

# **INTRODUÇÃO ÀS MICRORREDES E SEUS DESAFIOS**

Lucas Paulis Mendonça

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovada por:

---

Prof<sup>a</sup>. Carmen Lúcia Tancredo Borges, D. Sc.  
(Orientadora)

---

Prof. Djalma Mosqueira Falcão, D. Sc.

---

Eng<sup>o</sup>. Thiago Santos Attias Silva, M. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL  
MARÇO DE 2011

# Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Definição.....	1
1.2	Motivação.....	2
1.3	Desafios.....	3
2	Recursos de Geração Distribuída.....	4
2.1	Introdução.....	4
2.2	Cogeração.....	5
2.3	Geração Eólica.....	9
2.4	Células Fotovoltaicas.....	12
2.5	Pequenas Centrais Hidrelétricas.....	16
2.6	Mecanismos de Armazenamento.....	16
2.7	Flywheels de terceira geração.....	18
3	Integração da Geração Distribuída.....	21
3.1	Introdução.....	21
3.2	Distúrbios de Qualidade.....	21
3.3	Alternativas de geração distribuída.....	24
4	Características das Microrredes.....	32
4.1	Introdução.....	32
4.2	Características Técnicas.....	33
4.3	Comportamento.....	34
4.4	Associação de Microrredes.....	35
4.5	Vantagens.....	35
4.6	Impacto na Utilização do Calor.....	37
4.7	Impactos no Mercado.....	38
4.8	Impactos Ambientais.....	40
5	SCADA em Redes de Distribuição Ativas.....	42
5.1	Introdução.....	42
5.2	Sistemas SCADA atualmente.....	42
5.3	Controle de sistemas SCADA.....	43
5.4	Funcionalidades SCADA em Microrredes.....	44
5.5	Componentes das Redes SCADA.....	45
6	Desafios em Proteção .....	48
6.1	Introdução.....	48
6.2	Ilhamento.....	48

6.3 Principais Desafios de Proteção.....	52
6.4 Requisitos de Aterramento.....	53
7 Microrredes e Economia.....	55
7.1 Introdução.....	55
7.2 Mercado Atual de Energia no Brasil.....	55
7.3 Competitividade Econômica das Microrredes.....	58
7.4 Serviços Auxiliares em Energia.....	60
7.5 Mercado Flexível e seus Agentes.....	61
7.6 Métodos de Tarifação.....	63
8 Exemplos de Microrredes .....	64
8.1 Projeto Sendai [3].....	64
8.2 Rede Ativa de Orkney [5].....	66
8.3 Iniciativa Elétrica Galvin [24].....	67
8.4 Distribuidoras Adotando Sistemas SCADA [25,26].....	68
9 Conclusões.....	71
10 Referências.....	72

## Resumo

Neste trabalho serão estudadas as vantagens, desvantagens, desafios e oportunidades no âmbito das redes de distribuição ativas. Serão levados em conta diversos aspectos da implementação das microrredes, de forma a promover um estudo abrangente e completo, com análise técnica econômica e ambiental de seus impactos no modelo atual de distribuição. A apresentação dos recursos de geração distribuída é feita, assim como dados de gerenciamento, supervisão, controle e aquisição de dados (SCADA) dessas unidades. É dada atenção especial aos dispositivos de eletrônica de potência, responsáveis pela interface entre alguns geradores e o sistema, assim como aspectos de proteção, que ganha uma complexidade adicional em redes de configuração flexível. Apresenta-se também uma análise econômica das relações entre os diversos agentes que estariam presentes num mercado aberto e bilateral de energia. Esses aspectos serão estudados de forma a mostrar a viabilidade técnica e econômica das microrredes, considerando-as um avanço tecnológico. Para isso, pesquisas e simulações serão analisadas para obter resultados comparativos entre o modelo de gerenciamento atual da rede de distribuição e propostas de modelos de gerenciamento de energia para as microrredes. Finalmente serão descritos exemplos atuais de projetos e microrredes sendo implantados ao redor do mundo, com os objetivos e metas de cada um, sempre alinhados aos objetivos das redes de distribuição ativa.

Ao fim da pesquisa será constatado que de fato a rede de distribuição ativa atende à proposta de gerar benefícios em vários setores do mercado energético: para os investidores em energia, por tratar-se de obras de menor custo e maior agilidade para obter resultados; para a população, por ser de maior confiabilidade e menor dependência de gerações de grande porte e para o meio ambiente, por viabilizar plantas geradoras com insumos renováveis e de menor potencia instalada.

# 1 Introdução

## 1.1 Definição

A geração de energia do modo que conhecemos está em vias de sofrer mudanças significativas. A diminuição de reservatórios de combustíveis fósseis, o impacto ambiental de grandes obras e a alta dependência de fatores geográficos para geração dos modelos atuais têm sido apontados como empecilhos para boa parte das obras de geração. Nesse cenário, abre-se espaço para o desenvolvimento de um novo modelo no gerenciamento dos insumos energéticos, as chamadas *microgrids* ou microrredes.

O conceito de microrrede vem da utilização de geração distribuída utilizada para suprir cargas localmente, adaptando a geração às necessidades da carga. Do ponto de vista atual da geração longe da distribuição, ligados pela transmissão, pode-se enxergar a distribuição como uma carga ativa. Isso significa que um cliente pode tanto consumir quanto fornecer potência do sistema principal, devido à geração de pequena escala próxima das cargas. Nesse modelo, a geração passa a ter um controle mais interativo e detalhado, pois tem como função alimentar as cargas localmente com plantas de geração menores de até 50 MW, em níveis de tensão de até 138kV. Essa limitação está de acordo com o tamanho da geração de pequeno porte, devido ao menor impacto ambiental. Assim, o despacho não necessariamente é realizado de forma centralizada, bem como o planejamento dos recursos. [1]

Uma rede de distribuição ativa significa que a carga, ou seja, os consumidores, não mais serão clientes passivos, esperando que a energia chegue até eles vindo de gerações distantes, passando por quilômetros de rede, sujeitos a perdas elétricas, falhas e baixa confiabilidade. Nesse novo modelo de rede, seria explorada a geração distribuída, que são pequenas unidades modulares de produção de energia, gerando perto da carga e sujeita a menos perturbações e maior grau de independência do sistema nacional.

De fato, não há atualmente uma definição exata do conceito. Autores e órgãos divergem nesse ponto pois cada estudo leva em conta um ou mais aspectos característicos das microrredes. As características destas podem variar conforme o propósito de sua implementação, sendo alguns exemplos: diversificação da matriz

energética; aumento da confiabilidade e qualidade de energia fornecida; aumento da eficiência da geração e descentralização da geração.

A figura 1 ilustra um exemplo de ligação de microrrede:

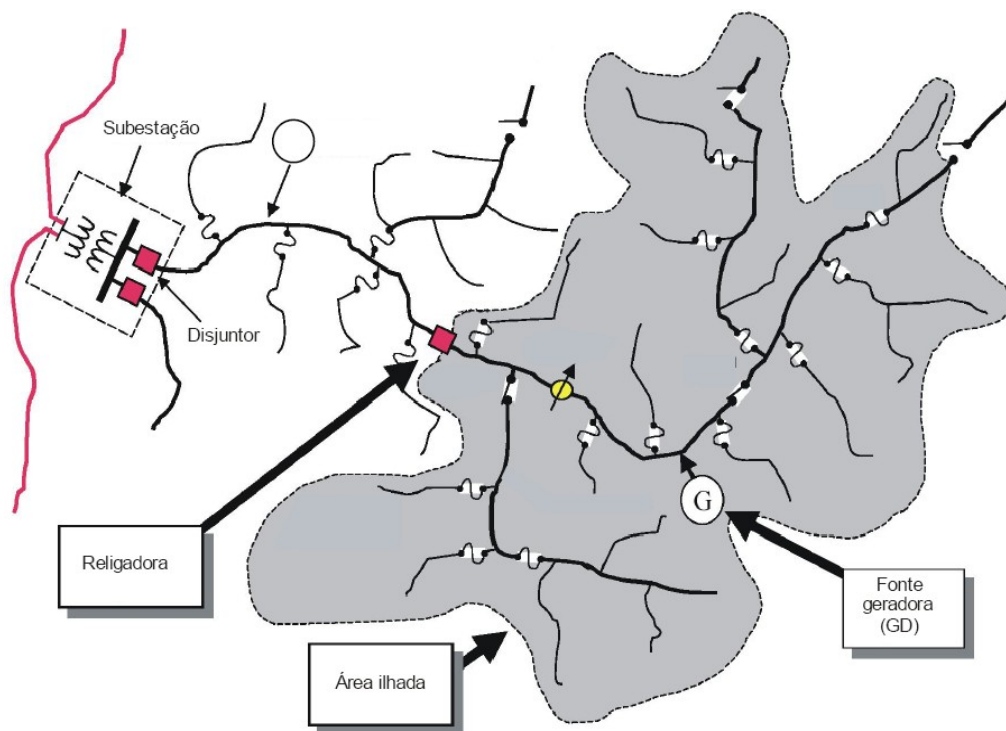


Figura 1: Exemplo de microrrede acoplada ao sistema de distribuição [2]

## 1.2 Motivação

A motivação para o estudo das redes de distribuição ativa vem da questão ambiental, aliado às vantagens técnicas da geração distribuída (GD). A escassez de combustíveis fósseis usados para alimentação de grandes termelétricas e o mal que a queima desses gera para o planeta favorecem investimentos em energia de fontes renováveis ou não convencionais.[1,3] Essas tendem a ser plantas de menor porte, adequadas para geração distribuída e menos dependentes de fatores geográficos para a implantação. Outras vantagens da geração perto da carga são a diminuição das perdas na transmissão e o aumento da confiabilidade da rede. Isso porque a geração estaria instalada diretamente à distribuição, não estando sujeitas a perdas e faltas na transmissão. A eficiência geral do processo também aumenta, devido a maior facilidade de instalação de cogeração acoplada à geração ou a grandes consumidores de energia para trabalho e calor, permitindo o aproveitamento de calor excedente. [4]

Fatores que podem incentivar a evolução da GD são o crescimento da expectativa dos consumidores por um serviço de maior qualidade e mais confiável do que o atual. Também influencia o fato de ser um ambiente propício para pesquisas e inovações em fontes renováveis e armazenamento de energia, como células combustíveis e *flywheel's*, que favorecem a diminuição das emissões de carbono. Objetivamente, clientes procuram a GD por três razões [2]: Redução de custos, aumento da confiabilidade e da qualidade do fornecimento de energia. Esses fatores tendem a incentivar concessionárias e operadores a melhor utilização e gerenciamento de recursos, investindo em tecnologia e substituindo equipamentos antigos.

### **1.3 Desafios**

Apesar de ser adaptável ao modelo atual, podendo ser instalado gradativamente, aplicar a adoção de redes de distribuição ativa representa um desafio técnico, pois o fluxo de potência na carga passa a ser bidirecional, exigindo uma flexibilidade maior do controle e da proteção dos sistemas de potência envolvidos. A GD atualmente é implementada ao modo '*fit-and-forget*', ela é adaptada à rede com controles abrangentes e não se acompanha o desempenho das máquinas [1]. Com a implantação de *microrredes*, passa a ser necessário um acompanhamento bem maior devido ao maior número de eventos numa rede de fluxo bidirecional, com mais geradores mais próximos à carga.

Para que a GD possa ser implementada sem riscos, é necessário grande conhecimento nas áreas de controle e proteção flexíveis, simulações e gerenciamento de rede em tempo real. Devem ser utilizados sensores e instrumentos de medida mais avançados, para que seja usado um dispositivo de controle supervisão e aquisição de dados (SCADA: *supervisory control and data acquisition*).

## 2 Recursos de Geração Distribuída

### 2.1 Introdução

Geradores de energia distribuída utilizados em microrredes são idealmente fontes alternativas ou renováveis de Energia [1,3,5,6]. O objetivo de gerar energia de modo distribuído é aproveitar as vantagens de fontes renováveis que emitem pouco carbono e a alta eficiência de sistemas que produzem calor e energia com cogeração. Essas plantas permitem que se aproveite calor que seria desperdiçado, gerando energia de modo eficiente enquanto as fontes alternativas ajudam a diminuir a poluição ambiental fornecendo energia limpa.

Esses recursos podem variar bastante, desde pequenos sistemas que geram calor como subproduto de seus processos, como pequenas turbinas de aquecimento de água para piscinas e condomínios ou fornos de padarias, até fontes renováveis conhecidas, como células fotovoltaicas ou pequenas centrais hidrelétricas. A escolha do recurso adequado depende fortemente de fatores geográficos, como o clima, relevo e disponibilidade de combustível. A busca por combustíveis alternativos leva inclusive a um maior investimento em pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias, como o uso do hidrogênio para produção de energia. Os avanços técnicos no entanto se estendem para diversos campos pertinentes como armazenamento de energia por meio de ultra-capacitores e *flywheels*.

Serão abordadas nesse capítulo alguns recursos para geração de energia distribuída:

1. Plantas suscetíveis à cogeração
2. Sistemas de geração eólica
3. Células fotovoltaicas
4. Pequenas centrais hidrelétricas
5. Mecanismos de armazenamento



## 2.2 Cogeração

A cogeração é bastante promissora para ser usada em microrredes, pois utiliza-se o calor gerado localmente, para dar energia as cargas locais, aumentando a eficiência já elevada de um processo com cogeração. Além da geração de eletricidade, calor em temperaturas a partir de 100° pode ser usado para resfriadores por absorção [1,4,7].

Por coletar calor remanescente de sistemas geradores de calor e potência, a cogeração torna um processo muito mais eficiente sobre o combustível utilizado, gerando energia a um custo bem menor do que se o combustível fosse usado somente para produção de energia elétrica. O processo de geração termelétrica tradicional tem uma eficiência de 35 a 40%, já um processo com cogeração pode chegar a 80% [4] como é o caso com turbinas de ciclo combinado, sem contar as perdas que são bem menores quando a energia é gerada localmente. É importante notar que o processo de cogeração deve ser feito próximo à descarga de calor, para não perdê-lo por meios ineficiente de transmissão desse, pois naturalmente a energia elétrica é bem melhor para ser transportada.

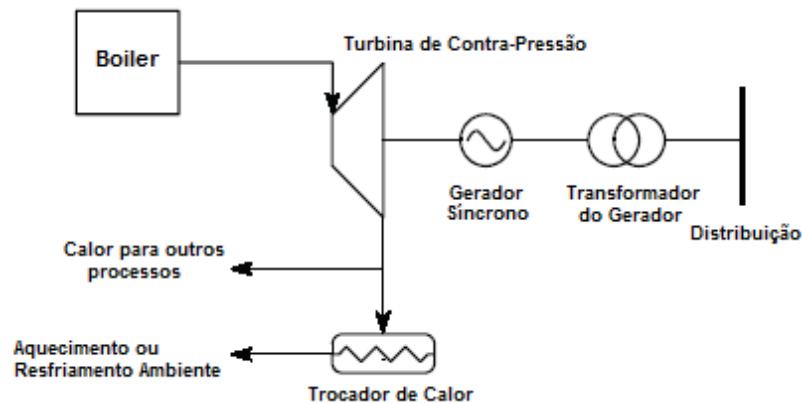
A cogeração pode ser aplicada em diversos contextos. Em residências e edifícios comerciais por exemplo, as cargas de calor são pequenas, assim as gerações de eletricidade também são pequenas, porém numerosas. Desse modo pode haver uma flexibilidade bem grande em relação as demandas e gerações, já que há muitas de ambas.

Atualmente são disponíveis diferentes arranjos de equipamentos capazes de produzir eletricidade através do calor resíduo. Dependendo das demandas da planta, é mais conveniente definir o arranjo pela razão entre energia elétrica e térmica. A tabela 1 mostra as diferentes técnicas e a razão média entre potência elétrica e térmica para cogeração.

Tipo de Equipamento	Razão kWt/kWe	Dimensão das demandas
Turbina de contra-pressão	6,9:1	Ciclos combinados
Turbinas com condensador	6,7:1	Pequenos Processos Industriais
Turbina à gas	3,6:1	Mais de 5MVA
Turbina à gas com ciclo combinado	1,8:1	Mais de 5MVA
Motor de combustão interna	1,8:1	Até 5MVA

*Tabela 1: modelos de máquinas para cogeração [7]*

As turbinas à vapor de contra-pressão representam a tecnologia mais arcaica, porém bem difundida por não possuir condensador. Essa característica provoca perda de potência na saída do vapor, contudo permite o uso do vapor residual que ainda retém temperatura e pressão em outros processos na mesma planta e dispensa o custo do condensador. O esquema a seguir mostra uma turbina de contra-pressão produzindo energia e calor.



*Figura 2: Turbina de contra-pressão*

Utilizando-se um condensador, parte do vapor pode ser extraído para outros processos com uma pressão maior, enquanto o resíduo é totalmente condensado, como mostrado na figura 3. Desse modo, garante-se que a demanda de calor seja totalmente satisfeita utilizando diferentes taxas de extração, gerando energia elétrica com o calor disponível.

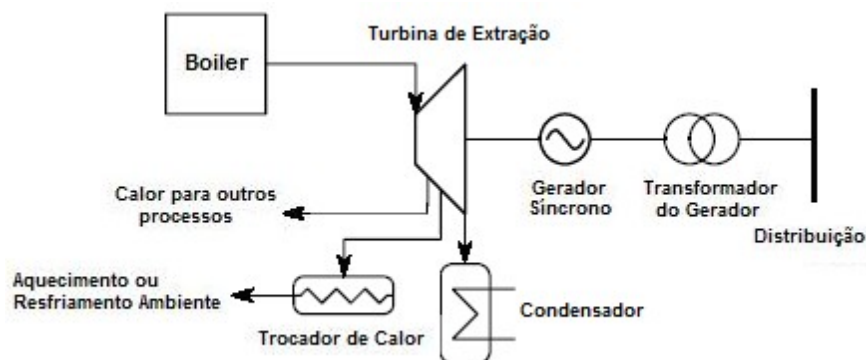


Figura 3: Turbina de extração

Para grandes demandas podem ser utilizadas turbinas a gás que atingem alta eficiência. Aproveitando o calor resíduo da turbina em ciclos combinados, chega-se a altas eficiências sobre o uso de combustível, na ordem de 75~80% [4]. O combustível pode ser mandado para um queimador auxiliar de modo a aumentar a relação entre calor e eletricidade conforme a demanda do processo. O gás resíduo do processo em uma turbina a gás sai a uma temperatura de 500 a 600°C, assim pode-se esquentar uma caldeira para novamente gerar eletricidade por uma turbina a vapor. A figura 4 mostra a turbina a gás com queimador auxiliar, podendo o gás resíduo ser usado para aquecer uma caldeira de turbinas à vapor, como as mostradas nas figuras anteriores.

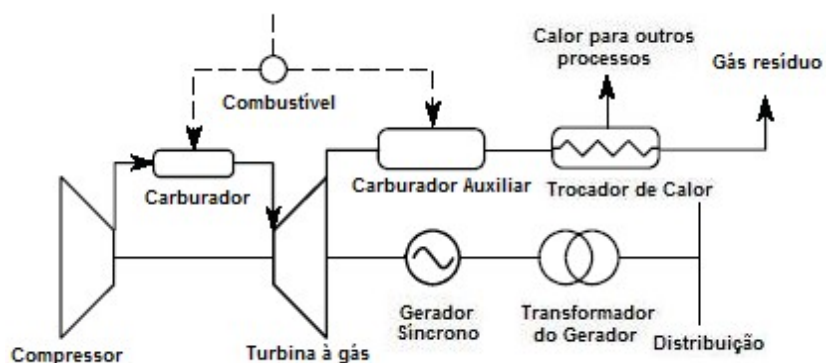
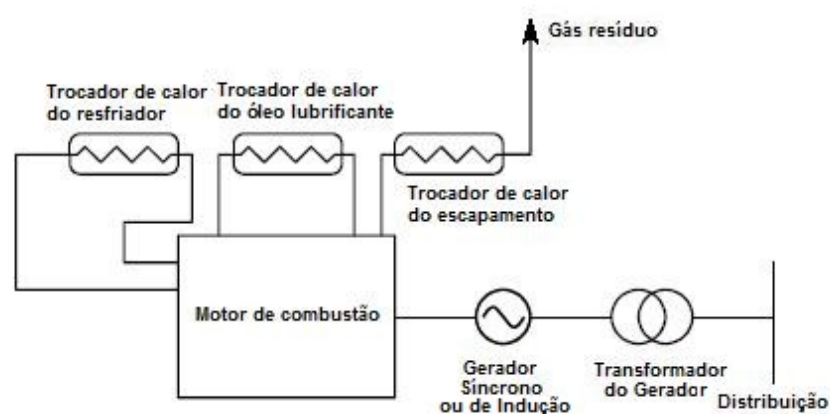


Figura 4: Turbina à gás com ciclo combinado

Em plantas menores, de até 5MW, uma alternativa é o motor à combustão convencional movido a gás por ser mais competitivo economicamente figura 5. Acima de 500kW o calor do escapamento é suficiente para ser aproveitado em turbinas à vapor, abaixo disso pode-se utilizar o calor do óleo, do radiador e do escapamento, como mostrado na figura 6. Em alguns casos são usados motores de indução para geração de energia.



*Figura 5: Motor de combustão à gás*

Com avanços tecnológicos na distribuição pode ser possível até exportar energia excedente para a distribuidora, porém atualmente a cogeração é utilizada em caráter complementar à demanda do empreendimento. O usual é o controle da cogeração ser feito de acordo com a temperatura e demanda de calor, contudo pode ser ajustada para atender à demanda de eletricidade e o calor suplementar ser fornecido por fontes alternativas. Para aplicações com demanda constante de calor seria especialmente atrativo utilizar mecanismos de armazenamento de energia para se ajustar à demanda elétrica do consumidor.

A escolha do equipamento de cogeração depende dos requisitos de projeto, da relação entre a demanda de calor e de eletricidade e da disponibilidade desse calor. A referência [4], apresentação comercial da fabricante de turbinas Bowman, mostra retornos de investimento em até 5 anos, para complexos residenciais, centros de lazer e processos industriais. Esses investimentos são da ordem de 100 mil dólares para potências de 200~300kWt e 50~100kWe, mas podem elevar a eficiência do uso de combustível, tornando a operação mais econômica e ambientalmente correta.

### 2.3 Geração Eólica

A geração eólica consiste numa hélice, que fica acoplada a um gerador indutivo por meio de uma caixa de marchas. A hélice de duas ou três pás gira com a ação do vento, fazendo com que o gerador transforme o movimento através da caixa de marcha em eletricidade. O propósito desse equipamento é transformar o movimento lento de rotação do eixo da hélice em uma rotação rápida no interior da turbina. A tensão e frequência adequadas são mantidas por mecanismos de controle e proteção. A potência das turbinas pode variar bastante, desde poucas centenas de kW até 5MW. [1]

A potência aproveitada varia dependendo de alguns fatores, como velocidade do vento, tamanho e formato do gerador, segundo a equação (2.1) [7, 8].

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho V^3 A \quad (2.1)$$

onde:

$C_p$  = coeficiente de potência

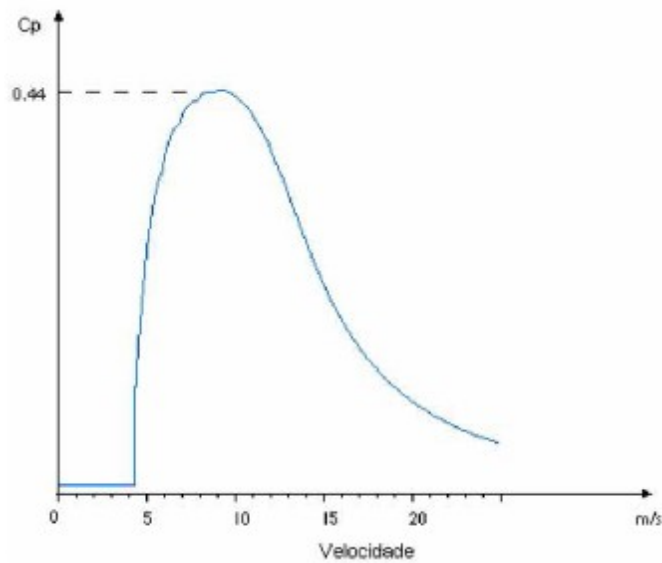
$P$  = potência (W)

$V$  = velocidade do vento (m/s)

$A$  = área varrida pela hélice (m<sup>2</sup>)

$\rho$  = densidade do ar (1.225 kg/m<sup>3</sup>)

A componente variável na equação é o coeficiente  $C_p$ , que varia conforme a velocidade do vento, alcançando seu maior valor na velocidade de vento nominal e diminui à medida que o vento aumenta conforme a figura 6. Valores nominais comuns do vento estão em torno de 12 a 15m/s. [8]



*Figura 6: Variação de  $C_p$  com a velocidade do vento [8]*

A potência varia muito devida a alterações na velocidade do vento, que dificilmente é constante, levando a pequenos picos na tensão gerada. A solução para esse problema está nas turbinas de velocidade variável, que geram um perfil mais suave de tensão. A natureza intermitente do vento faz com que a potência de fato gerada seja bem inferior a nominal [1].

Existem dois tipos de geradores eólicos, os de velocidade constante e de velocidade variável. Os de velocidade variável tem suas pás projetadas para conforme vento aumenta a velocidade, parte da hélice entra em zona de turbulência diminuindo a potência transmitida para o eixo. Esse controle é chamado controle por estol (stall) que denomina o fenômeno de turbulência do vento em parte de uma superfície, como em asas de aviões e pás de geradores eólicos. É possível também programar mais de um ponto ótimo, variando as marchas da caixa e os polos do motor de indução. As vantagens do modo de operação com velocidade constante são a construção simples e robusta, a alta confiabilidade que essa robustez traz, o baixo custo devido à simplicidade e a ausência de harmônicos devido ao fato de não haver conversão de frequência.

Já as turbinas de velocidade constante fazem seu controle por variações de ângulo de ataque nas hélices, chamado controle de passo. São implantados mecanismos de controle para regular o ângulo da hélice conforme a variação da

velocidade da pá, de forma a manter a velocidade de rotação constante. Até uma certa velocidade o controlador procura otimizar o trabalho e depois há que limita-lo, em caso de excesso de velocidade, escolhendo ângulos menos aerodinâmicos. Esse mecanismo leva a uma capacidade de absorção de energia maior. A variação do ângulo das pás também faz com que a turbina seja submetida a menos esforço mecânico, e elimina a necessidade de amortecimento mecânico, pois o próprio controlador elétrico já faz essa função. Devido a esses controles o custo da turbina de velocidade variável é mais elevado. A figura 7 abaixo ilustra a saída de potência por velocidade do vento para os diferentes controles de velocidade.

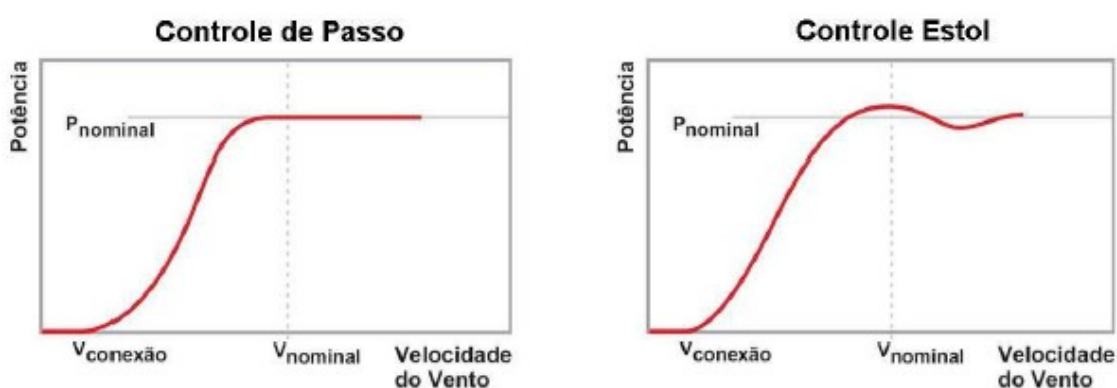


Figura 7: Variação da potência por velocidade do vento para diferentes controles.

[8]

Embora a energia eólica seja renovável e ambientalmente correta, há restrições de operação perto de centros urbanos, e conseqüentemente da carga. A presença de obstáculos como prédios e vegetação densa diminuem a velocidade do vento para as hélices. O efeito estético de parques eólicos também é agressivo em áreas urbanas. Além disso, a rotação das pás pode causar interferência em ondas de rádio e TV, ameaçar os pássaros em migração e alterar o clima local por diminuir a velocidade dos ventos que passam pelas pás. A rotação lenta das pás dos geradores é uma característica para minimizar esses efeitos negativos [9]. Assim é necessário planejamento adequado da instalação de parques eólicos para causar pouco impacto ambiental. Uma alternativa viável no entanto é a instalação de tais parques em áreas agro-produtoras, pois pode-se utilizar a área em volta dos parques para tais fins.

## 2.4 Células Fotovoltaicas

As células fotovoltaicas tem como vantagens ser de natureza sustentável, pois o combustível que é a luz solar é inexaurível e sem custo financeiro, causar pouco impacto ambiental comparado a outras fontes, uma vida útil longa, de até 30 anos com pouca manutenção e a ausência de ruído durante sua operação. Um aspecto técnico interessante é o fato de a corrente gerada ser originalmente CC e depois transformada para CA no nível de tensão desejado, ajudando a regular a tensão do sistema. Mais detalhes sobre essa interação são dados no capítulo 8, interfaces de eletrônica de potência.

Do ponto de vista ecológico, o desenvolvimento de células solares é determinante para a sustentabilidade do planeta. O fluxograma abaixo [10], ilustra os fluxos de energia na terra, e pode-se observar imediatamente que a energia solar é a fonte mais abundante de energia disponível. Percebe-se também que é uma das menos exploradas pela humanidade. Assim o desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica pode ser encarada como a solução a longo prazo mais próxima para a demanda de energia da humanidade.

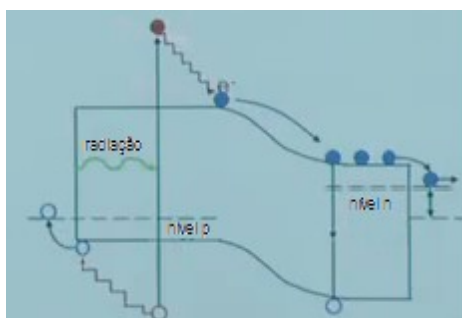
Apesar de poderem ser usadas como recursos de geração distribuída, atualmente as células fotovoltaicas comerciais tem alto custo de instalação e a baixa eficiência no processo de geração. Desse modo são mais atrativas em instalações menores, no nível de tensão do consumidor, em detrimento a grandes plantas. Outra alternativa viável é a eletrificação de instalações rurais ou distantes do sistema de distribuição principal.

A referência [11] é um estudo que mostra como seria viável a implantação de energia solar extensivamente no Brasil. O programa consiste na obrigatoriedade de compra da energia fotovoltaica pela concessionária, produzida por produtores independentes. A esses produtores, seria pago um valor de kWh superior ao cobrado normalmente, variando de acordo com a tecnologia. O custo excedente da concessionária seria rateado pelos demais consumidores, ao longo do tempo do programa. O estudo de caso mostra que com esses incentivos a energia solar teria um custo menor que a convencional de 5 a 6 anos, dependendo da região aplicada, por



conta da luminosidade e tarifa da energia convencional. A simulação considerou uma geração com potência de 1GW instalada ao longo de 10 anos, 100MW por ano. O custo estimado para o consumidor médio brasileiro (200kWh) seria de R\$ 0,28, aumentando até atingir um valor de pico de R\$ 1,51 no décimo ano e a partir daí decresceria. A tarifa adicional paga aos produtores independentes teria uma duração de 25 anos.

O modo de funcionamento das células fotovoltaicas é através de fotodiodos, que quando excitados pela luz solar geram uma tensão através da junção p-n do diodo. A tensão gerada é limitada pela tensão gerada nessa junção, quanto mais junções maior a área ocupada, assim a tensão é diretamente proporcional à área exposta ao sol. Por produzir uma tensão muito pequena, as células são arranjadas em série e paralelo de modo a se adaptar à rede no qual estão conectadas. A figura 8 mostra um diagrama esquemático de energia que ilustra o princípio da energia fotovoltaica:



*Figura 8: Princípio de funcionamento da energia fotovoltaica. [10]*

Basicamente o elétron inicialmente na parte 'n' da junção ganha energia através do sol para passar a banda de condução 'p', diminui sua energia até o limite de energia dessa banda. Uma vez que foi excitado ele tende a voltar para a junção 'n' rolando a ladeira de energia entre as bandas, criando assim corrente elétrica.

Há quatro tipos de células, monocristalinas, policristalinas, de filme fino e híbridas.

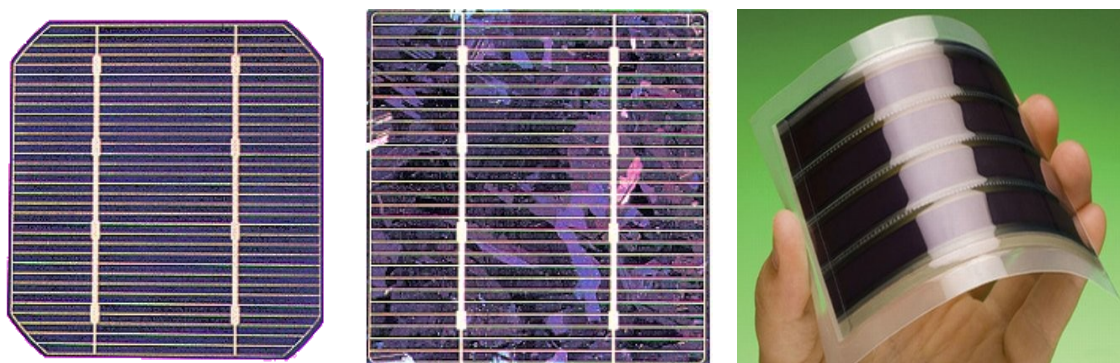
As monocristalinas são células cortadas a partir de um único cristal de silício. Elas tem como vantagem a eficiência relativamente alta, em torno de 15%. Seu processo de fabricação é caro e complicado.

Células policristalinas são feitas de lingotes derretidos e recristalizados. Durante o processo, silício derretido é depositado sobre os lingotes e eles são então

cortados em em camadas bem finas e associados para produzir uma célula. Sua eficiência de 12% é levemente menor do que a das células monocristalinas, mas seu custo é menor devido ao processo menos delicado de produção.

As células de filme fino são baseadas em silício amorfo, feito de átomos depositados em uma fina camada homogênea ao invés de uma estrutura cristalina. O filme é mais fino devido ao silício amorfo absorver mais energia mais efetivamente que uma estrutura cristalina. Essa células são mais flexíveis, sendo fáceis de posicionar. Sua eficiência no entanto é tipicamente apenas 6%, mas elas são ainda mais fáceis e baratas de produzir, se tornando mais competitivas no mercado.

O tipo híbrido de células, composto por fórmulas de silício amorfo e cristalino estão sendo desenvolvidas para aproveitar o máximo de cada tecnologia. A ideia do método é complexa, consiste em inserir uma camada de silício amorfo entre a parte emissora amorfa e a base cristalina, formando uma chamada 'célula de heterojunção' que produz uma tensão bem maior que os outros tipos de célula pela mesma área, com eficiências que chegam a 17%. A figura 9 mostra células solares dos três primeiros tipos.



*Figura 9: Células solares monocristalinas, policristalinas e de filme fino. [10]*

Um estudo recente [12] mostra o desenvolvimento de células polijunção com eficiência a luminosidade solar de até 32%, utilizando materiais semicondutores metamórficos de alta complexidade. Para intensidades de luz solar concentrada, a 240 vezes a luminosidade do sol, foi provada uma eficiência superior a 40%, ultrapassando qualquer taxa de conversão até então. Uma luminosidade dessa ordem poderia ser obtida por reflexão de espelhos.

Uma evolução mais recente é o desenvolvimento de um processo divulgado como Emissão Termiônica Melhorada por Fótons (PETE) [10] que consiste no aumento da energia dos elétrons através do aquecimento, combinando dois processos. Esses são a própria transformação fotovoltaica e o aquecimento por concentração de luz solar combinados em um único gerador. Através dessa técnica pode-se atingir eficiências energéticas teóricas superiores a 50%, aproveitando a energia solar e térmica da luz num único processo. Esse estudo mostra que é possível construir dispositivos financeiramente competitivos com a energia a gás, com potências na ordem de 25kW. A figura 10 mostra refletores parabólicos usados para concentrar a luz do sol, nos quais poderia ser implantado um dispositivo PETE:



*Figura 10: Parabólicas para concentração de energia solar. [10]*

Pelos exemplos de desenvolvimento de tecnologia citados, observa-se duas tendências nos estudos. A mais pragmática está em baratear as células solares ou subsidiar a implantação das mesmas de forma a difundir a tecnologia e utilizar imediatamente os benefícios ambientais dessas, mesmo que ao custo de eficiência. A outra é a aplicação de alta tecnologia de forma a aumentar a eficiência e que tem como desafio principal ser financeiramente viável ao mesmo tempo. Ambas são importantes, uma vez que a aplicação imediata das células solares fomentaria investimentos para pesquisa no desenvolvimento de equipamentos mais eficientes.

## 2.5 Pequenas Centrais Hidrelétricas

Geração hidrelétrica em pequena escala é ideal para fornecer potência geograficamente perto das cargas, se a topografia e o grau de precipitação do local permitirem. A saída de potência de uma PCH é dada pela equação abaixo [1]:

$$P = QH\eta\rho g \quad (2.2)$$

onde:

$P$  = potência (W)

$Q$  = fluxo de água (m<sup>3</sup>/s)

$H$  = cabeça da represa (m)

$\rho$  = densidade da água (1.225 kg/m<sup>3</sup>)

$\eta$  = eficiência na conversão eletromecânica

Cabeça da represa se refere à distância entre o nível da água e das turbinas.

A variação no regime de chuvas de um local afeta decisivamente a disponibilidade de energia de uma determinada PCH, principalmente se não houver represa para armazenar uma quantidade de água. Desse modo, uma PCH é um recurso não despachável e de integração mais complicada que os outros mencionados anteriormente. A potência gerada é proporcional tanto a área de entrada de água quanto pelo fluxo hídrico passante. A comporta de água é projetada para um dimensionamento ótimo desses dois fatores.

## 2.6 Mecanismos de Armazenamento

A possibilidade de armazenamento de energia em escala de distribuição é uma vantagem importante para o aumento da eficiência do sistema utilizando as microrredes.

Dispomos atualmente de bancos de baterias, com aplicação principalmente em subestações, para funcionamento de serviços auxiliares em caso de falta de energia ou para manter cargas críticas, que não permitem interrupção. Apesar de serem aplicados

esses bancos são caros e espaçosos, deixando um campo grande para ser desenvolvido. Uma alternativa que poderia ser usada em larga escala são os *flywheels*, dispositivos giratórios com alto momento de inércia que armazenam energia rotacional, que pode ser transformada em elétrica com até 90% de eficiência. Um desafio para a aplicação desses são a capacidade de armazenamento que atualmente varia entre 3 e 130 kWh [13,14].

Outra possibilidade é a aplicação de super-capacitores, que são suficientemente potentes para filtrar distúrbios e transitórios na rede e devolver a energia armazenada através de barras DC. Esses mecanismos de armazenamento podem contribuir para o aumento da qualidade do sistema por serem convertidos diretamente da fonte, sem harmônicos, através de barras DC [1].

O gráfico abaixo mostra características de densidade de potência e de energia para diferentes mecanismos de armazenamento. A escolha desses depende da aplicação, para sistemas de potência ininterruptíveis, é mais conveniente uma densidade de potência maior para alimentar o sistema enquanto uma fonte de energia auxiliar entra em operação. Altas densidades de potência também são desejáveis para melhora da qualidade de energia, como aplicação de capacitores em filtros ativos de potência. Já para aplicações de confiabilidade e redução de demanda de ponta, é necessário uma densidade de energia maior, de forma a suprir a demanda por períodos mais extensos, não tendo necessariamente uma potência tão alta. A figura 11 a seguir mostra alguns dispositivos de armazenamento e seus limites atuais dessas densidades.

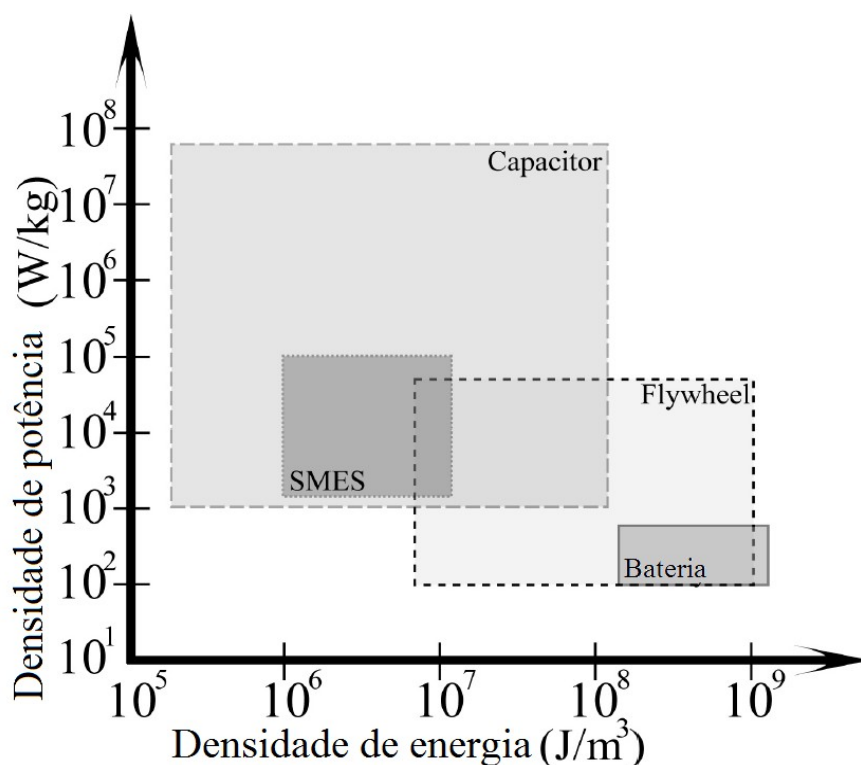


Figura 11: Densidades de potência e energia para dispositivos de armazenamento.

[14]

## 2.7 Flywheels de terceira geração

Estudos recentes [13,14] vem apresentado novas alternativas de construção de flywheels, denominados de terceira geração, que tem viabilidade econômica para aplicações em processos que necessitam suprimento contínuo de energia. A primeira geração é capaz de suportar grandes massas girantes, porém não possui grande densidade de armazenamento de energia e é feito para girar a velocidades constantes. A segunda geração, dotada de interfaces de eletrônica de potência é mais eficiente energeticamente e pode entregar a tensão na forma desejada, além de permitir velocidade variável da massa girante. A terceira geração tem características construtivas diferenciadas, como câmaras de vácuo e rolamentos magnéticos baseados em supercondutores. Esses avanços tornam possível o armazenamento de grandes pacotes de energia e alta potência, com alta capacidade de armazenamento em menos espaço [13].

O rolamento magnético a supercondutores além de não ter atrito, elimina a necessidade de sistemas de controle. Estudos com diferentes rolamentos mostram que de acordo com a construção dos blocos magnéticos, obtém-se forças de levitação maiores, que se revertem a uma maior capacidade de armazenamento e potência. Esse índices nos flywheels de 3ª geração chegam a ser maiores que os de baterias. Com os avanços construtivos, os flywheels de terceira geração são capazes de armazenar energia com densidades similares às das baterias, porém com uma saída de potência muito maior [14].

O custo de protótipos maiores de flywheels é especialmente competitivo para aplicações que requerem cargas e descargas frequentes. Isso se aplica especialmente às microrredes pois permite que seja comprada energia em períodos de baixa demanda e liberada no pico desta, permitindo a diminuição da potência instalada do sistema. Além disso, a rapidez de carga e descarga dos flywheels é muito mais rápida, sendo ideal para aplicações dinâmicas. A limitação das baterias para o armazenamento dinâmico é o alto tempo de carga e descarga e as altas perdas na conversão de energia. Ainda assim elas são mais adequadas para sua aplicação mais comum atualmente, o suprimento de energia em caso de falta para cargas de alta confiabilidade (como subestações), pois suas perdas estáticas são significativamente menores. A vida útil típica das baterias de alta potência é de aproximadamente 5 anos, muito menor que a dos flywheels que podem chegar a 25 anos, tornando-os mais atrativos a longo prazo. A tabela abaixo mostra características técnicas importantes a serem consideradas na escolha de baterias ou flywheels para mecanismos de armazenamento.

	Baterias	Flywheels
Perdas na conversão	Química → Elétrica: ~35%	Mecânica → Elétrica: ~10%
Perdas estáticas	0,05%	1 a 3%
Tempo de Recarga / Descarga	15 a 50 segundos	2,5 a 90 segundos
Vida útil	5 anos	25 anos

*Tabela 2: características técnicas de baterias e flywheels. [14]*

A adoção das microrredes tornaria os flywheels ainda mais viáveis economicamente, pois o armazenamento dinâmico de potência tem grande aplicabilidade nesse cenário. Há aplicações na qualidade de energia, devido às interfaces de eletrônica de potência que entregam uma tensão ideal para o sistema. Assim pode ser feita a regulação da frequência, do módulo da tensão, dos reativos e ainda a redução dos harmônicos na rede. O armazenamento de energia resguarda o cliente de faltas de curta duração na distribuição e transmissão, aumentando a confiabilidade do sistema existente. Finalmente, a adoção de flywheels viabilizaria ainda mais a geração através de fontes renováveis, armazenando a energia gerada durante períodos de baixa demanda e liberando-a nos quando a energia é mais cara, durante picos de demanda e faltas.



## **3 Integração da Geração Distribuída**

### **3.1 Introdução**

Os sistemas atuais de distribuição são constituídos por numerosos caminhos para escoamento do fluxo de potência. Cada um desses pontos, seja um gerador, um regulador de tensão ou uma carga, tem um comportamento variável que resulta em pequenas perturbações na qualidade de energia fornecida. Devido ao crescimento do uso de aparelhos sensíveis à essas perturbações, vem sendo cada vez mais comum a procura de sistemas de potência mais robustos, com capacidade de entregar potência com mais qualidade e confiabilidade.

Os recursos de geração distribuída, já apresentados no capítulo 2, são uma solução viável para atender essas necessidades. A utilização de plantas de calor e potência (cogeração) aumenta a eficiência energética do sistema e diminui o custo total do processo, uma vez que é mais barato gerar calor e aproveitar a eletricidade do que comprar combustível para cargas térmicas e elétricas separadamente. A geração distribuída também é vantajosa quando são utilizadas fontes renováveis e alternativas, principalmente para clientes distantes dos centros de consumo. Já nos grandes centros, essa geração local pode ser usada de forma intermitente, nos momentos de maior demanda, para diminuir o consumo de pico do cliente e assim permitir que a capacidade instalada do sistema atenda mais consumidores no horário mais crítico.

Além dos benefícios para o consumidor padrão, a geração distribuída permite que cargas prioritárias sejam alimentadas em caso de interrupção de fornecimento, utilizando o arranjo de uma microrrede desacoplada. Com a aplicação de interfaces eletrônicas (de potência) é possível ainda suprir às cargas prioritárias e/ou sensíveis com o máximo disponível de qualidade de tensão e frequência.

### **3.2 Distúrbios de Qualidade**

A tensão fornecida aos clientes é fornecida em AC, em uma frequência igual ou muito similar à gerada e numa magnitude pré-estabelecida. Desse modo, as cargas são planejadas para operar segundo um determinado padrão de fornecimento, do qual qualquer desvio causa uma queda de desempenho do equipamento. Na

prática, há uma série de distúrbios inerentes ao sistema que tiram a tensão fornecida dos padrões ideais. Esse tópico trata da natureza dessas perturbações e o que pode ser feito para minimizar seus efeitos:

- **Transitórios:** são os chamados picos de tensão, com duração de menos de um ciclo e variações de tensão e frequência na ordem de quilovolts e quilohertz. São causados por injeções muito rápidas de energia, como raios, troca de transformador em alimentadores de subestações, energização de banco de capacitores e interrupção de grandes cargas indutivas. Raios causam a maior variação de intensidade de tensão, mesmo caindo nas proximidades do circuito, devido a indução eletromagnética. Já a interrupção ou adição de cargas pode causar circuitos ressonantes devido aos harmônicos, amplificando também a magnitude do transitório. São disponíveis hoje no mercado dispositivos de proteção contra surtos capazes de minimizar os efeitos de transientes de alta frequência. Um aterramento adequado também ajuda a eliminação de ressonâncias e a efetividade dos pára-raios.
- **Sags e Swells de Tensão:** ocorre quando um transitório tem duração na ordem de segundos, ocorrem usualmente em caso de falta monofásica. Quando uma fase cai as outras aumentam a tensão para manter o fluxo, resultando em *sag* na fase que caiu e *swell* nas outras duas. A remoção de grandes cargas ou carga de um grande banco de capacitores também pode causar efeitos similares. As cargas mais afetadas são controladores industriais e PLC's, que necessitam alta qualidade de suprimento de energia para funcionar corretamente.
- **Sub e Sobretensões:** no caso de transitórios de longa duração, na ordem de minutos, o sistema entra em condição de subtensão ou sobretensão. Subtensões ocorrem com a perda da capacidade de geração, durante contingências de linha ou nas pontas dos alimentadores de distribuição devido à queda de tensão causada pela impedância da linha. Pode-se evitar a subtensão ajustando os tapes dos transformadores de distribuição, porém há o

risco de sobretensão nas cargas no início da linha que pode se agravar ainda mais no caso de restabelecimento da condição normal do sistema. A sobretensão também pode ocorrer no caso de defeitos nos transformadores e banco de capacitores de distribuição, e pode ser evitada aplicando dispositivos reguladores de tensão.

- Interrupção de fornecimento: caracteriza a ausência total de tensão nos alimentadores, causada por abertura de disjuntores em caso de falta ou por dano físico diretamente à rede de distribuição. No primeiro caso, o relé associado ao disjuntor ou religador tenta suprir novamente a linha algumas vezes, dependendo do padrão do equipamento e da concessionária. Se a falta persistir após essas tentativas automáticas é necessário averiguar a causa do defeito e tentar a realimentação posteriormente. As interrupções podem ser evitadas instalando dispositivos de armazenamento, como *flywheels*, ou por transferência automática de alimentador, que é o feito atualmente. No caso de longos períodos de interrupção a geração distribuída é a chave para suprir a potência necessária. Isolando-se a parte faltosa da rede pode-se operar no modo isolado do resto do sistema, mantendo o fornecimento através dos recursos de geração distribuída, como discutido anteriormente.
- Distorção harmônica: é quando o formato da onda de tensão transmitida aos clientes é diferente de uma senoide padrão, com desvios de frequências harmônicas da fundamental. Essa distorção ocorre porque cargas eletrônicas operam em formas de onda distorcidas, influenciando a tensão que alimenta todas as outras cargas. Os danos são causados principalmente a motores, diminuindo o fator de potência, aumentando atrito nos mancais e causando variações de torque. Também verifica-se o aquecimento excessivo de transformadores, e outras cargas lineares. Existem filtros de potência ativos capazes de filtrar a tensão utilizando retificadores de 12 pulsos baseados em eletrônica de potência, entregando uma tensão muito próxima a fundamental.

- Notches de tensão: são afundamentos quase instantâneos de tensão, causados por comutação de retificadores. Durante o chaveamento entre duas fases, quando uma liga e outra desliga, ocorre um curto circuito muito rápido que causa esse afundamento na tensão. Os danos causados são maiores quando a tensão vai a zero, pois alguns equipamentos e dispositivos de proteção são acionados para referência de tempo. Os notches podem causar falsos acionamentos desses dispositivos, causando a operação inadequada. Os danos podem ser evitados utilizando reatores que impedem que a tensão chegue a zero.

No caso de cargas domésticas e lineares, apesar de serem suscetíveis a perturbações na qualidade da energia, o sistema continua desempenhando suas funções adequadamente. Porém se tratando de plantas industriais, equipamentos de alta tecnologia e com grande quantidade de componentes eletrônicos e de comunicação, a qualidade ganha uma importância muito maior. Falhas em processos industriais contínuos e de fabricação são muito caras, compensando então um investimento maior em qualidade de energia. Instalações que lidam com comunicações, equipamentos médicos e de alta tecnologia como um todo também necessitam uma qualidade superior de energia. Dessa forma, o mercado vem se preocupando cada vez mais com a qualidade do fornecimento, abrindo um segmento novo de investimento e motivação para estudos em qualidade.

### **3.3 Alternativas de geração distribuída**

O aumento da qualidade e confiabilidade de energia através da geração distribuída é uma das principais características das microrredes. Os mecanismos de armazenamento são ideais para suprir pequenos distúrbios de tensão além de entregarem uma energia de qualidade superior. As fontes alternativas também entregam tensão senoidal sem distúrbios, sendo ideal para alimentar cargas prioritárias e sensíveis. Se aplicada em larga escala, a geração distribuída permite o suprimento de regiões inteiras sem depender da concessionária, aumentando a confiabilidade. O planejamento da geração também é facilitado, considerando que a

geração ficaria perto da carga e a capacidade instalada do sistema aumenta, assim como a eficiência.

Essas metas e vantagens são atingidas gradualmente, de acordo com o nível de integração da geração distribuída, equipamentos de eletrônica de potência e sistemas inteligentes. Alguns exemplos da aplicação da GD são:

1. Geração auxiliar: um gerador a gás ou diesel pode ser usado para proteger cargas comuns de longas interrupções, conectado à carga através de transferência automática, como mostrado na figura 12. Para cargas sensíveis no entanto, esse tipo de geração por si só não é suficiente, já que tem uma partida na ordem de 10 segundos para suprir potência ao sistema. O uso de motores à combustão também deve ser controlado por causa da alta emissão de gases tóxicos, contrariando a proposta das microrredes de serem ecologicamente corretas. São disponíveis no entanto combustíveis alternativos, como o biodiesel, que são menos poluentes ou reaproveitados de outros processos. Um controlador pode ser usado para seleccionar determinadas cargas mais importantes em detrimento de outras.

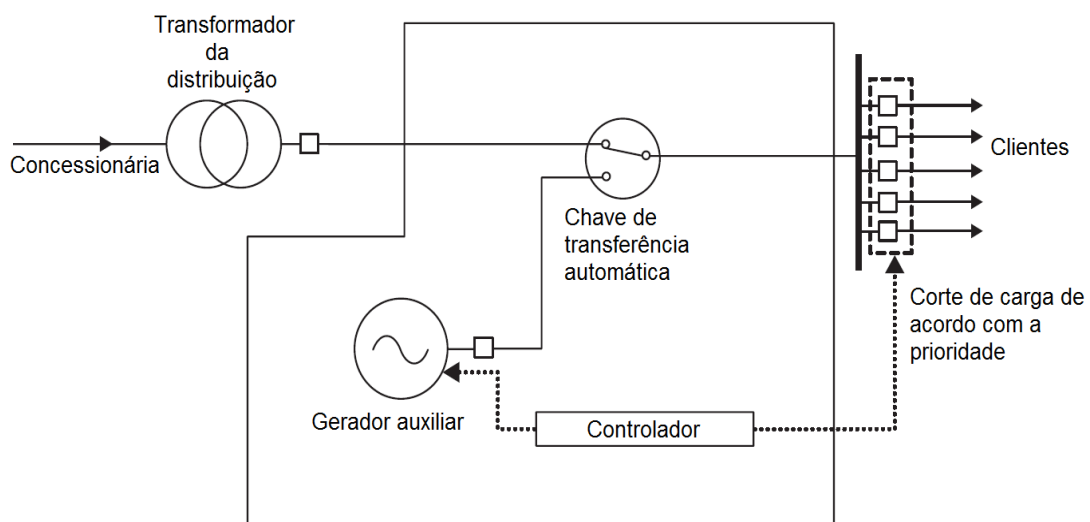


Figura 12: Esquema de geração auxiliar. [1]

2. Geração principal com cargas térmicas: em diversas ocasiões há cargas térmicas de tamanhos variados, desde fornos e centrais de condicionamento de ar até usinas siderúrgicas. Nesses casos é recomendável o uso de

microturbinas para aproveitamento do calor por cogeração. Além de ser mais econômico, as microturbinas geram energia em DC, necessitando um conversor mas entregando energia de alta qualidade. Essa energia pode ser usada para atender cargas prioritárias, operando em paralelismo com a rede conforme a demanda de calor.

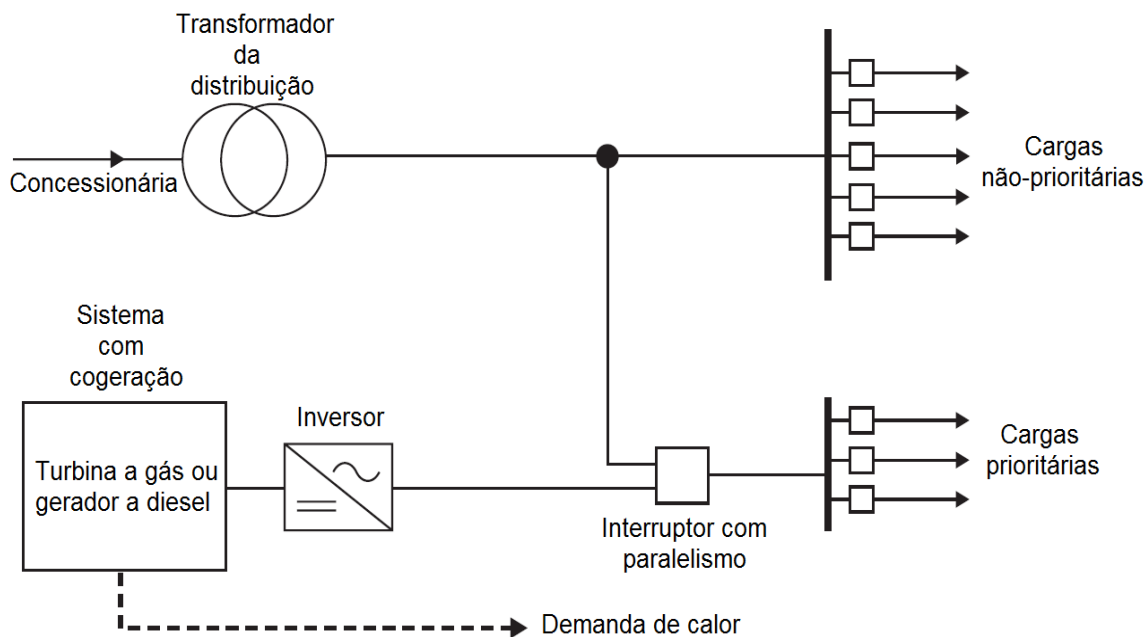


Figura 13: Esquema de geração paralela com cargas térmicas. [1]

3. Geração auxiliar com mecanismo de armazenamento: para cargas sensíveis e que não podem ter o fornecimento interrompido, é possível a utilização de um mecanismo de armazenamento, além da geração auxiliar. Um *flywheel* pode alimentar o sistema durante a partida, garantindo a não interrupção do fornecimento. Uma funcionalidade de controle seria utilizar o armazenamento para melhorar a qualidade da energia, além de controlar a transferência automática entre o motor e a concessionária e o corte de carga. Os geradores com combustível alternativo podem ser utilizados em horários de pico para expandir a capacidade do sistema por razões econômicas. Uma operação em horário de pico poderia ser comprada pela concessionária, já que o custo da energia é mais alto nesse período.

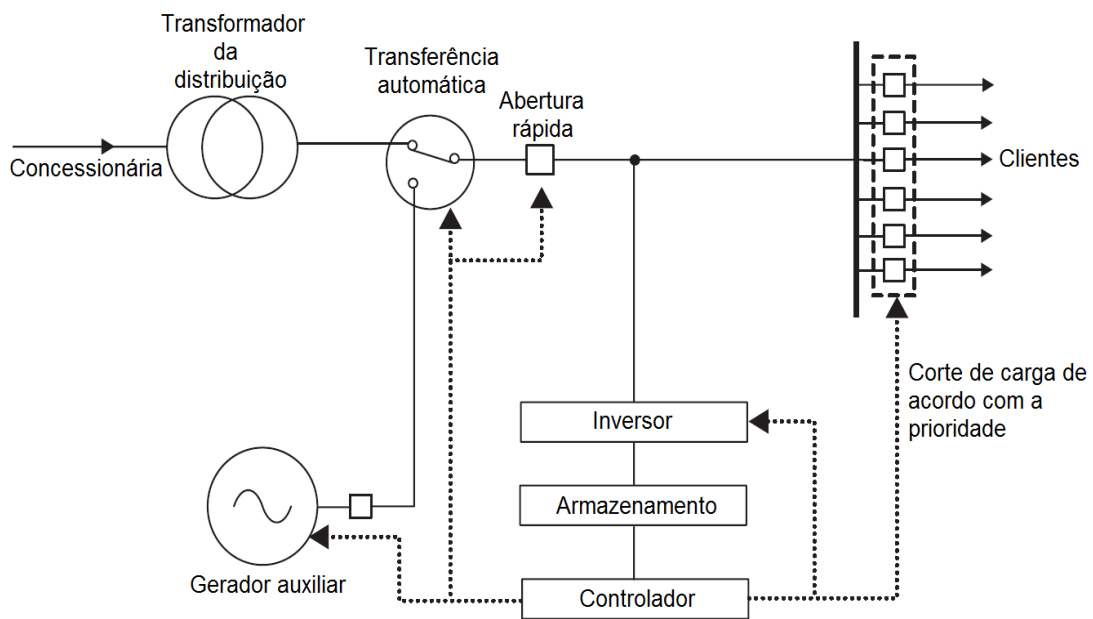


Figura 13: Esquema de geração auxiliar com armazenamento. [1]

4. Cargas térmicas constantes e operação ilhada: Para grandes pacotes de energia térmica com utilização constante, é possível separar uma parte da rede com dispositivo anti-ilhamento. Além dessa vantagem, toda a energia fornecida pela turbina será de boa qualidade, melhorando o desempenho das cargas da microrrede. Em caso de falta na rede a turbina continuaria alimentando o sistema separado da concessionária. Nesse arranjo há mais uma função do controle: determinar o momento adequado para a separação de parte ou todo o sistema.

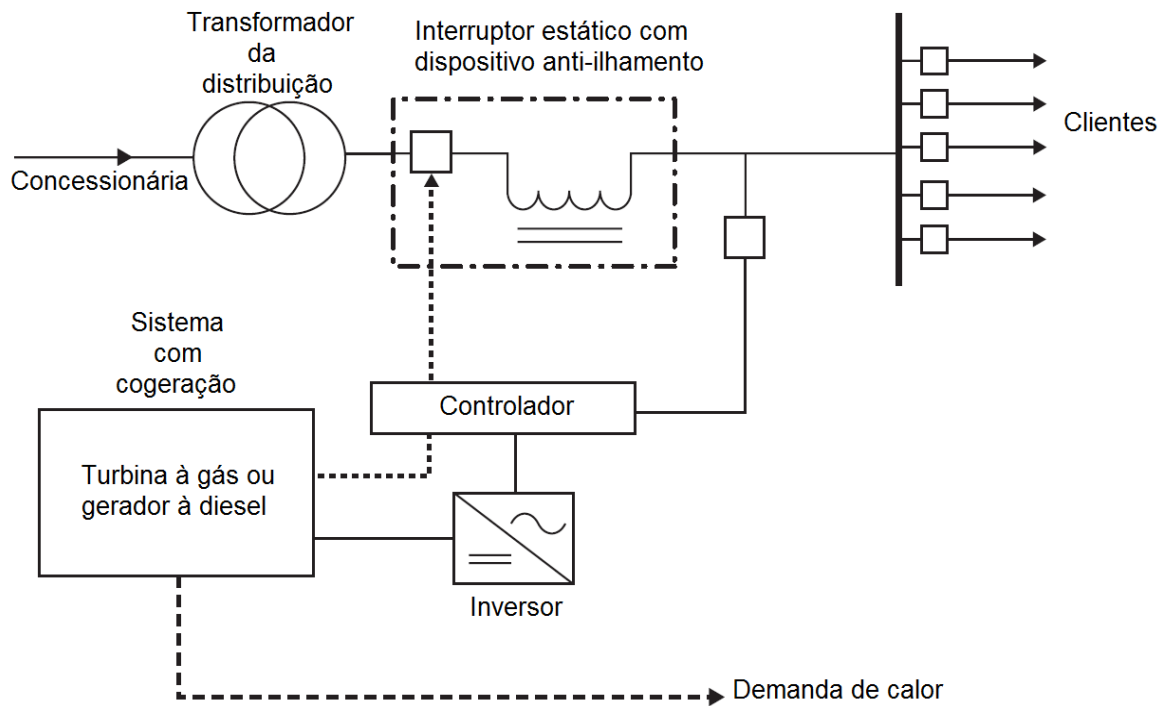
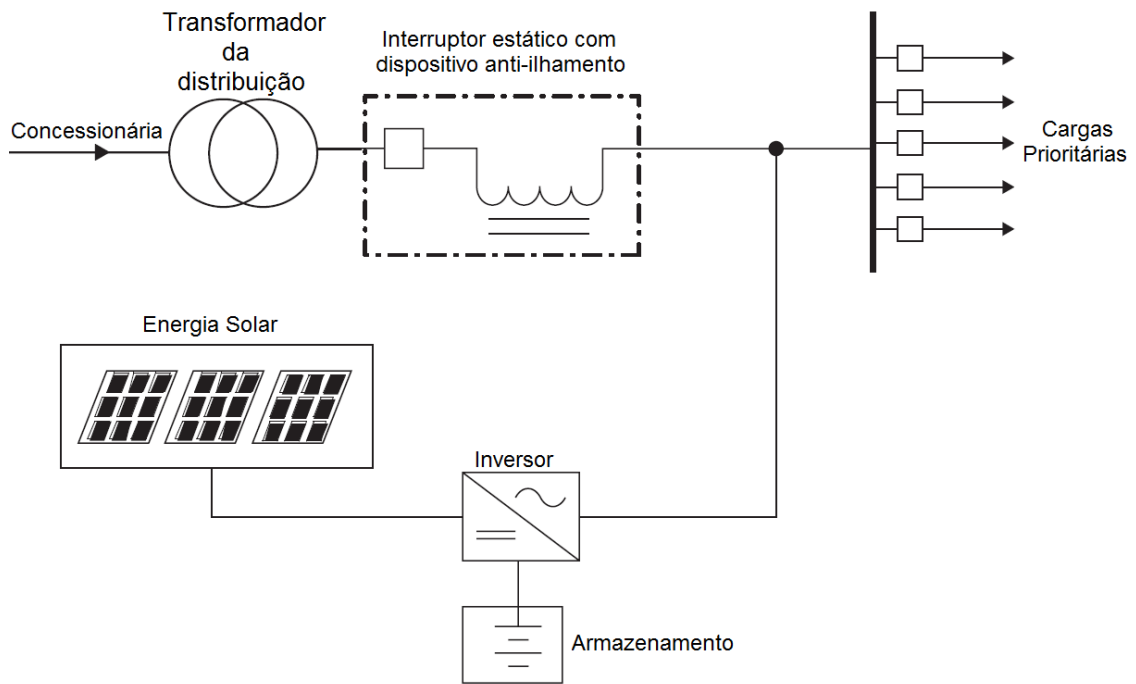


Figura 14: Cogeração de grande porte, capaz de ilhamento. [1]

5. Acoplamento de células solares: pode-se adicionar à quaisquer cargas prioritárias, células solares ligadas por um inversor à barra da microrrede, de modo a melhorar a qualidade da energia fornecida. A implementação pode ser feita com um filtro ativo de potência e um armazenamento por baterias, para dar suporte em caso de pequenas perturbações.





*Figura 15: Acoplamento de energia solar. [1]*

6. Acoplamento de geradores eólicos: Nesse caso, a eletrônica de potência deve ser ainda mais sofisticada, para permitir o paralelismo entre a geração eólica, o armazenamento e a distribuição das cargas em paralelo com o suprimento normal da concessionária. A energia gerada localmente é usada seletivamente, para as cargas mais importantes.

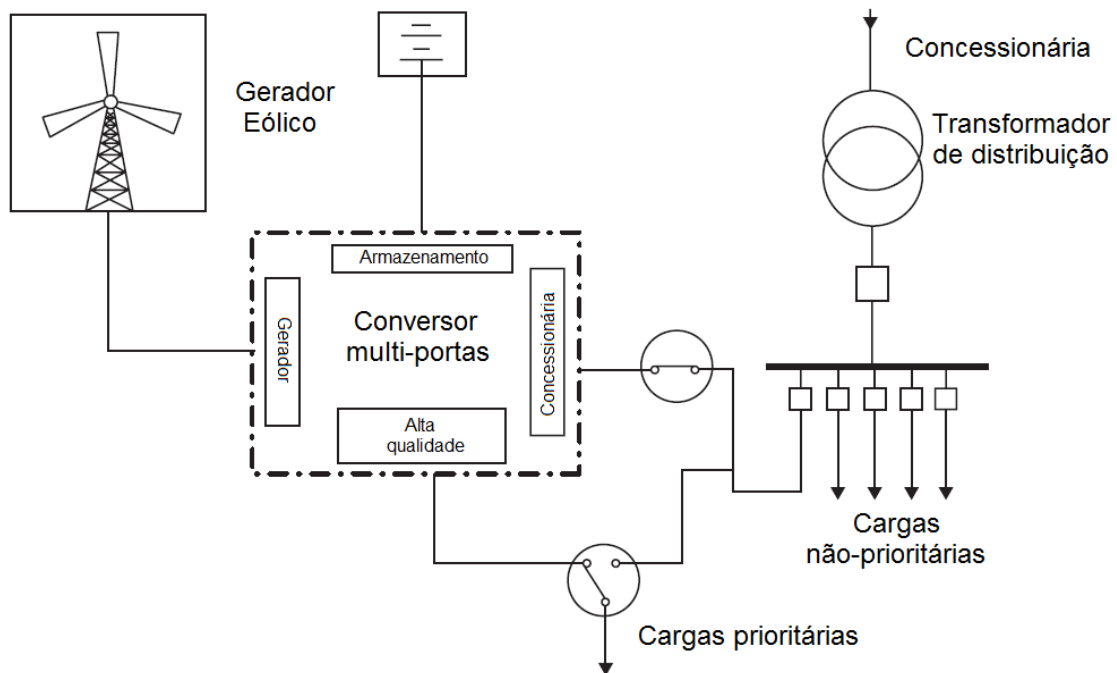
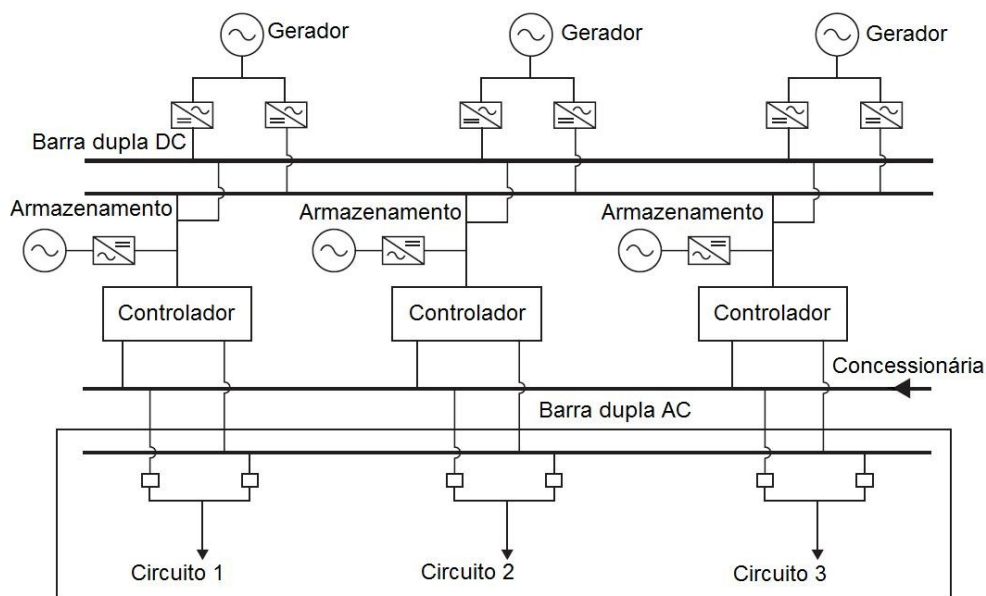


Figura 16: Acoplamento de gerador eólico. [1]

7. Sistema com barra dupla DC: Para uma operação independente da concessionária e com alta qualidade de energia, utiliza-se a geração distribuída como fonte principal. Os geradores eólicos, células solares, a combustíveis, turbinas de cogeração, entre outros, seriam ligados a um esquema de barra dupla DC, conectado a *flywheels*, e então a barra de consumo. Esta última estaria novamente em arranjo de barra dupla AC, sendo uma delas o ponto de acoplamento com a concessionária. Desse modo o sistema fica protegido contra faltas na geração distribuída, pois ela pode ser isolada da barra DC. É necessário um controle muito avançado nesse arranjo, capaz de controlar o fator de potência, o despacho econômico da GD, além das outras funcionalidades descritas nos outros arranjos.



*Figura 17: Sistema com barra dupla DC. [1]*

Percebe-se que a adoção das microrredes pode ser feita de forma gradual, começando com os primeiros arranjos e evoluindo de acordo com a viabilidade comercial e necessidade dos clientes. Para o sucesso de uma fonte de potência sem interrupção de fornecimento, deve-se atentar ao tempo de partida das turbinas e geradores à combustão, em relação à capacidade de manter-se somente pelos dispositivos de armazenamento. O paralelismo com a concessionária é outra questão delicada, esse modo de operação deve ser estudado cuidadosamente para que faltas na microrrede não afetem o sistema de distribuição. Por outro lado o paralelismo pode ser vantajoso para ambas as partes, pois a concessionária poderia comprar energia excedente da microrrede nos horários de pico, dados os incentivos comerciais adequados. A tendência é que clientes proprietários de geração distribuída possam vender a energia no mercado aberto e uma vez que isso aconteça, será uma grande motivação para o desenvolvimento de tecnologia em distribuição.

## **4 Características das Microrredes**

### **4.1 Introdução**

microrredes aparentam em relação ao sistema principal como unidades agregadas de cargas e micro-gerações, que podem ser associadas de forma a suprir cargas elevadas. Como dito no capítulo um, essas gerações são pequenas, em baixa/média tensão e se utilizam de fontes renováveis e cogeração, conforme discutido no capítulo dois. Há dois modos base de operação, conectadas ao sistema principal e operação isolada, e nesses dois modos há benefícios tanto para o sistema interligado quanto para os clientes. Nesse capítulo serão discutidos aspectos técnicos, econômicos e ambientais, no que concerne a utilização de microrredes, tocando aspectos de gerenciamento de recursos, utilização de plantas de calor e trabalho e reformas comerciais no mercado de eletricidade e gás para viabilidade das mesmas.

Boa utilização do calor desperdiçado em processos, com boa coordenação dos recursos produtores de trabalho e calor são requisitos fundamentais para a otimização da rede. Isso pode ser alcançado através da implantação de controladores locais nos recursos de geração e grandes cargas, coordenados por um controlador central que otimiza a produção de energia da microrrede.

Com o devido incentivo econômico, a participação das microrredes no mercado de gás e energia seria alta, devendo ser encorajada para que se atinja os benefícios desse modo de produção. Uma vez assegurada a viabilidade, surgiria uma gama de serviços auxiliares em eletricidade como controle de tensão através de regulação de reativo, reservas de potência para contingências e comércio de energia em pequena escala, acessível a qualquer cliente.

As mudanças no sistema devem levar em conta no preço da energia o grau de limpeza da energia, incentivando aquela proveniente de fontes renováveis e pouco emissoras de carbono. Esse controle seria feito pelas unidades de controle central que faria as decisões de despacho de geração levando em conta o fator ambiental.

## 4.2 Características Técnicas

De modo a maximizar o aproveitamento das *microrredes*, combinam-se redes de potência e calor, em BT ou MT, feitas para atender pequenas comunidades ou cargas, como universidades, hospitais, pequenos bairros residenciais ou comerciais. O foco é ter geração distribuída e fontes renováveis de energia, preferencialmente com fontes de calor por perto para aproveitar a cogeração [6]. A figura 18 representa um unifilar contendo geração distribuída em baixa e média e dispositivos de armazenamento:

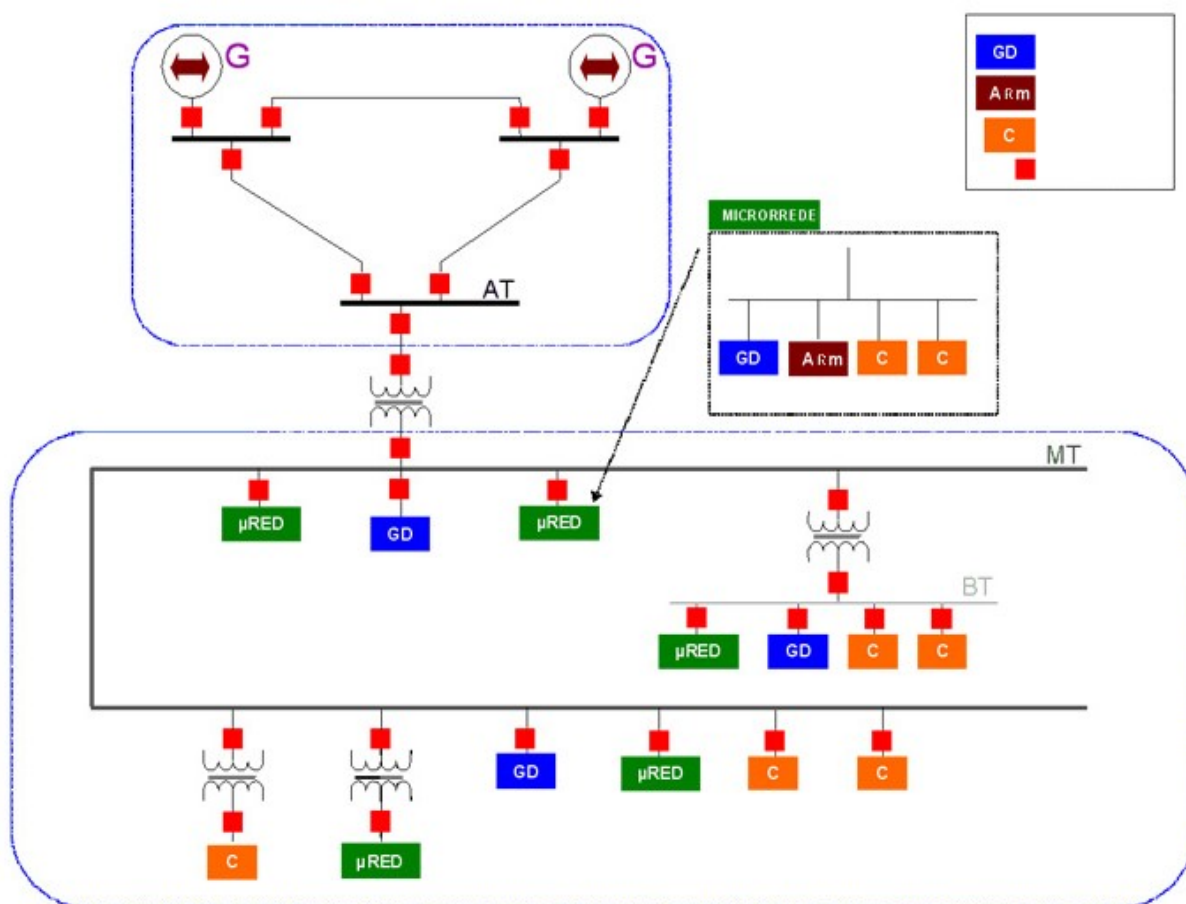


Figura 18: Esquema de ligação de Microrredes no sistema principal [6]

A *microrrede* ideal é vista do sistema como uma barra que pode ter tanto energia injetada quanto consumida, sem considerar que há uma série de equipamentos, controles e transitórios de geradores por trás daquele ponto [18]. Para os operadores é mais fácil de gerenciar o sistema dessa maneira, aumentando a confiabilidade do mesmo.

O desafio funcional das redes de distribuição ativas é a baixa confiabilidade e a dependência climática das fontes de energia renováveis, outra dificuldade é a falta de padrões regulatórios para operação dos *microrredes*, por se tratar de um modelo muito recente e não aplicado extensivamente. [2]

### 4.3 Comportamento

Durante falhas, os circuitos da grid que contem geradores podem se separar, alimentando cargas prioritárias enquanto as não prioritárias passam pela perturbação acopladas ao sistema principal [3]. No capítulo 6 será mostrando o comportamento do sistema acoplado ao sistema principal, passando por perturbações. Pode ser mostrado ate que ponto um sistema pode ser retornar à estabilidade pela ação de uma microrrede.

Em caso de ilhamento é necessário que seja feito um estudo de despacho de carga para decidir quais elementos do sistema ficam acoplados a cada rede. Isso acontece no módulo de gerenciamento de energia. Há um módulo local para cada gerador e um módulo geral para fazer o despacho. O controlador central deve garantir a otimização do sistema através de despacho econômico enquanto os locais se encarregam de suprir as demandas nas proximidades do gerador, por monitoramento das variáveis do sistema (como tensão). [1,3]

Entre as funções do controlador enquanto conectado ao sistema principal central estão:

- Monitoramento do sistema de despacho através de coleta de dados da rede
- Executar o despacho econômico das cargas, assim como compensação de reativo e estudo da estabilidade do sistema
- Assegurar operação sincronizada com o sistema principal administrando trocas de carga entre ele e a microrrede.

Quando o microrrede se desacopla do sistema principal, além das funções anteriores deve-se:

1. Manter as cargas prioritárias alimentadas, avaliando a disponibilidade de energia
2. Administrar sistemas de armazenamento de energia como megacapacitores, baterias e flywheels
3. Analisar a possibilidade de reconectar com a rede principal se for vantajoso

#### **4.4 Associação de Microrredes**

É difícil determinar uma potência padrão para uma microrrede. Um número prático seria em torno de 10 a 50MW, limitados pela disponibilidade de fontes alternativas na região e da densidade de carga a ser atendida. Limitantes inferiores seriam cada vez menores, na medida em que a tendência é a fragmentação da geração. Em regiões de alta densidade, a carga poderia ser seccionada e várias redes associadas de modo a atender demandas maiores, como cada rede alimentando um trecho de um sistema em anel de distribuição. Apesar de conceitualmente possível, são necessários controles avançados para coordenar os recursos de GD com a carga. Interações envolvendo conexão de ilhas geram transitórios e questões de sincronismo atualmente delicadas com a tecnologia convencional. O desenvolvimento de relés cada vez mais eficientes, das interfaces de eletrônica de potência e de mecanismos de armazenamento são decisivos para a proliferação da GD e das microrredes.

#### **4.5 Vantagens**

No campo ambiental há menos impacto que a geração convencional, devido a energia ser preferencialmente provida por fontes renováveis. Essas possuem menor emissão de gases poluentes, maior eficiência por meio de cogeração e plantas de aproveitamento de calor residual. A proximidade da carga gera menores perdas, aumentando mais ainda a eficiência do processo.

Na parte econômica e operacional temos a melhoria do perfil de tensão, devido a geração local e à maior facilidade de compensação de reativos e a redução da sobrecarga em sistemas de transmissão e distribuição. A figura 19 mostra como o perfil de tensão é melhorado na presença de geração distribuída.

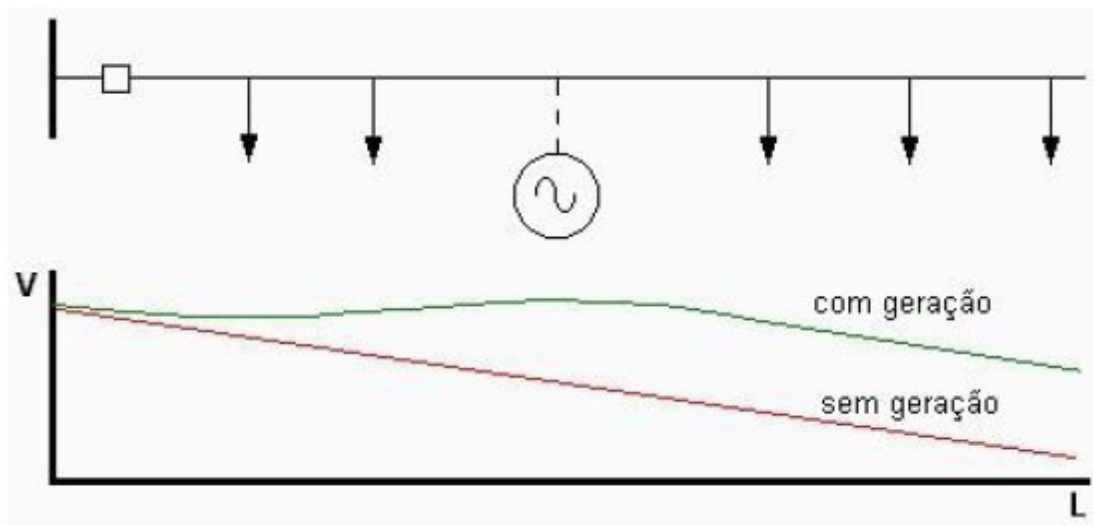


Figura 19 : Perfil de tensão em um alimentador [2]

A geração distribuída também permite o maior investimento em geração em detrimento a sistemas de transmissão e melhor dimensionamento dessa geração, combinando demandas de carga e geração.

A qualidade do serviço de energia melhora devido a descentralização do fornecimento, permitindo o recebimento de geração local ou pela transmissão. Essa flexibilidade também atenua o impacto negativo de quedas no sistema principal.

Alguns outros custos podem ser reduzidos através da adoção das microrredes, pelo aproveitamento de fontes de energia térmica, como grandes sistemas de refrigeração. E a cogeração levaria o aproveitamento energético a níveis de até 80% [4], que é muito bom comparado com 40% em média, obtidos no modelo atual. Outra redução seria nos custos de transporte da eletricidade, pois a geração local liberaria espaço nas linhas da concessionária. A presença de fornecedores independentes de eletricidade geraria uma concorrência que ajudaria a reduzir o custo de mercado da energia. Estariam disponíveis mais opções em caso de falha de um fornecedor e o mercado seria estimulado a produzir equipamentos mais eficientes e padronizados, tanto para os consumidores quanto para os fornecedores.

Um exemplo de como interligações de grids podem ser benéficos para investimentos é o direcionamento deles de diferentes concessionárias em fontes



geradoras ou qualquer outro equipamento que possa ser conectado a duas ou mais redes, distribuindo a energia conforme a necessidade de cada carga e investidor.

#### **4.6 Impacto na Utilização do Calor**

As fontes de energia das microrredes são caracterizadas por alta eficiência, e o calor gerado em excesso seria usado para atender demandas locais. Isso melhoraria significativamente a eficiência geral do sistema, que pode ser maior ainda com a implantação de mecanismos conservadores de calor.

Em termelétricas convencionais, 70% da energia oriunda da queima de combustíveis fósseis é perdida na forma de calor liberado na atmosfera e contribuindo para o efeito estufa. Aproximadamente mais 8% da energia do combustível é perdida na transmissão e distribuição da eletricidade, a energia gerada localmente eliminaria essas perdas, aumentando a eficiência da geração.

Esse calor desperdiçado pode ser usado para diversas aplicações: aquecedores de ambientes e de água, desumidificadores, turbinas a vapor, resfriadores por absorção e sistemas de armazenamento de calor. A adoção dessas aplicações pode recuperar até mais 30% da energia liberada, levando o processo a 80% de eficiência, quase o triplo dos tradicionais 30% [1]. A aplicação das microrredes incentiva a maior eficiência das plantas de geração, uma vez que podendo vender energia à concessionária a produção de eletricidade não fica limitada à demanda da planta. A operação desses recursos deve ser coordenada com a das outras fontes geradoras e a demanda de calor pode não ser coincidente com a de energia. Essa diferença de demandas pode ser solucionada utilizando-se mecanismos de armazenamento de calor [15], para gerar eletricidade no horário de pico e liberar o calor quando conveniente para a planta. Essa aplicação é especialmente atrativa no caso de aquecimento e resfriamento de ambientes ou água, em que há uma flexibilidade na demanda do calor. Desse modo a adoção das microrredes valoriza a utilização do calor rejeito e transforma demandas de calor em potenciais geradores de energia elétrica.

## 4.7 Impactos no Mercado

Para que a implementação das microrredes seja bem-sucedida, o mercado energético deve permitir incentivos para proprietários de microrredes e de seus recursos e serviços agregados. Esse incentivo pode ser alcançado se houver uma demanda pelos serviços auxiliares que podem ser prestados pela microrrede como regulação de tensão e controle de reativo, entre outras oportunidades. Os preços dos serviços devem variar conforme a necessidade do sistema pelos serviços prestados, sendo mais valorizados quando o sistema está em estados operativos mais frágeis, como no pico da demanda. O preço de mercado seria o fator principal no controle da geração de energia, colocando as dificuldades técnicas em segundo plano. [1,16]

A lucratividade da microrrede depende da sua capacidade de responder aos preços do mercado. Se essa interação for prejudicada devida a empecilhos técnicos ou econômicos os recursos continuariam operando apenas pela necessidade interna da rede local. A ocorrência dessas restrições seria prejudicial pois tornaria os preços muito voláteis. Assim deve-se dispor de uma flexibilidade em relação ao controle de geração e previsão de carga, ajudando os comercializadores a fazer decisões analisando dados periódicos da operação do sistema. Isso ajudaria na otimização do sistema de potência e na diminuição da necessidade de planejamento e controle centralizado.

Uma série de ferramentas foram desenvolvidas para uso dos comerciantes de energia para ajudar no gerenciamento dos recursos produtores de energia, determinando uma previsão horária de carga baseada no mercado em tempo real e em estados anteriores analisados historicamente. Essas incluem os sistemas SCADA, dispositivos de eletrônica de potência e centros de controle inteligente que serão descritos posteriormente. Essas ferramentas devem levar em conta alguns fatores, entre eles: desempenho de turbinas nas condições climáticas no momento, a demanda diária por energia elétrica e térmica, disponibilidade de combustível e as emissões de gases nocivos pelos geradores. Todos esses fatores contribuem na avaliação de viabilidade e preço da energia fornecida por um recurso de geração.

No modelo atual de mercado os consumidores não sentem as variações no preço da energia como os produtores, pois essas não são repassadas ao consumidor. A informação de custo necessária para estimular uma resposta do consumidor não é

disponível até que os controladores centrais das microrredes tenham acesso e participem dessa definição de preço de energia. Se as microrredes fossem implantadas no modelo atual, o preço da eletricidade seria muito sensível ao mercado de gás natural e muito volátil em relação aos investimentos. Como o mercado consumidor não possui uma interatividade grande em relação aos produtores, os controladores da microrrede deveriam possuir curvas de demanda flexíveis. Nessas poderiam ser feitos planos diários de despacho, baseados no clima e planos de processos térmicos do dia seguinte, servindo como dados para o controlador central.

A referência [17] é um estudo de consultoria sobre a aplicação de carros elétricos prestando serviço de regulação da rede. Nele podemos analisar duas tendências chave no estudo das microrredes; a interação do consumidor e de demandas pontuais para o benefício do sistema prestando serviços auxiliares e a importância de um controlador em tempo real que gerencie essas necessidades e comande os recursos geradores. Os testes mostraram que o tempo de resposta de um recurso gerador é menor que um segundo em 99% dos casos, tornando viável aplicações de controle em tempo real. As figuras 20 e 21 mostram um diagrama esquemático do funcionamento desse controle e a curva de demanda/geração de um desses carros elétricos ao longo do tempo.

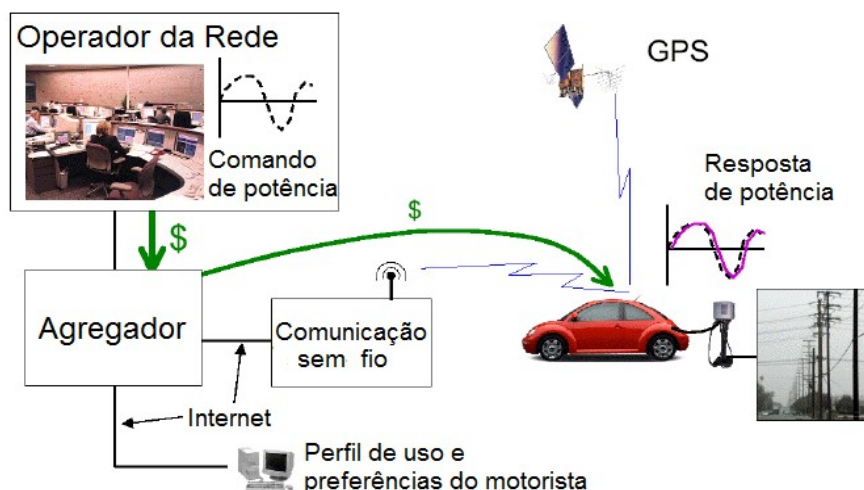


Figura 20: Diagrama esquemático de carros elétricos na regulação do sistema. [17]

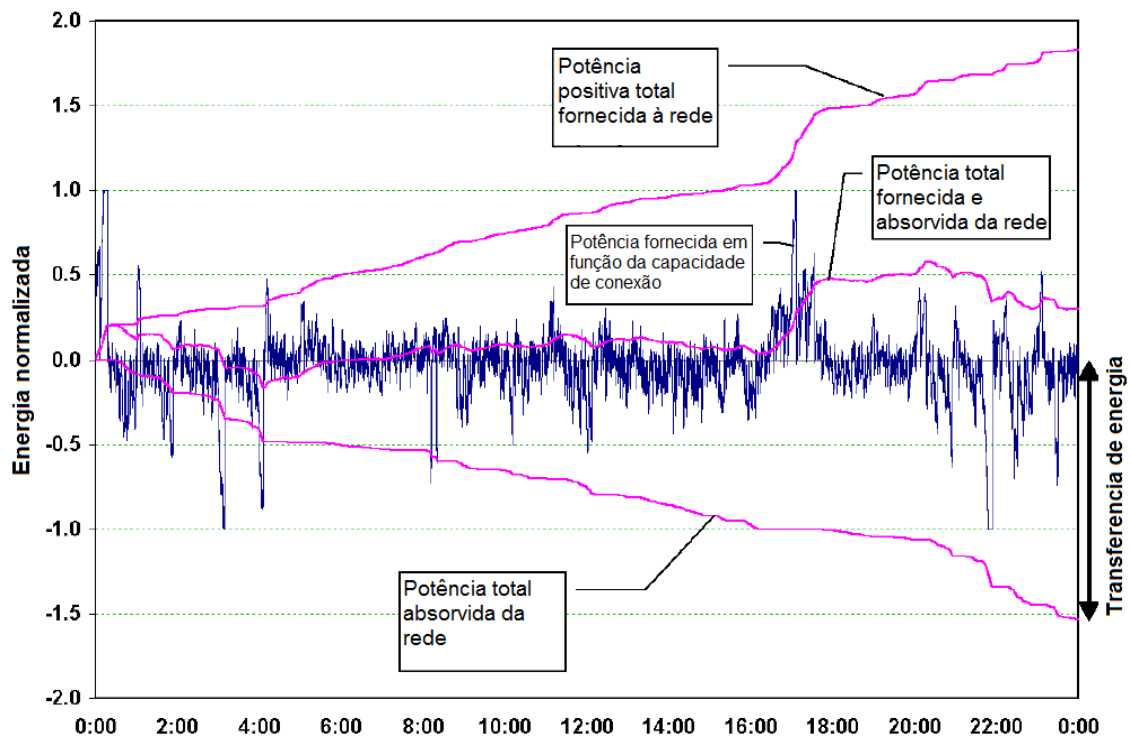


Figura 21: Demanda fornecida e absorvida pelo carro elétrico. [17]

As cargas ativas não são consideradas atualmente fontes de serviços auxiliares ao sistema de potência, se essa funcionalidade fosse implementada, as microrredes seriam ainda mais rentáveis economicamente, servindo como incentivo ao investimento. A redução do custo de transmissão também deveria ser considerada no lançamento das ofertas, pois a energia gerada localmente é mais eficiente e não congestionada ou sobrecarrega o sistema de transmissão. Como os mercados por serviços auxiliares ainda estão em fase embrionária, há uma falta de referência e parâmetro para estimar o valor financeiro desses serviços. Além disso, eles são de preço variável dependendo da condição do sistema e da facilidade de atender à demanda de qualidade.

#### 4.8 Impactos Ambientais

Sistemas com cogeração e outros recursos que emitem pouco ou menos carbono que a geração convencional ajudam na redução das emissões gasosas tóxicas e do efeito estufa. Afora a sensibilidade do mercado, a questão ambiental é uma das principais motivações para apoiar a adoção das microrredes.

Para operar de uma maneira sustentável, os controladores podem ser programados para tomar decisões minimizando a redução das emissões locais e do sistema. Se esses operadores levarem em conta a poluição no despacho, seus algoritmos de decisão deveriam ser mais complexos, isso pode ser evitado se os próprios preços de mercado fossem ajustados de forma justa dependendo da origem da energia, valorizando a que vem de fontes limpas. Para que esse ajuste seja feito adequadamente devem ser consideradas medições das emissões líquidas de gases, permitindo que o próprio preço da energia funcione como um medidor de poluição. Esses ajustes devem ser feitos em tempo real para que o preço seja justo, e deve levar em conta condições climáticas e o grau de poluição horária.

No que se refere a utilização de calor, a prioridade deve ser as demandas deste, em detrimento à carga elétrica, pois esta pode ser obtida por outros métodos renováveis e menos poluentes. Deve-se observar a emissão de gases também, não deixando que ultrapassem valores elevados para geração de calor que deve ser produzido preferencialmente de forma contínua e armazenado ou nos picos de demanda de eletricidade

## **5 SCADA em Redes de Distribuição Ativas**

### **5.1 Introdução**

Operadores de redes de distribuição utilizam o sistema de controle supervisório e aquisição de dados (SCADA) para gerenciar a rede de distribuição. O modelo de redes de distribuição ativa depende da implantação, custo e bom desempenho desses sistemas. Os recursos de geração distribuída, conforme ganham mais espaço, precisam de monitoramento mais eficiente e detalhado.

Esse capítulo trata de sistemas SCADA e alguns aspectos técnicos referentes à sua aplicação em microrredes.

### **5.2 Sistemas SCADA atualmente**

Sistemas baseados em operadores coordenam a comunicação e controle entre subestações remotas e a sala de controle. O sistema SCADA permite que seja mais fácil controlar disjuntores e seccionadoras remotamente.

Antigamente só era possível contar com comunicação por telefone e subestações tripuladas, porém com o avanço da tecnologia de comunicação foram implementados terminais remotos com mais medidores e maior largura de banda de comunicação. Atualmente subestações de média tensão ou superior podem contar com sistemas avançados de aquisição de dados, processamento desses, controle remoto, alarmes, bancos de dados, Interfaces Homem-Máquina e estimadores de carga, entre outras funções de alta complexidade.

Por possuir uma quantidade grande de informação a ser processada e transmitida, um gargalo no avanço da tecnologia SCADA é a evolução dos sistemas de comunicação. Atualmente essa estrutura é baseada em cabos elétricos de cobre, que são menos confiáveis que cabos de fibra ótica. Porém o uso de fibras pode encarecer muito um projeto inviabilizando-o, dependendo das distâncias à serem percorridas.

### 5.3 Controle de sistemas SCADA

Já que o sucesso das microrredes depende dos sistemas SCADA, é necessário que se faça uma otimização das informações à serem monitoradas. O aumento do volume de dados e distâncias a serem percorridas podem causar falta de confiabilidade. Para não ocorrer esse problema, é necessário que os recursos de gerenciamento de rede estejam localizados em posições estratégicas do sistema, em detrimento a salas de controle em centros de operação remota. Os tipos de controle podem ser centralizado ou distribuído.

O sistema centralizado controla as funções que lidam com o sistema de modo geral e a interação de suas partes, como despacho econômico e estimadores de carga. Nessa modalidade de controle, o maior desafio é a confiabilidade na comunicação pois as remotas localizadas à grandes distancias perto dos recursos de geração normalmente não tem sistemas sofisticados o suficiente para transmitir informação por grandes distancias com tempo de resposta decente. No entanto já foi provado que isso é possível no exemplo dos carros elétricos citado anteriormente. [17]

Sistemas SCADA menores localizados em subestações com geração e/ou em lugares distantes são centros de controle distribuído. Eles têm a vantagem de executar pouca variedade de funções em grande quantidade, de forma modular, de modo que seu custo diminui bastante em relação ao de sistemas centralizados que tem controles mais complexos. Dessa forma, o maior investimento nesse tipo de central seria o da própria comunicação com os sistemas de controle centralizado, viabilizando o controle intensivo economicamente. Numa microrrede, sistemas SCADA tem algumas aplicações específicas. Basicamente devem ser monitoradas a geração de energia elétrica em paralelo com a de calor, armazenamento e distribuição, atentando à níveis de tensão e reativos. Não é um sistema simples e são necessários muitos sinais diferentes para se executar um controle que leve em conta todas essas variáveis. No caso das microrredes a maioria dos controles é executado nas próprias estações locais e se refere a adaptações da geração às suas adjacências.

Não necessariamente o recurso de geração distribuída necessita de comunicação com outros elementos da rede, embora tal interação possa ocorrer. A geração deve ser regulada em reação aos estímulos em seu ponto de conexão, de

forma a não depender de ordens do controlador central para funcionar em harmonia com a rede. [16]

As operações locais são realizadas por terminais remotos ou dispositivos lógicos programáveis (PLC's). As funções gerais transmitidas pelo controlador central no entanto podem ajustar ou ignorar os sistemas locais dependendo da necessidade do operador do sistema. Por isso, uma função importante das estações locais é enviar as informações corretamente aos operadores para que esses tomem decisões corretamente, no caso de intervenção externa para operação mais econômica ou confiável.

#### **5.4 Funcionalidades SCADA em Microrredes**

Um sistema é melhor na medida em que é capaz de gerenciar mais aspectos da rede. Uma visão clara da topologia do sistema é necessária para integração com o campo e interatividade com o usuário, assim como um estimador de estados para a carga e simuladores de fluxo. Com equipamentos de medição avançados, medindo tensão nos barramentos, corrente nos alimentadores, perfis de carga dos consumidores e dados dos equipamentos desses, é possível obter altos índices de desempenho, operando o sistema no seu ponto ótimo. Assim obtém-se a supervisão da rede. Fatores que devem ser analisados para despachar energia em um sistema são os seguintes:

- Menor custo de geração;
- Eficiência da geração;
- Perdas nas linhas
- Qualidade de energia
- Exportação de potência
- Emissões da geração

Obtida a topologia do sistema e sabendo seu estado em tempo real, pode-se usar chaves telecomandadas para efetuar manobras em tempo real, isolando eventuais faltas no sistema ou operando-o de acordo com o corte de carga adequado. Utilizando os estimadores pode-se calcular a magnitude das faltas em determinado ponto do sistema e assim ajustar e coordenar os relés de proteção da rede. Sabendo os ajustes de proteção, pode-se calcular o risco de colocar um gerador em determinado lugar,



assim como analisar a confiabilidade para determinar o local mais apropriado da instalação do mesmo. Finalmente, tendo o sistema controlado, supervisionado e protegido, ajusta-se a carga de reativos para operação ótima minimizando as perdas.

Todas essas funções são necessárias para que seja viável a implantação de geração distribuída em um mercado em tempo real. Numa rede tão flexível é especialmente importante reajustar a proteção para cada condição operativa, pois as impedâncias mudam conforme a configuração da rede, variando assim as magnitudes de corrente de falta. Essa e outras aplicações são dependentes não somente do sistema de informação e controle, mas também dos equipamentos instalados na rede possuírem compatibilidade e grau de tecnologia para que essas funções sejam executadas.

Um aspecto importante é o tipo de controle a ser adotado, testes mostram [18] que a detecção de ilhamento é mais simples quando há somente geradores baseados em eletrônica de potência, ou somente rotacionais. Para controles com interfaces inversoras, é necessário que os controles sejam baseados em tensão ou frequência e que todos os recursos tenham o mesmo mecanismo de controle. Nos geradores rotacionais os controles disponíveis são baseados em potência ativa e reativa e novamente é necessário que sejam baseados na mesma variável. Em microrredes com os dois tipos de geração, situação que tende a ser cada vez mais comum, devem ser adotados os controles baseados em frequência e potência reativa, pois o ilhamento é detectado quando há o monitoramento dessas variáveis. Essa combinação de controles garante a operação dos recursos de geração independente uns dos outros. As medições são facilmente detectadas como ilhamento, levando o sistema a mudar seu modo de operação.

## **5.5 Componentes das Redes SCADA**

Nesse item será dada uma breve descrição dos componentes principais num sistema SCADA, são essas: Terminais Remotos, PLC's, o Controlador Central, as Interfaces Homem-Máquina(IHM) e a Estrutura de Comunicação. A figura 22 mostra alguns desses equipamentos.



Figura 22: Cabine Remota, PLC, IHM e medidor: Equipamentos de redes SCADA

- Terminais Remotos: Essas unidades são o meio de interação entre as unidades de geração/armazenamento reais e o sistema de controle central. São responsáveis por monitorar o sistema local e enviar informações pertinentes ao SCADA e aos PLC's para operações simples dos geradores em regime permanente.
- PLC's: São dispositivos eletrônicos usados em automação feitos para operar sob condições extremas de tensão temperatura e sujeira, de forma a minimizar ao máximo ruídos e vibrações. É a parte que processa as informações das remotas localmente e calcula as interações com o sistema baseado nessas leituras. São dotados de atuadores para executar esses controles através das remotas.
- Controlador Central: O “cérebro” do sistema SCADA é composto por servidores responsáveis pela aquisição e processamento da informação enviada pelo equipamento de campo. Os dados são dispostos para os operadores com esquemas gráficos e mensagens de suporte para auxiliar a tomada de decisões através das IHM's. Executa também cálculos que levam em conta a interação do sistema como um todo, por exemplo confiabilidade,

distribuição de carga e geração e análise de contingências. Todos seus sistemas possuem redundância em caso de falha de equipamentos ou manutenção de modo a nunca interromper a operação.

- IHM's: São os dispositivos que mostram aos operadores os dados processados para melhor tomada de decisões, facilitando a visualização e permitindo agilidade nas ações de controle. Como as funções de controle são muito complexas e processadas por dispositivos não muito amigáveis à humanos como PLC's e remotas, IHM's claras e eficientes são uma parte crucial do sistema SCADA.
- Estrutura de Comunicação: De modo geral são usados rádio, fibra ótica, conexões ethernet e por satélites para referência horária. Alguns protocolos são largamente utilizados, outros são específicos dependendo de cada fabricante. Os últimos tendem a desaparecer pois a tendência hoje é a escolha de cada fabricante pelo que ele produz melhor, não havendo a limitação de construir todo o sistema sob uma base de comunicação. Isso é bom pois facilita a expansão e manutenção dos equipamentos com protocolos mais gerais e minimiza a tendência de grandes fabricantes de dominar o mercado, facilitando a concorrência e assim incentivando uma melhora nos produtos.

## **6 Desafios em Proteção**

### **6.1 Introdução**

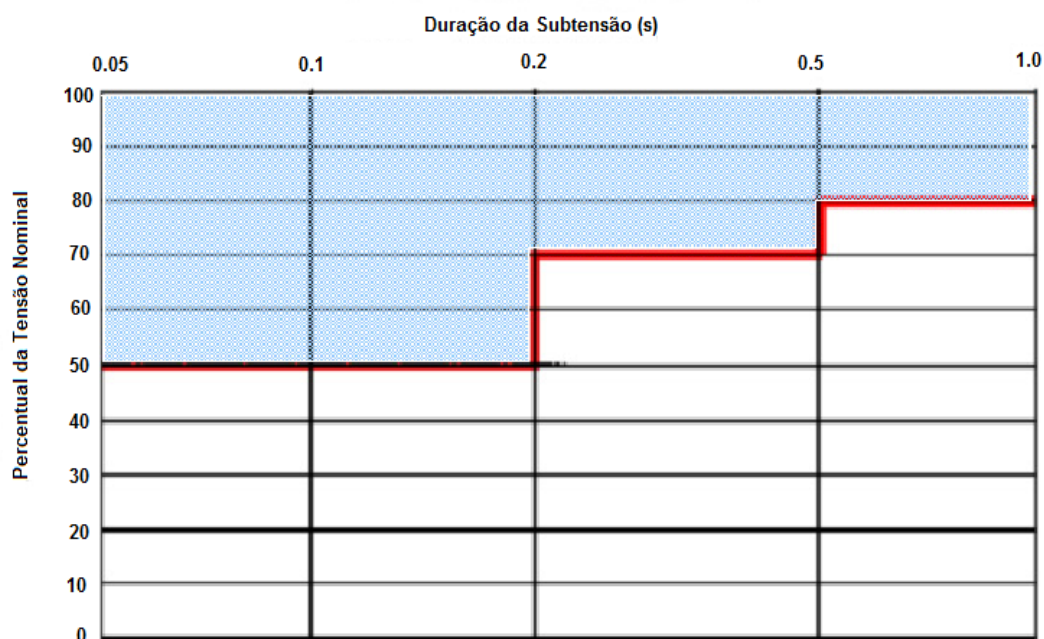
A proteção de microrredes é um desafio técnico, devido a alguns aspectos que não são considerados na proteção das redes convencionais, como as que existem hoje. Apesar de existir geração distribuída implantada em diversos locais, uma particularidade da geração nas redes de distribuição ativa abre uma possibilidade que até então não havia sido explorada. Os recursos de geração de uma microrrede, idealmente tem capacidade de suprir toda a demanda de energia localmente, podendo inclusive desconectar da rede principal em caso de falha ou perturbação desta. A decisão ou não da separação é um aspecto técnico delicado, que faz com que seja necessária uma análise precisa da situação do sistema, visto que separações e ilhamento desnecessários poderiam causar prejuízos e transtornos, como transitórios e quebra de sincronismo. A baixa potência da geração distribuída em comparação com o sistema principal torna difícil a detecção de correntes de curto quando o sistema está ilhado, sendo um desafio aos equipamentos atuais. Esse capítulo trata desses e outros desafios relacionados à proteção de microrredes.

O objetivo dos dispositivos de aquisição é enviar rapidamente a informação de operação dos geradores monitorada por microcontroladores remotos até um controlador central que atua na barra comum do sistema, operando os disjuntores ao longo dos alimentadores. Os controladores locais também atuam na detecção de faltas e desligamento dos geradores no caso de faltas internas no gerador, sempre reportando ao controlador central.

### **6.2 Ilhamento**

Uma microrrede em MT possui capacidade de geração de até 10MVA, que é muito pouco comparado ao porte da rede da concessionária. Apesar disso, deve haver capacidade de geração suficiente para atender no mínimo as cargas prioritárias, tornando possível a autonomia em relação à distribuidora. Um critério para avaliação da possibilidade de ilhamento é a certificação SEMI 47, desenvolvida nos Estados Unidos pelo EPRI (Electric Power Research Institute) [19], baseada no tempo que um

dispositivo semicondutor poderia ser submetido a um afundamento de tensão sem perder suas propriedades de semicondutividade. Esse critério é mais rígido que os praticados atualmente, por ser direcionado para a indústria de semicondutores em processos industriais, em casos que a perda de qualidade pode acarretar prejuízos na ordem de milhões. A figura 23 mostra a curva que delimita a região de operabilidade de um dispositivo semicondutor genérico.



*Figura 23: Curva característica da norma SEMI 47. [19]*

Além de atender critérios de qualidade, o controlador central deve analisar a necessidade real de ilhamento, evitando que seja feito desnecessariamente. Para isso deve-se levar em conta o trânsito de potência no ponto de acoplamento e a qualidade da energia que passa por esse ponto, tanto exportando quanto importando energia. Dependendo da capacidade de geração, o ilhamento pode prejudicar cargas não essenciais, prejudicando o consumidor, assim deve-se considerar a disponibilidade de reguladores de tensão e mecanismos de armazenamento de energia, para o caso de ilhamento de curta duração.

A referência [18] mostra resultados de simulações para casos de faltas de alta impedância e trifásicas e geradores com e sem inversores de potência, com o objetivo de avaliar a resposta da microrrede. O sistema testado consiste de dois

recursos de GD fornecendo 5,3MW, uma importação da rede primária de 1,4MW, essa carga dividida entre oito motores consumindo 1,5MW cada um. Os níveis de tensão da alimentação da concessionária são 115kV, da barra da microrrede e dos recursos de GD são de 13,8kV e os motores consomem em 4kV. Mais dados estão disponíveis na figura 24.

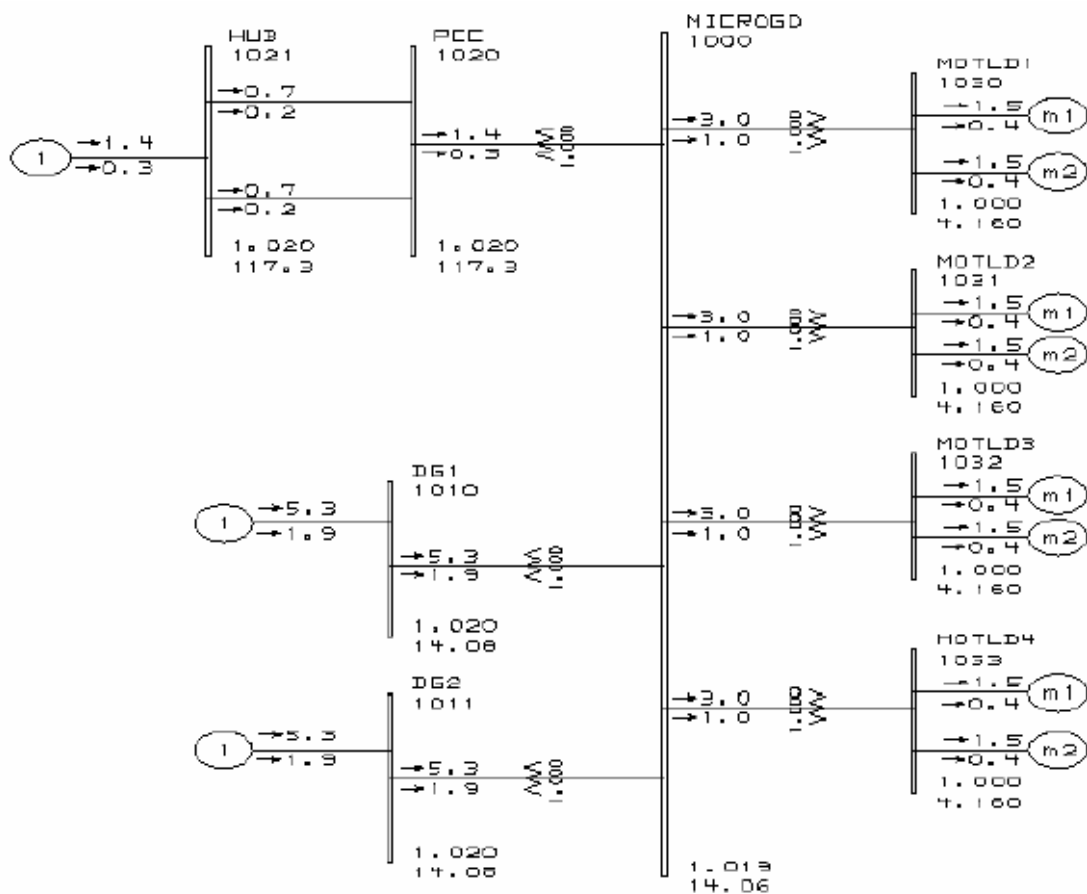


Figura 24: Sistema de teste. [18]

Observando os resultados percebemos que tomando certas precauções nos controles, como mostrado no capítulo anterior, a GD pode ser benéfica para a rede em relação a estabilidade. Os gráficos a seguir mostram a reação da rede às faltas, em casos com e sem desacoplamento da microrrede. A falta ocorre em uma das linhas da concessionária, tem duração de 16 ciclos e é eliminada abrindo a linha defeituosa.

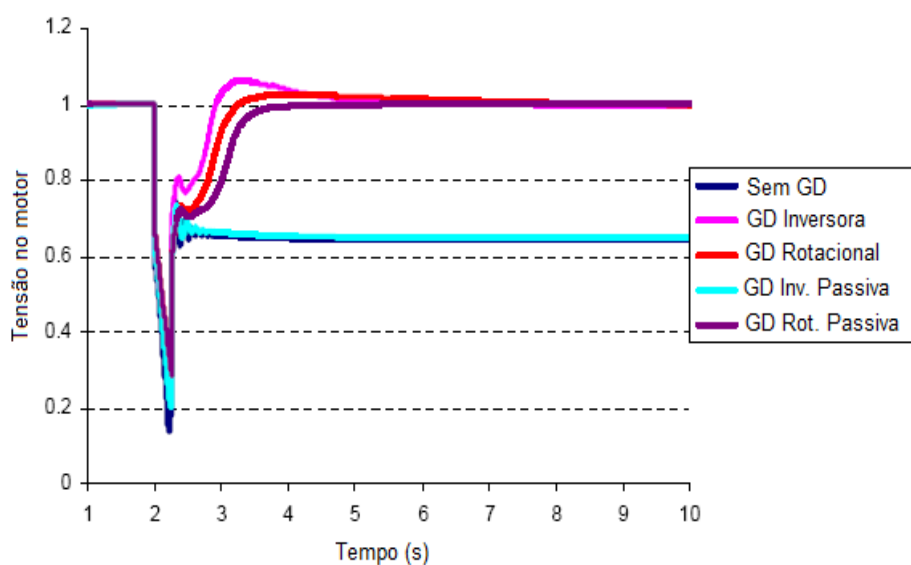


Figura 25: Resposta da microrrede à faltas, com diferentes tipos de controle, sem ilhamento. [18]

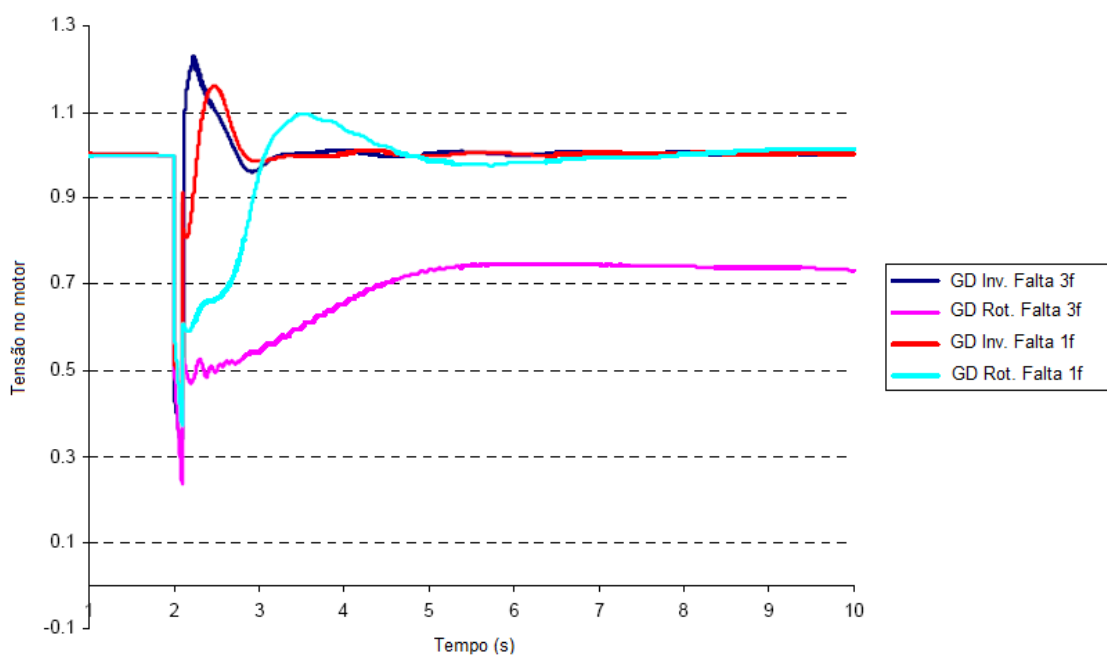


Figura 26: Tensão da carga em uma microrrede com ilhamento. [18]

Para restabelecer as condições de fornecimento, em cada caso aproximadamente metade da carga da microrrede teve de ser desligada. Cargas não prioritárias devem ser desligadas para assegurar a alimentação das prioritárias.

Em todos os casos percebem-se picos indesejáveis de acordo com a norma acima, sendo agressivo para sistema o caso de ilhamento da rede. Observa-se também que geradores com inversores causam picos maiores no sistema, mas são mais

responsivos em relação ao tempo de retorno à operação normal. Geradores mecânicos, apesar de serem mais suaves durante a falta, podem perder o sincronismo em faltas mais severas, como é o caso da falta trifásica (linha rosa). No entanto para os padrões praticados atualmente, o restabelecimento do serviço normal em aproximadamente um segundo é satisfatório e poderia ser melhorado aplicando dispositivos de armazenamento de energia e filtros ativos de potência.

### **6.3 Principais Desafios de Proteção**

Em modo Ilhado, há alguns aspectos importantes que aumentam a dificuldade da elaboração do sistema de proteção. Esses são a proteção de falta do sistema de distribuição, a dos recursos de GD e os requisitos para os transformadores de distribuição.

Os defeitos no sistema acoplado à microrrede, podem ser isolados por meio de fusíveis no ponto de acoplamento, que operam rapidamente com correntes na ordem de 20 a 50 p.u. e garantem essa proteção. Para faltas no sistema da própria microrrede operando em modo autônomo, a corrente de curto é consideravelmente menor, da ordem de 5 p.u., devido ao menor porte da geração, isso causa uma dificuldade na coordenação da proteção pois ora a rede está acoplada ora ilhada. Isso leva à necessidade de instalação de proteções adicionais e específicas, encarecendo o sistema. A solução ideal seria implantar relés mais sensíveis no lado de baixa tensão, permitindo o isolamento de cargas locais com defeito e oferecendo proteção aos defeitos na média tensão, sem provocar desligamentos supérfluos da geração local.

Para proteger a geração local é necessário conhecer bem as características da carga, de modo à não sobrecarregar os recursos de geração e manter um padrão mínimo de qualidade em caso de ilhamento. Em caso de falta de geração devem ser dispensadas cargas não prioritárias, sendo alimentadas pela concessionária. Para que esse controle seja executado adequadamente é necessário que as proteções anti-ilhamento presentes nos geradores sejam ignoradas em caso de desacoplamento do sistema principal. É necessário atentar ao excesso de geração, caso as cargas não prioritárias sejam desligadas da microrrede por falta de requisitos de qualidade, podendo levar à sobretensão e frequência. É especialmente complicado detectar faltas



dentro da microrrede em modo ilhado pois as correntes de falta quando são utilizados inversores estão limitadas a 2 p.u. aproximadamente. Assim as técnicas de detecção de falta devem ser baseadas em frequência, potência reativa ou outras variáveis que não envolvam altas correntes. Uma solução é a aplicação de relés diferenciais que detectam fugas de corrente em um determinado componente.

Os transformadores de distribuição devem atender a requisitos especiais para microrredes, levando em conta que a corrente de curto seria menor. A proteção atual de transformadores é baseada na corrente de curto do sistema principal, com correntes mais altas que as defeito na geração local. Desse modo, a proteção convencional não atua para os transformadores, deixando-os desprotegidos contra curtos dentro da microrrede.

#### **6.4 Requisitos de Aterramento**

O aterramento do neutro deve garantir escoamento de corrente de falta, com integridade do isolamento tanto no modo autônomo quanto em acoplado. Devem ser considerados na realização desse sistema os requisitos necessários para o aterramento da GD e da concessionária. Para isso deve-se analisar as opções de ligação delta ou estrela dos transformadores.

Nas subestações do sistema convencional de distribuição, os transformadores são solidamente aterrados em ambos os lados, sendo ligados em Y-Y. Os da rede secundária são  $\Delta$ -Y, aterrado em diversos pontos. A vantagem para esse sistema é que se uma falta fase-terra ocorre no lado da distribuidora, a microrrede se desconectaria pela detecção da falta no ponto de acoplamento, além de permitir o escoamento da corrente de sequência zero pelo aterramento do transformador. No entanto para faltas fase-terra a BT em  $\Delta$  é mais afetada do que se fosse ligada em Y, promovendo maiores afundamentos de tensão. A medição de defeitos em trafos Y-Y também é mais fácil e barata se comparada a transformadores com  $\Delta$ , pois nesses deve-se medir as correntes dos dois lados do trafo, enquanto com Y-Y a medição na BT já basta para determinar uma falta na microrrede. Também deve-se atentar às particularidades da GD, pois para geradores solidamente aterrados a corrente de falta seria muito alta no modo desacoplado.

Os relés de proteção devem estar bem coordenados, na seguinte sequência do desligamento mais rápido ao mais lento:

*Disjuntor da microrrede BT → Fusível à montante do trafo, no alimentador MT → Disjuntor principal no ponto de acoplamento da MT → Dispositivos ao longo do alimentador da concessionária → disjuntor da subestação da concessionária.*

Dependendo da severidade da falta, essa sequência de desligamentos pode ser alta demais, causando danos ao sistema. Daí vem a necessidade de proteções mais rápidas e sensíveis para se adequar a mais estágios de proteção, sendo mais rápida do que a existente atualmente nas distribuidoras, pois essa já é calculada para o limite máximo sem danos no sistema.

Esse é o principal desafio da proteção em microrredes, manter os padrões de qualidade da concessionária ao mesmo tempo em que coordena a proteção interna da microrrede. Para isso deve haver capacidade de trip mais rápida, detecção de correntes de curto de magnitude menor que as convencionais, ou desenvolvimento de métodos de proteção baseados em outras variáveis que não sobrecorrente. Essa rapidez na proteção também está limitada por dispositivos de comunicação, já que deve haver um esquema inteligente com um controlador central decidindo os trips mais adequados. Naturalmente tal evolução é mais cara e desafiadora tecnologicamente, representando todo um campo a ser pesquisado no futuro.

## **7 Microrredes e Economia**

### **7.1 Introdução**

Os capítulos anteriores analisaram os aspectos técnicos e ambientais das microrredes, mostrando que são uma boa alternativa ao modo atual de distribuição de potência. As questões econômicas, regulatórias e taxativas serão discutidas nesse capítulo, de forma a mostrar como as microrredes se tornariam viáveis financeiramente. A solução para a mudança é uma implementação gradual, tanto técnica quanto econômica.

O modelo atual vem sendo melhorado pela ANEEL, de forma a tornar a compra de energia mais justa e competitiva. Isso aponta uma tendência no Brasil de melhorar o sistema tarifário de energia, para os clientes e concessionárias. Para avanços maiores é necessária uma reestruturação do mercado que parece distante, uma vez que dificilmente as concessionárias abririam mão de suas áreas de concessão para agentes externos.

A economia proposta para as microrredes, inclui funcionalidades como preço da energia em tempo real, possibilidade de fluxo bilateral de acordo com o aumento de demanda e demanda por serviços auxiliares em qualidade de energia. Esses aspectos não são aplicados hoje e poderiam ser implantados com a viabilização das microrredes. A abertura dos serviços de eletricidade fomentaria a concorrência, levando a um serviço mais confiável, barato e eficiente, desde que tomadas certas precauções com o poder de mercado das grandes concessionárias.

### **7.2 Mercado Atual de Energia no Brasil**

No Brasil, temos a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) que é um órgão regulador vinculado ao ministério de minas e energia. Sua função é fiscalizar e ditar as regras que regem o comércio de energia em todos os níveis da produção. Até 1993, a tarifa de energia era única em todo território nacional. Esse fato certamente não reflete a realidade dos custos de energia para os clientes. O controle da tarifa era feito pelo custo da energia, o que não incentiva as concessionárias a operar de forma eficiente. Sua remuneração fica garantida, já que

independentemente do custo a tarifa era ajustada para gerar lucro, passando o ônus da ineficiência para o consumidor. Em 1995 as tarifas passaram a ser negociadas pelo preço da energia, de acordo com a rede de cada concessionária, no ano seguinte foi criada a ANEEL para lidar com essas questões. [20]

A partir daí, o preço da energia está num patamar mais particular, uma vez que são consideradas variáveis diversas, como densidade de carga, custos com a rede, investimentos necessários, entre outros fatores que levam o preço da energia a um valor mais próximo do custo. Na sua obrigação de levar energia aos clientes, a concessionária cobra uma tarifa que engloba os custos de compra de energia, de uso das redes de transmissão e distribuição e dos impostos pagos ao governo.

A energia era comprada de acordo com a conveniência da concessionária, com limite de preço dado pela ANEEL. A partir de 2004, surge uma lei [21] que determina a compra da energia em leilões públicos, esse avanço permitiu ainda mais competição, incentivando novamente a eficiência.

O advento das microrredes mudaria o cenário energético brasileiro, na medida que a geração distribuída e a procura por qualidade de energia faz com que as tarifas fiquem ainda mais diferenciadas. A concorrência livre, apesar de ser tendência, só seria realmente viável se os consumidores em BT pudessem comprar energia de outras fontes que não a concessionária. Esse processo seria realizado por agentes integradores, responsáveis por agregar as cargas de uma região (ex: microrrede) e adquirir essa energia em pacotes.

A parte mais viável das microrredes num cenário como o nosso, seria o aproveitamento das vantagens da GD para confiabilidade. Os geradores independentes da concessionária poderiam vender energia em horário de pico, caso houvesse tarifação em tempo real. Seriam necessários além de um operador nacional, vários operadores regionais de modo a evitar o congestionamento das vias elétricas. No caso de muitos investidores em GD, seria possível a criação de um mercado aberto de energia, facilitado por agregadores de carga e mercados de compra e venda. Assim o preço seria regulado por oferta e demanda de energia através de leilões diários e horários.

Novamente, um avanço no sentido de abrir o mercado necessitaria intervenção do governo através da ANEEL e o cenário atual monopolista não justifica

tal intervenção. Mesmo que o mercado fosse aberto haveria de ser formulada uma legislação que permitisse a venda de energia de pequenas gerações à distribuidora de forma que fosse vantajoso para ela, por não pagar custos de transmissão. O poder de mercado do monopólio no entanto poderia tirar os geradores distribuídos do mercado negando o acesso à rede. Nesse caso a implementação mais prática seria incentivando as próprias concessionárias a implantarem a GD, desviando os investimentos em transmissão para a geração local. Dessa maneira os clientes ainda aproveitariam vantagens regionais da rede para a confiabilidade e a distribuidora ofereceria um serviço melhor. Caberia então à ANEEL fixar tarifas justas, móveis e mais baratas de acordo com cada regional, baseadas na diminuição dos custos com transmissão.

Os investimentos nas diversas áreas como geração, expansão, transmissão e planejamento são ditados pela concessionária e repartidos. A forma com que essa divisão é feita atende os interesses dos acionistas, que tendem a escolher a forma mais lucrativa a curto prazo, para adquirir mais recursos. A escolha tende a ser pelo aumento da capacidade transmissão e distribuição, por serem obras mais curtas e com custo de implantação menor. O retorno é feito mais rapidamente, uma vez que é feito comprando energia de gerações centralizadas, levando ao aumento da procura dessas usinas.

Para mudar a tendência atual dos investimentos, poderia ser incentivado o uso da geração distribuída através de financiamentos para os recursos geradores. Se o custo desses fosse diluído, seria possível torná-los mais atraentes para os investidores, viabilizando e motivando a aplicação extensiva da geração distribuída e consequentemente das microrredes.

A medição já foi aprimorada ao redor do mundo e a implementação de medidores com tarifas diferenciadas no Brasil só aguarda a aprovação da ANEEL. Algumas empresas de distribuição como a Light e a Cemig investiram juntas 65 milhões de reais em pesquisa e desenvolvimento de programas de medição inteligente [22]. O piloto inclui testes em 3 mil residências no Rio de Janeiro e em Minas Gerais, de diferentes realidades econômicas. Os medidores inteligentes medirão a energia não somente em kWh mas também em reais, de modo que os consumidores poderão agir ativamente no consumo escolhendo usar a energia quando ela esteja mais barata. Além de medição inteligente, o projeto desenvolve tomadas inteligentes que desligam

aparelhos em modo de espera, diminuindo o consumo quando o aparelho está fora de uso.

Recentes consultas públicas da ANEEL [23] mostram o interesse do regulador em incentivar a GD de pequeno porte ligada diretamente a rede, diminuindo as barreiras e investigando as necessidades para tal instalação. Entre as questões levantadas estão a caracterização do pequeno gerador, com potência de geração menor que 10kW, sua ligação à rede, aspectos regulatórios e econômicos da interação entre as distribuidoras e o pequeno gerador. As normas para conexão de geradores à rede atualmente contemplam apenas geradores acima de 500kW, sendo necessária uma reforma nesse quesito. A máxima exportação de potência também deve ser regulada de forma a manter os fluxos no sistema da distribuidora unidirecionais, para viabilizar a implantação imediata da exportação de potência excedente. A questão técnica da ligação à rede é viável, uma vez que os inversores que fazem a interface entre o gerador e a rede possuem funções de proteção e controle integrados. A modularidade desses equipamentos em conjunto com geradores possibilita ainda maior popularização da pequena GD. Fatores regulatórios que podem contribuir ainda mais e estão em discussão são a tarifa reduzida para o pequeno gerador (tarifa “feed-in”) a medição bidirecional de energia e a compra obrigatória da energia de fontes renováveis pela concessionária. Uma vez que essas questões regulatórias sejam resolvidas, pode-se incentivar a pequena geração controlando índices econômicos de incentivo, regulando ou incentivando o pequeno gerador.

### **7.3 Competitividade Econômica das Microrredes**

A geração distribuída e aplicação de controle na rede torna o sistema mais econômico, e portanto mais lucrativo durante sua operação, além de oferecer novas oportunidades de negócio. A preocupação com o meio ambiente vem da natureza inerente aos recursos de geração distribuída, plantas menores e renováveis. A geração local dispensa custos com transmissão e minimiza os de distribuição, tornando a energia gerada mais barata. A utilização de cogeração em plantas que

geram calor, além de ser uma oportunidade de negócio como prestação de serviço, aumenta a rentabilidade do combustível utilizado. Aumentando a confiabilidade, diminuem os custos relacionados a indicadores de faltas, e de risco sobre o fornecimento da transmissão. Após determinado crescimento na procura dos recursos de geração distribuída, será possível produzi-los em larga escala, diminuindo o preço dos mesmos.

O sistema convencional tem as vantagens de ter baixo risco econômico e custo de implantação para os usuários finais, sendo novamente cabível, o subsídio na implantação de recursos de GD e mecanismos de armazenamento. Durante a operação, uma microrrede é similar a uma distribuidora, ambas seguem o despacho econômico para atender os clientes e compram e vendem energia em momentos diferentes. Além disso, a geração tem o mesmo perfil da atual, alto custo de base e baixo de variação para cargas de base e baixo custo de base mas alto de variação para períodos de ponta.

As características fundamentais no investimento das microrredes, que diferem das distribuidoras são a otimização das demandas de calor e eletricidade e o casamento entre a geração e a demanda. A eficiência maior ao se adotar esse modelo está na utilização completa dos combustíveis através de plantas de cogeração e no menor uso da transmissão, levando a menos perdas. Já a instalação de geração para suprir demandas locais se deve ao fato da capacidade de alimentar o sistema local no caso de falta ou má qualidade de suprimento. Ambas características levam a uma operação mais econômica e confiável do sistema, em comparação com o modelo atual de distribuição. A figura 27 ilustra o custo ótimo de um sistema baseado na confiabilidade. O preço da confiabilidade é de simples determinação, uma vez que os investimentos necessários na rede tem um preço determinado e índices de falha medidos, que permitem situar-se num ponto dessa curva. Já o custo da interrupção é de difícil determinação, uma vez que é difícil mensurar os malefícios causados pelas faltas de energia para os consumidores como um todo. Esse preço vai além dos kWh não vendidos: em determinadas instalações industriais, mesmo distorções na forma da tensão podem parar equipamentos, causando prejuízos de milhões de dólares; em instalações médicas, vidas humanas podem ser perdidas se determinados equipamentos pararem por curtos espaços de tempo.

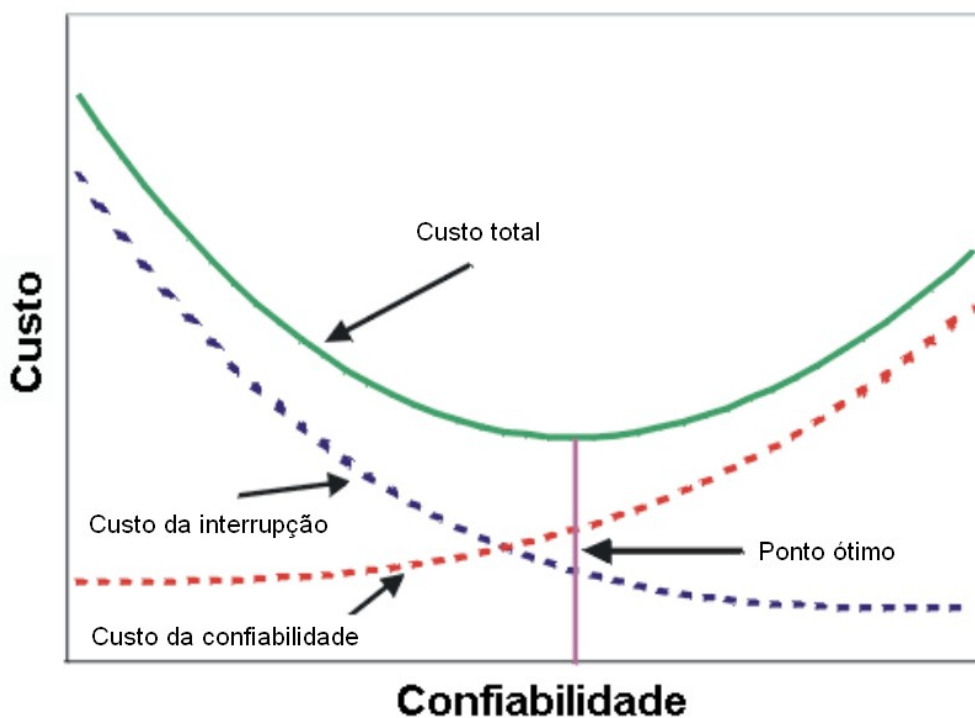


Figura 27: Preço da confiabilidade. [3]

Uma peculiaridade nas microrredes é a possibilidade de entregar tensões de diferentes qualidades ao longo do sistema, enquanto a geração central entrega sempre a mesma tensão. Isso assegura que cada consumidor invista na sua instalação de acordo com a confiabilidade desejada, sem depender necessariamente da concessionária.

#### 7.4 Serviços Auxiliares em Energia

As reformas recentes no mercado de energia revelam uma tendência à competitividade e comércio por leilões. Embora as funções da transmissão, geração e distribuição continuem as mesmas, novas formas de relação entre elas, não necessariamente verticais, seriam observadas num mercado aberto. A distribuição é a parte mais frágil e sujeita a faltas e perdas do sistema. Com o foco no cliente, ela receberia mais investimentos e alguma capacidade de geração, tornando o serviço melhor e mais rentável. Com o foco dos investimentos em escala menor, seria mais fácil para a entrada de novos agentes no mercado fornecendo serviços em energia.



Entre esses serviços estão a parte de qualidade, vinculada à natureza da tensão gerada por energia renovável ser retificada e com pouca interferência do sistema principal. Essas funções incluem ajuste de potência reativa, serviços relacionados a controle do recurso de geração, venda de energia em caso de falta e suporte de tensão à rede. Os recursos de geração característicos nas microrredes são dotados de interfaces de eletrônica de potência, capazes de entregar uma tensão desejada para a melhoria do sistema, utilizando filtros ativos de potência. A interface de eletrônica de potência também permite uma ligação e desligamento mais rápidos nos geradores, podendo suprir energia até em períodos curtos de falta. No caso de mecanismos de armazenamento presentes, a falta sequer seria percebida pelos clientes.

Com o aumento de agentes e a abertura do mercado, uma reforma tributária viabilizaria a concorrência. Para isso também é necessária a implantação de sistemas SCADA altamente avançados, com controles rápidos e eficientes, de modo a interagir com eficácia. O próprio fornecimento desses sistemas por si só já configura um serviço de informação.

## **7.5 Mercado Flexível e seus Agentes**

A participação direta de cada gerador no mercado pode não ser prática no caso de muitas unidades, principalmente durante a fase de implantação das microrredes. Assim surgiriam naturalmente prestadores de serviços e intermediários entre o mercado. Tratando-se de um volume muito grande de informações, é mais fácil para os controladores lidar com regiões e grupos de geradores do que cada um individualmente.

Os agregadores seriam responsáveis por compilar as informações de oferta e procura de energia e ofertar num mercado central de energia. Essas ofertas são sujeitas a verificação dos operadores do sistema local e da distribuição e a melhor e mais viável é escolhida. Para pequenos geradores é preferível realizar comércio de energia com ajuda de corretores experientes no mercado de energia, mas seria possível entrar diretamente no mercado, sem a intermediação de um agregador. A etapa do mercado de energia também poderia ser pulada, através de acordos bilaterais

entre produtores e consumidores, sendo no entanto necessária a liberação da transação pelos operadores. A agência de mercado poderia operar em diversos níveis de tensão, permitindo tanto a interação de produtores e consumidores maiores, vendendo energia em grandes pacotes, quanto de clientes domiciliares operando através de agregadores. A figura 28 mostra um fluxograma que ilustra como essas interações seriam feitas.

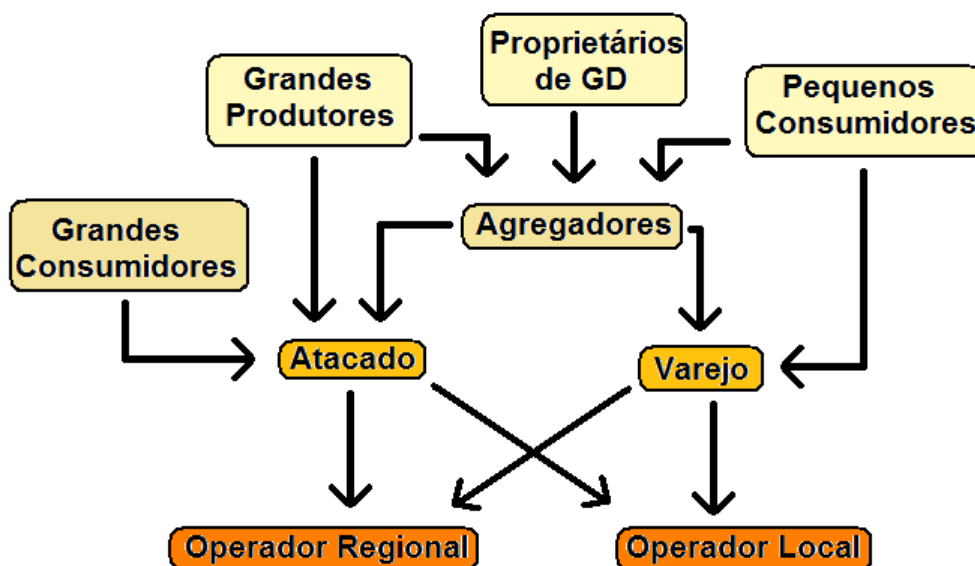


Figura 28: Mercado interativo. [1]

Um exemplo dessa interação seria durante uma falta, onde geradores com capacidade para suprir a carga apresentam propostas automaticamente a um controlador. Este avaliaria a mais econômica e viável tecnicamente e liberaria o despacho. Essa liberação seria feita levando em consideração somente o aspecto técnico, cabendo ao operador de mercado a viabilidade econômica considerando perdas, confiabilidade e natureza da energia. É uma operação não trivial que requer alta tecnologia de informação, inteligência e controle.

Para facilitar essas operações é conveniente a definição dos agentes envolvidos nesse processo, que surgiriam com a abertura do mercado. Essa definição deve ser feita por um órgão regulador, de modo a permitir a livre concorrência e a viabilidade de pequenas gerações, incentivando a energia limpa. Poderiam ser aplicados fatores de correção na tarifa de energias provenientes de fontes limpas, com incentivos fiscais ou subsídios para cobrir a diferença para o produtor. Um exemplo seria se durante uma transação de energia, se a geração for oriunda de uma fonte

renovável, o preço para o consumidor reduziria, e a diferença entre o preço real seria paga pelo governo ou rateada entre os demais consumidores.

## **7.6 Métodos de Tarifação**

A complexidade de um mercado aberto de energia é muito grande, há muitos organismos envolvidos e cada um quer sua parte do pagamento. Uma função essencial do órgão regulador é garantir que essa distribuição seja justa e permita a manutenção e o investimento em cada parte do sistema. Além de justa, deve ser considerado influenciar esses custos para promover a concorrência e encorajar a aplicação de geração alternativa, distribuída e de alta qualidade.

Numa transação de energia de um pequeno produtor até um pequeno consumidor, há participação de vários agentes citados no tópico anterior: agregadores duas vezes, pelo comprador e pelo fornecedor de energia, operadores internos das duas redes e do sistema de distribuição, o aluguel do sistema de distribuição e o operador de mercado. Essa taxação pode ser inibidora, uma vez que produtores e consumidores maiores, e portanto com mais tendência ao monopólio, podem fazer seus acordos e contratos diretamente com os clientes, pulando etapas do processo e reduzindo custos. A questão é que um mercado grande, com muitos agentes, tem alto custo de operação.

A pressão exercida por grandes grupos pode ser muito grande, especialmente quando este detém um gargalo no processo como as distribuidoras. Esse poder permite que elas escolham seus clientes e fornecedores, que no caso podem ser firmas afiliadas ou grupos de uma mesma empresa, em detrimento a geradores mais competitivos. Isso também pode acontecer no caso de um grupo grande de geradores controlar os preços através de cartéis, não ligando seus recursos para aumentar o preço da energia por eles fornecida. Essas manipulações de mercado podem ser controlados tarifando-se mais os produtores maiores e com um bom planejamento do sistema de operação e distribuição.

## 8 Exemplos de Microrredes

Neste capítulo serão apresentados exemplos de microrredes implementados atualmente, destacando suas principais características e vantagens sobre as redes convencionais.

### 8.1 Projeto Sendai [3]

Um centro de geração de energia foi produzido em 2004 no Japão, em uma região onde há cargas residenciais, e um campus de uma universidade com um hospital geriátrico. Havendo a necessidade de alta qualidade de energia para os equipamentos médicos sensíveis do hospital e para melhorar a qualidade da energia do local, foi construída uma instalação de melhoria de qualidade e a rede primária local foi separada do sistema principal. A figura 29 mostra a situação geográfica do local:



Figura 29: Mapa da região no entorno do Centro de Energia do Projeto Sendai

A geração principal desse centro de energia são dois geradores a gás de alta eficiência com potência instalada de 350kW cada, capazes de suprir a demanda do hospital, aumentando a confiabilidade deste. São utilizadas células combustíveis de 250kW e placas solares com 50kW de potência conectadas a uma barra DC para aumentar a qualidade da energia fornecida ao hospital em situações de regime e para reduzir os harmônicos da rede. Além disso há reguladores de tensão que mantêm esse valor adequado para os equipamentos das instalações do campus e para o sistema na área local. A rede é conectada em média tensão ao sistema principal por um ponto de acoplamento e as cargas convencionais recebem a qualidade da energia desse, pois não há necessidade de qualidade tão alta quanto a do hospital.

Esse exemplo mostra como as microrredes podem aumentar a confiabilidade e qualidade de cargas sensíveis e prioritárias, podendo ainda melhorar a qualidade de energia para os consumidores próximos. Nota-se também que nem toda instalação precisa do mesmo grau de qualidade de energia e que isso pode ser selecionado utilizando uma microrrede. A figura 30 é a foto de divulgação do centro de energia e mostra o centro e os equipamentos presentes.



*Figura 30: Foto do Centro de Energia do projeto Sendai.*



## 8.2 Rede Ativa de Orkney [5]

Esse exemplo se passa na Escócia, na região de Orkney, é um pequeno arquipélago no norte do país, tendo como principais fontes energéticas geradores eólicos e a gás, usinas maremotrizes e de energia das ondas. A ligação com o sistema principal é feita por cabos submarinos e dois transformadores de 20MVA cada, a carga da ilha hoje não passa de 32MW, mas a capacidade de geração está esgotada. A figura 31 mostra as ilhas e a rede elétrica local.

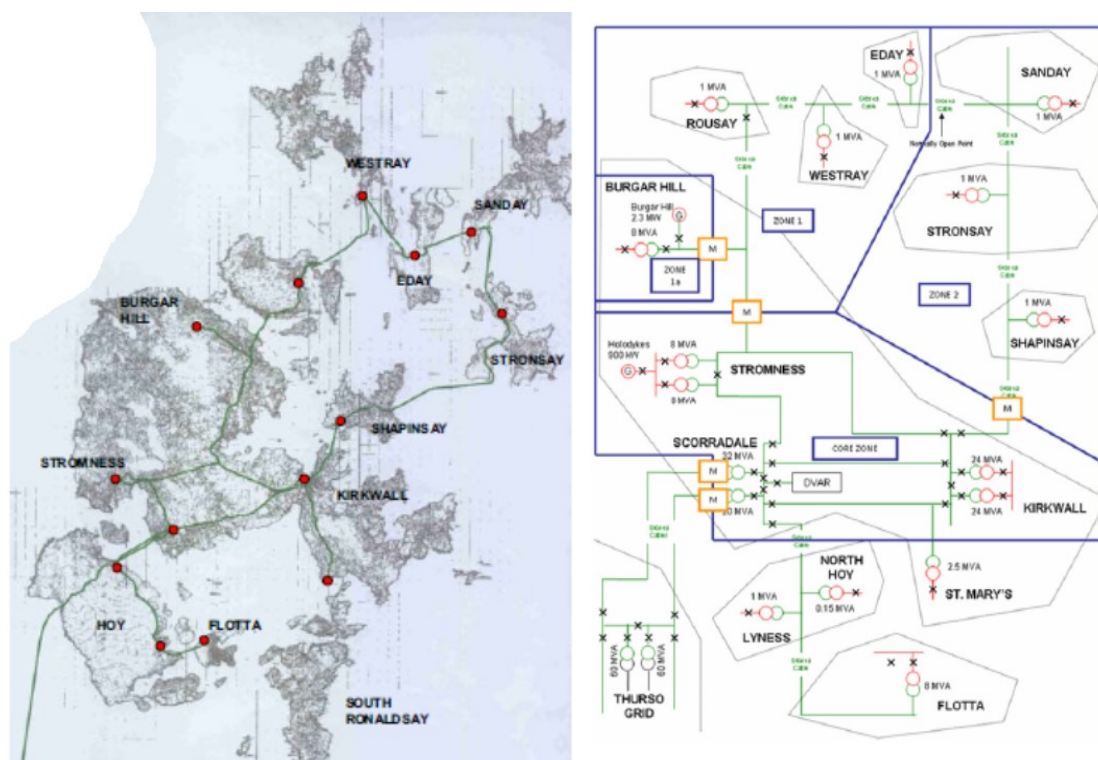


Figura 31: Arquipélago e rede local da região de Orkney

O interessante nesse projeto é o sistema SCADA, altamente avançado e a rede de MT em 33kV ao redor das ilhas interligando várias microrredes. O esquema de controle é composto por um controlador central e várias unidades distribuídas e módulos específicos com suas respectivas funções. O módulo central recebe medidas, executa estimativas e administra a interface SCADA. O controlador de medição coleta corrente, fluxo de potência e o estado dos disjuntores e passa para o controlador central. Já os controladores locais da geração recebem o ponto de operação calculado pelo controlador central e o aplica às máquinas, além de monitorá-las.

Esse exemplo mostra como um ambiente limitado em recursos energéticos pode ser beneficiado pelas microrredes, aplicando-se a geração distribuída e os controladores utilizando sistema SCADA, para aumento de confiabilidade e independência do sistema principal.

### **8.3 Iniciativa Elétrica Galvin [24]**

Em 2004 o ex-presidente da Motorola Bob Galvin lançou a Iniciativa Elétrica Galvin, inspirado em uma grande falta de energia que atingiu mais de 50 milhões de clientes no nordeste dos EUA e Canadá para divulgar o modelo do chamado 'sistema elétrico perfeito' nos EUA, esse sistema perfeito são as microrredes. A partir de então, através dessa organização, vem crescendo o número de incentivos comerciais sendo feitos projetos e políticas no sentido de facilitar a inclusão das microrredes para uma maior satisfação do cliente, menor custo e melhor operabilidade.

Essa iniciativa consiste em realizar uma reforma regulatória, desenvolver o sistema de potência perfeito e tornar o consumidor consciente da qualidade e preço da energia sendo consumida por ele. A reforma regulatória tem como objetivo abrir o mercado de energia para políticas voltadas para o consumidor, focando na melhora do serviço através de investimentos empresariais que gerariam bom retorno aos investidores.

O sistema de potência perfeito é um objetivo da iniciativa, através das microrredes. Duas delas foram feitas de modo a demonstrar o potencial desse modo de distribuição, uma no Instituto Tecnológico de Illinois e outra numa comunidade em Novo México. Essas obras levaram a investimentos de acionistas em outros lugares com microrredes em desenvolvimento, apresentando e exigindo aos acionistas os critérios para o bom funcionamento das microrredes.

Para conscientizar os clientes, políticos e tomadores de decisão das vantagens das microrredes, vem sendo feita uma campanha de propaganda a nível nacional, mostrando os benefícios técnicos e econômicos das microrredes de forma a influenciar a população a exigir melhores serviços em eletricidade. Essa popularidade

para a questão energética é excelente para atrair investimentos e fomentar o desenvolvimento do setor.

A figura 32 mostra algumas propagandas relacionadas ao desenvolvimento das microrredes.



Figura 32: Propagandas visando divulgar as vantagens das microrredes

Esse exemplo mostra que para o sucesso das microrredes, além de desafios técnicos existem desafios regulatórios e financeiros e que a ampla divulgação desse modelo é necessária para vencer esses desafios, podendo inclusive obter incentivos para a aplicação de melhorias no sistema elétrico e aplicação das microrredes.

#### 8.4 Distribuidoras Adotando Sistemas SCADA [25,26]

Vem crescendo a procura de sistemas inteligentes para diminuição de perdas e aumento da monitoração do sistema. As soluções em TI vem se tornando cada vez



mais viáveis para as distribuidoras, que obtém um retorno financeiro maior e uma qualidade melhor de operação. As vantagens técnicas e operativas propiciadas pelos sistemas SCADA avançados, mesmo que não direcionadas para uma abertura do mercado, já estão sendo implementadas para redução de custos.

Esses sistemas tem sido implantados globalmente, em escalas diferentes dependendo da modernidade da rede de distribuição. Em 2007, no Panamá e na Colômbia, as distribuidoras ELEKTRA e EMCALI implantaram sistemas SCADA com objetivo de aumentar a qualidade do serviço através do monitoramento de faltas. Essa detecção facilita um tempo menor de resposta das equipes de operação, para atender clientes na ordem de 300 a 400 mil por concessionária. Esse monitoramento também permite planejar o sistema para um funcionamento otimizado.

Há aplicações em escala muito maior, como é o exemplo da companhia Ghizou Power, uma das duas estatais fornecedoras de energia na china. A companhia atende a mais de 40 milhões de clientes, e começou em 2009 um processo de modernização que inclui todas as funcionalidades SCADA descritas no capítulo 5.

Sistemas que já contém geração distribuída também podem se beneficiar de controles avançados, como é o caso da companhia britânica BC Hydro. Ela possui 30 geradores hidroelétricos e três usinas a gás natural que produzem anualmente em torno de 50GWh. Em 2009 foi iniciada uma modernização do sistema de forma a operá-lo mais eficientemente e viabilizar a instalação de ainda mais geradores distribuídos.

A distribuidora americana Progress Power investiu em informação para aumentar a eficiência dos processos de geração, aplicando além da GD baseada em energia renovável, programas de eficiência energética. Para viabilizar o controle de tais métodos, além do SCADA, foram feitos investimentos pesados na qualidade da rede distribuidora, aumentando ainda mais a eficiência e operabilidade da rede.

A aplicação desses sistemas não contempla somente a operação em tempo real, através da modelagem de perfis de carga, a empresa italiana Enel pode prever sua demanda de ponta. Para isso são usados dados históricos que representam partes do sistema, podendo assim operá-lo como se fossem diferentes regiões. A implantação dos centros de controle começou em 2006, com o objetivo de redução de perdas e operação ótima do sistema. Através dessas medidas já foi constatada uma economia

de 144GWh por ano, representando uma diminuição na emissão de 75 toneladas de CO<sup>2</sup> e uma economia de quase 6 milhões de Euros, anualmente.

No exemplo da Enel, foi verificada uma economia proveniente de boa operação e redução de perdas, gerando benefícios aos acionistas e ao meio ambiente. Essas aplicações mostram que apesar do mercado continuar fechado a novos investidores, as vantagens técnicas da geração distribuída já estão sendo aproveitadas pelas concessionárias.

## 9 Conclusões

Analisando os aspectos práticos e operacionais das microrredes, pode-se concluir que o modelo clássico de fornecimento de energia como temos hoje, apesar de ter funcionado até agora, não é mais a única opção. Os avanços na tecnologia de proteção e controle nos permitem aprimorar o que temos para criar benefícios técnicos, econômicos e ambientais.

Na parte técnica, as microrredes são vantajosas pois apresentam maior confiabilidade por ter mais caminhos para o fluxo de potência no modo acoplado ao sistema, permitindo suprir áreas em contingência que poderiam ter que ser desligadas devido a altas demandas. A maior vantagem no entanto é a independência em relação ao sistema interligado, podendo operar em modo isolado no caso de grandes perturbações ou contingências que afetariam a qualidade do fornecimento para seus clientes. Nos dois casos, a geração local de energia ajuda a descongestionar o sistema de transmissão, minimizando as perdas do sistema.

Os benefícios no mercado estão relacionados ao fato de as unidades de geração serem de menor porte, permitindo investidores menores e em maior quantidade, abrindo o mercado de energia à novos agentes. A necessidade por serviços auxiliares como regulação de tensão ou reativo lança novas modalidades de comércio no mercado energético e aumenta a concorrência e assim a exigência do consumidor por um serviço de qualidade. Para que seja implantado no entanto, é necessária uma reforma comercial, que valorize a energia oriunda de fontes limpas e renováveis e que permita o comércio bidirecional de energia com as concessionárias.

Para o meio ambiente, um dos principais motivadores do estudo, a adoção das microrredes seria muito benéfica, pois viabilizaria a utilização de fontes renováveis e alternativas de energia, com alta eficiência, utilizando a energia de modo mais inteligente. Além disso a característica de plantas menores e distribuídas minimiza o impacto no meio ambiente na própria construção das plantas.

O potencial das microrredes é muito grande, porém ainda é necessário muito estudo técnico e econômico para que seja viável produzir energia localmente, bidirecionalmente e ecologicamente amigável, de modo rentável e vantajoso aos investidores e aos clientes.

## 10 Referências

- [1] – S.Chowdhury, S.P. Chowdhury e P.Crossley. “*Microgrids and Active Distribution Networks.*” IET 2009 (1ª ed.). Cap. 1,2,3,4 e 7
- [2] – M.V.X. Dias, E.C. Borotni e J.Haddad. “*Geração distribuída no Brasil: oportunidades e barreiras.*” Revista Brasileira de Energia v.11, nº2 em 2005
- [3] - C. Marnay. “*Microgrids: Providing Energy Services Locally.*”, 25 de março de 2009, vídeo em Google Tech Talks.
- [4] – K. Mehrayin. “*Microturbines and their use in small scale cogeneration.*” Apresentação comercial da Bowman Power em Janeiro de 2002
- [5] - G.Harrison. “*Smartgrid Activity in the U.K.*”, 14 de setembro de 2010 no Congresso Brasileiro de Automática.
- [6] - E.Perea, Oyarzabal J.M. e R.Rodríguez. “*Definición, evolución, aplicaciones y barreras para el desarrollo de microrredes en el sector eléctrico.*” Boletim do IDAE nº 44 de março de 2009.
- [7] - N. Jenkins, R. Allan, P. Crossley, D. Kirschen, G. Strbac. “*Embedded Generation.*” IET power generation series nº31. Publicado em 2000 e 2ª ed. Em 2008.
- [8] – A.P.C. Ferraz. “*Avaliação da Operação de Geradores Eólicos em Regime Estacionário Considerando a Conexão Direta à Rede Elétrica.*” Projeto de graduação da UFRJ em Março de 2010
- [9] - R.G. Port. “*Uma análise sobre medição e faturamento de potência e energias não ativas.*” Tese da UNIFEI em 2006.
- [10] – J.W. Schwede ,I. Bargatin, D. C. Riley, B. E. Hardin, S. J. Rosenthal, Y. Sun, F. Schmitt, P. Pianetta, R. T. Howe, Z. Shen, N. A. Melosh. “*Photon-enhanced thermionic emission for solar concentrator systems.*” Nature Materials, Vol. 9, No. 9. em setembro de 2010)

- [11] – R. Rüther, I. Salamoni, A. Montenegro, P. Braun, R. Devienne. “*Programa de telhados solares fotovoltaicos conectados à rede elétrica pública no Brasil.*” Artigo do ENTAC em outubro de 2008
- [12] - R. R. King, D. C. Law, K. M. Edmondson, C. M. Fetzer, G. S. Kinsey, H. Yoon, R. A. Sherif, e N. H. Karam. “*40% efficient metamorphic GaInP/GaInAs/Ge multijunction solar cells.*” Applied Physics Letter. Maio de 2007
- [13] - O.J. Fiske, M.R. Ricci. “*Third generation flywheels for high power electricity storage.*” Apresentação da LaunchPoint Technologies Inc. Em setembro de 2006
- [14] - R.M. Stephan, R. de Andrade Jr., G.G. Sotello. “*Third generation flywheels: a promising substitute to batteries.*” Eletrônica de Potência, vol.13,no.3, agosto de 2008
- [15] - O. Ercan Ataer. “*Storage of Thermal Energy.*” Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), disponível em [www.eolss.net](http://www.eolss.net) em 20 de fevereiro de 2011
- [16] – R.H. Lasseter, P. Piagi. “*Microgrid: A Conceptual Solution.*” Power Electronics Specialists Conference (PESC) em junho de 2004
- [17] – A.N. Brooks. “*Vehicle-to-Grid Demonstration Project: Grid Regulation Ancillary Service with a Battery Electric Vehicle.*” Consultoria para CARB e CEPA em dezembro de 2002
- [18] - Z. Ye, R. Walling, N. Miller, P. Du, K. Nelson. “*Facility Microgrids.*” Subcontract Report NREL/SR-560-38019. Maio de 2005
- [19] – [www.f47testing.epri.com](http://www.f47testing.epri.com). Disponível em 15 de fevereiro de 2011
- [20] – Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996. De instituição da criação da ANEEL.
- [21] – Lei nº10.848 de 2004
- [22] – [www.redeinteligente.com](http://www.redeinteligente.com) em 23 de fevereiro de 2011, “*Distribuidoras de energia brasileiras querem tornar as redes elétricas inteligentes*”
- [23] – Consulta pública ANEEL nº15/2010
- [24] - [www.galvinpower.org](http://www.galvinpower.org) em 20 de Setembro de 2010
- [25] – [www.smartgridnews.com.br](http://www.smartgridnews.com.br) em 18 de Janeiro de 2011
- [26] – [www.elp.com](http://www.elp.com) em 10 de fevereiro de 2011

