capacidade de rampa rápida dos geradores e incentiva a flexibilidade	Minutos

 Inovações em Serviços Ancilares



Futuro: Conforme o setor elétrico começa a confiar nos sistemas de geração distribuída e principalmente nos sistemas de armazenamento, começam a surgir oportunidades ímpares no setor. A visão de prosumidores vem crescendo e os novos modelos regulatórios poderão ser incentivos para maior penetração de GD e para a prestação de serviços auxiliares à rede elétrica.

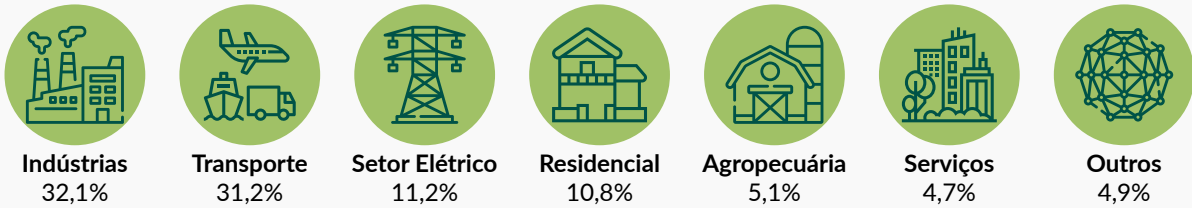
http://www.gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/33_sena_2021_06_01.pdf

4.4. Eficiência Energética, Smart Home e IoT

A eficiência energética ocorre sempre que é possível realizar o mesmo nível de serviço com um menor consumo de energia, ou ainda, aumentar o nível de serviço com o mesmo consumo energético. A Figura 63 apresenta uma segregação de setores e seus consumos contabilizados no ano de 2021 segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE).

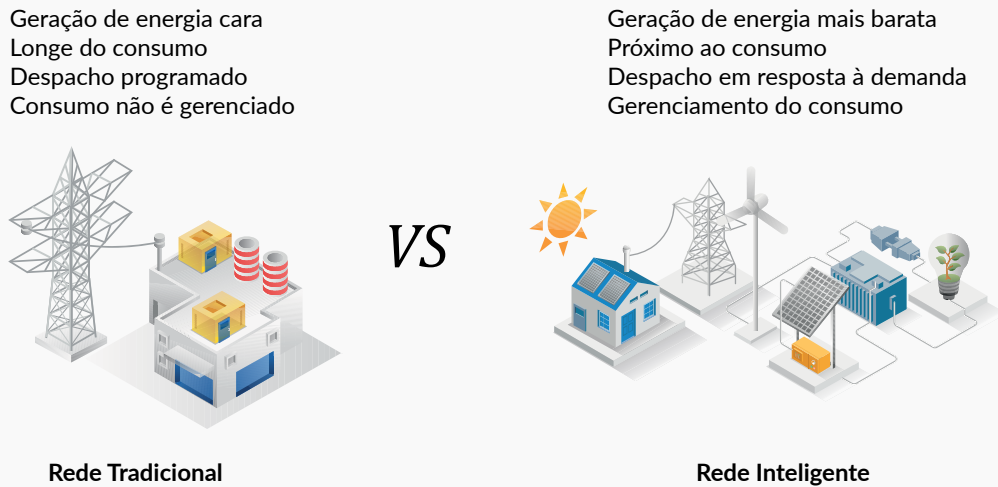
66. Fonte: Traduzido de (IRENA 2., 2019)

Figura 63. Segregação de números de consumo por setor ano base 2021⁶⁷.



A modernização do setor elétrico traz consigo potenciais para uma maior eficiência do sistema. Por meio de sistemas com base em IoT, dispositivos de medição inteligente podem ser utilizados para controlar a potência em regiões de menor consumo em horários específicos e aumentar a geração nas proximidades de onde a demanda é maior. Assim, a energia gerada e consumida passa por menos perdas, aumentando sua eficiência no sistema. Além disso, as REI por meio de GDs evitam o acionamento de grandes geradores de fonte primária de energia cara e poluente e reduzem o gasto operacional com congestionamento nas linhas de transmissão.

Figura 64. Relação base de eficiência entre Redes elétricas tradicionais e REI⁶⁸.



Uma maneira de estimular a prospecção e implantação de ações de eficiência energética no setor elétrico e na aplicação de REI é através de leilões de eficiência energética, onde os agentes competem pelo menor preço por meio de diferentes carteiras de projetos de redução de consumo de energia. Outra maneira é a utilização de indicadores de eficiência, estabelecendo metas e prazos para os agentes do setor. Todavia, de maneira geral, o sistema elétrico ainda carece de mecanismos regulatórios e fiscais para apoiar formas estratégicas que promovem a eficiência energética de maneira ampla e sistêmica.

A eficiência energética nas REI pode ser aperfeiçoada com o uso de dispositivos inteligentes instalados dentro de residências, que passam a ser chamadas de Prédios Inteligentes (SB – *Smart Buildings*) e Casas Inteligentes (SH – *Smart Homes*). A Figura 65 apresenta exemplos de ações para promover a eficiência em construções e casas inteligentes. Estas ações visam estabelecer o gerenciamento interno mais eficiente sobre eletricidade, água, gás e resíduos, tornando as residências mais sustentáveis e reduzindo gastos.

67. Fonte: Elaboração própria

68. Fonte: Elaboração própria



Figura 65. Eficiência energética em Smart Buildings e Smart Homes⁶⁹.



Smart Buildings

- O sistema inteligente de gerenciamento de prédios e as redes de sensores sem fio podem ajudar potencialmente a controlar os aparelhos do prédio de maneira eficiente. Os sistemas de aquecimento e refrigeração podem ser totalmente desligados quando não houver ninguém no edifício. As câmeras de entrada podem ser usadas para detectar qualquer presença dentro do edifício para ligar apenas aparelhos específicos.

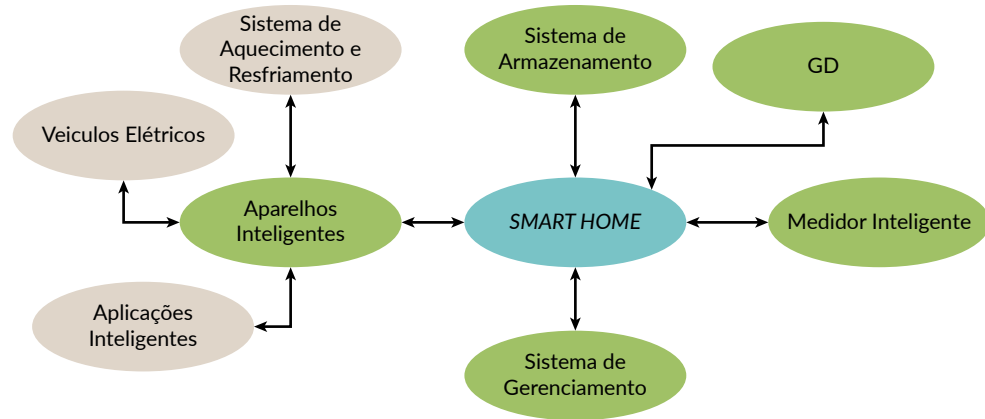


Smart Homes

- A infraestrutura de comunicação ajuda os moradores residenciais a ficarem conectados com suas casas, mesmo quando estão fora. Os aparelhos e medidores inteligentes dão aos consumidores consciência sobre seu consumo de energia em tempo real. Podem mudar seu comportamento em relação ao uso de energia com um enfoque mais eficiente e melhorando os gastos com a energia.

Conceitualmente, as construções inteligentes são constituídas de medidor inteligente, GD, sistema de armazenamento, aparelhos inteligentes com comandos de voz e automação integrada (exemplo de tomadas, lâmpadas, TVs, ares-condicionados, etc.) e sistema de gerenciamento de energia. A Figura 66 apresenta uma visão estrutural de uma casa inteligente com aplicações de tecnologias de REI. É relevante pontuar a importância da interconectividade interna das construções inteligentes para uso dos aparelhos e serviços. Esta interconectividade é alcançada com a aplicação em larga escala do conceito de IoT.

Figura 66. Visão conceitual de um modelo de SG⁷⁰.



A base para projetos de *Smart Homes* (SH) está na visão estrutural de IoT e processamento de dados em plataforma de nuvem. Sendo assim, toda a implementação dos serviços de uma SH é factível mediante uma sólida infraestrutura de comunicação entre os dispositivos. As tecnologias de maior destaque para uso de comunicação entre os dispositivos inteligentes residenciais são: Wifi, ZigBee, Bluetooth, SubGhz, 6LowPan, EnOcean e Wave2m.

69. Fonte: Elaboração própria

70. Fonte: Elaboração própria

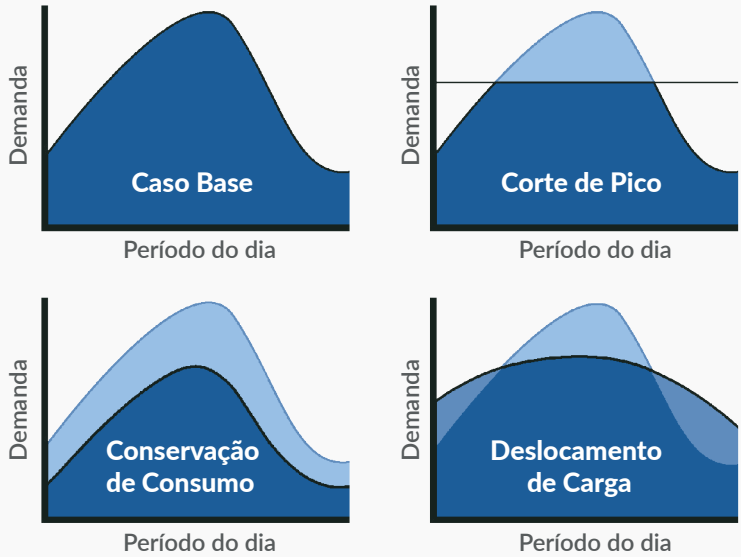


Futuro: Muitas empresas vêm investindo fortemente no intuito de disponibilizar ferramentas e recursos para casas inteligentes. Amazon, Apple e Google são exemplos e sinalizam as tendências deste mercado que irá se desenvolver muito em alguns anos com suas ferramentas e serviços de assistentes virtuais.

<https://www.tecmundo.com.br/produto/217957-smart-home-10-produtos-deixar-casa-inteligente.htm>

A eficiência energética também pode ser promovida através da aplicação de técnicas de Resposta à Demanda (RD) em uma REI. Neste caso, de acordo com a necessidade da rede, pode-se agir sobre cargas flexíveis no intuito de promover corte de pico de demanda (*Peak Shaving*), deslocamento de carga (*Load Shifting*) ou mesmo incentivar a conservação de energia. A Figura 67 mostra formas de promover eficiência energética por meio de RD.

Figura 67. Formas de promover Eficiência Energética através de REI com o conceito de RD⁷¹.



Saiba mais: Veja o Balanço Energético Nacional (BEN) da EPE para ter uma visão completa de quais setores e aplicações tem maior gasto energético no link abaixo:

<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>

71. Fonte: www.usaid.gov/energy/efficiency/basics



4.5. Modelos de Resposta à Demanda

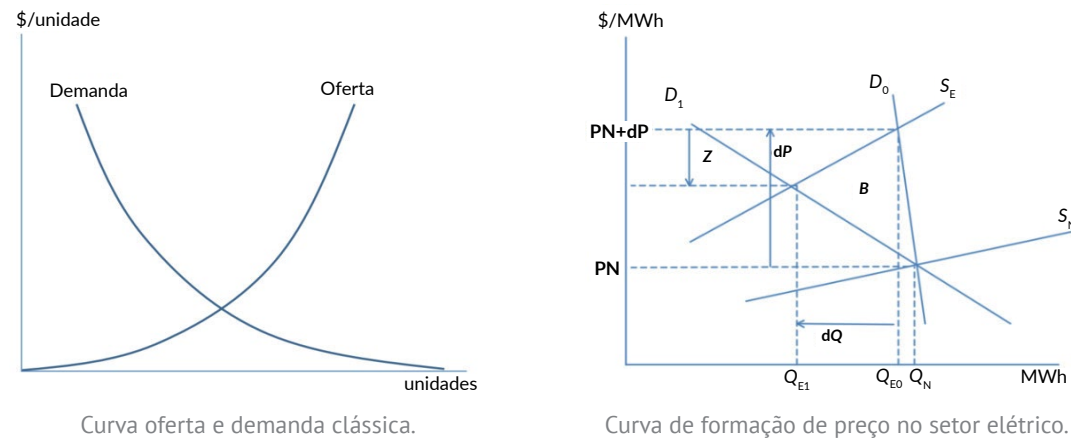
A base para se estipular Resposta à Demanda (RD) é a idealização de dois aspectos:

- Permitir que a flutuação do preço da eletricidade reflita em mudanças de consumo e na demanda de eletricidade;
- Encorajar os consumidores a deslocarem seu comportamento de alto uso de eletricidade para horários fora do pico de demanda da rede.

O fundamento matemático da formação de preços do setor elétrico segue o conceito de oferta e demanda. Considerando o mercado competitivo, a oferta é determinada pelo custo marginal, ou seja, o fornecedor continuará a produção de unidades adicionais enquanto o custo da unidade de produção for menor que o preço em que ele possa vender. A curva de demanda representa a quantidade de produto que um consumidor ideal compraria levando em consideração a utilidade do produto, bem como todas as alternativas possíveis que o consumidor poderia fazer para satisfazer a utilidade por outros meios.

A Figura 68 ilustra as curvas de oferta e demanda para formação de preço no setor elétrico. Especificamente para o setor elétrico, são utilizadas duas curvas para oferta (S_E : Condição Excesso e S_N : Condição Normal) e duas curvas para demanda (D_0 : Curva inelástica e D_1 : curva elástica).

Figura 68. Curvas de oferta e demanda e formação de preço.⁷²



A interpretação das curvas da Figura 68 (b) é baseada em suas intersecções. Com a intersecção da oferta normal com a demanda inelástica, forma-se o Preço Normal (PN). Se ocorrer um evento anormal, um novo ponto de equilíbrio de preço é formado com valor $PN+dP$. Se a demanda for de alguma forma mais elástica e a curva D_1 estivesse em vigor, então durante um evento anormal na rede o ponto de equilíbrio seria SE e D_1 , resultando em um preço abaixo de $PN + dP$ pelo valor definido como Z . Em termos de economia total de custos para o público, a redução em unidades de energia é $Q_{E0} - Q_{E1}$ e a economia total de custos é a área do triângulo B , assumindo que a suposição realizada de curvas lineares de oferta e demanda seja verdadeira.

A forma de aplicação prática dos modelos de RD é dividida em dois grupos representando o tipo de sinalização que é dado ao consumidor: um baseado em preços e outro em incentivos. O primeiro refere-se à mudança no perfil do uso da energia em consideração a flutuação do seu preço ao longo do dia. Já o segundo oferece incentivos financeiros para a redução da demanda em momentos críticos do sistema.

72. Fonte: (BUSH, 2014)



Futuro: Resposta à Demanda é um modelo muito aplicado em países da Europa e nos EUA. No Brasil, há projetos pilotos coordenados pelo ONS, o que pode ser um indicio da aceitação deste modelo nacionalmente. Assim, é possível visualizar um grande futuro para o conceito de Resposta à Demanda, principalmente ao atrelá-lo aos conceitos de plantas virtuais (VPP – *Virtual Power Plant*), células de rede e as próprias micro e mini geração distribuída.

<https://editorabrasilenergia.com.br/o-novo-programa-de-resposta-da-demanda-do-mme/>

A Figura 69 apresenta as principais formas de modelos para a resposta da demanda atualmente empregadas no mundo. Destaque é dado para o sistema TOU (*Time of Use*) utilizado no Brasil pelo sistema de tarifação de bandeira azul e branca.

Figura 69. Modelo de aplicação de RD⁷³.

RD baseada em preço	Time-of-Use (TOU)	Divide a tarifa em período de tempo durante o dia, oferecendo tarifas para cada período. Reflete o custo médio de geração e transmissão. Promove tarifação dinâmica. No Brasil, as tarifas azul e branca são tipos de TOU.
	Critical Peak Pricing (CPP)	Consumidores pagam preços mais altos durante dias em que o custo de energia está alto ou quando a rede elétrica é estressada severamente. Em troca, recebem descontos durante momentos de baixo estresse da rede.
	Peak Time Rebate (PTR)	Apresenta similaridade com o CPP, porém ao invés de cobrar uma tarifa mais alta, os consumidores são pagos para reduzirem seu consumo em relação a uma linha base.
	Real Time Pricing (RTP)	Os consumidores pagam a energia sob uma tarifa com valor mais próximo ao preço spot, retratando-se assim os custos reais de geração e transmissão em cada hora.
	Controle Direto de Carga:	O operador do sistema desliga ou reduz parcelas de carga do consumidor remotamente em momentos pré-definidos. Este controle é oferecido para o setor industrial, residencial e comercial.
RD baseada em incentivo	Interruptibilidade:	Reduz a carga integrada ao sistema de tarifação que proporciona desconto ou credito nas tarifas com a consequente diminuição de carga em momentos de contingência. Oferecido para grandes consumidores.
	Participação nos Mercados de Energia:	Consumidores fazem ofertas para a redução de carga no mercado de energia. É oferecido para grandes consumidores ou consumidores de um sistema de carga agregado.
	Programas de Emergência:	Realiza pagamentos de incentivos a consumidores para a redução da carga em momentos de emergência no sistema.
	Mercado de Serviços Auxiliares:	Oferta de redução de carga para operação como reserva ou regulação de frequência da rede. Se a oferta solicitada for aceita, o consumidor é remunerado pelo preço spot.
	Mercado de Capacidades:	Oferta de redução de carga em mercados de capacidade para substituir geração convencional por recursos alternativos.



Saiba mais: Aprenda ainda mais sobre RD no artigo sobre Gerenciamento pelo lado da demanda no link abaixo:

http://www.osestoreletrico.com.br/wp-content/uploads/documentos/fasciculos/ed-128_Fasciculo_Cap-IX-Geracao-distribuida.pdf

73. Fonte: Elaboração própria



4.6. Recapitulando

Neste capítulo, foram apresentadas as principais variáveis na qualidade da energia e como as REI afetam seus indicadores, o conceito de prosumidor e a forma em que REI pode prestar serviços ancilares à rede. Construções inteligentes, como casas e prédios, foram discutidas com enfoque em eficiência energética, chegando ao ponto de utilizar REI na Resposta à Demanda (RD) para se obter maior eficiência no setor elétrico. Por fim, os modelos atuais de RD e a formação de preços no mercado de energia elétrica foram apresentados.

Ao final desta(s) aula(s), o/a aluno/a deverá ser capaz de:

- Saber sobre a qualidade de sinal elétrico na rede e sua necessidade para os consumidores;
- Diferenciar consumidor, produtor e prosumidor;
- Entender a participação de prosumidores na resposta à preços e por incentivos;
- Avaliar os serviços ancilares para suporte à rede, entendendo como as REI podem contribuir para a qualidade da energia da rede;
- Refletir sobre modelos de negócios que envolvem REI para prestação de serviços ancilares;
- Ponderar a eficiência energética alcançada pela implantação de REI;
- Visualizar o papel de construções inteligentes no contexto de REI;
- Conhecer os principais modelos de resposta à demanda aplicados no Brasil e no mundo.

Atividades Sugeridas:

1. Pesquisar sobre os indicadores de qualidade de energia elétrica estabelecidos pela ANEEL. Busque conhecer principalmente sobre o DEC e FEC e entenda como estes e os demais indicadores afetam as concessionárias do setor elétrico e os consumidores da rede.
2. Buscar nas bases de dados da ANEEL e em uma rápida pesquisa na internet a diferença das bandeiras no sistema de tarifação nacional. Foque a pesquisa nas bandeiras azul e branca para que possa ser visualizado como a Resposta à Demanda é ou pode ser aplicada no Brasil.
3. Avaliar o relatório de Balanço Energético Nacional (BEN) disponibilizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) nos últimos anos, analisando os setores de maior crescimento de consumo e seus impactos com a pandemia de COVID-19 nos anos de 2020 e 2021.
4. Procurar visualizar em sua casa, escritório ou ambiente de trabalho onde a eficiência energética poderia ser aplicada e como as REI, principalmente as GDs e sistemas de armazenamento, colaborariam com a eficiência energética local.
5. Refletir sobre a formação de preço no setor elétrico, pesquisando sobre as taxações e itens que compõem a conta de energia. Comece entendendo o significado do TUST e TUSD, indo além para se conscientizar sobre a economia que as REI poderão agregar na fatura do consumidor da rede elétrica.

Algumas fontes interessantes:

A elaboração deste capítulo se baseou em referências na literatura, cujas fontes estão citadas a seguir:

- J. Momoh, *Smart Grid: Fundamentals of Design and analysis*. 2012. (Momoh, 2012)
- T. Sato; D. Kammen; B. Duan; M Macuha; Z. Zhou; J. Wu; M. Tariq; S. Asfaw. *Smart Grid Standards: Specification, Requeriments, and technologies*. 2015. (Sato, et al., 2015)
- Q. Huang, S. Jing, J. Yi, and W. Zhen. *Innovative Testing and Measurement Solutions for Smart Grid*. 2014. (Q. Huang, 2014.)
- WANG, Chengshan et al. (Ed.). *Smart electricity distribution networks*. CRC Press, 2017 (Wang, 2017)
- BUSH, Stephen F. *Smart grid: Communication-enabled intelligence for the electric power grid*. John wiley & sons, 2014. (BUSH, 2014)
- Rego, Erik; Trinkenreih, Jorge; Soares, Jeferson. **NOTA TÉCNICA: Resposta da Demanda: Conceitos, Aspectos Regulatórios e Planejamento Energético**. EPE 2019. (Rego, Trinkenreih, & Soares, 2019)
- <https://tarifamoderna.com.br/wp-content/uploads/2020/12/caderno-4-projeto-tarifa-moderna.pdf>

Avaliação:

1. Descreva sua opinião sobre o principal ou mais motivador incentivo atualmente existente para se tornar um prosumidor e quais são suas definições em relação à tarifação de energia. Compare sua resposta com a apresentada no final deste ebook.
2. Ao ligar uma unidade de geração distribuída na rede, deve-se obedecer a vários requisitos para que a qualidade de energia da rede básica seja garantida. Dentre os principais itens de atenção em relação a qualidade do suprimento de energia, destaca-se a qualidade do sinal de tensão em corrente. Qual fenômeno dentre os apresentados neste capítulo representa maior probabilidade de ocorrer na rede devido ao chaveamento de uma GD trifásica na rede?



Capítulo 5: Regulação e Modelos de Negócios



Nota para o/a professor/a – Tendo em vista que a regulação envolvendo GDs está em constante adaptação, este capítulo objetiva apresentar para os/as alunos/as uma compreensão básica da regulação até o dia em que este ebook foi escrito. Ademais, visa transmitir aos/às alunos/as ideias base de modelos de negócios envolvendo GDs.

5.1. Histórico da Regulação da Geração Distribuída

A Resolução Normativa ANEEL nº 482 de 2012 é considerada o momento histórico mais relevante para o desenvolvimento de um sistema elétrico mais limpo e sustentável. Esta resolução trata sobre o acesso da Mini e Microgeração (MMGD), estipulando regras para acesso e conexão destes serviços na rede. Esta resolução vem passando por revisões regulatórias periódicas, que culminou na promulgação de uma lei específica para GDs em janeiro de 2022, a lei nº 14.300.

O histórico da regulação da GD no Brasil foi iniciado em 1995 com leis de liberação de concessão para implementação de GD. A Figura 70 resume os principais itens regulatórios que trouxeram a GD no patamar atual.

Figura 70. Histórico da regulação sobre GD no Brasil até 2015⁷⁴.

1995	<ul style="list-style-type: none">Promulgação da Lei de Concessões, objetivando a implementação de uma nova formatação institucional e regulatória, incluindo aspectos de GD
2004	<ul style="list-style-type: none">Lei nº10.848 e Decreto nº5.263, iniciando a regulação da GDDecreto nº5.163 PROINFRA
2008	<ul style="list-style-type: none">Projeto Piloto e pioneiro da COPEL de GD e saneamento ambientalFormação de Grupo de Trabalho pelo MME de GD com sistemas fotovoltaicos
2010	<ul style="list-style-type: none">Portaria ANEEL nº1.447 com dizeres sobre a diminuição de obstáculos para o acesso de pequenas centrais geradoras aos sistemas de distribuição.Solicitação do instituto IDEAL para ampliar a redução TUSD e TUST de 50% para 100% sob fontes de energia solarSolicitação da Ventos do Brasil Energia para instalação de aerogeradores e utilização do conceito de Net MeteringNota Técnica nº0043/2010 SRD/ANEEL (Superintendência de Regulação dos Serviços de Distribuição/ANEEL)Consulta Pública nº15/2010
2011	<ul style="list-style-type: none">Nota Técnica nº004/2011 com 577 contribuições de agentes para análise regulatória das GDsMemorando nº0060/2011 - SRD ANEEL relativo ao Net MeteringNota Técnica nº25/2011 assinada pela áreas de superintendência da ANEEL.Audiência Pública nº0042/2011
2012	<ul style="list-style-type: none">Resolução Normativa nº481, de 17 de Abril de 2012 - Desconto modificado TUST e TUSD para energia fotovoltaicaResolução Normativa nº482, de 17 de Abril de 2012 - Acesso de mini e microgeração
2015	<ul style="list-style-type: none">Resolução 687/2015 - Adaptação da Resolução 482/2012

74. Fonte: Adaptado de (Martins, 2020)

Para a revisão no biênio 2018 e 2019, objetivando a continuidade do desenvolvimento sustentável da GD, elaborou-se a Nota Técnica nº 78/2019 para a coleta e análise de contribuições para micro e minigeração distribuída, o Relatório de Análise de Impacto Regulatório AIR nº 3/2019 promovendo aprimoramento regulatório dos ativos da rede e a Consulta Pública CP 25/2019 para ouvir agentes setoriais para a elaboração do texto modificador da Resolução nº 482/2012, Resolução nº 414/2010 e seção 3.7 do Módulo 3 PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional). Em 2021, a reformulação dos incentivos à GD entrou em votação no senado no intuito de atualizar e regulamentar as diretrizes da Resolução nº 482/2012.

Em janeiro de 2022, a presidência da república do Brasil sancionou a lei nº 14.300 que trata sobre a geração distribuída no país. O foco da lei é dado para o sistema de compensação da energia elétrica gerada em unidades consumidoras e não revoga a Resolução nº 482/2012. A Figura 71 apresenta um resumo comparativo entre a resolução e a lei.

Figura 71. Resumo comparativo da resolução 482 e da lei 14300⁷⁵.

Tema	Como era a REN 482/2012	Lei 14.300/2022
Direito adquirido	Não existia garantia – competência da ANEEL para alterar a Resolução 482/12	Para projetos protocolados até 12 meses após a publicação da Lei fica mantido o regime atual até 31/12/2045
Valoração dos Créditos	Compensação de 100% das componentes tarifárias	Algumas componentes deixarão de ser compensadas de forma gradual e escalonada de acordo com a regra de transição prevista (6 anos – utilização da CDE). A partir de 2029 novo entrada com "regra nova"
Compensação das componentes tarifárias	A REN 482 poderia ser alterada a qualquer momento pela ANEEL – cenário "Alternativa 5" (compensação apenas TE – Energia)	Encontro de "contas" a ser feito em até 18 meses da publicação da Lei, a partir de diretrizes do CNPE (6 meses). A ANEEL será obrigada a considerar o cálculo do SCEE de todos os benefícios ao sistema da GD
Demanda das Usinas	TUSD C	TUSD G (até 70% menor que a TUSD C)
Custo de Disponibilidade	Cobrado em duplicidade na prática	Deixará de ser cobrado em duplicidade
Geração Compartilhada	Via Consórcio (PJ) ou Cooperativa (PF)	Flexibilização. Via Consórcio, Cooperativa, Associação e Condomínio civil (voluntário ou edilício)
Potência Máxima	Em regra até 5 MW para todas as fontes de energia	Até 3 MW para solar (não despacháveis) e até 5 MW para as demais fontes (despacháveis)
Titularidade	Unificar titularidade era uma prática de mercado sem respaldo legal/regulatório	Previsão legal expressa para unificação (pode ser solução para ICMS na geração compartilhada)
Distribuição de Créditos	Prazo de 60 dias para análise da Distribuidora	Prazo caiu para 30 dias
Troca de Titularidade	A qualquer momento, a partir da assinatura do CUSD e do CCER	(i) a transferência de titularidade dos projetos já conectados não implicará na perda dos benefícios já obtidos anteriormente; (ii) será permitida a transferência de titularidade ou transferência de controle, até a solicitação de vistoria do ponto de conexão para a distribuidora
Garantia de fiel cumprimento (caução)	Não há necessidade	2.5% do investimento potência entre 500kW e 1.000 kW e 5% para sistemas maiores que 1.000 kW. Projetos superiores a 500kW devem apresentar garantia em até 90 dias da publicação da lei. Não se aplica à geração compartilhada, EMUC e para os casos em que o CUSD seja firmado em 90 dias da lei
B (optante)	Entendimento atual é de que consumidor não poderia ser B optante com usina minigeração	Permitido B optante com usina junto à carga até 112,5 kW
Prazo para cadastro/porcentagem	60 dias a partir do envio dos dados	30 dias a partir do envio dos dados
Programa para GD em baixa renda	Não existia vedação, mas a ANEEL não recomendava a prática	Fica vedada expressamente comercialização de pareceres de acesso
Comercialização de Energia	Vedado	Possibilidade de comercialização dos excedentes com as distribuidoras por meio de chamada pública a ser regulamentada pela ANEEL
Atributos Ambientais	Atualmente não são valorados	Serão valorados e remunerados a partir de março de 2022
Prazo para cumprimento das disposições	Sem previsão	Distribuidoras deverão se adequar e operacionalizar as alterações em até 180 (cento e oitenta) dias da data de publicação desta Lei

75. Fonte: <https://canalsolar.com.br/lei-14-300-principais-mudancas-do-marco-legal-da-gd/>



Saiba mais: Veja a lei nº 14.300 na íntegra através do link a seguir:
<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.300-de-6-de-janeiro-de-2022-372467821>



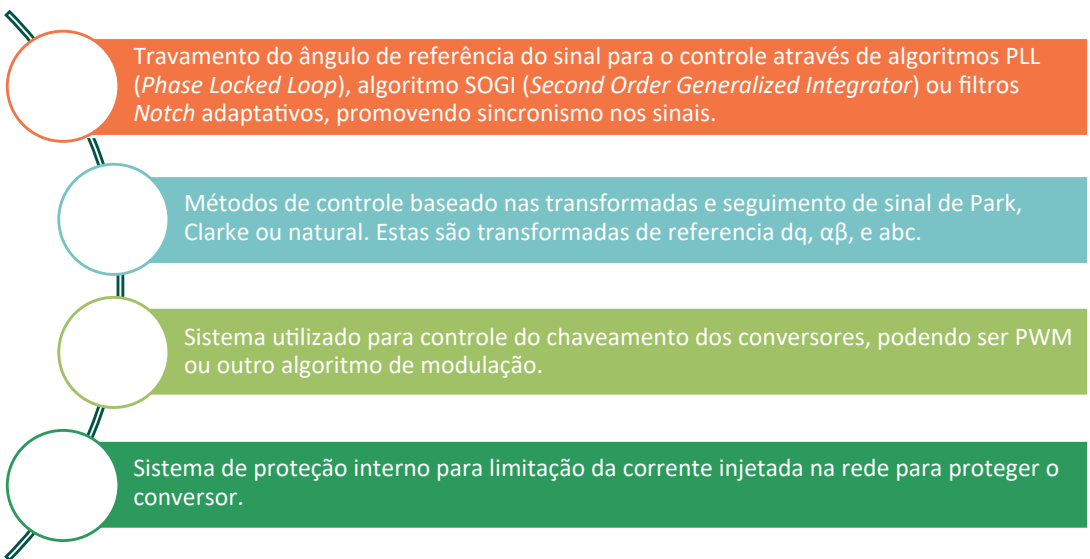
Futuro: Com a lei nº 14.300, oportunidades a respeito de micro e mini geração se tornaram mais claras, abrindo possibilidade para novos modelos de negócios. Neste sentido, são previstos avanços significativos em microrredes, plantas virtuais e REIs em direção às Smart Cities. Um dos principais avanços imediatamente esperado trata sobre a tarifação e compensação de proprietários de GD que poderão ter voz ativa mais intensa no setor elétrico.

<https://www.mayerbrown.com/-/media/files/perspectives-events/publications/2022/01/informativo-do-setor-eletrico--lei-n-14300-de-2022--marco-legal-da-gd.pdf>

5.2. Avaliação Técnica e Econômica

Quando se fala em aspectos técnicos, deve-se considerar inicialmente as questões de “ilhamento” intencional e adequação para manter os níveis de qualidade no fornecimento de energia elétrica. Em relação aos conversores eletrônicos, os principais aspectos técnicos estão relacionados primeiramente à forma de controle de suas chaves de estado sólido e, secundariamente, aos efeitos que este chaveamento controlado causa ao se integrar com a rede elétrica. A Figura 72 apresenta as principais possibilidades técnicas encontradas para o desenvolvimento de conversores que afetam os projetos de GD.

Figura 72. Variáveis em desenvolvimento de conversores eletrônicos aplicados à GD⁷⁶.



76. Fonte: Adaptado de (João, 2019)

Cada ponto relacionado ao controle afeta a resposta da GD mediante transitórios na rede, que podem ser causados por uma falta na rede elétrica, falta na própria GD e por desconexão ou conexão de GDs ao longo da rede. Além disto, o desenvolvimento dos filtros de sinais dos conversores também são pontos que necessitam de avaliações prévias para os projetos de conversores eletrônicos que irão conectar as GDs a rede, devido a diferentes respostas para controles com filtros passivos do tipo RL, RLC e LC.

No Brasil, o mantimento da geração pela GD mediante uma falta não é permitido, sendo necessário o desligamento das GDs sobre esta situação. Contudo, para tornar um ilhamento possível é necessário que haja um disjuntor motorizado de acoplamento ou um sistema eletrônico de acoplamento das redes no ponto de conexão. Ademais, um sistema de controle de supervisão de sincronismo deve existir para a reconexão da GD. Também se faz necessária a existência de um relé que evite fluxo reverso de energia em momentos em que a GD estiver ilhada de forma intencional.



Saiba mais: O ilhamento intencional de GD na rede elétrica brasileira é abordado no documento PRODIST da ANEEL. Mergulhe neste documento e veja as regras estabelecidas atualmente:

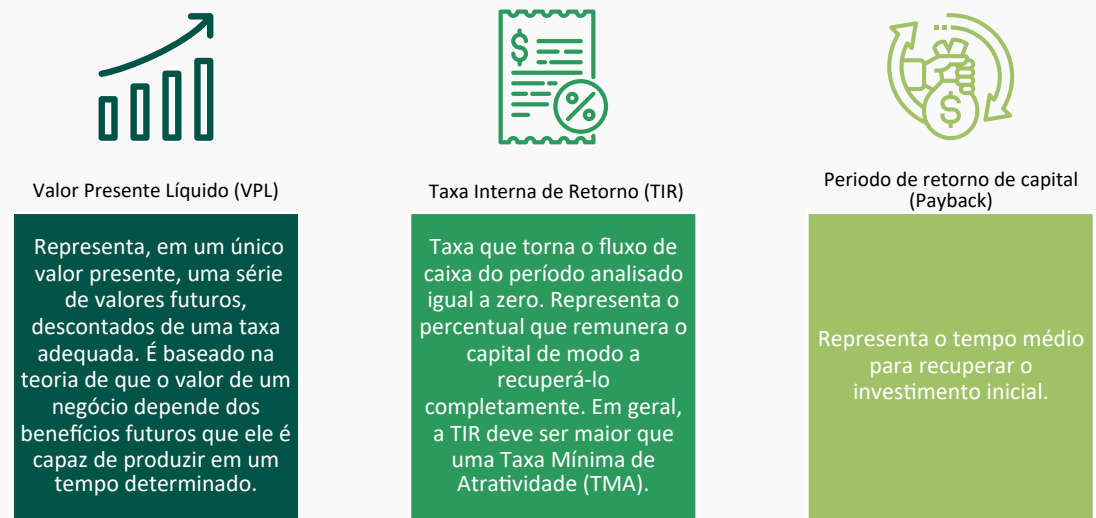
PRODIST Módulo 8: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_7.pdf

PRODIST Módulo 3: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_2.pdf

PRODIST Módulo 4: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_3.pdf

Quando se fala em aspectos econômicos e financeiros, é necessário realizar o balanço entre custos e benefícios de modo que as oportunidades de negócio sejam atrativas. Neste sentido, a avaliação econômica de um sistema energético deve levar em conta os custos associados à aplicação e às especificidades de operação. Os principais indicadores para se realizar uma análise financeira destes sistemas são apresentados na Figura 73.

Figura 73. Principais indicadores financeiros em projetos⁷⁷.



77. Fonte: Elaboração própria

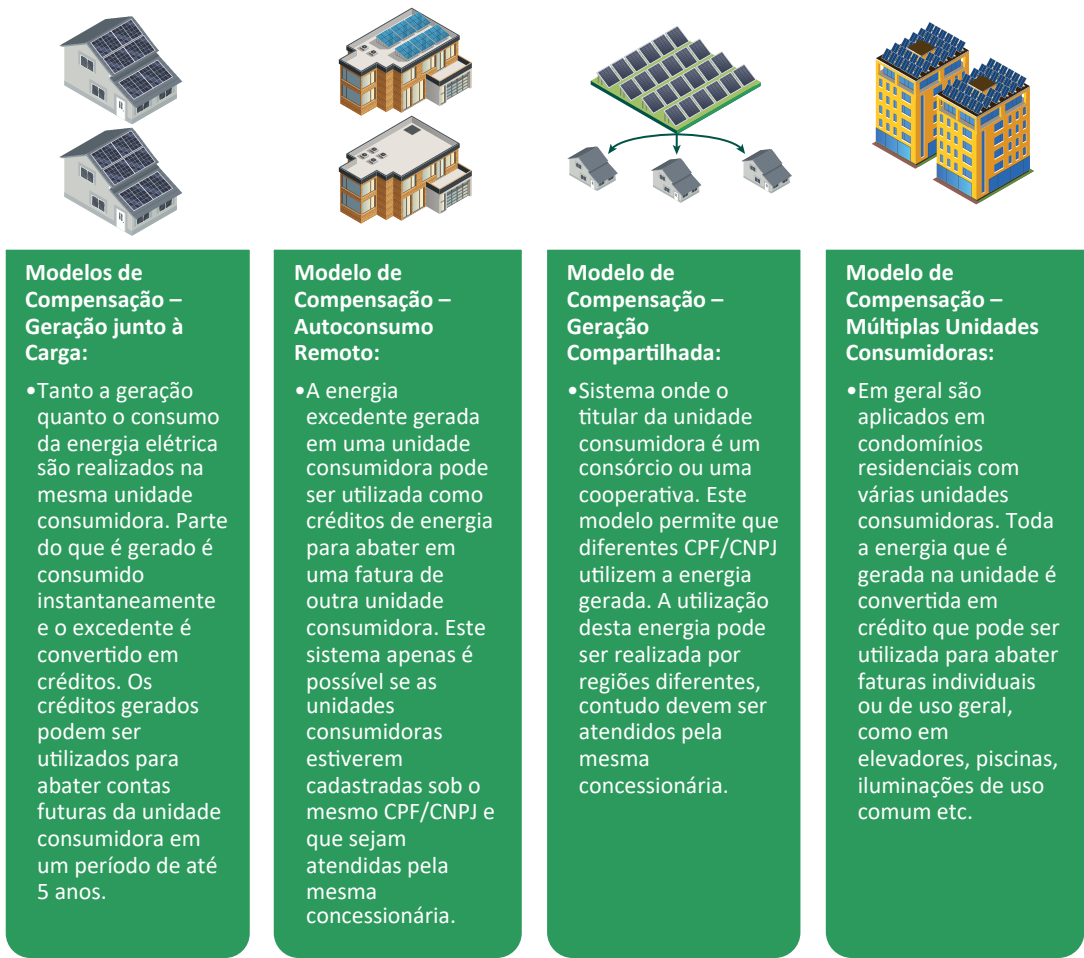


No contexto de sistemas de geração de energia, o indicador LCOE (*Levelised Cost of Energy*) é utilizado para medição de retorno financeiro. Este indicador representa o custo de produção de cada unidade de energia produzida pelo sistema analisado e permite ainda comparar os custos associados para diferentes sistemas energéticos. Mediante um valor LCOE menor do que a tarifa de energia, a análise realizada indica que o sistema passa a ser mais barato que a energia fornecida pela distribuidora. Este conceito é geralmente utilizado no contexto de autoprodução de energia. No contexto de sistemas híbridos, ou seja, geração com sistemas de armazenamento, o indicador LCOS (*Levelised Cost of Storage*) pode ser empregado. Este indicador permite a comparação de custo entre diferentes tecnologias de armazenamento.

5.3. Modelos de Negócios

Com a variedade de tecnologias e, principalmente, com a popularização dos sistemas de geração, vários modelos de negócios foram desenvolvidos. Alguns destes modelos que mais se destacam para aplicação comum são apresentados na Figura 74.

Figura 74. Modelos de negócios utilizando GD.⁷⁸

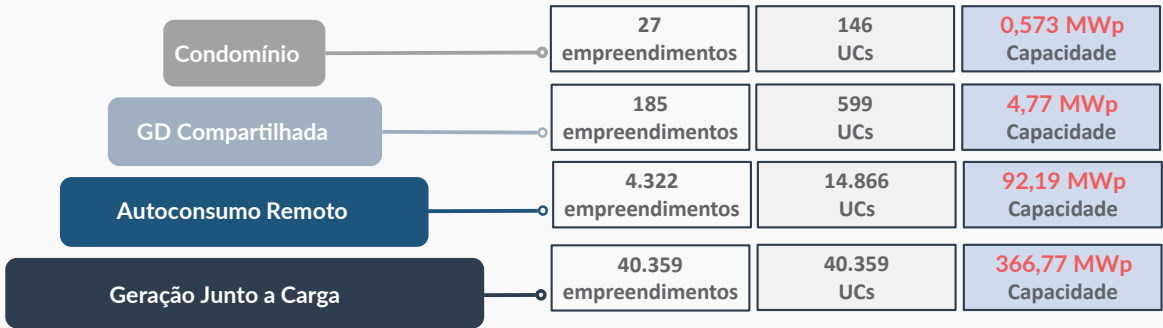


78. Fonte: Adaptado de <https://www.sebrae.com.br/Sebrae/Portal%20Sebrae/UFs/PI/Anexos/greener.pdf>



A Figura 75 apresenta a situação no Brasil a respeito dos modelos de negócios focados em compensação com dados da ANEEL do ano de 2020. Os modelos de negócio baseados em *Leasing* (arrendamento mercantil) são vistos em diversas empresas norte-americanas, tornando os Estados Unidos referência neste modelo.

Figura 75. Situação brasileira, segundo ANEEL 2020, de implantação de modelos de compensação⁷⁹



Modelos de negócios baseados em sistemas vêm ganhando viabilidade no setor elétrico. Exemplos destes sistemas são as mini e microrredes, células, plantas virtuais, além dos conceitos de resposta à demanda e as próprias redes inteligentes.

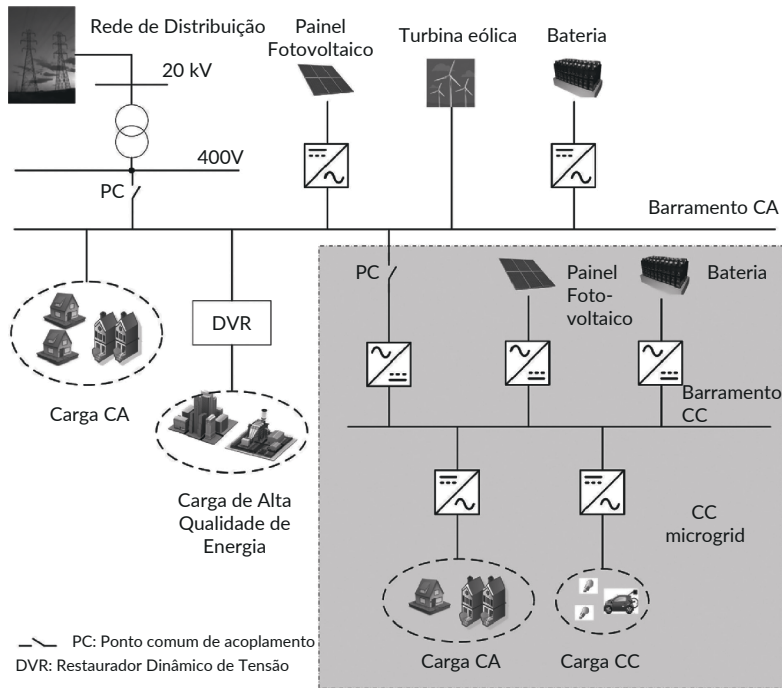
As microrredes, assim como suas derivações de mini e nanorredes, são consideradas como um sistema de conglomerados de geração e consumo local. Nesta situação, a geração é produzida no nível de distribuição (baixa ou média tensão) pelas próprias unidades consumidoras. Esta geração é geralmente produzida por fonte de recursos renováveis, como solar e eólica. Contudo, é um sistema que exige suporte para se manter ativo mesmo se desconectado da rede. A Figura 76 apre-

79. Fonte: <https://www.sebrae.com.br/Sebrae/Portal%20Sebrae/UFs/PI/Anexos/greener.pdf>



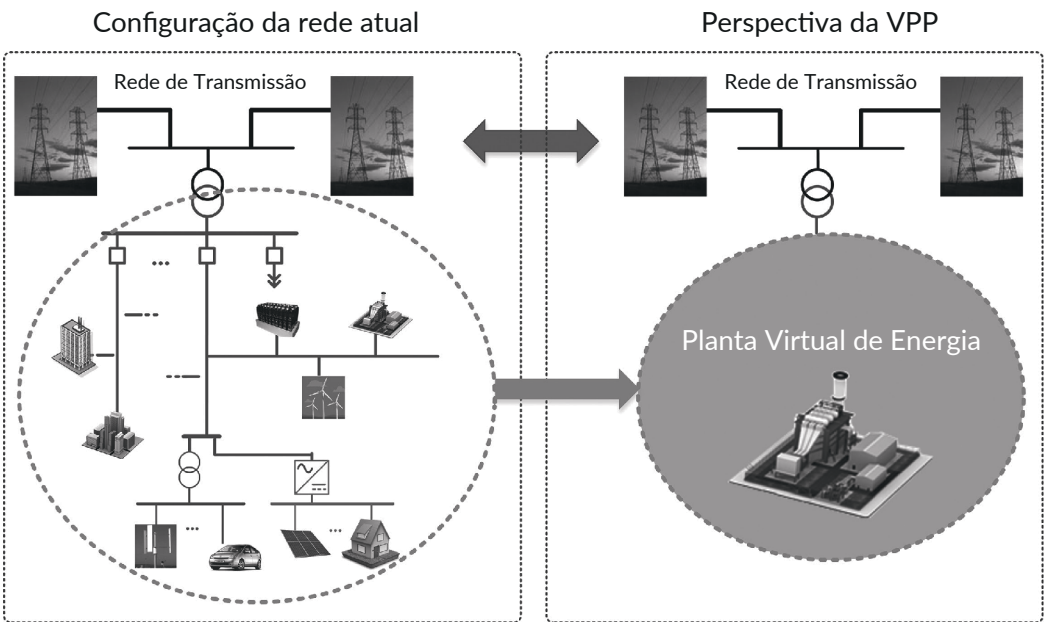
seja, que é constituída de uma porção com barramento CC e outra com barramento CA.

Figura 76. Ilustração de um sistema de microrrede híbrida⁸⁰



O modelo de negócios baseado em plantas virtuais de geração, denominadas na literatura de *Virtual Power Plant* (VPP), é um conjunto de REDs que é operado coletivamente por uma entidade de controle central. A Figura 77 ilustra a ideia de uma VPP.

Figura 77. Características de REDs em uma VPP⁸¹



80. Fonte: (Wang, 2017)

81. Fonte: (Wang, 2017)

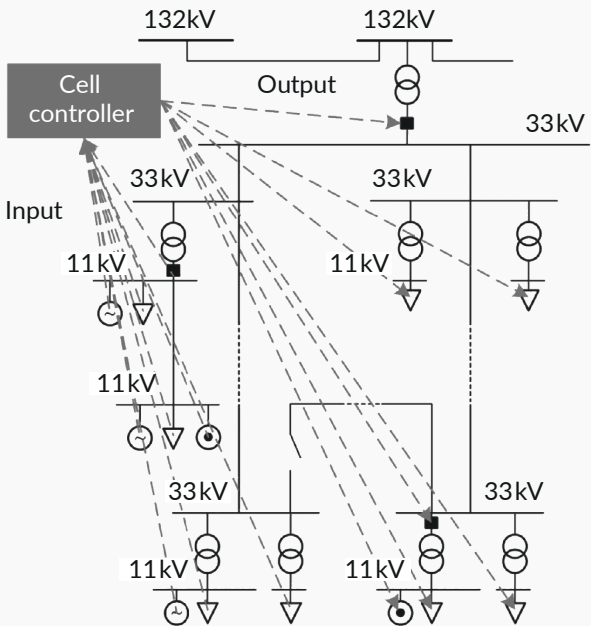
Ao agregar os REDs em um portfólio, estes tornam-se visíveis para o operador do sistema e podem ser controlados de maneira ativa. Uma VPP é organizada para ter características técnicas (TVPP) e comerciais (CVPP) como uma unidade central de geração. Embora as microrredes e a VPP pareçam ter conceitos semelhantes, há uma série de diferenças, como as descritas na Figura 78.

Figura 78. Comparativo entre Microrredes e Plantas Virtuais (VPP)⁸²

	MICRORREDES	PLANTAS VIRTUAIS - VPP
LOCALIDADE	REDs estão localizados na mesma rede de distribuição local e visam atender principalmente à demanda local.	REDs não estão necessariamente localizados na mesma rede local e são coordenados em uma ampla área geográfica.
TAMANHO	Capacidade instalada de microrredes é normalmente relativamente pequena (de poucos kW a alguns MW)	Classificação de potência de uma VPP pode ser muito maior que alguns MW
INTERESSE	Focado na satisfação do consumo local	Tratamento do consumo como um recurso flexível que participa da comercialização de energia agregada via remuneração a Resposta à Demanda.

Modelos baseados em sistemas de células são usados para definir uma área ampla de rede na qual um conjunto de REDs pode ser controlado em resposta a uma série de objetivos. Este sistema pode ainda ser considerado como uma entidade que consiste em uma série de microrredes. A Figura 79 apresenta a estrutura de um modelo de um sistema baseado em células.

Figura 79. Estrutura de um sistema em células⁸³



82. Fonte: Elaboração própria

83. Fonte: (Wang, 2017)



O objetivo dos sistemas em células é baseado em dois pilares:

1. **Em operação normal**, as células gerenciam a rede de maneira otimizada, incluindo os REDs e as demandas ativas como um todo e conseguem um uso mais eficaz dos ativos da rede de distribuição;
2. **Em uma situação de contingência estressada**, as células fornecem possibilidades adicionais de operação da rede, como a transferência emergencial da área das células para operação ilhada com preservação do fornecimento de energia para o maior número possível de consumidores.

Outros modelos de negócios baseados em sistemas podem ser apresentados, como o desenvolvimento de casas inteligentes (*Smart Homes*), eletromobilidade ou a própria implantação de Redes Elétricas Inteligentes (REI). Com a junção destes modelos, chega-se à formação de um modelo de cidades inteligentes (*Smart Cities*).



Saiba mais: Nos links abaixo, você encontra reportagens sobre a aplicação de VPP no mundo:

<https://www.edie.net/news/8/Tesla-launches-UK-based-virtual-power-plant-project/>

<https://www.toshiba-energy.com/en/renewable-energy/product/vpp.htm>

<https://eepower.com/new-industry-products/toshiba-launches-virtual-power-plant-solution-using-ai-and-iot/>

<https://asia.nikkei.com/Spotlight/Environment/Toshiba-aims-to-launch-virtual-power-plants-across-Japan-in-2022>

<https://www.greentechmedia.com/articles/read/10-victories-for-virtual-power-plants-in-2020>

5.4. Recapitulando

Neste capítulo, foi apresentado o caminho histórico da regulamentação acerca da geração distribuída no Brasil. Ponderou-se ainda os principais pontos técnicos na implantação de recursos distribuídos na rede e aspectos para cálculo de viabilidade financeira. O capítulo se fecha com a apresentação dos modelos de negócios atualmente existentes no mercado e sua representatividade no Brasil e no mundo.

Ao final desta(s) aula(s), o/a aluno/a deverá ser capaz de:

- Visualizar a trilha regulatória sobre Geração Distribuída que influi nos projetos de Redes Elétricas Inteligentes;
- Avaliar tecnicamente projetos com aplicação de interfaces de eletrônica de potência na rede elétrica básica;
- Entender os principais indicadores financeiros em projetos envolvendo a aplicação de conversores eletrônicos;
- Visualizar os modelos de negócios com GD no Brasil e no Mundo baseado em compensação e outros;
- Visualizar os modelos de negócios baseado em sistemas.

Atividades Sugeridas:

1. Para refinar o conhecimento sobre a trilha regulatória relativa às REI, pesquise sobre os marcos regulatórios da GD citados neste capítulo. Indo além, busque se aprofundar sobre a Lei nº 14.300.

Algumas fontes interessantes:

A elaboração deste capítulo se baseou em referências na literatura, cujas fontes estão citadas a seguir:

- M. A. I. Martins. **Implantação de Microrredes Inteligentes: Contribuição aos Aspectos Regulatórios**. Tese - (2020). (Martins, 2020)
- WANG, Chengshan et al. (Ed.). *Smart electricity distribution networks*. CRC Press, 2017. (Wang, 2017)
- Castro, Nivalde; Dantas Guilherme. **Experiências Internacionais em Geração Distribuída: Motivações Impactos e Ajustes**. Publit, 2018. (Castro & Guilherme., 2018)
- Fernandes, Rubiara. Notas de Aula – **Desenvolvimento e Implantação de Microrredes Inteligentes – Estratégias de Controle para Integração de Sistemas e Gerenciamento de Energia**. IFSC 2013 (Fernandes, 2013)
- www.Greener.com.br

Avaliação:

A regulação pertinente à geração distribuída no Brasil sofre alterações desde 1995. Desde esta época, pode-se dizer que a Resolução nº 482/2012 e posteriormente a lei nº 14.300 de 2022 foram dois dos marcos mais significativos. Disserte sobre as contribuições desta resolução para os empreendimentos de geração distribuída no Brasil.



Casos de Sucesso

Caso 1: Geração Compartilhada – Fazenda Solar Órigo.

Local: Brasil

Descrição: Este é um projeto de GD enquadrado como um projeto de Geração Compartilhada, no qual o titular da unidade consumidora é um/a consórcio/cooperativa, permitindo que diferentes CPF/CNPJ usufruam da geração de energia (eles podem estar em regiões diferentes, porém devem ser atendidos pela mesma concessionária).

O caso da Fazenda Solar da empresa Órigo, possui as seguintes características:

- Localização: Minas Gerais
- Área ocupada: 2,5 hectares
- N° clientes atendidos pela geração compartilhada: 63
- Potência instalada: 1 MW
- Geração média: 170 MWh/mês

Figura 80 – Fazenda Solar em modelo de Geração Compartilhada⁸⁴.



Benefícios:

1. Economia com energia para os clientes participantes da geração compartilhada.
2. Oportunidade para empresas e prestadores de serviços de GD da região.
3. Desenvolvimento regional em geração fotovoltaica.



Saiba mais: Veja outros casos de aplicação e modelos de GD neste link:

<https://www.sebrae.com.br/Sebrae/Portal%20Sebrae/UFs/PI/Anexos/greener.pdf>

84. Fonte: <https://origoenergia.com.br>

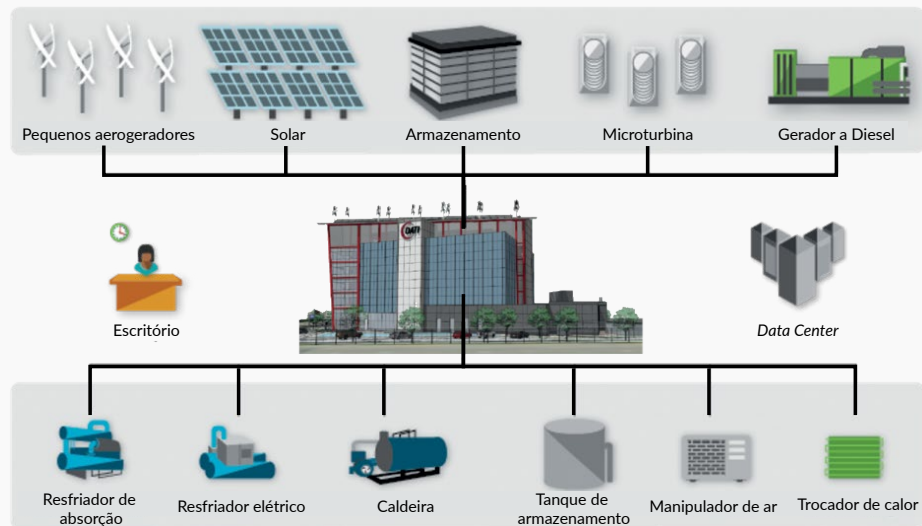
Caso 2: Microrrede - OATI Microgrid Technology Center – Xcel Energy

Local: Estados Unidos

Descrição: Aplicação de microrrede em um *data center*, com objetivo de garantir a confiabilidade e a segurança energética, bem como aumento de eficiência e redução de custos de operação. Trata-se de uma microrrede de 2,4 MW, composta por:

- 24 kW de geração eólica com eixo vertical.
- 600 kW de geração com microturbinas a gás natural (gerando calor e refrigeração).
- 125 kW / 231 kWh de armazenamento de energia em baterias de Li-íon.
- 1500 kW de geração backup a diesel.
- Controlador de microrredes

Figura 81 – Esquema da microrrede OATI para Data Center⁸⁵.



Benefícios:

1. Garantia de qualidade e confiabilidade do fornecimento de energia.
2. Segurança energética na operação do *Data Center*.
3. Otimização energética a partir do controlador de microrredes.
4. Economia de energia.
5. Fonte de receita adicional com prestação de serviço da microrrede para a rede elétrica local.



Saiba mais: Veja sobre o mercado de microrredes neste link:

<https://microrredes.org.br/static/media/article01.f36405e8.pdf>

85. Fonte: <https://www.21stcentech.com/minneapolis-microgrid-installation/>

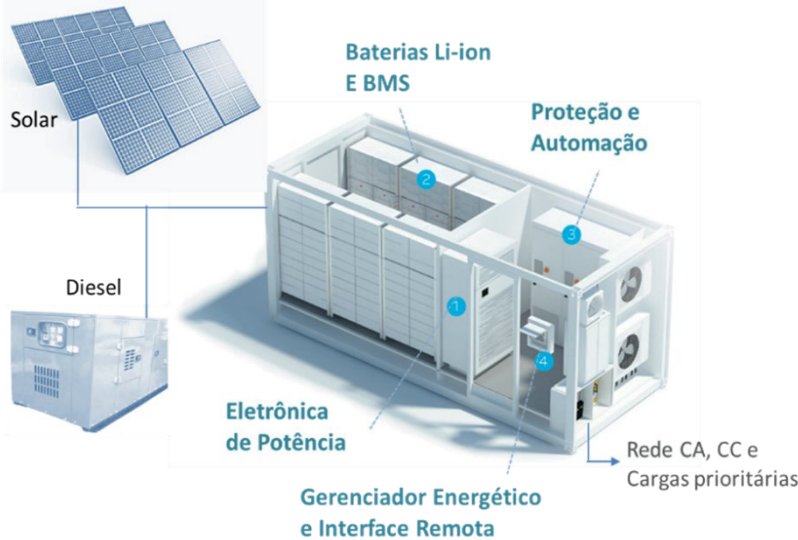


Caso 3: Microrrede – P&D COPEL.

Local: Brasil

Descrição: Este é um projeto de P&D da Companhia Paraense de Energia (COPEL) em parceria com a Fundação CERTI, que tem como objetivo desenvolver e implantar uma microrrede para fornecimento de energia em áreas remotas. Neste projeto a microrrede está sendo instalada em uma Ilha, na Baía do Paranaguá (PR), com previsão de entrada em operação em fevereiro de 2022. Esta microrrede tem como componente central um sistema de armazenamento construído em um contêiner, baseado em baterias de íon-de-lítio com capacidade de 100k kW/ 120 kWh. Além disso, a microrrede conta também com geração por painéis fotovoltaicos, gerador diesel de backup, equipamento de controle e proteção. Um item de destaque no projeto é o sistema de gerenciamento energético embarcado na solução, sendo o componente que confere inteligência à microrrede responsável pela otimização dos recursos energéticos e gestão da demanda.

Figura 82 – Ilustração da microrrede e componentes utilizados no projeto⁸⁶.



Benefícios:

1. Substituição de geração a diesel por geração e armazenamento de energia renovável.
2. Solução modular integrada em um contêiner com baterias e controle da microrrede.
3. Economia com logística de transporte de diesel para a ilha.
4. Segurança e qualidade de energia.



Saiba mais: Para conhecer mais sobre RED em sistemas isolados, acesse o link:

<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/distribuicao/sistemas-isolados-e-com-fontes-intermitentes>

86. Fonte: Elaboração própria

Caso 4: Usina Fotovoltaica Flutuante.

Local: Brasil

Descrição: Uma aplicação da geração fotovoltaica com bastante potencial no Brasil é a instalação dos painéis sobre a superfície d'água, em reservatórios de usinas hidrelétricas. A aplicação possui como vantagens, por exemplo, resfriamento natural dos painéis fotovoltaicos e consequentemente aumento da eficiência, diminuição da evaporação do reservatório devido a cobertura com os módulos fotovoltaicos, uso de área sem disputa de solo para outros usos, entre outras. Neste caso, apresenta-se um projeto de usina fotovoltaica flutuante instalado na Usina Hidrelétrica de Sobradinho. A plataforma flutuante tem 7,3 mil módulos de placas solares, área total de 10 mil m² e capacidade de 1 MWp, com planos de expansão para os próximos anos.

Figura 83 – Usina Fotovoltaica Flutuante na Usina Hidrelétrica de Sobradinho⁸⁷



Benefícios:

1. Aproveitamento de área para geração de energia sem disputa de solo.
2. Aumento da eficiência da produção fotovoltaica pelo resfriamento natural dos painéis.
3. Integração complementar com a geração da hidrelétrica.
4. Possibilidade de uso de materiais recicláveis para os flutuadores.



Saiba mais: Para conhecer mais sobre as usinas fotovoltaicas flutuantes, acesse o relatório no link:

<https://www.teriin.org/sites/default/files/2020-01/floating-solar-PV-report.pdf>

87. Fonte: <https://www.temsustentavel.com.br/usina-solar-flutuante/>



Caso 5: Urban Futurability – Enel SP.

Local: Brasil

Descrição: *Urban Futurability* é uma iniciativa da Enel, em parceria com a Fundação CERTI, no âmbito de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) ANEEL. É considerado pela empresa como o seu maior caso de inovação a nível global. Trata-se de um programa de inovação e aplicação de soluções para modernização do setor elétrico, abrangendo um grande número de tecnologias, metodologias, serviços e transversalidades ligadas às Redes Elétricas Inteligentes. Dentre os temas envolvidos no projeto estão proteção adaptativa inteligente na rede de distribuição, tecnologias de realidade aumentada e virtual para treinamento e operação de redes, integração com recursos energéticos distribuídos, *smart metering*, inteligência de dados etc. O projeto inclui a implantação de um grande laboratório vivo, abrangendo o bairro da Vila Olímpia na cidade de São Paulo.

<https://www.enel.com.br/pt-saopaulo/Redes-do-Futuro/sp-do-futuro/vilaolimpia1.html>

Figura 84. Ilustração e informações gerais a respeito do caso *Urban Futurability*⁸⁸.



Benefícios:

1. Aumento da eficiência e resiliência da rede elétrica.
2. Diminuição de custos para a implantação e operação de redes de distribuição.
3. Viabilização de novos modelos de negócios para as empresas de energia e parceiros.
4. Capacitação de equipes da empresa de energia e de fornecedores em tecnologias de REI.
5. Transversalidades e integrações com outras utilidades (telecomunicações, água, gás, outras).



Saiba mais: Veja outras aplicações de REI no contexto de Cidades Inteligentes neste link:

https://www.researchgate.net/publication/337486897_A_Widespread_Review_of_Smart_Grids_Towards_Smart_Cities

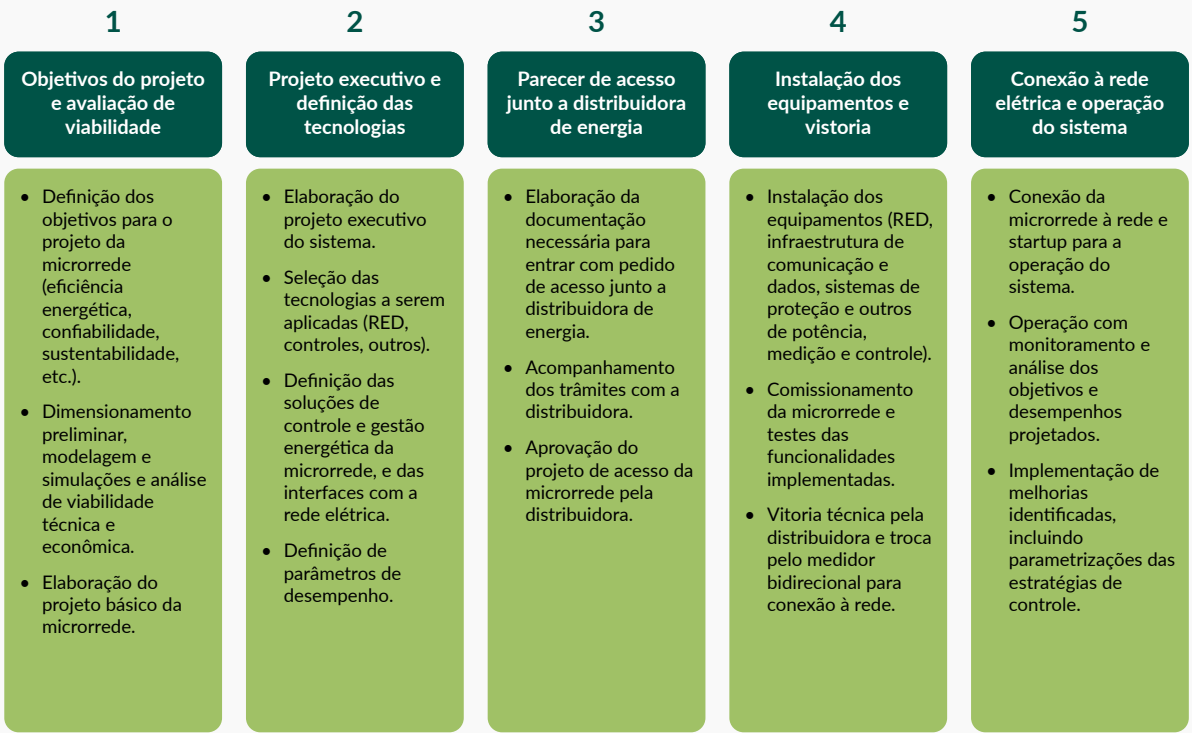
88. Fonte: Elaboração própria

Roteiro para projetos com RED no contexto de REI

As aplicações de tecnologias e modelos de RED e REI são muito amplas, incluindo desde projetos mais simples de geração fotovoltaica na unidade consumidora até aplicações de grande porte e agregação de múltiplas soluções, como é o caso das REI inseridas no conceito de Cidades Inteligentes.

O roteiro descrito na Figura 85 é uma referência para um dos possíveis modelos de aplicação de RED/REI, no caso sendo para uma aplicação de projeto de microrredes:

Figura 85. Roteiro genérico para projetos de microrredes⁸⁹.



89. Fonte: Elaboração própria



Entidades a consultar sobre o tema de RED e REI

Consulte abaixo algumas entidades relevantes sobre o tema de Recursos Energéticos Distribuídos e Redes Elétricas Inteligentes, que podem fornecer informações técnicas e de mercado, potenciais parceiros para desenvolvimento de projetos, listas de fornecedores e prestadores de serviços, oportunidades de financiamento, entre outros temas.

ABGD – Associação Brasileira de Geração Distribuída (Brasil)

<https://www.abgd.com.br/>

Atuação:

- Promoção dos benefícios da GD para toda a sociedade.
- Criação e difusão de referências que garantam a segurança, alto grau de qualidade e profissionalismo em todas as instalações de geração distribuída.
- Representação e defesa de interesses de seus associados junto aos órgãos governamentais, entidades de classe, órgãos reguladores, *players* do setor.
- Organização e compartilhamento de informações, conhecimento e *networking* oriundos de uma associação de empresas com objetivo de desenvolver o mercado de GD.
- Prestação de serviços aos associados, como por exemplo, modelos de contratos aplicados na área (venda e locação de equipamentos, formação de consórcio, formação de cooperativa, entre outros).
- Incentivo ao contato entre associados, clientes, fabricantes, fornecedores e prestadores de serviços através de grupos para associados ABGD.

Por que consultar: A ABGD agrega uma grande quantidade de associados que atuam com GD no país, servindo como base de dados e *networking* para quem busca e/ou quer ofertar produtos e serviços relacionados a projetos na área.

ABRADEE – Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica (Brasil)

<http://abradee.org.br/>

Atuação:

- Coordenação de grupos de trabalho sobre temas de interesse no setor elétrico, dos quais muitos deles apresentam sinergia com o tema de Redes Elétricas Inteligentes.
- Elaboração/divulgação de estudos em todas as áreas da distribuição.
- Coordenação em projetos de elaboração/revisão de normatização técnica nas áreas da distribuição de energia elétrica.
- Realização de pesquisas junto às distribuidoras de energia elétrica, quanto ao grau de satisfação dos clientes em relação à qualidade dos serviços prestados pelas associadas.
- Realização de seminários de melhores práticas e processos de *benchmarking*.
- Promoção e apoio a eventos de interesse das associadas.
- Manutenção do Comitê Brasileiro de Eletricidade – CB3 da ABNT.
- Relacionamento com organizações do setor, tanto nacional quanto internacionalmente.

Por que consultar: Por meio da ABRADDEE é possível acessar informações atualizadas sobre o segmento de distribuição, com conteúdo de âmbito regulatório, técnico e institucional das concessionárias, particularmente de interesse no contexto das Redes Elétricas Inteligentes. Além disso, via participação de membros associados, há oportunidade de contribuição com o desenvolvimento de RED e REI nos grupos de trabalho temáticos coordenados pela associação.

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers (Mundo)

<https://ieeexplore.ieee.org/>

Atuação:

- IEEE é a maior organização profissional técnica do mundo dedicada ao avanço da tecnologia para o benefício da sociedade, especificamente em áreas relacionadas às engenharias elétricas e eletrônicas.
- Realiza diversas atividades: publicações, conferências, padronização de tecnologias e processos, capacitação profissional e de educação.
- Possui mais de 400 mil membros associados em mais de 160 países.
- Possui base de documentação técnica e científica com mais de 5 milhões de itens, dentre os quais, dada a amplitude do tema das REI, muitos possuem relação.

Por que consultar: A base de publicações da IEEE é a maior referência técnica e científica em termos de tecnologias, projetos, procedimentos e inovações na área de RED e REI. Adicionalmente, o IEEE possui uma atuação na elaboração de padronização de tecnologias e recomendação para realização de projetos, com vasto conteúdo de temas relacionados aos RED e REI.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil)

<https://www.aneel.gov.br/>

Atuação:

- A ANEEL é uma autarquia vinculada ao Ministério de Minas e Energia, que regula o setor elétrico brasileiro.
- Regula a geração, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica.
- Fiscaliza, diretamente ou mediante convênios com órgãos estaduais, as concessões, as permissões e os serviços de energia elétrica.
- Implementa as políticas e diretrizes do governo federal relativas à exploração da energia elétrica e ao aproveitamento dos potenciais hidráulicos.
- Estabelece tarifas de energia elétrica e serviços associados.
- Promove as atividades de outorgas de concessão, permissão e autorização de empreendimentos e serviços de energia elétrica, por delegação do Governo Federal.

Por que consultar: A ANEEL é responsável pelo estabelecimento dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), que devem ser considerados na elaboração e operação de projetos de RED e REI, particularmente daqueles que possuem interface com a rede de distribuição (procedimentos de conexão, requisitos de qualidade de energia, orientações sobre projetos e operação dos sistemas de armazenamento de energia, etc.). Além disso, por meio da ANEEL e concessionárias, é possível acessar a oportunidades de financiamento para desenvolvimento de projetos no contexto do Programa de P&D da ANEEL.



CIGRE Brasil – Conselho Internacional de Grandes Sistemas Elétricos (Mundo/Brasil)

<https://cigre.org.br/>

Atuação:

- O CIGRE é uma comunidade global colaborativa comprometida com o principal programa de desenvolvimento de conhecimento do mundo para a criação e compartilhamento de conhecimento do sistema de energia.
- Tem por objetivo promover o intercâmbio e desenvolvimento técnico, tecnológico e da engenharia no Brasil, no campo da produção de energia elétrica, de sua transmissão em alta tensão e distribuição, bem como de regulação e mercado de energia.
- Parte da atuação do CIGRE se dá por meio de Comitês de Estudo, dentre os quais muito relacionados ao tema de RED e REI, especificamente o CE-C6 (Sistemas Ativos de Distribuição e Recursos Distribuídos de Energia).

Por que consultar: Por meio do CIGRE é possível encontrar informações técnicas relevantes e atualizadas, compartilhar conhecimento, acessar especialistas, eventos setoriais e participar de comitês de estudos. No caso do tema de RED e REI, o comitê de estudo CE-C6 tem como objetivo a avaliação do impacto técnico de novas características de distribuição sobre a estrutura e operação do Sistema, abrangendo: desenvolvimento da geração distribuída, dispositivos para armazenamento de energia, gerenciamento pelo lado da demanda e eletrificação rural.

ABMR – Associação Brasileira de Microrredes (Brasil)

<https://www.microrredes.org.br/>

Atuação:

- Promove e estimula o desenvolvimento de informações, seja de pesquisa básica ou aplicada, no que tange às tecnologias de microrredes.
- Desenvolve estudos e medidas que tenham por finalidade aperfeiçoar o desempenho empresarial de seus associados.
- Realiza ações e presta serviços voltados à educação, cultura, ciência, tecnologia e de inovação, de forma a disseminar as tecnologias de microrredes.
- Promove eventos, congressos, campanhas, cursos, seminários, palestras, oficinas, estágios, fóruns, assim como encontros sobre temas relacionados aos interesses de microrredes, bem como para a divulgação das suas atividades.
- Promove, reúne, realiza e divulga periodicamente pesquisas e estatísticas com vistas à elaboração de estudos informativos e avaliação das tendências e dimensão de microrredes.
- Mantém intercâmbio de caráter cultural e informativo com outras associações e entidades afins, no Brasil e no exterior, promovendo, quando for o caso, atividades conjuntas.
- Defende os interesses dos associados, respeitando sempre os objetivos da associação e a Lei.

Por que consultar: A ABMR desenvolve pesquisas básica e aplicada de caráter científico e tecnológico focados em microrredes, sendo dividida em 5 grupos de trabalhos: Tecnologias e Padrões; Modelos de Negócios; Pesquisa e Conhecimento; Política e Regulamentação; Gestão e Articulação Institucional. Sua missão é promover o avanço tecnológico da inserção de Microrredes na matriz elétrica nacional, fomentando a competitividade, a consolidação e a sustentabilidade do mercado de microrredes no Brasil.

Fechamento

Diariamente, o consumidor de energia elétrica se torna cada vez mais o protagonista deste setor. Ao passo que diversas tecnologias são criadas para atender as demandas dos consumidores e aliviar suas dores quanto ao consumo de energia elétrica, legislações e regulamentações também estão sendo atualizadas visando esse objetivo. Fica mais evidente a importância do papel do consumidor na orientação das principais iniciativas do setor elétrico.

Com isso, as Redes Elétricas Inteligentes aliadas aos Recursos Energéticos Distribuídos, recursos estes que estão junto ao consumidor, se tornam uma matéria indispensável para conhecimento e aprofundamento dos profissionais desse setor. Entender como as fontes renováveis, agora na forma de geração distribuída, conversam com os sistemas de armazenamento e como as possíveis manobras realizadas com foco na resposta à demanda podem proporcionar redução de custos e melhorias na rede é essencial para lidarmos com a rede elétrica do futuro.

Aliado ao conhecimento base de fontes, armazenamento e manobras, estão as redes de comunicação, os protocolos de comunicação e a infraestrutura de dados, que são essenciais para o controle, gerenciamento e interface com os consumidores. Entender quais são as tecnologias mais viáveis e as que proporcionam melhor performance e velocidade de entrega de dados é essencial para gerar valor para o consumidor e para as instituições que operam as redes elétricas.

Além disso, o profissional do futuro no setor de energia precisará lidar com um dos principais vetores da inserção de tecnologia no setor elétrico, que são as legislações e regulamentações. Estes vetores determinam a que tempo e qual os limites de abrangência que as tecnologias poderão ter no futuro.

É nesse sentido que esse ebook se mostra importante ao compilar os conteúdos mais relevantes a serem passados por docentes a alunos/as de disciplinas relacionadas a essa temática. Espera-se que, com disciplinas atualizadas, estudantes de cursos que têm interação com o setor elétrico finalizem seus cursos com conhecimentos mais aderentes aos exigidos pelo atual mercado de trabalho.



Glossário

ABMR	Associação Brasileira de Microrredes
AIR	Análise de Impacto Regulatório
AMI	<i>Advanced Metering Infrastructure</i> – Infraestrutura Avançada de Medição
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	<i>American National Standards Institute</i> - Instituto Nacional Americano de Padrões
BAN	<i>Building Area Network</i> – Rede de Área Predial
BEN	Balanço Energético Nacional
BESS	<i>Battery Energy Storage System</i> – Sistema de Armazenamento de Energia
BLF	<i>Base Load Forecaster</i> – Preditor de Carga
BMS	<i>Battery Management System</i> – Sistema de Gerenciamento de Energia
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CIGRE	<i>Conseil International des Grands Réseaux Électriques</i> – Conselho Internacional de Grandes Sistemas Elétricos
CLF	<i>Change Load Forecaster</i> – Preditor de Modificação de Carga
CMO	Custo Marginal de Operação
CMSE	Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
Cp	Coefficiente de Potência
CPP	<i>Critical Peak Pricing</i> – Preço de Pico Crítico
CVPP	<i>Commercial Virtual Power Plant</i> – Planta Virtual Comercial
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
DNP	<i>Distributed Network Protocol</i> – Protocolo de Rede de Distribuição
DOD	<i>Depth of Discharge</i> - Profundidade de Descarga
EMS	<i>Energy Management System</i> – Sistema de Gerenciamento Energético
ENTSO-E	Rede Europeia de Operação do Sistema de Transmissão para Eletricidade
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ESS	<i>Energy Storage System</i> – Sistema de Armazenamento de Energia
EV	<i>Electric Vehicle</i> – Veículo Elétrico
EUA	Estados Unidos da América
FAN	<i>Field Area Network</i> – Rede de Área de Campo
FCL	<i>Fault Current Limiter</i> – Limitador de Corrente de Falta
FCS	<i>Fault Current Source</i> – Fonte de Corrente de Falta
FIT	<i>Feed-in-Tariff</i> – Tarifas de Incentivo para Energias Renováveis
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
GD	Geração Distribuída
GOOSE	<i>Generic Object Oriented Substation Event</i> - Eventos de Subestação Orientado a Objetos Genéricos
HAN	<i>Home Access Network</i> – Rede de Acesso Residencial
IAN	<i>Industrial Area Network</i> – Rede de Área Industrial
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i> – Comissão Eletrotécnica Internacional
IED	<i>Intelligent Electronic Device</i> – Dispositivos Eletrônicos Inteligentes
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> - Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
IHM	Interface Homem-Máquina
IoT	<i>Internet of Things</i> - Internet das Coisas
kV	Quilovolt
LAN	<i>Local Area Network</i> – Rede de Área Local
LCOE	<i>Levelized Cost of Energy</i> - Custo Nivelado de Energia
LCOS	<i>Levelized Cost of Storage</i> - Custo Nivelado de Armazenamento
MME	Ministério de Minas e Energia

MMR	Mini e Micro Redes
MMS	<i>Manufacturing Message Specification</i> - Especificação da Mensagem de Fabricação
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i> – Rastreamento do Ponto de Máxima Potência
MR	Microrrede
MMGD	Mini e Microgeração
ms	Milissegundo
MWp	MegaWatt-pico
NAN	<i>Neighborhood Area Network</i> – Rede de Área Vizinha
NERC	<i>North American Electric Reliability Corporation</i> – Corporação de Confiabilidade Elétrica Norte-Americana
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i> - Laboratório Nacional de Energias Renováveis
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
OSI	<i>Open System Interconnection</i> – Sistema de Interconexão Aberto
Payback	Período de retorno de capital
PC	<i>Point Connection</i> – Ponto de Conexão
PCS	<i>Power Conversion System</i> – Sistema de Conversão de Energia
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PLL	<i>Phase Locked Loop</i> – Ciclo de Travamento de Fase
PMU	<i>Phasor Measurement Unit</i> – Unidade de Medição Fasorial
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PTR	<i>Peak Time Rebate</i> - Desconto no Horário de Pico
PN	Preço Normal
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> – Modulação Por Largura de Pulso
RD	Resposta à Demanda
RDA	Rede de Distribuição Ativa
RED	Recurso Energético Distribuído
REI	Rede Elétrica Inteligente
RLS	<i>Recursive Least Square</i> – Mínimo Quadrado recursivo
RNA	Redes Neurais Artificiais
RTP	<i>Real Time Pricing</i> – Precificação em tempo real
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i> – Controle Supervisório e Aquisição de Dados
SB	<i>Smart Buildings</i> – Prédios Inteligentes
SH	<i>Smart Homes</i> – Casas Inteligentes
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
SOC	<i>State of Charge</i> – Estado de carga
SOGI	<i>Second Order Generalized Integrator</i> – Integrador Generalizado de Segunda Ordem
SOH	<i>State of Health</i> – Estado de Saúde
SNTP	<i>Simple Network Time Protocol</i> – Protocolo de Sincronismo de Tempo
SV	<i>Sample Value</i> – Valor Amostrado
TCP/IP	<i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i> - Protocolo de Controle de Transmissão/Protocolo de Internet
TIR	Taxa Interna de Retorno
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
TOU	<i>Time of Use</i> – Tempo de Uso
TUSD	Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição
TUST	Tarifa de Uso do Sistema de Transmissão
TVPP	<i>Technical Virtual Power Plant</i> – Planta virtual Técnica
UC	Unidade Consumidora
UCTE	União para Coordenação de Transmissão de Eletricidade
UTR	<i>Unity Terminal Remote</i> – Terminal de Unidade Remota
VE	Veículos Elétricos
VPL	Valor Presente Líquido
VPP	<i>Virtual Power Plant</i> – Plantas Virtuais
WAN	<i>Wide Area Network</i> – Rede de Área Ampla



Referências

A. Khotanzad, R. A.-R. (Nov. de 1998). ANNSTLF-Artificial Neural Network Short-Term Load Forecaster- generation three. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 13, no. 4, pp. 1413-1422.

Bazzo, T. d. (2017). *Projeto Ótimo Multidisciplinar de Geradores Síncronos de Ímãs Permanentes para Aerogeradores Considerando a Curva de Ocorrência do Vento*. Florianopolis: UFSC.

BUSH, S. F. (2014). *Smart grid: Communication-enabled intelligence for the electric power grid*. John wiley & sons, .

Cantane, D. A., Junior, O. H., & Hamerschmidt, M. B. (2020). *Tecnologias de Armazenamento de Energia Aplicada ao Setor Elétrico Brasileiro*. SCIENZA.

Griebenow, C., Ohara, A. Instituto E+ Transição Energética (2019): *Panorama do Sistema Elétrico Brasileiro*. Rio de Janeiro/RJ - Brasil.

Castro, N., & Guilherme., D. (2018). *Experiências Internacionais em Geração Distribuída: Motivações Impactos e Ajustes*. Publit.

Ekanayake, J. (2012). *Smart Grid: Technology and Applications*. John Wiley & Sons.

Fernandes, R. (2013). *Notas de Aula – Desenvolvimento e Implantação de Microrredes Inteligentes – Estratégias de Controle para Integração de Sistemas e Gerenciamento de Energia*. . Florianopolis: IFSC.

Filho, L. R., Cremasco, C. P., Seraphim, O. J., & Caneppele, F. D. (2011). *Analytical and geometric characterization of general methodology of determination of Weibull distribution for wind regime and its applications*.

Hatziargyriou, N. (2013). *Microgrid: Architecture and Control*.

IRENA. (2015). *Battery Storage for Renewables: Market Status and Technology Outlook*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.

IRENA. (2019). *Innovation landscape brief: Utility-scale batteries*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.

IRENA, 2. (2019). *Innovative Ancillary Services: Innovation Landscape Brief*. International Renewable Energy Agency.

IRENA, I. R. (2015). *Battery Storage for Renewables: Market Status and Technology Outlook*. International Renewable Energy Agency.

J. A. A. da Silva, B. P. (2019). “Tratamento E Análise De Dados Solarimétricos Da Estação Meteorológica Da Emc/Ufg,”. *Energ. Sol. e eólica* 2, , pp. 275–289.

João, D. V. (2019). *Proteção Adaptativa em Microrredes de Média Tensão Formadas Exclusivamente por Conversores eletônicos: uma abordagem baseada em medições centralizadas de tensão* . Florianópolis: UFSC.

Martins, M. A. (2020). *IMPLANTAÇÃO DE MICRORREDES INTELIGENTES: CONTRIBUIÇÃO AOS ASPECTOS REGULATÓRIOS*. Florianópolis: UFSC.

Momoh, J. (2012). *Smart Grid: Fundamentals of Design and Analysis*.

MOUFTAH, H. T., EROL-KANTARCI, M., & REHMANI, M. H. (2018). *Transportation and power grid in smart cities: communication networks and services*. John Wiley & Sons, .

N. de Castro, A. L. (2018). “Perspectivas da tecnologia blockchain no Setor Elétrico : Aplicações na Europa , na Austrália e nos Estados Unidos,” . *CanalEnergia.com.br*, p. 7, .

Q. Huang, S. J. (2014.). *Innovative Testing and Measurement Solutions for Smart Grid*. .

Rego, E., Trinkenreih, J., & Soares, J. (2019). *NOTA TÉCNICA: Resposta da Demanda: Conceitos, Aspectos Regulatórios e Planejamento Energético*. . EPE .

Sato, T., Kammen, D., Duan, B., Macuha, M., Zhou, Z., Wu, J., . . . S. Asfaw, S. (2015). *Smart Grid Standards: Specification, Requirements, and technologies*.

Wang, C. (2017). *Smart electricity Distribution Networks*. CRC Press.

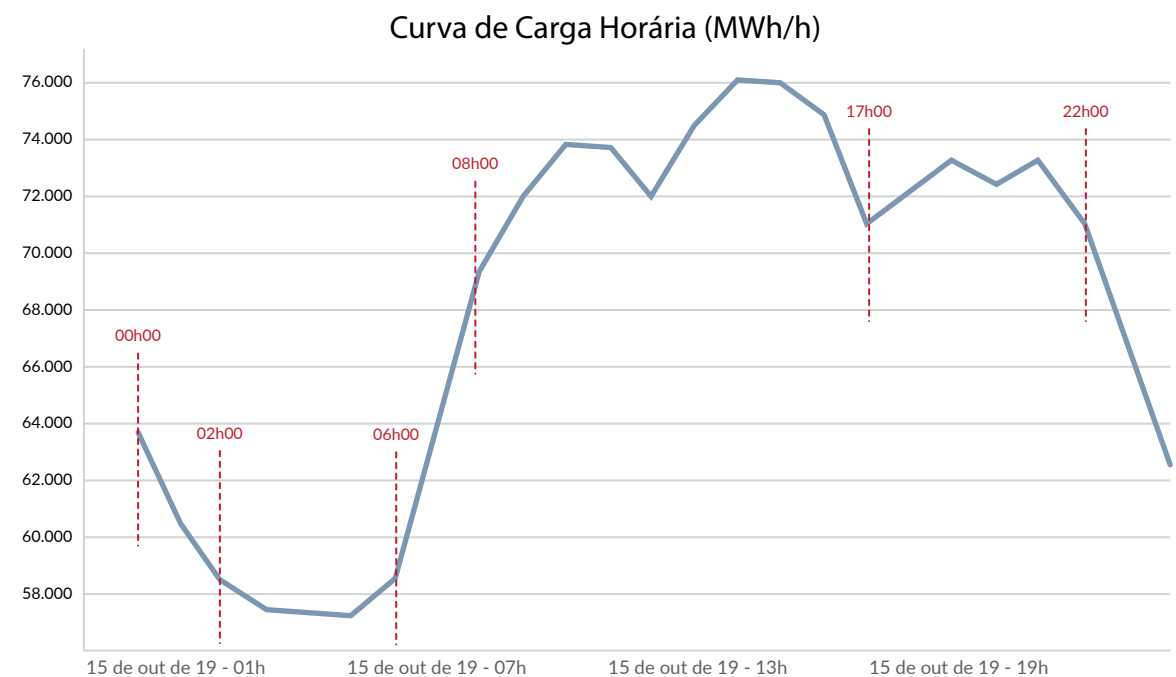


Respostas das Avaliações

Capítulo 1

1. A horizontalidade permitirá que a geração de energia seja realizada mais próximo ao consumidor. Desta forma, mediante a uma falha da rede externa, a porção da rede do projeto poderá manter sua geração autônoma, garantindo que seus consumidores ainda recebam energia apropriadamente. Além disso, haverá redução das perdas nos sistemas de transmissão, aumentando a eficiência do setor elétrico no que tange aspectos de garantia da continuidade do serviço de energia. Desta forma, empresas locais poderão usufruir da oportunidade de desenvolver soluções específicas para o projeto.
2. A resposta pode ser obtida analisando a curva de carga da imagem abaixo encontrada na plataforma WEB de acesso do ONS. Assim, a resposta seria: Solar: 8h00 às 17h00 – Térmica: 2h00 às 6h00; – Mesmo que no período de 2h00 até às 6h00 outra fonte de energia pode ser utilizada, neste horário o consumo é menor e a geração térmica poderá ter impacto minimizado.

Figura 86. Perfil de carga padrão de consumo do SIN



Capítulo 2

1. Supondo que o escopo de um projeto conta com o objetivo de amortecer oscilações da rede provenientes de fontes intermitentes de energia, por exemplo, fotovoltaica e eólica na baixa tensão, é essencial avaliar a capacidade de armazenamento, viabilidade, confiabilidade, tempo de carga/descarga e tamanho da unidade. Em respeito aos benefícios relacionados ao comportamento elétrico, obtemos a seguinte análise:

Figura 87. Dados de Geração de um Sistema fotovoltaico em dias nublados e dias de céu claro.

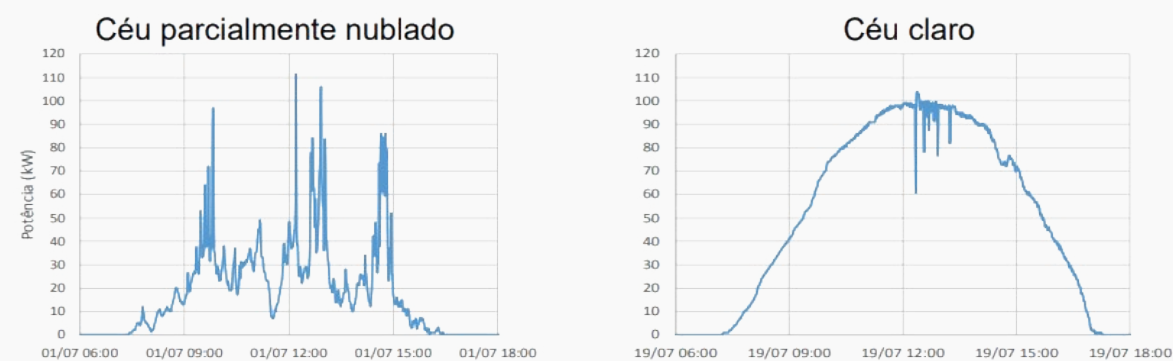
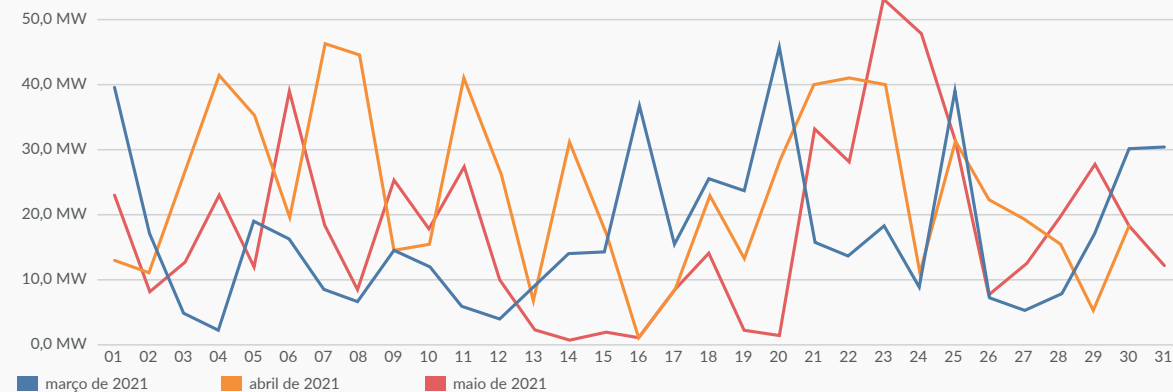


Figura 88. Dados de Geração de um complexo eólico de alta tensão.



...



...

Figura 89. Curva do pato.

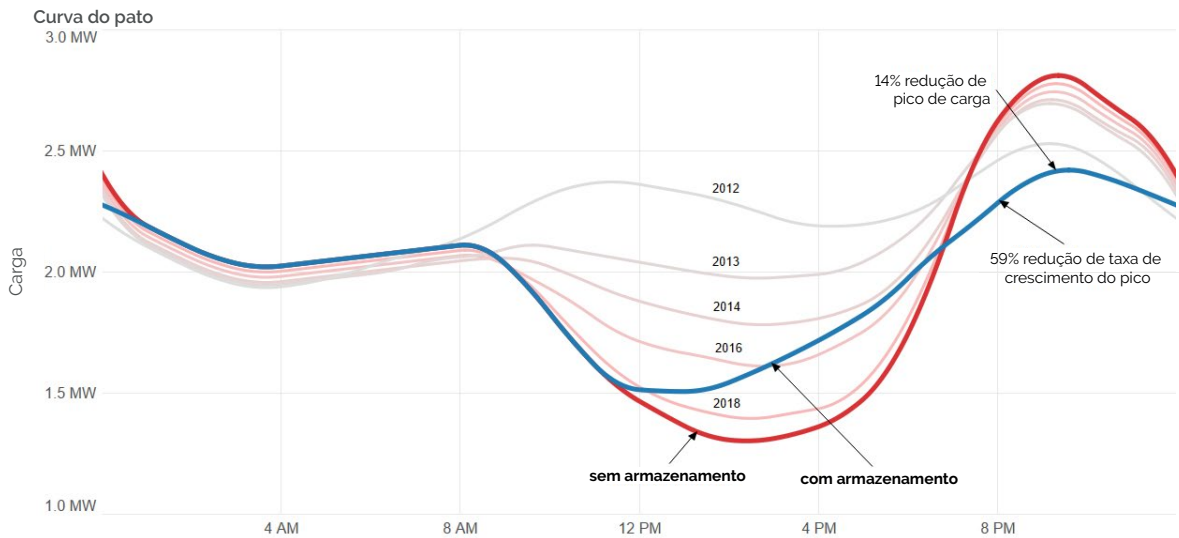
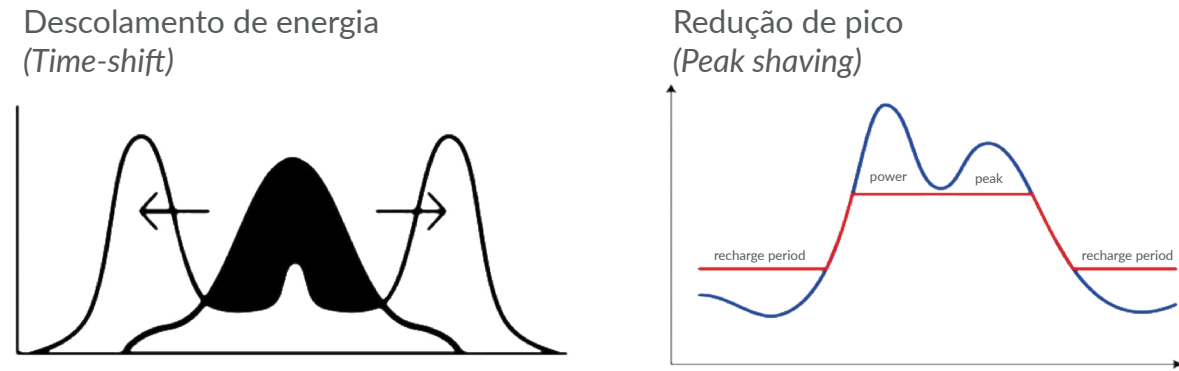


Figura 90. Deslocamento de energia e redução de pico.



Com base na Figura 87, sistemas de armazenamento mitigariam variações climáticas no sistema fotovoltaico; Com base na Figura 88, sistema de armazenamento compensaria as variações do vento suavizando a potência gerada no sistema eólico; Com base na Figura 89, sistemas de armazenamento tenderão a reduzir os requisitos de rampa provocados pela alta penetração de fontes de geração fotovoltaicas; Com base na Figura 90, o sistema de armazenamento terá o potencial de deslocar a curva de geração fotovoltaica e reduzir os picos de carga da rede local.

Capítulo 3

1. Resolução:

Sistema Solar: $750\text{W}/\text{m}^2 \rightarrow$ De acordo com os gráficos: $I=2\text{A}$ e $V_{\text{max}}=0,5\text{V}$.
Calculando a potência solar por celular $\rightarrow P=VI=2*0,5=1\text{W}$
Considerando 100 células $\rightarrow 1\text{W}*100=100\text{W}$

Sistema Eólico: $v=8\text{m/s} \rightarrow$ De acordo com os gráficos: $P=0,4\text{pu}$
Convertendo pu em watts $\rightarrow 0,4\text{pu}*100\text{W} = 40\text{W}$
Considerando 2 geradores $\rightarrow 2*40=80\text{W}$

Sistema total: 100W solar mais 80W eólico $\rightarrow 100+80=180\text{W}$

\rightarrow Resposta final: **180W**





Capítulo 4

- 1. Uma boa e direta resposta sobre este questionamento é o sistema *net-metering*, que compensa o prosumidor com créditos em sua conta de luz ao injetar energia excedente à rede básica. O crédito é estipulado no valor de varejo sem independência se a energia do prosumidor foi gerada de dia ou de noite. Este sistema de tarifação visa bonificar por meio de um sistema de créditos que auxilia na geração de energia para a rede. Com isto, do ponto de vista de sistemas, este prosumidor é visto como uma bateria virtual.
- 2. O principal e mais eminente fenômeno a se destacar quando é injetado potência na rede é a subtensão, causada pelo aumento da potência injetada na rede. Este fenômeno ocorre quando a tensão reduz entre 80 e 90% por um curto período.



Capítulo 5

- 1. A resolução nº 482/2012, estipulou regras de acesso e conexões de GD à rede básica de energia. Isto facilitou a abertura de novos modelos de negócios baseados principalmente em geração de energia fotovoltaica e eólica. Além disto, a resolução estipulou descontos nas tarifas de TUST e TUSD. Os créditos de energia obtidos pela GD foram revistos, dando maior prazo para sua utilização. De fato, a resolução nº 482 é um marco que permitiu muitos novos empreendimentos não apenas da geração solar e eólica, mas também da biomassa, hidráulica e cogeração. Em janeiro de 2022, a lei 14.300 alterou aspectos do sistema de compensação de geração de energia elétrica através de GD e transformou aspectos da resolução em lei. A lei, sendo juridicamente mais ponderante que a resolução, não revoga a resolução nº 482/2012, mas traz maior segurança e garantia para novos empreendimentos na área de GD, microrredes, minirredes e outros modelos de negócios.



Este ebook faz parte de uma coleção de quatro apostilas desenvolvidas pelo projeto Profissionais do Futuro: Competências para a Economia Verde.

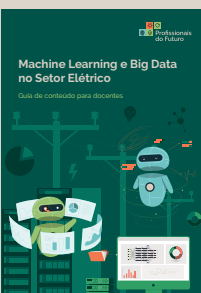
Confira abaixo os demais exemplares:



Sistemas de armazenamento de energia



Cibersegurança e Ética de Dados no Setor Elétrico



Machine Learning e Big Data no Setor Elétrico



