

ANDRÉ LUIS CARVALHO MENDES

**METODOLOGIA E APLICAÇÃO DA INSERÇÃO DE GERAÇÃO
FOTOVOLTAICA DISTRIBUÍDA E ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM
SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2013

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV

T

M538m
2013

Mendes, André Luis Carvalho, 1984-
Metodologia e aplicação da inserção de geração
fotovoltaica distribuída e armazenamento de energia em sistema
elétrico de potência / André Luis Carvalho Mendes. – Viçosa,
MG, 2013.
xiii, 93 f. : il. ; 29 cm.

Orientador: Delly Oliveira Filho.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Geração de energia fotovoltaica. 2. Energia solar.
3. Energia elétrica - Produção. I. Universidade Federal de
Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22. ed. 621.47

ANDRÉ LUIS CARVALHO MENDES

**METODOLOGIA E APLICAÇÃO DA INSERÇÃO DE GERAÇÃO
FOTOVOLTAICA DISTRIBUÍDA E ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM
SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 24 de junho de 2013.

Wathney Hermsdorff

Denilson Eduardo Rodrigues

Maria Helena Murta Vale

Paulo Marcos de Barros Monteiro
(Coorientador)

Profº PhD Delly Oliveira Filho
(Orientador)

Aos meus pais, primeiros e sempre mestres.
Às minhas irmãs, pelo companheirismo e paciência.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela presença restauradora constante em todos os momentos, atuando como Mestre em meus pensamentos, orientando em minhas decisões e iluminando a trilha para a caminhada cada vez mais sábia.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV) e ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do Curso.

Aos professores Dely Oliveira Filho, pelos ensinamentos; e Paulo Marcos de Barros Monteiro e Antônia Sônia Cardoso Diniz, pela orientação.

A professora Olga por ter sido precursora dessa linha de pesquisa na Área de Energia.

Aos Engenheiros Marcio Eli e Alvaro da empresa CEMIG que me auxiliaram nos estudos realizados.

Aos meus amigos Joselma e Jorge, pela convivência agradável.

A todos que colaboram para a realização desse trabalho de mestrado.

A todos os funcionários e professores do DEA, pela paciência e pelo carinho.

BIOGRAFIA

ANDRÉ LUIS CARVALHO MENDES, filho de Luiz Gonzaga Mendes e Maria Amélia Carvalho Mendes, nasceu em Viçosa, Mina Geral.

Em 2003 ingressou no Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Viçosa, concluindo-o em 2010, com o título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Em 2011, ingressou no Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola na Área de Energia na Universidade Federal de Viçosa, defendendo a sua dissertação em 2013.

SUMÁRIO

LISTA DE QUADROS	vi
LISTA DE FIGURAS.....	vii
RESUMO.....	ix
ABSTRACT	xvi
CAPÍTULO 1.....	1
1. Introdução Geral.....	1
1.1. Considerações Iniciais.....	1
1.2. Esboço do Conteúdo da Tese.....	4
1.3. Justificativa da Dissertação.....	5
1.4. Referências Bibliográficas.....	7
CAPÍTULO 2.....	9
2. Estudo de Estado da Arte da Geração Distribuída com Armazenamento de Energia no Brasil e em Países Seleccionados	9
2.1. Introdução.....	9
2.2. Tecnologias de armazenamento de energia mais utilizadas na geração distribuída.....	11
2.2.1. Baterias de Fluxo (Flow batteries - FBES)	16
2.2.2. Células a Combustível (Armazenamento de Energia a Hidrogênio).....	18
2.2.3. Supercapacitores.....	19
2.3. Técnicas de planejamento da Geração Distribuída.....	20
2.4. Avaliação de seleccionados.....	20
2.5. Vantagens e desafios da geração distribuída com armazenamento de energia	23
2.6. Conclusão.....	25
2.7. Referências Bibliográficas.....	26
CAPÍTULO 3.....	30
3. Critérios de Pré-Seleção de Locais para Inserção da Geração Distribuída Fotovoltaica e Armazenamento de Energia no Sistema de Distribuição de Energia Elétrica.....	30
3.1. Introdução.....	30
3.2. Objetivo Geral.....	33
3.2.1. Objetivos Específicos.....	34

3.3. Material e Métodos.....	34
3.3.1. Investigação de critérios.....	34
3.3.2. Classificação critérios	35
3.4. e Discussão.....	35
3.4.1. Investigação de critérios.....	35
3.4.2. Classificação dos critérios	42
3.5. Conclusão.....	49
3.6. Referências Bibliográficas.....	50
CAPÍTULO 4.....	59
4. Metodologia e aplicação da Inserção de Geração Fotovoltaica Distribuída e Armazenamento de Energia.....	52
4.1. Introdução.....	52
4.2. Objetivo Geral.....	53
4.2.1. Objetivos específicos.....	54
4.3. Material e Métodos.....	54
4.3.1. Avaliação de critérios.....	54
4.3.2. Aplicação da metodologia de inserção de geração fotovoltaica distribuída.....	63
4.3.3. Avaliação de critérios.....	64
4.4. Resultado e Discussão.....	65
4.4.1. Avaliação de critérios.....	65
4.4.2. Aplicação da metodologia de inserção de geração fotovoltaica distribuída com armazenamento de energia.....	66
4.4.3. Avaliações para diferentes cenários.....	86
4.5. Conclusão.....	88
4.6. Referências Bibliográficas.....	89
CAPÍTULO 5.....	91
5. Conclusão Geral.....	91

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Exemplos de aplicações de sistemas de armazenamento de energia em larga escala.	13
Quadro 3.1 – Número de consumidores por ramo da concessionária CEMIG .42	
Quadro 3.2 - Seletividade, caracterização e motivação dos critérios de pré-seleção.	46
Quadro 3.3 - Descrição quantitativa dos critérios de pré-seleção.	47
Quadro 4.1- Pesos utilizados no índice geral, para a simulação completa	72
Quadro 4.2- Resultado dos índices específicos e do índice geral para o alimentador SLAD212.	73
Quadro 4.3 - Pesos utilizados no índice geral, para a simulação simplificada. 74	
Quadro 4.4- Resultado dos índices específicos e do índice geral simplificado para o alimentador SLAD212.	76
Quadro 4.5- Resultado dos índices específicos e do índice geral simplificado para o alimentador BETC 506.	78
Quadro 4.6- Resultado dos índices específicos e do índice geral simplificado para o alimentador BETQ 417.	80
Quadro 4.7- Resultado dos índices específicos e do índice geral simplificado para o alimentador BHAT 04.	81
Quadro 4.8- Resultado dos índices específicos e do índice geral simplificado para o alimentador BHGT 11.	83
Quadro 4.9- Resultado dos índices específicos e do índice geral simplificado para o alimentador PMSU 15.	84
Quadro 4.10 - Resultado comparativo do índice geral das simulações.	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1- Oferta interna de energia elétrica na União Europeia por fonte no período de 2008 – 2035.	2
Figura 1.2 - Capacidade instalada de energia elétrica brasileira nos anos de 2005 e 2030.	3
Figura 1.3 - Consumo energético no setor agropecuário brasileiro no período de 1975 a 2010.	5
Figura 2.1 - Distribuição dos acumuladores eletroquímicos diferentes de acordo com as densidades de energia e potência.	16
Figura 2.2 - Ilustração de uma bateria de fluxo do tipo Brometo de Polissulfeto.....	17
Figura 2.3 - Célula a combustível.	18
Figura 3.1 - Evolução histórica da produção fotovoltaica mundial no período 1993-2011.	33
Figura 3.2 – Valor médio de terreno na Região Metropolitana de Belo Horizonte – MG.	37
Figura 3.3- Radiação solar direta normal diária média anual para Minas Gerais.....	38
Figura 3.4 - Custos históricos de módulos de c-Si no Brasil.	41
Figura 4.1 -Oferta interna de energia elétrica por fonte – ano base 2011.	61
Figura 4.2 – Perfil de carga média mensal para o mês de julho do alimentador SLAD212 no software Homer.	67
Figura 4.3 - Configuração do sistema.	68
Figura 4.4 – Perfil do índice fator de carga horário para o ano 2011/2012.	69
Figura 4.5 – Perfil do índice confiabilidade horário para o ano 2011/2012.	70
Figura 4.6 – Perfil índice ambiental horário para o ano 2011/2012.	71
Figura 4.7 – Localização do ponto de conexão de inserção da GD com armazenamento de energia.....	71
Figura 4.8 – Topologia do alimentador BETC 506.	77
Figura 4.9 – Topologia do alimentador BETQ 417.....	79

Figura 4.10 – Topologia do alimentador BHAT 04.	80
Figura 4.11 – Topologia do alimentador BHGT 11.	82
Figura 4.12 – Topologia do alimentador PMSU 15.	83

RESUMO

MENDES, André Luis Carvalho Mendes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, junho de 2013. **Metodologia e aplicação da inserção de geração fotovoltaica distribuída e armazenamento de energia em sistema elétrico de potência.** Orientador: Delly Oliveira Filho. Coorientadores: Antônia Sônia Alves Cardoso Diniz e Paulo Marcos de Barros Monteiro.

Energia tem sido um dos fatores importantes para o desenvolvimento econômico, político e social ocorrido no mundo, principalmente, desde a segunda metade do século XX. É crucial para o desenvolvimento econômico e humano e fundamental para a melhoria da qualidade de vida da população. Nesse contexto, a utilização da Geração Distribuída (GD) da energia elétrica vem ganhando destaque, principalmente a advinda de fontes renováveis. Apesar da geração de energia solar fotovoltaica ser ainda considerada não competitiva economicamente, essa tecnologia vem sendo promovida por meio de programas governamentais. Consequentemente, tem se observado um forte crescimento de sua utilização tanto no Brasil como no mundo. Nesse trabalho, foram pesquisados métodos de localização da geração distribuída com armazenamento de energia do ponto de vista de concessionárias de distribuição de energia elétrica. Optou-se por utilizar a metodologia descrita por Toledo, 2013, que se baseia no cálculo do Índice Geral (I_G). Esse índice é composto por aspectos técnicos econômicos e ambientais. O aspecto econômico é composto pelo sub-índice de perdas na linha (I_{PL}) e pelo sub-índice do fator de carga (I_{FC}), o aspecto técnico pelo sub-índice do perfil de tensão (I_{PT}) e pelo sub-índice de confiabilidade (I_C), e por último, o aspecto ambiental definido pelo sub-índice ambiental (I_{AMB}). Em cada sub-índice foi aplicado um conjunto de pesos para que se tenham opções de valorizar determinado aspecto. Foi proposta a utilização de critérios de pré-seleção com o objetivo de identificar áreas de maior ou menor interesse para a instalação da GD com armazenamento de energia, assim diminuindo o universo de análise. Os critérios de pré-seleção foram definidos como: caracterização da rede de distribuição; localização; tipo de instalação; custo de conexão e prioridade da carga. Para as análises realizadas utilizou-se o *software* de planejamento energético, Homer, e o PSS ADEPT para o cálculo do fluxo de potência. Os

cinco alimentadores de distribuição analisados são localizados na região metropolitana de Belo Horizonte, MG da concessionária CEMIG. Foi também analisado o índice geral simplificado, que é o índice geral menos os sub-índices que dependem do cálculo do fluxo de potência, i. e., perdas na linha e o perfil de tensão. A análise realizada consistiu de indicar locais ótimos para a inserção da GD com armazenamento de energia. A metodologia utilizada mostrou-se apropriada para o objetivo proposto, i. e., de determinar locais ótimos para a inserção da geração distribuída com armazenamento de energia, do ponto de vista de concessionárias de distribuição de energia elétrica. E por fim, foram propostas algumas sugestões para trabalhos futuros e para o aprimoramento da metodologia.

ABSTRACT

MENDES, André Luis Carvalho Mendes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, June, 2013. **Methodology and application of insertion of distributed photovoltaic generation and energy storage in the electric power system.** Adviser: Dely Oliveira Filho. Co-advisers: Antônia Sônia Alves Cardoso Diniz and Paulo Marcos de Barros Monteiro.

Energy has been an important economic, political and social factor in the world, especially since the second half of the twentieth century. It is crucial for economic and human development and fundamental to improve the population's life quality. In this context, the use of Distributed Generation (DG) of electrical energy has been increased attention, mainly from renewable sources. Despite the generation of solar PV is still considered not economically competitive, this technology has been promoted through governmental programs. Consequently, it has seen a strong growth in its use both in Brazil and in the world. In this study, we investigated the localization methods of distributed generation with energy storage from the point of view of the electrical energy distribution utilities. We chose to use the methodology described by Toledo, 2013, based on the calculation of the general index (IG). This index is composed of technical, economic and environmental aspects. The economic aspect is composed of the line losses sub-index (IPL) and the load factor sub-index (IFC), the technical aspect of the voltage profile (IPT) sub-index and the reliability (IC) sub-index, and lastly, the environmental aspect is composed of the environmental sub-index (IAMB). In each sub-index was applied a set of weights that have options to value certain aspect. It was proposed to use the pre-selection criteria, in order to identify areas of great or minor interest to install the GD with energy storage, thereby reducing the universe of analysis. The pre-selection criteria were defined as: the distribution grid characterization, location, installation type, connection cost and load priority. For the analyzes we used the software for energy planning, Homer, and PSS ADEPT to calculate the power flow. The five distribution feeders analyzed are located in the metropolitan region of Belo Horizonte, Minas Gerais of the utility CEMIG. It was also analyzed the general simplified index, which is the general index less the sub-indices that depend on the calculation of the power flow, i. e., the line losses and the voltage profile. The analysis consisted of the indication of the

optimal locations for the insertion of GD with energy storage. The methodology used was appropriate for the proposed goal, i. e., to determine the optimal locations for insertion of distributed generation with energy storage, from the electrical energy distribution utilities point of view. Finally, some suggestions were proposed for future work in order to improve the methodology.

1. Introdução Geral

1.1 Considerações Iniciais

Energia tem sido um dos fatores importantes para o desenvolvimento econômico, político e social ocorrido no mundo, principalmente, desde a segunda metade do século XX. É crucial para o desenvolvimento econômico e humano e fundamental para a melhoria da qualidade de vida da população. Maiores ou menores possibilidades energéticas determinam o crescimento ou a estagnação econômica de um país.

No Brasil, optou-se pela geração centralizada, sendo que o principal tipo de fonte geradora são as usinas hidroelétricas de grande porte. Esta opção deve-se ao baixo custo deste tipo de aproveitamento energético e à grande disponibilidade de água, aliada a uma topologia favorável das bacias hidrográficas. À medida que a economia nacional se desenvolveu, os melhores lugares para a instalação de hidroelétricas foram ocupados e a construção de novas usinas gera maior impacto ambiental, dificultando a sua implementação. Além disso, a vulnerabilidade do sistema brasileiro predominantemente hidroelétrico, especialmente pela falta de investimentos despertou a atenção das autoridades e de especialistas, evidenciado na crise de suprimento de energia de 2001(Ferreira, 2003).

Nos Estados Unidos da América as principais fontes geradoras de eletricidade são termoelétricas supridas por carvão mineral e gás natural, sendo 42% carvão mineral, 25% gás natural, e o restante composto por: 19% nuclear, 13% energias renováveis e menos de 1% derivados do petróleo. A parcela de energia renovável é composta por 63% hidroelétrica, 23% eólica, 11% biomassa, 3% geotérmica e solar que contribui com menos de 1% (EIA, 2012).

Na Europa, observando a matriz elétrica de 2008, percebe-se que as principais fontes geradoras são nucleares, carvão mineral, gás natural e fontes renováveis. De acordo com as projeções para os próximos anos haverá crescimento na geração de energia elétrica a gás e crescimento maior ainda da energia advinda de fontes renováveis, como mostra a Figura 1.1(EIA, 2011).

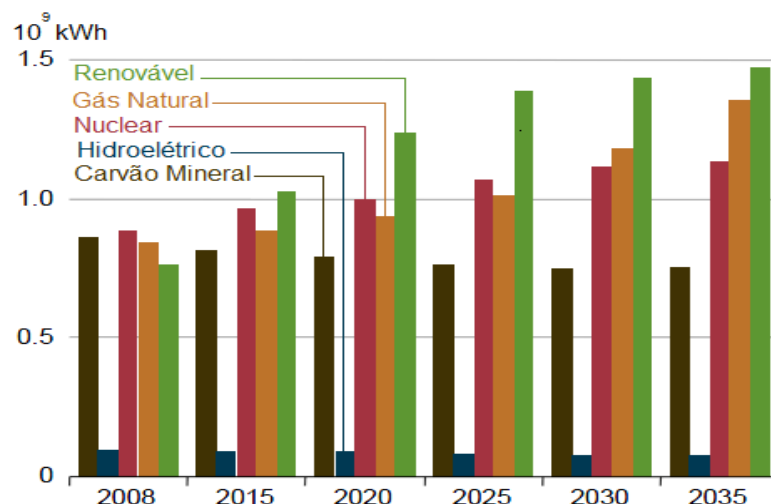


Figura 1.1- Oferta interna de energia elétrica na União Europeia por fonte no período de 2008 – 2035.

Fonte: EIA, 2011

Atualmente, o Brasil vem promovendo a diversificação da sua Matriz Energética, buscando alternativas para aumentar a segurança no abastecimento de energia elétrica além de permitir a valorização das características e potencialidades regionais e locais. Na Figura 1.2 é possível

notar o aumento na capacidade instalada comparando a matriz 2005 com a prevista para 2030(EPE, 2004; EPE, 2007).

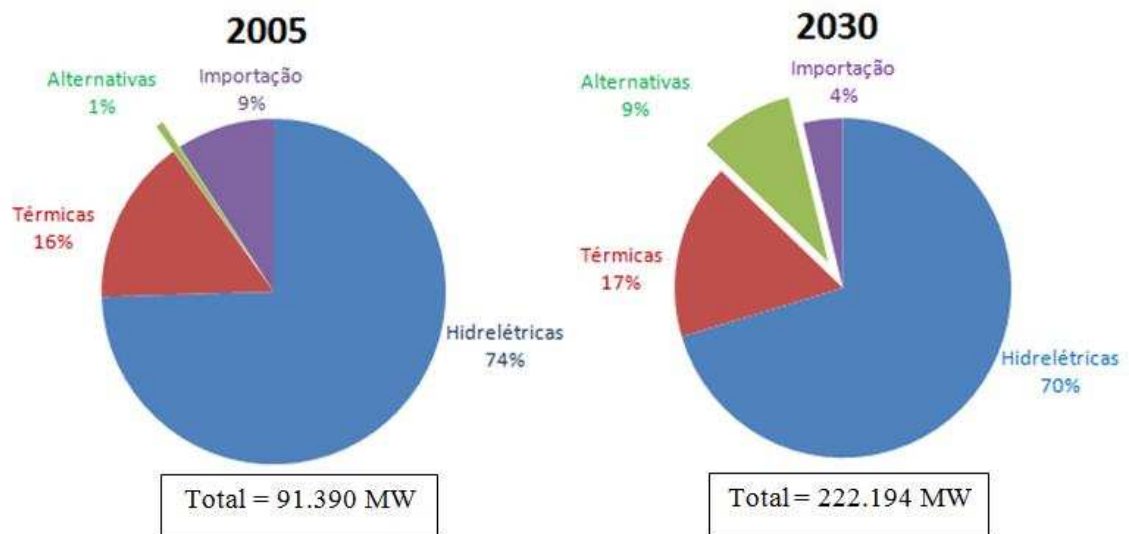


Figura 1.2 - Capacidade instalada de energia elétrica brasileira nos anos de 2005 e 2030.

Nesse contexto apresentado, a utilização da geração distribuída vem ganhando destaque, principalmente advinda de fontes renováveis. A Geração Distribuída (GD) pode ser definida como a geração de energia elétrica junto ou próxima do(s) consumidor (es), independentemente da potência, tecnologia e fonte de energia. Caracteriza-se, geralmente, por possuir pequena escala de produção de energia, flexibilidade quanto à localização e modularidade.

A GD pode proporcionar uma série de benefícios, como retardar o investimento em ampliações da geração centralizada existente e na construção de novas unidades e adiar a necessidade de redimensionamento das linhas de transmissão, além de criar oportunidades para novos agentes produtores de energia. Adicionalmente, o uso de GD, em complemento à geração centralizada, pode reduzir as perdas do sistema, melhorar os níveis de tensão, aumentar a capacidade de transmissão, diminuir o tempo de implantação, dentre outros benefícios ao sistema. Por outro lado, a inserção de GD pode

ocasionar fluxo bidirecional nas linhas de transmissão e problemas de acionamento da proteção em casos de curto-circuito no sistema de distribuição de energia elétrica (Guedes et al., 2009).

Tan et, al, 2013, alerta para as consequências de se conectar a DG a rede de distribuição de energia sem análise adequada quanto à estabilidade, segurança, proteção, perdas e qualidade da energia. Assim é necessário o desenvolvimento de metodologias e ferramentas específicas com capacidade para identificar melhores pontos de conexão da GD a fim de coibir esses efeitos (El-zonkoly, 2013).

1.2 Esboço do Conteúdo da Tese

Essa dissertação é constituída dos seguintes tópicos:

Capítulo 1: Introdução geral – Apresenta um panorama atual da geração de energia elétrica no Brasil e no mundo, bem como a utilização da geração distribuída.

Capítulo 2: Estudo de estado da arte da geração distribuída com armazenamento de energia no Brasil e em países selecionados – Descreve os principais tipos de armazenamento de energia, as técnicas de planejamento da GD, a análise da implementação da GD em alguns países selecionados e as vantagens e desafios encontrado.

Capítulo 3: Critérios de pré-seleção de locais para inserção da geração distribuída fotovoltaica e armazenamento de energia no sistema de distribuição de energia elétrica – Descreve a metodologia de critérios de pré-seleção de locais para inserção da geração distribuída fotovoltaica e armazenamento com o objetivo de diminuir o âmbito de análise dos possíveis locais.

Capítulo 4: Metodologia e aplicação da inserção de geração fotovoltaica distribuída e armazenamento de energia – Apresenta a metodologia de locais

para inserção da geração distribuída fotovoltaica e armazenamento utilizado e as análises dessas inserções em alguns alimentadores selecionados.

Capítulo 5: Conclusão geral – Conclui os trabalhos apresentados e oferece sugestões para trabalhos futuros

1.3 Justificativa da Dissertação

A energia solar fotovoltaica integrada à rede surge como uma grande promessa para a GD. Questões técnicas para seu emprego têm sido aperfeiçoadas. Um dos aspectos importantes será normalizar questões essenciais da geração distribuída, nos aspectos de qualidade, segurança e proteção (EPE, 2007).

No setor agropecuário é crescente a utilização do uso da energia elétrica, como relatado no Balanço Energético Nacional de 2011, Figura 1.3 (EPE, 2011). A eletrificação oferece um elenco de soluções para bombeamento de água, iluminação, telecomunicações, refrigeração para fins médicos e alimentares e força motriz aplicada a diversos fins, sendo uma grande aliada no aumento da produtividade e, conseqüentemente, contribuindo para a manutenção do homem no campo.

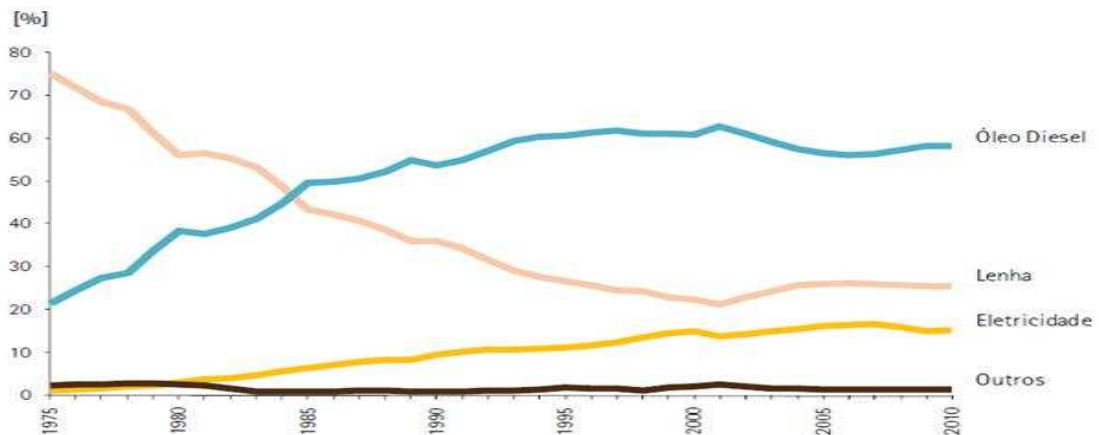


Figura 1.3 - Consumo energético no setor agropecuário brasileiro no período de 1975 a 2010.

Fonte: EPE, 2011.

No Brasil, o conceito de eletrificação rural descentralizada vem recebendo incentivos governamentais por meio de programas específicos, sendo direcionado para contemplar, principalmente, o uso de fontes renováveis de energia, e tem como objetivo o desenvolvimento sustentável. Exemplos são os geradores fotovoltaicos, turbinas eólicas, co-geração usando biogás, geração por meio de biomassa vegetal tais como, cana de açúcar, lenha e biodiesel (Rossi, 2012).

A inserção da GD em larga escala no sistema elétrico de potência representa uma mudança significativa na operação e planejamento do sistema como um todo (Trebolle, 2012) que deve ser analisada no atual contexto que questiona a forma em que se dá o desenvolvimento. A avaliação da GD no sistema elétrico de potência pode ser de pelo menos três perspectivas: (i) das concessionárias, (ii) dos consumidores individuais e (iii) da sociedade como um todo, e cada uma delas tem a sua importância.

Sistemas fotovoltaicos de geração de energia elétrica têm sido empregados com e sem armazenamento de energia. Nos sistemas com armazenamento de energia parte da geração é armazenada para uso nos horários de maior demanda ou de maiores custos. Os sistemas de armazenamento de energia na visão de concessionárias também visam aumentar a modulação pelo remanejamento de cargas que diminui o carregamento de alimentadores.

A tarifa Branca será uma opção tarifária para os consumidores de baixa tensão, por exemplo, para o consumidor residencial. Essa tarifa possui três diferentes preços de energia a depender da hora de consumo, como forma de reduzir o gasto dos consumidores que possuem baixo consumo no horário de pico, gerando também o uso mais eficiente da rede de distribuição (ANEEL, 2012).

A tarifa branca juntamente com a possibilidade de conexão da micro e mini-geração junto à rede de distribuição de energia elétrica, normatizada pela resolução 482 da ANEEL, deverá incentivar a utilização de sistemas de

armazenamento de energia, sendo possível armazenar energia em um horário de tarifa reduzida ou por meio de uma fonte geradora e injetar energia na rede de distribuição no horário de tarifa mais elevada.

Previendo novas mudanças com a inserção da geração distribuída no meio rural e urbano são necessários mais pesquisas sobre o assunto. Assim, este trabalho propõe dar continuidade aos trabalhos desenvolvidos, aperfeiçoando a metodologia desenvolvida por Toledo, e realizando análise do impacto da inserção da geração fotovoltaica distribuída com armazenamento de energia em um sistema elétrico de potência real.

É crescente a utilização de novos sistemas de geração de energia, proveniente de diversas fontes e não é conhecido o impacto dessa inserção no sistema elétrico de potência (SEP), assim se faz necessária à pesquisa para o melhor entendimento de seus efeitos para garantir a qualidade dos serviços de fornecimento de energia elétrica aos consumidores.

1.4 Referências Bibliográficas

ANEEL, 2012. Estrutura Tarifária Para o Serviço de Distribuição de Energia Elétrica - Tarifa Horária Branca-Baixa Tensão. Acessado em maio, 2013 no site: <http://www.aneel.gov.br/>.

EIA, U.S. Energy Information Administration, Electric Power Monthly, March, 2012, P. 14.

EIA, U.S. Energy Information Administration, The International Energy Outlook 2011, September, 2012, P. 94.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética, Ministério das Minas e Energia, Matriz Energética Nacional 2030, 2007.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética, Ministério das Minas e Energia, Balanço Energético Nacional 2011, 2011.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética, Ministério das Minas e Energia. Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica – Proinfa. 2004.

FERREIRA, O. C. A nova economia. Economia & Energia. 2003, disponível em:http://www.ecen.com/eee38/a_nova_economia.htm acessado em: abril de 2012.

GUEDES, L. M. SANTOS, E. C., OLIVEIRA, M. A. G. Alocação de geração distribuída em redes de distribuição radiais considerando análise de curva de carga. XIII Encontro Regionallbero Americano do Comitê Nacional Brasileiro de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2009.

ROSSI, L. A. Aspectos da geração descentralizada ou dispersa de energia elétrica no meio rural e as fontes renováveis de energia, disponível em: <http://www.feagri.unicamp.br/tomates/pdfs/consumo1.pdf> acessado em: abril de 2012.

TREBOLLE, D. GÓMEZ, T. COSENT, R. FRÍAS, P., Distribution planning with reliability options for distributed generation, Electric Power Systems Research, Volume 80, fevereiro, p. 222-229, 2010.

TAN, W. HASSAN, M. Y. MAJID, M. S. HASIMAH, RAHMAN, A., Optimal distributed renewable generation planning: A review of different approaches, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 18, fevereiro, p. 626-645, 2013.

EL-ZONKOLY, A. SAAD, M. KHALIL, R., New algorithm based on CLPSO for controlled islanding of distribution systems, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 45, Issue 1, February 2013, Pages 391-403

2. Estudo de Estado da Arte da Geração Distribuída com Armazenamento de Energia no Brasil e em Países Selecionados

2.1 Introdução

O desenvolvimento e o uso de energia renovável tem experimentado um crescimento rápido nos últimos anos. Nos próximos 20-30 anos, todos os sistemas energéticos sustentáveis irão se basear no uso racional dos recursos tradicionais e na maior utilização de energias renováveis (Ibrahim et al., 2008). A contribuição referente aos sistemas energéticos sustentáveis é significativa para a utilização racional da energia. Porém, exigirá considerável desenvolvimento de métodos ou sistemas que utilizem o armazenamento de energia, especialmente para a utilização de modo contínuo de fontes intermitentes. Isto irá abrir um novo campo de aplicação, especialmente devido ao crescimento da produção elétrica a partir de energias renováveis, juntamente com a produção descentralizada.

A operação e o planejamento de sistemas de energia elétrica no contexto brasileiro, conduzidos de forma centralizada, levaram ao desenvolvimento de um sistema complexo de geração, transmissão e distribuição de energia, em que o armazenamento de energia não tem sido muito utilizado. Uma das únicas exceções é o armazenamento de água em reservatórios de barragens de aproveitamento energético, que é de grande importância pelo fato do sistema elétrico brasileiro ser predominantemente

hidroelétrico. Hoje, a capacidade de armazenamento em todo o mundo é o equivalente de cerca de 90GW (Multon et al., 2003; Rudell, 2003), de uma produção total de 3,4 TW, ou seja, cerca de 3% do total (Ibrahim et al., 2008).

Dentre as fontes energéticas renováveis e descentralizadas, a energia solar é promissora no Brasil, considerando o alto valor de irradiação solar global incidente sobre todo o território brasileiro, que chega até 6,7 mWh/m² frente a menos de 2 mWh/m² na maioria dos países da União Europeia (Pereira et al., 2006). Apesar de a energia solar fotovoltaica ser considerada limpa, é importante destacar seus aspectos negativos em termos ambientais, principalmente devido à considerável quantidade de resíduos tóxicos produzidos na fabricação dos módulos solares fotovoltaicos.

Segundo Mcmanus, 2012, o futuro estilo de vida em um cenário de baixas emissões de carbono será fortemente dependente de sistemas de armazenamento de energia. Esses sistemas, em geral, contêm materiais que podem ser prejudiciais ao meio ambiente se não forem manuseados convenientemente. Dessa forma, é essencial entender os impactos ambientais negativos provenientes da produção, do uso e da disposição final de sistemas de armazenamento de energia, em especial baterias, de forma a escolher aqueles que de fato, venham a contribuir para uma maior sustentabilidade.

As gerações de energia solar e eólica estão crescendo rapidamente ao redor do mundo, principalmente para aliviar o impacto ambiental negativo do setor de geração de energia elétrica (Beaudin et al., 2010).

A geração de energia por fontes renováveis, em geral, é considerada menos competitiva em comparação com as tradicionais fontes geradoras de energia elétrica, principalmente pela intermitência na geração e o custo elevado. No entanto, as energias renováveis têm as vantagens de não depender de combustíveis fósseis e evitar a emissão de gases de efeito estufa. Além disso, não necessitam de grandes medidas de segurança como no caso da energia atômica.

Muito se tem incentivado a utilização das energias renováveis, como nos 27 países da União Europeia, que traçaram metas de substituir 20% da

geração de energia elétrica a partir de combustíveis fósseis e nucleares por fontes renováveis de energia até 2020 (Krozer, 2013).

O armazenamento de energia elétrica é amplamente considerado como uma das possíveis soluções para viabilizar a geração de energia elétrica das fontes renováveis (Beaudin, et al., 2010). Como mencionado por Evans et al., 2012, para que as energias renováveis integradas ao sistema de fornecimento de energia elétrica continuem crescendo será necessário considerá-la como segura e contínua, sendo necessário para tal a utilização de sistemas de armazenamento de energia.

Tem se observado custos decrescentes do armazenamento de energia e dos custos de conexão ao sistema elétrico serão mais atraentes economicamente. Essas são indicações de se ter maior quantidade de armazenamento de energia conectada no sistema elétrico de potência nas próximas décadas. Porém, as tecnologias de armazenamento de energia têm limitações como dificuldades de operação, manutenção e capacidades limitadas (Hittinger et al., 2012).

A fim de descrever as características e o campo de aplicação das tecnologias de armazenamento de energia e as técnicas de planejamento da geração distribuída com e sem armazenamento, foi realizado uma pesquisa bibliográfica e os resultados estão descritos a seguir.

2.2 Tecnologias de armazenamento de energia mais utilizadas na geração distribuída

De forma geral, podem-se dividir os tipos de armazenamento de energia em três classes: físicos, químicos ou mistos.

As formas de armazenamento de energia por meio físico compreendem: (i) volante de inércia, (ii) potencial hidráulico, (iii) ar comprimido, (iv) térmico, (v) supercapacitores e (vi) supercondutores magnéticos de armazenamento de energia (*Superconducting Magnetic Energy Storage* - SMES). O armazenamento por meio químico é compreendido por baterias e pilhas de

diversas tecnologias. As tecnologias mistas são tecnologias que conciliam meios físicos e químicos para armazenamento de energia tais como: produção/extração de combustíveis e armazenamento dos mesmos em lugares apropriados, armazenamento de biomassa para fins energéticos e baterias híbridas mistas, que utilizam de armazenamento físico e químico simultaneamente.

Pelo fato do armazenamento de energia química ser considerado de alta energia, ou seja, capaz de fornecer energia a uma carga considerada alta por um grande período, ela é a mais indicada para utilização junto à geração distribuída, sendo capaz de trabalhar em ciclos de carga e descarga diários, sem emissões nocivas de gases de efeito estufa ou ruído e requerendo pouca manutenção. Assim, a geração distribuída com armazenamento de energia pode atuar na qualidade de energia, tendo com principal objetivo o nivelamento de carga e o corte de pico, proporcionando ganhos econômicos (Nourai, 2002).

Ibrahim et al., 2008 prevê a possibilidade de, em futuro próximo, o sistema elétrico de potência utilizar sistemas de armazenamento e recuperação como coadjuvantes no atendimento à demanda e, como consequência, promover um aumento na flexibilidade da rede em termos de nivelamento de carga. Vários projetos com sistemas de armazenamento de grande porte com baterias foram construídos e testados em uma variedade de aplicações de rede elétrica (Doughty, 2010). Podem ser citados vários exemplos de aplicações em larga escala. O QUADRO 2.1 fornece alguns exemplos de aplicações de sistemas já instalados.

Quadro 2.1 - Exemplos de aplicações de sistemas de armazenamento de energia em larga escala

Projeto (Local)	Aplicação	Início de Operação	Potência	Energia	Tipo de Bateria
<i>Energy United</i>	Cortes de picos de demanda	1987- 2002	500 kW	500 kWh	Chumbo-ácido, célula inundada
Berliner Kraft-undLicht	Regulação de frequência e capacidade de geração adicional	1987-1995	8,5 MW em 60 min. de regulação de frequência; 17 MW para 20 min. de capacidade de geração adicional	14 MWh	Chumbo-ácido, célula inundada
Southern California Edison Chino Battery Storage Project	Vários modos de demonstração, incluindo nivelamento de carga, confiabilidade da linha de transmissão, controle local de potência reativa.	1988-1997	14 MW	40 MWh	Chumbo-ácido, célula inundada
Puerto Rico Electric Power Authority	Controle de frequência e capacidade de geração adicional	1994-1999	20 MW	14 MWh	Chumbo-ácido, célula inundada

Projeto (Local)	Aplicação	Início de Operação	Potência	Energia	Tipo de Bateria
PQ2000 the Brockway Standard Lithography Plant (Homerville, EUA)	Qualidade de potência, Fonte de alimentação ininterrupta (sistema no-break)	1996-2001	2 MW	55 kWh	Chumbo-ácido
Metlakatla Power and Light	Regulação de tensão e controle da geração.	1997-até hoje	1MW	1,4 MWh	Chumbo-ácido regulada por válvula
Golden Valley Electric Association	Suporte/control de potência reativa, capacidade de geração adicional, estabilidade de sistemas elétricos de potência	2003-até hoje	27 MW	14,6 MWh	Níquel-cádmio, tipo de células SBH920
AEPSistema de Armazenamento de energia distribuído com Baterias Sódio-enxofre	Adiamento da expansão do sistema	2006-até hoje	1,0 MW	7,2 MWh	Sódio-enxofre
Sistema de armazenamento de energia nos terminais de ônibus (LongIsland, New York)	Atendimento de carga	2008-até hoje	1,2 MW	6,5 MWh	Sódio-enxofre

Projeto (Local)	Aplicação	Início de Operação	Potência	Energia	Tipo de Bateria
Baterias Vanadium Redox instaladas no escritório da Sumitomo (Densetsu, Osaka)	Atendimento de picos de demanda	2000-até hoje	3 MW	800 kWh	Bateria de fluxo vanádio-redox
Pacificorp Castle Valley (Utah, EUA)	Adiamento de expansão do sistema, regulação da tensão	2004- até hoje	250 kW	2 MWh	Bateria de fluxo vanádio-redox

Fonte: Doughty, 2010

Existe uma vasta gama de tecnologias utilizadas na fabricação de acumuladores em baterias (chumbo-ácido, níquel-cádmio, níquel-hidreto metálico, níquel, ferro, zinco-ar, ar-ferro, sódio-enxofre, lítio-íon, lítio-polímero, dentre outros) e suas principais características que determinam o campo de utilização são: a densidade de energia e a densidade de potência.

A Figura 2.1 demonstra a aplicabilidade das tecnologias de baterias mais utilizadas nos tempos atuais, onde, quanto mais à direita do eixo inicial maior é a densidade de energia, sendo mais utilizadas em dispositivos que necessitam de suprimento de cargas por longos períodos. E quanto mais acima do eixo inicial maior é a densidade de potência, sendo mais utilizadas em dispositivos que necessitam de suprimento de cargas de elevada potência.

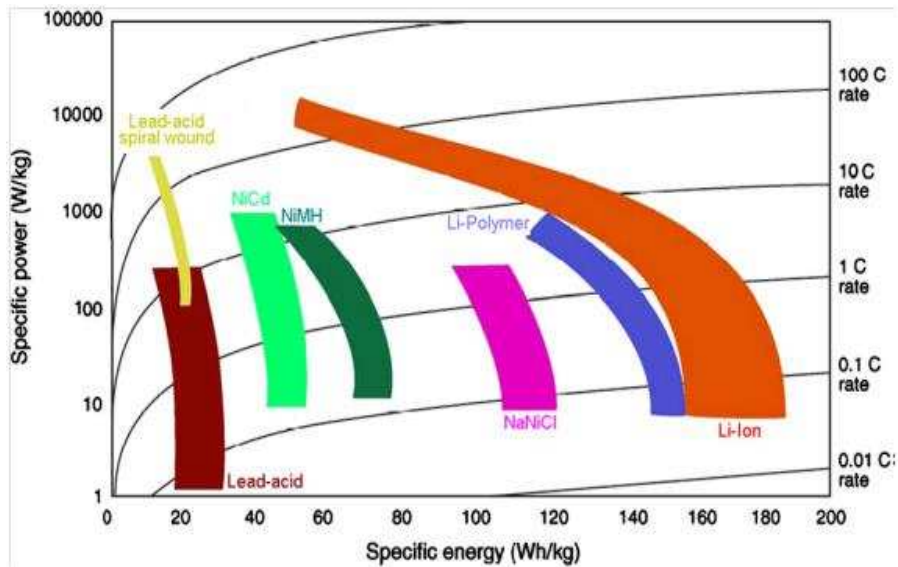


Figura 2.1 - Distribuição dos acumuladores eletroquímicos diferentes de acordo com as densidades de energia e potência.

Fonte: Bossche *et al.*, 2006.

Nas seções seguintes, serão descritas com maiores detalhes as tecnologias de armazenamento de energia de natureza química, que são as mais utilizadas juntamente com a GD.

2.2.1 Baterias de Fluxo (*Flow batteries - FBES*)

Baterias de fluxo são sistemas de dois eletrólitos em que os compostos químicos utilizados para armazenamento de energia estão em estado líquido, em solução com o eletrólito. Tais baterias superaram as limitações de acumuladores eletroquímicos padrão (chumbo-ácido ou de níquel-cádmio, por exemplo), em que as reações eletroquímicas criam compostos sólidos que são armazenados diretamente sobre os eletrodos em que se formam. Este é, portanto, um sistema limitado de massa, o que, obviamente, restringe a capacidade de baterias padrão (Ibrahim *et al.*, 2008).

Vários tipos de eletrólitos foram desenvolvidos utilizando bromo como o elemento central juntamente com: zinco (ZnBr), sódio (NaBr), vanádio (VRB) e, mais recentemente, polissulfeto de sódio (Figura 2.2) (Ibrahim *et al.*, 2008).

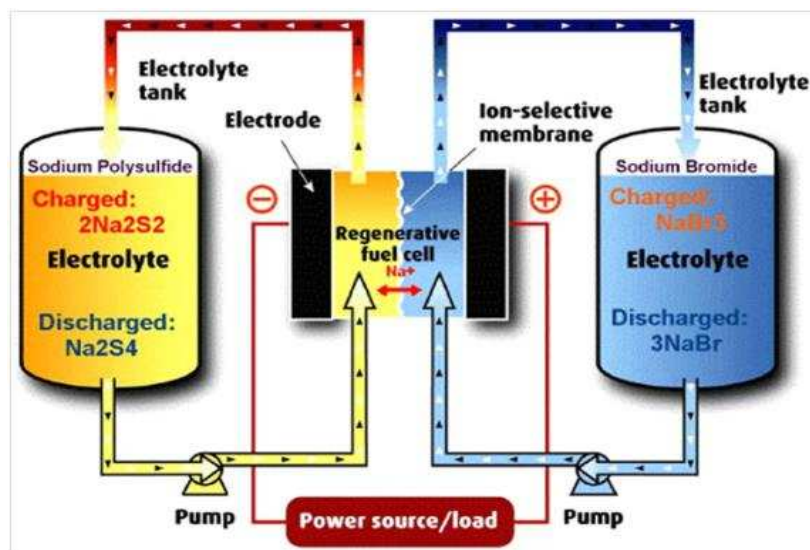


Figura 2.2 - Ilustração de uma bateria de fluxo do tipo Brometo de Polissulfeto.

Fonte: ESA, 2012.

A Bateria Brometo de Polissulfeto (*Polysulfide Bromide Battery- PBS*), é constituída por duas soluções salinas (brometo de sódio e polissulfeto de sódio) que estabelecem uma reação eletroquímica reversível. Sua temperatura operacional é a ambiente, possuindo 75% de eficiência. É de grande porte, apresenta longo tempo de descarga, mas ainda tem pouca experiência do seu uso em ampla escala (Nourai, 2002).

As baterias de fluxo Redox de Vanádio (*Vanadium Redox Battery, VRB*) armazenam energia através da reação de cátions de vanádio de valências distintas, onde o eletrodo negativo é formado pelo par $V^{2+}|V^{3+}$, o positivo $V^{4+}|V^{5+}$ e ambos estão imersos em soluções de ácido sulfúrico de concentração moderada. Esses dois tipos de bateria de fluxo requerem maior espaço físico em comparação com as demais (Nourai, 2002).

Já as baterias de fluxo ZnBr são totalmente montadas na fábrica. No processo de descarga, Zn e Br reagem, levando ao aumento da densidade de cátions Zn^{2+} e Br^- , uma vez que o zinco possui maior caráter redutor. Quando a bateria é carregada, zinco metálico deposita-se na forma de um filme de baixa espessura sobre o lado do eletrodo formado por carbono. A eficiência dessa tecnologia é de aproximadamente 75% e sua maior desvantagem, em

comparação com as outras duas baterias de fluxo, é o seu tempo de descarga relativamente curto (Nourai, 2002).

Outro bom exemplo da bateria de fluxo foi desenvolvido em 2003 por *Regenesys Technologies*, na Inglaterra, com uma capacidade de armazenamento entre 15 e 120 MWh. Desde então, foi atualizado para um sistema eletroquímico inteiramente baseado em vanádio. (ESA, 2012).

2.2.2 Células a Combustível (Armazenamento de Energia a Hidrogênio)

As células a combustível são um meio de restaurar a energia gasta para produzir hidrogênio a partir da água, por eletrólise. A oxi-redução que ocorre entre H_2 e O_2 é uma reação particularmente simples, que ocorre dentro da célula eletroquímica elementar, constituída por dois eletrodos (ânodo e cátodo), os quais são separados por eletrólito, um meio para a transferência de carga através dos íons H^+ , Figura 2.3 (Ibrahim *et. al.*, 2008).

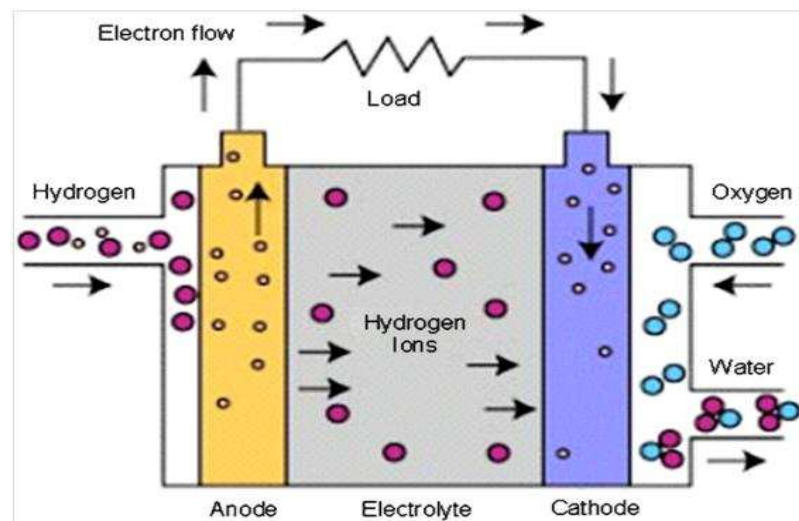


Figura 2.3 - Célula a combustível.

Fonte: Ibrahim et al., 2008.

Existem muitos tipos de células a combustível, tais como: alcalina (AFC), de metanol direto (DMFC), de ácido fosfórico (PAFC), de carbonato fundido

(MCFC) e de óxido sólido (SOFC). As diferenças básicas entre estes tipos de baterias são: eletrólito utilizado, temperatura de funcionamento, desenho e campo de aplicação. Além disso, cada tipo tem necessidade de combustíveis específicos (Ibrahim *et al.*, 2008).

As células a combustível podem ser utilizadas tanto na geração de energia elétrica centralizada quanto na descentralizada - especialmente nas aplicações de baixa potência. Utilizam-se células a combustível em aplicações interligadas ou não a sistema elétrico de potências (Ibrahim *et al.*, 2008). Acredita-se que o uso de células a combustível de hidrogênio tem o potencial de contribuir para a redução da poluição atmosférica. Entretanto, a emissão não intencional de hidrogênio e o aumento de vapor de água na estratosfera podem ser fatores que demandam preocupação (Tromp *et al.*, 2003; Noyan, 2011).

2.2.3 Supercapacitores

A tecnologia de Supercapacitores (SC) tem chamado muito a atenção nos últimos anos no campo de armazenamento de energia. As suas principais vantagens em comparação com as baterias são: alta densidade de potência, grande capacidade de ciclos carga/descarga, operação em larga faixa de temperatura e rápida capacidade de carga/descarga (Marcinauskas *et al.*, 2012).

As principais características dos SCs são: o desempenho em baixas temperaturas, necessidade de pouca manutenção, imunidade quanto a pico de descarga, velocidade de resposta e extrema durabilidade. No entanto, seu alto custo, grande quantidade de auto descarga e baixa densidade de energia são tidos como as principais desvantagens. Além disso, essa nova tecnologia apresenta uma excelente solução para regulação de tensão, e tem sido muito utilizado para diminuir o afundamento de tensão no Japão (Ferreira *et al.*, 2013).

2.3 Técnicas de planejamento da Geração Distribuída

Existem diversas linhas de pesquisa e técnicas de planejamento da geração distribuída com e sem armazenamento. Em geral, o que as diferenciam é o foco, ou seja, qual é o efeito ou o benefício prioritário em que o sistema proposto tende a atuar com maior ênfase.

A geração distribuída tem sido tratada com bastante relevância, como observado por Yongbiao et al., 2012 que afirma que os tradicionais métodos de planejamento de sistemas de distribuição, tecnologias e centros de operações não estão distantes de se adaptarem às novas tecnologias.

Na primeira década do século XXI observou-se a tendência na geração descentralizada. Isso se deu pelo desenvolvimento das tecnologias de utilização de fontes de energia renováveis como eólica e, em menor grau, a fotovoltaica (Hemmes et al., 2012).

ZangeneH et al., 2009 divide a geração distribuída em dois principais grupos: aqueles com base na combustão ou não renováveis (que atualmente, compõem a maior parte da potência instalada de GD no mundo) e os não dependentes de combustíveis ou renováveis. Por outro lado, tecnologias renováveis como eólica e fotovoltaica (PV) estão crescendo muito rapidamente impulsionados por incentivos governamentais. PV apresentou o maior crescimento, em torno de 60% ao ano entre 2000 e 2004, enquanto a energia eólica cresceu 28% ao ano nesse mesmo período. Outras tecnologias como microturbinas e células a combustíveis estão se aprimorando apresentando-se como candidatas para a utilização na GD no futuro.

2.4 Avaliação de tendência em países selecionados

É crescente a avaliação de cenários futuros considerando baixa emissão de carbono nos últimos anos, mas efetivamente poucas mudanças estão sendo implementadas para sua obtenção (Hughes e Strachan, 2010).

O armazenamento em grande escala pode vir a se tornar economicamente viável em cenários com a participação expressiva de energia

renovável. O tipo ideal de armazenamento e o custo da energia variam com a utilização das fontes de energia intermitente, mesmo que não apresentem grande eficiência (Grünwald et al., 2011). O armazenamento de energia é tido como um trunfo para promover a energia solar e eólica, como energia firme, pois suas intermitências na geração dificultam a sua viabilidade como fonte capaz de assegurar uma determinada capacidade de geração sem interrupções. Como essas fontes geradoras dependem de condições naturais que são instáveis, o armazenamento visa a suprir a energia nesses momentos de intermitência, garantindo o fornecimento em patamares confiáveis.

Os Estados Unidos da América estão investindo maciçamente em pesquisa, desenvolvimento e a utilização de fontes de energia renováveis. De acordo com Linden et al., 2006, investimentos em projetos de geração e transmissão e distribuição nos EUA em 15 anos podem ultrapassar 100 bilhões de dólares, sendo o setor de armazenamento de energia o mais beneficiado.

À medida que as centrais de armazenamento de energia elétrica vão sendo inseridas no sistema elétrico de potência e mais amplamente utilizadas, há uma tendência de se tornarem mais eficientes. Além disso, será evitado o uso de unidades geradoras de energia elétrica pouco eficiente durante períodos de pico, pois é melhor evitar o não fornecimento de energia elétrica do que a não utilização dessas unidades geradoras. Altos picos podem ser amenizados com armazenamento em níveis de distribuição da energia elétrica, que também poderá ser utilizado em período de maior consumo. (Linden et al., 2006)

Além disso, existem fortes incentivos governamentais para a promoção de fontes renováveis de energia, como é o caso do programa *Go Solar California*, que tem como objetivo a instalação de 3.000 megawatts de energia solar em casas e empreendimentos até final de 2016, para alcançar a meta de em 2020, 20% da energia primária ser de fontes renováveis.

Há alguns anos, o Japão utiliza o armazenamento de energia para suprir a intermitência da radiação solar em sistemas de geração fotovoltaica, usadas como alternativa para fontes geradoras que utilizam combustíveis fósseis. A utilização de baterias de grande capacidade para o fornecimento de energia

elétrica, e. g., carregamento à noite e descarregamento em horário de pico, principalmente baterias sódio-enxofre e baterias de fluxo, são desenvolvidas pela indústria com fomento governamental em parceria com laboratórios e universidades. O artigo redigido por Aki retrata diversos programas governamentais e empresas japonesas que desenvolvem tecnologias e produtos relacionados com o armazenamento de energia (Aki, 2011).

O Japão está sendo desafiado pela presente situação, a tomar decisões relacionadas para adotar com maior ênfase fontes renováveis de energia. Após o acidente ocorrido em março de 2011, provocado por terremoto e tsunami, que ocasionou um acidente nuclear na usina de Fukushima, a geração de energia núcleo elétrica tem sido fortemente questionada pela sociedade. Assim o novo cenário de geração de energia elétrica no Japão é: (i) uma maior participação de energia renovável; e (ii) o quase banimento de uso da energia nuclear para esse fim (Onoue et al., 2012).

O governo japonês prevê que a capacidade instalada de energia fotovoltaica no país chegue a 53GW, em 2030 (Yokoyama et al., 2011).

O artigo escrito por Okui et al., 2010 considera a utilização por parte do sistema elétrico de potência do armazenamento de energia de veículos. No entanto, é necessário estabelecer métodos eficazes de controle e legislação pertinente. Assim estudos devem ser feitos para planejar, do ponto de vista do sistema elétrico de potência, o uso da capacidade de armazenamento de energia da frota de veículos elétricos, considerando a curva de carga do sistema e os horários de utilização e de carga das baterias dos veículos elétricos (Okui et al., 2010).

Similar a demais países da Europa, a Espanha vem criando mecanismo de promoção da geração de energia elétrica advindo de fontes renováveis, combinando a geração de calor e energia causando crescentes e significativas mudanças no sistema de distribuição do país (Cossent et al., 2011).

A lei espanhola *Electricity Act* classifica as unidades geradoras de energia elétrica em duas categorias: “regime especial” e “regime ordinário”. O regime especial compreende as fontes renováveis de energia (excluindo

grandes centrais hidroelétricas), fontes geradoras através de rejeitos e de ciclo combinado, calor e energia elétrica, consideradas elegíveis para receber incentivos governamentais. Por outro lado, o “regime ordinário” que compreende tecnologias de geração de fontes convencionais como: carvão mineral, gás e grandes centrais hidroelétricas é considerado não elegível para tal. Desde 1997, o cronograma de incentivo e outros programas de incentivos do regime especial são adaptados às tecnologias em desenvolvimento levando em consideração a situação do sistema elétrico de potência (Cossent et al., 2011).

Em 1997, o regime especial era 9% do total de energia produzida, enquanto que em 2005 foi registrado um aumento para 18%. No final de 2010 o regime especial totalizava 33% do total de energia produzida (Cossent et al., 2011).

Desde algumas décadas, existe o apelo por fontes renováveis de energia na Espanha e atualmente vem aumentando esse desejo. O investimento em energia solar fotovoltaico incentivado pela legislação efetivada em 2007 foi muita atrativa gerando investimentos sete vezes maiores que o esperado para o ano seguinte. No entanto, novas legislações diminuíram drasticamente os subsídios, entrando em um ciclo de redução progressiva dos mesmos (Moreno et al., 2011).

2.5 Vantagens e desafios da geração distribuída com armazenamento de energia

Toda tecnologia existente na nossa sociedade tem um objetivo e um campo de aplicação que, em geral, são funções derivadas de suas vantagens. Em se tratando da geração distribuída com armazenamento de energia elétrica listam-se abaixo as suas vantagens:

- (i) **Planejamento do investimento:** com a utilização da geração distribuída com armazenamento de energia, é possível retardar o investimento em ampliações da geração centralizada existente e na

construção de novas unidades, além de adiar a necessidade de redimensionamento das linhas de transmissão.

(ii) **Novas oportunidades:** criar oportunidades para novos agentes produtores de energia, podendo gerar energia suficiente para não ter gasto com energia (porém, poderá ser cobrada uma taxa de manutenção do sistema).

(iii) **Redução de perdas e melhora na qualidade de energia:** A GD com armazenamento de energia, em complemento à geração centralizada, pode reduzir as perdas do sistema, pois será gerada próximo à carga evitando perda inerente à transmissão e distribuição. Além de melhorar os níveis de tensão e a confiabilidade, aumenta a capacidade da linha transmissão, pois uma determinada quantidade de energia não precisará ser transmitida, já que será gerada próximo à carga.

(iv) **Energia temporária:** Com a modalidade de fornecimento de energia temporária, que fornece energia para eventos temporários, o armazenamento de energia elétrica em grande quantidade poderá suprir a demanda dessas cargas sem alteração da curva de carga do setor onde será o evento.

(v) **Sustentabilidade:** A geração de energia elétrica é um grande fator analisado para a determinação do grau de sustentabilidade de um país, e a geração distribuída advinda de fontes renováveis aliadas ao armazenamento de energia elétrica pode contribuir em grande quantidade para a sustentabilidade energética de um país.

(vi) **Valorização do imóvel:** A utilização de tecnologias mais eficientes em imóvel permite que o usuário evite perdas e desperdício ao longo de seu uso, gerando uma economia nas despesas. Assim esse é um fator que valoriza o imóvel em relação a outros com as mesmas características, porém, sem o uso dessas tecnologias.

Desvantagens:

- (i) **Sistema mais complexo:** Com a utilização da GD em maior escala, o sistema elétrico de potência deverá inserir as unidades de geração mais significativas no sistema da distribuidora de energia elétrica, para maior gerenciamento do mesmo, além do que a inserção de GD pode ocasionar fluxo bidirecional nas linhas de transmissão e problemas de acionamento da proteção em casos de curto-circuito no sistema.
- (ii) **Alto custo:** Em geral, o custo de implementação da GD com armazenamento de energia elétrica é considerado alto, em comparação com grandes e médias centrais geradoras. Porém há de se avaliar todos os benefícios e desvantagens como um todo nas tomadas de decisões.
- (iii) **Manutenção:** As baterias mais utilizadas no armazenamento de energia têm necessidade de serem trocadas em média de três a quatro anos. Isso eleva o preço de manutenção do sistema de armazenamento.

2.6 Conclusão

As fontes alternativas de energia têm um futuro promissor. Muitos países estão cientes de seus benefícios e consequências e estão dispostos a financiar o desenvolvimento tecnológico a fim de torná-las amplamente utilizadas na geração de energia elétrica.

O armazenamento de energia tem um papel importantíssimo na promoção dessas fontes, isto porque a maioria é tida como fontes geradoras intermitentes sendo incapazes de fornecer uma quantidade constante de energia em grandes períodos, o que pode ser reavaliado se forem acrescidas, com sistemas de armazenamento de energia elétrica, que visam suprir a energia não gerada, sendo capazes de fornecer energia firme.

Como visto anteriormente, existem vários métodos para a determinação da localização da GD com ou sem armazenamento, no entanto, não há um consenso sobre qual o método mais indicado. A caracterização de um

determinado sistema elétrico de potência influencia na escolha do método da localização da GD.

O Brasil tem procurado diversificar a sua matriz energética, por meio do incentivo a fontes renováveis de energia. A motivação para busca dessa diversificação se deve a: grande participação da geração hidroelétrica na matriz energética brasileira; o racionamento de energia ocorrido em 2001, evidenciando a vulnerabilidade do sistema elétrico; e o fluxo de investimentos no sistema geração, transmissão e distribuição não foram satisfatórios para sustentar o crescimento econômico do país.

Por outro lado, motivado por questões circunstanciais ocorreu um fluxo significativo de investimentos para construção de usinas termoelétricas, por terem menor tempo de implantação em relação às usinas hidroelétricas.

2.7 Referências Bibliográficas

AKI, H., "Energy storage research and development activities in Japan," *Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE* , v 1, julho, 2011, p 24-29.

BEAUDIN, M.; ZAREIPOUR, H.; SCHELLENBERGLABE, A.; ROSEHART, W.; Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources: An updated review, *Energy for Sustainable Development*, v 14, dezembro 2010, p. 302-31.

BOSSCHE, V.; VERGELS, F.; MIERLO V. J.; MATHEYS, J.; AUTENBOER, V. W. SUBAT: An assessment of sustainable battery technology. *Journal of power sources* 2006.

COSSANT, R.; GÓMEZ, T.; OLMOS, L.; Large-scale integration of renewable and distributed generation of electricity in Spain: Current situation and future needs, *Energy Policy*, v 39, dezembro, 2011, p 8078-8087.

DOUGHTY, D. H. Batteries for Large-Scale Stationary Electrical Energy Storage. The Electrochemical Society *Interface* • Fall 2010

ESA, Electricity Storage Association. Disponível em: <www.electricitystorage.org.> Acesso em 28 jun. 2012.

EVANS, A.; STREZOV, V.; EVANS T. J.; Assessment of utility energy storage options for increased renewable energy penetration, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v 16, agosto, 2012.

FERREIRA, H. L.; GARDE, R.; FULLI, G.; KLING, W. LOPES, J. P.; Characterisation of electrical energy storage technologies, *Energy*, v 53, maio, 2013, p 288-298.

GRÜNEWALD, P.; COCKERILL, T.; CONTESTABILE, M.; PEARSON, P.; The role of large scale storage in a GB low carbon energy future: Issues and policy challenges, *Energy Policy*, v 39, setembro, 2011, p 4807-4815

HEMMES, K.; GUERRERO, J. M.; ZHELEV, T.; Highly efficient distributed generation and high-capacity energy storage, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, v 51, janeiro, 2012, p 18-31.

HITTINGER, E.; WHITACRE, J. F.; Apt, J.; What properties of grid energy storage are most valuable?, *Journal of Power Sources*, v 206, maio 2012, p 436-449.

HUGHES, N.; STRACHAN, N.; Methodological review of UK and international low carbon scenarios, *Energy Policy*, v 38, outubro, 2010, p 6056-6065.

IBRAHIM, H.; ILINCA, A.; PERRON, J. Energy storage systems -Characteristics and Comparisons. Wind Energy Research Laboratory (WERL), Université du Québec à Rimouski. Canada; 2008.

KROZER, Y.; Cost and benefit of renewable energy in the European Union, *Renewable Energy*, v 50, fevereiro, 2013, p 68-73.

LINDEN S. V. D., Bulk energy storage potential in the USA, current developments and future prospects, *Energy*, v 31, dezembro, 2006, p 3446-3457.

NOURAI, A., Large-scale electricity storage technologies for energy management. Power Engineering Society Summer Meeting. IEEE, 2002.

MARCINAUSKAS L.; KAVALIAUSKAS, Ž.; VALINČIUS, V.; Carbon and Nickel Oxide/Carbon Composites as Electrodes for Supercapacitors, *Journal of Materials Science & Technology*, v 28, outubro, 2012, p 931-936.

MCMANUS, M.C.; Environmental consequences of the use of batteries in low carbon systems: The impact of battery production. *Applied Energy* 93, 2012, p. 288–295.

MORENO, F.; MARTÍNEZ-VAL, J. M.; Collateral effects of renewable energies deployment in Spain: Impact on thermal power plants performance and management, *Energy Policy*, v 39, outubro, 2011, p 6561-6574.

MULTON, B, RUER, J.; Stocker l'électricité : Oui, c'est indispensable, et c'est possible ! pourquoi, où , comment? Publication ECRIN en contribution au de'bat national sur l'énergie; Abri 2003.

NOYAN, O. F. Some approach to possible atmospheric impacts of a hydrogen energy system in the light of the geological past and present-day. *International Journal of Hydrogen Energy*, v 36, 2011, p 1216-1228.

OKUI, A.; HASE, S.; SHIGEEDA, H.; KONISHI, T.; YOSHI, T., "Application of energy storage system for railway transportation in Japan," *International Power Electronics Conference (IPEC)*, junho , 2010, p 3117,3123.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F.R.; ABREU, S.L.D. E.; RUTHER, R.; Atlas Brasileiro de Energia Solar. São José dos Campos: INPE, (2006). p 60.

RUDELL, A.; Storage and Fuel Cells. EPSRC SuperGen Workshop: Future Technologies for a Sustainable Electricity System. University of Cambridge; 2003.

TROMP T. K.; SHIA R. L.; ALLEN M.; EILER J. M.; YUNG Y. L.; Potential environmental impact of a hydrogen economy on the stratosphere. *Science* 2003; 300:1740-2.

YOKOYAMA, R.; HIDA, Y.; KOYANAGI, K.; IBA, K., "The role of battery systems and expandable distribution networks for smarter grid," *Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE* , v 1, julho, 2011, p 24-29.

YONGBIAO Y.; XIAOHUI, X.; CHANGGUO Z.; XIAOHUA, D.;"Analysis of the key technology of smart distribution park," *Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), 2012 IEEE* , v1, maio, 2012, p 21-24.

ZANGENEH, A.; JADID, S.; RAHIMI-KIAN, A.; Promotion strategy of clean technologies in distributed generation expansion planning, *Renewable Energy*, v 34, dezembro, 2009, p 2765-2773.

ONOUE, K., MURAKAMI, Y., SOFRONIS, P., Japan's energy supply: Mid-to-long-term scenario – A proposal for a new energy supply system in the aftermath of the March 11 earthquake, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 37, pg 8123-8132 Maio, 2012.

3. Critérios de Pré-Seleção de Locais para Inserção da Geração Distribuída Fotovoltaica e Armazenamento de Energia no Sistema de Distribuição de Energia Elétrica

3.1 Introdução

Atualmente, os sistemas elétricos de potência, em geral, são constituídos por grandes sistemas centralizados, com longas linhas de transmissão em alta tensão e centros de distribuição de energia elétrica. Dentre as características usuais destes sistemas de potência citam-se como vantagens uma rede de alta capacidade e uma maior facilidade de planejamento, e como desvantagens a dificuldade no suprimento de cargas variáveis e fragilidade na propagação de faltas de energia (Passey, et al., 2011).

A utilização crescente da geração distribuída (GD) e de micro-redes tem mudado a concepção tradicional dos sistemas elétricos de potência. Dentre as principais vantagens dessas tecnologias citam-se: o fornecimento de energia para carga localizada, menor custo de investimento em linhas de transmissão, menores custos de operação e perdas nas linhas, diminuição da geração centralizada e da capacidade da rede, melhoria do fator de carga, possibilidade de planejamento do atendimento do crescimento da demanda de forma modularizada, diminuindo investimentos e aumento da confiabilidade, bem como possibilidades de redução da poluição ambiental (Zhang et al., 2008).

A decisão da localização ótima da geração de energia elétrica distribuída com ou sem armazenamento de energia é complexa, pois envolve análises multivariadas. Além do mais, algumas concessionárias de energia elétrica possuem dimensões bastante elevadas, como por exemplo, a CEMIG, que é a maior empresa no segmento de distribuição de energia elétrica do Brasil, com cerca de 10,8 milhões de consumidores em 805 municípios dos estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro, atendendo aproximadamente 30 milhões de habitantes. O sistema de distribuição de energia elétrica da CEMIG tem 104.482 km de comprimento das linhas de distribuição urbana e 362.197 km de linhas de distribuição rural e uma capacidade instalada de 6.896 MW (ano base 2012), (CEMIG, 2013).

Dentre as ferramentas utilizadas nas análises de sistemas elétricos destacam-se as técnicas de modelagem matemática e simulação computacional dos sistemas elétricos de potência. Estas técnicas têm o intuito de investigar resultados a partir de um modelo matemático, que represente um fenômeno ou um comportamento físico para reduzir riscos na tomada de decisão, identificar problemas antes de suas ocorrências, e de excluir processos que não auxiliam nas análises quantitativas. Além do mais, a modelagem matemática e simulação computacional permitem que seja investigada a viabilidade técnica e econômica de um projeto antes de sua execução (Carleto, 2006).

Em grandes sistemas de distribuição de energia elétrica, como é o caso da CEMIG, é de grande valia a utilização de mecanismos que sintetizem e facilitem análises do sistema de distribuição de energia elétrica para o seu melhor planejamento. E uma das maneiras possíveis, é por meio da classificação. É importante ressaltar que a injeção da potência de fontes energéticas descentralizadas em lugares inapropriados, sem o controle de tensão, pode resultar em um aumento nas perdas elétricas no sistema e em indesejáveis níveis de tensão, fora dos limites aceitáveis. Portanto, é necessário reconhecer que a correta localização das fontes de GD é importante

para o desenvolvimento e planejamento das redes de distribuição (BARIN et al., 2012).

O efeito fotovoltaico é uma das possíveis formas de conversão da energia solar em energia elétrica que ocorre em dispositivos conhecidos como células fotovoltaicas.

A conversão de energia solar que ocorre em células fotovoltaicas se dá em dois estágios essenciais. Primeiro, a absorção da luz (fótons) gera um par lacuna-elétron, ocorrendo á quebra da coesão entre os elétrons da camada de valência. Então o elétron e a lacuna são separados pela estrutura do equipamento, elétrons no terminal negativo e lacunas no terminal positivo, dessa forma gerando uma diferença de potencial, portanto, energia elétrica (Markvart e Castañer, 2003).

As células fotovoltaicas quando agrupadas em placas dão origem ao gerador fotovoltaico, ou módulo fotovoltaico, utilizado em sistemas fotovoltaicos (Toledo, 2013).

A produção mundial da indústria de geração fotovoltaica teve uma produção anual em torno de 35 GW em 2011, gerando recursos da ordem de U\$ 60.000 milhões neste ano.

O crescimento da produção foi superior a 35% em relação a 2010, segundo a Photon International. Destaca-se o crescimento superior a 100% em 2010 em relação a 2009, segundo todas as fontes. A China é o maior produtor mundial, com mais de 50% da produção de células solares disponíveis no mercado. Destaca-se que mais de 75% da produção mundial da geração fotovoltaica está concentrada na Ásia. A Figura 3.1 apresenta a evolução histórica da produção fotovoltaica no período 1993-2011(Kazmerski, 2012).



Figura 3.1 - Evolução histórica da produção fotovoltaica mundial no período 1993-2011 (Kazmerski, 2012)

No entanto, para que a tecnologia fotovoltaica se torne competitiva com as opções energéticas convencionais, ainda é necessário um esforço científico e tecnológico significativo, para reduzir os custos de produção. Bem como o desenvolvimento de marco regulatório que permita uma maior penetração das tecnologias de GD no mercado.

Este estudo teve como motivação o desenvolvimento de critérios que sintetizem e facilitem a análise global do sistema, auxiliando na tomada de decisão da localização da GD com ou sem armazenamento de energia.

3.2 Objetivo Geral

Propor critérios de pré-seleção de locais para inserção da geração distribuída fotovoltaica e armazenamento de energia do ponto de vista de concessionária de distribuição de energia elétrica.

3.2.1 Objetivos Específicos

Investigar possíveis critérios de pré-seleção de locais para inserção da geração distribuída fotovoltaica e do armazenamento de energia.

Classificar os critérios de pré-seleção de locais para inserção da geração distribuída fotovoltaica e armazenamento de energia quanto à seletividade.

3.3 Material e Métodos

Este trabalho foi realizado no Laboratório de Energia do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa em Viçosa - MG. Foram pesquisadas as principais características que possivelmente influenciam na localização da GD com ou sem armazenamento, e definido os possíveis critérios de pré-seleção, a fim de facilitar a análise de localização da GD com armazenamento de energia em grandes sistemas de fornecimento de energia.

3.3.1 Investigação de critérios

A investigação de possíveis critérios de pré-seleção de locais para inserção da geração distribuída fotovoltaica e do armazenamento de energia iniciou pelo estudo das características de um sistema de distribuição de energia quanto a:

- (i) Rede de distribuição;
- (ii) Localização;
- (iii) Instalação;
- (iv) Custo de conexão; e
- (v) Prioridade da carga.

3.3.2 Classificação dos critérios

Foi feita a classificação dos critérios de pré-seleção de locais para inserção da geração distribuída fotovoltaica e armazenamento de energia quanto à seletividade, visando facilitar o planejamento elétrico. Foram classificados todos os aspectos considerados no item anterior.

3.4 Resultados e Discussão

Com os possíveis critérios de pré-seleção definidos, foi analisada qualitativamente e quantitativamente a aplicação desses critérios, e os resultados estão descritos a seguir.

3.4.1 Investigação de critérios

Foram investigados diferentes critérios de pré-seleção e os principais fatores que justificam a sua adoção, conforme demonstrado a seguir.

Rede de distribuição

Um dos aspectos investigado como possível critério de pré-seleção de locais para inserção de GD e armazenamento de energia foi caracterização da rede de distribuição quanto ao:

- (i) Tipo de rede: convencional, compacta e subterrânea;
- (ii) Sistema de alimentação: monofásico ou trifásico; e
- (iii) Tipo de alimentador: rural ou urbano.

VELASCO et al, 2006, analisaram os custos de implantação e manutenção das redes de fornecimento de energia elétrica convencional,

compacta e subterrânea. Concluíram que os custos de manutenção e instalação da rede apresentam valores distintos dependendo do tipo de rede a ser instalado.

A definição quanto à exigência alimentação monofásica ou trifásica pode ser exigida por questões técnicas ou estratégicas, assim com a exigência do alimentador rural ou urbano.

Assim, denota-se que o tipo de linha não é um fator que impossibilita a recepção de uma possível alocação de GD, porém devido à diferença de custo observada, questões técnicas e prioridade de alimentadores rurais ou urbanos, é conveniente, se possível, quantificar como mais atraente um determinado tipo de rede de distribuição.

Localização

A localização da GD e do armazenamento de energia foi considerada quanto a:

- (i) Disponibilidade de local;
- (ii) Custo da utilização do local;
- (iii) Disponibilidade da radiação solar; e
- (iv) Radiação média da região.

Os equipamentos utilizados na geração distribuída com ou sem armazenamento necessitam de um local adequado para sua instalação, esse pode ter um custo de utilização do espaço, caso seja alugado, ou não havendo esse custo, o espaço seja de propriedade do agente gerador ou um espaço cedido para essa finalidade.

Na locação de um espaço para a instalação da geração distribuída com ou sem armazenamento de energia, regiões densamente povoadas

apresentam, em geral, altos valores de concessão, devido à valorização do imóvel ocorrida pela exploração econômica, deixando-os pouco atraente para utilizar o sistema proposto.

Na Figura 3.2 se mostra o custo médio de terreno para a região metropolitana de Belo Horizonte – MG, que foi utilizado como base para regiões urbanas de todo o estado de Minas Gerais.

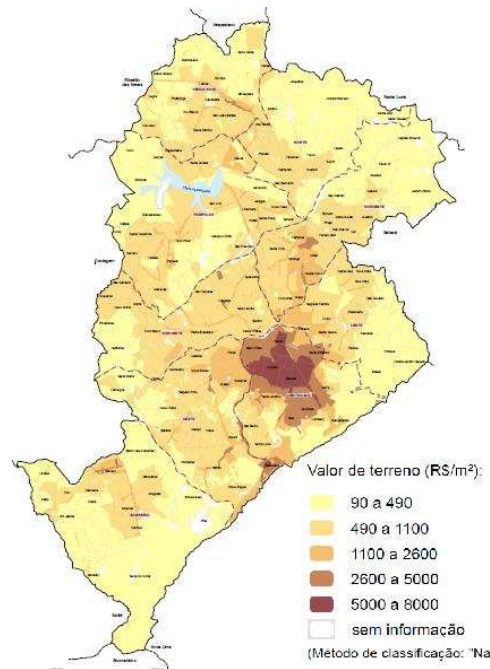


Figura 3.2 – Valor médio de terreno na Região Metropolitana de Belo Horizonte - MG

Se a GD for advinda da energia solar, a disponibilidade de radiação é um fator primordial para sua utilização, pois a existência de objetos próximos ao sistema de geração poderá provocar um sombreamento no mesmo. Assim será necessário averiguar a possibilidade de sombreamento no local da instalação do sistema.

Outro fator importante para a melhor absorção de energia solar pelos módulos fotovoltaicos a se analisar, seria a radiação solar média na região onde se pretende instalar a GD, que está disponível no documento Atlas Solarimétrico de Minas Gerais. Em seguida está ilustrada na Figura 3.3 a

radiação solar direta normal diária média anual para Minas Gerais (Minas Gerais, 2013).

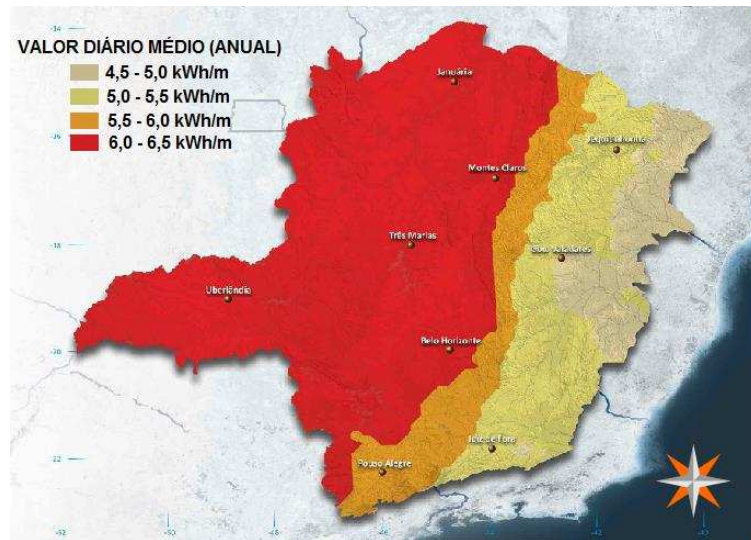


Figura 3.3- Radiação solar direta normal diária média anual para Minas Gerais.

Fonte Minas Gerais, 2013.

Com o exposto acima, pode-se perceber a importância da localização da GD com ou sem armazenamento de energia, nos custos e no funcionamento do sistema.

Instalação

Também foram considerados aspectos da instalação elétrica como:

- (i) Idade e estado de conservação das instalações que receberão a GD e o armazenamento de energia; e
- (ii) Existência de equipamentos de controle e automação que facilitem a instalação da GD com e sem armazenamento de energia.

De maneira geral, todos os equipamentos são aperfeiçoados com o desenvolvimento de novas tecnologias. Assim, os equipamentos encontrados no sistema elétrico de potência também são cada vez mais dotados de

sistemas de proteção e controle, que poderão ser um fator interessante a ser analisado. Além do mais, a GD e o armazenamento de energia necessitam de maiores cuidados com relação aos critérios de controle e proteção para poder injetar energia no sistema sem causar maiores problemas.

Nota-se, em geral, que as instalações mais recentes necessitam em menor frequência de manutenção, assim permanecem menos tempo desligadas para tal. Portanto, para um maior aproveitamento da GD seria interessante a instalação em unidades mais recentes, assim, evitando o não aproveitamento da GD e do armazenamento de energia, no período que a unidade estiver desligada para manutenção.

A utilização de sistema de controle e proteção exigido na GD, com ou sem armazenamento de energia elétrica previamente instalada em um determinado local, pode se tornar um fator interessante, pelo fato da não necessidade de adquirir esse equipamento.

Assim, as caracterizações da instalação elétrica quanto à sua idade e equipamentos já instalados poderão representar um fator importante no critério de pré-seleção de locais para instalação GD com ou sem armazenamento de energia.

Custo de conexão

Para a instalação da GD com armazenamento de energia são necessários equipamentos específicos que permitam a conexão dessa tecnologia à rede de distribuição de energia elétrica daquele local. Os custos dos equipamentos e suas respectivas conexões são descritos a seguir:

- (i) Necessidade de equipamentos de controle e automação, em função do nível de tensão;
- (ii) Custos de manutenção e instalação; e

- (iii) Fatores que afetam a análise econômica como local, custos da energia para carga das baterias; custos de operação; custos de oportunidade, entre outros.

Atualmente, para se conectar a uma distribuidora de energia elétrica são realizadas algumas análises a fim de resguardar o pleno funcionamento do sistema e apresentar a melhor opção para o acessante. Dentre as análises realizadas, encontra-se a aplicação do critério de menor custo global, onde é feito um levantamento dos locais aptos e seus respectivos custos para se conectar à distribuidora. Os critérios que norteiam o cálculo do critério de menor custo global são: (ANEEL, 2013)

- a) demanda (pesada, média e leve) por subestação;
- b) custo dos investimentos;
- c) custo de operação e manutenção;
- d) custo das perdas;
- e) custo ambiental;
- f) valor residual dos equipamentos e instalações.

Em se tratando da geração distribuída solar, em muitos casos, o seu custo de investimento é considerado, devido principalmente pelo alto custo dos painéis fotovoltaicos. No entanto, é possível notar alterações nos custos de investimento dessa fonte de energia.

O gráfico disponibilizado da Figura 3.4 mostra a evolução dos custos dos módulos fotovoltaicos no Brasil, desde 2001. Nele se observa a tendência de queda no preço, que de acordo com a interpolação linear é de cerca de 1,70 R\$/Wp ao ano. Contudo, ressalta-se que valores menores podem ser encontrados, e o menor valor constante nos dados disponíveis é inferior, atingindo 4,9 R\$/Wp, para aquisição de grandes quantidades (Galdino, 2012).

O sistema de armazenamento, instalado próximo de alguma carga de vital importância, poderá ser utilizado como energia de emergência para esses locais, evitando gastos com geradores, que em sua maioria tem como combustível o diesel. Contudo, são necessárias maiores investigações para que o sistema de armazenamento possa funcionar como sistema de energia de emergência de uma dada carga prioritária.

3.4.2 Classificação dos critérios

Após a descrição da influência de cada critério de pré-seleção, foi realizada uma análise quantitativa a fim de demonstrar a representatividade de cada critérios e os resultados estão expostos a seguir.

Rede de distribuição de energia elétrica

A rede de fornecimento de energia elétrica de média tensão (13,8kV, 23,1kV e 34,5kV) é constituída de 75 % de rede de distribuição aérea (RDA), 24% rede de distribuição protegida (RDP) e 1% de rede isolada aérea e subterrânea (RI). Enquanto na baixa tensão é constituída por 52 % RI e 48% de RDA, segundo dados fornecidos pela própria concessionária de energia.

Com relação aos consumidores atendidos pela CEMIG, 90,42% de consumidores são considerados urbanos e 8,60% são considerados rurais,

Quadro 3.1 – Número de consumidores por ramo da concessionária CEMIG

Empresa	Número de consumidores					
	Residencial	Industrial	Comercial	Rural	Outras	Total
CEMIG	5.148.517	72.387	556.893	549.736	62.135	6.389.668
	Número de consumidores em porcentagem					
	80,58%	1,13%	8,72%	8,60%	0,97%	100,00%
	Urbano			Rural	Outras	Total
	90,42%			8,60%	0,97%	10,00%

Fonte: Adaptado de Notas de revisão tarifária da Aneel

Tendo como referência os números de transformadores da CEMIG, estima-se que 79,99% dos clientes são atendidos com alimentação monofásica, enquanto 20,01% são atendidos com alimentação trifásica.

Com estas informações podem-se caracterizar as redes de distribuição direcionando a análise da localização ótima da GD com ou sem armazenamento, evitando a análise de locais impróprios ou favorecendo locais mais indicados pelo critério de pré-seleção.

Localização

Analisando a figura 3.2, estima-se que 49,02% da região metropolitana de Belo Horizonte tenha o valor do terreno, em R\$/m², entre 90 a 490; 40,83% entre 490 a 1100; 5,20% entre 1100 a 2600; 3,07% entre 2600 a 5000 e 1,21% entre 5000 a 8000, valores em R\$/m².

Observando a figura 3.3, nota-se que as regiões centrais e oeste têm as maiores médias de radiação solar direta incidente. Sendo, aproximadamente, 8,95% do território mineiro com médias entre 4,5, e 5,0, 18,76% entre 5,0 e 5,5, 12,03% entre 5,5 e 6 e 60,25% entre 6,0 e 6,6 kWh/m².

Contudo, haverá necessidade de estudos complementares para identificar locais que, por algum motivo esteja indisponível, ou a existência de algum objeto (ex. construções e árvores) que acarretem no sombreamento nos módulos fotovoltaicos, que é um fato indesejado.

Com a quantificação descrita acima se pode evitar a análise de determinado local ou evidenciar melhores locais, para a utilização da metodologia de localização ótima da GD com ou sem armazenamento.

Instalação

Em consulta ao sistema de informação da CEMIG, estima-se que as idades médias dos principais componentes do sistema de fornecimento de energia elétrica são:

- transformadores de distribuição: 20 anos
- Reguladores de tensão: 20 anos
- Seccionalizadores: 15 anos
- Religadores: 15 anos
- Chaves fusíveis :12 anos
- Chaves facas : 18 anos

Porém não são encontradas na base de dados pesquisados da CEMIG informações sobre a idade de cada um desses dispositivos utilizados. Sendo assim, há necessidade de maiores informações sobre esses equipamentos para que esse critério de pré-seleção, seja utilizado. Uma alternativa, para auxiliar na estimativa da idade desses equipamentos seria verificar o histórico de manutenção.

A importância desse critério está relacionada com a provável correlação entre a idade e a tecnologia de equipamentos elétricos.

Custo de conexão

A análise do custo de conexão é totalmente dependente das características técnicas da geração distribuída e do armazenamento de energia. O cálculo do custo global depende da distância do ponto de conexão e os equipamentos de controle, do percurso dos cabos de energia, entre outros fatores.

Outro fator que influencia nos custos de investimentos são os valores dos módulos fotovoltaicos, os quais apresentam decréscimo no seu valor ao longo

dos anos, como demonstrado anteriormente, além do fator de escala, que altera em grandes proporções o custo unitário.

Com isso, será necessário determinar, mesmo que de forma estimada, esses custos para efetivar a utilização desse critério de pré-seleção.

Prioridade da carga

Utilizando como referência a região metropolitana de Belo Horizonte – MG com área total de 330,95 km², foi realizada uma pesquisa sobre os locais prioritários, e estimou-se como sendo 30 para essa região. Considerando como área útil para inserção da GD nesses locais de 1km², essas áreas somadas representam cerca de 11 % da área total da região.

Assim, sendo uma prioridade estratégica a instalação da GD com armazenamento próximo a um local prioritário, pode-se restringir de forma significativa o âmbito de análise.

Após descrever detalhadamente os critérios de pré-seleção, foi realizada uma análise qualitativa da seletividade de cada critério, juntamente com o resumo de sua caracterização e a sua motivação, Quadro 3.2. Para essa análise, foram considerados como alta seletividade os critérios mais relevantes, onde, provavelmente, sua condição poderá inviabilizar ou favorecer a instalação da GD com ou sem armazenamento de energia. Os critérios classificados com baixa seletividade dificilmente irão impossibilitar a instalação do sistema proposto, porém poderão ser um fator incentivador ou não de cada local. A classificação média foi atribuída aos critérios que necessitam de maior atenção, podendo incentivar ou desestimular a instalação do sistema nesses locais.

Quadro 3.2 - Seletividade, caracterização e motivação dos critérios de pré-seleção

Critério de pré-seleção	Caracterização do critério	Motivação	Seletividade de
Rede de Distribuição de Energia Elétrica	Subterrânea, aérea e compacta	O custo de conexão e de manutenção varia de acordo com tipo de linha	Baixa
Localização	Áreas densamente povoadas e urbanas, sem radiação direta, sem acesso.	Existe a necessidade de alocação dos equipamentos de geração e de armazenamento de energia	Alta
Instalação	Antigas, novas, com determinados equipamentos.	Locais onde o sistema de distribuição apresenta grande percentual de falta de energia elétrica, ou utiliza equipamentos mais antigos, não são aconselháveis para instalação da GD com ou sem armazenamento.	Mediana
Custo de Conexão	Custo calculado para se conectar à distribuidora de energia elétrica	É realizada a análise do custo global, para diminuir ao máximo o valor do investimento ao se conectar à distribuidora de energia elétrica.	Baixa
Prioridade da carga	Aumentar a confiabilidade do sistema que atende locais de extrema importância, podendo até servir de energia de <i>Backup</i> .	Existem cargas que a interrupção do fornecimento de energia elétrica implica em grandes prejuízos para a sociedade, tais como, hospitais, centros de controle e outros.	Mediana

A fim de fornecer algum balizamento quantitativo para auxiliar a abrangência de cada critério de pré-seleção, foi realizada pesquisa tendo como base o sistema de fornecimento de energia elétrica da CEMIG, e os resultados estão descritos detalhadamente no item 4.3.2 e a apresentação de forma resumida dessa descrição está no QUADRO 3.3.

Quadro 3.3 - Descrição quantitativa dos critérios de pré-seleção

Critério de pré-seleção	Descrição quantitativa
Rede de Distribuição de Energia Elétrica	<p>Com relação aos consumidores atendidos pela CEMIG, 90,42% de consumidores da CEMIG são considerados urbanos e 8,60% são considerados rurais.</p> <p>A rede de fornecimento de energia elétrica de média tensão (13,8kV, 23,1kV e 34,5kV) é constituída de 75 % de rede de distribuição aérea (RDA), 24% rede de distribuição protegida (RDP) e 1% de rede isolada aérea e subterrânea (RI). Enquanto na baixa tensão é constituída por 52 % RI e 48% de RDA, segundo dados fornecidos pela própria concessionária de energia</p>
Localização	<p>Estima-se 49,02% da região metropolitana de belo horizonte tem o valor do terreno entre 90 a 490, 40,83% tem entre 490 a 1100, 5,20% tem entre 1100 a 2600, 3,07% tem entre 2600 a 5000 e 1,21% tem entre 5000 a 8000 a 1100, valores em R\$/m².</p> <p>Nota-se que as regiões centrais e oeste têm as maiores médias de radiação solar direta incidente. Sendo, aproximadamente, 8,95% do território mineiro com médias entre 4,5, e 5,0, 18,76% entre 5,0 e 5,5, 12,03% entre 5,5 e 6 e 60,25% entre 6,0 e 6,6 kWh/m².</p>

Instalação	<p>Verificar se a idade dos equipamentos, dar preferência para os equipamentos mais novos e verificar a estado de conservação dos mesmos. Para efeito de comparação as idades médias dos equipamentos são:</p> <ul style="list-style-type: none"> - transformadores de distribuição: 20 anos - Reguladores de tensão: 20 anos - Seccionalizadores: 15 anos - Religadores: 15 anos - chaves fusíveis :12 anos - chaves facas : 18 anos
Custo de Conexão	<p>Verificar os locais que apresentam menor custo de conexão e menor custo e operação e manutenção.</p>
Prioridade da carga	<p>Considerando que uma cidade contém no máximo 30 locais considerados prioritários, tais como: hospitais, aeroportos centros de controle. Considerando como área 1km². Estimasse que essas áreas somadas representem em torno de 11% da área total.</p>

No intuito de auxiliar na aplicação de metodologia de localização da inserção da GD com ou sem armazenamento de energia, foram desenvolvidos os critérios de pré-seleção visando diminuir o horizonte de análise da aplicação da metodologia.

Os critérios de pré-seleção foram escolhidos com base nas principais características dos sistemas de fornecimento de energia mais utilizados pelas concessionárias.

No entanto, poderão e deverão ser incluídos critérios de pré-seleção relevantes para um determinado sistema de distribuição peculiar, bem como poderão ser excluídos alguns critérios de pré-seleção aqui citados.

A maioria dos critérios de pré-seleção possibilita fazer a análise quantitativa, porém alguns necessitam de informações que não foram possíveis de serem levantadas, como por exemplo, a idade dos equipamentos. Outro exemplo é a determinação de características específicas como o sombreamento, que necessita averiguar a presença de algum objeto obstruindo o acesso à radiação solar.

3.5 Conclusão

É importante a definição de pré-critérios para a localização da geração distribuída tendo em vista a complexidade e o tamanho do sistema elétrico de potência ao nível de distribuição de energia elétrica. O uso de pré-critérios agiliza a determinação da localização da GD. Esses pré-critérios devem ser sempre questionados visando um aperfeiçoamento da metodologia de definição a localização da GD.

As análises desse trabalho foram realizadas com base nos sistemas da concessionária de energia CEMIG, que é uma das instituições parceiras no projeto P&D 308, o qual financiou essa pesquisa. No entanto, acredita-se que os trabalhos aqui realizados podem ser extrapolados para todas as demais concessionárias de energia.

3.6 Referências Bibliográficas

ANEEL, 2013. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Acessado em maio, 2013 no site: <http://www.aneel.gov.br/>.

BARIN, A.; CANHA, L.N.; ABAIDE, A.R.; MACHADO, R.Q., Methodology for placement of Dispersed Generation Systems by analyzing its Impacts in Distribution Networks, Latin America Transactions, IEEE - Revista IEEE America Latina ,vol.10, no.2, p.1544,1549, março, 2012.

CARLETO, N., A Importância Da Simulação Computacional Em Projetos de Sistemas na Área de Engenharia Elétrica, 2º Congresso Brasileiro de Sistemas, Ribeirão Preto – SP, 2006.

CEMIG, Centrais Energéticas de Minas Gerais, www.cemig.com.br, data da consulta 02/05/2013

GALDINO, M. A., ANÁLISE DE CUSTOS HISTÓRICOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS NO BRASIL , IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferencia Latino-Americana da ISES – São Paulo, setembro , 2012.

KAZMERSKI, L. L.; Comunicação in: 38th IEEE Photovoltaic Specialist Conference; Austin, U.S.A.; 2012.

MARKVART, T. CASTAÑER, L., IIA-1 - Principles of Solar Cell Operation, In: Tom Markvart and Luis Castañer, Editor(s), Practical Handbook of Photovoltaics, Elsevier Science, Amsterdam, p. 71-93, 2003.

Minas Gerais, Atlas Solarimétrico de Minas Gerais, acessado em 01 de abril de 2013, disponível em <https://www.matrizlimpa.com.br/index.php/2013/02/atlas-solarimetrico-de-minas-gerais/4450>

PASSEY, R. SPOONER, T. MACGILL, I. WATT, M. SYNGELLAKIS, K. The potential impacts of grid-connected distributed generation and how to address them: A review of technical and non-technical factors, *Energy Policy*, Volume 39, p. 6280-6290, outubro, 2011.

TAN, W., HASSAN, M. Y. MAJID, M. S. RAHMAN, H. A., Optimal distributed renewable generation planning: A review of different approaches, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 18, p. 626-645, fevereiro, 2013.

TOLEDO, O. M.; OLIVEIRA FILHO, D.; DINIZ, A. S. A. C.; MARTINS, J; VALE, M. H. M., "Methodology for Evaluation of Grid-Tie Connection of Distributed Energy Resources—Case Study With Photovoltaic and Energy Storage," *Power Systems*, *IEEE Transactions on* , vol.28, no.2, pp.1132,1139, maio, 2013.

ZHANG, Y. MAO, M. DING, M. CHANG, L., Study of energy management system for distributed generation systems, *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, 2008. DRPT 2008. Third International Conference , p.2465,2469, Abril, 2008.

4. Metodologia e aplicação da Inserção de Geração Fotovoltaica Distribuída e Armazenamento de Energia

4.1 Introdução

Com a crescente demanda de energia mundial, como já mencionado em capítulos anteriores, muito se tem estudado sobre as consequências advindas desse aumento de geração de energia elétrica para acompanhar a demanda, tais como: questões técnicas, ambientais, planejamentos, novas formas de geração e aproveitamento energético.

A análise técnica da instalação da GD com ou sem armazenamento de energia é de extrema importância para evitar aumento nas perdas e níveis de tensões inaceitáveis (Barin et al., 2012 e Papaioannou et al. 2013).

A instalação de geradores distribuídos nos sistemas de distribuição de energia elétrica deve ser precedida de uma série de estudos técnicos visando determinar condições de operação, controle e proteção desses geradores de forma a minimizar eventuais impactos negativos nos sistemas de energia elétrica como um todo. Assim, importantes requisitos técnicos devem ser satisfeitos de modo a garantir a operação segura e confiável da rede elétrica em sua totalidade (Vieira Jr, 2011).

Existem diversos estudos sobre localização ótima da geração de energia elétrica distribuída, com diversas propostas, estratégias e abordagens, cada método com suas próprias características e objetivos.

Contudo, a sistematização do problema ainda está por se resolver. TAN et al., 2013, fizeram uma revisão sobre os principais métodos de localização da geração de energia renovável distribuída, entre eles citam-se: métodos analíticos, otimização pelo fluxo de potência, integração mista de programação não linear, diversos tipos de otimização utilizando técnicas de inteligência artificial, sistemas inteligentes híbridos entre outros. Cada um dos métodos pesquisados possui características peculiares, potencialidades e campo de aplicação, todos visando à promoção da geração de energia renovável distribuída integrada aos sistemas elétricos de potência.

A metodologia de inserção de geração distribuída e armazenamento de energia interligada ao sistema elétrico de potência desenvolvida por Toledo, 2013, foi tida como base dos estudos aqui desenvolvidos, sendo sugeridas algumas modificações, como a inclusão da análise dos critérios de pré-seleção.

Nesse intuito foi analisada a inserção da GD com armazenamento em alguns sistemas de distribuição de energia elétrica reais da concessionária CEMIG e os resultados obtidos estão apresentados a seguir.

4.2 Objetivo Geral

Analisar e aplicar a metodologia de inserção de geração fotovoltaica distribuída com armazenamento de energia, que auxilie no planejamento de sistema de distribuição de energia elétrica.

4.2.1 Objetivos específicos

- i. Avaliar critérios de inserção de geração fotovoltaica distribuída com armazenamento de energia, proposta por Toledo, 2013.
- ii. Aplicar a metodologia de inserção de geração fotovoltaica distribuída com armazenamento de energia em alguns sistemas elétricos selecionados.
- iii. Analisar a metodologia proposta perante diferentes cenários da geração de energia elétrica.

4.3 Material e Métodos

Para a realização do objetivo principal desse trabalho foi necessário avaliar e definir um método de localização da GD com armazenamento de energia, a ser utilizado. Foi utilizada para este fim, a metodologia proposta por Toledo, 2013.

Após a avaliação dessa metodologia, a mesma foi aplicada em alguns alimentadores do sistema de distribuição da concessionária de energia elétrica, CEMIG Distribuição.

E por fim, realizou-se uma análise de cenários, com foco nas tendências da GD baseadas em previsões futuras, planos energéticos do Brasil, Plano Decenal de Expansão de Energia 2021(PDEE 2021) e da literatura científica, (Hofman e Huisman, 2012, Liao et al, 2011; Costantiniet et al, 2007).

4.3.1 Avaliação de critérios

A metodologia, proposta por Toledo et al., 2013 se baseia no cálculo do Índice Geral (I_G) que determina a análise de desempenho do sistema e é

dividido em cinco itens, nos quais alguns são diretamente proporcionais, ou seja, o seu aumento representa benefícios para o sistema e outros são inversamente proporcionais, no qual a sua diminuição representa benefícios para o sistema.

Os itens que compõem o I_G foram classificados segundo três aspectos: econômicos, técnicos e ambientais. Os aspectos econômicos são os que afetam a capacidade de oferta de energia segura por parte da rede, representando assim o aumento da capacidade da rede, são eles: o índice de perdas na linha (I_{PL}) e o índice do fator de carga (I_{FC}). Os índices que contemplam os aspectos técnicos são aqueles em que as normas que regem o mercado de energia são atendidas, no caso: o índice do perfil de tensão (I_{PT}) e o índice de suprimento da carga (I_C). Estes índices têm sua implicação no aspecto econômico, apesar de não estarem classificados no mesmo. E, por último, o aspecto ambiental, traduzido pelo índice ambiental (I_{AMB}) que analisa essa importante questão por meio da quantificação da redução das emissões dos gases do efeito estufa.

Índice de perdas na linha (I_{PL})

O I_{PL} é um índice em que a resposta positiva do sistema representa redução, ou seja, a função objetivo deste índice requer a minimização das perdas na linha. Para a determinação deste índice, as seguintes equações (4.1 e 4.2) serão utilizadas (CHIRADEJA, 2004):

$$PL = \sum_{i=1}^n I_{L,1}^2 R_i d_i \quad (4.1)$$

Em que:

- PL – perdas na linha do sistema de distribuição/ transmissão (pu);
- $I_{L,i}$ – corrente do ramal i da linha de distribuição/ transmissão (pu);
- R_i – comprimento do ramal i (km);
- d_i – número total de ramais do sistema de distribuição/ transmissão (adimensional); e
- N – número total de barramentos no sistema de distribuição/ transmissão (adimensional).

$$I_{PL} = \frac{PL_{\text{caso}}}{PL_{\text{base}}} \quad (4.2)$$

Em que:

- PL_{caso} – Perdas na linha no caso estudado (pu); e
- PL_{base} – Perdas na linha – caso base (pu).

Índice do fator de carga (I_{FC})

Segundo definição da ANEEL (2010), o fator de carga é a razão entre a demanda média e a demanda máxima da unidade consumidora, ocorridas no mesmo intervalo de tempo especificado. Então, o fator de carga da energia demandada da rede do barramento i é a razão entre soma da energia suprida pela rede durante um período de tempo para o barramento em relação à máxima capacidade de atendimento da linha dentro do mesmo período, equação 4.3.

$$FC_i = \frac{\sum_{t=1}^n E_{R,i}(t)}{C} \quad (4.3)$$

Em que:

- FC_i – fator de carga do barramento i (adimensional);
- $F_{R,i}$ – energia média demandada da rede do barramento i (kWh);
- C – valor máximo da energia demandada da rede do barramento i (kWh)

O índice fator de carga da linha i é representado pela razão entre o fator de carga do sistema com a geração fotovoltaica e armazenamento de energia e o fator de carga do sistema do caso referência, equação 4.4.

$$I_{FC} = \frac{FC_{\text{caso}}}{FC_{\text{base}}} \quad (4.4)$$

Em que:

- PC_{caso} – fator de carga do barramento i no caso estudado (adimensional); e
- PC_{base} – fator de carga do barramento i no caso referência (adimensional).

Neste caso, o fator de carga do barramento i maior do que 1 significa uma melhoria do nível de atendimento de energia, em relação ao nível de atendimento de energia do caso base.

Índice de perfil de tensão (I_{PT})

A ANEEL (2010) utiliza um conjunto de normas, o PRODIST, para os procedimentos de distribuição. Segundo este órgão governamental, são normas que disciplinam o relacionamento entre as distribuidoras de energia elétrica e demais agentes (unidades consumidoras e centrais geradores) conectados aos sistemas de distribuição, que incluem redes e linhas em tensão inferior a 230 quilovolts (kV). Dentro do seu módulo 8 (Qualidade da Energia Elétrica) a norma preconiza, para pontos de conexão em Tensão Nominal superior a 1 kV

e inferior a 69 kV, a classificação tensão de atendimento em função da variação da tensão medida (TL) em relação à tensão de referência (TR) segundo os limites definidos por:

- (i) Adequada $0,93 TR \leq TL \leq 1,05 TR$;
- (ii) Precária $0,90 TR \leq TL < 0,93 TR$; e
- (iii) Crítica $TL < 0,90 TR$ ou $TL > 1,05TR$.

Para a composição do perfil de tensão dentro da metodologia proposta, considera-se o perfil de tensão de atendimento adequado, sendo seu valor máximo e mínimo, respectivamente, $0,93TR$ e $1,05TR$. A verificação do melhor perfil de tensão para dentro de cada caso depende da verificação destes níveis nos barramentos que possuam carga. Então, partindo-se do princípio proposto por Ochoa (2006) o cálculo inicialmente do perfil de tensão tem por objetivo mensurar o afastamento da tensão resultante do melhor perfil de tensão para o sistema, e está descrito na equação 4.5. O índice do perfil de tensão será então determinado como em função da razão entre o perfil de tensão do caso estudado e o perfil de tensão do caso base, descrito na equação 4.6.

$$PT = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[1 - \left(\frac{|V_{1,caso} - V_{1,0}|}{V_{1,0}} \right) \right] \quad (4.5)$$

Em que:

- $V_{i,caso}$ – Magnitude da tensão no barramento i para o caso estudado (pu);
- $V_{i,0}$ – Magnitude da tensão no barramento i – melhor perfil (pu); e
- n – Número total de barramentos no sistema de distribuição/transmissão (adimensional).

$$I_{PT} = \frac{PT_{caso}}{PT_{base}} \quad (4.6)$$

Em que:

- PT_{caso} – perfil de tensão no caso estudado (adimensional); e
- PT_{base} – perfil de tensão no caso base (adimensional).

Como este índice está vinculado ao menor afastamento do caso base, a resposta positiva do sistema será proporcional ao aumento do nível do perfil de tensão.

Índice de confiabilidade (I_c)

O índice de confiabilidade representa o quanto à carga está sendo atendida sem interrupções no fornecimento. Para a quantificação deste índice faz-se necessário determinar a perda de fornecimento de energia da carga para o período estudado ($LPS(t)$), descrito na equação 4.7.

$$LPS(t) = E_L(t) - E_R(t) - (E_{PV}(t) + E_B(t-1) - E_{Bmin}) \eta_{inv} \quad (4.7)$$

Em que:

- $LPS(t)$ – Perda de fornecimento de energia da carga para a hora t, (Wh);
- $E_L(t)$ – energia demandada pela carga durante a hora t (Wh);
- $E_R(t)$ – energia fornecida pela rede durante a hora t (Wh);
- $E_{PV}(t)$ – energia gerada pelos módulos fotovoltaicos durante a hora t (Wh);
- $E_B(t-1)$ – energia armazenada nas baterias durante a hora t-1 (Wh);
- η_{inv} – eficiência do inversor CC-CA, (decimal); e
- E_{Bmin} – nível mínimo de energia permitido nas baterias (Wh).

O nível de atendimento de energia à carga, para um considerado período de tempo t , é a razão entre a diferença entre a soma da energia demandada pela carga e todos os valores de $LPS(t)$ para aquele período e a soma da energia demandada pela carga, equação 4.8, ou seja:

$$SC = \frac{\sum_{t=1}^t E_L(t) - \sum_{t=1}^n LPS(t)}{\sum_{t=1}^n E_L(t)} \quad (4.8)$$

O índice de suprimento à carga é representado pela razão entre o nível de atendimento à carga com a geração fotovoltaica e armazenamento de energia e o nível de atendimento à carga do caso referência, equação (4.9):

$$I_C = \frac{SC_{\text{caso}}}{SC_{\text{base}}} \quad (4.9)$$

Em que:

SC_{caso} – nível de atendimento de energia no caso estudado (adimensional);
e

SC_{base} – nível de atendimento de energia no caso referência (adimensional).

Neste caso, o índice de atendimento à carga maior da unidade significa uma melhoria do nível de atendimento de energia no caso em relação ao nível de atendimento de energia do caso base.

Índice ambiental (I_{AMB})

O nível de emissões de gases do efeito estufa na geração de energia elétrica está, em sua maioria, associado à composição da matriz energética. Em países aonde a matriz se compõe, em sua maioria, de fontes não renováveis, o nível das emissões é mais intenso. No caso brasileiro, tem-se uma matriz energética favorável se comparada à média mundial. Os dados do

balanço energético nacional para a oferta interna de energia elétrica por fonte no ano de 2011 apresentam a utilização de fontes renováveis para geração de energia elétrica em um percentual acima de 80%, Figura 4.1 (EPE, 2012).

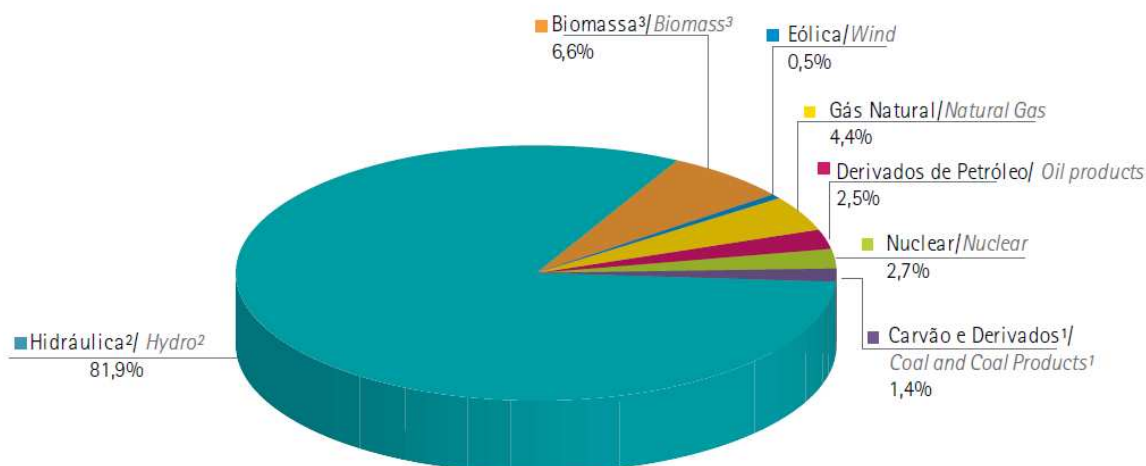


Figura 4.1- Oferta interna de energia elétrica por fonte – ano base 2011.

Fonte: (EPE, 2012)

Mas cabe destacar que, como resultado da utilização de energias renováveis, na geração de eletricidade, mesmo com um aumento de 0,6%, registrou-se uma queda de 33,5% nas emissões, em relação a 2008 (EPE, 2010). Em termos absolutos, isto significa que a substituição de uma fonte não renovável por outra renovável representa impacto maior na redução das emissões. Em 2011, a participação de renováveis na Matriz Elétrica Brasileira ampliou-se para 88,8% devido às condições hidrológicas favoráveis e ao aumento da geração eólica, possibilitando a diminuição de 7,9% na geração termelétrica em comparação com 2010 (EPE, 2012).

Para efeito de cálculo, foi considerada apenas a parcela de energia renovável inserida, em função, neste caso, da atuação da energia gerada ser no horário de pico que é, na maioria das vezes, atendido por fontes não renováveis, equação 4.10:

$$I_A = \left[1 - \frac{E_{PV}(t)}{E_R(t)} \right] \quad (4.10)$$

- E_{pv} – Potência fornecida pelo sistema de geração fotovoltaico (kW); e
- E_r – Potência fornecida pelas demais fontes geradoras de energia elétrica (kW).

O índice ambiental é representado pela razão entre o nível de emissões de gases do efeito estufa com a geração fotovoltaica e armazenamento de energia e o do caso referência, equação 4.11:

$$I_{AMB} = \frac{I_{A,caso}}{I_{A,base}} \quad (4.11)$$

Em que:

- $I_{A,caso}$ – nível de emissões de gases do efeito estufa no caso estudado (adimensional);
- $I_{A,base}$ – nível de emissões de gases do efeito estufa no caso referência (adimensional).

Neste caso, a inserção de energia gerada de fonte renovável representa uma redução nas emissões de gases de efeito estufa, daí a caracterização da resposta positiva do sistema como redução.

Índice Geral (I_G)

Para a determinação do Índice geral, foi utilizada a função objetivo, equação 4.12, onde alguns critérios são diretamente proporcionais ao

somatório dos índices em que a resposta positiva do sistema representa aumento e inversamente proporcional aos somatórios dos índices em que a resposta positiva do sistema representa redução.

$$I_G = w_1 I_{PT} + w_2 I_C + w_3 \frac{1}{I_{PL}} + w_4 I_{FC} + w_5 \frac{1}{I_{AMB}} \quad (4.12)$$

Em que:

- I_G – índice geral (adimensional);
- I_{PT} – Índice ambiental (adimensional);
- I_C – Índice de confiabilidade (adimensional);
- I_{PL} – Índice de perfil de tensão (adimensional);
- I_{FC} – Índice do fator de carga (adimensional); e
- I_{AMB} – Índice de perdas na linha (adimensional);

Os pesos atribuídos a cada índice variam segundo a seguinte equação 4.13, a qual define que o somatório dos pesos é igual à unidade.

$$1 = \sum_{i=1}^n W_i \quad (4.13)$$

- W_i – pesos atribuídos a cada índice; e
- n – número de índices utilizados.

4.3.2 Aplicação da metodologia de inserção de geração fotovoltaica distribuída

Foram selecionados alguns alimentadores no âmbito do sistema de fornecimento de energia elétrico da concessionária CEMIG Distribuição, para a aplicação da metodologia de inserção de geração fotovoltaica distribuída com armazenamento de energia. Em seguida, são descritas com maiores detalhes as análises realizadas.

4.3.3 Análise de cenários

Com o objetivo de identificar possíveis modificações no setor de energia, que de certa forma, influenciam na maior utilização da GD com ou sem armazenamento de energia, foram analisados diversos estudos realizados, em sua maioria por institutos de pesquisa, que descrevem através de séries históricas e análises político-econômica das tendências da área de energia para anos futuros.

Dentre os principais parâmetros que as tendências de avaliação de cenários energéticos futuros para o Brasil, que foram analisados citam-se:

- Percentual de participação da GD na matriz de oferta de energia elétrica;
- Custos da implantação da Geração Distribuída em relação aos custos atuais, para diferentes locais;
- Cenários político-econômicos de países;
- Incertezas do fornecimento e dos custos das fontes tradicionais de energia, especialmente os combustíveis fósseis, devido a instabilidades político-econômicas e de crises de abastecimento;
- Marco regulatório da utilização de GD, em países e regiões selecionados do mundo e no Brasil. Tipos de tarifas, políticas da implantação da GD e subsídios são alguns dos aspectos selecionados ao marco regulatório que foram avaliados; e
- Avaliação de externalidades relacionadas a aspectos que influenciam na decisão de implantação da GD.

4.4 Resultado e Discussão

São descritos nessa seção a avaliação e critérios para localização da geração distribuída com armazenamento de energia, aplicação da metodologia em alimentadores selecionados no estado de Minas Gerais, da distribuidora de energia elétrica da CEMIG Distribuição, e a avaliação de cenários futuros da geração distribuída.

4.4.1 Avaliação dos critérios

Ao analisar os cinco critérios existentes na metodologia de Toledo, 2013, percebe-se que eles contemplam os pontos cruciais na implementação de sistemas de distribuição de energia elétrica, ou seja, critérios técnicos, econômicos e ambientais.

No entanto, os critérios Perfil de Tensão e Perdas na Linha demandam um esforço computacional maior, isso por necessitar do cálculo do fluxo de potência para obtenção dos seus valores.

Os demais aspectos podem ser calculados por meio de programas de planejamento energético, como o *software Homer*.

A determinação do Índice Geral simplificado, índice geral sem o perfil de tensão e perdas na linha permite uma avaliação abrangente de aspectos para a localização da GD com e sem armazenamento de energia. Mas, havendo a disponibilidade do cálculo do fluxo de potencia deve-se usar o índice geral completo.

4.4.2 Aplicação da metodologia de inserção de geração fotovoltaica distribuída com armazenamento de energia

Foram selecionados alguns alimentadores no âmbito do sistema de fornecimento de energia elétrica da CEMIG, para a aplicação da metodologia de inserção de geração fotovoltaica distribuída com armazenamento de energia. Em seguida estão descritas com maiores detalhes as análises realizadas.

Análise completa da inserção da GD com armazenamento de energia no alimentador SLAD212 (Arena do Jacaré)

Como o objetivo de analisar o impacto da instalação da inserção da geração fotovoltaica distribuída e de armazenamento de energia no sistema de distribuição da concessionária CEMIG, que é um dos objetivos do projeto P&D D 308, foram realizadas simulações da inserção de um sistema no alimentador SLAD212 na cidade de Sete Lagoas MG da CEMIG D. Esse alimentador supre diversos consumidores, além do estádio de futebol Arena do Jacaré onde será implementado o sistema proposto pelo projeto.

Com dados de demanda de 15 em 15 minutos do alimentador SLAD212, foi calculado o perfil médio mensal da demanda para um ano, de julho de 2011 a junho 2012, (CEMIG D, 2013). Esses valores foram utilizados como dados de entrada para planejamento energético no software Homer, Figura 4.2.

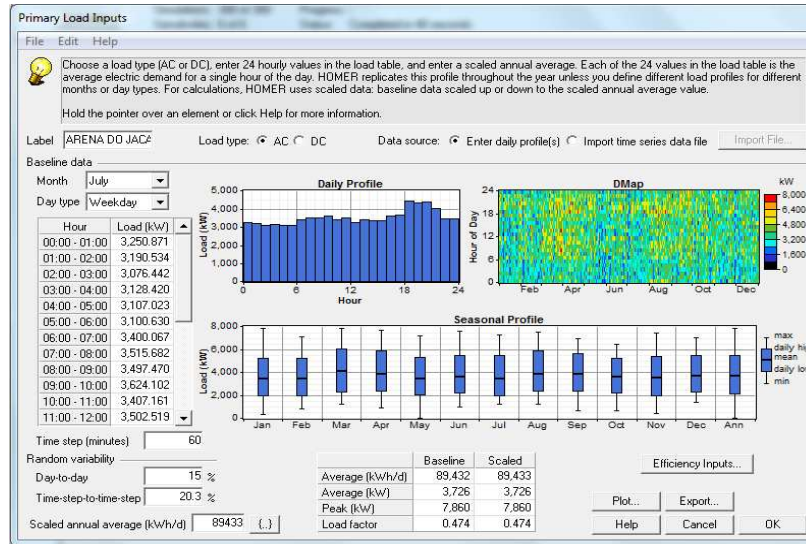


Figura 4.2 – Perfil de carga média mensal para o mês de julho do alimentador SLAD212 no software Homer.

A Figura 4.2 mostra dados do mês de julho do ano de 2012 analisados referentes a: (i) curva de carga para uma quarta feira típica; (ii) o consumo em kW de hora em hora do ano; (iii) o máximo e mínimo de consumo mensal; e (iv) as médias de consumo diário em kWh/d, a média anual em kW, o pico de consumo em kW e o fator de carga.

Para o cálculo do Índice Geral, é necessário além dos valores calculados pelo Homer, o cálculo do fluxo de potência para ser possível calcular com precisão os valores das perdas na linha e do perfil de tensão, porém o fluxo de potência é um calculo instantâneo assim demandando um grande esforço computacional para se obter os resultados.

Dentre as limitações desse trabalho citam-se: (i) acesso limitado ao banco de dados da CEMIG D; (ii) acesso limitado ao programa gerenciador e ao software de fluxo de potência. Seguindo orientação do gerente de desenvolvimento de sistemas da distribuidora de energia elétrica CEMIG, o engenheiro Álvaro, foi calculado o fluxo de potência para três principais momentos do dia, os quais representam com grande precisão os valores médios diário, como descritos a seguir:

O período de carga da bateria foi programado para se realizar entre 00:00 e 04:00 horas de cada dia;

O período de descarga da bateria foi programado para se realizar entre as 18:00 e 20:00 horas de cada dia.

A potência instalada de geradores fotovoltaicos foi de 2 vezes 440 kWp, com a geração média de 440kWp. Ou seja, foi considerado que a geração média foi igual a 50% dos valores nominais.

Assim decidiu-se analisar a inserção com a configuração do sistema no *software* de planejamento energético Homer, contemplando o conjunto gerador solar fotovoltaico de 880 kWp, o inversor de frequência de 880 kW, o banco de baterias composto de 6 blocos em paralelo, composto de 126 baterias OPZV 490 Ah em série cada um, sendo capaz de fornecer 440 kh.

A configuração utilizada possui: (i) barramento de corrente contínua, onde estão ligados os geradores solares fotovoltaicos, o banco de baterias; (ii) o barramento de corrente alternada onde estão ligadas a carga e a rede de distribuição, e (iii) a conexão dos dois barramentos feita por meio dos inversores, Figura 4.3.

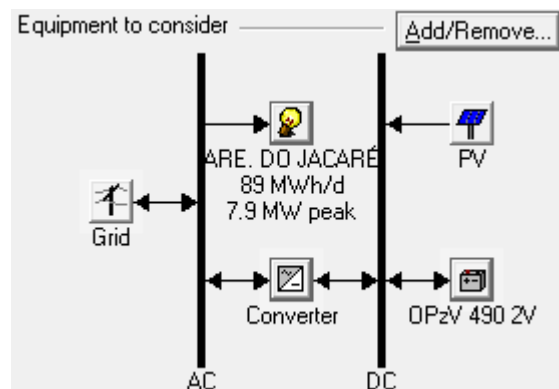


Figura 4.3 - Configuração do sistema.

Com os resultados do Homer foi possível fazer a análise dos índices: índice de confiabilidade, do índice fator de carga e do índice ambiental, como descrito a seguir.

Os índices do fator de carga diário foram calculados e o fator de carga médio obtido como resultado foi de 1,01315, Figura 4.4. Analisando o índice do fator de carga verifica-se uma melhora significativa do sistema com a inserção da geração fotovoltaica e do banco de baterias. A atuação do sistema de baterias foi para fornecer energia para à rede no horário de pico, sendo descarregadas até no máximo 40% de sua capacidade nesse período e carregadas no horário de menor consumo (nas primeiras horas do dia).

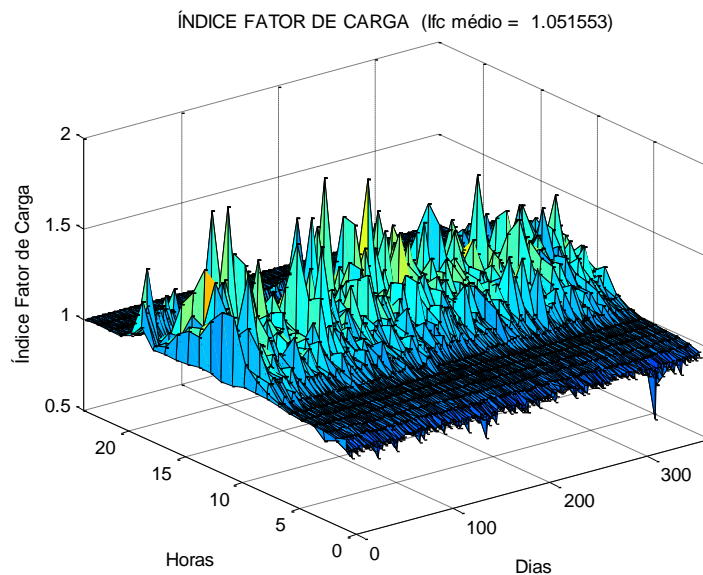


Figura 4.4 – Perfil do índice fator de carga horário para o ano 2011/2012.

Foi calculado o índice de confiabilidade e o valor médio encontrado foi de 1.000531, Figura 4,5. Como o valor médio desse índice foi acima de um, representa melhoria na confiabilidade do sistema proposto em relação ao sistema original.

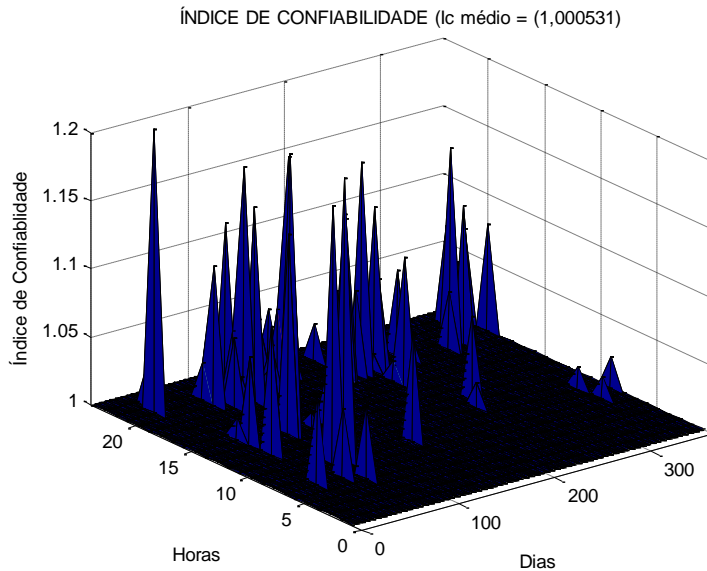


Figura 4.5 – Perfil do índice confiabilidade horário para o ano 2011/2012.

Como o sistema de armazenamento está programado para atuar em um horário definido, não se tinha grandes expectativas por melhorias na confiabilidade. Caso a melhora da confiabilidade seja um objetivo do operador do sistema de armazenamento, o controle do sistema de armazenamento poderia facilmente ser programado para atuar na falta de energia, ou seja, as baterias iriam suprir determinada carga quando não houver fornecimento de energia elétrica pela concessionária, assim ocasionando um grande impacto na confiabilidade. Isto para uma carga específica, pois o sistema de armazenamento não teria a condição de fornecer energia para todo o alimentador.

A utilização da geração de energia elétrica fotovoltaica contribui para a diminuição da emissão de gases geradores de efeito estufa. O valor médio do índice ambiental foi de 0,97570, Figura 4.6. Como este é um índice de redução, este valor significa melhora em relação à situação sem o sistema proposto.

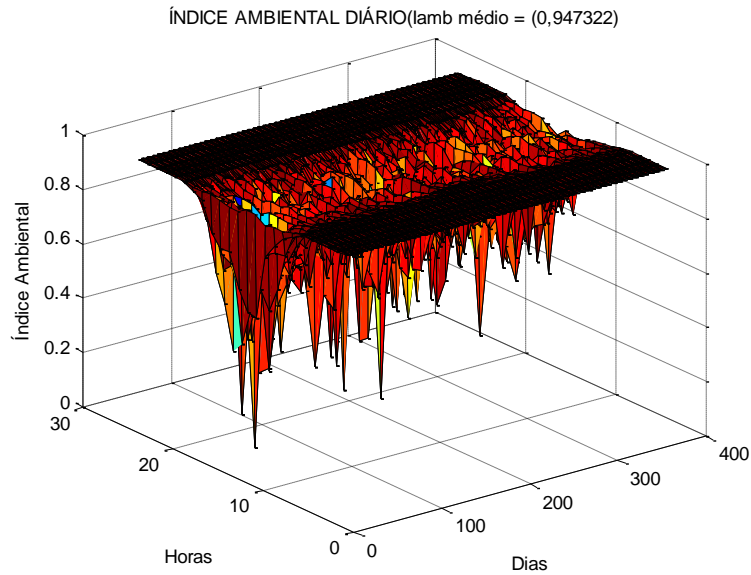


Figura 4.6 – Perfil índice ambiental horário para o ano 2011/2012.

Em seguida foi selecionado um ponto próximo ao estádio Arena do Jacaré, Figura 4.7, e nesse ponto foi inserida a geração distribuída e simulado o sistema de armazenamento de energia.



Figura 4.7 – Localização do ponto de conexão de inserção da GD com armazenamento de energia.

Após a configuração adequada do sistema foi calculado o fluxo de potência para alguns determinados pontos do dia da semana típica os quais representam com grande precisão os valores diários, obtendo como resultado as perdas na linha e o perfil de tensão.

Com os cálculos acima descritos, e utilizando as equações 4.5 e 4.2 obtém-se como resultados os respectivos índices, $I_{PT} = 1,0005170$ e o $I_{PL} = 0,953567$.

A fim de priorizar alguns índices para a formulação do índice geral, a metodologia utiliza os pesos com esse intuito. Nota-se que esses pesos podem e devem ser modificados para atender aos critérios que o utilizador da metodologia pretende obter maiores benefícios, apenas respeitando que o requisito do somatório dos pesos tem que ser igual a um.

Para a simulação completa da inserção da GD com armazenamento, foi utilizados 5 conjuntos de pesos, Quadro 4.1.

Quadro 4.1- Pesos utilizados no índice geral, para a simulação completa

Pesos(W)	Aspectos Técnicos		Aspectos Econômicos		Aspecto Ambiental	$\sum W$
	I_{PT}	I_C	I_{PL}	I_{FC}	I_{AMB}	
	(1)	0,275	0,275	0,200	0,200	
(2)	0,200	0,200	0,250	0,250	0,100	1,000
(3)	0,250	0,250	0,200	0,200	0,100	1,000
(4)	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	1,000
(5)	0,200	0,200	0,175	0,175	0,250	1,000

No primeiro e terceiro conjunto de pesos foram priorizados os aspectos técnicos, no segundo foram priorizados os aspectos econômico, no quarto foi distribuído igualmente entre os critérios e no quinto e ultimo conjunto foi priorizado o critério ambiental.

Com os índices parciais calculados e os pesos definimos de acordo com o Quadro 4.1, foi possível calcular o índice geral cada situação, Quadro 4.2.

Quadro 4.2- Resultado dos índices específicos e do índice geral para o alimentador SLAD212.

Pesos(W)	Aspectos Técnicos		Aspectos Econômicos		Aspecto Ambiental	Índice Geral
	I _{PT}	I _C	I _{PL}	I _{FC}	I _{AMB}	
	1,000517	1,000531	0,953567	1,051553	0,947323	IG
(1)	0,275	0,275	0,200	0,200	0,050	1,023118
(2)	0,200	0,200	0,250	0,250	0,100	1,030832
(3)	0,250	0,250	0,200	0,200	0,100	1,025872
(4)	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	1,031380
(5)	0,200	0,200	0,175	0,175	0,250	1,031654

Observa-se, na análise do quadro 4.2, a diferença entre os resultados calculados, isso se deve à influência dos pesos na determinação do índice geral.

De acordo com os resultados, conclui-se que a inserção da GD com armazenamento de energia foi benéfico em todos os quesitos analisados, tendo o sistema impactado em níveis distintos para cada aspecto. No entanto, a decisão sobre a utilização necessitar de uma análise econômica mais detalhada.

Análises simplificadas da inserção da GD com armazenamento de energia em alimentadores da CEMIG

Devido à dificuldade de se obter o cálculo do fluxo de potência horário para determinado sistema e conseqüentemente calcular o perfil de tensão e as

perdas na linha, optou-se por o índice geral adaptado para os demais alimentadores.

A análise simplificada utiliza o mesmo índice geral, porém, excluindo os índices referentes ao perfil de tensão e as perdas na linha, equação 4.14.

$$I_G = w_1 I_C + w_2 I_{FC} + w_3 \frac{1}{I_{AMB}} \quad (4.14)$$

Onde:

- I_G – índice geral (adimensional);
- I_C – Índice de confiabilidade (adimensional);
- I_{FC} – Índice do fator de carga (adimensional);
- I_{AMB} – Índice de perdas na linha (adimensional);
- w – pesos atribuídos a cada índice;

Foram disponibilizados pela CEMIG informações de alguns alimentadores, os quais foram analisados e aplicados à metodologia proposta de forma simplificada.

Na análise simplificada foi calculado o índice geral tendo com admitido os pesos de acordo com o Quadro 4.3.

Quadro 4.3 - Pesos utilizados no índice adaptado.

Pesos(W)	Aspectos	Aspectos	Aspecto	ΣW
	Técnicos	Econômicos	Ambiental	
	I_C	I_{FC}	I_{AMB}	
(1)	0,400	0,400	0,200	1,000
(2)	0,450	0,450	0,100	1,000
(3)	0,475	0,475	0,050	1,000
(4)	0,300	0,300	0,400	1,000

Para a definição da potência do sistema de geração fotovoltaica, foi estabelecida com sendo dez por cento do maior valor de consumo instantâneo calculado pelo Homer, e a capacidade de fornecimento de energia das baterias seria próxima a cinco por cento desse mesmo valor, porém em kilo watt hora. Exceto para a análise simplificada do SLAD 212 no qual optou-se por simular o sistema de GD com armazenamento que será implementado no estádio Arena do Jacaré.

Com esses parâmetros definidos, foi realizada a análise dos demais alimentadores e os resultados, características de cada sistema analisado estão descritos a seguir.

Análise simplificada da inserção da GD com armazenamento de energia no alimentador SALAD 212 (Arena do Jacaré)

O projeto P&D 308 pretende instalar um sistema de geração fotovoltaica distribuída de 50 kWp e um sistema de armazenamento de 100 kWh utilizando bateria chumbo ácida no estádio de futebol Arena do Jacaré situado na cidade de Sete Lagoas MG. Portanto foi analisado, de forma simplificada, o alimentador SLAD 212, que supre o estádio, com as mesmas características, a fim de estimar os possíveis benefícios a se obter com a instalação do sistema proposto.

Assim foram inseridos os perfis de consumo mensal no software Homer e considerado um valor de capacidade de fornecimento da rede de 6500 kW e obtidos os valores referentes ao sistema de distribuição, bem como, os valores de geração fotovoltaica e do sistema de armazenamento de energia.

De posse desses valores, foi possível calcular os índices parciais e utilizando os pesos indicados no Quadro 3, foi possível obter o índice geral para as respectivas situações, Quadro 4.4.

Quadro 4.4- Resultado dos índices específicos e do índice geral simplificado para o alimentador SLAD212.

Pesos(W)	Aspectos Técnicos	Aspectos Econômicos	Aspecto Ambiental	Índice Geral I_G
	I_C	I_{FC}	I_{AMB}	
	1,000008	1,0016308	0,9979468	
(1)	0,400	0,400	0,200	1,001067
(2)	0,450	0,450	0,100	1,000943
(3)	0,475	0,475	0,050	1,000881
(4)	0,300	0,300	0,400	1,001315

Observa-se que os valores obtidos no índice geral foram acima da unidade, representando benefícios para o sistema. Importante ressaltar, que os valores da GD e do armazenamento de energia inseridos, são relativamente pequenos se comparados com a capacidade da rede. Assim de acordo com os resultados da simulação, o sistema proposto terá um impacto de pequenas proporções no sistema de fornecimento de energia.

Análise simplificada da inserção da GD com armazenamento de energia no alimentador BETC 506

Foi analisado o alimentador BETC 506, que tem comprimento de 80,07 km, sendo 47,52 km de rede urbana e 32,55 km de rede rural, com uma demanda total de 5616 kW, com uma topologia radial, figura 4.8.

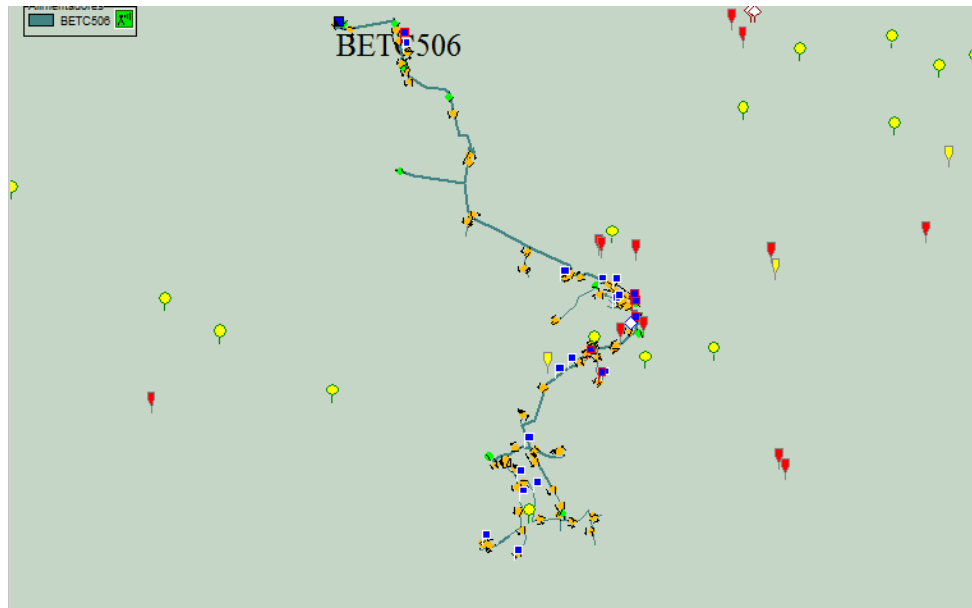


Figura 4.8 – Topologia do alimentador BETC 506.

Para a análise simplificada desse sistema optou-se por simular um sistema de geração fotovoltaica 860 kWp, um conversor de 860 kW, e um sistema de armazenamento de aproximadamente 430kWh, como optou-se por manter as fileiras de 126 baterias em série, foram utilizados 756 (6 fileiras) baterias opzv 490Ah totalizando o fornecimento de 490kWh.

Foi inserido, para fins de simulação no software Homer, os perfis de carga mensal de junho de 2011 a julho de 2012 do alimentado BETC506. Com os resultados obtidos foram calculados os índices parciais da análise simplificada, e por fim, calculado o índice geral para os pesos descritos, como ilustrado no Quadro 4.5.

Quadro 4.5- Resultado dos índices específicos e do índice geral simplificado para o alimentador BETC 506.

Pesos(W)	Aspectos Técnicos	Aspectos Econômicos	Aspecto Ambiental	Índice Geral I_G
	I_C	I_{FC}	I_{AMB}	
	1,001430	1,059337	0,937503	
(1)	0,400	0,400	0,200	1,037639
(2)	0,450	0,450	0,100	1,034011
(3)	0,475	0,475	0,050	1,032197
(4)	0,300	0,300	0,400	1,044895

Análise simplificada da inserção da GD com armazenamento de energia no alimentador BETQ 417

Foi analisado o alimentador BETQ 417, que tem comprimento de 43,75 km, sendo 37,37 km de rede urbana e 6,38km de rede rural, com uma demanda total de 6.828 kVA, com uma topologia radial, figura 4.9.

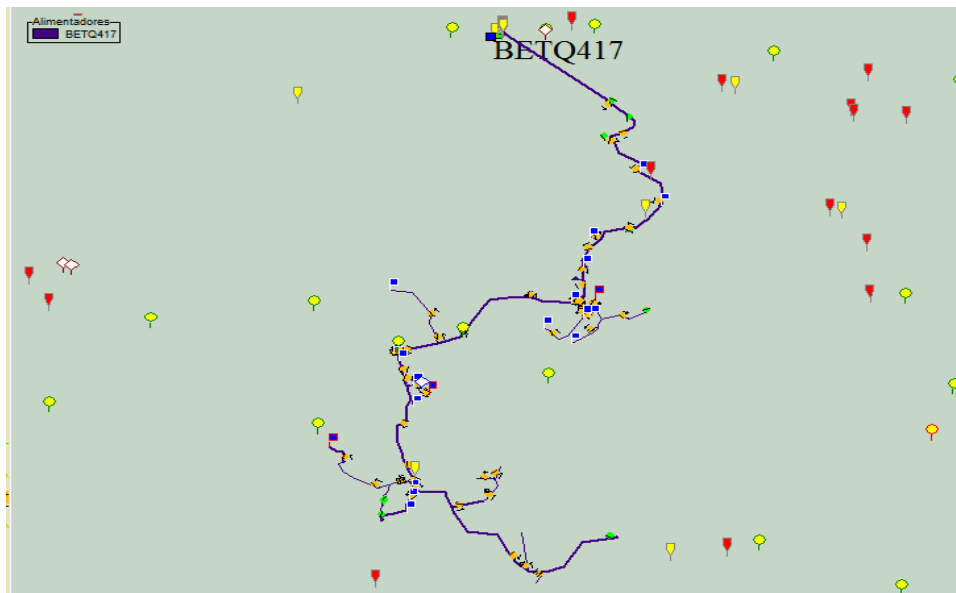


Figura 4.9 – Topologia do alimentador BETQ 417.

Para a análise simplificada desse sistema optou-se por simular um sistema de geração fotovoltaica 630 kWp, um conversor de 630 kW, e um sistema de armazenamento de aproximadamente 315 kWh, como optou-se por manter as fileiras de 126 baterias em serie, foi utilizado 504 (4 fileiras) de baterias opzv 490Ah totalizando o fornecimento de 296 kWh.

Foram inseridos os perfis de carga mensal de junho de 2011 a julho de 2012 do alimentado BETC506 configurado o sistema de geração fotovoltaica e armazenamento de energia como descrito no parágrafo anterior, e com os resultados obtidos foram calculados o índice parciais da análise simplificada, e por fim, calculado o índice geral para os pesos descritos no Quadro 3, como ilustrado na o Quadro 4.6 .

Quadro 4.6- Resultado dos índices específicos e do índice geral simplificado para o alimentador BETQ 417.

Pesos(W)	Aspectos Técnicos	Aspectos Econômicos	Aspecto Ambiental	Índice Geral I_G
	I_C	I_{FC}	I_{AMB}	
	1,0011417	1,076646	0,934989	
(1)	0,400	0,400	0,200	1,045021
(2)	0,450	0,450	0,100	1,041957
(3)	0,475	0,475	0,050	1,040425
(4)	0,300	0,300	0,400	1,051148

Análise simplificada da inserção da GD com armazenamento de energia no alimentador BHAT 04

Foi analisado o alimentador BHAT 04, que tem comprimento de 22,16 km, sendo na totalidade rede urbana apresentando uma topologia radial, figura 4.10.

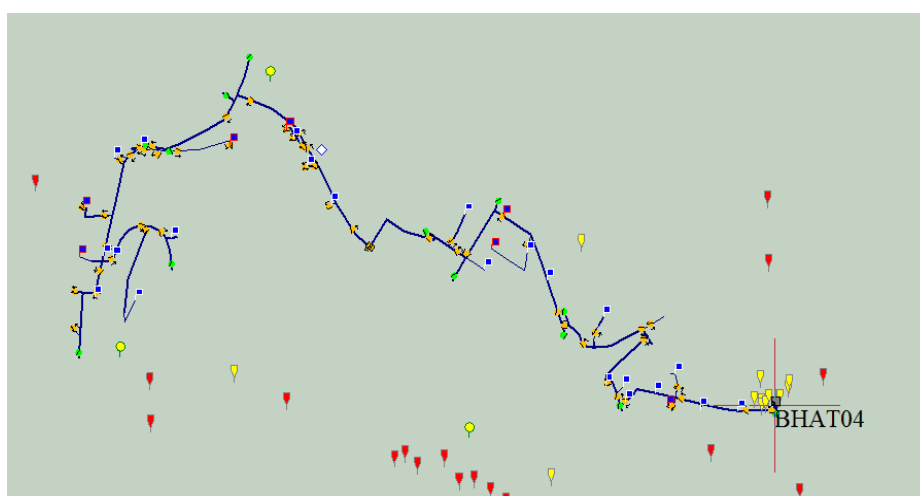


Figura 4.10 – Topologia do alimentador BHAT 04.

Para a análise simplificada desse sistema optou-se por simular um sistema de geração fotovoltaica 590 kW, um conversor de 590 kW, e um sistema de armazenamento de aproximadamente 315 kWh, como optou-se por manter as fileiras de 126 baterias em serie, foi utilizado 295 (4 fileiras) de baterias opzv 490Ah totalizando o fornecimento de 296 kWh.

Foram inseridos os perfis de carga mensal de junho de 2011 a julho de 2012 do alimentado BETC506 configurado o sistema de geração fotovoltaica e armazenamento de energia como descrito no parágrafo anterior, e com os resultados obtidos foram calculados o índice parciais da análise simplificada, e por fim, calculado o índice geral para os pesos descritos no Quadro 3, como ilustrado na o Quadro 4.7.

Quadro 4.7- Resultado dos índices específicos e do índice geral simplificado para o alimentador BHAT 04.

Pesos(W)	Aspectos Técnicos	Aspectos Econômicos	Aspecto Ambiental	Índice Geral I_G
	I_C	I_{FC}	I_{AMB}	
	1,000166	1,041028	0,956119	
(1)	0,400	0,400	0,200	1,025657
(2)	0,450	0,450	0,100	1,023127
(3)	0,475	0,475	0,050	1,021862
(4)	0,300	0,300	0,400	1,030716

Análise simplificada da inserção da GD com armazenamento de energia no alimentador BHGT 11

Foi analisado o alimentador BHGT 11, que tem comprimento de 4,25 km, sendo na totalidade rede urbana apresentando uma topologia radial, figura 4.11.

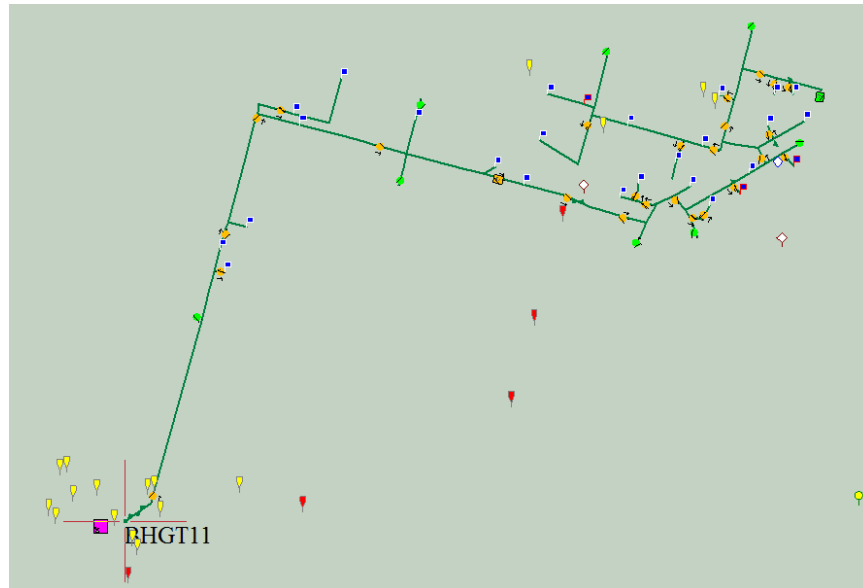


Figura 4.11 – Topologia do alimentador BHGT 11.

Para a análise simplificada desse sistema optou-se por simular um sistema de geração fotovoltaica 500 kW, um conversor de 500 kW, e um sistema de armazenamento de aproximadamente 250 kWh, como optou-se por manter as fileiras de 126 baterias em serie, foi utilizado 378 (3 fileiras) de baterias opzv 490Ah totalizando o fornecimento de 222 kWh.

Foram inseridos os perfis de carga mensal de junho de 2011 a julho de 2012 do alimentado BETC506 configurado o sistema de geração fotovoltaica e armazenamento de energia como descrito no parágrafo anterior, e com os resultados obtidos foram calculados o índice parciais da análise simplificada, e por fim, calculado o índice geral para os pesos descritos no Quadro 3, como ilustrado na o Quadro 4.8.

Quadro 4.8- Resultado dos índices específicos e do índice geral simplificado para o alimentador BHGT 11.

Pesos(W)	Aspectos Técnicos	Aspectos Econômicos	Aspecto Ambiental	Índice Geral I_G
	I_C	I_{FC}	I_{AMB}	
	1,000159	1,045503	0,950475	
(1)	0,400	0,400	0,200	1,028686
(2)	0,450	0,450	0,100	1,025759
(3)	0,475	0,475	0,050	1,024295
(4)	0,300	0,300	0,400	1,034541

Análise simplificada da inserção da GD com armazenamento de energia no alimentador PMSU 15

Foi analisado o alimentador PMSU 15, que tem comprimento de 450,59 km, sendo 37,44 km de rede urbana e 413,115 km de rede rural, com uma demanda total de 5.689 kVA, com uma topologia radial, figura 4.12.

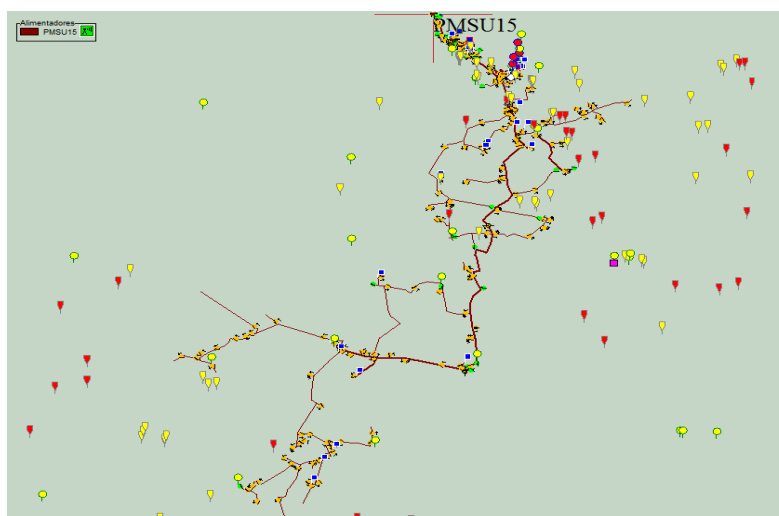


Figura 4.12 – Topologia do alimentador PMSU 15.

Para a análise simplificada desse sistema optou-se por simular um sistema de geração fotovoltaica 620 kW, um conversor de 620 kW, e um sistema de armazenamento de aproximadamente 504 kWh, como optou-se por manter as fileiras de 126 baterias em serie, foi utilizado 504 (4 fileiras) de baterias opzv 490Ah totalizando o fornecimento de 296 kWh.

Foram inseridos os perfis de carga mensal de junho de 2011 a julho de 2012 do alimentado BETC506 configurado o sistema de geração fotovoltaica e armazenamento de energia como descrito no parágrafo anterior, e com os resultados obtidos foram calculados o índice parciais da análise simplificada, e por fim, calculado o índice geral para os pesos descritos no Quadro 3, como ilustrado na o Quadro 4.9.

Quadro 4.9- Resultado dos índices específicos e do índice geral simplificado para o alimentador PMSU 15.

Pesos(W)	Aspectos Técnicos	Aspectos Econômicos	Aspecto Ambiental	Índice Geral I_G
	I_C	I_{FC}	I_{AMB}	
	1,000299	1,060045	0,936009	
(1)	0,400	0,400	0,200	1,037810
(2)	0,450	0,450	0,100	1,033991
(3)	0,475	0,475	0,050	1,0320811
(4)	0,300	0,300	0,400	1,0454491

Comparando os resultados das análises utilizando o índice geral adaptado, pode-se perceber que a inserção da geração distribuída no alimentador BETQ 417 apresentou valores mais elevados para o índice geral. Sendo assim, a instalação da GD com armazenamento, de acordo com as

características descritas anteriormente, provavelmente trará maiores benefícios ao alimentador BETQ 417, em comparação com os demais.

Quadro 4.10 - Resultado comparativo do índice geral das simulações.

IG	BETC 506	BETQ 417*	BHAT 04	BHGT 11	PMSU 15
(1)	1,037639	1,045021	1,025657	1,028686	1,037810
(2)	1,034011	1,041957	1,023127	1,025759	1,033991
(3)	1,032197	1,040425	1,021862	1,024295	1,032081
(4)	1,044895	1,051148	1,030716	1,034541	1,045449

(*) Valores em negrito representam o alimentador de maior índice geral, portanto, local indicado para a inserção da GD com armazenamento de energia.

No entanto, o resultado acima descrito foi observado apenas questões nas quais o índice geral abrange, não sendo considerado o custo de cada sistema de GD com armazenamento de energia dimensionado.

Os resultados da simulação da inserção da GD com armazenamento no SLAD 212 apresentaram valores muito inferiores em comparação com as demais simulações, isso devido ao fato do sistema de GD com armazenamento de energia estabelecido para a análise simplificado do SLAD 212, ter sido definida de acordo com as características do sistema que será implementado no estádio arena do jacaré, e não referente percentagem do pico de consumo.

4.4.3 Avaliações para diferentes cenários

O Plano Decenal de Expansão de Energia 2021(PDEE 2021) incorpora uma visão integrada da expansão da demanda e da oferta de diversos recursos energéticos no período 2012-2021.

Com relação aos derivados de petróleo, continua se observando queda expressiva de participação no consumo final de recursos energético nacional, de 40,1%, em 2012, para 34,8%, em 2021.

Em relação às outras fontes renováveis de geração consideradas neste estudo – eólicas, as térmicas movidas à biomassa, em sua maioria de bagaço de cana-de-açúcar, e as PCH – nota-se uma expansão média anual de 10%, com destaque para as usinas eólicas.

Os investimentos dos últimos anos demonstraram que as usinas eólicas atingiram preços bastante competitivos e impulsionaram a instalação de uma indústria nacional de equipamentos para atendimento a esse mercado. Essa participação crescente no mercado de energia elétrica resultou de uma combinação de fatores relacionados ao cenário externo, ao desenvolvimento tecnológico e da cadeia produtiva, além de aspectos regulatórios, tributários e financeiros.

Ao contrário das usinas eólicas, as PCH observaram trajetória decrescente de competitividade nos leilões desde 2009. É comum que as questões relacionadas ao processo de licenciamento ambiental apresentem complicadores à viabilização dos projetos de PCH.

A fonte solar, cujo desenvolvimento é desejável e se apresenta em estudo para melhor se aplicar, dependendo da evolução positiva de sua competitividade perante as demais fontes, tais estudos apontam que existem no território brasileiro um elevado potencial para sua conversão em energia elétrica, com irradiação global média anual entre 1.200 e 2.400 kWh/m²/ano. Apesar do grande potencial, os custos atuais desta tecnologia são muito

elevados e não permitem sua utilização em volume significativo. Porém, esses custos têm registrado acentuada queda nos últimos anos, com tendência de continuidade futura, principalmente na geração fotovoltaica, podendo tornar a fonte competitiva no horizonte de planejamento decenal.

O custo de geração fotovoltaica distribuída já alcançou a paridade com as tarifas na rede de distribuição em algumas áreas de concessão, ou seja, valor da energia menor ou igual ao preço da distribuidora para o consumidor final, incluindo impostos. A instalação de painéis solares por consumidores residenciais e comerciais poderá se tornar viável em alguns anos, porém ainda é difícil estimar a magnitude e a distribuição espacial da inserção dessa rota tecnológica no país. Outro fator importante a ser considerado é a difícil previsão da utilização pelo setor residencial, pois envolve outras variáveis além das econômicas, isto é, as externalidades, como, por exemplo: o valor da independência energética e a conscientização ambiental. Além do mais, existem outras variáveis que impactam a decisão do consumidor em instalar essa fonte, como a implementação da regulamentação vigente e a existência de incentivos.

Com esse panorama apresentado pelo PDEE 2021, pode-se notar a crescente tendência da utilização das energias renováveis, na qual se destaca a energia eólica. Proporcionando um aumento na geração distribuída.

Com esse cenário de aumento das energias renováveis e da GD, a pesquisas sobre esses assuntos são de extrema importância, pois a inserção dessas novas fontes de energia, sem planejamento pode impactar em sérios problemas no sistema elétrico brasileiro.

No artigo redigido por Costantini et al , 2007, os autores fazem uma análise das tendências para a produção de energia na Europa e seus impactos na economia e na sociedade de modo geral. Abordam as principais questões sobre os combustíveis fósseis, que são as principais fontes de energia da Europa, destacam: a instabilidade política dos países fornecedores, a crescente demanda de energia para o desenvolvimento dos países e a volatilidade do

preço. Nos cenários de análise realizados, fica clara a preocupação sobre a possibilidade de um colapso pela falta desses combustíveis, já que as reservas são limitadas.

Liao et al, 2011, faz uma análise da importância dos subsídios para a promoção da geração de energia elétrica advinda de fontes renováveis de energia.

Hofman e Huisman, 2012, fizeram uma comparação entre os investimentos em energias renováveis e políticas climáticas. E destaca que a crise financeira europeia forçou os governos a cortar subsídios para as energias renováveis, e isso influenciou para o decréscimo de investimentos privados nessa fonte energética.

Com esse cenário mundial de preocupação com o esgotamento futuro das reservas de petróleo, se mostra favorável para a promoção da GD. No entanto são necessários incentivos para que as energias renováveis, que são a maior precursor da GD, tenha um preço competitivo com as demais fontes de energia.

Além do mais, as condições políticas e econômicas dos países influenciam de forma preponderante na maior ou menor utilização da geração distribuída.

4.5 Conclusão

A metodologia aplicada aos sistemas de distribuição de energia aqui demonstrados apresentou como resultados valores positivos, representando de maneira geral, uma melhoria na qualidade de fornecimento de energia.

Como mencionado no item anterior, o acesso limitado ao programa computacional utilizado para o cálculo do fluxo de potência da CEMIG, impossibilitou a utilização da análise completa de todos os sistemas de energia

selecionados, sendo realizada a análise completa apenas para o primeiro estudo e para os demais, para isso realizou-se a análise simplificada.

A utilização da metodologia de otimização linear multiobjetivo permite variação na determinação dos pesos utilizados para os aspectos econômicos técnicos e ambientais, para representar as prioridades de planejamento para a localização da GD com armazenamento de energia.

As análises de cenários futuros demonstraram que existe a tendência da maior utilização da GD com armazenamento conectado ao sistema tradicional de fornecimento de energia elétrica.

Porém, existe a necessidade do maior desenvolvimento tecnológico e o crescimento da produção para reduzir os valores dos painéis solares fotovoltaicos, que são considerados altos. Atualmente, a política de subsídio vem sendo considerada uma necessidade ao crescimento de sua utilização ocorrida nos últimos anos. No entanto, as turbulências políticas e econômicas podem influenciar consideravelmente nos subsídios governamentais, refletindo na utilização da GD com ou sem armazenamento.

4.6 Referências Bibliográficas

EPE, 2012. Plano Decenal de Expansão de Energia 2021, Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética, Brasília, EPE, 2012.

PAPAIOANNOU, I. T., PURVINS, A., TZIMAS, E., Demand shifting analysis at high penetration of distributed generation in low voltage grids, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 44, pg 540-546, janeiro, 2013.

BARIN, A.; CANHA, L.N.; ABAIDE, A.R.; MACHADO, R.Q., "Methodology for placement of Dispersed Generation Systems by analyzing its Impacts in

Distribution Networks," Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina) , vol.10, no.2, p.1544,1549, março, 2012.

VIEIRA Jr, J. C. M., Detecção de Ilhamento de Geradores Distribuídos: Uma Revisão Bibliográfica Sobre o Tema, v. 1, n. 1, p. 3 -14 , julho/dezembro, 2011.

TOLEDO, O. M.; OLIVEIRA FILHO, D.; DINIZ, A. S. A. C.; MARTINS, J; VALE, M. H. M., "Methodology for Evaluation of Grid-Tie Connection of Distributed Energy Resources—Case Study With Photovoltaic and Energy Storage," Power Systems, IEEE Transactions on , vol.28, no.2, pp.1132,1139, maio, 2013.

EPE, 2010. Balanço Energético Nacional 2010 – Resultados Preliminares Ano Base 2009. Acessado em junho <https://ben.epe.gov.br/BENResultadosPreliminares2010.aspx>

5. Conclusão Geral

O trabalho aqui apresentado teve como objetivo contribuir com a metodologia de inserção da geração distribuída com ou sem armazenamento de energia proposta, com aplicação em sistemas de distribuição de energia elétrica da concessionária CEMIG.

Os resultados das simulações da inserção da GD com armazenamento demonstraram que a sua implementação, de fato, deverá proporcionar melhora nos aspectos técnicos, econômicos e ambientais nas proporções indicadas pelos cálculos dos índices aqui apresentados.

Será muito significativa a análise das modificações no sistema de distribuição de energia após a instalação e operação GD com armazenamento proposto, pois assim poderá quantificar, de fato, as modificações obtidas no sistema de distribuição de energia elétrica proporcionado pela inserção desse sistema, sendo possível comparar as modificações percebidas pelas medições com os resultados simulados.

Para a aplicação da metodologia aqui apresentada em grandes sistemas, a utilização dos critérios de pré-seleção é importante para simplificar o âmbito de análise, diminuindo consideravelmente o tempo de processamento.

É crescente a utilização da geração distribuída no Brasil e no mundo. Em alguns países, principalmente europeus, a energia gerada pela GD é

expressiva, tendo a necessidade de maiores cuidados para que a utilização a GD conectada à rede de distribuição de energia elétrica não prejudique a estabilidade do sistema como um todo,

Além disso, as normas para se conectar a GD ao sistema de distribuição são bastante rígidas por questões de segurança. Com, por exemplo, a exigência de proteção ante ilhamento, que evita que a GD forneça energia para a rede quanto cessar o fornecimento de energia da concessionária. Isso se faz necessário para maior segurança dos trabalhadores, uma vez que, quando o trabalhador estiver em serviço de manutenção na rede elétrica, sem a presença de energia vinda da rede de distribuição, para que não leve uma descarga elétrica da energia fornecida pela GD.

O Brasil está começando a viabilizar a conexão da micro e mini geração conectada à rede, isso foi possível através das normas estabelecida a partir resolução 482 da ANEEL.

As normas estabelecidas entre as conexões pelas agências responsáveis são importadas de países que tenham maior experiência com a GD, a fim de evitar problemas já apresentados nesses países com a maior inserção dessa tecnologia.

Devido ao acesso parcial ao software de fluxo de potência não foi possível calcular todos os índices parciais na maior parte das análises, sendo necessária a utilização da forma simplificada.

Foram utilizados softwares diferentes para as análises dos critérios utilizados, sendo necessária a importação de dados de um para o outro, gerando uma demanda de tempo maior na compilação dos resultados.

Propõe-se como trabalhos futuros:

- (i) Promover maior interação entre os softwares de fluxo de potência e o software de dimensionamento de geração distribuída, a fim de facilitar a análise da inserção dessa tecnologia à rede de distribuição.

- (ii) Utilização de softwares de fluxo de potência mais atuais os quais possuam opções de inserir geradores fotovoltaicos e eólicos.
- (iii) Comparar a análise obtida nas simulações com a análise após a implementação da geração distribuída no estádio Arena do Jacaré em Sete lagoas – MG.
- (iv) Análise de sistemas maiores para quantificar as modificações em alimentadores próximos ao alimentador onde foram inseridos a GD com ou sem armazenamento.
- (v) Verificar características peculiares para compor outros critérios de pré-seleção como, por exemplo, condições climatológicas e previsão de degradação dos equipamentos.

Contudo, essa pesquisa, pode servir de orientação para a localização da geração distribuída com e sem armazenamento de energia, objetivando a promoção da geração distribuída proporcionando melhora no sistema de fornecimento de energia como um todo resolvendo problemas relacionados à escassez de recursos energéticos.