



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE – UFCG  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA - CEEI  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA - DEE  
GRUPO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – GSE

JOSÉ DE SOUSA LIMA JÚNIOR

GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E OS IMPACTOS CAUSADOS NO  
SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

Campina Grande, Paraíba.

Maio de 2013.

JOSÉ DE SOUSA LIMA JÚNIOR

GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E OS IMPACTOS CAUSADOS NO  
SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Orientador:

Professor Dr. George Rossany Soares de Lira - UFCG

Campina Grande, Paraíba.

Maio de 2013.

JOSÉ DE SOUSA LIMA JÚNIOR

# GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E OS IMPACTOS CAUSADOS NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Aprovado em        /        /

Professor Dr. George Rossany Soares de Lira - UFCG

Orientador

Professor Avaliador  
Componente da Banca

Campina Grande, Paraíba.

Maio de 2013.

## **Dedicatória**

Ao meu avô, **Francisco Nunes de Lima (In Memoriam)**.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todas as graças concedidas ao longo de minha caminhada terrena, por ter me concedido saúde, força e coragem, que foi fundamental para superação de todas as adversidades ao longo desta caminhada.

Aos meus pais, Lima e Marina, pelas várias noites de orações dedicadas a mim, por sempre terem acreditado na minha capacidade e pelas palavras doces que proferiram ao mencionar meu nome.

À minha noiva, Gardênia, por ter tido paciência comigo, pelas palavras de conforto nos momentos em que mais precisei e por não ter me abandonado nos momentos turbulentos.

Às minhas irmãs, Brigid' e Bianka, por suportarem os momentos de estresse, por sempre me apoiarem e estiveram ao meu lado nos momentos mais difíceis da minha vida.

Aos meus amigos e colegas de curso, Francisco Luiz Júnior, Guilherme Júnior, Rodolfo Lira, Wallysson Vasconcelos, Luciano Duarte, Fausto Vilar, Romero Álamo, Tarcisio Trajano, Cláudio Moreira, Danilo Medeiros e Tiago Balbino, pelos muitos incômodos, momentos de alegrias e superações vivenciadas em minha vida acadêmica.

Ao professor Dr. George Rossany Soares de Lira que se colocou a disposição no desenvolvimento e participação da minha formação profissional, dando-me suporte no que foi necessário e sempre disposto a ajudar-me.

A todos aqueles que não foram citados, mas que de forma direta ou indireta contribuíram substancialmente para meu aprendizado profissional.

## RESUMO

No Brasil, a maior parte da geração de energia elétrica é proveniente de centrais hidrelétricas. Embora seja uma fonte de energia renovável, as grandes centrais causam um forte impacto ao meio ambiente. Uma alternativa eficiente é investir em geração distribuída que são centrais menores e situadas próximas dos centros de carga. Este trabalho consiste mostrar as possíveis aplicações e os impactos causados por esse modo de geração descentralizada em conjunto num determinado sistema elétrico. Também aborda os requisitos técnicos, a viabilidade econômica e as normas contratuais vigentes hoje no país. Tem-se com a geração distribuída a diminuição das perdas elétricas e melhoras no perfil de tensão da rede.

**Palavras-chave:** Geração Distribuída, impactos na rede de distribuição, viabilidade econômica.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sistema Interligado Nacional. ....	2
Figura 2. Matriz Energética Brasileira atual.....	4
Figura 3. Evolução do Consumo setorial de energia elétrica (GWh).....	5
Figura 4. Evolução da elasticidade-renda do consumo de eletricidade. ....	6
Figura 5. Potencial Hidrelétrico Brasileiro.....	7
Figura 6. Média anual de insolação diária no Brasil (horas). ....	11
Figura 7. Curvas típicas de potencia de turbinas eólicas. ....	13
Figura 8. Velocidade Média Anual do Vento.....	14
Figura 9. Comportamento do perfil de tensão em um ramal sem e com geração distribuída. .	18
Figura 10. SIN e subsistemas. Índice de perdas percentuais. ....	21

# LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Matriz Energética Brasileira – Março 2013.....	4
--	---

# LISTA DE ABREVIATURAS

AIE: Agência Internacional de Energia

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

BEN: Balanço Energético Nacional

BIG: Banco de Informações de Geração

CC: Corrente Contínua

EE: Energia Elétrica

EPE: Empresa de Pesquisa Energética

GD: Geração distribuída

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IEEE: Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos

LD's: Linhas de Distribuição

LT's: Linhas de Transmissão

MME: Ministério de Minas e Energia

OCDE: Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico

ONS: Operador Nacional do Sistema Elétrico

PCH's: Pequenas Centrais Hidrelétricas

PIB: Produto Interno Bruto

SIN: Sistema Interligado Nacional

SIPOT: Sistema de Informações do Potencial Hidrelétrico Brasileiro

# SUMÁRIO

1	Introdução .....	1
2	O sistema elétrico brasileiro.....	2
2.1	Matriz Energética Brasileira.....	3
2.2	Consumo.....	5
3	Geração Distribuída .....	8
3.1	Geração Residencial .....	9
3.1.1	Energia Solar .....	10
3.1.2	Energia Eólica.....	12
3.2	Cogeração.....	15
4	Impactos da Geração Distribuída no Sistema de Distribuição.....	17
4.1	Fluxo de Potência .....	17
4.2	Níveis de tensão.....	18
4.3	Confiabilidade .....	19
4.4	Ilhamento.....	19
4.5	Harmônicos .....	20
4.6	Níveis de curto-circuito .....	20
4.7	Redução das perdas .....	21
5	Regulamentação para conexão.....	22
6	Viabilidade econômica.....	23
7	Conclusões .....	24
8	Referências Bibliográficas .....	25

# 1 INTRODUÇÃO

O surgimento da indústria elétrica brasileira e mundial ocorrida no fim do século XIX trouxe vários benefícios à sociedade, uma vez que os sistemas de iluminação a chamas foram substituídos por iluminação elétrica. Posteriormente, os motores elétricos trouxeram novas possibilidades às residências e indústrias, permitindo o florescimento e a prosperidade dos povos e nações.

Originalmente, a geração de energia elétrica se dava através de pequenas unidades geradoras, localizadas próximas aos pontos de consumo. Mas foi percebido que a geração de eletricidade poderia proporcionar um crescimento na economia local com a instalação de grandes empreendimentos geradores. Então, a consolidação da indústria se deu em torno do paradigma das grandes centrais geradoras interligadas por linhas de transmissões aos vastos centros de consumo.

Atualmente, em virtude das constantes alterações do clima a nível mundial, percebe-se que há um grande interesse na criação de novas tecnologias e aprimoramento das tecnologias já existentes, no que diz respeito às formas alternativas de geração de energia elétrica.

A geração distribuída (GD) trata de unidades geradoras menores, localizadas perto do consumidor final e ligadas diretamente nas linhas de distribuição, servindo como auxílio as grandes unidades geradoras. As vantagens da GD são de origem técnica, ambiental e econômica.

Na parte técnica, diminui a imprescindibilidade do uso de longas linhas de transmissão (LT's), diminuindo também o risco de ocorrências de colapsos sistêmicos como apagões. Na parte ambiental, pelo fato de diminuir as perdas nas LT's e linhas de distribuição (LD's), reduz a demanda por novas usinas hidrelétricas e o consumo de combustível das usinas térmicas, reduzindo a emissão de gases que causam efeito estufa, diminuindo o aquecimento global. A utilização de fontes renováveis também se enquadra nas questões ambientais. No que diz respeito ao lado econômico, reduz o uso de LT's e LD's e também proporciona economia de combustível quando feita em sistemas de cogeração.

## 2 O SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

O Brasil possui atualmente cerca de 194 milhões de pessoas e é a nação que possui a 5ª maior extensão territorial. Com esses dados, percebe-se o quão é complexo o Sistema Interligado Nacional (SIN) que é formado por redes de transmissão que cruzam o país levando energia elétrica aos mais diversos locais até consumidores finais.

O SIN abrange todo o país, exceto parte da região Norte. No ano de 2012, o SIN possuía aproximadamente 103 mil quilômetros instalados de linhas de transmissão, nas tensões 230, 345, 440, 500 e 750 kV. O mapa do SIN no horizonte 2013 é visualizado na Figura 1, com todas as linhas que o constituem[1].

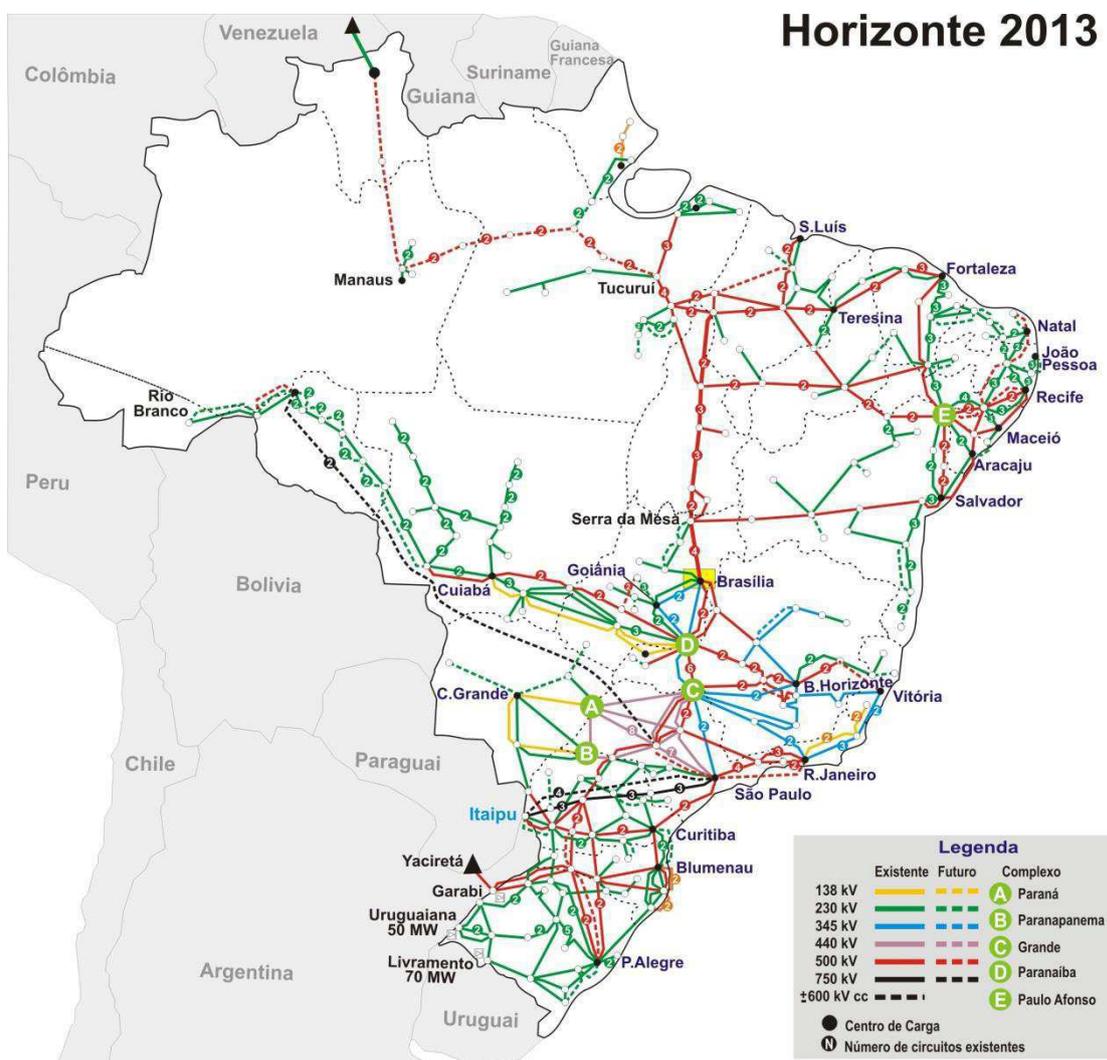


Figura 1. Sistema Interligado Nacional.

Fonte: Operador Nacional do Sistema[1].

De acordo com os dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), divulgados em fevereiro de 2012 o país contava com 72,7 milhões de unidades consumidoras [2]. O Brasil é o décimo maior consumidor mundial de energia elétrica, segundo dados da Agência Internacional de Energia (AIE), com sede em Paris. Desde 2001, o consumo de eletricidade no país aumentou quase 38%, acima da média mundial, que foi de 30% no período.

De acordo com a agência, 45% da energia total produzida no Brasil é originária de fontes renováveis, enquanto a média nos países ricos da OCDE (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico) é de apenas 8% [3].

A permuta de energia entre diferentes regiões do país é importante, visto que no Brasil predominam as usinas hidrelétricas localizadas em lugares com regimes hidrológicos diferentes. Como os períodos de estiagem de uma região podem corresponder ao período chuvoso de outra, a integração possibilita que a localidade em que os reservatórios de água estão mais cheios envie energia elétrica para a localidade que estão com os reservatórios vazios. Esta integração permite a preservação do “estoque de energia elétrica” represado sob a forma de volume útil de água nos reservatórios.

O órgão responsável por coordenar e controlar a operação do SIN é o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Este órgão define quais as usinas que devem operar e quais devem ficar de reserva, de modo a manter o volume de produção igual ao de consumo.

## 2.1 MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

Segundo o Banco de Informações de Geração (BIG), órgão vinculado a ANEEL, o Brasil conta com aproximadamente 2.797 usinas, significando aproximadamente 131.039 GW de capacidade instalada, onde 37,5% das usinas são hídricas e responsáveis por aproximadamente 65% da geração brasileira, conforme mostra o Quadro 1.

Empreendimentos em Operação							
Tipo	Capacidade Instalada			Total		%	
	N.º de Usinas	(kW)	%	N.º de Usinas	(kW)		
Hidro	1.048	84.671.596	64,61	1.048	84.671.596	64,62	
Gás	Natural	108	11.832.030	9,03	147	13.515.693	10,31
	Processo	39	1.683.663	1,28			
Petróleo	Óleo Diesel	997	3.466.766	2,65	1.031	7.717.413	5,89
	Óleo Residual	34	4.250.647	3,24			
Biomassa	Bagaçõ de Cana	366	8.520.612	6,50	452	10.256.800	7,83
	Licor Negro	14	1.246.222	0,95			
	Madeira	45	379.235	0,29			
	Biogás	18	74.298	0,06			
	Casca de Arroz	9	36.433	0,03			
Nuclear	2	2.007.000	1,53	2	2.007.000	1,53	
Carvão Mineral	Carvão Mineral	12	2.664.328	2,03	12	2.664.328	2,03
Eólica		91	2.024.538	1,54	91	2.024.538	1,54
Importação	Paraguai		5.650.000	5,46		8.170.000	6,24
	Argentina		2.250.000	2,17			
	Venezuela		200.000	0,19			
	Uruguai		70.000	0,07			
<b>Total</b>	<b>2.797</b>	<b>131.039.298</b>	<b>100</b>	<b>2.797</b>	<b>131.039.298</b>	<b>100</b>	

Quadro 1. Matriz Energética Brasileira – Março 2013.

Fonte: Banco de Informações de Geração [4].

A EPE, que planeja a expansão do setor elétrico, prevê a diversificação da matriz energética, desconcentrando a histórica concentração de geração de energia elétrica hidráulica. Anos atrás, a participação das hidrelétricas era cerca de 90%, atualmente é 65%, esse recuo ocorreu devido a construção em maior ritmo de usinas baseadas em outras fontes, tais como termoeletricas e usinas de biomassa.

O Quadro 1, em termos percentuais de geração pode ser melhor representado na Figura 2, verificando-se a matriz elétrica brasileira.

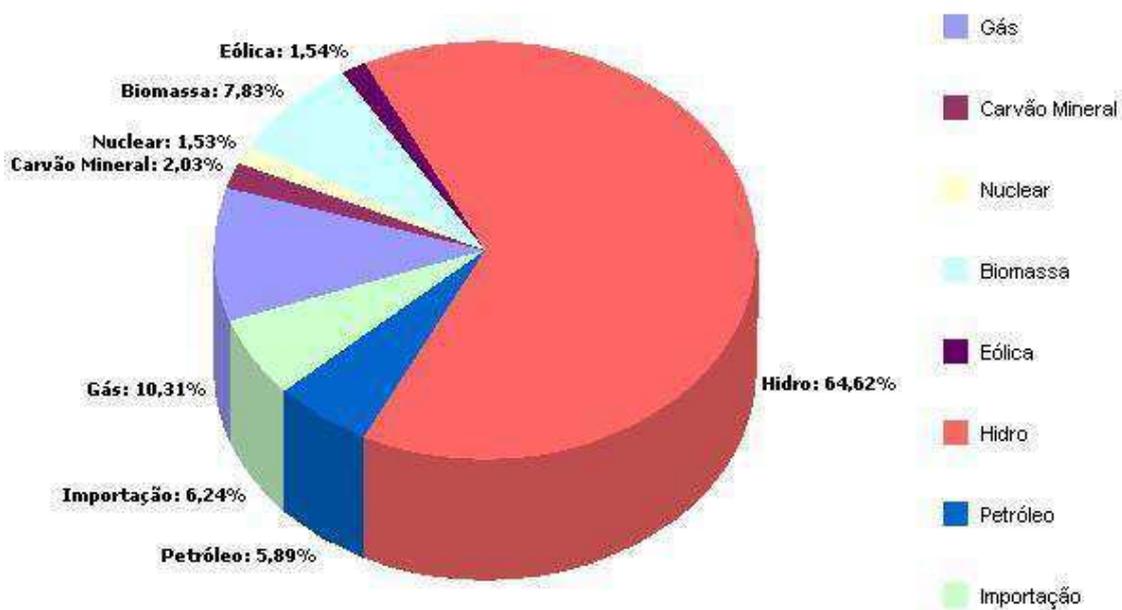


Figura 2. Matriz Energética Brasileira atual.

Fonte: Banco de Informações de Geração [4].

## 2.2 CONSUMO

Sabe-se que maior parte do consumo de energia elétrica brasileira está concentrado nas regiões sul e sudeste, representando 61% do consumo total de 440.000 GWh, segundo dados do EPE (Empresa de Pesquisas Energéticas) de 2012 [5].

Na Figura 3 é mostrada a curva de consumo dividido em vários tipos de consumidor no período de 70 a 2003, visualizando o crescimento e a participação de consumo de cada setor.

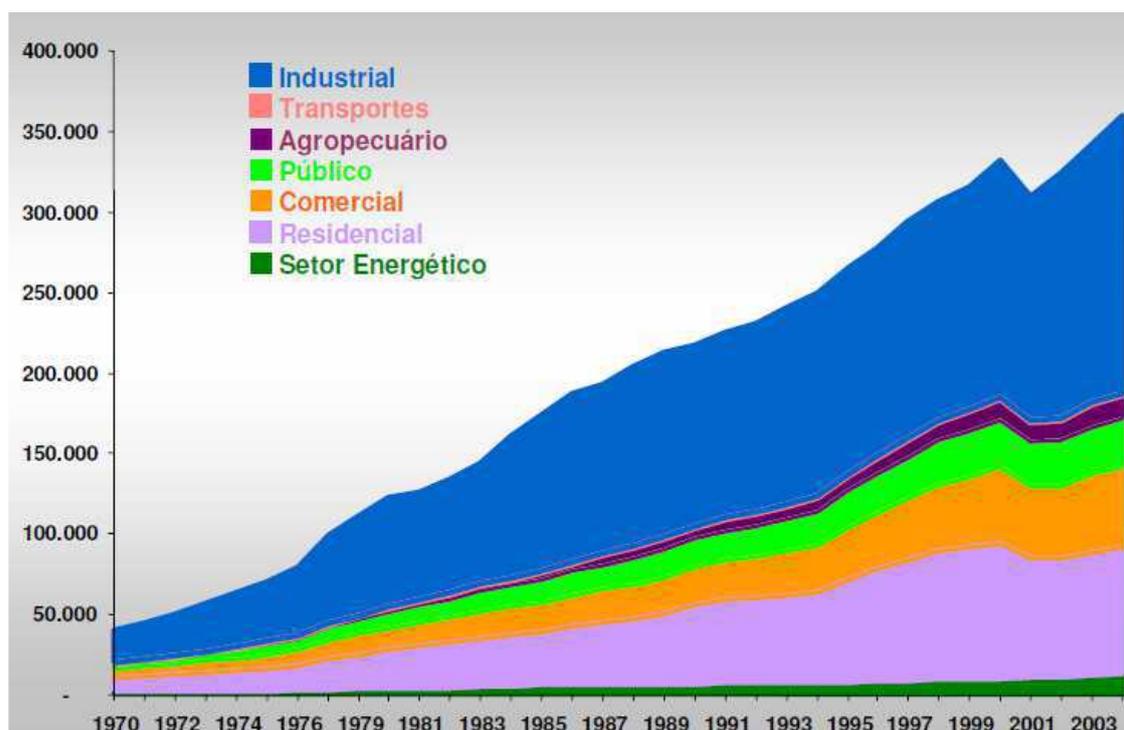


Figura 3. Evolução do Consumo setorial de energia elétrica (GWh).

Fonte: EPE [6].

É importante observar que a partir da análise da Figura 4, veem-se alguns acontecimentos históricos que ocorreram no Brasil, tais como a expansão das indústrias siderúrgicas em meados de 1977, ocasionando um alto consumo de energia. Em 1994, com a implantação do plano real, onde ocorreu o controle da inflação, vê-se novamente um crescimento de energia, ocasionado pelo crescimento econômico favorável.

Em 2001, ocorreu o racionamento de energia que impôs restrições ao consumo de energia em algumas regiões do país.

A partir destes fatos, fica nítida a relação entre o consumo de energia elétrica e a situação econômica do país. Relação esta denominada elasticidade-renda do consumo

que é obtida a partir da divisão do crescimento do consumo de energia elétrica por crescimento do PIB.

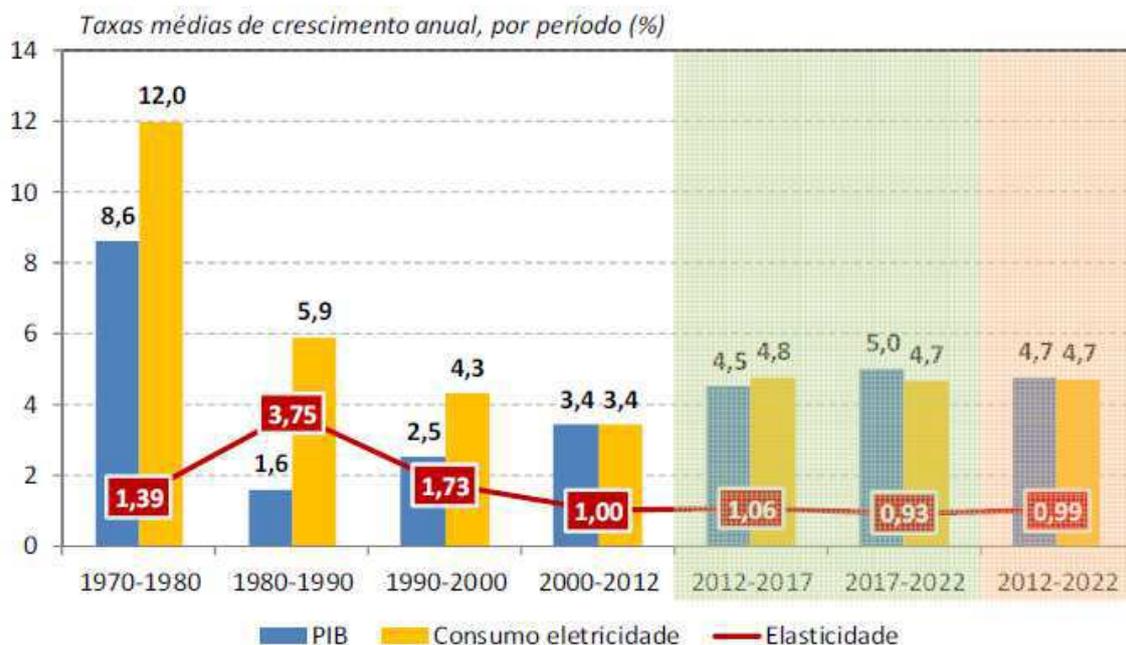


Figura 4. Evolução da elasticidade-renda do consumo de eletricidade.

Fonte: EPE [7].

No plano decenal de Expansão de Energia 2013-2022 está previsto que o índice de elasticidade será por volta de 1. No primeiro quinquênio, a elasticidade é um pouco superior à unidade (1,06) para um crescimento do PIB de 4,5% ao ano em média e, no segundo período, a elasticidade é inferior à unidade (0,93), resultando uma elasticidade-renda nos 10 anos de 0,99. Dessa forma, a intensidade elétrica da economia aumenta ligeiramente nos primeiros cinco anos, mas depois decai e, no final do horizonte decenal, fica praticamente igual ao valor inicial de 2012.

Para que não ocorra novamente o apagão, é necessário que sejam feitos grandes investimentos em usinas e LT's. A Figura 5 mostra o mapa do Brasil com a distribuição do potencial hidrelétrico brasileiro, relacionando o potencial já utilizado e o ainda disponível.

Nota-se que o maior potencial se encontra na região norte, ou seja, longe dos grandes centros de consumo, com reservas ambientais e florestas densas.

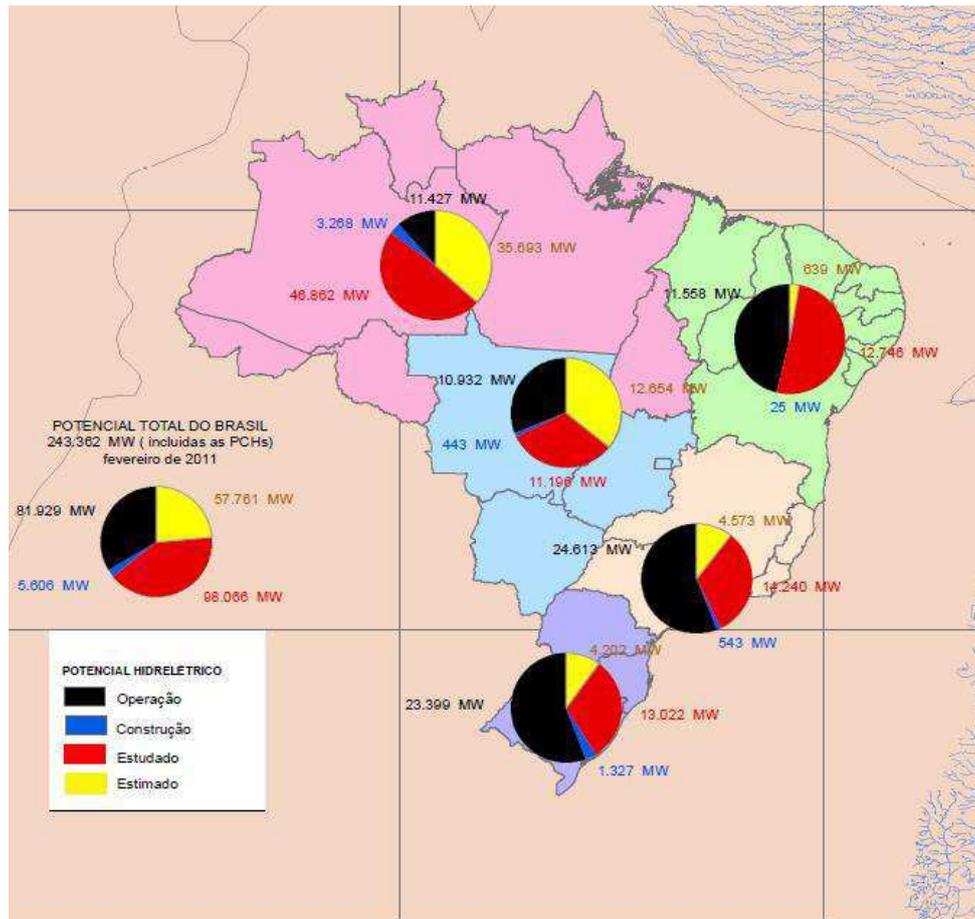


Figura 5. Potencial Hidrelétrico Brasileiro.

Fonte: ELETROBRAS – SIPOT [8].

Percebe-se que a geração hidrelétrica pode sustentar o aumento de carga durante 30 a 40 anos, porém apresentando custos de geração cada vez mais elevados, maiores impactos ambientais e necessidade de expansão do SIN e da capacidade das LT's que o compõem.

São necessários investimentos nas mais variadas formas de geração de EE não essenciais a fim de diversificar a matriz energética brasileira em busca do menor custo, da minimização dos impactos ambientais e sem afetar a qualidade do fornecimento.

A GD busca aproveitar recursos locais para gerar energia o mais próximo possível do ponto de consumo, a fim de evitar a expansão das LT's, diminuindo as perdas e aumentando a confiabilidade do setor energético brasileiro.

### 3 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A Geração Distribuída localiza-se próxima das cargas elétricas, mas as unidades geradoras têm condições próprias para desempenhar um papel importante para o conjunto do sistema interligado além de suprir a energia local.

De acordo com Ackermann, 2001 [9], a GD pode ser definida como uma fonte de geração conectada diretamente na rede de distribuição ou no consumidor. A geração distribuída pode ser dividida de acordo com a potência gerada em:

- Micro GD: menos de 10 kW;
- Pequena GD: entre 10 kW e 500 kW;
- Média GD: entre 500 kW e 5 MW;
- Grande GD: entre 5 MW e 50 MW;

Outras definições também podem ser adotadas. Para o Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE), geração descentralizada é uma central de geração pequena o suficiente para estar conectada a rede de distribuição e próxima do consumidor.

No Brasil, GD foi definida de forma oficial pelo **DECRETO Nº 5.163 DE 30 DE JULHO DE 2004**, publicado pela ANEEL da seguinte forma:

“Art. 14. Para os fins deste Decreto, considera-se geração distribuída a produção de energia elétrica proveniente de empreendimentos de agentes concessionários, permissionários ou autorizados, incluindo aqueles tratados pelo art. 8º da Lei nº 9.074, de 1995, conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador, exceto aquela proveniente de empreendimento:

I - hidrelétrico com capacidade instalada superior a 30 MW; e

II - termelétrico, inclusive de cogeração, com eficiência energética inferior a setenta e cinco por cento, conforme regulação da ANEEL, a ser estabelecida até dezembro de 2004.

Parágrafo único. Os empreendimentos termelétricos que utilizem biomassa ou resíduos de processo como combustível não estarão limitados ao percentual de eficiência energética prevista no inciso II do **caput**.”[10]

Como se vê, apenas PCH's, que possuem potência instalada inferior a 30 MW são consideradas como GD.

Esta tecnologia não é nova, uma vez que, assim se iniciou a geração de energia elétrica no mundo, quando cada um produzia a sua eletricidade de forma isolada.

Devido ao crescimento da carga, foi necessário aumentar a potência gerada, estimulando o surgimento dos primeiros sistemas de distribuição e de geração centralizada. Com o aumento e crescimento destes sistemas isolados levou a formação de sistemas interconectados como o SIN brasileiro.

Porém este tema está voltando a ganhar destaque devido:

- O aparecimento de novas tecnologias que permitem e flexibilizam a GD;
- A GD reduz as perdas no sistema de distribuição, aumentando sua eficiência;
- Possibilita o uso de insumos regionais para geração de energia;
- O aparecimento de restrições técnicas, ambientais e econômicas para expansão da geração centralizada;
- A necessidade de busca pela redução tarifária;
- A necessidade de aumento da eficiência em processos industriais;
- Possibilita que comunidades isoladas tenham acesso à energia elétrica;
- Reduz os riscos de instabilidade, pois é ligada em paralelo à rede;
- A utilização da GD pode adiar ou tornar desnecessário o investimento na expansão de subestações e/ou ramais de distribuição.

A seguir têm-se os possíveis usos de GD no contexto brasileiro.

### 3.1 GERAÇÃO RESIDENCIAL

Na sustentabilidade, não adianta montar sistemas produtivos mais eficientes apenas nas indústrias, se faz necessário também investir em residências mais eficientes, buscando o equilíbrio entre o aproveitamento de fontes naturais de energia e tecnologia, escolhendo criteriosamente os materiais construtivos, as técnicas de aproveitamento dos condicionantes naturais, busca pela conscientização e eficiência energética.

Na eficiência energética, uma edificação ecológica deve aproveitar ao máximo os recursos naturais disponíveis como radiação solar, temperatura e ventos, minimizando o consumo de EE, reduzindo, por consequência, os impactos ambientais causados pelas centrais geradoras.

### 3.1.1 ENERGIA SOLAR

Uma tecnologia já bastante usada atualmente é o uso da radiação solar para aquecer a água através de placas solares instaladas em cima de prédios. Estas placas funcionam de modo similar às estufas, aquecendo os pequenos canos que transportam água.

O uso de painéis fotovoltaicos também ocorre para a geração de EE através dos raios solares. Estes criam uma diferença de potencial em suas extremidades, proporcionando a alimentação de equipamentos elétricos.

Para que seja feita a instalação dos painéis fotovoltaicos, é necessário analisar mapas que contenham dados referentes a insolação da região a fim de que possam ser estimados a potência gerada por módulo e quantos módulos serão necessários para suprir a carga.

A Figura 6 apresenta a insolação média no Brasil, percebendo-se que em grande parte do território, apresenta 6 a 7 h de sol diária. E em alguns estados do Nordeste (Paraíba, Rio Grande do Norte e Ceará) chega a 8 h diárias, demonstrando as melhores condições para utilização do uso desta tecnologia.

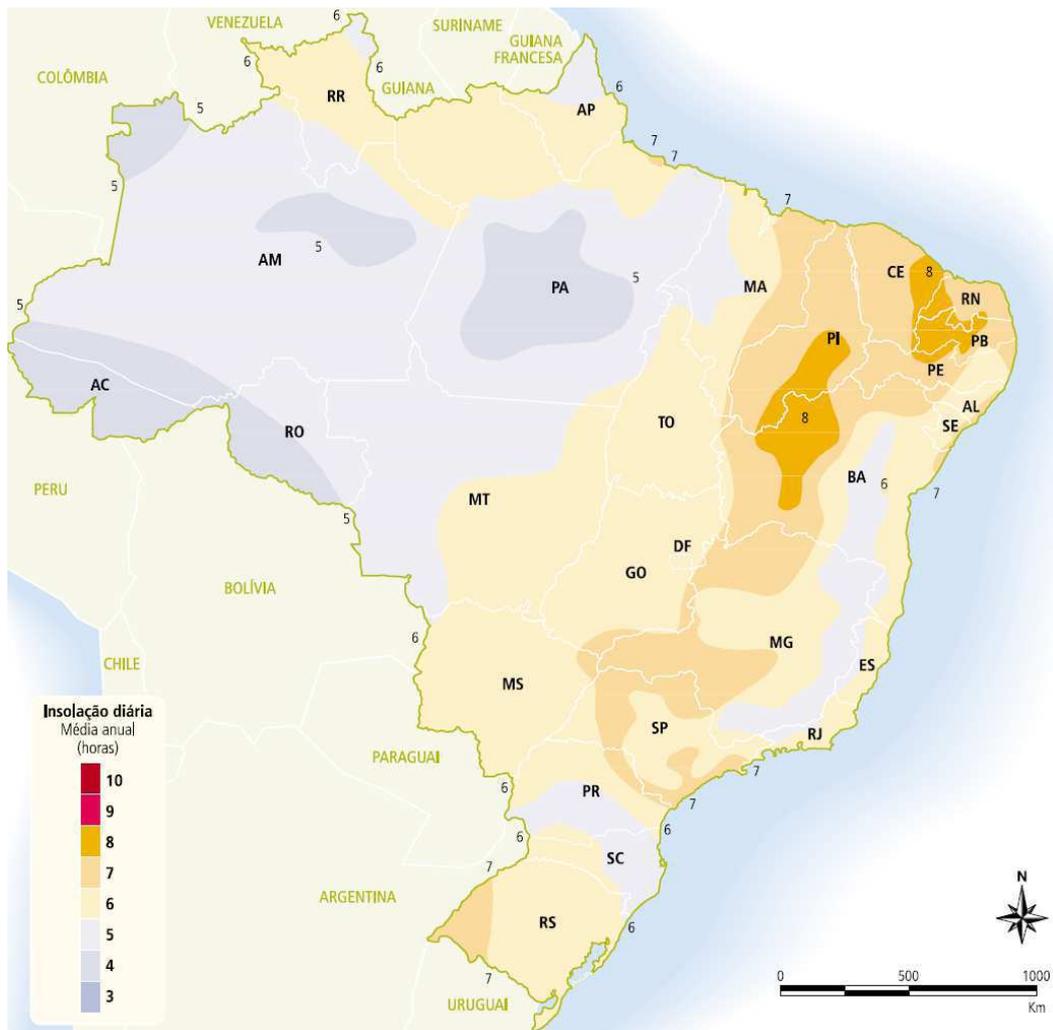


Figura 6. Média anual de insolação diária no Brasil (horas).

Fonte: Atlas Solarimétrico do Brasil [11].

Por causa das variações climáticas, este sistema utiliza baterias para o armazenamento de energia excedente durante o dia para usá-la à noite.

Na Alemanha, onde esta tecnologia já é mais desenvolvida, o uso das baterias é evitado porque os excedentes são vendidos às concessionárias de EE.

Há duas maneiras para essa troca de energia, são elas:

- *Dual metering*: 2 medidores unidirecionais, um para medir a energia utilizada na rede e outro para medir a energia produzida em excesso é injetada na rede da concessionária. Mas as concessionárias compram a energia 3 a 5 vezes mais baratas do que cobram, estimulando que o consumidor use a energia no momento em que é gerada, sem querer vendê-la. O uso de 2 medidores causam custos adicionais às concessionárias, tanto com equipamentos quanto com processamento de dados, criando então um novo método.

- *Net metering*: medidor bidirecional que registra o fluxo de energia em ambos os sentidos, não importando se o momento de geração coincide com o de consumo, mas sim a diferença líquida entre os fluxos, tornando a rede similar a uma bateria.

Devido a sua baixa densidade energética, este tipo de geração de energia elétrica adapta-se melhor à geração distribuída do que a centralizada evidenciando um claro espaço a ser ocupado por ela. Mas ainda esbarra nos altos custos de implantação. A seguir têm-se as vantagens e desvantagens deste método de GD:

Vantagens:

- Altamente modular;
- Emissão de poluentes nula;
- Baixa manutenção;
- Geração para isolados;
- Não gera ruídos;
- “Combustível” gratuito;
- Rápida instalação.

Desvantagens:

- Alto investimento inicial;
- Vida útil curta – aproximadamente 20 anos;
- Necessidade de incentivos do governo;
- Uso de inversores.

### 3.1.2 ENERGIA EÓLICA

A geração de energia elétrica a partir dos ventos é possível devido ao deslocamento de massas de ar que ocorrem devido às diferentes pressões atmosféricas, ocasionadas pelo movimento de rotação da terra e pela radiação solar não uniforme.

Os aerogeradores aproveitam o fluxo de ar passante pelas pás, provocando a rotação do eixo devido às forças de empuxo e arrasto. Estes podem ser classificados conforme a posição do eixo do rotor, vertical ou horizontal, possuindo as vantagens e desvantagens a seguir:

- Horizontal: necessita de mecanismo que permita o posicionamento do eixo do rotor em relação a direção do vento, para um melhor aproveitamento global;

- Vertical: não necessita de mecanismo de direcionamento, mas tem menor rendimento e sofre com problemas de vibração.

Os grandes aerogeradores são de eixo horizontal e com 3 pás, devido ao fato da grande relação de potência extraída por área de varredura do rotor, além de seu rendimento máximo ocorrer em velocidades mais altas. Atualmente, na Alemanha já se produzem aerogeradores de até 6 MW.

Alguns aerogeradores se integram ao sistema de fornecimento de energia, formando um sistema híbrido com o gerador a diesel, a instalação traz economia no consumo de diesel e reduz a emissão de poluentes. Este sistema é atraente em locais onde não se dispõe da rede de distribuição interligada.

Outros usos comuns de fornecimento de energia utilizando sistemas eólicos são:

- Sistemas eólicos de grande porte interligados com a rede de distribuição;
- Sistemas eólicos autônomos, os quais fornecem eletricidade regular para um sistema de pequeno porte isolado com uso de baterias para armazenar energia.

A velocidade do vento é fator determinante para a viabilidade de um projeto, logo seu uso em sistemas isolados é limitado a regiões de ventos fortes e constantes. A Figura 7 relaciona a velocidade do vento com a potência gerada, percebendo que a potência máxima é atingida com ventos de 14 m/s, permanecendo constante para evitar danos ao equipamento.

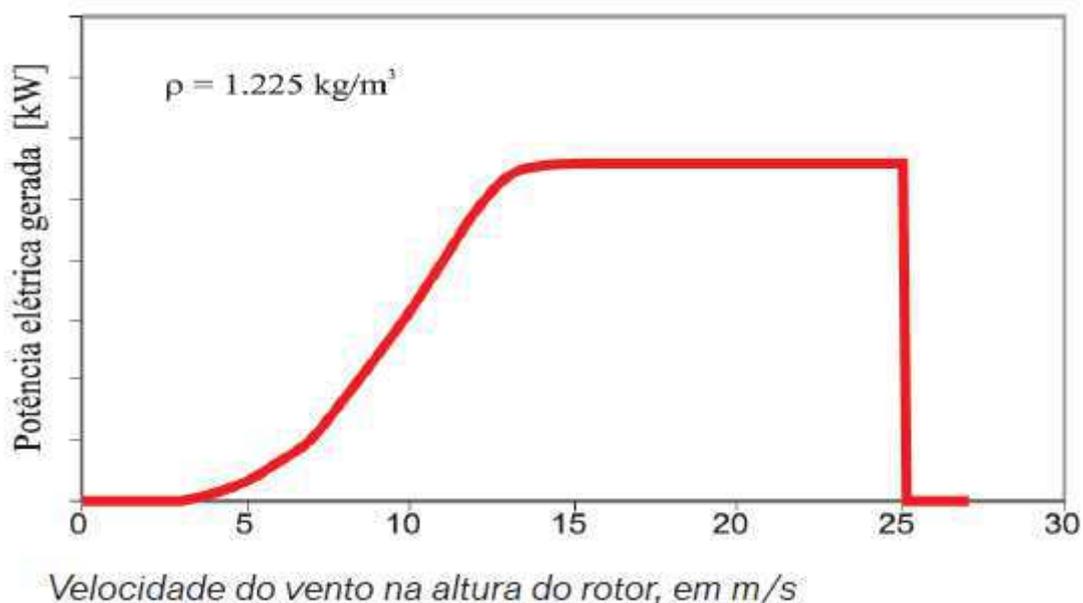


Figura 7. Curvas típicas de potencia de turbinas eólicas.

Fonte: Atlas do Potencial Eólico Brasileiro [12].

Na Figura 8, tem-se um mapa eólico do Brasil o qual mostra as localidades com melhores características de ventos para serem instalados aerogeradores.

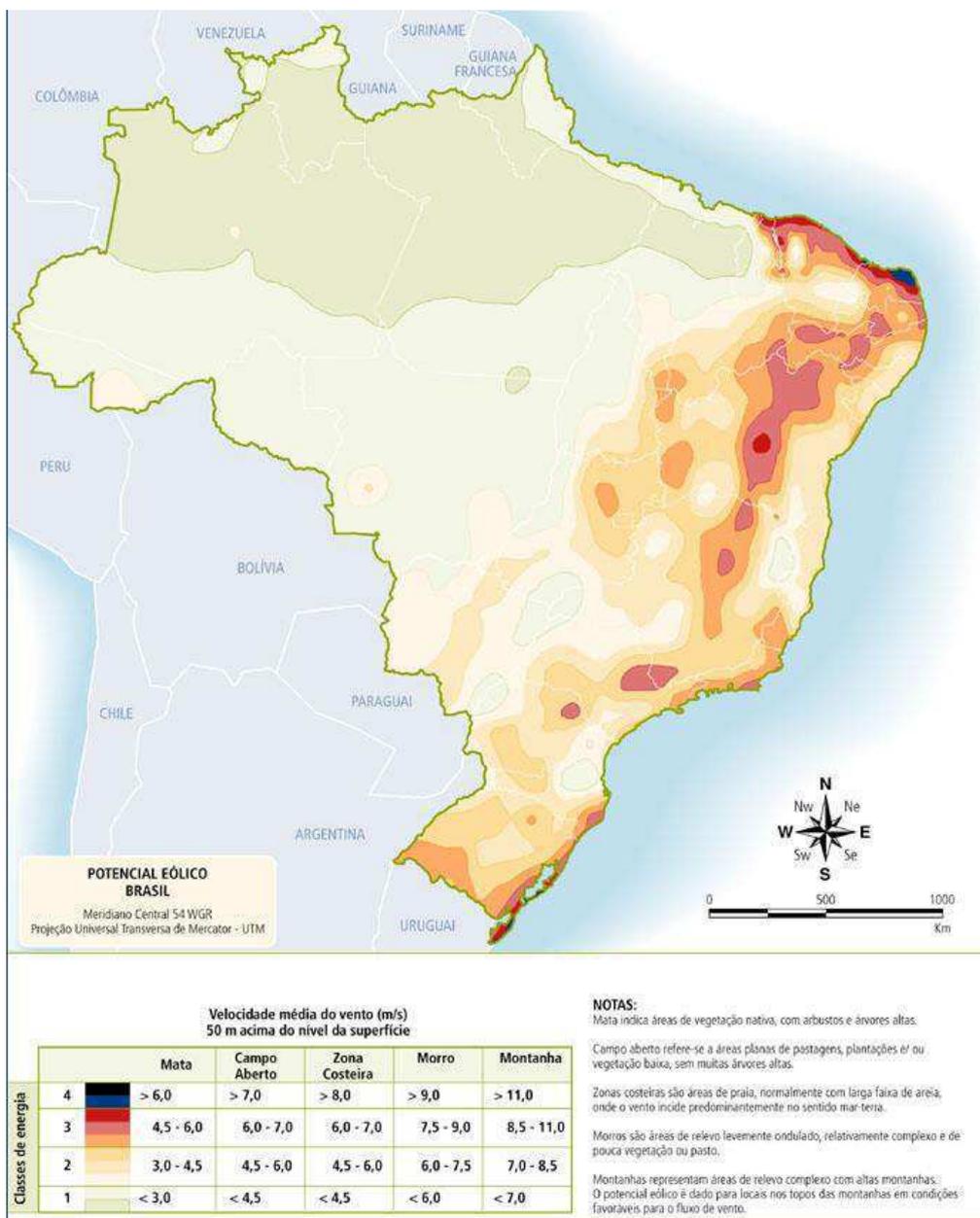


Figura 8. Velocidade Média Anual do Vento.

Fonte: Atlas do Potencial Eólico Brasileiro [12].

Analisando o mapa eólico brasileiro, nota-se o litoral do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Norte e Ceará são as regiões que apresentam as melhores condições e apresentam os primeiros parques eólicos do país.

Em último estudo realizado no país, chegou-se a um potencial energético de 143 GW, 11% superior a potência total instalada em março de 2013. Mesmo com um potencial significativo, a energia eólica representa 1,54% da matriz elétrica brasileira [4].

## 3.2 COGERAÇÃO

A cogeração é o processo de geração simultânea de energia elétrica/mecânica e térmica a partir da queima de um combustível. Por se localizar próximo a carga, pode ser considerada uma forma de geração distribuída.

Essa cogeração é muito utilizada na indústria, onde acontece a geração de um subproduto que pode ser utilizado como combustível. Nesse processo, ocorre a racionalização do uso de recursos naturais e o conseqüente aumento da eficiência energética, diminuindo os impactos ambientais na produção do produto.

Um exemplo de cogeração é a indústria açucareira, onde o bagaço da cana é um subproduto do processo industrial. O bagaço pode ser queimado gerando energia elétrica/mecânica e térmica que podem ser aproveitadas no processo de fabricação do açúcar.

Os fatores que incentivam o uso de cogeração são:

- A disposição, por parte dos consumidores, de reduzir o custo do suprimento de energia elétrica e de melhorar a confiabilidade desse suprimento, face ao aumento dos preços aplicados pelas concessionárias e as deficiências de geração e transmissão;
- Disponibilidade crescente do gás natural para geração, em virtude da construção de gasodutos para transporte e do desenvolvimento da rede de distribuição;
- Conscientização dos problemas ambientais, promovendo soluções que tendem a reduzir os impactos ambientais da geração, dentre as quais as que permitem melhor aproveitamento da energia proveniente de combustíveis fósseis ou renováveis;
- Aperfeiçoamento de tecnologias que tornam competitivas novas fontes e novos processos de geração de energia;
- Progresso da tecnologia da eletrônica e conseqüente redução nos custos de sistemas de proteção e controle.

As desvantagens do uso de cogeração são:

- Altos custos da implementação;
- Necessidade de manutenção e controle dos equipamentos envolvidos na geração de energia;

- Alto custo de energia de *back-up*, energia vendida pela concessionária em caso de falta de geração própria;
- Falta de ações governamentais como crédito acessível e mudanças na regulamentação para se tornar mais utilizado.

## 4 IMPACTOS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

A inserção de fontes de energia no sistema de distribuição pode afetar os perfis de tensão e frequência, níveis de curto circuito e a qualidade da energia da rede da concessionária. Estudos estão sendo realizados para que se evitem que estas conexões prejudiquem a qualidade de fornecimento, buscando atenuar os problemas e aumentar os benefícios da geração distribuída.

### 4.1 FLUXO DE POTÊNCIA

As redes de distribuição são reguladas para atuarem sem levar em consideração qualquer geração conectada ao longo dos alimentadores ou nas cargas dos consumidores. A introdução de fontes de geração na rede de distribuição acarreta uma redistribuição do fluxo de potência.

A inserção de um gerador distribuído ocasiona duas situações possíveis:

- Geração < Demanda: o consumidor não consegue exportar energia, porém reduz a demanda oriunda da concessionária. Espera-se então que os equipamentos trabalhem de forma adequada nesta condição, pois irão operar com um nível de carregamento menor;
- Demanda < Geração < 2 vezes a Demanda: caso a geração atinja o valor da demanda, nenhum fluxo ocorrerá no sentido concessionária-consumidor e os equipamentos da interconexão trabalharão praticamente em vazio. Caso a geração seja maior do que a demanda e menor do que duas vezes o seu valor, obterá um fluxo no sentido consumidor-concessionária com um valor igual à demanda. Assim, os equipamentos podem ser considerados adequados visto que haverá apenas a inversão do fluxo de potência.

Esses casos devem ser avaliados antes da conexão da geração, pois deve ser feito um reajuste no sistema de proteção e realocação de reguladores de tensão.

## 4.2 NÍVEIS DE TENSÃO

Sistemas de distribuição de energia elétrica são constituídos por redes radiais. Redes radiais são sistemas que possuem uma topologia formada basicamente por um centro de fornecimento e extensas ramificações que levam energia aos consumidores finais.

Reguladores de tensão e bancos de capacitores são instalados ao longo dos alimentadores para compensar as quedas de tensão causadas pelas cargas.

A conexão de geração distribuída nas redes de distribuição acarretam alterações na tensão ao longo do alimentador, podendo ocasionar mudanças nas condições de operação dos equipamentos de regulação de tensão.

A escolha do ponto de conexão no alimentador pode ocasionar uma diminuição considerável das perdas e uma elevação na tensão, caso seja alocada em um ponto ótimo. Caso isso não aconteça, as perdas podem aumentar devido ao maior fluxo de potência em baixa tensão.

Estudos recentes mostram que o ponto ótimo ou barra ótima é aquela mais afastada da subestação onde parte o alimentador ou a que se localiza próxima as áreas de maior concentração de cargas [13].

A Figura 9 ilustra como a geração distribuída pode melhorar aspecto do comportamento da tensão.

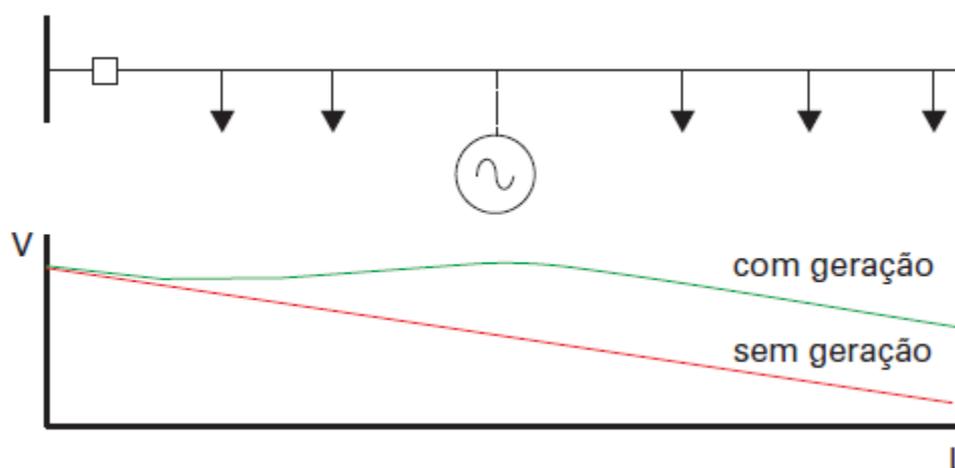


Figura 9. Comportamento do perfil de tensão em um ramal sem e com geração distribuída.

Fonte: Geração Distribuída – Aspectos Tecnológicos, Ambientais e Institucionais [14].

Além do ponto de conexão, outros fatores que influenciam na regulação de tensão são: o nível de penetração da geração distribuída no respectivo alimentador e o tipo de geração utilizada.

### 4.3 CONFIABILIDADE

Nos sistemas em série, a falha em qualquer equipamento desconecta as duas extremidades. Nos sistemas conectados em paralelo, se apenas um equipamento estiver funcionando corretamente, é suficiente para a conexão entre as duas extremidades.

Assim, a geração distribuída aumenta a confiabilidade do sistema pelo fato de sua ligação ser realizada em paralelo com a rede concessionária e por reduzir a quantidade de dispositivos em série entre a geração centralizada e o consumidor final.

Uma das grandes vantagens da geração distribuída é o aumento da confiabilidade. Mas a conexão em paralelo pode causar o fenômeno de ilhamento.

### 4.4 ILHAMENTO

O ilhamento de um alimentador acontece quando o gerador distribuído alimenta as cargas de parte do alimentador isoladamente, não estando conectado em paralelo ao resto do sistema. Isto traz benefícios ao sistema uma vez que minimiza a quantidade de consumidores atingidos em caso de falta ou manobra, aumentando a confiabilidade do sistema.

É necessário que as unidades de geração distribuída sejam confiáveis e coordenadas com o sistema de proteção e seccionamento do sistema de distribuição, evitando a propagação das faltas. Quando ocorrer a reenergização da rede, deve ser verificado o sincronismo da parte ilhada com o restante da rede.

Esta operação que permite ilhamento de cargas e a reconexão das cargas a rede é complexa. Porém novas tecnologias com chaveamentos automáticos e técnicas de comunicação remota de dados da rede aos centros de operação e controle tem tornado esta operação mais viável e confiável ultimamente [15].

## 4.5 HARMÔNICOS

A qualidade da energia elétrica é um dos pontos mais importantes a serem compreendidos. Mesmo que ocorra a inserção de geradores de variados tipos e potências, não pode acontecer a perda da qualidade da energia que leva em consideração o nível de tensão, frequência e a forma de onda. As perturbações das formas de ondas devem ser evitadas.

O uso das fontes renováveis como fontes de alternativas de energia elétrica traz benefícios ao ecossistema. Mas deve-se observar que estas fontes não devem interferir na qualidade de energia elétrica.

As tecnologias que geram potência em CC, como por exemplo, as células fotovoltaicas, necessitam de inversores para se conectar a rede da concessionária. Estes equipamentos trabalham com chaveamentos que acabam gerando distorções harmônicas na forma de onda.

No caso das turbinas eólicas, o problema se encontra na utilização de geradores assíncronos, retificadores, inversores e outros equipamentos eletrônicos que podem ser fonte de distorções harmônicas e flutuações de tensão.

Estes problemas citados são gerados devido a falta de controle sobre os recursos naturais que produzem esta energia, no caso a radiação solar e o vento, de maneira que é necessária a utilização de equipamentos eletrônicos para ajustes de frequência, tensão e potência de saída.

## 4.6 NÍVEIS DE CURTO-CIRCUITO

A colocação de geradores distribuídos ocasiona o aumento nos níveis de curto-circuito na rede. Este aumento ocorre devido o gerador distribuído também fornecer corrente a falta, sendo adicionada aquela corrente fornecida pela subestação.

A reestruturação dos componentes de proteção (fusíveis e relés de sobre-corrente) e realização de novos estudos de seletividade para manter a confiabilidade do sistema devem ser feitos.

## 4.7 REDUÇÃO DAS PERDAS

Com a geração distribuída, é possível instalar uma potência entre 12 e 20 % menor do que aquela que seria necessária caso o atendimento do respectivo consumo se efetivasse através da geração centralizada.

De acordo com a EPE, na projeção da demanda de energia elétrica no plano decenal de 2013-2022, a média de perdas do sistema no ano de 2012 foi de 17,2 %, como mostra a Figura 10.

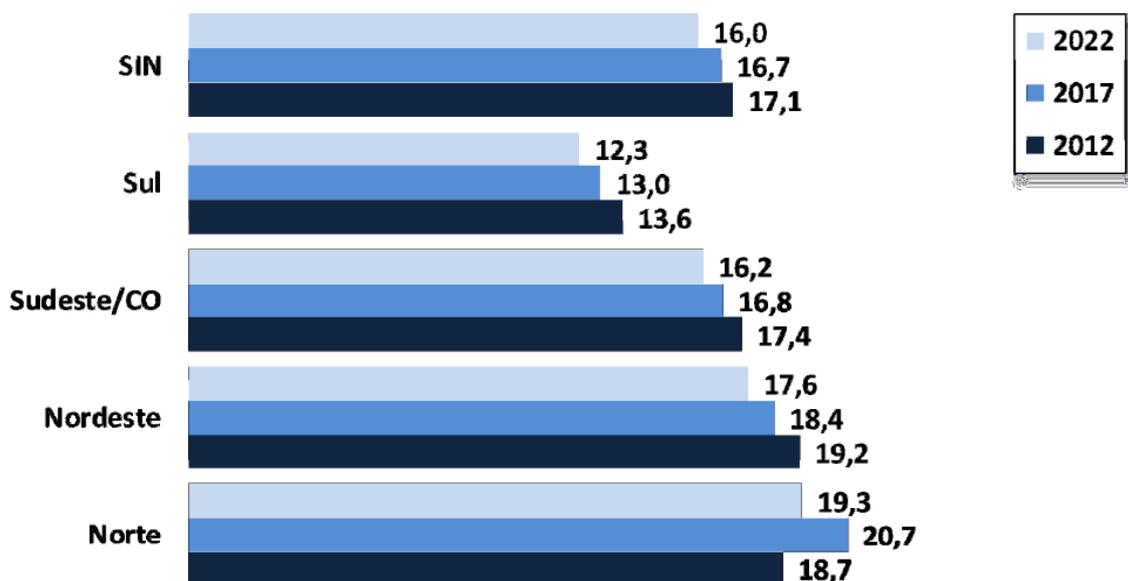


Figura 10. SIN e subsistemas. Índice de perdas percentuais.

Fonte: EPE [7].

Devido à distância que existiria entre o local de consumo e a localização da unidade geradora, perdas de 12 a 20 % ocorreriam nas redes de transmissão e distribuição. Estes ganhos são divididos por todos os consumidores na medida que a geração distribuída anula estas perdas presentes nos sistemas de geração centralizada.

## 5 REGULAMENTAÇÃO PARA CONEXÃO

Os procedimentos de conexão não estão normalizados e a falta de normas impede a padronização. Os clientes devem obedecer normas específicas de cada concessionária.

Na legislação brasileira, padrões técnicos de conexão e atendimento ainda estão pouco explicitados no que se refere a rede de distribuição. A resolução da ANEEL Nº281 de 01 de outubro de 1999 existente é insuficiente no que diz respeito a divisão de responsabilidades quando o acesso se realiza na rede de distribuição.

O ONS possui regras definidas para o acesso à rede básica, denominadas Procedimentos de Rede, que definem as responsabilidades de cada agente no acesso a estas redes. Porém, a maioria dos empreendimentos de geração distribuída, devido ao seu porte, tem sua instalação viabilizada para tensões inferiores a 230 kV, que é a tensão mínima para a rede básica [16].

Desta forma, não se aplicam os Procedimentos de Rede já consolidados, mas sim uma variedade de requisitos técnicos e operacionais definidos pela proprietária da rede de distribuição local que até o momento não possuem padronização regulamentar. Talvez este seja um dos maiores desafios da geração distribuída.

## 6 VIABILIDADE ECONÔMICA

O estudo de viabilidade econômica de um sistema de geração distribuída, em caso de venda de excedentes, depende da regulamentação da concessionária local. No Brasil falta uma normalização dos requisitos de conexão e dos deveres do acessado na legislação vigente.

Devido cada concessionária possuir sua regulamentação própria, os valores que são pagos para a utilização do sistema de distribuição variam. Os contratos para compra/venda fixados entre as partes também variam.

Em geral para atender as exigências mínimas do ponto de conexão, há a necessidade de um painel de faturamento com dois medidores (um principal e um de retaguarda), além dos equipamentos de proteção exigidos.

Desta forma, desconsiderando os valores de instalação, manutenção e estudo de impacto na rede, os custos fixos para o ponto de conexão acrescidos do custo do equipamento gerador mais a falta de incentivos do governo, tornam inviáveis projetos de pequeno porte, ou seja, da geração residencial por painéis fotovoltaicos ou aerogeradores.

Para a conexão de GD de pequeno porte em países que incentivam este tipo de geração é apenas a instalação de um inversor de frequência que é responsável pela regulação da frequência, controle da tensão de saída e proteção contra casos de ilhamento. Um país que incentiva este tipo de geração é a Nova Zelândia. Na Alemanha estas instalações são viáveis devido aos incentivos governamentais, onde o governo empresta dinheiro para instalação de painéis fotovoltaicos com taxas de juros de 0%.

## 7 CONCLUSÕES

O desenvolvimento da humanidade está intimamente ligada ao uso de energia em suas diversas formas. A consolidação deste desenvolvimento significaria garantir que as fontes de energia estejam disponíveis em níveis suficientes para garantir a demanda de energia que sustenta o desenvolvimento da sociedade moderna.

No Brasil, grande parte da energia elétrica tem sua origem hidráulica, o que explica o extenso sistema de transmissão necessário para levar esta energia aos centros consumidores. Restrições ambientais têm cada vez mais dificultado a abertura de novas a abertura de novas linhas de transmissão e a implementação de grandes centrais hidrelétricas.

O Brasil precisa caminhar muito para que o uso do potencial energético alternativo face as grandes centrais geradoras, seja maximizado. Caminhar no sentido de promover um ambiente regulatório, comercial e técnico que facilite e incentive a implantação de geração distribuída.

Os padrões técnicos de conexão e atendimento, principalmente para a rede de distribuição, estão ainda pouco explicitados na legislação brasileira. O que existe é uma resolução da ANEEL com algumas modificações que são insuficientes no que se refere à divisão de responsabilidades quando o acesso se dá na rede de distribuição.

Mesmo assim acredita-se que a geração distribuída representará um importante papel no futuro, complementando a geração centralizada, minimizando as perdas e aumentando a confiabilidade do Sistema Elétrico Brasileiro.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ONS. **Dados Relevantes**. 2012. Site: [www.ons.org.br](http://www.ons.org.br). Acessado em: 15/03/2013.
- [2] ANEEL. **Agência Nacional de Energia Elétrica**. Site: [www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br). Acessado em: 15/03/2013.
- [3] **Instituto Humanitas Unisinos**. Site: <http://www.ihu.unisinos.br/noticias/508094-brasil-e-10o-maior-consumidor-mundial-de-energia-eletrica>. Acessado em: 04/04/2013.
- [4] ANEEL. **Banco de Informações de Geração**, março de 2013. Acessado em: <file:///D:/Documents/Trabalhos%20JR/Geracao%20distribuida/BIG%20-%20Banco%20de%20Informa%C3%A7%C3%B5es%20de%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20quadro%201.htm>. Acessado em 04/04/2013.
- [5] EPE. **2ª Revisão Quadrimestral das Projeções da demanda de energia elétrica do Sistema Interligado Nacional 2012-2016**. 2012.
- [6] EPE. **Consumo Final e Conservação de Energia Elétrica (1970 – 2005)**. 2005.
- [7] EPE. **Projeção da demanda de energia elétrica para os próximos 10 anos (2013-2022)**. 2012.
- [8] ELETROBRAS. **Potencial Hidrelétrico Brasileiro – SIPOT**. 2009.
- [9] ACKERMANN, T., ANDERSSON, G., SÖDER, L., "**Distributed generation: a definition**", 2001.
- [10] ANEEL. **Decreto Nº 5.163**. 2004.
- [11] **Atlas Solarimétrico do Brasil**. Editora Universitária da UFPE, 2000.
- [12] **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. 2001.
- [13] GUEDES, L. M.; SANTOS, E. C.; OLIVEIRA, M. A. G. **Alocação de Geração Distribuída em Redes de Distribuição Radiais considerando Análise de Curva de Carga**. XIII ERIAC, Puerto Iguazú. 2009.
- [14] SILVA LORA, E. E.; HADDAD, J. **Geração Distribuída – Aspectos Tecnológicos, Ambientais e Institucionais**.
- [15] XAVIER DIAS, M. V.; DA COSTA BOROTNI, E.; HADDAD, J. **Geração Distribuída no Brasil: oportunidades e barreiras**.
- [16] ROMAGNOLI, H. C. E. C. B. **Perspectivas para a Geração Distribuída no marco Regulatório atual do Setor**. 2005.