

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

HIGOR BRUSCH DAROS

INTEGRAÇÃO DE FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEIS

Porto Alegre

2013

HIGOR BRUSCH DAROS

INTEGRAÇÃO DE FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEIS

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro

Porto Alegre

2013

HIGOR BRUSCH DAROS

INTEGRAÇÃO DE FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEIS

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina “Projeto de Diplomação” do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre,
Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr^a. Gladis Bordin, UFRGS

Doutora pela Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis, Brasil

Eng. Clarissa Pinto Bastos, ENERFIN DO BRASIL SOC. E ENERGIA LTDA.

Engenheira Eletricista pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Porto Alegre, Dezembro de 2013.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Celene e Geraldo, pelo apoio incondicional em todos os momentos da minha vida.

Aos meus familiares que, mesmo distantes, sempre me apoiaram para que esse sonho se realizasse.

Aos meus grandes amigos, José Augusto da Silva Filho, Pedro Capra, Rafael Tolotti e Rafael Serrão, pela amizade, companheirismo e carinho fraterno.

A todos os amigos de curso, em especial a Ary Lautenschleger, Carolina Gabiatti, Felipe Boos, Fernando Crivellaro, Lucas Behnck e Lucas Endres, pelas infinitas horas de estudo, projetos e ajuda.

Ao professor Luiz Tiarajú por ter aceitado orientar-me neste trabalho e em muitas outras oportunidades durante o período de graduação, e ter acreditado em mim em todos os momentos.

Aos amigos Bernardo Bortoluzzi, Douglas Sandri, Everton Spader e Guilherme Bledow, por todos os projetos que complementaram minha formação como engenheiro, além da grande parceria em todos os momentos.

À escola ENSTA Bretagne, pela oportunidade de intercâmbio na França.

A todos os colegas da Enerfín do Brasil pelo suporte e apoio diário, especialmente à Clarissa Bastos, por sempre ter confiado que esse trabalho poderia se realizar.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para este momento.

RESUMO

Este trabalho foi criado com o objetivo de estudar a integração de fontes de energia renováveis para o abastecimento de uma cidade de pequeno porte no estado do Rio Grande do Sul. As energias renováveis estudadas são a energia eólica, energia solar e biomassa, e os conceitos de geração de energia elétrica a partir dessas três formas são aprofundados. Outras questões abordadas no presente trabalho envolvem métodos para armazenamento e a conversão da energia produzida e a possibilidade de autosuficiência, sem a necessidade de interligação com o sistema elétrico brasileiro. Um estudo é feito sobre a viabilidade econômica do projeto e conceitos como período de retorno do capital investido são analisados e discutidos.

Palavras-chave: Engenharia Elétrica. Fontes Renováveis. Integração de Energia Elétrica. Geração de Energia Elétrica.

ABSTRACT

This document was created with the objective of studying the integration of energy by renewable sources for the supply of a small city in the Brazilian state of Rio Grande do Sul. The energies studied come from wind generators, solar plants and biomass-power plants, and the concepts of electric power generation are further developed. Besides that, the methods concerning the storage and the conversion of the electric energy, as well as the possibility of an auto sufficient system are approached without the necessity of connection with the Brazilian electric system. The project's economic viability is also analyzed and discussed.

Keywords: Electrical Engineering. Renewable Sources. Electric Power Generation. Integration of Energy Sources.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Exposição do Assunto	11
1.2	Objetivos.....	11
1.3	Estrutura do Trabalho	12
2	FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEIS	13
2.1	Introdução.....	13
2.2	Energia Eólica.....	13
2.3	Energia Solar	15
2.4	Biomassa.....	17
3	INTEGRAÇÃO DE FONTES DE ENERGIA	19
3.1	Introdução.....	19
3.2	Método CC	20
3.3	Método CA	22
3.4	Método CA em Alta Frequência.....	23
4	ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA	25
4.1	Introdução.....	25
4.2	CAES (<i>Compressed Air Energy Storage</i>)	25
4.3	Baterias Avançadas.....	26
4.3.1	<i>Baterias de Chumbo-ácido</i>	27
4.3.2	<i>Baterias de Níquel-Cádmio</i>	29
4.4	SMES (<i>Superconducting Magnetic Energy Storage</i>).....	30
5	INTERCONEXÃO E ISOLAMENTO DA REDE.....	32
5.1	Introdução.....	32
5.2	Isolamento da <i>Microgrid</i>	32
5.3	Controle de Interligação	35
5.4	Conexão à Rede	36
5.4.1	<i>Conexão Síncrona</i>	37
5.4.2	<i>Conexão por Indução</i>	38
5.4.3	<i>Conexão com Inversores</i>	38

6	ESTUDO DE CASO	42
6.1	Introdução	42
6.2	Definições Básicas do Sistema	42
6.3	Integração ao Sistema Elétrico de Potência.....	43
6.4	Armazenamento de energia	44
6.5	Consumo de energia elétrica.....	45
6.6	Determinação da Dimensão do Sistema	46
6.6.1	<i>Geradores Eólicos</i>	46
6.6.2	<i>Geradores Fotovoltaicos</i>	47
6.6.3	<i>Sistema Projetado</i>	49
6.7	Análise Econômica	49
6.7.1	<i>Custos de Instalação</i>	50
6.7.2	<i>Comercialização da Energia</i>	51
6.7.3	<i>Análise de Resultados</i>	51
7	CONCLUSÕES.....	53
	REFERÊNCIAS	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Curva de potência do aerogerador Enercon E-82 2000 kW.....	14
Figura 2: Composição da célula fotovoltaica.	16
Figura 3: Corte transversal de uma célula fotovoltaica.	16
Figura 4: Diagrama esquemático dos processos de conversão energética da biomassa.....	17
Figura 5: Tecnologias de conversão de fontes de energias alternativas para interconexão.	20
Figura 6: Integração de fontes de energia pelo método CC.	21
Figura 7: Integração de fontes de energia pelo método CA.	22
Figura 8: Integração de fontes de energia pelo método CA em alta frequência.....	23
Figura 9: Diagrama do princípio de funcionamento de uma usina de CAES.....	26
Figura 10: Banco de baterias de chumbo-ácido do tipo FLVA.....	28
Figura 11: Banco de baterias de chumbo-ácido do tipo VRLA.	28
Figura 12: Exemplo de bateria do tipo níquel-cádmio.	29
Figura 13: Configuração básica de um <i>CSC-Based</i> SMES.	31
Figura 14: Fluxo de potência entre <i>microgrid</i> , a rede elétrica principal e uma carga local.	33
Figura 15: Arquitetura de uma <i>microgrid</i> dividida em subsistemas e com conexão à rede elétrica principal.	35
Figura 16: Interligação entre fontes de energias renováveis e Sistema Elétrico de Potência...	36
Figura 17 : Velocidade de vento média anual a uma altura de 100m no litoral do Rio Grande do Sul.....	42
Figura 18 : Curva de radiação solar anual para Porto Alegre.....	43
Figura 19: Geração fotovoltaica diária em base horária.....	44
Figura 20 : Curva de potência do aerogerador Vestas V90 – 3 MW.....	46
Figura 21 : Topologia do sistema analisado na integração de fontes de energias renováveis..	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Temperatura crítica de supercondutores.....	30
Tabela 2: Tempo de interrupção da conexão entre uma fonte de energia renovável e o SEP em função dos distúrbios de tensão.	40
Tabela 3: Tempo de interrupção da conexão entre uma fonte de energia renovável e o SEP em função dos distúrbios de frequência.	40
Tabela 4: Máxima corrente de distorção harmônica em porcentagem de corrente I.....	41
Tabela 5: Radiação mensal em kWh/m ² /dia.....	43
Tabela 6 : Consumo de energia elétrica no município de Xangri-lá/RS no ano de 2012.....	45
Tabela 7: Especificações técnicas inversor SMA Sunny.....	47
Tabela 8: Potência gerada pelo painel solar com potência nominal de 235W.	47
Tabela 9: Estimativa de custo de instalação da fonte de energia fotovoltaica.	50
Tabela 10 : Quadro comparativo entre os aspectos de projeto para energia solar e eólica.	52

LISTA DE ABREVIações

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CAES	Armazenador de Energia de Ar Comprimido – <i>Compressed Air Energy Storage</i>
CC	Corrente Contínua
CSC	Conversor de Fonte de Corrente – <i>Current Source Converter</i>
FVLA	Bateria de chumbo-ácido ventiladas – <i>Free Vented Lead Acid</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SMES	Armazenamento de Energia por Supercondução Magnética – <i>Superconducting Magnetic Energy Storage</i>
VRLA	Bateria de chumbo-ácido reguladas por válvula – <i>Valve Regulated Lead Acid</i>
VSC	Conversor de Fonte de Tensão – <i>Voltage Source Converter</i>

1 INTRODUÇÃO

1.1 Exposição do Assunto

Devido às limitações das fontes de energia primariamente utilizadas, fontes renováveis foram idealizadas e pesquisadas de modo a reestruturar a matriz energética mundial. Apesar de o sol ser a fonte primária de todas as energias disponíveis na natureza, algumas fontes estão associadas a materiais finitos (como os combustíveis fósseis), ou seja, há um limite de tempo na utilização dessas opções de fontes de energia. Neste contexto, surgem como alternativas as fontes de energia renováveis.

Segundo POMILIO (2013), por energia renovável se entende as formas de energia que ocorrem na natureza e que são produzidas continuamente em decorrência da energia absorvida do sol, seja diretamente (energia solar, fotovoltaica) ou indiretamente, como produzida pelo vento, da biomassa ou do movimento das águas em geral (marés, ondas, desníveis, etc.). Além da questão do limite de utilização dessas fontes, há também uma preocupação ambiental envolvida, tanto no intuito do reaproveitamento de energia, na tentativa de diminuir o desperdício de produtos e no emprego de fontes de energia mais limpas, energias estas que, para sua produção, não haja emissão de gases ou outros resíduos nocivos ou que contribuam para o chamado efeito estufa (POMILIO, 2013).

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é estudar e analisar a integração de fontes de energia renováveis visando o abastecimento de uma cidade ou região de pequeno porte sem que haja a necessidade de utilização do sistema elétrico de transmissão e distribuição. Neste trabalho, o enfoque é dado na integração de três fontes de energia consideradas renováveis, que são energia solar, energia eólica e biomassa. Para cada caso, são analisadas as características mais importantes e a forma de obtenção desses tipos de energia.

Outros fatores importantes que constituem esse trabalho são as pesquisas sobre o armazenamento da energia produzida, assim como a conversão desta para utilização contínua sem que haja a necessidade de interligação com o sistema elétrico. Mais, há também um estudo econômico sobre a viabilidade do projeto e alguns fatores importantes na consolidação deste, como análises sobre o período de retorno do capital investido e a rentabilidade do negócio.

1.3 Estrutura do Trabalho

Sobre a estrutura do trabalho, este está dividido em 7 capítulos.

No Capítulo 2, é feita uma revisão bibliográfica sobre as energias a serem utilizadas (energia solar, eólica e biomassa), assim como uma análise sobre suas características mais importantes relacionadas ao projeto.

No Capítulo 3, são apresentados os métodos para a integração dessas fontes de energia renováveis. Nele, são discutidas as formas mais viáveis de se obter um projeto consistente e econômico.

No Capítulo 4, depois de discutidas as questões de integração das fontes renováveis, são analisadas as formas de armazenamento da energia elétrica produzida.

A conversão da energia para que haja esse armazenamento ou injeção na rede é apresentada no Capítulo 5 deste trabalho.

No Capítulo 6, o projeto é então definido e apresentado, levando em consideração as possibilidades expostas nos capítulos anteriores, e também já realizando a análise econômica citada.

Por fim, o Capítulo 7 é composto pelas conclusões do trabalho.

2 FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEIS

2.1 Introdução

A alternativa das fontes de energia renováveis é tratada adequadamente, especialmente nas regiões que possuem a capacidade de geração a partir das condições correntes na natureza. Para poder realizar o estudo da integração de fontes de energia, deve-se, primariamente, analisar as características básicas de cada uma das fontes de energia renováveis. Estas fontes – solar, eólica e biomassa – são detalhadas a seguir com este intuito de conhecimento individual de cada uma para, posteriormente, integrá-las da forma mais propícia possível.

2.2 Energia Eólica

O vento – atmosfera em movimento – tem sua origem na associação entre a energia solar e a rotação planetária (DO AMARANTE *et al*, 2001), e é dele que surge a energia eólica. Basicamente, energia eólica é aquela obtida da energia cinética (do movimento) gerada pela migração das massas de ar provocada pelas diferenças de temperatura existentes na superfície do planeta. Já a geração de eletricidade com o uso de turbinas eólicas de grande porte foi posta em prática há algumas décadas, porém tem sido muito visada nos últimos anos.

A conversão de energia eólica em energia mecânica é realizada pelo contato do vento com as pás de um aerogerador. Ao girar, essas pás fornecem energia mecânica que aciona o rotor que, conseqüentemente, produz energia elétrica. A quantidade de energia produzida depende tanto de fatores naturais, como o vento que incide por entre as pás e a densidade do ar da região, como por fatores de construção do próprio aerogerador, como o diâmetro do rotor e a eficiência do conjunto gerador/transmissão, seguindo a Equação (1) apresentada (DO AMARANTE *et al*, 2001).

$$P (W) = \frac{1}{2} \rho A_r v^3 C_p \eta \quad (1)$$

Onde:

ρ = densidade do ar em kg/m³;

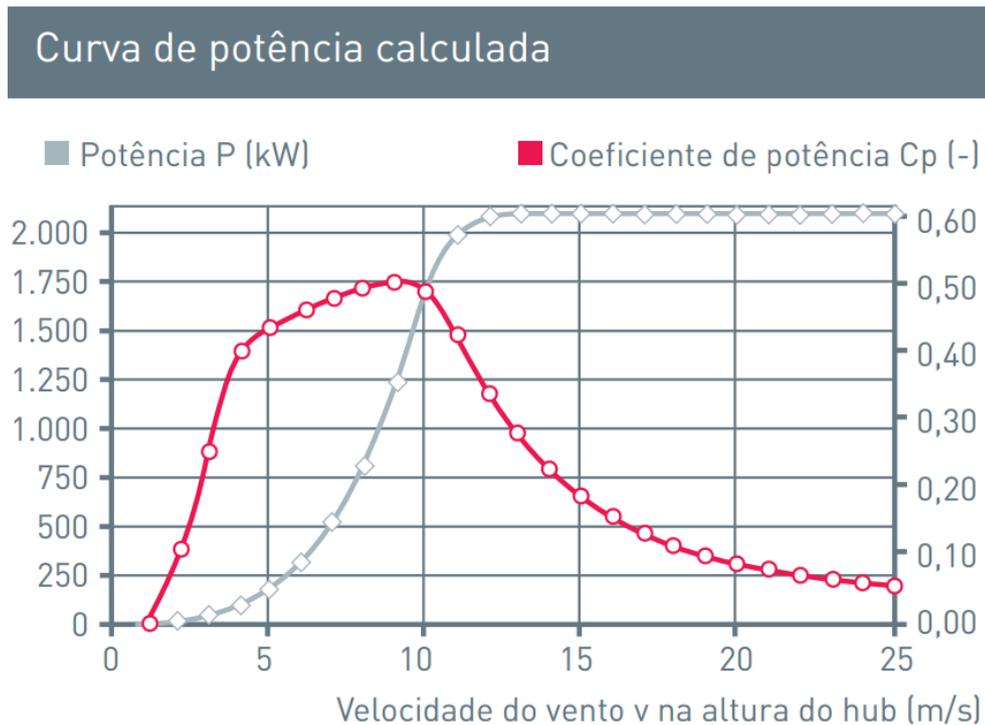
$A_r = \pi.D^2/4$, em que D é o diâmetro do rotor;

C_p = coeficiente aerodinâmico de potência do rotor;

η = eficiência do conjunto gerador/transmissão.

A relação entre velocidade de vento e capacidade de geração da máquina pode ser melhor analisada pela Figura 1. Nela, pode-se perceber que há geração de energia elétrica a partir de velocidades de vento da ordem de 2,5 e 3,0 m/s, ou seja, abaixo disso o conteúdo energético do vento não é satisfatório para ser aproveitado.

Figura 1: Curva de potência do aerogerador Enercon E-82 2000 kW.



Fonte: ENERCON, 2013.

Além disso, nota-se uma saturação da geração da máquina próxima à sua capacidade nominal, com velocidades de vento (para a máquina analisada) da ordem de 13m/s. Para velocidades superiores a esta, é acionado um sistema automático de limitação de potência da máquina, que pode ser por controle de ângulo de passo das pás ou por estol aerodinâmico, dependendo do modelo da turbina (DO AMARANTE *et al*, 2001). Portanto, a ideia de que quanto mais vento, mais energia é gerada, é equivocada. Aliás, velocidades de vento muito maiores do que a citada, apesar de serem raras, proporcionam uma turbulência prejudicial à máquina. Nestes casos, um sistema de proteção é acionado automaticamente para reduzir a rotação das pás e desconectar o sistema elétrico do gerador da rede elétrica.

Para aproveitamento do potencial eólico de uma dada área, normalmente é construída uma usina eólica. Usina eólica é um conjunto de aerogeradores dispostos de forma a não interferirem no abastecimento de vento de cada um. A construção de uma usina apresenta a

vantagem da economia de custos, como o arrendamento de área, fundações, aluguel de guindastes e montagem, e equipes de operação e manutenção.

2.3 Energia Solar

Assim como o sol é importante na geração das correntes de ar que propiciam a utilização dos ventos para a geração de energia, ele também pode ser utilizado como fonte direta de energia renovável. A radiação solar pode ser convertida em energia elétrica por meio de efeitos sobre determinados materiais, por exemplo, os efeitos termoelétrico e o fotovoltaico (ANEEL, 2005).

No caso do aproveitamento passivo da energia solar, tem-se no calor e na iluminação proporcionada os dois pontos a serem utilizados. Eles decorrem da penetração ou absorção da radiação solar nas edificações, o que reduz as necessidades de iluminação e aquecimento dos ambientes.

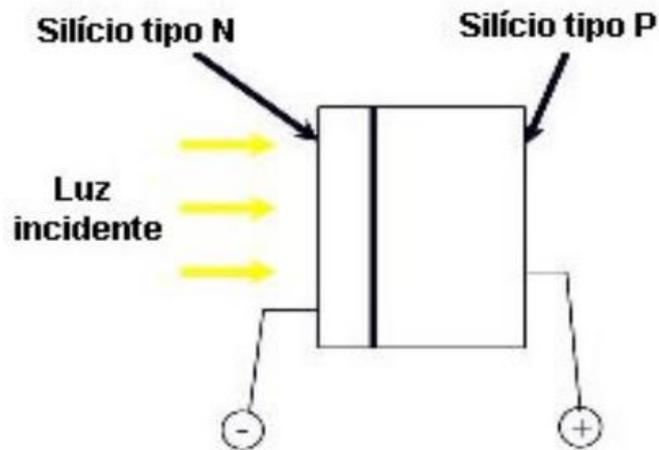
Já o aproveitamento térmico é feito com o uso de coletores ou concentradores solares (ANEEL, 2005). Esse tipo de aproveitamento é utilizado no aquecimento de fluidos, seja em uma atividade doméstica (aquecimento de água para higiene pessoal e lavagem de utensílios e ambientes), seja para tarefas que requeiram temperaturas mais elevadas (secagem de grãos e produção de vapor).

Outro método a ser analisado neste trabalho é o qual faz a conversão direta da energia solar em energia elétrica pelos efeitos da radiação (calor e luz) sobre determinados materiais. Essa conversão pode ser realizada pelo surgimento de uma diferença de potencial em materiais semicondutores, provocada pela junção de dois metais, ou também pela conversão de fótons contidos na luz solar em energia elétrica, por meio do uso de células solares. Essa forma de obtenção de energia é, atualmente, mais utilizada em locais onde a distância à rede elétrica seja suficientemente grande para que a energia obtida seja mais barata do que a extensão da rede até o local da aplicação (AMESEIXAL).

Segundo ANEEL (2005), o efeito fotovoltaico decorre da excitação dos elétrons de alguns materiais na presença da luz solar. Dentre os materiais adequados para essa conversão (células solares ou fotovoltaicas), tem-se como destaque o silício. Como o cristal de silício puro não possui elétrons livres, apresenta-se como um mal condutor elétrico. Logo, a célula fotovoltaica é composta por duas porções de silício, dopadas com elementos opostos, como mostra a Figura 2. De um lado, faz-se a dopagem do silício com fósforo, obtendo-se um material com elétrons livres (tipo N). De outro, a dopagem é feita com o boro, resultando em

um material com características inversas, ou seja, falta de elétrons (tipo P) (DO NASCIMENTO, 2004).

Figura 2: Composição da célula fotovoltaica.

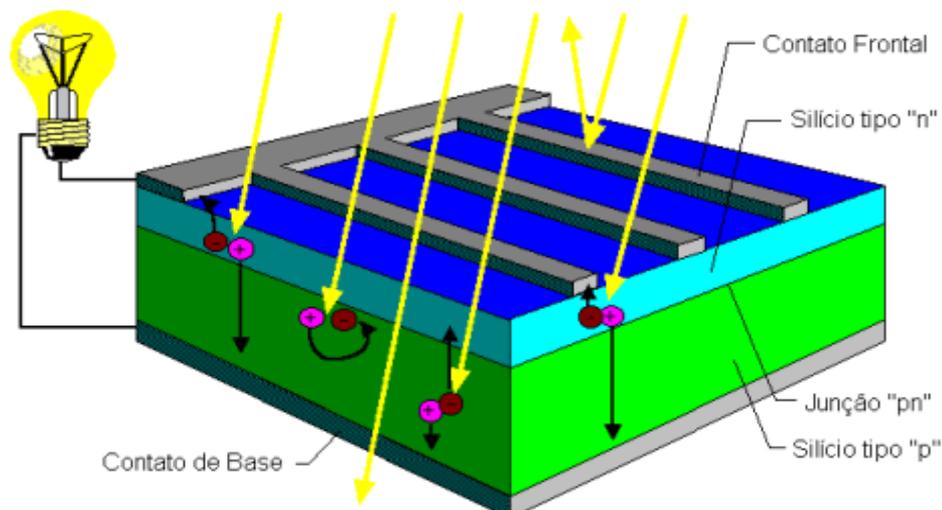


Fonte: DO NASCIMENTO, 2004.

Ao serem unidas, as duas placas formam um campo elétrico na região P-N devido aos elétrons livres do silício tipo N que ocupam as lacunas da estrutura do silício tipo P. Quando a luz é incidida sobre a célula, os fótons chocam-se com outros elétrons da estrutura de silício concedendo a energia necessária e transformando os fótons em condutores. Por meio de um condutor externo, gera-se um fluxo de elétrons – corrente elétrica. Essa corrente será proporcional à intensidade da luz incidente.

A Figura 3 apresenta o corte transversal de uma célula fotovoltaica.

Figura 3: Corte transversal de uma célula fotovoltaica.



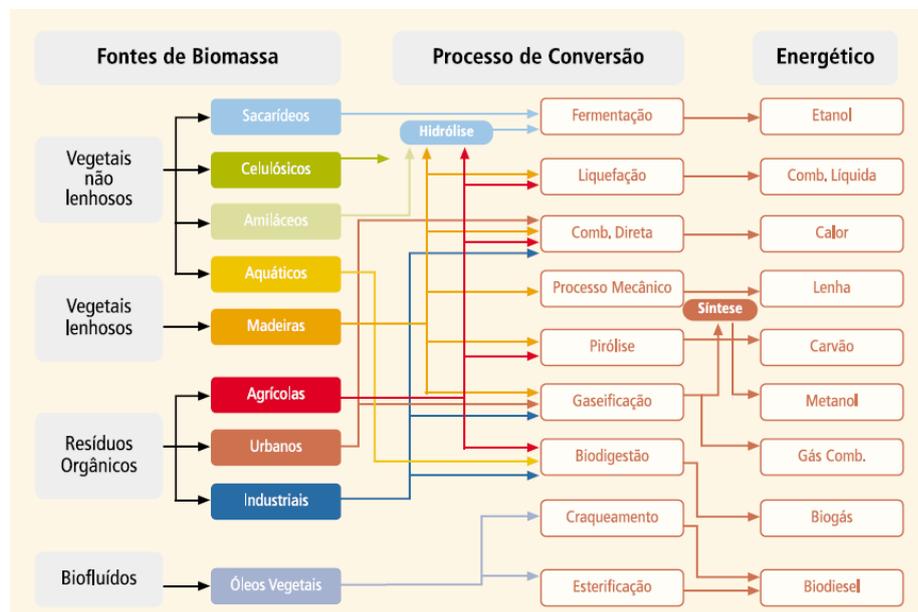
Fonte: DO NASCIMENTO, 2004.

2.4 Biomassa

Biomassa é toda matéria orgânica que pode ser aproveitada na produção de energia (BRAND, 2008). Como já citado, a biomassa é uma forma indireta de energia solar, pois resulta da conversão de energia solar e química, por meio da fotossíntese. Os combustíveis mais comuns da biomassa são os resíduos agrícolas, madeiras e plantas como a cana-de-açúcar, colhidos justamente para a produção de energia. Além desses, o lixo produzido em cidades pode ser aproveitado como combustível que viria a suprir seja as próprias residências, como o transporte e as indústrias da cidade.

A biomassa se destaca com a grande vantagem de poder ser aproveitada através da combustão de fornos e caldeiras, mesmo que sua eficiência seja reduzida. Essa eficiência pode ser ampliada através de tecnologias mais avançadas na conversão dessa energia (ANEEL, 2005). Essas tecnologias visam, além de uma maior eficiência na produção de energia, mas também a redução dos impactos ambientais causados pelos resíduos gerados por essa forma de geração de energia.

Figura 4: Diagrama esquemático dos processos de conversão energética da biomassa.



Fonte: ANEEL, 2005.

Entre as técnicas utilizadas para transformar a matéria-prima em energético e mostradas na Figura 4, tem-se, por exemplo, a digestão anaeróbica, cujo produto final é o biogás – composto basicamente de metano e dióxido de carbono –, consiste na decomposição do material pela ação de bactérias na ausência do ar (ANEEL, 2008). Outra opção muito

utilizada na agroindústria é a fermentação, onde há a conversão dos açúcares de plantas (batata, milho, beterraba e cana-de-açúcar) em álcool pela ação de microorganismos. O produto final desta técnica é o etanol, utilizado como combustível em motores de combustão interna e também é misturado na gasolina. Além disso, o resíduo sólido desse processo de fermentação pode ser utilizado em usinas termelétricas para a produção de eletricidade.

Outras técnicas também existentes no tratamento da biomassa são a pirólise ou carbonização, esta a mais antiga e simples de todos os processos, que faz a conversão de um combustível sólido em outro de melhor qualidade e conteúdo energético. O exemplo mais comum é a transformação de lenha em carvão. Essa transformação se dá por meio do aquecimento do material original até a extração do material volátil.

Esse processo é feito justamente pelo produto final (carvão vegetal) ter densidade energética duas vezes maior do que o material de origem, e queima em temperaturas muito mais elevadas. Na gaseificação, o combustível sólido é transformado em gás, que pode ser utilizado em motores de combustão interna e em turbinas para geração de eletricidade. A gaseificação pode ser considerada um processo limpo, caso sejam retirados os componentes químicos que prejudicam o meio ambiente e a saúde humana. A técnica que esteve muito discutida no Brasil nos últimos tempos dá-se pela obtenção da glicerina e do biodiesel através de reações entre óleos vegetais, metanol ou etanol e uma base – hidróxido de sódio ou de potássio.

A disponibilidade dessa fonte de energia é estimada em 1,8 trilhão de toneladas. A longo prazo, pode-se apontar que essa quantidade vista em termos de geração de energia da ordem dos 11 mil TWh (ANEEL, 2008). A produção varia desde pequenas escalas (geração menor que 1 MW), quando os sistemas são basicamente a vapor ou utilizam gaseificadores da biomassa acoplados a motores, até escalas maiores (geração na ordem de dezenas de MW), quando as tecnologias são empregadas na agroindústria através de ciclos a vapor, ciclos de gasificação e turbinas a gás.

3 INTEGRAÇÃO DE FONTES DE ENERGIA

3.1 Introdução

O conceito de integração de fontes de energia se baseia na demanda de uma parte do sistema, que necessita da energia para seus fins, e da oferta dos geradores ou fontes de energia, que disponibilizam essa grandeza. Dessa combinação, faz-se uma composição de um sistema interligado que possibilita uma transmissão da energia desde sua geração ao seu consumo.

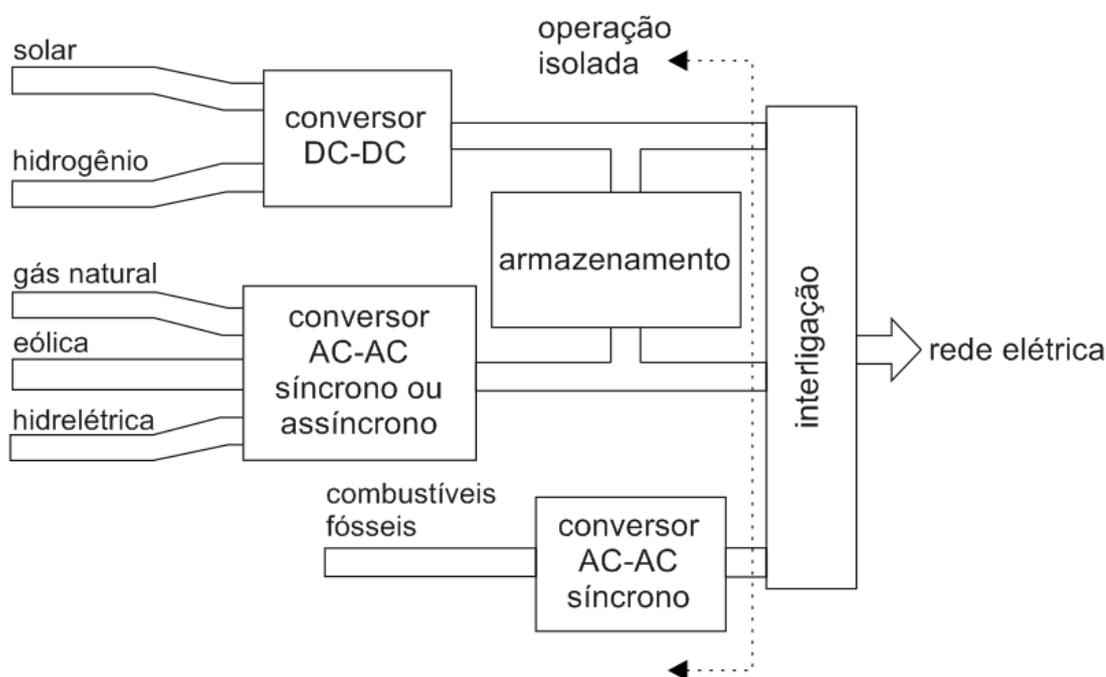
Em se tratando de fontes de energia renováveis, tem-se a característica de que estas não possuem uma saída contínua e regular, havendo a necessidade de armazenamento para que a energia seja utilizada quando houver demanda (FARRET & SIMÕES, 2006). Para que múltiplas fontes de energia renováveis façam parte do sistema, o conceito de *microgrid* é então tratado. Segundo GLENWRIGHT (2002), *microgrid* é um grupo de cargas interconectadas e fontes de energia distribuídas com limites elétricos definidos que atua como uma unidade controlável com relação à rede e pode se conectar e desconectar desta rede para poder atuar seja em contato com a rede ou em um modo isolado. A *microgrid*, para os componentes consumidores, proporciona a energia e o calor necessários; para o sistema, a *microgrid* serve como uma unidade que pode atuar independentemente ou a partir de sinais de um operador do sistema de potência. Ambos os comportamentos da *microgrid* requerem algumas características como, na função conectada à rede, ser necessário o suporte à integração de fontes de energia renováveis e a otimização para a operação econômica destas fontes. Por outro lado, caso atue independentemente, é necessário que haja a organização do próprio sistema da *microgrid*, um gerenciamento das cargas consideradas críticas e não-críticas visando a geração de energia disponível, além de um sistema emergencial que impeça a falta de energia para as demandas cruciais.

Antes de apresentar os métodos para integração das fontes de energia, deve-se considerar que as fontes de energia tratadas no capítulo anterior fazem parte de dois tipos diferentes de geração de energia elétrica. Enquanto que os sistemas fotovoltaicos são do tipo estacionário, ou seja, fornecem corrente contínua, os sistemas eólicos, compostos por geradores síncronos ou de indução, fornecem corrente alternada.

A Figura 5 apresenta as tecnologias de conversão para as fontes de energia renováveis. Nota-se que o esquema mostra tanto a possibilidade de isolamento quanto a interconexão com

a rede. Caso sejam utilizadas apenas as fontes eólica e hidrelétrica, um controle de tensão alternada de frequência variável deve ser agregado a uma conexão AC através de um sistema de conversão AC-AC. Porém, caso seja incluída uma outra fonte de energia, por exemplo uma fonte fotovoltaica, é necessária também a utilização de um barramento DC para conectá-la ao sistema.

Figura 5: Tecnologias de conversão de fontes de energias alternativas para interconexão.



Fonte: FARRET & SIMÕES, 2006, modificado.

Deve-se levar em consideração também o armazenamento da energia produzida. A *microgrid* deve possuir uma etapa de armazenamento, para quando a oferta de energia seja maior que a demanda, o excesso não seja perdido e possa ser utilizado em um outro momento. Antes de tratar do armazenamento da energia, serão apresentados diferentes métodos para integração de fontes de energia. A seguir, o método CC, o método CA e o o método CA em alta frequência são abordados.

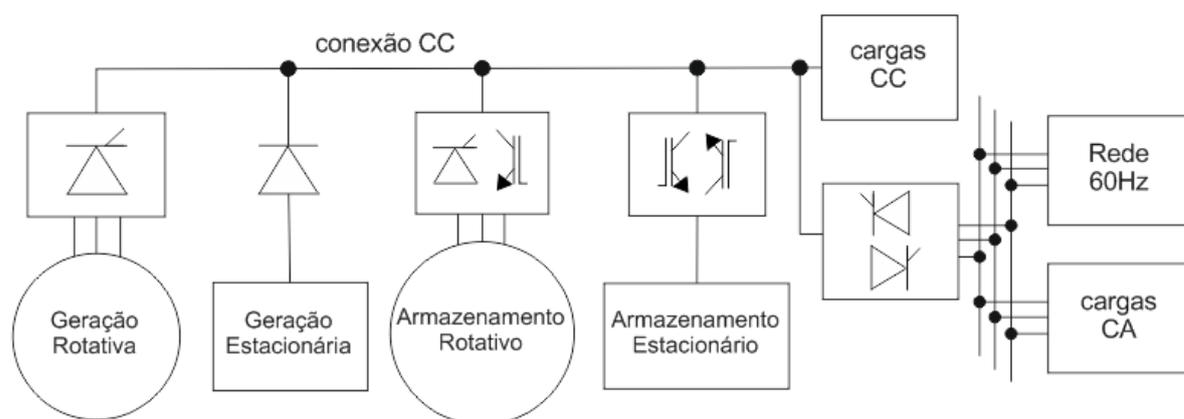
3.2 Método CC

O método CC é a forma mais simples e antiga de integração de energia elétrica (FARRET & SIMÕES, 2006). Esse tipo de integração é utilizado majoritariamente nos primeiros carros produzidos, onde um exemplo é a conexão direta de uma fonte CC com uma bateria e uma carga. A capacidade desse método em conexões CA-CC, transmissão e

distribuição CC foi ampliada a partir do desenvolvimento de retificadores de potência e retificadores controlados.

A simplicidade deste método se dá pela não-obrigatoriedade de haver sincronismo, além de as perdas em transmissão e distribuição serem menores do que nos outros métodos AC. Outras vantagens do método CC são a viabilidade com que se obtém os conversores e o baixo custo da infraestrutura necessária para a transmissão – apesar de as exigências de um terminal CC serem mais complexas. Em contrapartida, as desvantagens ao se utilizar esse método podem dificultar sua aplicação. Os custos com os equipamentos dos terminais, as corrosões dos eletrodos que fazem parte da infraestrutura do sistema, a grande quantidade de componentes e controles e, principalmente, a necessidade de uma compatibilidade cuidadosa dos níveis de tensão para evitar a re-circulação de corrente entre as fontes de entrada são fatores a serem considerados na escolha deste método.

Figura 6: Integração de fontes de energia pelo método CC.



Fonte: FARRET & SIMÕES, 2006, modificado.

Para a geração estacionária, deve ser utilizado somente um sistema com o uso de diodos para uma fonte que alimenta a conexão CC, evitando assim os fluxos de corrente para dentro das fontes CC, como visto na Figura 6. No caso de geradores síncronos ou de indução, são necessários dois conversores atuando separadamente. Os controles de cada fonte devem ser empregados separadamente, pois a contribuição de corrente na conexão CC pode ocorrer apenas aumentando o nível de tensão de saída em relação às outras fontes. Com relação à conexão com a rede 60 Hz, esta deve possuir um conversor CC-CA somente se a rede é utilizada para armazenar energia; caso contrário, um inversor do tipo tiristor é o suficiente para fazer a ligação.

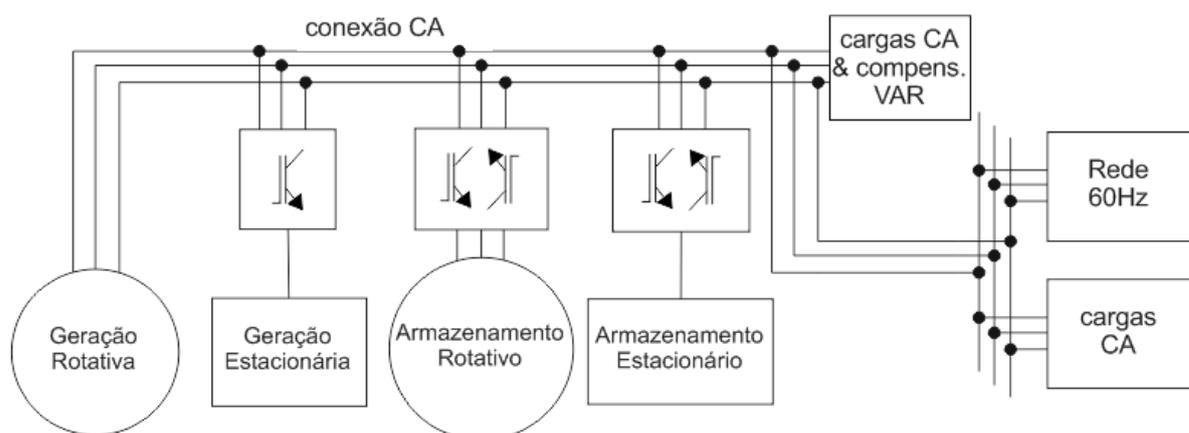
3.3 Método CA

O segundo método a ser apresentado para integração de fontes de energia é o método CA. Esse método é baseado em um barramento CA que pode operar nas frequências 50 ou 60Hz, como a própria rede pública ou uma rede local que atua em operação isolada (FARRET & SIMÕES, 2006).

Entre as vantagens de utilização deste método, encontram-se a utilidade de regulação e manutenção da tensão de operação, que torna mais fácil a injeção de potência na rede, a correspondência facilitada entre multiterminais e multitensões e o uso de isolamento galvânica, que isola eletricamente o circuito de potência de saída do circuito de potência de entrada. Ao utilizar geradores síncronos ou de indução, estes estabelecem seus próprios pontos de operação, o que pode vir a simplificar a conexão pelo método CA através da eliminação de conversores eletrônicos.

Se, pelo método CC, o sincronismo não é necessário, neste método, a necessidade de sincronismo é rigorosa, além da correspondência dos níveis de tensão e da sequência de fase correta entre as fontes, tanto na conexão como na operação. A partir dessas exigências, o controle neste método deve ser muito mais rígido para evitar problemas no sistema. A presença de indutâncias e capacitâncias proporcionam perdas, desfavoráveis quando se é feita uma distribuição a longa distância. Além disso, outros pontos negativos do método CA são os limites reduzidos de transmissão e distribuição, a necessidade de uma correção do fator de potência e da distorção harmônica, e também a possibilidade de re-circulação de corrente entre as fontes de energia.

Figura 7: Integração de fontes de energia pelo método CA.



Fonte: FARRET & SIMÕES, 2006, modificado.

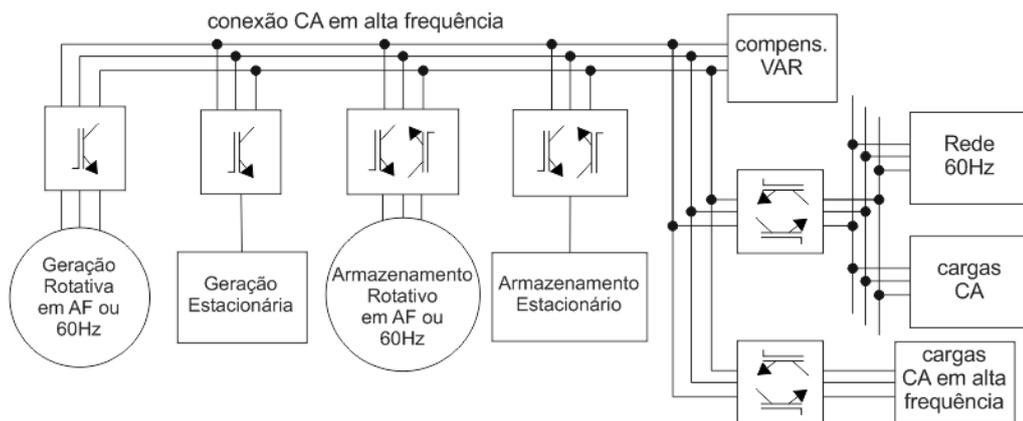
Através da Figura 7, nota-se a vantagem desse método quando utilizados geradores de corrente alternada, devido a sua fácil conexão com o sistema – a conexão é direta. Para as fontes estacionárias, é necessário um conversor CC-CA (também é possível utilizar um booster CC-CC e depois um conversor CC-CA permitindo assim uma eficiência maior na conversão).

3.4 Método CA em Alta Frequência

O método CA em alta frequência para sistemas de *microgrid* é uma solução da eletrônica de potência que serve como uma interface para a rede e também para uma operação isolada do sistema (FARRET & SIMÕES, 2006). As frequências utilizadas na indústria são usualmente de 400 Hz, mesmo valor dos casos de naves espaciais, barcos, ônibus, aviões, submarinos e outras cargas do mesmo estilo. Esse método fornece proteção contra faltas, tem como característica ser fisicamente de dimensões pequenas, e suas configurações atendem a várias funções de qualidade de energia.

A grande vantagem de sistemas eletrônicos de potência é a possibilidade de ser controlado e monitorado remotamente, permitindo a uma otimização em tempo real do fluxo de potência e das necessidades do sistema. A Figura 8 apresenta um esquemático do sistema pelo método CA em alta frequência.

Figura 8: Integração de fontes de energia pelo método CA em alta frequência.



Fonte: FARRET & SIMÕES, 2006, modificado.

A conversão da energia gerada pelas fontes de energia pode ser feita de duas formas, através da conversão CA-CA tradicional com switches semicondutores. A primeira alternativa é realizada em duas etapas, sendo a primeira em uma conversão CA-CC e, depois, uma nova conversão CC-CA. No segundo caso, a conversão é feita diretamente através de

cicloconversores. Segundo POMILIO (2009), cicloconversores são associações de retificadores controlados, de maneira que estes permitem produzir saída com frequência distinta daquela presente na entrada. Esses cicloconversores tratam a tensão de saída dos geradores, que, como anteriormente dito, fornecem tensões com frequências da ordem dos 400 Hz, reduzem essa frequência para fazer o acionamentos de cargas que operam com frequência na ordem dos 50/60 Hz. Em um cicloconversor, não há um compartimento de armazenamento de energia. Portanto, a energia instantânea de saída é igual à de entrada, descontadas as perdas.

Outra característica dos cicloconversores é a presença de harmônicos complexos em sua onda de saída. Porém, os harmônicos são de ordem superior e normalmente filtrados pela indutância dos motores. O ripple de corrente também acaba sendo menor através desse método, aumentando assim sua eficiência. Para o armazenamento, não apenas as baterias são admitidas, mas os armazenamentos dinâmicos tornam-se uma alternativa no método CA em alta frequência.

Se por um lado, por fazer parte da eletrônica de potência traz vantagens em relação aos outros métodos, o custo dos transformadores nesse cenário do método CA em alta frequência acaba sendo muito alto, além do grande número de dispositivos que devem compor o sistema para colocar em operação seu controle que é muito complexo. Por ser a tecnologia mais recente, ainda há muito o que se desenvolver neste contexto, como os próprios equipamentos. Estes equipamentos possuem limites de operação pequenos, comparados aos outros métodos, e apresentam também alguns problemas na transmissão e distribuição em altas frequências.

4 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA

4.1 Introdução

O armazenamento de energia elétrica vem ao encontro de duas necessidades básicas para os sistemas evitando problemas que seriam danosos ao próprio sistema de distribuição de energia elétrica (IEC, 2011). Sem o armazenamento, toda demanda de energia elétrica deveria ser atendida com geração, ou seja, a energia seria consumida ao mesmo tempo que é gerada. O segundo ponto trata sobre as próprias falhas físicas do sistema, como danos à linha, que impediriam que a energia gerada chegasse aos pontos de demanda. Este fato ocorre pois as fontes de energia são instaladas geralmente distantes dos locais onde a energia será consumida. Logo, é necessário a conexão através de sistemas de potência que estão sujeitos a estas falhas anteriormente citadas.

O armazenamento de energia deve ser visto na maior parte dos casos como uma bateria, carregando ou descarregando de acordo com as demandas do sistema elétrico (ELMEEGARD & BRIX, 2005). Quando a produção de energia excede à demanda, a bateria é carregada, e descarrega quando a demanda é maior que a geração.

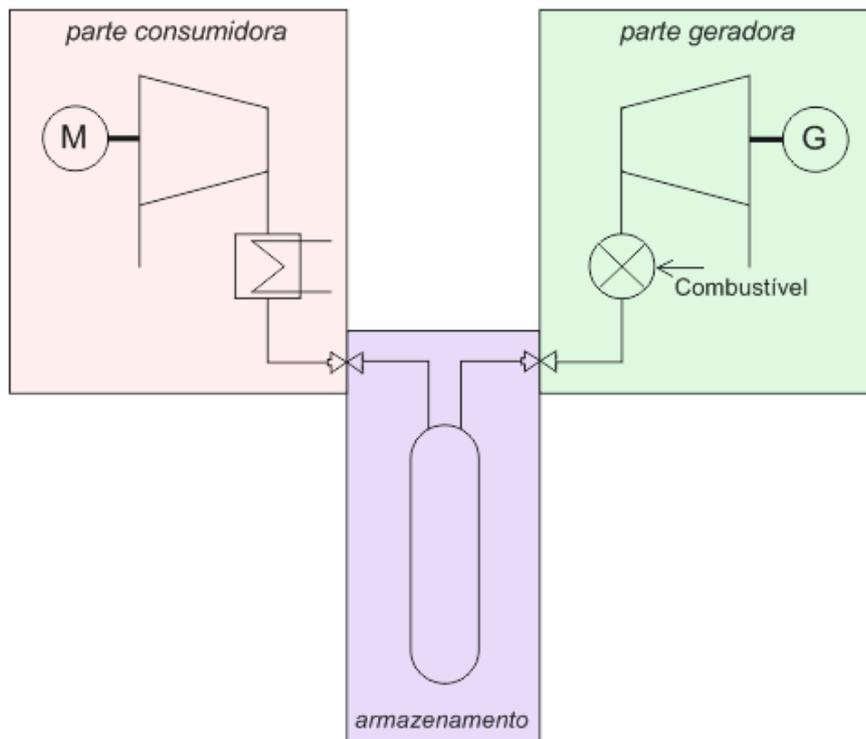
Por se tratar de um volume de energia considerável, são abordados e analisados três tipos de armazenamento de energia que podem ser considerados de grande porte, que são o armazenamento de energia em ar comprimido (CAES, do inglês *Compressed Air Energy Storage*), as baterias avançadas e o armazenamento de energia por supercondução magnética (SMES, do inglês *Superconducting Magnetic Energy Storage*).

4.2 CAES (*Compressed Air Energy Storage*)

Uma usina de CAES consiste em um grande volume armazenador de ar comprimido em alta pressão e tem como princípio uma turbina a gás que é dividida em dois compartimentos, o de compressão (armazena energia) e o de expansão (libera a energia demandada). Esses compartimentos armazenam o ar comprimido em cavernas subterrâneas ou formação de rochas (ELMEEGARD & BRIX, 2005).

O armazenamento de energia com ar comprimido é um método não somente eficiente e limpo, mas também econômico (JUNG, 2010). Estas plantas são projetadas para operar em um ciclo diário, carregando-se durante a noite e se descarregando durante o dia.

Figura 9: Diagrama do princípio de funcionamento de uma usina de CAES.



Fonte: ELMEEGARD & BRIX, 2005, modificado.

A Figura 9 representa a instalação de uma usina de CAES e seus princípios básicos. À esquerda, tem-se a parte consumidora, onde há um compressor de ar e um refrigerador. O armazenamento é feito em uma caverna subterrânea, que tem ligação entre as duas outras partes do sistema. Já a parte geradora contém um incinerador de gás e uma turbina. Os blocos desse sistema são interligados por válvulas que são controladas pelo sistema operacional.

Apesar de suas vantagens, este método ainda tem um custo de instalação muito alto, devido ao maquinário extremamente complexo e equipamentos customizados, além de armazenar o ar em cavernas subterrâneas.

4.3 Baterias Avançadas

Segundo CHAGAS (2007), as baterias são associações em série ou paralelo de células unitárias acumuladoras de energia, o que permitem a obtenção de valores de tensões ou correntes elétricas desejados. Essas baterias, além da acumulação de energia, são capazes de conservá-la e restituí-la, representando uma fonte autônoma de energia.

Uma bateria possui dois polos, um positivo (cátodo) e um negativo (ânodo). A liberação da energia acumulada na bateria se dá entre esses polos, quando o cátodo é reduzido pela absorção de elétrons liberados pela oxidação do ânodo (JUNG, 2010).

As baterias são divididas em duas categorias principais, as baterias primárias – que são aquelas que não podem ser recarregadas, ou seja, produzem energia a partir de uma reação eletroquímica, geralmente irreversível, que as inutiliza posteriormente – e as baterias secundárias. As baterias secundárias podem ser recarregadas por uma fonte de alimentação externa e, apesar de ter uma vida útil limitada, pode ser carregada e descarregada muitas vezes.

Enquanto que no processo de carga, a energia elétrica é convertida em energia química, para ser acumulada dentro da bateria, no processo de descarga, acontece o oposto, isto é, a energia acumulada é convertida em energia elétrica e liberada. Na descarga, a medida que a bateria fornece corrente elétrica em sua saída, a diferença de potencial entre seus eletrodos diminui. No processo inverso, a carga, a passagem de corrente no sentido oposto decompõe a água e as reações químicas são sucedidas por um aumento da diferença de potencial entre os polos da bateria.

4.3.1 Baterias de Chumbo-ácido

Existem dois tipos de baterias de chumbo-ácido: as ventiladas (FVLA, do inglês *Free Vented Lead Acid*) e as reguladas por válvula (VRLA, do inglês *Valve Regulated Lead Acid*) (CHAGAS, 2007). Em ambos os casos, as baterias podem ser acopladas formando um banco de baterias para armazenar energia em grandes quantidades.

As baterias FVLA são as mais comuns dentre as baterias de chumbo-ácido. Dentre suas características principais, estão o fato de ser necessário o enchimento com água em intervalos regulares, e também a exigência de sua instalação em salas exclusivas com sistemas especiais de controle de ar ambiente e instalação elétrica da iluminação à prova de explosão, uma vez que essas baterias emitem gases perigosos quando da sua utilização pela liberação de hidrogênio. A vida útil estimada para esse tipo de bateria de chumbo-ácido é de aproximadamente de 12 a 15 anos, dependendo da temperatura de armazenamento. O fim da vida útil é considerado quando a capacidade da bateria atinge 80% de sua capacidade nominal, declarada pelo fabricante. A Figura 10 apresenta um banco de baterias do tipo FLVA.

Figura 10: Banco de baterias de chumbo-ácido do tipo FLVA.



Fonte: CHAGAS, 2007.

As bateras VRLA podem ser de dois tipos: as de eletrólito gel e as de eletrólito asorvido nos separadores (CHAGAS, 2007). Essas baterias permitem a recombinação da maior parte dos gases produzidos durante o seu funcionamento, reduzindo assim as perdas de água. Sua capacidade pode variar de poucos Ah até vários milhares de Ah. Por isso, sua aplicação vai desde sistemas de telecomunicações e no-breaks até em centros de distribuição de energia e construções de grande porte, como hospitais, bancos, aeroportos. As grandes vantagens desse tipo de bateria é seu baixo custo e necessidade reduzida de manutenção. Mais, por não liberarem gases, podem ser armazenadas no mesmo ambiente que outros equipamentos. A Figura 11 apresenta um banco de baterias de chumbo-ácido do tipo VRLA.

Figura 11: Banco de baterias de chumbo-ácido do tipo VRLA.



Fonte: CHAGAS, 2007.

As baterias de chumbo-ácido também não estão sujeitas ao “efeito memória”. Efeito memória é a incapacidade de uma bateria ser recarregada por completo a partir de um certo uso, isso porque a composição química da bateria dá sinal de que a carga está completa, mesmo não estando (JUNG, 2010). Por outro lado, essas baterias devem ser armazenadas carregadas, para que seja evitada a sulfatação das placas, processo esse irreversível que prejudica a recarga das baterias.

4.3.2 Baterias de Níquel-Cádmio

As baterias de níquel-cádmio possuem estrutura física similar às baterias de chumbo-ácido citadas anteriormente (GUIMARÃES *et al.*, 1999). Ao invés de placas de chumbo, utilizam-se hidróxido de níquel e óxido de cádmio para as placas positiva e negativa, respectivamente, e seu eletrólito é o hidróxido de potássio.

As baterias deste tipo podem ser totalmente descarregadas, não estão sujeitas à sulfatação e não há influência da temperatura sobre seu carregamento. Entretanto, as baterias de níquel-cádmio possuem um custo inicial mais alto e sofrem influência do efeito memória. Enquanto que as baterias de chumbo-ácido se autodescarregam aproximadamente 40% da sua energia armazenada num período de um ano, as baterias de níquel-cádmio se autodescarregam na mesma quantidade em apenas três meses. A comparação entre as duas baterias serve também quando se trata dos meios de medição do estado de carga. Por haver pouca variação da tensão e do peso específico de seu eletrólito durante a descarga, não há a possibilidade de indicação do momento em que a bateria de níquel-cádmio encontra-se completamente descarregada. A Figura 12 apresenta um exemplo de bateria de níquel-cádmio.

Figura 12: Exemplo de bateria do tipo níquel-cádmio.



Fonte: TRIEB, 2013.

4.4 SMES (*Superconducting Magnetic Energy Storage*)

A supercondutividade pode ser compreendida como um fenômeno quântico-macroscópico, onde uma única função de onda é capaz de descrever esse estado (JUNG, 2010). O material supercondutor tem, dentre suas características, resistividade nula quando resfriado abaixo de certa temperatura crítica e diamagnetismo perfeito, ou seja, exclusão do campo magnético de seu interior. A Tabela 1 apresenta as temperaturas críticas de alguns materiais supercondutores comumente utilizados.

Tabela 1: Temperatura crítica de supercondutores.

Material	Tipo	T_c (K)
Zinco	metal	0,88
Alumínio	metal	1,19
Estanho	metal	3,72
Mercúrio	metal	4,15
YBa ₂ Cu ₃ O ₇	cerâmica	90
TlBaCaCuO	cerâmica	125

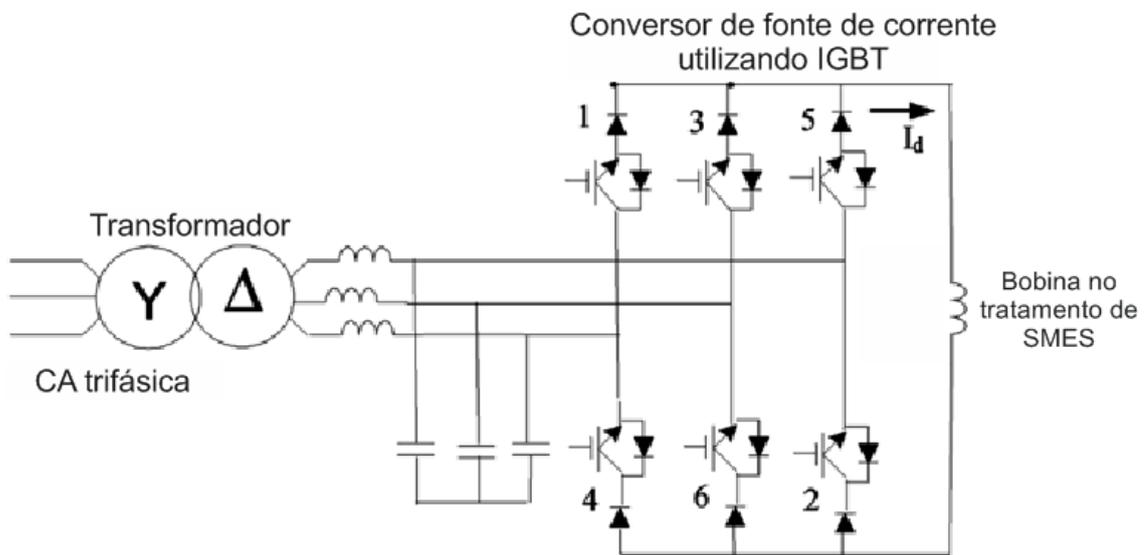
Fonte: JUNG, 2010.

O armazenamento de energia por supercondução magnética tem como base uma grande bobina supercondutora capaz de armazenar energia elétrica no campo magnético gerado pela corrente contínua que passa através dele (ALI & DOUGAL, 2010). As potências tanto ativa quanto reativa podem ser absorvidas ou liberadas pela bobina de SMES de acordo com a demanda do sistema.

Um sistema típico SMES é composto por três partes: a bobina supercondutora, o sistema de condicionamento de energia e de um refrigerador criogenicamente resfriado. Essa temperatura criogênica é mantida por um criostato que contém hélio ou nitrogênio líquido. Para produzir uma bobina eficiente com o menor custo possível, fatores como sua configuração, capacidade energética, estrutura e temperatura de operação são levadas em consideração. Todos esses fatores são escolhidos considerando os parâmetros de relação massa/energia, forças de Lorentz, campo magnético disperso e visando minimizar todas as perdas concernentes ao sistema SMES. Já a bobina pode ser configurada de duas formas: como um solenóide ou como um toróide. Pela simplicidade e efetividade, é abordada a configuração tipo solenóide.

Segundo ALI & DOUGAL (2010), há três diferentes tipos de tecnologia para os sistemas SMES e seus métodos controladores, que são o sistema SMES baseado em tiristor, o sistema SMES baseado em um conversor de fonte de tensão (*VSC-Based SMES*) e o sistema SMES baseado em um conversor de fonte de corrente (*CSC-Based SMES*). Neste trabalho, será abordado o *CSC-Based SMES*, pois segundo as análises, este sistema permite um controle independente das potências ativa e reativa e do sistema de potência, a distorção harmônica é baixa comparada aos outros métodos, assim como o ripple de tensão da bobina supercondutora.

Figura 13: Configuração básica de um *CSC-Based SMES*.



Fonte: ALI & DOUGAL, 2010, modificado.

A configuração básica de uma unidade de *CSC-Based SMES* está mostrado na Figura 13. A parte CC do conversor é conectada diretamente à bobina e sua parte CA é ligada à linha de potência. O banco de capacitores ligado na entrada do conversor tem como função o amortecimento da energia armazenada nas indutâncias da linha e também na filtragem dos harmônicos de ordens superiores na parte alternada da corrente.

Sobre o armazenamento de energia, uma unidade SMES pode atingir um potencial de armazenamento da ordem dos 5000 MWh, e por ser um sistema de corrente, a transferência de potências ativa e reativa entre o conversor e o sistema de potência é muito rápida, o que resulta num tempo rápido de resposta para as mudanças dinâmicas do fluxo de potência.

5 INTERCONEXÃO E ISOLAMENTO DA REDE

5.1 Introdução

Como analisado no Capítulo 3, um sistema com múltiplas fontes de energia renováveis pode proporcionar uma suficiência de energia a um grupo de cargas, ocorrendo assim um isolamento da rede pública. Neste capítulo, são tratados tanto este isolamento da *microgrid* criada, quanto um controle de interligação para que não hajam danos à rede causados pelo mal comportamento da energia produzida. Além disso, é tratada a conexão dessas fontes de energia renováveis com a rede elétrica.

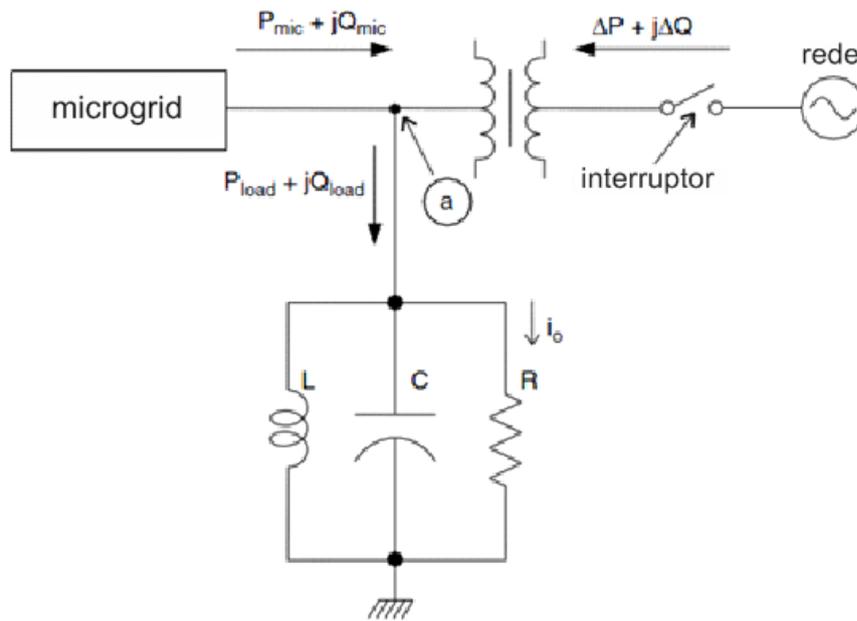
5.2 Isolamento da *Microgrid*

O isolamento de uma *microgrid*, que é composta de uma rede de transmissão, distribuição e geração de energia por fontes alternativas, além de cargas, e pode estar apta a isolamento intencional, assim como possui um ponto de conexão com a rede elétrica principal, acontece quando esta continua a energizar uma parte da rede principal após essa seção ter sido isolada (FARRET & SIMÕES, 2006). Apesar de surgir como um benefício para o sistema, esta situação pode vir a causar danos quando provocada não-intencionalmente devido à possibilidade de tensões fora do limite de operação ou excursões de frequências. Mais, deve-se haver uma sincronização e medidas dos níveis de tensão correspondentes quando da reconexão da *microgrid* com a rede principal. Por isso, é importante que o sistema da *microgrid* possua mecanismos que previnam esses isolamentos involuntários. Por sua vez, quando operado intencionalmente, o isolamento ocorre quando as fontes e cargas tem a capacidade de trabalhar em paralelo à rede, havendo um fluxo de potência somente entre esses pontos dentro da *microgrid*.

Esse isolamento involuntário pode acontecer de acordo com algumas situações que são geradas a partir da desconexão da *microgrid* com a rede elétrica. Na Figura 14, apresenta-se um bloco que representa a *microgrid*, um outro representando uma carga local e, por fim, ligada a estes através de um transformador e um switch, a rede elétrica principal. Quando o switch é aberto sobre certas condições, a *microgrid* pode continuar energizada e alimentando a carga local conectada à ela. É necessário, então, que os sistemas de energias alternativas tenham relés de proteção adequados para que sejam verificadas condições anormais de aumento ou diminuição de frequência ou tensão, e consequentemente alertem as unidades

controladoras para que estas desconectem a *microgrid* do sistema em caso de tensão ou frequência fora dos limites de operação (FARRET & SIMÕES, 2006).

Figura 14: Fluxo de potência entre *microgrid*, a rede elétrica principal e uma carga local.



Fonte: FARRET & SIMÕES, 2006, modificado.

Quando o interruptor está fechado, tem-se como equações de potência as Equações (2) e (3) apresentadas abaixo:

$$\Delta P = P_{load} - P_{mic} \quad (2)$$

$$\Delta Q = Q_{load} - Q_{mic} \quad (3)$$

Onde as potências ativa e reativa da carga são expressas em função da tensão do nó *a* pelas Equações (4) e (5), respectivamente:

$$P_{load} = \frac{V_a^2}{R_{load}} \quad (4)$$

$$Q_{load} = \frac{V_a^2}{\omega L} - \frac{V_a^2}{1/\omega C} \quad (5)$$

Quando o dispositivo que interliga a rede é aberto, as variações de potência ativa ΔP e reativa ΔQ são levados a zero. O comportamento do sistema dependerá dos valores instantaneamente anteriores ao momento do desligamento, indicador por ΔP_- e ΔQ_- . Essas duas variáveis produzem quatro casos de estado do sistema em operação. Para cada caso, um

relé de proteção entra em ação para prevenir o isolamento involuntário. São eles: o relé de sobretensão, o relé de subtensão, o relé de sobrefrequência e o relé de subfrequência.

Com isso, os possíveis casos de atuação de cada um dos relés são:

- I. $\Delta P_- > 0$: caso onde a *microgrid* produz menos potência ativa do que é necessário para alimentar a carga local, ou seja, $P_{load} > P_{mic}$. Assim, quando a chave switch abre e ΔP vai à zero, a potência P_{load} diminui, levando a tensão V_a a diminuir também, pois está se supondo R_{load} constante nessa situação. Essa subtensão é percebida pelo relé de subtensão, prevenindo o isolamento.
- II. $\Delta P_- < 0$: caso onde a *microgrid* produz mais potência ativa do que é necessário para alimentar a carga local, ou seja, $P_{load} < P_{mic}$. Assim, quando a chave switch abre e ΔP vai à zero, a potência P_{load} aumenta, levando a tensão V_a a se elevar também. Essa sobretensão é percebida pelo relé de sobretensão, prevenindo o isolamento.
- III. $\Delta Q_- > 0$: caso onde há um atraso no fator de potência da carga ou uma carga cuja componente reativa seja do tipo indutiva. Quando a chave switch abre, ΔQ torna-se zero. Para uma operação da *microgrid* com fator de potência unitário no ponto comum de acoplamento, ambas as potências reativas são nulas, $Q_{load} = 0$ e $Q_{mic} = 0$. Pela Equação (5), para Q_{load} ser nula, seu termo indutivo deve diminuir enquanto que o termo capacitivo deve se elevar. Isso ocorre quando a frequência ω aumenta, sendo detectada pelo relé de sobrefrequência.
- IV. $\Delta Q_- < 0$: caso onde há um avanço no fator de potência da carga ou uma carga cuja componente reativa seja do tipo capacitiva. Quando a chave switch abre, ΔQ torna-se zero. Pela Equação (5), para Q_{load} ser nula, seu termo indutivo deve ser balanceado ao seu termo capacitivo. Isso ocorre quando a frequência ω diminui, sendo detectada pelo relé de subfrequência.

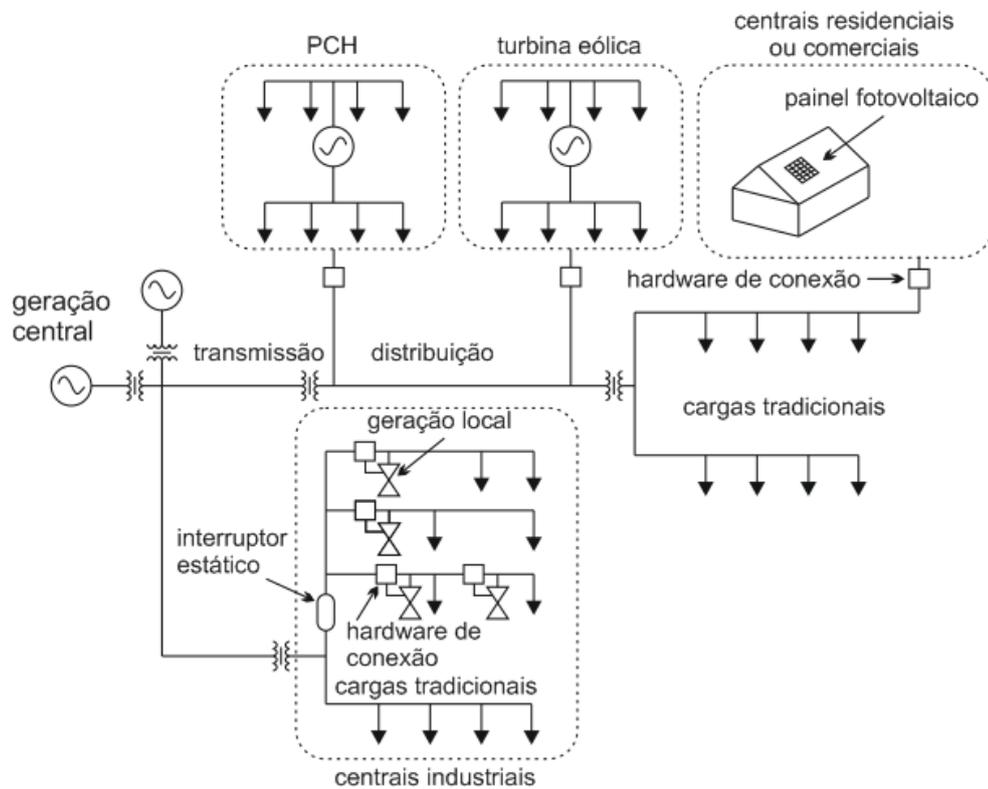
Além desses casos já citados, também existem possibilidades onde ΔP_- ou ΔQ_- sejam zero. Quando a potência de geração da *microgrid* corresponde à demanda de potência da carga, o fator de deslocamento da carga é unitário e o switch abre, não há alterações no circuito isolado e, portanto, os relés de subtensão, sobretensão, subfrequência e sobrefrequência não são capazes de detectar qualquer desvio de tensão ou corrente. Nesses casos, a magnitude da tensão e frequência devem variar ligeiramente de seus valores nominais. Como não se pode arbitrar limites de operação tão pequenos para os relés – senão a *microgrid* estaria sujeita a possuir desarmes por quaisquer ruídos –, forma-se assim uma zona

de não-deteccção. Deve-se, então, incorporar métodos ao sistema que previna o isolamento involuntário quando este encontra-se nesta zona, pois as chances de que ΔP_- ou ΔQ_- estejam nesta situação são significativas (FARRET & SIMÕES, 2006).

5.3 Controle de Interligação

Um exemplo de *microgrid* é apresentado pela arquitetura vista na Figura 15. O controle de isolamento intencional é dado pelos interruptores estáticos que atuam em menos de um ciclo. A *microgrid* é projetada visando as características e demandas dos consumidores finais, ao contrário dos conceitos da geração centralizada. Essa característica tem como principal componente a confiança e flexibilidade dos componentes eletrônicos que operam no controle entre os recursos distribuídos e os sistemas de corrente alternada que os envolvem (FARRET & SIMÕES, 2006).

Figura 15: Arquitetura de uma *microgrid* dividida em subsistemas e com conexão à rede elétrica principal.



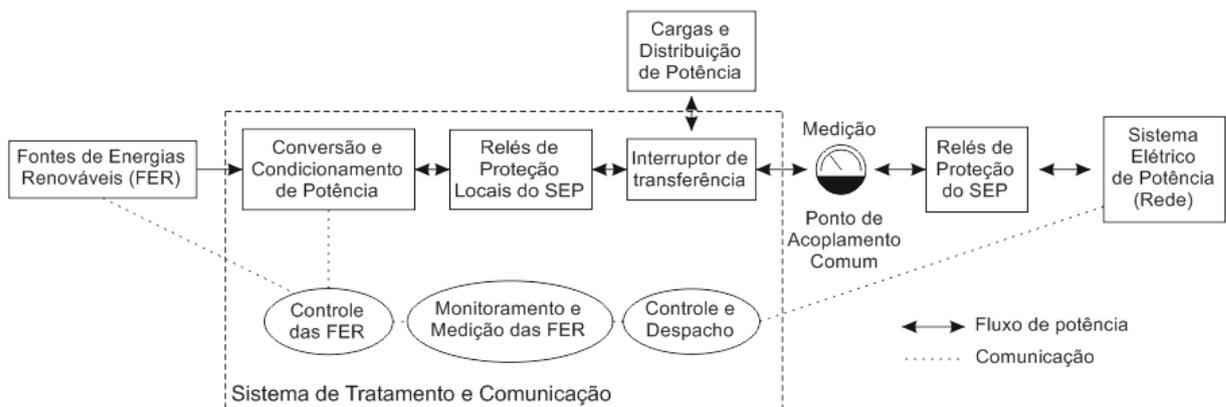
Fonte: FARRET & SIMÕES, 2006, modificado.

5.4 Conexão à Rede

Segundo FARRET & SIMÕES (2006), um sistema de interconexão consiste no *hardware* e no *software* que proporcionam uma conexão entre as fontes de energias renováveis e o sistema elétrico de potência (SEP). Esse sistema de interconexão é o meio pelo qual as fontes de energias renováveis se conectam eletricamente ao SEP, possibilitando o monitoramento, o controle, a medição e o despacho de uma unidade de fontes de energias renováveis.

Para conectar as fontes de energias renováveis ao SEP, deve existir um bloco intermediário que contenha algumas funções necessárias para uma conexão eficiente entre os dois extremos. Nesse bloco intermediário, faz-se necessária a presença de estágios de tratamento da energia, como também estágios de comunicação, monitoramento e controle, caracterizando esse sistema como uma rede de energia inteligente. A Figura 16 apresenta a conexão dos dois sistemas unidos pelo bloco intermediário de tratamento e comunicação.

Figura 16: Interligação entre fontes de energias renováveis e Sistema Elétrico de Potência.



Fonte: FARRET & SIMÕES, 2006, modificado.

As funções que devem estar presentes nesse bloco incluem a conversão e condicionamento da potência recebida. Essa potência advinda das fontes de energias renováveis é tratada para se adequar aos parâmetros da rede. Por exemplo, as fontes fotovoltaicas ou mesmo a energia armazenada em baterias são do tipo CC, então é possível que se faça conversão da potência e seja entregue potência CA à rede. A parte de condicionamento da potência trata a potência para que seja transmitida qualitativamente limpa às cargas.

As funções de proteção monitoram o ponto comum de acoplamento entre os dois blocos, além das potências de entrada e saída das fontes de energias renováveis, para que estas

sejam desconectadas do SEP caso haja condições fora dos limites de operação, como sobretensão, subtensão ou alterações na frequência. A proteção segue na forma de controles de cargas e das próprias fontes de energias renováveis. Esses controles englobam o desligamento do sistema e comandos de níveis de tensão, como também o controle de hardwares para a desconexão do SEP.

O bloco intermediário ainda inclui funções auxiliares, como a regulação e o suporte de tensão, as reservas operacionais e uma possível alimentação de reserva. As medições de tensão também são executadas para possíveis faturamentos da energia a ser injetada na rede. Por fim, ainda há também um estágio de comunicação, que permite que as fontes de energias renováveis interajam e operem junto às cargas locais como uma parte de uma grande rede elétrica de sistemas de potência ou como *microgrids*.

Quanto à questão dos relés utilizados nesse intermédio entre fontes de energias renováveis e SEP, os primariamente utilizados eletromecânicos discretos estão sendo substituídos por equipamentos digitais, geralmente com capacidade para muitas funções e utilizações. A tecnologia dos inversores vem sendo uma alternativa aos conversores de potência rotativos – geradores síncronos e de indução – e possibilita uma integração dos relés de proteção baseados em inversores.

As tecnologias de conexão do SEP com as fontes de energias renováveis dependem substancialmente do tipo de geradores a serem integrados à rede. Neste trabalho, são tratados três tipos de interligação: síncrona, por indução e com inversores.

5.4.1 Conexão Síncrona

A mais utilizada atualmente, pela maior quantidade de geradores em serviço serem síncronos. Um gerador síncrono é uma máquina CA cuja velocidade de rotação em operação normal é constante e em sincronismo com a frequência do SEP que está conectado (FARRET & SIMÕES, 2006). Esse tipo de gerador pode operar em modo autônomo ou interligado ao SEP. Quando interligado, a saída deste tipo de gerador está exatamente em passo com a tensão e a frequência do SEP. A sincronização destes geradores com o SEP exigem controles mais complexos e também equipamentos de proteção para isolá-los da rede elétrica quando esta passar por um estado de falta. Por outro lado, geradores síncronos podem fornecer energia durante uma interrupção do SEP, além de permitirem um controle do fator de potência pelos próprios supervisores do sistema com fontes de energias renováveis.

5.4.2 Conexão por Indução

Diferentemente dos geradores síncronos, os geradores de indução são máquinas assíncronas que requerem uma fonte de energia externa para que seja fornecida uma corrente de magnetização necessária para estabelecer o campo magnético através do entreferro e entre o rotor e o estator (FARRET & SIMÕES, 2006). Por este motivo, o gerador de indução deve sempre estar em operação paralelo à rede elétrica, a uma máquina síncrona ou a um capacitor que possa suprir os requisitos reativos e, conseqüentemente, servir como fonte de energia para que seja produzida a corrente necessária.

Geradores de indução operam numa determinada velocidade de rotação um pouco acima do necessário para o sincronismo exato. Abaixo dessa velocidade de sincronismo, essas máquinas funcionam como motores de indução e, portanto, tornam-se cargas para o SEP. Essa é uma das maiores desvantagens desses geradores. Nessa situação, pode haver o surgimento de correntes inrush potencialmente prejudiciais junto com conjudgados associados. Independentemente da carga associada, os geradores de indução consomem muita potência reativa proveniente de uma área do SEP, o que afeta a regulação da tensão do circuito no qual está conectado. Deve-se considerar uma inclusão de banco de capacitores para ajustar o fator de potência e reduzir o consumo de potência reativa pelo gerador.

Dentre os fatores que destacam esse tipo de conexão, a necessidade de um sistema de controle básico, já que sua operação é relativamente simples, os procedimentos para sincronismo não são exigidos que sejam diferenciados e complexos, uma vez que a sincronização com o SEP ocorre de forma essencialmente automática, e quando há a ocorrência de faltas em uma área do SEP, os geradores de indução normalmente cessam seu funcionamento, o que resulta em prevenção de danos.

5.4.3 Conexão com Inversores

Um conversor de potência elétrica fornece um meio de comunicação entre uma fonte de energia renovável assíncrona e uma área do SEP, proporcionando um tratamento para a conexão correta entre as duas partes (FARRET & SIMÕES, 2006).

O conversor mais utilizado é o conversor de potência CC-CA ou inversor. Neste caso, a tensão de entrada do dispositivo é, normalmente, uma tensão CC não-regulada. Essas tensões em corrente contínua são geradas por fontes como os painéis fotovoltaicos, as baterias

armazenadoras, ou até geradores CA retificados. Na saída do inversor, tem-se tensão e frequência com intensidades especificadas pelo operador do sistema elétrico daquela região.

Os conversores de potência estática são geralmente implementados com diodos, transistores e tiristores e possuem características compatíveis com as aplicações de fontes de energias renováveis. Eles podem ser retificadores (conversão CA-CC), inversores (conversão CC-CA) e cicloconversores (conversão CA-CA em diferentes frequências). Entre as principais características que influem na utilização desses conversores e desse tipo de conexão se sustentam na maior eficiência desses sistemas, assim como uma maior confiabilidade, em comparação com conversores de máquinas rotatórias. Outra vantagem surge na flexibilidade desse tipo de sistema quanto à incorporação de relés de proteção e opções de comunicação.

Para conectar fontes de energias renováveis ao SEP, deve-se considerar, além do tipo de conexão a ser feita, alguns fatores importantes sobre as grandezas estudadas, que são:

Regulação de tensão: deve-se manter a tensão exatamente ou muito próximo de seu valor nominal, apesar de variações causadas pela flutuação de cargas. Com a tensão regulada, pode-se garantir o bom funcionamento e eficiência das máquinas conectadas ao sistema.

Aterramento: a conexão entre as fontes de energia renováveis e o SEP deve ser coordenada para que não haja diferenças nos métodos de aterramento e que ambos os sistemas sejam compatíveis também nesse ponto. Quando isso não acontece, problemas de sobretensão podem aparecer ocasionando danos a equipamentos da rede.

Sincronização: como já abordado anteriormente, é necessário que os sistemas estejam sincronizados para que possa haver a conexão entre eles. Essa sincronização dá-se quando a saída da fonte de energia renovável e a entrada do sistema elétrico de potência possuem a mesma magnitude de tensão, frequência, rotação, ângulo e sequência de fases.

Isolamento: isoladores devem ser inseridos entre a fonte de energia renovável e o SEP, e devem ser rapidamente acessíveis, bloqueáveis e visíveis. Interruptores desconectores posicionados estrategicamente servem como uma forma de isolamento nesse caso.

Resposta a Distúrbios de Tensão: assim que a tensão de uma fonte de energia renovável começar a apresentar algum distúrbio, esta deve interromper a conexão com a área do SEP num tempo determinado. Esses dados encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2: Tempo de interrupção da conexão entre uma fonte de energia renovável e o SEP em função dos distúrbios de tensão.

% da Tensão Nominal	Tempo de Interrupção (s)
$V < 50$	0,16
$50 \leq V < 88$	2,00
$110 \leq V < 120$	1,00
$V \geq 120$	0,16

Fonte: FARRET & SIMÕES, 2006.

Resposta a Distúrbios de Frequência: esses distúrbios de sobrefrequência ou subfrequência normalmente ocorrem durante operações do sistema de distribuição. Apesar de a frequência no ponto de geração ser bem estável, os ângulos de tensão podem variar bastante de acordo com as mudanças bruscas da corrente de carga. Os tempos de interrupção para cada caso de alteração de frequência são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Tempo de interrupção da conexão entre uma fonte de energia renovável e o SEP em função dos distúrbios de frequência.

Porte da Fonte de Energia Renovável	Faixa de Frequência (Hz)	Tempo de Interrupção (s)
$\leq 30kW$	$f > 60,5$	0,16
	$f < 59,3$	0,16
$> 30kW$	$f > 60,5$	0,16
	$f < \{59,8 - 57,0\}$ (ajustável)	0,16 - 0,30
	$f < 57,0$	0,16

Fonte: FARRET & SIMÕES, 2006.

Desconexão por faltas: as faltas ocorrem devido a correntes de curto circuito que podem ocasionar danos ao sistema. As correntes de curto circuito podem ser da ordem de milhares de ampère, e seu efeito pode ser prevenido a partir de controles e equipamentos de proteção que desconectam o gerador assim que é identificada uma situação de falta.

Perda de sincronismo: esse fato pode ocorrer quando há uma operação isolada da *microgrid* com suas fontes de energias renováveis operando sem interligação com o sistema elétrico. Caso haja uma reconexão de ambos os sistemas, haverá um transiente de corrente e tensão enquanto há uma tentativa de sincronização. A gravidade desses transientes está

diretamente relacionada com a magnitude da separação dos ângulos de tensão entre os dois sistemas no momento de reconexão.

Coordenação de religamento do alimentador: quando a falta num sistema é controlada e não é longa o suficiente para causar danos a este, o alimentador pode ser energizado novamente. Esse religamento pode ser automático, contanto que sejam programados testes na linha verificando sua situação para que não haja uma falta mais grave. A primeira tentativa de religamento pode ser feita rapidamente, na ordem dos 0,2 segundos até períodos mais demorados, de até 15 segundos.

Cintilamento de tensão: cintilamento é a impressão de variação visual induzida por um estímulo luminoso, e mesmo uma fonte de energia renovável de comportamento suave pode vir a causar cintilamentos. O cintilamento envolve fatores que não estão ligados somente ao início ou parada das máquinas geradoras ou suas flutuações básicas, e uma fonte de energia renovável não deve criar cintilamentos que afetem os outros componentes do sistema elétrico.

Injeção CC: a injeção de uma tensão CC na rede faz com que haja um deslocamento positivo na tensão do sistema de potência. Esse acréscimo na tensão aumenta a saturação dos componentes magnéticos, fazendo-os operar no início da zona não-linear da curva entre intensidade e campo magnéticos, algo economicamente mais viável.

Harmônicos: são sinais elétricos em frequências múltiplas da frequência da linha de potência. A injeção de correntes harmônicas ao SPE no ponto de acoplamento comum não deve exceder os limites apresentados pela Tabela 4.

Tabela 4: Máxima corrente de distorção harmônica em porcentagem de corrente I.

Ordem da Harmônica (ímpares*)	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
Porcentagem permitida (%)	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0

* as harmônicas pares são limitadas em 25% da limitação das harmônicas ímpares descritas.

Fonte: FARRET & SIMÕES, 2006.

O tipo e a intensidade das contribuições harmônicas provindas de uma fonte de energia renovável depende da tecnologia de conversão de potência utilizada, sua filtragem e também sua configuração de conexão.

6 ESTUDO DE CASO

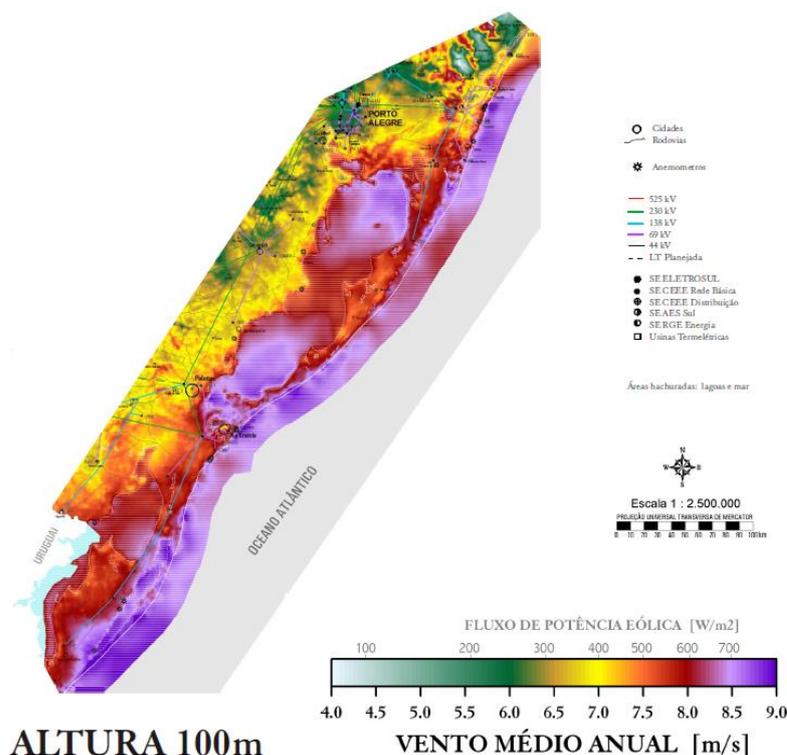
6.1 Introdução

A partir dos conceitos apresentados nos capítulos anteriores, é feita a análise de um caso de integração de fontes de energias renováveis, escolhido de acordo com as possibilidades de implementação. Para o sistema a ser desenvolvido, são especificadas as fontes de energia a serem utilizadas, e a forma com que elas alimentarão uma comunidade. Uma análise econômica é apresentada para verificar o tempo de retorno do investimento do sistema.

6.2 Definições Básicas do Sistema

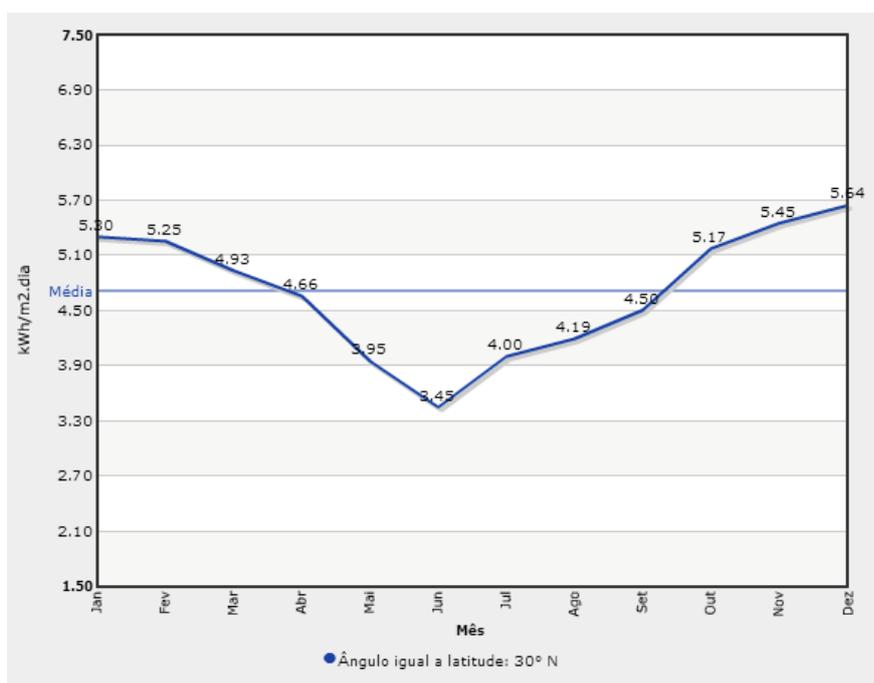
O sistema a ser estudado tem como local de implementação a região litorânea do Rio Grande do Sul. As características energéticas foram relevantes para a escolha do local do projeto. Por sua localização, a região não é propícia à utilização da biomassa. Este fato se deve à falta de recursos na região, além da dificuldade de transporte e armazenamento massivo desta fonte de energia renovável. Por outro lado, pela Figura 17, nota-se o potencial eólico anual no litoral gaúcho a partir da velocidade de vento média anual.

Figura 17 : Velocidade de vento média anual a uma altura de 100m no litoral do Rio Grande do Sul.



Além do potencial eólico, a região sul do Brasil apresenta também um potencial de radiação solar, como mostrado na Figura 18. A curva de radiação solar anual para Porto Alegre pode ser considerada como similar à curva das cidades litorâneas, por apresentarem latitudes praticamente iguais (DEL GRANDE, 2013).

Figura 18 : Curva de radiação solar anual para Porto Alegre.



Fonte: DEL GRANDE, 2013.

Os dados da Figura 18 também aparecem discriminados na Tabela 5.

Tabela 5: Radiação mensal em kWh/m²/dia.

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
Radiação	5,30	5,25	4,93	4,66	3,95	3,45	4,00	4,19	4,50	5,17	5,45	5,64	4,71

Fonte: DEL GRANDE, 2013.

Definido o local de implementação do sistema, deve-se abordar na sequência o método de integração dessas fontes ao sistema elétrico brasileiro.

6.3 Integração ao Sistema Elétrico de Potência

A partir das topologias discutidas no Capítulo 3, o método CA é tomado como a conexão a ser utilizado. Sua simplicidade na conexão de geradores rotativos (caso das turbinas eólicas) facilita sua implementação. No caso dos geradores estacionários e seu

armazenamento, deve-se incluir inversores para que a potência CC gerada seja injetada no sistema já no formato CA.

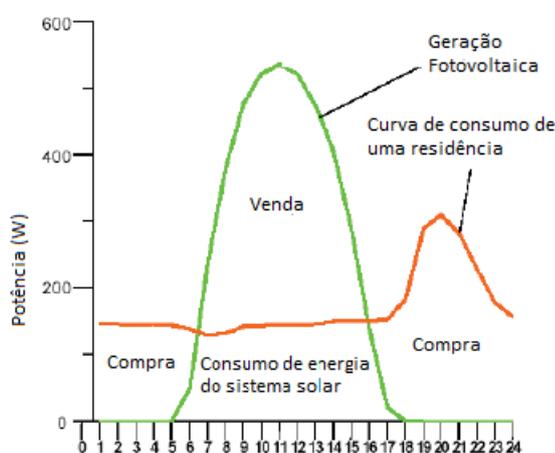
A conexão com a rede elétrica básica também é realizada, para que haja uma maior eficiência do sistema. Essa conexão, como analisada na seção 5.4 permite a injeção da potência sobressalente gerada nas fontes de energias renováveis instaladas na rede elétrica, não havendo perdas de energia quando a produção é maior que a demanda. Por outro lado, também é possível assim que a comunidade alimentada por essas fontes renováveis não sofra com a falta de energia quando a demanda é maior do que a produção, pois o sistema elétrico pode suprir essa diferença de energia.

6.4 Armazenamento de energia

Como discutido na seção acima, haverá a conexão do sistema com a rede elétrica, possibilitando, assim, a injeção de energia no sistema elétrico. Portanto, não são incluídos no projeto os sistemas de armazenamento de energia por ar comprimido e por supercondução magnética, devido ao alto investimento econômico exigido para implementar esses sistemas.

Por outro lado, bancos de baterias como os apresentados na seção 4.3 compõem os armazenadores de energias para grupos de painéis fotovoltaicos. Como pode ser visto na Figura 19, a geração de energia por radiação solar ocorre num período que não há tanta demanda. Por isso, essa energia pode ser armazenada e ser utilizada em um outro momento. É importante também ressaltar que, para o caso da região estudada, existe um consumo menor de energia entre o período das 12h às 14h e, logo após, um aumento dessa demanda de energia, proporcionando uma crista na onda menor do que o aumento na parte da noite.

Figura 19: Geração fotovoltaica diária em base horária.



Fonte: DEL GRANDE, 2013.

As baterias de chumbo-ácido reguladas por válvula são as mais eficientes nas questões referentes às características de armazenamento e à vida útil de sua operação. A posição do banco de baterias deve ser em um ambiente cuja temperatura esteja entre 20°C e 25°C. Em razão da limitação de um banco de baterias deste tipo em manter armazenada a carga, ou seja, a possibilidade da auto-descarga, a energia neles estocadas deve sempre ter prioridade na utilização assim que forem totalmente carregadas.

Assim, os bancos de baterias são dispostos localmente, ou seja, não há um único banco de baterias central que armazena a energia sobressalente de todos os painéis fotovoltaicos, mas sim diversos bancos de baterias de menor porte, exclusivos para cada painel solar instalado.

6.5 Consumo de energia elétrica

Segundo DEL GRANDE (2013), o levantamento do consumo de energia elétrica no ano de 2012 no município litorâneo de Xangri-lá, que contém aproximadamente 12,5 mil habitantes (segundo dados do IBGE), foi de 5.546 MWh, distribuídos entre os meses conforme mostra a Tabela 6.

Tabela 6 : Consumo de energia elétrica no município de Xangri-lá/RS no ano de 2012.

Mês	Consumo em uma residência (kWh)	Consumo Total (MWh)
Janeiro	148	617
Fevereiro	214	892
Março	109	454
Abril	81	337
Mai	62	258
Junho	76	317
Julho	74	308
Agosto	149	621
Setembro	67	279
Outubro	101	421
Novembro	114	475
Dezembro	136	567
Total	1.331	5.546

Fonte: DEL GRANDE, 2013.

A partir desses dados, pode-se estimar que um habitante na região litorânea do Rio Grande do Sul consome, em média, 443 kWh/ano.

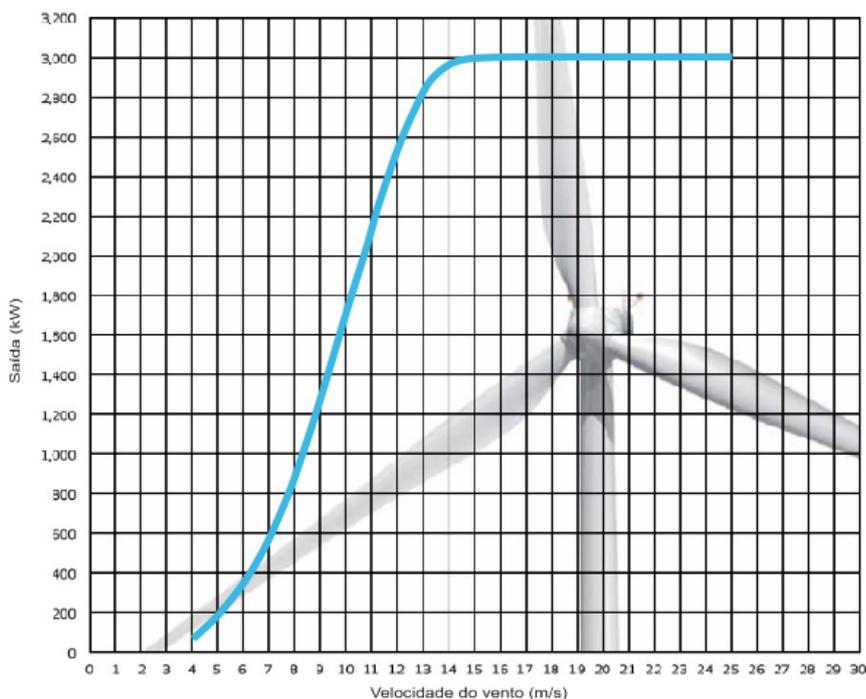
Se forem considerados os municípios de Xangri-lá, Capão da Canoa, Arroio do Sal e Torres, o número de habitantes, segundo o IBGE, é de aproximadamente 105 mil. Para a determinação da quantidade de geradores eólicos e fotovoltaicos que farão parte do sistema, este será o número de pessoas que será tomado como base para garantir a suficiência de energia.

6.6 Determinação da Dimensão do Sistema

6.6.1 Geradores Eólicos

Os geradores eólicos escolhidos tem potência nominal de 3 MW. A curva de potência do aerogerador em questão encontra-se na Figura 20.

Figura 20 : Curva de potência do aerogerador Vestas V90 – 3 MW.



Fonte: VESTAS, 2013.

De acordo com VALECROSS (2013), um parque eólico instalado na região litorânea do Rio Grande do Sul com capacidade instalada de 27 MW pode gerar uma produção de 95.000 MW por ano. Logo, para um aerogerador de 3 MW, a produção anual é de, aproximadamente, 10.000 MWh por ano.

6.6.2 Geradores Fotovoltaicos

A geração por radiação solar deve incluir, além dos painéis fotovoltaicos, inversores para que a tensão CC produzida seja transformada em CA para ser injetada ao sistema.

Define-se, então, o inversor a ser utilizado para que sejam combinados vários módulos de painéis solares. Segundo NEO SOLAR (2013a), o inversor SMA Sunny Mini Central possui as especificações dispostas na Tabela 7.

Tabela 7: Especificações técnicas inversor SMA Sunny.

Entrada		Saída	
Pot. Máxima	6300 W	Pot. Nominal	6000 W
Tensão Máxima	600 Vcc	Faixa de Tensão	180~260 Vca
Tensão Mínima	211 Vcc	Frequência	60 Hz
Corrente Máxima	26 A	Corrente Máxima	26A

Fonte: NEO SOLAR, 2013a.

Tabela 8: Potência gerada pelo painel solar com potência nominal de 235W.

Mês	Pot. Gerada (kWh)
Janeiro	40,3
Fevereiro	36,8
Março	36,3
Abril	32,3
Mai	27,8
Junho	23,3
Julho	28,0
Agosto	29,9
Setembro	31,8
Outubro	38,5
Novembro	39,9
Dezembro	43,3
Total	408,1

Fonte: DEL GRANDE, 2013.

Segundo DEL GRANDE (2013), os painéis fotovoltaicos que possui o melhor custo-benefício dentre os analisados possuem potência nominal de 235 W por módulo. O painel fotovoltaico analisado tem potência gerada anual apresentada na Tabela 8 (calculada para apenas um módulo). A tensão de saída máxima desses painéis é de 30,5 V (NEO SOLAR, 2013b), portanto, segundo a Equação (6), considerando a tensão máxima de entrada do inversor do projeto, tem-se a quantidade de painéis solares que podem ser acoplados.

$$n = \frac{V_{m\acute{a}x_{inversor}}}{V_{m\acute{a}x_{painel}}} \quad (6)$$

Onde:

n = número máximo de painéis acoplados;

$V_{m\acute{a}x_{inversor}}$ = tensão máxima de entrada do inversor;

$V_{m\acute{a}x_{painel}}$ = tensão máxima de saída do painel.

A Equação (7) mostra o cálculo, resultando em 19,6 unidades, de onde pode-se estimar 18 painéis, por questões de segurança.

$$n = \frac{600 \text{ V}}{30,5 \text{ V}} = 19,6 \text{ unidades} \quad (7)$$

Como a entrada do inversor aceita, no máximo, potência igual a 6000 W, e as 18 unidades do painel solar somam 4230 W (NEO SOLAR, 2013b), esta condição também é atendida para a configuração projetada.

Além disso, para completar o sistema de geração solar, devem ser consideradas as fixações para suporte dos painéis. Essas fixações podem ser para até 5 módulos ou até 10 módulos (DEL GRANDE, 2013). Logo, necessita-se de duas fixações do tipo de até 10 módulos para que o “kit” seja completado. Essa configuração de um inversor e 18 painéis solares resulta em uma geração anual mostrada na Equação (8).

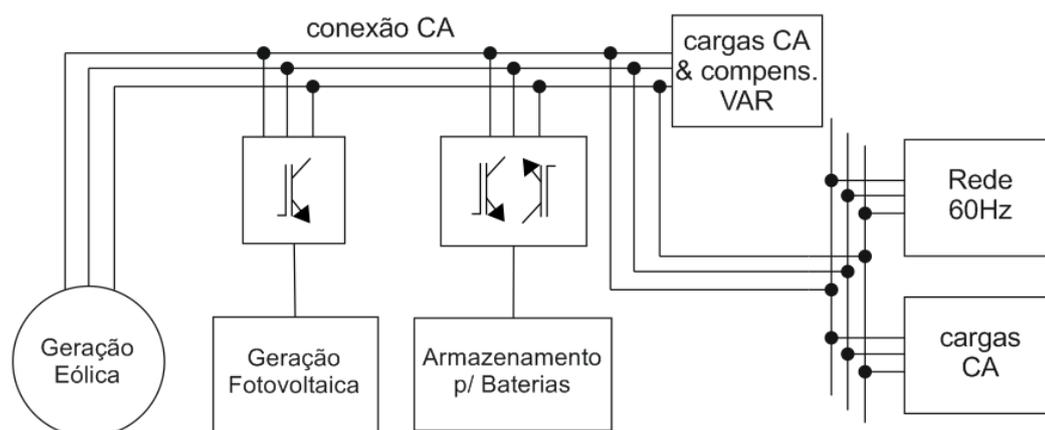
$$P_{solar} = n * P_{painel_{unit}} = 18 * 408,1 \text{ kWh} \quad (8)$$

$$P_{solar} = 7,34 \text{ MWh/ano}$$

6.6.3 Sistema Projetado

A Figura 21 apresenta a topologia do sistema analisado neste trabalho. Este sistema possui geradores rotativos que produzem energia elétrica a partir da energia eólica, geradores estacionários – painéis fotovoltaicos – e o armazenamento da potência destes painéis em baterias de chumbo-ácido reguladas por válvula.

Figura 21 : Topologia do sistema analisado na integração de fontes de energias renováveis.



Para suprir a energia demandada dos quatro municípios do litoral do Rio Grande do Sul, deve-se gerar, anualmente, o equivalente a 46.600 MWh. Considerando as perdas na transmissão, da ordem de 2,5%, tem-se que a energia necessária para ser gerada é de 47.765MWh por ano. Pelos dados de VELOCROSS (2013), a capacidade de geração garantida de uma usina eólica é de 40% de sua capacidade nominal, ou seja, define-se a quantidade de quatro turbinas eólicas de potência nominal de 3MW que garantem aproximadamente 42.000 MWh.

Como analisado no item anterior, um conjunto fotovoltaico projetado produz, anualmente, 7,34 MWh. Para suprir a energia estimada restante, deve-se instalar 786 conjuntos de painéis fotovoltaicos. Estas duas fontes de energia já suprem, assim, por completo, a demanda de energia dos municípios litorâneos a serem atendidos. Logo, não é necessária a inclusão da energia proveniente da biomassa.

6.7 Análise Econômica

Nesta análise econômica, são abordados os custos de instalação das fontes de energias renováveis, sem levar em consideração os custos com manutenção. Estes custos podem ser

inclusos no desconto da energia produzida, isto é, a energia gerada sobressalente no sistema analisado é faturada e injetada à rede, cobrindo os gastos adicionais e também a instalação das baterias armazenadoras da energia gerada pelos painéis fotovoltaicos. Os custos de instalação são abordados e comparados com os valores de venda da energia visando estimar um período de retorno do investimento feito.

6.7.1 Custos de Instalação

Segundo NEO SOLAR (2013), o custo do sistema de geração de energia elétrica por radiação solar para o modelo escolhido é de R\$ 42.781,00, incluindo os custos com fixação do painel e inversor CC-CA a ser utilizado para cada conjunto de 18 unidades de painéis solares, como mostra a Tabela 9. O custo de fixação é para até dez módulos, e como o conjunto de painéis fotovoltaicos foi projetado para ter 18 módulos em série, tem-se um custo total apresentado na Tabela 9.

Tabela 9: Estimativa de custo de instalação da fonte de energia fotovoltaica.

Item	Qtde.	Custo Unit. (R\$)	Total (R\$)
Painel Solar	18	999,00	17.982,00
Inversor SMA Sunny	1	15.399,00	15.399,00
Sistema de Fixação	2	4.700,00	9.400,00
TOTAL p/ 1 conjunto painel solar:			42.781,00
Conjunto Painel Solar	786	42.781,00	33.625.866,00

Fonte: NEO SOLAR, 2013.

Para a geração eólica, pode-se utilizar o parâmetro do investimento feito pela Honda, uma vez que as máquinas são do mesmo fabricante e possuem a mesma potência nominal, com a diferença da quantidade de máquinas, pois o projeto do grupo Honda comporta nove aerogeradores, enquanto que o sistema analisado neste trabalho conta com quatro geradores eólicos. Com isso, pode-se estimar que o orçamento do investimento para um aerogerador é aproximadamente a metade do que o aplicado pelo grupo Honda, isto significa um investimento para o sistema deste trabalho de aproximadamente R\$ 45 milhões (SOARES, 2013).

6.7.2 Comercialização da Energia

A comercialização da energia não implica que toda a energia será vendida ao sistema elétrico brasileiro. Porém, faz-se essa estimativa para descobrir quanto será recebido no pagamento pela energia elétrica gerada pelas fontes de energias renováveis que compõem o sistema analisado.

Segundo dados de DEL GRANDE (2013), o preço do kWh para energia solar é de R\$0,41/kWh. Pela Tabela 8, tem-se que o total anual gerado pela fonte de energia solar é de 7,34MWh por ano. Contabilizando a geração dos 786 conjuntos de painéis solares (compostos por 18 unidades de painéis solares, um inversor para conexão ao sistema e fixações apropriadas), tem-se como receita de geração solar R\$ 2.365.388,40 por ano.

No caso da geração eólica, pode-se estabelecer, segundo MONTENEGRO (2013), que o valor por MWh produzido é de R\$ 122,00/MWh. Este valor serve como parâmetro, pois será o preço-teto do MWh no leilão de energia que se realizará na metade de Dezembro de 2013. Como foi analisado anteriormente, deve-se considerar a quantia de 41.960 MWh por ano produzida pelo parque eólico – correspondente à diferença entre o total consumido e a geração solar já considerada –, e o excedente será utilizado para cobrir gastos de manutenção, instalação das baterias armazenadoras e outros fatores. Sendo assim, anualmente, a geração de energia elétrica através de energia eólica fornece como receita R\$ 5.119.120,00 por ano.

Com isso, a cada ano, a receita do sistema analisado é de R\$ 7.484.508,40. Analisando via *payback* simples, ou seja, sem considerar a taxa de depreciação monetária anual, tem-se o investimento de R\$ 78.625.866,00 e a receita anual da venda de energia pelo sistema, de R\$7.484.508,40. O período de retorno é calculado segundo a Equação (9).

$$T = \frac{\text{Investimento Total (R\$)}}{\text{Receita Anual (R\$/ano)}} \quad (9)$$

$$T = \frac{\text{R\$ 78.625.866,00}}{\text{R\$ 7.484.508,40/ano}} = 10,5 \text{ anos} \quad (10)$$

Portanto, obtém-se como período de retorno um tempo igual a 10,5 anos, Equação (10).

6.7.3 Análise de Resultados

Os resultados obtidos nas seções anteriores, como os custos para instalação, a energia gerada anualmente e as receitas referente à faturação dessa energia são os fatores que levam à

conclusão da viabilidade do sistema projetado. A Tabela 10 apresenta um comparativo entre as duas fontes de energia utilizadas, solar e eólica.

Tabela 10 : Quadro comparativo entre os aspectos de projeto para energia solar e eólica.

Fator	Energia Eólica	Energia Solar
Número de módulos	4 aerogeradores	786 conjuntos de painéis solares
Investimento	R\$ 45.000.000,00	R\$ 33.625.866,00
Potência Instalada	12 MW	3,325 MW
Energia Gerada Anual	42.000 MWh	5769,24 MWh
Receita Anual	R\$ 5.119.120,00	R\$ 2.365.388,40

Como os painéis fotovoltaicos e os componentes de seu sistema tem um tempo de vida útil entre aproximadamente 15 e 20 anos (DEL GRANDE, 2013), e considerando que os contratos de energia com produtores eólicos também tem duração de 20 anos, ou seja, garantindo a confiabilidade deste sistema no período estimado, pode-se afirmar que o sistema analisado é viável economicamente e ainda pode trazer retornos financeiros após o prazo de pagamento do investimento.

7 CONCLUSÕES

Os conceitos abordados ao longo deste trabalho ressaltam a importância das fontes de energias renováveis no novo conceito de geração e distribuição de energia elétrica. Sistemas descentralizados, como *microgrids*, fazem com que as pequenas centrais geradoras de energia ganhassem força e facilita a inserção destas no mercado de energia. As microgerações são uma solução futura para o abastecimento de energia de cargas locais.

Foi constatado que pela sazonalidade dos fatores naturais que propiciam a geração de energia elétrica, caso do vento e do sol – que possuem curvas anuais de comportamento não constantes –, a integração das fontes de energias renováveis também com a rede elétrica pode trazer benefícios ao sistema, sem perder sua autossuficiência.

O sistema torna-se autossuficiente assim que a sua geração média anual esteja apta a fornecer energia à região de interesse, ou seja, com o balanço entre o que é gasto de energia proveniente da rede elétrica e o que é comercializado, há um saldo positivo sem que haja necessidade de despesas perante o sistema elétrico brasileiro. A grande vantagem da interligação com a rede elétrica ocorre no aspecto econômico, onde é possível que a energia sobressalente injetada à rede seja ressarcida. Mais, analisando pelo aspecto técnico do sistema, a conexão entre o sistema projetado e o sistema elétrico brasileiro feita por um bloco intermediário inclui estágios de proteção da rede, evitando falhas que podem prejudicar os equipamentos que compõem o sistema.

Ainda no quesito econômico-tecnológico, pode-se analisar a dificuldade na implantação da tecnologia dos armazenamentos apresentados, como o CAES e o SMES. Apesar de serem eficientes e de estarem em evolução, a instalação de sistemas como estes ainda é desfavorável. Como o sistema pode ser atendido apenas com as outras duas fontes de energia, não foi necessário o aproveitamento da energia gerada pela biomassa.

Na questão envolvendo os métodos de interligação das fontes de energia, pode-se perceber também que haverá alterações com o avanço da tecnologia. Dependendo da aplicação que for utilizada, um método se destaca mais do que outro. O método CA escolhido possibilita uma conexão simples com a fonte de energia eólica, mesmo que seja necessária a inclusão de inversores para fazer o intermédio entre a rede e o painel solar, pois esse método também facilita a ligação com a rede elétrica 60 Hz e com cargas que operam com corrente alternada.

O sistema analisado contou com fontes de energia eólica e solar, dimensionadas de acordo com a população a ser atingida pelo projeto. A população dos municípios de Arroio do Sal, Capão da Canoa, Torres e Xangri-lá pode ser suprida, já que o consumo de energia pelo total de habitantes das cidades é compensado pela produção de energia do parque eólico com quatro aerogeradores e os 786 conjuntos de painéis solares – formados por 18 unidades de painéis solares e um inversor. O estudo de caso contou não somente com a projeção do sistema analisado, mas também com uma análise econômica que verificou os custos de instalação do sistema. A partir dessa análise, obteve-se um período de retorno do capital investido mais curto do que a vida útil dos equipamentos utilizados, resultando assim em um negócio viável para a situação analisada.

REFERÊNCIAS

ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil** / Agência Nacional de Energia Elétrica. 2 ed. Brasília, 2005. ISBN: 85-87491-09-1.

ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil** / Agência Nacional de Energia Elétrica. 3 ed. Brasília, 2008. ISBN: 978-85-87491-10-7.

AMESEIXAL. **Energia Solar** / Agência Municipal de Energia de Seixal. Portugal. Disponível em: <<http://www.cm-seixal.pt/ameseixal/municipe/energiasRenovaveis/documentos/EnergiaSolar.pdf>>. Acesso em: 01 out. 2013.

CHAGAS, M. W. P. **Novas Tecnologias para Avaliação de Baterias**. Mestrado em Desenvolvimento de Tecnologia do IEP/LACTEC. Curitiba, 2007.

DEL GRANDE, A. A. **Sistemas Fotovoltaicos para Geração de Energia Elétrica**. Projeto de Diplomação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Brasil, 2013.

DO AMARANTE, O. A. C.; BROWER, M.; Zack, J.; DE SÁ, A. L. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Brasília, 2001. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf>. Acesso em: 10 set. 2013.

DO AMARANTE, O. A. C.; DA SILVA, F. J. L. **Atlas Eólico: Rio Grande do Sul**. Secretaria de Energia, Minas e Comunicações. Porto Alegre, 2002.

DO NASCIMENTO, C. A. **Princípio de Funcionamento da Célula Fotovoltaica**. Universidade Federal de Lavras. Minas Gerais, Brasil, 2004. p. 14-17.

ENERCON. **Gama de Produtos ENERCON**. Alemanha. 2013. Disponível em: <http://www.enercon.de/p/downloads/ENERCON_Produnkt_pt_web_072013.pdf>. Acesso em: 11 set. 2013.

FARRET, F.A.; SIMÕES, M.G. **Integration of alternative sources of energy**. John Wiley & Sons Inc. EUA, 2006. ISBN: 978-0-471-71232-9.

GUIMARÃES, A.P.C.; RIBEIRO, C. M.; BASTOS, L. E. G.; VALENTE, L. C. G.; DA SILVA, P. C.; DE OLIVEIRA, R. X. **Manual da Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. CRESCER. Rio de Janeiro. 1999.

TRIEB. **Baterias Níquel-Cádmio Valve Regulated**. Brasil, 2013. Disponível em: <http://trieb.com.br/catalogo_urpp.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2013.

IEC. **White Paper: Electrical Energy Storage** / International Electrotechnical Commission. Suíça, Dezembro 2011. ISBN: 978-2-88912-889-1.

JUNG, J. **Armazenamento de Energia em Smart Grids**. Projeto de Diplomação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Brasil, 2010.

MONTENEGRO, S. **Leilão A-5: preço-teto para eólica e solar fica em R\$ 122/MWh**. Centro Nacional de Desenvolvimento de PCH. Brasil, 2013. Disponível em: <<http://www.canalenergia.com.br/zpublisher/materias/CNDPCH.asp?id=98352>>. Acesso em: 01 dez. 2013.

NEO SOLAR. **Inversor Grid-Tie SMA Sunny Mini Central 6000 (SMC 6000A)**. Brasil, 2013. Disponível em: < <http://www.neosolar.com.br/loja/inversor-grid-tie-sma-sunny-mini-central-6000.html>>. Acesso em: 02 dez. 2013a.

NEO SOLAR. **Painel Solar Fotovoltaico Jetion JT235PCe (235Wp)**. Brasil, 2013. Disponível em: < <http://www.neosolar.com.br/loja/painel-solar-fotovoltaico-jetion-jt235pce-235wp.html>>. Acesso em: 02 dez. 2013b.

POMILIO, J. A. **Eletrônica de Potência**. DSCE – FEEC – UNICAMP. Campinas. 2009. Disponível em: < <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/itpot/cap10.pdf>>. Acesso em: 27 nov. 2013.

POMILIO, J. A. **Eletrônica de Potência para Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica**. Campinas. 2013. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/it744/CAP1.pdf>>. Acesso em: 07 set. 2013.

SOARES, F. **Parque eólico da honda em xangri-lá inicia atividades em 2014**. Jornal do Comércio. Brasil. Abril de 2013. Disponível em: < http://www.xangrila.rs.gov.br/novosite/index.php?option=com_content&view=article&id=292:parque-eolico-da-honda-em-xangri-la-inicia-atividades-em-2014&catid=40:noticias>. Acesso em: 30 nov. 2013.

VALECROSS Honda. **Parque Eólico em Xangri-lá - Honda Energy do Brasil Ltda**. Brasil, 2013. Disponível em: <<http://www.valecross.com.br/noticias/319-parque-eolico-em-xangri-la-honda-energy-do-brasil-ltda>>. Acesso em: 01 dez. 2013.

VESTAS Wind Systems A/S. **V90 – 3 MW Brochure**. Dinamarca, 2013. Disponível em: < <http://nozebra.ipapercms.dk/Vestas/Communication/Productbrochure/V9030MW/V9030MWUK/>>. Acesso em: 01 dez. 2013.