

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, AMBIENTAIS E DE
TECNOLOGIAS**

**MESTRADO EM SISTEMAS DE INFRAESTRUTURA
URBANA**

RICARDO DANTAS DEMATTÊ

**AVALIAÇÃO DA INSERÇÃO DE GERAÇÃO
DISTRIBUÍDA NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA BRASILEIRO UTILIZANDO
MÉTODOS MULTICRITÉRIO**

CAMPINAS

2017

RICARDO DANTAS DEMATTE

**AVALIAÇÃO DA INSERÇÃO DE GERAÇÃO
DISTRIBUÍDA NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA BRASILEIRO UTILIZANDO
MÉTODOS MULTICRITÉRIO**

Dissertação apresentada como exigência para obtenção do Título de Mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana, ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, da Pontifícia Universidade Católica de Campinas.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Lia Toledo Moreira
Mota

Co-orientador: Prof. Dr. Marcius Fabius
Henriques de Carvalho

PUC-CAMPINAS

2017

Ficha Catalográfica
Elaborada pelo Sistema de Bibliotecas e
Informação - SBI - PUC-Campinas

t621.3191
D372a

Dematte, Ricardo Dantas.

Avaliação da inserção de geração distribuída no sistema de distribuição de energia elétrica brasileiro utilizando métodos multicritério / Ricardo Dantas Dematte. - Campinas: PUC-Campinas, 2017.
98p.

Orientadora: Lia Toledo Moreira Mota. Coorientador: Marcius Fabius Henriques de Carvalho.

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana.

Inclui bibliografia.

1. Sistemas de energia elétrica. 2. Sustentabilidade. 3. Impacto ambiental. 4. Energia elétrica – Distribuição. I. Mota, Lia Toledo Moreira. II. Carvalho, Marcius Fabius Henriques de. III. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias. Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana. IV. Título.


22.ed. CDD – t621.3191

RICARDO DANTAS DEMATTÊ

**AVALIAÇÃO DA INSERÇÃO DE GERAÇÃO
DISTRIBUÍDA NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA BRASILEIRO UTILIZANDO
MÉTODOS MULTICRITÉRIO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias da Pontifícia Universidade Católica de Campinas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana.
Área de Concentração: Sistemas de Infraestrutura Urbana.
Orientador (a): Prof. (a). Dr. (a). Lia Toledo Moreira Mota.
Co-orientador: Prof. Dr. Marcius Fabius Henriques de Carvalho.

Dissertação defendida e aprovada em 28 de junho de 2017 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:



Profa. Dra. Lia Toledo Moreira Mota
Orientadora da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Profa. Dra. Marina Lavorato de Oliveira
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Prof. Dr. Sérgio Ricardo Lourenço
Universidade Federal do ABC - UFABC

À minha mãe, excelente professora, incansável
batalhadora e grande incentivadora, que me
proporcionou cultura e conhecimento
responsáveis pelas minhas conquistas.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Alexandre Mota,

Pela sabedoria de um inesquecível mestre e grande incentivador deste projeto.

À Prof.^a Dra. Lia Mota,

Pelo incentivo, apoio, orientação e colaboração para a conclusão deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Marcius de Carvalho,

Pela dedicação incansável, paciência e inúmeras contribuições nesta pesquisa.

Aos professores do programa de pós-graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana,

Pelo apoio e aprendizado adquirido.

A todos os alunos da turma de mestrado,

Pela ajuda, aprendizado e companheirismo vividos durante o período de aulas.

Ao Adolfo e Fabiana,

Pela parceria e companheirismo nesta jornada.

Ao meu filho Fernando e minha esposa Adriana,

Pelo amor incondicional.

“A mais bela coisa que podemos vivenciar é o mistério. Ele é fonte de qualquer arte verdadeira e qualquer ciência. Aquele que desconhece esta emoção, aquele que não para mais para pensar e não se fascina, está como morto: seus olhos estão fechados.”

Albert Einstein
(1879-1955)

RESUMO

DEMATTE, Ricardo Dantas. *Avaliação da Inserção de Geração Distribuída no Sistema de Distribuição de Energia Elétrica Brasileiro Utilizando Métodos Multicritério*. 2017. 98f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana) – Programa de Pós-graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2017.

Um dos principais desafios encontrados no mundo atualmente é a geração de energia elétrica de forma sustentável e renovável, visando diminuir gradativamente a geração baseada em combustíveis que causam um grande impacto ambiental como o carvão, petróleo e energia nuclear. A emissão e acumulação de CO₂ na atmosfera e o consequente aquecimento global tem convencido a opinião pública que o uso de fontes de energia de baixo impacto ambiental devem ocupar papel de destaque na produção de energia. A geração distribuída utilizando fontes renováveis apresenta-se como uma tendência mundial para atender parte da demanda por energia elétrica. Desta forma, este trabalho propõe uma avaliação multicritério das principais fontes de energia utilizadas no sistema elétrico brasileiro, sob o ponto de vista econômico, técnico e socioambiental. Neste sentido, também é realizada uma avaliação dos impactos da inserção da geração distribuída na rede de distribuição de energia elétrica brasileiro.

Palavras-chave: Fontes de Energia. Análise Multicritério. Geração Distribuída. Sistema de Distribuição da Rede Elétrica.

ABSTRACT

DEMATTE, Ricardo Dantas. *Evaluation of the Distributed Generation Insertion in the Brazilian Electric Distribution Network Using Multicriteria Methods*. 2017. 98p. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana) – Programa de Pós-graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2017

Nowadays, one of the main challenges in the world is the generation of electricity in a sustainable and renewable way, aiming to gradually reduce the generation based on fuels that cause a high environmental impact such as coal, oil, and nuclear energy. The emission and accumulation of CO₂ in the atmosphere and the consequent global warming has convinced public opinion that the use of low environmental impact technologies should play a prominent role in energy production.

Distributed generation using renewable sources presents itself as a worldwide trend to meet part of the demand for electricity. In this way, this work proposes a multicriteria evaluation of the main sources of energy used in the Brazilian electrical system, from the economic, technical and socio-environmental point of view. In this sense, it is also an evaluation of the impacts of the insertion of the distributed generation into the Brazilian electricity distribution network.

Keywords: *Energy Sources. Multicriteria Analysis. Distributed Generation. Distribution Network*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Variação da Irradiação Solar em Campinas - SP.....	12
Figura 2 – Capacidade Fotovoltaica Mundial Instalada	13
Figura 3 – Componentes de um Sistema Fotovoltaico	14
Figura 4 – Concentrador Parabólico de uma CSP.....	16
Figura 5 – Turbina Eólica	18
Figura 6 – Capacidade Eólica Instalada Mundial em 15 anos	19
Figura 7 – Esquema Básico de Uma Usina Termoelétrica.....	20
Figura 8 – Usinas de Biomassa no Brasil	21
Figura 9 – Usina Hidrelétrica	22
Figura 10 – Percentual das Fontes na Matriz Energética no Brasil.....	24
Figura 11 – Exemplo de Usina de Marés.....	25
Figura 12 – Usina de Correntes Marítimas da SeaGen	26
Figura 13 – Usina de Ondas de PECÉM-CE	27
Figura 14 – Funcionamento de uma Usina Geotérmica.....	28
Figura 15 – Usina Geotérmica na Islândia.....	29
Figura 16 – Rede de Distribuição com Geração Distribuída	31
Figura 17 – Geração Distribuída <i>On-Grid</i>	33
Figura 18 – Geração Distribuída <i>Off-Grid</i>	34
Figura 19 – Exemplo de Rede de Distribuição com GD.....	42
Figura 20 - Fronteira da Eficiência das DMUs	49
Figura 21 - Fluxograma do Método FCO	56
Figura 22 – Rede de 9 Barras	58
Figura 23 – Cenário 1 – Rede de 33 Barras sem GD	60
Figura 24 – Cenário 2 – Rede de 33 Barras com GD	62
Figura 25 – Eficiência das FAERs pelo DEA.	65
Figura 26- Eficiência das FGEEs pelo DEA.....	67
Figura 27 - Eficiência das FAERs pelo Promethee.....	69
Figura 28- Eficiência das FGERs pelo Promethee.....	71
Figura 29- DEA x Promethee - 1º Conjunto de Dados.....	74
Figura 30- DEA x Promethee - 2º Conjunto de Dados.....	75
Figura 31- Fluxo de Corrente – Rede 33 Barras sem GD.....	76
Figura 32- Gráfico do Perfil de Tensão da Rede 33 Barras sem GD.	79
Figura 33- Fluxo de Corrente – Rede 33 Barras com GD.....	80
Figura 34- Perfil de Tensão da Rede 33 Barras sem GD.....	83
Figura 35- Mudança no Perfil de Tensão da Rede	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Consumo de Eletricidade no Brasil (GWh).....	2
Tabela 2 – Tipos de Geração Distribuída.....	44
Tabela 3 – Entrada e Saída para as Fontes Renováveis	52
Tabela 4 – Entrada e Saída para as Fontes de Energia	52
Tabela 5 – Exemplo de Matriz Incidência da Rede de 9 Barras	58
Tabela 6 – Dados de Entrada do Cenário 1	61
Tabela 7 – Dados de Entrada do Cenário 2	63
Tabela 8 - Ranking de FAERs Utilizando o DEA.....	64
Tabela 9 - Ranking de FGEEs Utilizando o DEA	66
Tabela 10 - Ranking de FAERs Utilizando o PROMETHEE	68
Tabela 11 - Ranking de FGEEs Utilizando o PROMETHEE	70
Tabela 12 - Ranking Comparativo de FAERs	72
Tabela 13- Ranking Comparativo de FGEEs	73
Tabela 14- Valores das Correntes – Rede 33 Barras sem GD	77
Tabela 15- Perfil de Tensão da Rede 33 Barras sem GD.....	78
Tabela 16- Valores das Correntes – Rede 33 Barras com GD	81
Tabela 17- Perfil de Tensão da Rede 33 Barras com GD.....	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEM	Reciclagem e Reaproveitamento Lixo
BEN	Balanco Energético Nacional
BIO	Usina a Biomassa
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CIRED	<i>International Conference Of Electricity Distributors</i>
CO2	Dióxido de Carbono
COPPE	Instituto de Pós-Graduação e Pesquisa de Eng ^a . da UFRJ
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica
CSP	<i>Concentrated Solar Power</i>
DEA	<i>Data Envelopment Analysis</i>
DMU	<i>Decision Making Units</i>
DOE	<i>US Department of Energy</i>
DRANCO	Usina de Gás De Lixo
EI	<i>Energy Informative</i>
EIA	<i>U.S. Energy Information Administration</i>
EOL	Usina Eólica
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i>
ESHA	<i>European Small Hydropower Association</i>
FAER	Fontes Alternativas Energia
FC	Fluxo de Carga
FCO	Fluxo de Corrente Ótimo
FGEE	Fontes Geradoras de Energia Elétrica
FP	Fluxo de Potência
GD	Geração Distribuída
GDL	Gás De Lixo

GWEC	<i>Global Wind Energy Council</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i>
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia.
NEI	<i>Nuclear Energy Institute</i>
NRC	<i>United States Nuclear Regulatory Commission</i>
PCH	Pequena Central Hidroelétrica
PROMETHEE	<i>Preference Ranking Organization METHod for Evaluations</i>
REN21	<i>Renewables for 21 Century</i>
SEAGEN	<i>SeaGen Tidal Turbine</i>
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SOL	Usina Solar
U-235	Urânio 235
UHE	Usina Hidroelétrica
UN	<i>United Nations.</i>
UN-WATER	United Nations Inter Agency for Freshwater Related Issues
UTE	Usina Térmica
WBA	<i>World Bioenergy Association</i>
WEF	<i>Wind Energy Foundation</i>
WER	<i>World Energy Resources</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivos	4
1.2	Objetivos Específicos	4
1.3	Organização do trabalho	4
2	REVISÃO DA LITERATURA	5
2.1	Geração de Energia Elétrica	5
2.2	Fontes Convencionais de Energia Elétrica	6
2.3	Fontes Renováveis de Energia Elétrica	9
2.4	Geração Distribuída (GD)	30
2.5	Inserção de Geração Distribuída no Sistema Elétrico	42
3	MATERIAIS E MÉTODOS	46
3.1	Metodologia para Análise da Eficiência de Fontes de Energia	46
3.2	Metodologia Para Análise da Inserção de Geração Distribuída	53
4	RESULTADOS E ANÁLISES	64
4.1	Resultados da Análise de Eficiência das Fontes de Energia	64
4.2	Resultados da Análise Técnica de Inserção de GD	76
5	CONCLUSÃO	85
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica tem importância fundamental na economia das sociedades modernas atualmente. Praticamente todos os setores produtivos da sociedade têm uma dependência direta de energia elétrica. Constata-se, desta forma, que o desenvolvimento econômico dos países está diretamente relacionado com o consumo de eletricidade (IEA, 2016).

Grande parte da geração de energia elétrica mundial está baseada nas usinas termoelétricas à carvão, gás natural e urânio enriquecido. Projeções apontam que para o ano de 2040, as usinas termoelétricas que utilizam combustíveis fósseis e não renováveis ainda sejam responsáveis por 78% da produção mundial de energia elétrica (WER, 2016).

As termoelétricas que utilizam carvão mineral como fonte de geração de energia representam cerca de 40% de toda eletricidade gerada no mundo. O gás natural é a segunda maior fonte na geração de energia, representando 22% da energia gerada globalmente, além de ser o único combustível fóssil no qual o consumo está projetado para crescer. A produção global de urânio aumentou 40% entre 2004 e 2013. Em dezembro de 2015, estavam em construção 65 reatores nucleares com uma capacidade total de 64 GW. Dois terços das unidades em construção estão localizados em três países: China, Índia e Rússia (WER, 2016).

A preocupação com o meio ambiente e emissão de gases de efeito estufa têm contribuído para a queda na utilização de carvão e de combustíveis baseados em petróleo, como combustíveis para as termoelétricas. Por outro lado, verifica-se um aumento da geração de energia utilizando usinas termoelétricas baseadas em gás natural e energia nuclear (IRENA, 2017).

O aumento do consumo de energia elétrica é visto em praticamente todos os países. Há uma projeção do aumento do consumo de 30% até 2040 (IEA, 2016), especialmente nos países em desenvolvimento, como o Brasil.

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) há uma projeção de aumento no consumo energia elétrica no Brasil da ordem de 4% por ano até 2024 (EPE, 2015). A Tabela 1 mostra a projeção do aumento da demanda nos próximos anos, com os principais grupos de consumidores de energia elétrica: residencial, comercial e industrial.

Nesse panorama, para o aumento da geração, se faz necessário uma diversificação da matriz energética brasileira com outras fontes renováveis, além das grandes centrais hidráulicas, de forma que o Brasil aumente sua confiabilidade no fornecimento, segurança energética e ao mesmo tempo mantenha uma matriz energética sustentável (EPE, 2015).

Tabela 1 – Consumo de Eletricidade no Brasil (GWh)

Ano	Residencial	Industrial	Comercial	Outros	Total
2014	132.049	178.055	89.819	73.472	473.395
2015	138.872	176.971	95.302	76.311	487.456
2016	145.089	179.574	100.621	79.084	504.368
2017	151.391	184.370	106.238	82.134	524.134
2018	157.817	193.359	112.184	85.068	548.427
2019	164.487	200.950	117.954	88.137	571.529
2020	171.341	209.463	123.903	91.467	596.173
2021	178.381	216.202	130.022	94.918	619.523
2022	185.611	222.822	136.304	98.493	643.231
2023	193.029	230.409	142.738	102.194	668.370
2024	200.642	237.287	149.452	106.089	693.469
Variação (% ao ano)					
2014-2019	4,5	2,4	5,6	3,7	3,8
2019-2024	4,1	3,4	4,8	3,8	3,9
2014-2024	4,3	2,9	5,2	3,7	3,9

Fonte: EPE, 2015

Um dos principais desafios encontrados no mundo atualmente é a geração de energia elétrica de forma sustentável e renovável, visando diminuir gradativamente a geração baseada em combustíveis fósseis e energia nuclear e ao mesmo tempo, atender à demanda crescente por eletricidade. Neste contexto, a emissão e acumulação de CO₂ na atmosfera e o conseqüente aquecimento global têm convencido a opinião pública que o uso de fontes de baixo impacto ambiental devem ocupar papel de destaque na produção de energia (EIA, 2017).

O Acordo de Paris (UN, 2016), que entrou em vigor em 4 de novembro de 2016, constitui um importante passo na luta contra o aquecimento global. A ONU (Organização das Nações Unidas) estabelece metas de redução de emissão de CO₂ que exigirão uma mudança no ritmo de descarbonização, reduzindo o uso de combustíveis fósseis e incentivando o uso de fontes renováveis (IEA, 2016).

Com isto, os serviços de energia renováveis e seguros tornam-se essenciais para incrementar a produtividade econômica dos países, melhorar a qualidade de vida dos cidadãos, proteger o meio ambiente e garantir a segurança e a estabilidade dos setores produtivos da sociedade (DOE, 2017).

O avanço da pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias para produção de energia elétrica utilizando fontes renováveis, tem contribuído para o aumento da eficiência e para a redução de custos destes geradores. Este fato tem favorecido o crescimento da utilização destas fontes (WER, 2016).

Atualmente, diversas fontes renováveis estão sendo utilizadas, como as usinas eólicas, geotérmicas, heliotérmicas, oceânicas, usinas à biomassa e biocombustíveis e painéis fotovoltaicos (TOLMASQUIM, 2016).

A geração de energia eólica mundial atingiu cerca de 7% da energia global em 2015. A capacidade global instalada de geração de eletricidade baseada em energia solar, tem apresentado um crescimento exponencial. No entanto, representou apenas 1% de toda a eletricidade utilizada globalmente em 2015 (WER, 2016).

Usinas a biomassa (resíduos agrícolas e florestais) e biocombustíveis (etanol e biodiesel) estão sendo utilizados em países em desenvolvimento, como uma alternativa mais sustentável à utilização de combustíveis fósseis. A biomassa é a terceira maior fonte de geração de eletricidade entre as energias renováveis após as centrais hidroelétricas e as usinas eólicas (WBA, 2016).

O cenário de produção de eletricidade por meio de fontes renováveis remete ao conceito de geração distribuída, descentralizada, onde pequenos geradores são inseridos na rede de distribuição. A geração distribuída renovável torna-se uma tendência mundial, visando uma geração de eletricidade mais sustentável e o atendimento de parte da demanda energética mundial (DOE, 2017).

O Brasil já tem um histórico de geração de energia elétrica baseado em fontes renováveis e apresenta grande potencial para a utilização de outras fontes renováveis, como por exemplo as usinas eólicas e painéis fotovoltaicos, devido a sua posição geográfica privilegiada (TOLMASQUIM, 2016).

Assim, o panorama apresentado é de transformações e transição do setor elétrico, com a descentralização da geração, com a inserção de geração distribuída para a produção de energia elétrica, onde podem ser encontrados vários desafios e questões ainda a serem respondidas.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo avaliar as principais fontes de energia utilizadas no sistema elétrico brasileiro, sob o ponto de vista econômico, técnico e socioambiental, visando auxiliar na tomada de decisão com relação à fonte mais eficiente. Além disso, pretende-se avaliar, do ponto de vista técnico, os efeitos da inserção da geração distribuída no sistema elétrico brasileiro.

1.2 Objetivos Específicos

Realizar uma comparação dos resultados obtidos sobre o *ranking* de fontes de energia, utilizando duas metodologias de análise multicritério distintas: o DEA e o PROMETHEE.

Avaliar a alteração no perfil de tensão e das perdas técnicas em uma rede de distribuição sem a inserção de geração distribuída no sistema e com a inserção de geração distribuída.

1.3 Organização do trabalho

No Capítulo 2, é realizada uma revisão de literatura, apresentando os conceitos de fontes renováveis e não renováveis para produção de energia elétrica, conceitos e aplicações de geração distribuída e aspectos inserção de geração distribuída no sistema de distribuição elétrico.

No Capítulo 3, são descritas duas metodologias de análise multivariável das fontes renováveis e não renováveis, para avaliação da eficiência de cada tipo de fonte de energia utilizada para geração de energia elétrica no sistema brasileiro.

Neste sentido, também é descrita no Capítulo 3, uma metodologia para análise técnica da inserção de geração distribuída na rede de distribuição do sistema elétrico brasileiro.

No Capítulo 4, são apresentados e analisados os resultados obtidos a partir da aplicação das metodologias descritas no Capítulo 3.

Finalmente, no Capítulo 5, estão descritas as conclusões deste trabalho.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta uma revisão das principais fontes de geração de energia elétrica e suas diversas características, os conceitos e aplicações da geração distribuída na rede de distribuição e os efeitos causados pela inserção da geração distribuída no sistema elétrico.

2.1 Geração de Energia Elétrica

A energia elétrica é produzida a partir de outras formas de energia. As formas de energia encontradas na natureza e utilizadas para gerar energia elétrica são chamadas de fontes primárias. As fontes primárias podem ser divididas em fontes convencionais (não renováveis) e fontes renováveis (SILVA, 2010).

As fontes convencionais possibilitaram o uso generalizado da eletricidade em praticamente todo o mundo. São geradores termoelétricos que utilizam como fonte primária, combustíveis fósseis, não renováveis. As fontes convencionais são responsáveis por grande parte da energia elétrica produzida (IEA, 2016).

As fontes renováveis envolvem outras formas de geração de energia elétrica que diferem das convencionais. Em geral estas usinas utilizam como fonte primária, recursos naturais renováveis. (IRENA, 2017).

O sistema elétrico é composto de três partes principais: geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Inicialmente, este sistema foi projetado para uma geração centralizada, onde as grandes usinas são responsáveis pela geração da eletricidade, que por sua vez é transmitida a uma distribuidora de energia, que por fim é distribuída ao consumidor final (TOLMASQUIM, 2016).

No Brasil, a maior parte da geração de eletricidade é proveniente de grandes centrais hidroelétricas, como por exemplo a usina de Itaipu com capacidade instalada de geração de 14 GW e a usina hidroelétrica de Tucuruí com capacidade instalada de geração de 8,37 GW (ANEEL, 2008).

A capacidade instalada determina se a geração é micro, mini, média ou de grande porte. A micro geração tem capacidade instalada de até 75kW. A mini geração, com capacidade instalada de até 5 MW. A pequenas centrais hidroelétricas com capacidade instalada de 5 MW até 30MW, são de médio porte. As grandes Usinas Hidroelétricas de Energia (UHE), com capacidade instalada acima de 30 MW, são consideradas de grande porte (ANEEL, 2008).

2.2 Fontes Convencionais de Energia Elétrica

As termoelétricas são usinas que tem a finalidade de transformar a energia térmica (calor) em energia elétrica (eletricidade), por meio do aquecimento da água até virar vapor à alta pressão, que por sua vez faz movimentar turbinas conectadas a um gerador de eletricidade. Existem diversos tipos de termoelétricas, entretanto as mais utilizadas no mundo, atualmente, são as termoelétricas que utilizam fontes não renováveis como combustíveis para gerar calor (IRENA, 2017).

O processo de funcionamento de uma termoelétrica é baseado na queima de um material para combustão e conseqüente produção de calor. Os principais combustíveis utilizados em uma termoelétrica convencional são, por exemplo, carvão, gás natural, urânio enriquecido e derivados do petróleo (BRASCIANI, 2011).

As usinas termoelétricas são amplamente utilizadas principalmente pelo fato de ser uma tecnologia confiável e apresentar alta produtividade na geração de energia, tornando este tipo de usina eficiente do ponto de vista técnico. Por outro lado, a utilização em larga escala de combustíveis como carvão mineral, petróleo e gás natural tornam este tipo de usina prejudicial ao meio ambiente (SAJID, 2017).

A preocupação com o meio ambiente e emissão de gases de efeito estufa tem contribuído para a queda na utilização de carvão e de combustíveis baseados em petróleo, como combustíveis para as termoelétricas. Por outro lado, verifica-se um aumento da geração de energia utilizando usinas termoelétricas baseadas em gás natural e energia nuclear (IEA, 2016).

Apesar dos investimentos na geração de energia elétrica utilizando fontes renováveis, as usinas termoelétricas à carvão, gás natural e urânio enriquecido continuarão tendo um papel predominante na produção de energia. A estimativa para 2040 é que as usinas termoelétricas que utilizam carvão, gás natural e nuclear ainda sejam responsáveis por 78% da produção mundial de energia elétrica (IEA, 2016).

Uma das principais vantagens deste tipo de usina é não haver uma dependência de condições climáticas para a geração de energia, como ocorre nas hidroelétricas. Outra vantagem é que as termoelétricas não têm restrição de localização como as usinas baseadas em fontes renováveis, que dependem de acesso a água, ventos ou luz solar. A restrição para este tipo de usina é o acesso ao material combustível da usina (SAJID, 2017).

Entretanto, as usinas termoelétricas têm grandes desvantagens do ponto de vista ambiental, pois na queima dos materiais combustíveis para gerar calor, emitem grande quantidade de gases poluentes na atmosfera, afetando diretamente o meio ambiente. Outro fator negativo desta usina é o tipo de material utilizado para a combustão, em geral combustíveis fósseis, que são um recurso escasso e finito na natureza (BRASCIANI, 2011).

A seguir, são descritos os principais tipos de termoelétricas utilizados na atualidade.

2.2.1 Termoelétrica a Gás Natural

São usinas termoelétricas que utilizam o gás natural como combustível na queima para geração de energia elétrica. Estas usinas não são consideradas renováveis, pois utilizam combustível fóssil como fonte primária da geração de energia. Este tipo de usina teve uma expansão significativa nos últimos 15 anos, por conta do aumento da oferta de gás natural – proveniente da Bolívia e de novos campos de petróleo no Brasil - para o setor elétrico brasileiro (ANEEL, 2008).

As usinas termoelétricas a gás natural vêm se configurando uma alternativa à implantação de novas usinas a carvão mineral nos EUA e na Europa. As emissões de gases poluentes por este tipo de termoelétrica são menores, em comparação a termoelétricas a carvão, tornando esta fonte ambientalmente mais compatível com as exigências ambientais impostas atualmente (SKONE, 2017).

2.2.2 Termoelétrica a Óleo Diesel

São usinas termoelétricas que utilizam o óleo diesel para geração de energia elétrica. Por utilizarem combustível fóssil para a geração de energia elétrica, estas usinas não são classificadas como renováveis. A aplicação direta deste tipo de usina de geração de energia elétrica é frequente em grupos geradores movidos à diesel, em comunidades isoladas, ou sistemas de proteção elétrica, como por exemplo, um sistema de proteção contra *blackouts* ou para suprir parte da demanda energética em momentos de crise energética (ANEEL, 2008).

2.2.3 Termoelétrica a Carvão Mineral

São usinas termoelétricas que utilizam o carvão mineral como combustível para a produção de energia elétrica. O carvão é um dos combustíveis mais utilizados para geração de energia elétrica no mundo, ao lado do óleo diesel e do gás natural. A

disponibilidade deste recurso e o custo reduzido para sua extração em diversos países, tornou o carvão mineral uma das principais fontes para geração de energia. O carvão mineral também não é classificado como renovável (SKONE, 2017).

Além disto, a usina termoelétrica a carvão tem alta emissão de CO₂ na atmosfera, sendo uma das mais poluidoras, causando inúmeros danos ambientais. No caso do Brasil, usinas termoelétricas a carvão podem ser encontradas, com mais frequência, na região Sul, como por exemplo, a usina de São Jerônimo onde há maior disponibilidade deste recurso para a geração de eletricidade (ANEEL, 2008).

2.2.4 Termoelétrica a Combustível Nuclear

São usinas termoelétricas que utilizam urânio enriquecido, em geral o Urânio U-235, como combustível para geração de calor e consequente produção de energia elétrica. O princípio de funcionamento destas usinas está centrado na fissão nuclear para gerar calor. Este calor aquece a água a temperaturas que podem chegar a 1500°C, transformando esta água em vapor com elevada pressão. Este vapor d'água com alta pressão faz girar turbinas a grandes velocidades, produzindo energia elétrica (NRC, 2014).

As usinas nucleares são consideradas eficientes, com grande capacidade de geração de energia elétrica, utilizando um combustível de baixo custo em comparação a outras termoelétricas. O custo de geração nas usinas nucleares fica em torno de 40 dólares por MW, mais caro apenas que usinas hidroelétricas e mais barato que todas as demais usinas termoelétricas (NEI, 2017).

Apesar de atender com eficiência as demandas técnico-econômicas como grande capacidade de geração de energia a um baixo custo, as usinas nucleares possuem uma grande desvantagem que é a geração de lixo radioativo, material resultante da fissão nuclear necessária para gerar energia elétrica. Este lixo radioativo deve ter um descarte adequado, isolado, para evitar dispersão da radiação, altamente nociva aos seres humanos (GONZALES, 2013).

O custo de manutenção da usina, que inclui o descarte de material radioativo é alto, pois estes devem ter um descarte adequado em locais apropriados. Além disso, acidentes com usinas nucleares, como a explosão da usina de Chernobyl, na Ucrânia e, mais recentemente, em Fukushima, no Japão, fizeram com que a comunidade internacional cancelasse projetos que utilizam usinas nucleares para produção de energia (GONZALES, 2013).

2.3 Fontes Renováveis de Energia Elétrica

O Sol é responsável por praticamente todo o desenvolvimento e manutenção da vida em nosso planeta, além de ser uma fonte de energia praticamente inesgotável. Esta estrela também é responsável pela evaporação das águas do mar e dos rios, provocando o ciclo das águas, permitindo que a água seja represada, possibilitando a geração de energia elétrica por meio de usinas hidroelétricas, sendo esta fonte energética responsável por 66,50% da energia elétrica produzida no Brasil (MME, 2016)

A irradiação proveniente do Sol também possibilita a geração de energia elétrica por meio de painéis fotovoltaicos. Entretanto, a luz e irradiação solar incidem de forma distinta sobre o planeta, dependendo da posição geográfica e dos movimentos de rotação e translação da Terra. A posição geográfica e o movimento de translação do planeta determinam o ângulo de incidência dos raios solares sobre uma determinada localidade. Um exemplo desta diferença de angulação são os raios solares que incidem de forma direta, perpendicular e constante sobre localidades posicionadas sobre a linha do Equador, enquanto nos Polos Norte e Sul verifica-se maior angulação dos raios solares, com grande variação da incidência dos raios solares. Por outro lado, o movimento de rotação da Terra gera períodos diários de baixa exposição, passando pela exposição completa e chegando a total ausência aos raios solares. A variação de incidência, ausência de irradiação e angulação solar são fatores que influenciam a geração fotovoltaica (ALMEIDA, 2012).

Esta mesma variação de angulação e incidência de raios solares gera as diferenças de temperatura entre as diversas localidades do planeta. A diferença de temperatura associada à diferença de pressão ocasiona a circulação de massas gasosas na atmosfera, gerando os ventos que, por sua vez, podem ser utilizados na produção de energia em turbinas eólicas (HIRATA, 2004).

Além disso, é importante ressaltar que grande parte da energia renovável é proveniente da queima de insumos provenientes da biomassa, cujo desenvolvimento tem relação direta com o Sol, como o carvão e óleos vegetais, madeira ou lenha, álcool de cana de açúcar ou milho, bagaço de cana e resíduos diversos (GALDINO et al, 2009).

Devido à sua localização privilegiada (região intertropical), o Brasil recebe grandes quantidades de irradiação solar, durante praticamente o ano todo, possuindo

um enorme potencial para geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis e, mais especificamente, para a geração fotovoltaica (RUTHER, 2004).

Atualmente, existem diversas fontes disponíveis para geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis, dentre elas pode-se citar: geração fotovoltaica, geração heliotérmica, geração termoelétrica a partir da incineração de resíduos de biomassa e biocombustíveis, geração hidroelétrica de grande porte e de pequeno porte, geração geotérmica, geração a partir das marés ou das ondas oceânicas e geração eólica (FRERIS, 2008).

Essas fontes de energia serão brevemente descritas nos itens que se seguem.

2.3.1 Geração Fotovoltaica

A energia solar é o recurso energético mais abundante na Terra, com cerca de 885 milhões de Terawatts-hora (TWh) atingindo a superfície do planeta a cada ano, o que significa 6200 vezes a energia primária comercial consumida pela humanidade em 2008, e 3500 vezes a energia que a humanidade deverá consumir em 2050, segundo a referência (IEA, 2014).

A energia solar fotovoltaica é obtida por meio da capacidade de materiais semicondutores em converter a luz solar em eletricidade. Os semicondutores são materiais que possuem condutividade elétrica que varia de um condutor (material que conduz eletricidade) até um isolante (material que isola a eletricidade), dependendo das condições físicas a que este material semicondutor é submetido. No caso dos semicondutores utilizados nos painéis solares, como o silício, a energia da luz incidente cria partículas móveis carregadas, que produzem corrente elétrica. Este processo é chamado de efeito fotovoltaico (BRAGA, 2008).

A irradiação solar que atinge a superfície da Terra é de cerca de 1 kW/m² em condições claras e quando o Sol está no zênite, ou próximo do ponto mais alto no firmamento, formando um ângulo de 90° graus com o horizonte. Esta irradiação possui dois componentes: a irradiação direta, que vem diretamente do Sol sem nenhum obstáculo e a irradiação difusa, que vem indiretamente por meio da atmosfera e sofre efeitos de absorção e reflexão pelas nuvens e pela umidade do ar. Para a geração de energia elétrica, os sistemas fotovoltaicos fazem uso da irradiância global, que é a soma das radiações direta e difusa (NOWAK, 2014).

Além das condições atmosféricas, outros fatores como o movimento de rotação e translação da Terra e a localização geográfica também afetam a disponibilidade de irradiação total incidente sobre a superfície terrestre. O movimento de rotação terrestre faz variar a angulação solar de uma determinada localidade em relação ao Sol. Esta variação da angulação permite expor um ponto geográfico à incidência de raios solares (dia) como também à total ausência de raios solares (noite). Da mesma forma, a latitude, a inclinação do eixo imaginário da Terra e o movimento de translação influenciam no ângulo de incidência dos raios solares em relação a um ponto geográfico terrestre (MAGNOLI e SCALZARETTO, 1998).

O posicionamento de um determinado ponto geográfico em relação ao Sol determina a quantidade de incidência de raios solares e, por consequência, a irradiação solar que este ponto recebe. A quantidade de irradiação solar incidente sobre um ponto geográfico determina o potencial de energia elétrica que poderá ser gerada por meio de células fotovoltaicas. Este potencial pode ser calculado por meio da obtenção da taxa de irradiação solar incidente sobre uma determinada posição geográfica terrestre (ALMEIDA, 2012).

Utilizando-se a coordenada geográfica da localidade, ou seja, sua latitude e longitude, é possível determinar o índice solarimétrico, visando a obtenção da taxa de irradiação incidente sobre este local. O índice solarimétrico está disponível no Atlas Solarimétrico do Brasil, estudo realizado pelo CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica), que contém o mapeamento da irradiação solar em todo o território brasileiro (CEPEL, 2000).

O cálculo da irradiação solar direta pode ser feito, com boa precisão, utilizando o método de Liu-Jordan/Hottel (LIU e JORDAN, 1960) e (HOTTEL, 1976). O fluxo de irradiação direta em uma superfície horizontal (I_{DH}) expressa em Wm^2 , em dias claros, é dado por (1) (FORTES e FERREIRA, 2013):

$$I_{DH} = I \cdot \tau \cdot \cos(\Phi) \quad (1)$$

Onde:

I_{DH} é a constante solar

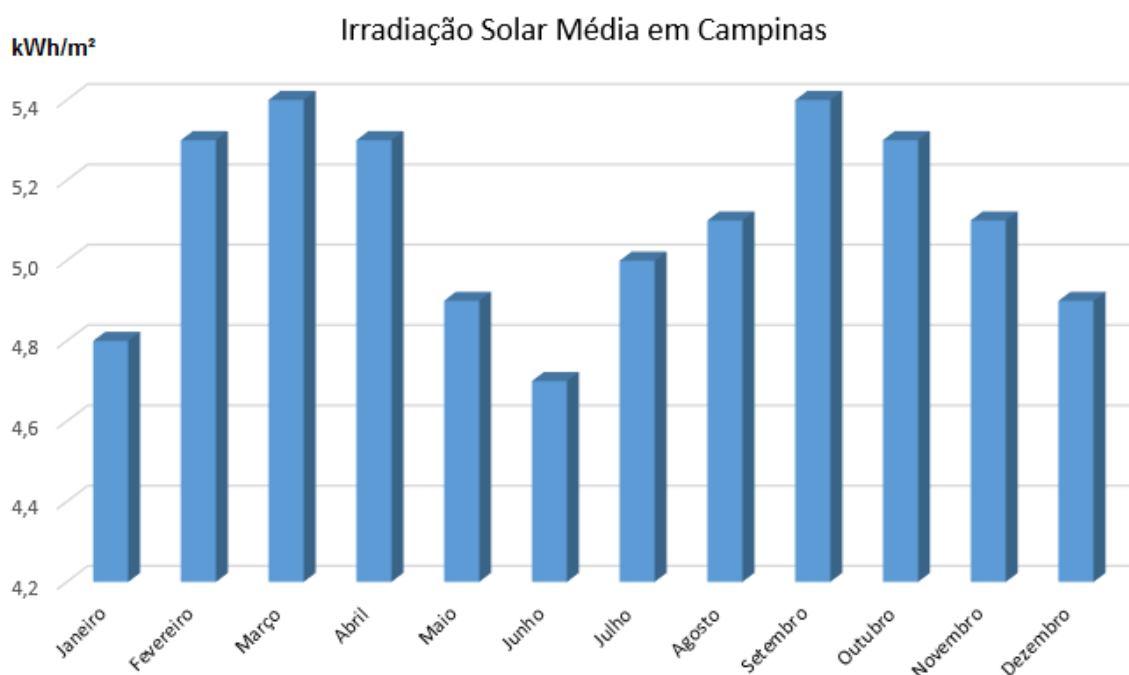
τ é a transmitância da irradiação direta através da atmosfera

Φ é o ângulo de zênite em graus

Na cidade de Campinas, estado de São Paulo, Brasil, o índice solarimétrico médio local é de 4,90 kWh/m²/dia. Entretanto, é importante salientar que há uma variação da irradiação solar ao longo dos meses do ano, que deve ser considerada no dimensionamento de sistemas fotovoltaicos a serem instalados.

A Figura 1 apresenta a variação da irradiação solar em Campinas durante os 12 meses do ano.

Figura 1 – Variação da Irradiação Solar em Campinas - SP



Fonte: CRESESB, 2017

O Brasil é um dos países de maior índice de irradiação solar no mundo, pelo fato da maior parte do território brasileiro estar situado numa região com incidência praticamente vertical dos raios solares, em quase todas as regiões. Além disso, a proximidade à linha do Equador faz com que haja pouca variação na incidência solar ao longo do ano, de modo que, mesmo no inverno, possa haver bons níveis de irradiação (TOLMASQUIM, 2016).

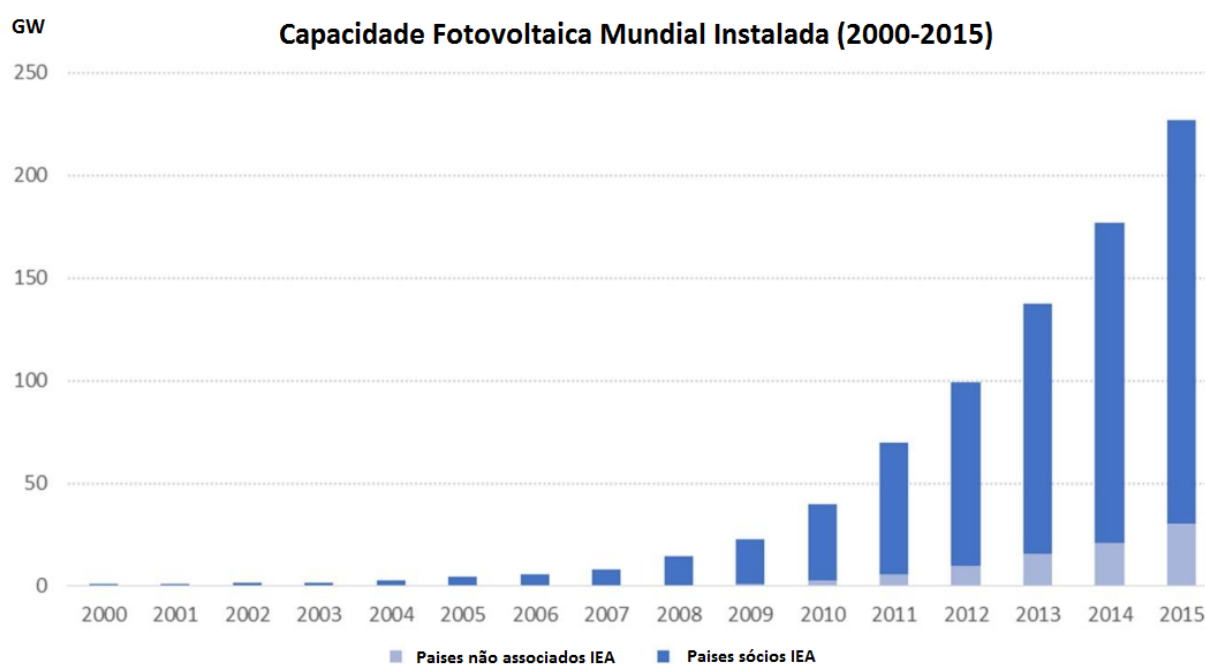
Somente em algumas áreas da região Sul do país encontram-se índices relativamente baixos de irradiação, comparada com outras áreas do Brasil. No entanto, a área de menor incidência solar no Brasil recebe quatro vezes mais irradiação que a melhor área de incidência da Alemanha (RUTHER, 2004).

A redução de custos de implantação e a facilidade de instalação têm feito com que a energia solar fotovoltaica se torne uma tendência mundial.

Segundo dados do International Energy Agency (IEA), foi registrado um crescimento recorde em 2015, com o mercado anual aumentando 25% em relação a 2014, onde mais de 50 GW de geração fotovoltaica foram adicionados, o equivalente a cerca de 185 milhões de painéis solares, elevando a capacidade global para cerca de 227 GW (IEA PVPS, 2015).

A Figura 2 apresenta a o crescimento da energia solar em todo o mundo.

Figura 2 – Capacidade Fotovoltaica Mundial Instalada



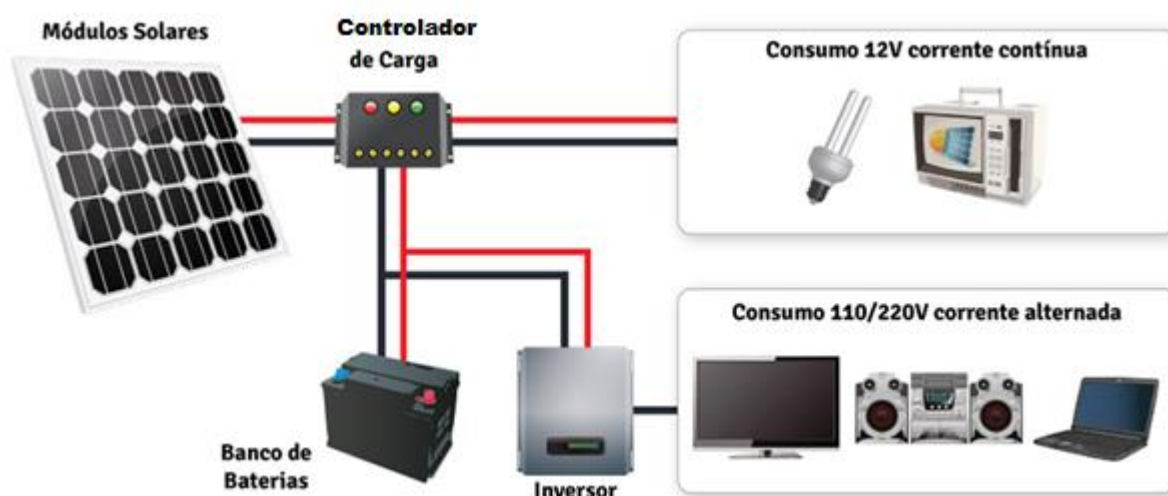
Fonte: Adaptado de IEA PVPS, 2015.

Nos últimos 15 anos, o foco da pesquisa e desenvolvimento de painéis fotovoltaicos esteve concentrado nos países ricos e mais desenvolvidos. Atualmente, os países em desenvolvimento, no qual se inclui o Brasil, também começaram a contribuir para o crescimento destas fontes de energia. Nos dias atuais, é possível verificar que a demanda por painéis solares vem aumentando de forma mais acentuada no mundo em desenvolvimento do que nos países ricos (REN21, 2016).

O sistema fotovoltaico, visto na Figura 3, utiliza painéis fotovoltaicos que captam a irradiação solar e a convertem em corrente elétrica contínua, conhecida como CC. Esta corrente passa por um controlador de carga que tem a função de gerenciar o processo de carga e descarga da bateria, permitindo seu carregamento completo e seu descarregamento até um limite determinado.

Por sua vez, esta corrente contínua pode alimentar diretamente um sistema de baterias CC, armazenando a energia produzida ou ser utilizada para alimentar equipamentos que utilizam CC. Entretanto, a maioria dos equipamentos eletrodomésticos em uma residência são alimentados em corrente alternada (CA). Para alimentar esses equipamentos é necessário um dispositivo para transformar a corrente contínua em alternada: um inversor CC/CA (HARRIES, 2013).

Figura 3 – Componentes de um Sistema Fotovoltaico



Fonte: (SUNLAB, 2017)

Nos dias atuais, existem duas possibilidades de instalação de um painel fotovoltaico ou um sistema de painéis fotovoltaicos no Brasil:

- 1) Sistema fotovoltaico conectado à rede de distribuição de energia elétrica, onde há produção de energia elétrica para atender a demanda local e o excedente desta produção ser disponibilizado à rede elétrica. Este excedente energético pode ser convertido em bônus tarifário ao usuário, reduzindo o custo da energia na residência (MIRANDA, 2014).
- 2) Sistema fotovoltaico desconectado da rede de distribuição de energia elétrica (*off-grid*), utilizando banco de baterias de alto desempenho (SPEIDEL, 2015).

O primeiro caso trata da aplicação da Resolução Normativa da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) nº 687/2015 (ANEEL, 2017) que cria um sistema de compensação de energia elétrica (*feed-in-tariff*) para micro e mini geração no sistema elétrico brasileiro, regulamentando e incentivando o uso de microgeração fotovoltaica em cidades brasileiras

O segundo caso trata do uso de geração de energia elétrica fotovoltaica em comunidades isoladas, fazendas, locais de difícil acesso ou locais onde incentivos tarifários (*feed-in-tariff*) não compensam para integração à rede. Neste caso, a utilização de bancos de bateria de alto desempenho para armazenamento de energia tem se tornado uma constante (SPEIDEL, 2015).

2.3.2 Geração Heliotérmica

A energia solar é praticamente uma fonte inesgotável e o recurso renovável mais abundante do planeta. Diversas tecnologias vêm sendo desenvolvidas para utilizar este recurso para produção de energia. Além da geração de energia elétrica por painéis fotovoltaicos, que é amplamente conhecida, existe uma outra forma de geração de energia elétrica utilizando os recursos provenientes do Sol que é a geração heliotérmica ou *Concentrated Solar Power* ou CSP (OLIVEIRA FILHO, 2014).

O princípio desta fonte de energia consiste na conversão da energia solar em energia térmica e por sua vez em energia elétrica. O sistema é baseado em uma série de coletores solares que captam a radiação solar, a convertem em calor e transferem este calor para um fluido, que pode ser água ou óleo (KALOGIROU, 2009).

A configuração mais usual dos geradores CSP é baseado na coleta da energia solar por meio de coletores de alto desempenho, conhecidos como concentradores. Estes dispositivos concentradores têm a função de concentrar a energia solar em um determinado ponto, gerando mais calor e por consequência aumentando o desempenho do sistema (MALAGUETA, 2012).

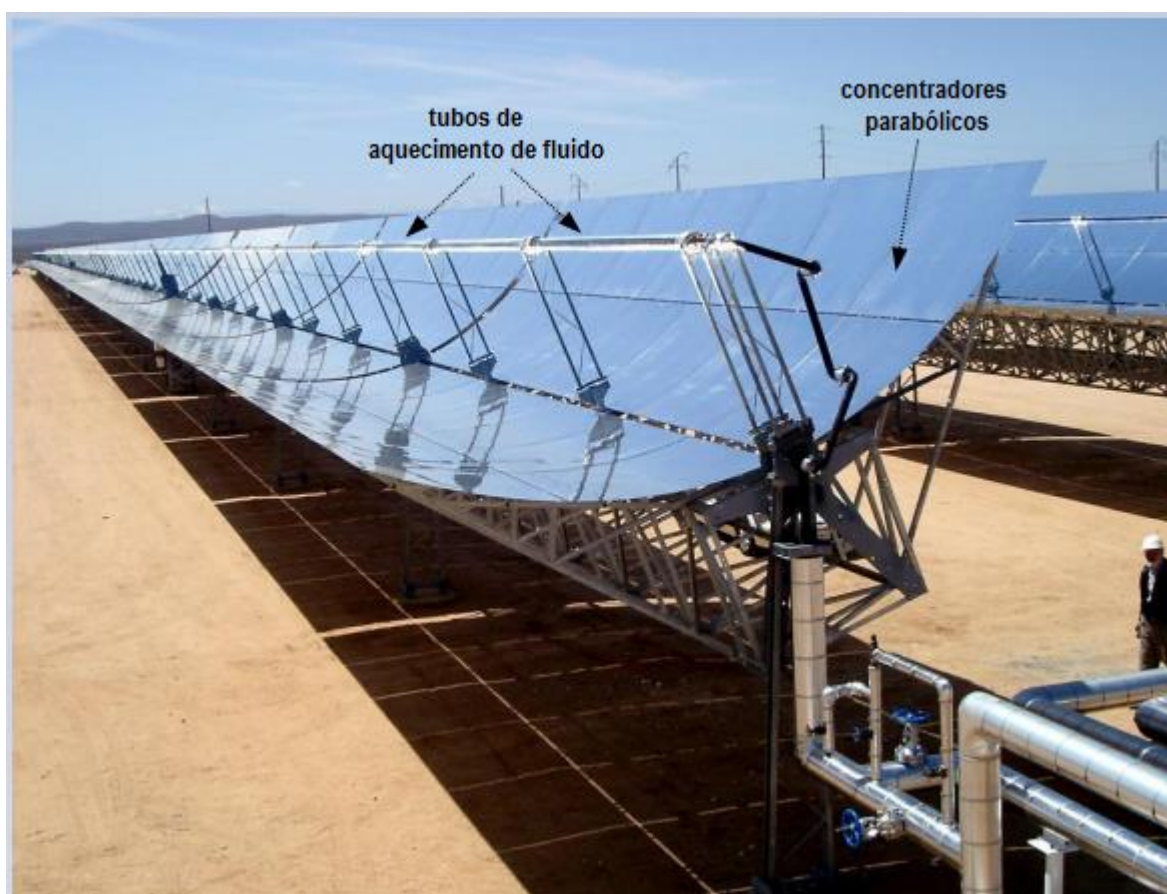
Os raios solares concentrados em um ponto focal têm função de aquecer um fluido (que pode ser a água ou um óleo) que passam por tubos utilizados na usina CSP. Por sua vez, este fluido aquecido, possibilita o aquecimento da água à até 400°C, gerando vapor à alta pressão, que por sua vez é enviado a turbinas para geração de energia elétrica (MALAGUETA, 2012).

Os concentradores são a base do sistema de uma usina CSP. Os concentradores mais eficientes utilizados são os concentradores parabólicos. Estes concentradores têm a função de refletir os raios solares em um ponto focal, que é um tubo receptor para o fluido circulante (KALOGIROU, 2009).

Esta energia solar concentrada aquece o fluido que circula dentro do tubo, para a geração de energia. Outros tipos de concentradores parabólicos utilizam espelhos para reflexão de raios solares e torres, que atuam como ponto focal para absorção da energia solar (KALOGIROU, 2009).

A Figura 4 demonstra o funcionamento de uma usina heliotérmica, onde podem ser vistos os concentradores de energia solar parabólicos e os tubos de aquecimento do fluido.

Figura 4 – Concentrador Parabólico de uma CSP



Fonte: RENEWABLE POWER NEWS (2009)

As usinas heliotérmicas ou CSP ainda são consideradas tecnologias em desenvolvimento, que necessitam de pesquisas para se tornarem financeiramente viáveis. Os EUA e a Espanha são os países que mais desenvolvem pesquisas voltadas às usinas heliotérmicas (MALAGUETA, 2012).

2.3.3 Geração Eólica

O vento é o ar em movimento, que é causado pelo aquecimento desigual da superfície da Terra pelo Sol. Um exemplo deste aquecimento desigual pode ser encontrado no ciclo dos ventos que ocorre em todo o planeta diariamente (EIA, 2016).

Durante o dia, o ar sobre a superfície da terra se aquece mais rapidamente do que o ar sobre a água dos mares. O ar quente sobre a terra se expande e sobe; e o ar mais pesado e frio se desloca para tomar seu lugar, criando vento. À noite, os ventos são invertidos porque o ar esfria mais rapidamente sobre a terra do que sobre a água. Da mesma forma, os ventos atmosféricos que circundam a Terra são criados porque a terra perto da linha do Equador é mais aquecida pelo Sol do que a terra perto dos Polos Norte e Sul (WEF, 2017).

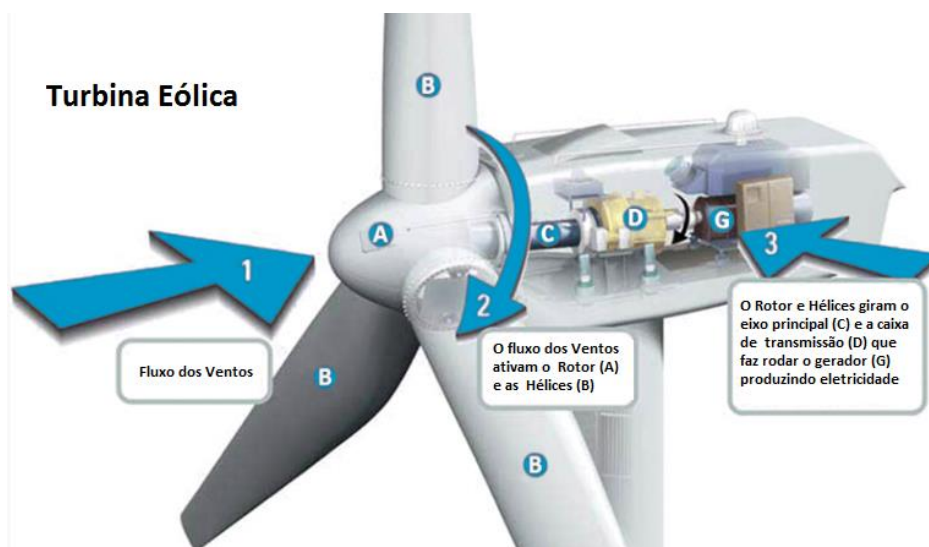
Uma turbina eólica, como todas as formas de fontes geradoras de energia, é um dispositivo que converte um tipo de energia em eletricidade. No caso da turbina eólica, a energia cinética dos ventos é transformada em energia elétrica por meio de um rotor aerodinâmico. A turbina captura o fluxo de ar que flui por meio das hélices ou pás rotativas do sistema eólico e a converte em energia elétrica através de um gerador elétrico (TREWBY, 2014).

O coeficiente de potência expressa a eficiência de uma determinada turbina eólica em converter a energia do vento em energia elétrica. Para que a turbina seja 100% eficiente, toda energia cinética gerada pelo fluxo de ar necessitaria ser interceptada pelas hélices do sistema e convertidas em energia elétrica pelo gerador (KRAUTNER et al, 1999).

Os pesquisadores Frederick Lanchester, Albert Betz e Nikolay Zhukovsky determinaram que uma turbina eólica de eixo horizontal, de rotor único, pode capturar um máximo de 59,3% da energia do fluxo de ar que passa pelo disco do rotor da turbina. Este máximo é conhecido como o de limite Betz, sendo este o coeficiente de potência máximo teórico de conversão de energia para qualquer turbina eólica (ROSEMBERG et al, 2014).

Uma turbina eólica, vista na Figura 5, é composta, basicamente, de hélices (**B**) conectadas à um rotor (**A**) instaladas em uma torre de sustentação. Esta turbina aproveita o fluxo dos ventos (**1**) para movimentar as hélices e o rotor. Por sua vez o rotor faz girar o eixo principal (**C**) e a caixa de transmissão (**D**) conectadas à um gerador elétrico (**G**), produzindo eletricidade (HIRATA, 2004).

Figura 5 – Turbina Eólica



Fonte: Adaptado de Hydro, 2017

Quanto maior a área varrida por estas pás rotativas, maior a energia cinética aproveitada e maior a energia entregue ao rotor. A Energia Cinética Bruta (P) por unidade de tempo, do vento passando por uma área perpendicular ao seu vetor velocidade instantânea, pode ser calculada de acordo com a Equação (2) (KRAUTNER et al, 1999):

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

Onde:

C_p é a razão entre a velocidade do rotor e a velocidade do vento

ρ é a densidade do ar

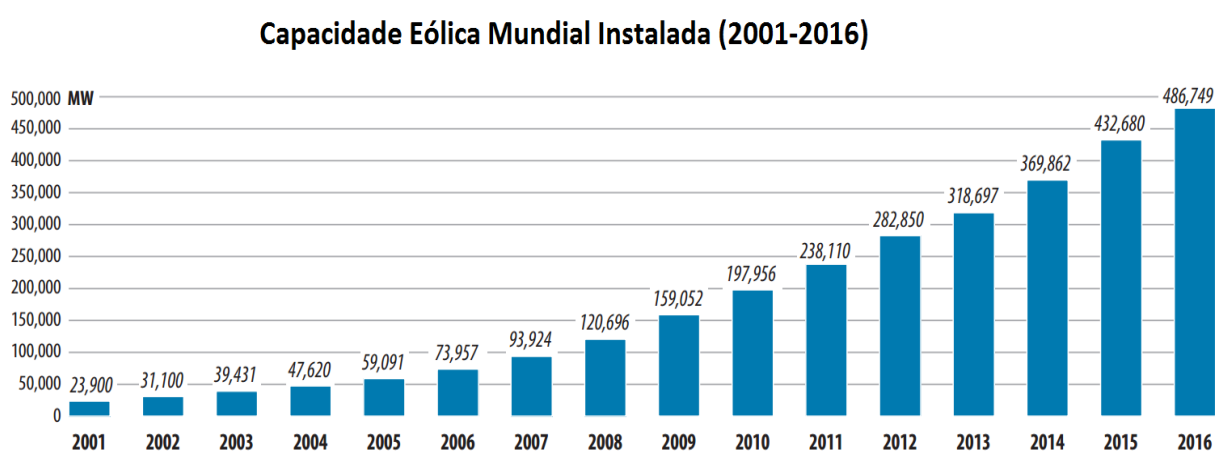
A é a área da circunferência formado pelas pás rotativas

V é a velocidade do vento

A usina eólica tornou-se mais eficiente em regiões costeiras onde há uma maior constância de ventos vindos do oceano. Atualmente, as usinas eólicas em terra (*onshore wind farms*) e usinas eólicas marinhas (*offshore wind farms*) são uma tecnologia estável e consolidada. Estão sendo implementadas constantes melhorias nos sistemas de potência, aumento de confiabilidade e conexão com as redes de distribuição. Da mesma forma, estão sendo desenvolvidos projetos que são mais fáceis de instalar, operar e manter. No entanto, o ambiente marinho será sempre exigente e, como resultado, a energia eólica marinha, provavelmente, permanecerá mais desafiadora e cara do que em terra (TREWBY, 2014).

Em todo o mundo pode-se verificar um grande potencial de geração de energia elétrica proveniente dos ventos. Até 2030, a energia eólica poderá atingir 2.110 GW e fornecer até 20% da demanda por eletricidade global, criando 2,4 milhões de novos postos de trabalho e reduzindo as emissões de CO₂ em mais de 3,3 bilhões de toneladas por ano e atraindo investimentos anuais de cerca de 200 bilhões de euros. A capacidade eólica mundial dos últimos 15 anos, apresentada na Figura 6, aponta o forte crescimento desta fonte em todo o mundo (GWEC, 2016).

Figura 6 – Capacidade Eólica Instalada Mundial em 15 anos



Fonte: Adaptado de GWEC, 2016.

Os ventos são uma constante em praticamente todo planeta, independentemente da posição geográfica, fazendo com que o potencial eólico mundial seja muito grande.

Estima-se que o potencial eólico bruto mundial é de 500.000 TWh por ano. Entretanto, existem diversas restrições socioambientais, como áreas para habitação, turismo, agricultura, reservas naturais, dentre outras, que reduzem o potencial para apenas 10% da estimativa bruta, que poderia ser efetivamente aproveitado para produção de energia. Desta forma, o potencial eólico líquido mundial e efetivamente praticável está na ordem de 53.000 TWh por ano, que mesmo assim, corresponde, atualmente, a quatro vezes o consumo mundial de energia elétrica (ANEEL, 2003).

O Brasil é um país com grande potencial eólico em diversas regiões, mas principalmente na região Nordeste, e com um mercado que mostra forte expansão nos últimos anos. A geração de energia elétrica a partir de fontes eólicas alcançou, em todo o país, a marca de 21,626 GWh em 2015. Dado este que significa um aumento de 77,1 % em relação à capacidade instalada no ano de 2014 (BEN, 2016).

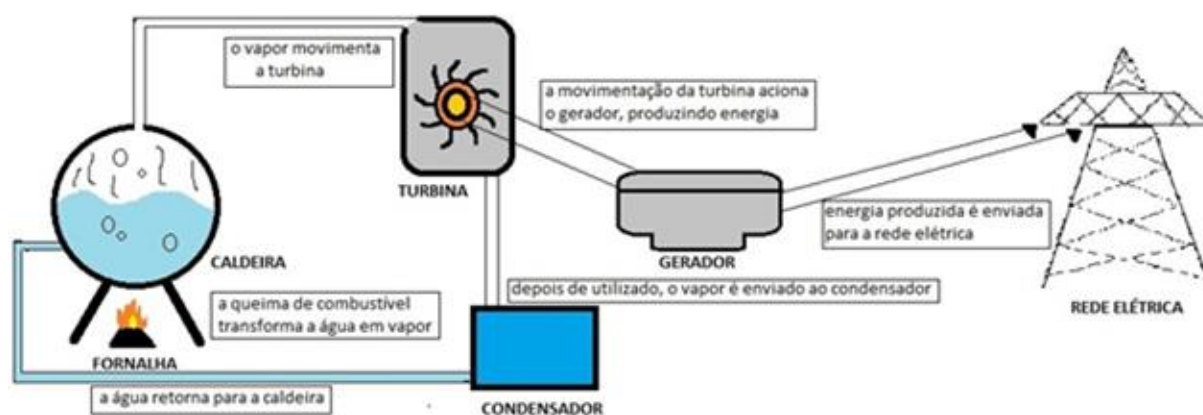
2.3.4 Geração Termoelétrica

A geração termoelétrica se baseia no princípio da conversão do calor (energia térmica) em eletricidade (energia elétrica). Entretanto, a conversão de energia térmica em elétrica, não se dá de forma direta, mas por meio de um processo de transformação (BRASCIANI, 2011).

O calor gerado na queima do combustível aquece um fluido depositado em uma caldeira, em geral a água, para que esta se converta em vapor à alta pressão. O gás também pode ser utilizado como substituto da água em algumas usinas. Por fim, este vapor ou gás aquecido à alta pressão faz movimentar as pás da turbina de um gerador, produzindo energia elétrica. As termoelétricas consideradas renováveis são as que utilizam biomassa como combustível, por se tratar de um recurso natural renovável (GOMES, 2010).

A Figura 7 apresenta o funcionamento de uma usina termoelétrica convencional e seus principais componentes.

Figura 7 – Esquema Básico de Uma Usina Termoelétrica



Adaptado de PEREIRA, 2013.

As termoelétricas ocupam o segundo lugar em geração de energia elétrica no sistema elétrico brasileiro. Inicialmente, estas usinas serviram como uma reserva estratégica do setor elétrico para suprir parte da demanda de energia quando as hidroelétricas não atendiam a demanda por conta de condições climáticas adversas, como a falta de chuvas que acarretam em baixo nível do reservatório de água, que pode gerar uma diminuição da geração de energia hidroelétrica. Outros fatores, como o aumento da demanda crescente no Brasil, a necessidade de expansão e diversificação da matriz energética brasileira possibilitaram o crescimento de termoelétricas em todo o país (TOLMASQUIM, 2016).

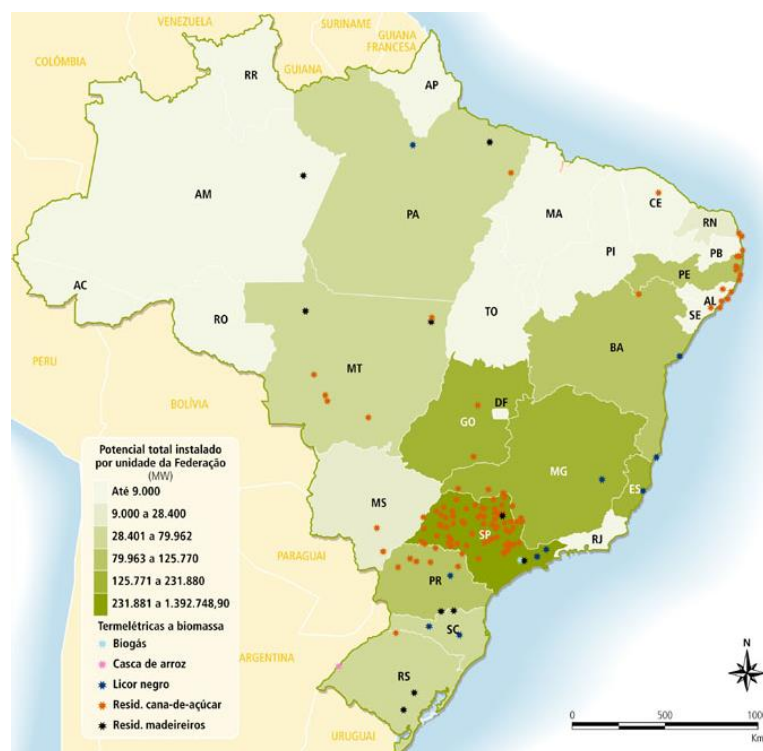
2.3.5 Termoelétrica a Biomassa

São usinas termoelétricas que utilizam a biomassa, ou massa biológica resultante de matéria orgânica, como fonte renovável para geração de energia elétrica. Uma das vantagens do uso desta usina é o reaproveitamento de materiais orgânicos que seriam descartados, tais como: carvão vegetal, resíduos de madeira, licor negro, biogás, capim elefante, óleo de palmiste. (TOLMASQUIM, 2016).

No caso do Brasil, com um setor agrícola desenvolvido, verifica-se uma grande produção de biomassa, que são resíduos das plantações de diversas culturas. Os tipos de biomassa mais utilizados são os resíduos de plantações de cana de açúcar e arroz (ANEEL, 2008).

Outra grande vantagem é que estas usinas estão localizadas próximas do centro de consumo, reduzindo custos associados à produção, como por exemplo, usinas de etanol, que utilizam o resíduo da matéria prima cana de açúcar, o bagaço de cana, para produção de energia elétrica que pode ser consumida pela própria usina (TOLMASQUIM, 2016). A Figura 8 apresenta as principais usinas de biomassa no Brasil e os respectivos materiais combustíveis utilizados.

Figura 8 – Usinas de Biomassa no Brasil



Fonte: ANEEL, 2008

2.3.6 Geração Hidráulica

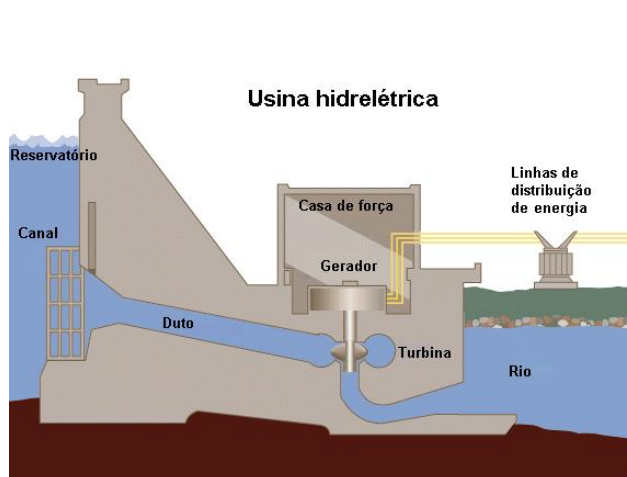
A água é o recurso natural mais abundante do planeta. Além de ser essencial para a manutenção da vida de todos os seres vivos, também pode ser utilizada para a geração de energia elétrica. Entretanto, a água não é distribuída uniformemente pelo globo, pois apenas um pequeno grupo de países possui 60% de toda a água doce disponível no mundo: Brasil, Rússia, China, Canadá, Indonésia, EUA, Índia, Colômbia e Congo (UN-WATER, 2017).

A água é uma fonte bastante apropriada para a geração de energia elétrica, principalmente no Brasil, rico em rios e cachoeiras, sendo um recurso natural abundante e também renovável. (MMA, 2017).

A usina hidroelétrica utiliza a energia liberada pela queda da água em uma barragem. A água represada cai, devido à gravidade, por um duto que faz girar as pás de uma turbina. Esta turbina, por sua vez, gera eletricidade (CASTALDI et al, 2013).

A Figura 9 apresenta o processo de produção de energia, onde a rotação das turbinas pela força das águas faz gerar eletricidade.

Figura 9 – Usina Hidrelétrica



Fonte: Adaptado de ANEEL, 2002

Antes que uma usina hidrelétrica seja construída, deve-se calcular a quantidade de energia que pode ser produzida quando a instalação estiver completa. A geração de energia em uma usina hidroelétrica é calculada através do fluxo de água que produz uma energia potencial em virtude de sua velocidade e da altura vertical da queda d'água. (ESHA, 2004).

A energia gerada por um fluxo de água que flui em um condutor transversal circular fechado, sob uma certa pressão, é dada pela equação (3) ou princípio de Bernoulli (ESHA, 2004):

$$H = h_1 + \left(\frac{P}{\gamma} \right) + \left(\frac{V^2}{2g} \right) \quad (3)$$

Onde:

H = energia total gerada pela usina

h_1 = altura da queda d'água

P = a pressão d'água

γ = peso específico da água

V = velocidade da água

g = aceleração da gravidade

Analisando a usina, sob o ponto de vista socioambiental, verifica-se que os custos de produção de energia por uma usina hidrelétrica são menores do que de outras fontes de geração. Havendo um menor custo de produção de energia, há a possibilidade da oferta de energia a custos mais baixos, tornando a energia elétrica mais acessível à população e para indústrias e empresas, incentivando a economia de países em desenvolvimento como o Brasil. Além disso, a construção e operação da usina trazem benefícios para toda a região onde é implantada, sob a forma de aumento de oferta de empregos, geração de renda, diversificação das oportunidades econômicas e geração de *royalties* (CASTALDI et al, 2013).

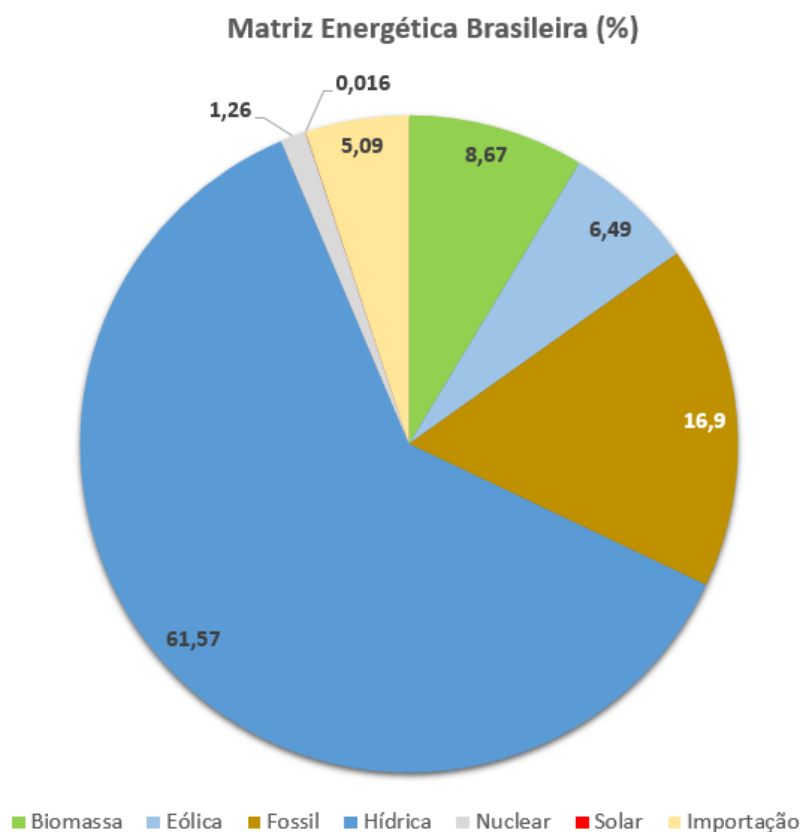
A usinas hidroelétricas possuem grande destaque em nível mundial. Em 2015, foram incrementados 28 GW na capacidade de produção das hidroelétricas (em todo o mundo), com capacidade global total de, aproximadamente, 1.064 GW. Os principais países produtores de energia hidroelétrica são a China, Brasil, Estados Unidos, Canadá, Rússia, Índia e Noruega, que em conjunto, representam cerca de 63% de toda a capacidade instalada de geração de energia hidroelétrica no mundo (REN21, 2015).

No Brasil, as hidroelétricas têm dominado o cenário de geração de energia elétrica há muitos anos. Entretanto, após a crise energética de 2001, houve a necessidade de incentivar uma maior diversificação da matriz energética brasileira, promovendo a geração por outras fontes para atender à crescente demanda interna

por energia elétrica. Neste período, observou-se o rápido crescimento implantação de termoeletricas que utilizam como combustível o gás natural e o óleo diesel para suprir a demanda interna. (LINS et al, 2006).

Além disto, pôde-se verificar uma expansão de outras fontes renováveis, como a eólica, a termoeletrica a biomassa e a fotovoltaica. A Figura 10 apresenta a matriz energética brasileira, onde há um predomínio de usinas que utilizam fontes renováveis para geração de energia elétrica, com destaque para as usinas hidroelétricas, configurando-se uma estratégia da política energética no Brasil (ANEEL, 2017).

Figura 10 – Percentual das Fontes na Matriz Energética no Brasil



Fonte: ANEEL, 2017

Pontos negativos a serem considerados em hidroelétricas estão associados a elevados custos de implantação das usinas e a danos ambientais causados pelo alagamento de terras para a construção de enormes reservatórios de água, necessários para a geração de energia. Também deve-se levar em conta a dependência climática para a geração da energia. A escassez de chuvas, nos últimos anos, no Brasil, e a conseqüente diminuição da geração de energia elétrica, evidenciaram este problema (TOLMASQUIM, 2016).

2.3.7 Usinas Oceânicas

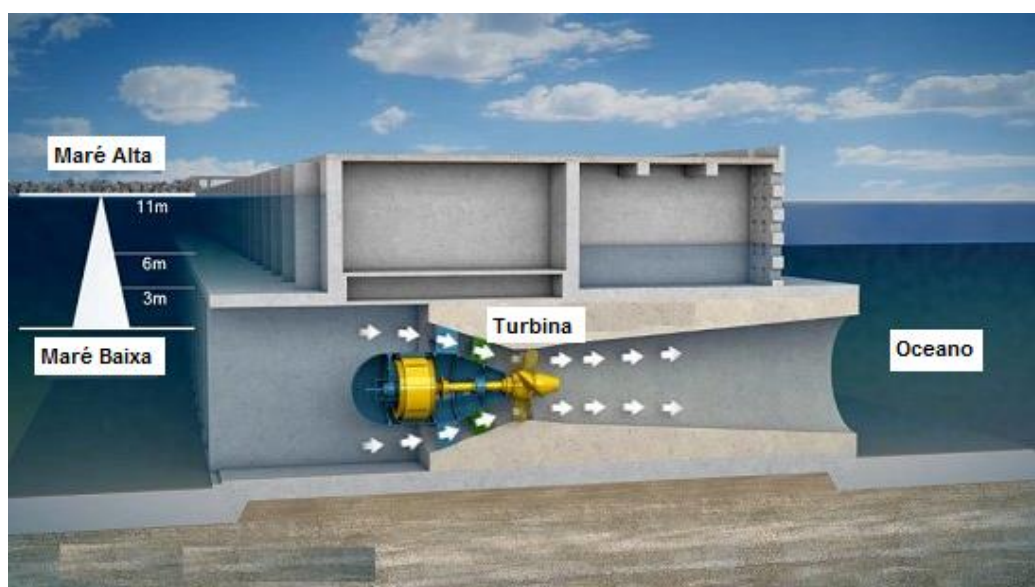
As usinas oceânicas se utilizam da energia proveniente das ondas e das marés para a geração de energia elétrica. (REN21, 2016). Três exemplos desta usina são descritos a seguir: fluxo de marés, correntes marítimas e de ondas.

As usinas de marés têm o princípio de funcionamento baseado no fluxo das marés. No período de maré alta, a água do mar é represada em um reservatório em um sistema de barragem de marés, enquanto que no período de maré baixa, a água sai do reservatório, movimentando as turbinas e possibilitando a geração de eletricidade (IRENA, 2017).

O mercado para a usina de marés oceânicas ainda não foi completamente desenvolvido porque a maioria das usinas ainda está em fase de desenvolvimento ou prototipação. Pesquisas nesta área vêm sendo desenvolvidas em diversos países como os EUA, Reino Unido, Japão, Rússia e Noruega, cada qual utilizando e desenvolvendo tecnologias diferentes para aproveitar as características da costa oceânica de cada país. Os dois maiores projetos de energia oceânica são os 254 MW da usina de Sihwa na Coreia do Sul e a usina de La Rance na França, que produz 240 MW (REN21, 2016).

A Figura 11 apresenta um exemplo de uma turbina utilizada em uma usina de marés na lagoa de Swansea, no País de Gales, Reino Unido.

Figura 11 – Exemplo de Usina de Marés



Fonte: Adaptado de REN21, 2016

Até o final de 2015, a capacidade global de potência de marés oceânicas permaneceu em, aproximadamente, 530 MW, principalmente na forma de energia coletada de barragens de marés. Em todo o mundo, o potencial que pode ser gerado por meio das ondas é estimado em 1 TW. Existem projetos para a expansão de usinas de ondas na Índia, Coréia do Sul, Filipinas e Rússia, agregando cerca de 115 MW. Projeções para novos projetos até 2020, estão na faixa de 200 MW (IRENA, 2017).

Apesar de utilizarem uma fonte renovável para produção de energia elétrica como o fluxo de marés, estas usinas ainda não são competitivas do ponto de vista comercial, pois apresentam baixa geração de energia elétrica (IRENA, 2017).

As usinas de correntes marítimas se assemelham as usinas eólicas, por retirar a energia da água em movimento. Estas usinas utilizam pás e rotores, conectados a um gerador de energia elétrica. Como a água é mais densa que o ar, as turbinas podem ser menores que as eólicas, produzindo a mesma energia. No entanto, as usinas de aproveitamento de correntes marítimas não têm um único formato padrão, como as usinas eólicas. As diferentes variações tecnológicas se devem ao fato da usina tem que ser adequada ao ambiente onde são instalados, com diferentes profundidades e fluxo das marés oceânicas (FLEMING, 2012).

A Figura 12 apresenta uma usina de correntes marítimas instalada da Irlanda do Norte, no Reino Unido.

Figura 12 – Usina de Correntes Marítimas da *SeaGen*



Fonte: SEAGEN, 2017

As usinas de ondas são uma fonte baseada na utilização da energia gerada pela movimentação das ondas para geração de energia elétrica. As ondas são geradas pelo vento, que circula em toda a superfície do mar e pela profundidade do mar próximo à costa litorânea. Assim como, as usinas de marés, existem diversos tipos de usinas de ondas que, basicamente, utilizam o mesmo princípio para geração de energia: utilizar o movimento das ondas para movimentar pistões, que por sua vez acionam os geradores que produzem energia elétrica. Esta é a base do funcionamento das usinas de ondas de Pelamis na costa de Edimburgo na Escócia e da usina de Aguçadora em Portugal (IRENA, 2017).

O Brasil possui uma grande área costeira e disponibilidade em diversos locais para instalação de usinas de ondas. O potencial brasileiro, em toda sua costa foi estimado em 114 GW (ESTEFEN, 2015).

A primeira usina de ondas da América Latina foi instalada, em 2012, no Ceará, próxima ao porto de Pecem. Este projeto foi implementado pelos pesquisadores da COPPE da Universidade Federal do Rio de Janeiro. A Figura 13 apresenta a usina de ondas de Pecem, no litoral brasileiro

Figura 13 – Usina de Ondas de PECEM-CE



Fonte: COPPE, 2017

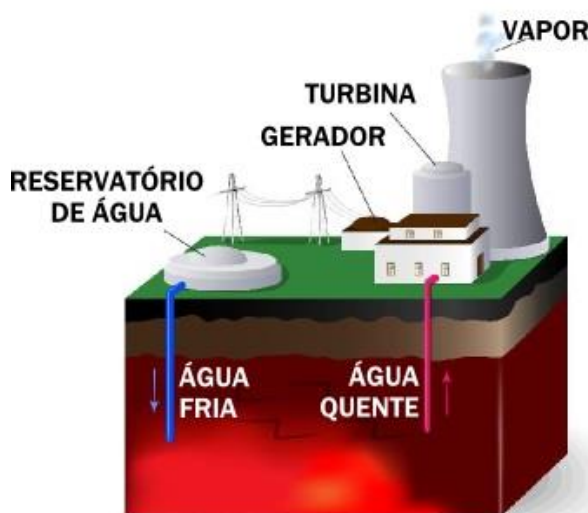
O sistema brasileiro é formado por flutuadores e um braço mecânico que são movimentados pelas ondas do mar, que acionam uma bomba para pressurizar a água conectada a uma câmara hiperbárica. A água pressurizada forma um jato d'água em alta pressão capaz de fazer movimentar uma turbina, que por sua vez, aciona o gerador de energia elétrica (COPPE, 2017).

2.3.8 Usinas Geotérmicas

O princípio das usinas geotérmicas é o de utilizar o calor (energia térmica) existente no interior na Terra, onde há áreas aquecidas pela proximidade com o magma, para produzir energia elétrica. O funcionamento desta usina é semelhante ao de uma termoelétrica convencional, onde o calor superaquece a água, produzindo vapor à alta pressão, sendo capaz de movimentar turbinas conectadas a um gerador de eletricidade (ARBOIT et al, 2013).

Esta geração ocorre utilizando a energia térmica contida em formações rochosas profundas, em áreas geotérmicas, onde as temperaturas giram em torno de 200°C a 320°C. Estas regiões são chamadas de áreas geotérmicas de alta temperatura. Estas regiões de alta temperatura são encontradas perfurando-se a profundidades entre 1200m a 3000m. Nas usinas geotérmicas são utilizadas turbinas de baixa pressão, que são acionadas pelo vapor gerado pela água aquecida após passar por dutos em contato com as áreas geotérmicas de alta temperatura (ELIASSOM et al, 2011). A Figura 14 apresenta o conceito básico de uma usina geotérmica.

Figura 14 – Funcionamento de uma Usina Geotérmica



Fonte: Adaptado de ARBOIT et al, 2013

Países com atividade vulcânica frequente tem um potencial geotérmico maior, pois podem utilizar sistemas de rochas quentes e secas, com temperaturas na faixa de 150 a 300°C, para aquecer a água, enviada por dutos a estas rochas. Entretanto, vários países vêm desenvolvendo estudos de viabilidade da energia geotérmica e estas pesquisas têm demonstrado que a sua utilização pode ser feita

em praticamente todo lugar, como em sistemas de baixa entalpia, conhecidas no Brasil como sistemas de águas quentes (ARBOIT et al, 2013).

O potencial geotérmico brasileiro está focado na utilização de recursos geotérmicos de baixa temperatura, na faixa de 50°C. Devido à baixa temperatura para geração de energia elétrica, grande parte do recurso geotérmico brasileiro é utilizada para recreação, como no parque de Caldas Novas, em Goiás. Este fato desestimula investimentos no setor para produção de energia elétrica. A real potencialidade da utilização de recursos geotérmicos brasileiros parece estar destinada a aquecimento de residências e sistemas de calefação (ARBOIT et al, 2013).

A utilização de energia geotérmica direta para aquecimento e para a geração de eletricidade total no globo são estimados em um total de 75 TWh. A maioria das usinas geotérmicas do mundo é encontrada na Islândia, Turquia, EUA, Filipinas, Indonésia, Japão, Nova Zelândia e México (REN21, 2016).

A Figura 15 apresenta uma usina geotérmica instalada na Islândia.

Figura 15 – Usina Geotérmica na Islândia



Fonte: REN21, 2016

A energia geotérmica é renovável e possui muitas vantagens sobre outros recursos energéticos renováveis, tais como: baixa dependência de fatores atmosféricos, pouca ocupação de solo para a usina, alta disponibilidade de recursos e baixos níveis de poluição (ELIASSOM et al, 2011).

Por outro lado, este tipo de usina mostra-se viável apenas em regiões geotérmicas de alta temperatura, onde o calor do interior da Terra apresenta-se praticamente na superfície, como nos vulcões e gêiseres, inviabilizando a instalação de usinas geotérmicas na maioria dos locais. Em regiões geotérmicas de baixa temperatura, como no Brasil, a utilização de dutos e canos de perfuração a grandes profundidades eleva o custo de implantação, operação e manutenção da usina, inviabilizando economicamente esta usina (ARBOIT et al, 2013).

2.4 Geração Distribuída (GD)

A geração distribuída (GD), também denominada de geração dispersa, difusa ou descentralizada pode ser considerada como a geração e armazenamento de energia elétrica em pequena escala, localizada próxima ao centro de consumo, com a opção de interagir com a rede elétrica (OLADE, 2011).

Entretanto, ainda não há uma definição única e clara do que é geração de eletricidade em pequena escala. Instituições internacionais do setor elétrico como o *Electric Power Research Institute* (EPRI) define a geração distribuída como uma geração de poucos kW até 50 MW, enquanto o *Gas Research Institute* define a geração distribuída como uma pequena produção de energia na faixa entre 25 kW a 25 MW (ACKERMANN et al, 2000).

As principais organizações internacionais e grupos de trabalho da indústria tentam chegar a uma definição para a geração distribuída e o seu respectivo limite de potência instalada (PURCHALA et al, 2006):

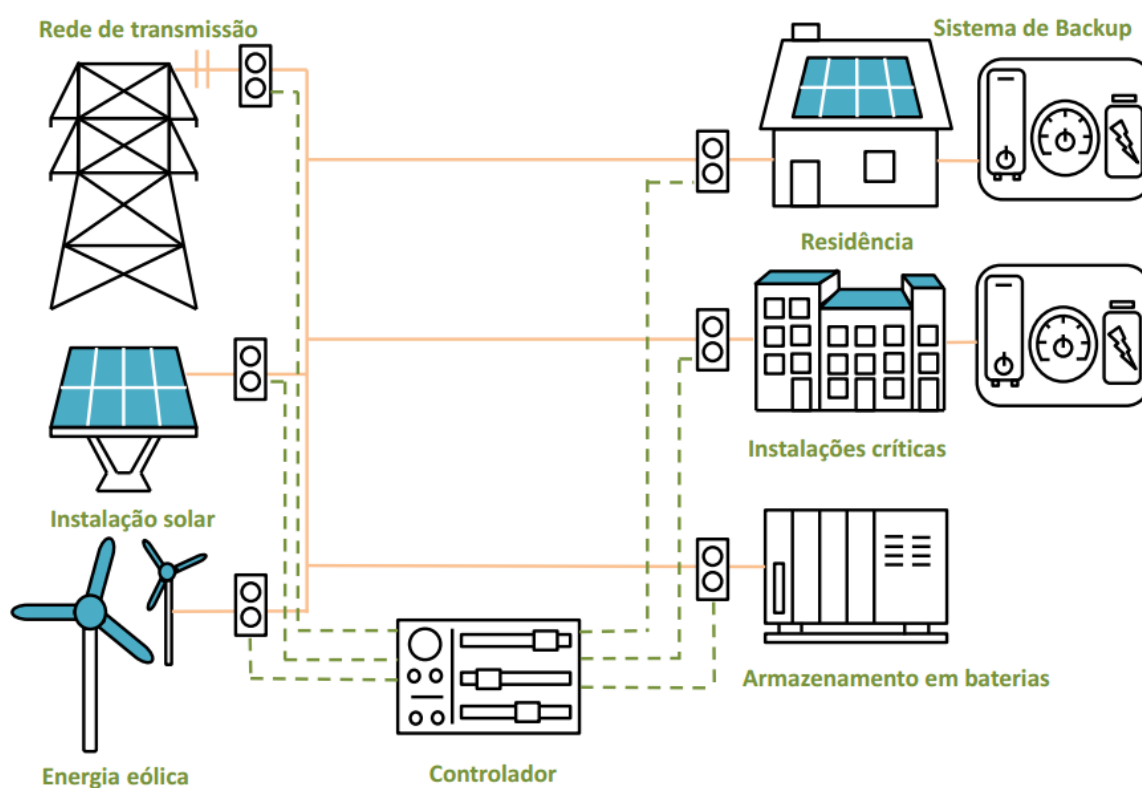
- a. O grupo de trabalho do CIREN (*International Conference of Electricity Distributors*), dedicado à geração distribuída, a define como todas as unidades de geração com capacidade máxima entre 50MW e 100MW, que são conectadas à rede de distribuição (CIREN, 2017)
- b. O IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), por outro lado, define a geração distribuída como a geração de eletricidade por instalações que são suficientemente menores que as centrais geradoras, de modo a permitir a interconexão em praticamente qualquer ponto de um sistema de energia (IEEE, 2017).
- c. A IEA (*International Energy Agency*), vê a geração distribuída como unidades que produzem energia próximo ao cliente ou dentro de concessionárias locais de distribuição, fornecendo energia diretamente à rede de distribuição local. A IEA não faz referência com relação ao nível de capacidade de geração (IEA, 2017).
- d. A ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) define a geração distribuída no Brasil por meio da Resolução Normativa 482 de 2012 (ANEEL, 2012) e alterada posteriormente através da Resolução Normativa 687 de 2015 (ANEEL, 2015).

Nestas resoluções, a agência brasileira define como microgeração distribuída uma fonte geradora de energia com potência instalada menor que 75 kW e como minigeração distribuída as centrais geradoras de energia elétrica com potência instalada entre 75 kW e 5 MW.

O setor elétrico passa por um momento de reestruturação e a geração distribuída associada a fontes renováveis de geração possuem um papel importante na definição deste novo cenário. O sistema elétrico, que antes era dominado por um sistema centralizado com grandes usinas de produção de energia, passa a ter geração descentralizada em diversos pontos da rede de distribuição. Conforme as tecnologias de fontes de mini e microgeração forem se desenvolvendo, ampliando a produção e reduzindo custos, a tendência é que se tenha mais inserção destas fontes no sistema elétrico (CARLEY, 2009)

A Figura 16 apresenta a geração distribuída conectada na rede de distribuição, utilizando fontes renováveis para produção de energia.

Figura 16 – Rede de Distribuição com Geração Distribuída



Fonte: Adaptado de IEEE PES Smart Grids, 2016

Na Figura 16, nota-se que a rede de transmissão entrega ao sistema de distribuição, a energia elétrica gerada de forma convencional, por meio das grandes

centrais elétricas, conectadas a rede de transmissão. Entretanto, verifica-se que além desse alimentador principal, existe a geração distribuída conectada na rede: No exemplo pode ser observada uma instalação de painéis fotovoltaicos e uma usina de turbinas eólicas. A energia gerada por estas fontes renováveis pode atender a demanda de um ponto da rede (exemplos: residência, hospitais), ou ser armazenada em um sistema de baterias, para que seja consumida posteriormente.

A redução do custo de investimento (capital inicial para a instalação dos geradores), a redução do custo operacional (custo de operação e manutenção do sistema) e o aumento da confiabilidade de pequenos geradores de energia elétrica, possibilitam a rápida inserção destas fontes no sistema elétrico (SOUDI, 2013).

Os principais tipos de GDs renováveis são os painéis fotovoltaicos, turbinas eólicas, usinas termoelétricas à biomassa, usinas de ondas e marés oceânicas, usinas geotérmicas e heliotérmicas. Em geral, são sistemas de geração distribuída de mini e micro geração de energia (<10MW) instalados próximos ao consumidor na rede de distribuição (BARBOSA e AZEVEDO, 2014).

As fontes de geração distribuída, por se tratarem de sistemas de geração de energia em pequena escala, podem ser dispositivos conectados ao sistema elétrico através da rede de distribuição de baixa tensão e conectadas a instalações de consumidores; ou podem ser sistemas geradores de energia elétrica independentes, desconectados da rede de distribuição elétrica (SPEIDEL e BRAÜNL, 2016)

As unidades de GD conectadas diretamente à rede de distribuição são definidas como *on-grid* e as unidades de GD sem conexão com a rede de distribuição, porém conectadas ao consumidor final, são definidas como *off-grid* (SPEIDEL e BRAÜNL, 2016).

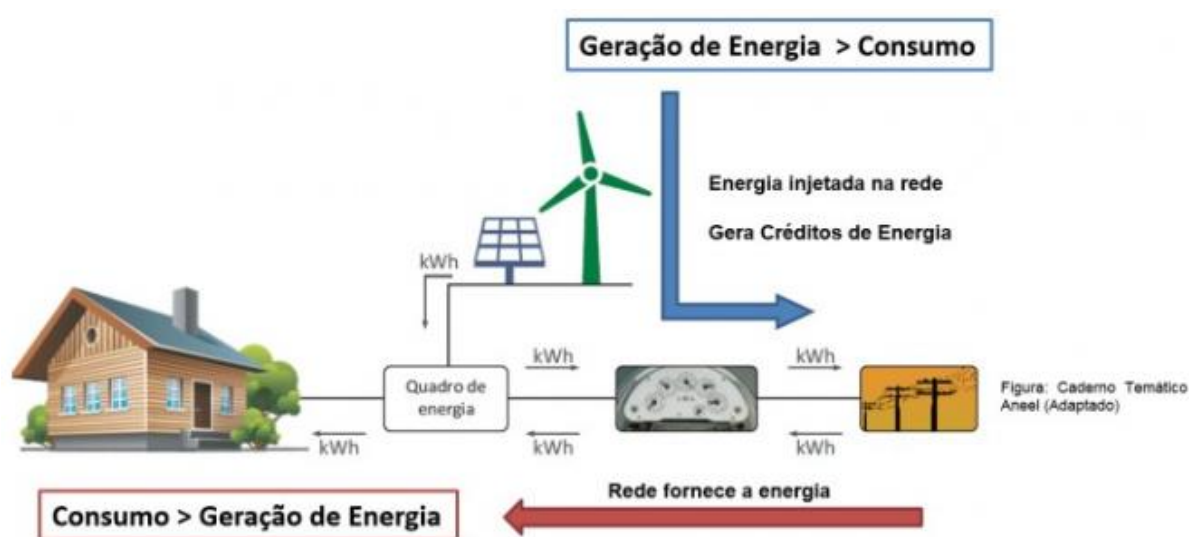
Os sistemas *on-grid* são as GDs conectadas à rede de distribuição elétrica e podem ser de diversos tipos e fontes de energia diferentes, como apontado acima (SPEIDEL e BRAÜNL, 2016).

No sistema *on-grid*, a conexão com a rede de distribuição permite que o excedente de produção de energia gerada pela GD seja disponibilizado para consumo em outros pontos da rede. No caso de cogeração de energia por uma usina termoelétrica à biomassa, como as usinas à bagaço de cana-de-açúcar, as empresas distribuidoras de energia compram e distribuem a energia elétrica produzida (BARBOSA e AZEVEDO, 2014).

No caso de microgeração de energia, como por exemplo a produção de energia de um sistema de painéis fotovoltaicos em uma residência, o excedente de energia produzida recebe, em geral, créditos tarifários (*tariff-in*) por esta produção (que servirá posteriormente como abatimento no custo total da energia elétrica) fornecidos pela empresa distribuidora a este consumidor/ produtor de energia elétrica (BARBOSA e AZEVEDO, 2014).

A Figura 17 apresenta um sistema de geração distribuída *on-grid*, onde há uma conexão com a rede de distribuição da concessionária de energia.

Figura 17 – Geração Distribuída *On-Grid*



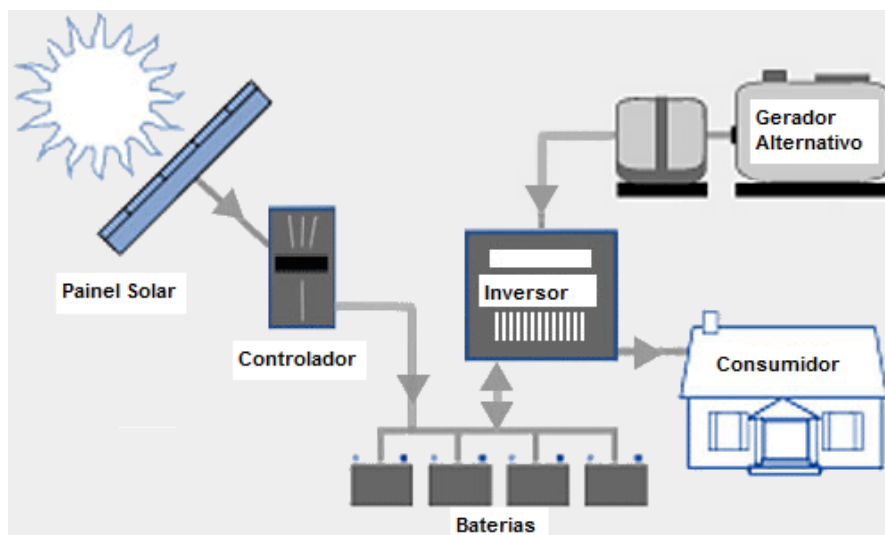
Fonte: ANEEL, 2016

Os sistemas de geração distribuída *off-grid* são, em geral, pequenos geradores de energia eólica ou fotovoltaica que atendem à demanda energética de uma pequena localidade ou até mesmo de uma residência. Estes sistemas estão se tornando possíveis com os avanços tecnológicos na produção de baterias, que estão se tornando mais eficientes e com custos reduzidos (SPEIDEL e BRAÜNL, 2016).

A utilização de sistemas GD *off-grid* em comunidades isoladas, fazendas, locais de difícil acesso ou localidades onde a rede de distribuição das concessionárias de energia elétrica ainda não possui interconexão, configura-se como uma possível solução para atender a demanda destes consumidores e reduzir custos com transmissão e distribuição (BARBOSA e AZEVEDO, 2014).

A Figura 18 apresenta um sistema de geração distribuída *off-grid*, onde há o armazenamento desta energia em bancos de baterias, entretanto não há conexão com a rede de distribuição elétrica.

Figura 18 – Geração Distribuída *Off-Grid*



Fonte: Adaptado de EI, 2017

2.4.1 Exemplos da Utilização da Geração Distribuída

A referência (SPEIDEL e BRAÜNL, 2016) analisa a microgeração distribuída utilizando painéis fotovoltaicos nas instalações do campus rural *Future Farm* da *University of Western Australia*. O campus foi instalado na sede de uma antiga fazenda que possuía apenas uma grande casa, que foi reformada para atender à Universidade. Esta residência possui um sistema de ar-condicionado e calefação, sendo estes os itens que mais consomem energia, em um consumo total estimado em 36kWh por dia. Esta casa é inteiramente mantida por um sistema de painéis fotovoltaicos *off-grid* com potência instalada de 10kW.

A utilização de fontes renováveis para geração descentralizada de energia vem se tornando realidade em várias localidades. Um exemplo está inserido na análise técnica e financeira de uma usina híbrida eólica e fotovoltaica na região de Caetité, na Bahia, Brasil (BARACCO et al, 2015). Esta região da Bahia mostrou-se promissora para a utilização de ambas as fontes. A região de Caetité possui ventos noturnos constantes e com alta velocidade, o que é propício à instalação de usinas eólicas. Esta região também possui um dos maiores índices de irradiação solar do Brasil, com média anual de 6 kWh/m² (AMARANTE et al, 2001).

A associação dos dois fatores (grande potencial de geração de energia fotovoltaica durante o dia aliada a um grande potencial de geração de energia eólica à noite) torna as usinas de Caetité viáveis técnica e economicamente. A usina fotovoltaica de Caetité tem uma potência instalada de 9 MW, enquanto a usina eólica possui 18 turbinas com capacidade de 1,65 MW cada, totalizando 29,7 MW. O parque de usinas renováveis de Caetité tem a capacidade instalada total de 38,7 MW (BARACCO et al, 2015).

Da mesma forma, verifica-se grande potencial de utilização de usinas de biomassa no estado do Rio Grande do Sul, no Brasil. Verifica-se que há grande produção de resíduos de biomassa provenientes de atividades agrícolas e florestais, como resíduos de madeira e casca de arroz. Entretanto, nota-se um sub aproveitamento destes materiais para geração de energia elétrica. A solução deste problema passaria pela geração descentralizada, por meio da implantação de pequenas usinas termoelétricas à biomassa, cada uma com capacidade instalada de 1 MW, espalhadas em diversas localidades do estado. As pequenas usinas termoelétricas ajudariam na redução do desperdício de biomassa, que chega a 2,9 milhões de toneladas de casca de arroz por ano e poderiam gerar em torno de 68 MW de energia elétrica com a queima da casca de arroz (GOMES et al, 2013).

A escassez de água em algumas regiões do Brasil, como no semiárido do Nordeste, inviabiliza a construção de grandes centrais hidroelétricas nesta região. O setor elétrico tem optado por implantar usinas termoelétricas a gás natural e óleo diesel para suprir a demanda energética nestas regiões. Entretanto, o custo operacional e a emissão de gases do efeito estufa por estas usinas são muito altos (TOMASQUIM, 2016).

Uma alternativa para geração de energia elétrica no semiárido brasileiro seria o uso de fontes renováveis para geração de energia elétrica: usinas híbridas a biomassa e heliotérmica ou CSP. Esta fonte se baseia no uso de espelhos concentradores parabólicos de raios solares para gerar calor, associada à queima de madeira encontrada na região, como o arbusto jurema-preta, para servir de combustível em pequenas usinas termoelétricas. Este arbusto é abundante no semiárido e tem um ciclo de produção de 8 anos. Neste sentido, as usinas CSP tornam-se viáveis, pois o semiárido da região Nordeste possui alto índice de irradiação solar (5,5 kWh/m²) e alta disponibilidade de solo, pois grande parte dos terrenos é desértico (SORIA et al, 2015).

A fazenda União, localizada no município de Barra, no estado da Bahia, possui uma área de 7000 hectares, com um volume aproximado de 539.000 m³ de madeira. No caso de instalação de uma usina híbrida nesta localidade, seriam necessários o uso de 627 hectares de madeira do arbusto jurema preta por ano. Além disso, seriam necessários 83,7 hectares de área para instalação de uma usina de CSP. Neste caso, a usina solar CSP seria responsável por 53,6% da geração e 46,4% da madeira. O potencial de geração de energia elétrica desta usina híbrida é de 30 MW (SORIA et al, 2015).

A seguir, são destacados os principais impactos, como os benefícios econômicos, ambientais e técnicos, além dos problemas e desafios encontrados na utilização da geração distribuída, com foco na GD renovável:

2.4.2 Benefícios econômicos com a utilização de GD

O crescimento econômico está vinculado ao acesso à energia elétrica. Países em desenvolvimento, como Índia e Brasil, tem uma demanda crescente por energia, de acordo com o crescimento dos setores produtivos da sociedade. Faz-se necessário desenvolver o setor elétrico para atender a esta demanda interna, diversificando a matriz energética. Entretanto, é importante criar uma política de incentivos à GD renovável que atenda a demanda energética destes países, reduzindo a necessidade da implantação de novas e grandes centrais de energia, que geram alto impacto ambiental e econômico (DESCATEAUX et al, 2016).

A redução de custos associados a geração, transmissão e distribuição é um objetivo comum do setor elétrico. A GD pode ter um papel fundamental neste processo de redução de custos (IRENA, 2017)

O aumento do consumo de eletricidade associado a crescentes restrições técnico-econômicas para a construção de grandes usinas, altos custos operacionais, crises financeiras e aumento da conscientização da população quanto às questões ambientais, fazem crescer a utilização de GD em todo o globo (REN21, 2016).

Os altos custos e as restrições técnicas à construção de novas linhas de transmissão e distribuição e os avanços tecnológicos em pequenos geradores, eletrônica de potência e dispositivos de armazenamento de energia, permitiram a redução dos custos destes dispositivos, e contribuíram para acelerar a disseminação da geração distribuída (HUNG e MITHULANANTAHN, 2013).

O novo cenário do setor elétrico com a instalação da GD em diversos pontos da rede de distribuição, proporciona uma redução dos custos de operação relacionados a perdas no sistema, em geral derivadas de perdas de potência na rede elétrica de distribuição, multas por interrupções de energia e sobrecarga da rede elétrica (CELLI et al, 2005).

Outro benefício da utilização de GDs é a possibilidade de diminuição ou até mesmo a eliminação da necessidade de compra da energia proveniente da concessionária. Isto gera um benefício imediato ao consumidor, visto que a conta de energia elétrica será menor (BARBOSA e AZEVEDO, 2014).

No caso do Brasil, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica permite que a energia excedente gerada pela GD funcione como uma bateria, armazenando este excedente. Quando a energia gerada e injetada na rede pela GD for maior que a energia consumida (venda de energia), o consumidor recebe um crédito em energia da concessionária. Quando o consumidor demandar energia da concessionária (compra de energia), os créditos gerados podem ser usados para abater este consumo (ANEEL, 2016).

Na Suécia, também são utilizadas políticas de compensação de energia elétrica, em forma de crédito, para residências que utilizem fontes renováveis para geração de energia elétrica, em geral painéis fotovoltaicos. O crédito dado a residências que geram excedentes à rede elétrica (venda de energia) é de €0.069/kWh (NYHOLM et al, 2017).

Além deste crédito tarifário, a Suécia, em conjunto com a Noruega, adotou em 2015, um certificado de energia renovável às residências que utilizam geração fotovoltaica distribuída. Este certificado permite incentivos financeiros aos consumidores, como a redução de taxa de juros de financiamento em bancos para implantação e expansão de sistemas de GDs baseados em fontes renováveis. Com este incentivo tarifário e certificado de renováveis, a Suécia vem, anualmente, desde 2014, dobrando o número de instalações residenciais de geração fotovoltaica distribuída (NYHOLM et al, 2017).

O governo da Austrália tem incentivado a implantação de sistemas de GDs fotovoltaicos através de políticas de compensação generosas (*feed-in tariff*), redução de juros para financiamento para instalação de renováveis e incentivos fiscais a indústria de células fotovoltaicas, que resultam na queda de preço destes painéis. A grande maioria da geração de energia, pelos sistemas de GD fotovoltaica na Austrália

é para consumo próprio. O uso de painéis fotovoltaicos tem trazido benefícios significativos aos australianos, com diminuição da dependência com a concessionária de energia e a redução do custo com eletricidade (OLIVA, 2017).

Apesar dos benefícios aos consumidores, verifica-se que em países como os EUA, Austrália, Espanha e África do Sul, a forte inserção de painéis fotovoltaicos na rede, o aumento da competição e a crescente redução no consumo de energia começam a ser sentidos pelas empresas distribuidoras de energia. Ações judiciais, pedidos de compensação e solicitações de aumento de tarifas começam a ser demandados pelas concessionárias de energia (OLIVA, 2017).

2.4.3 Benefícios técnicos com a utilização de GD

O sistema elétrico de potência (SEP) pode ser definido como um conjunto de equipamentos e instalações destinados à geração, transmissão e distribuição de energia elétrica (ABNT, 2008).

O sistema elétrico de potência foi projetado inicialmente para ter uma geração centralizada de energia, utilizando grandes usinas elétricas. Após a geração, esta energia é transmitida das grandes centrais elétricas até as empresas de distribuição elétrica dos centros de consumo, como por exemplo as cidades. Por fim, as empresas de distribuição se encarregam de distribuir a energia elétrica aos diferentes pontos de consumo do sistema de distribuição, como por exemplo indústrias, empresas, escolas, hospitais e residências (FERREIRA et al, 2016)

A desregulamentação dos mercados do SEP propiciou diversas mudanças no setor elétrico. Dentre as principais mudanças, a GD utilizando fontes renováveis tem ocupado um papel de destaque. A GD renovável abre caminho para uma maior diversificação da matriz energética (LUMBRERAS et al, 2017).

A maior parte da energia elétrica ainda é produzida pelas grandes centrais geradoras de energia, para depois ser transmitida e distribuída às unidades de consumo. Os equipamentos, as linhas de transmissão e as linhas da rede de distribuição possuem resistências elétricas (nos fios e cabos), que sofrem aquecimento durante a passagem de corrente elétrica, gerando perdas por Efeito Joule, conhecidas como perdas técnicas (CAVALHEIRO, 2016).

Em geral, as perdas técnicas são mais expressivas na rede de distribuição de energia, próximas aos centros consumidores. As soluções para redução das perdas técnicas passam por otimização das configurações da rede de distribuição,

substituição de cabos e equipamentos obsoletos, melhoria do gerenciamento do fluxo de energia reativa e adição de geração distribuída na rede de distribuição de energia elétrica (CAVALHEIRO, 2016).

As perdas técnicas nas linhas de transmissão e distribuição dependem diretamente da resistência das linhas e da corrente passante por elas. A utilização de geração distribuída renovável inserida diretamente no centro de consumo da energia elétrica, pode reduzir necessidade e a capacidade de novas linhas para atender o consumidor. Desta forma, a inserção de GD contribui para a redução das perdas técnicas na rede de distribuição (SOUDI, 2013).

2.4.4 Benefícios ambientais com a utilização de GD

Com o aumento da demanda energética em escala global, verifica-se a necessidade da diversificação da matriz energética. A construção de grandes centrais elétricas tem restrições ambientais e econômicas crescentes como alagamento de grandes áreas, a emissão de gases poluentes na atmosfera e custo elevado para construção; fatores que têm sido alvos frequentes de críticas da sociedade (TOLMASQUIM, 2016)

A geração distribuída vinda de fontes renováveis contribui para a diminuição da emissão de gases poluentes, gerando energia através de fontes renováveis e diminuindo a dependência por usinas que utilizam combustíveis fósseis, como carvão e gás natural, para a geração de energia elétrica (REN21, 2016; DESCATEAUX et al, 2016).

Além disso, a utilização de GD na produção de energia elétrica reduz a necessidade da utilização de grandes espaços para geração de eletricidade, como no caso da construção de novas hidroelétricas para suprir a atual demanda energética. Os painéis fotovoltaicos podem ser instalados no topo das edificações, turbinas eólicas *off-shore* podem ser instaladas na costa marítima de diversos países, as usinas geotérmicas extraem calor do subsolo, ocupando pouco espaço e usinas de biomassa são pequenas e se encarregam da queima de resíduos urbanos e agroindustriais que não seriam mais aproveitados pela atividade humana (SPEIDEL e BRAÜNL, 2016).

Associado ao crescimento econômico e à demanda crescente por investimentos em infraestrutura energética, verifica-se uma crescente participação de setores da sociedade que demanda um desenvolvimento sustentável e a utilização de

fontes de energia de baixo impacto ambiental. Nesta linha de pensamento sustentável, diversos países têm incentivado o uso de sistemas renováveis e evitado o uso de fontes que causam grandes impactos ao meio ambiente. A Alemanha, por exemplo, tem reduzido gradualmente a utilização de centrais nucleares e incentivado o uso de renováveis; o Reino Unido tem feito grandes investimentos em usinas eólicas *off-shore*; na Austrália, 15% das residências já possuem um sistema fotovoltaico instalado; nos EUA verifica-se grande aumento da geração fotovoltaica e no Brasil as usinas hidroelétricas vêm adotando o conceito de fio d'água, onde não é mais necessário um grande reservatório de água para geração de eletricidade, minimizando o impacto ambiental (CAMILO et al, 2017).

O aumento da eficiência e redução de custo de implantação das fontes de energia de geração distribuída renováveis, como painéis fotovoltaicos e turbinas eólicas, colocam estes sistemas como parceiros naturais na jornada rumo a um futuro de geração de energia mais sustentável (OLIVA, 2017).

Diversos aspectos já mencionados incentivam a inserção das GD renováveis. Entretanto, também existem problemas a serem considerados, conforme se segue.

2.4.5 Problemas ou desafios com a utilização de GD

Com a inserção de geração distribuída na rede elétrica, tem-se múltiplos pontos de geração de energia. Esta geração dispersa, não centralizada, gera impactos positivos e negativos no sistema elétrico (BARBOSA e AZEVEDO, 2014).

Um fator decisivo a ser considerado na geração distribuída renovável é a pequena capacidade de geração de energia, que apesar de ser uma característica da GD, também é uma importante restrição técnica (SINGHA et al, 2017).

Recentes avanços tecnológicos permitiram uma expressiva redução nos custos de produção, instalação e operação das fontes renováveis. Entretanto, o custo do kW instalado das renováveis é muito mais caro, comparado ao kW produzido pelas grandes centrais elétricas, como as grandes usinas hidroelétricas e termoelétricas. Entretanto, é importante frisar que existem grandes variações do custo de produção de energia entre os diferentes tipos de renováveis (SOUDI, 2013).

Grande parte das fontes renováveis de energia, como por exemplo os painéis fotovoltaicos e as turbinas eólicas, tem alta dependência de fatores atmosféricos como nuvens, precipitação e ventos para a produção de energia. Os

fatores naturais são inconstantes e causam grande imprevisibilidade na geração de energia elétrica por estas fontes renováveis (SPEIDEL e BRAÜNL, 2016).

Apesar de diversos benefícios ambientais, técnicos e econômicos relatados, a geração distribuída renovável possui grandes limitações quanto ao tipo a ser utilizado, pois depende diretamente de fatores ambientais para a geração de energia elétrica. Um exemplo a ser citado são os painéis fotovoltaicos que dependem da irradiação solar direta para obter uma boa produção de energia. No caso de nuvens, precipitações e alta umidade atmosférica, a produção do painel fotovoltaico diminui sensivelmente (SINGHA et al, 2017).

Outro problema a ser enfrentado com a inserção da GD reside no fato de que os sistemas elétricos de distribuição foram originalmente projetados para receber um fluxo unidirecional de potência. Com a inserção de geração distribuída, pode haver uma inversão no sentido do fluxo de potência pela rede, ocasionando problemas relacionados ao gerenciamento do sistema de proteção e à instabilidade da rede elétrica (MARINOPULOS et al, 2011).

Além disso, uma grande quantidade de pequenos geradores espalhados pela rede de distribuição pode gerar diversos problemas, como o aumento da complexidade de operação da rede, dificuldade na cobrança do consumo de energia elétrica, aumento na complexidade dos sistemas de controle e gerenciamento das redes (ANEEL, 2016).

Como já relatado anteriormente, a localização, o tipo e a capacidade de geração de uma GD renovável tem papel importante na redução de perdas em um sistema de distribuição. Uma GDs localizada no final do alimentador da rede de distribuição favorece a redução das perdas do sistema e melhoria do perfil de tensão. Entretanto, uma GD com capacidade e localização inadequadas pode ocasionar efeitos indesejados como o aumento das perdas técnicas e sobrecarga no sistema (PESARAN et al, 2017).

A fim de maximizar os benefícios e minimizar os problemas da inserção da geração distribuída, as agências regulatórias e empresas do setor elétrico têm estabelecido restrições técnicas para a integração de GDs na rede, como a exigência do uso de equipamentos de controle e proteção certificados e estabelecimento de limites de geração em residências (HUDA et al, 2017).

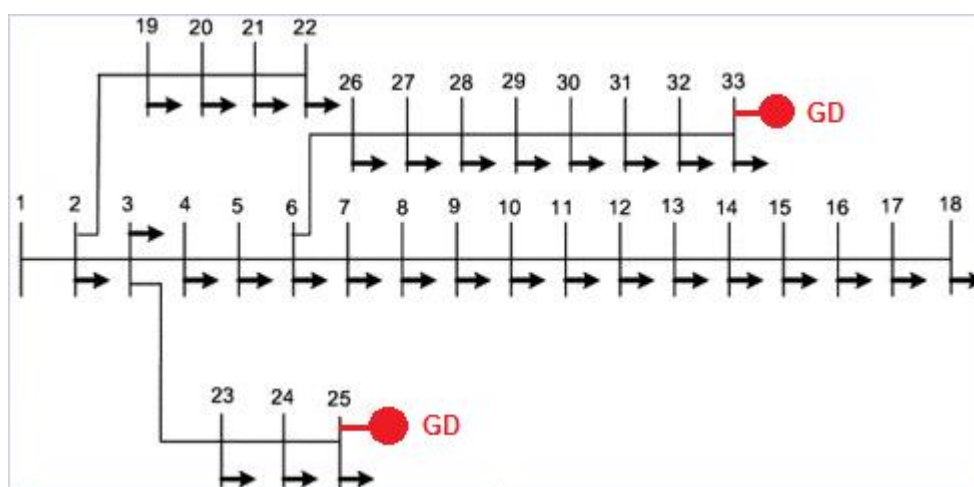
2.5 Inserção de Geração Distribuída no Sistema Elétrico

A inserção de geração distribuída, renováveis ou não renováveis, em uma rede de distribuição elétrica muda o paradigma do sistema elétrico de potência. A adição de múltiplas fontes geradoras de energia na rede adiciona outras variáveis ao sistema de distribuição, como novos fluxos de potência ativa e reativa e alteração no perfil de tensão na rede (ZHOU et al, 2013).

A inserção da geração distribuída baseada em fontes renováveis é uma tendência mundial. Entretanto, deve-se levar em conta que o sistema elétrico, inicialmente, foi projetado para a geração centralizada. Desta forma, a inserção da geração distribuída renovável no sistema elétrico de distribuição proporciona diversos impactos à rede, principalmente com o aumento da complexidade do planejamento e da operação do sistema elétrico (PESARAN et al, 2017).

A Figura 19 apresenta uma rede de distribuição de 33 barras IEEE, utilizada para testes, com duas GDs inseridas no sistema.

Figura 19 – Exemplo de Rede de Distribuição com GD



Fonte: Adaptado de TAMANDANI et al, 2014

Na Figura 19 verifica-se uma rede de distribuição com geração distribuída, onde a barra 1 é o alimentador principal (*feeder node*) do sistema. A rede se subdivide em diversos ramos (linhas) para atender os pontos de consumo do sistema, as barras de carga. Na barra de carga 25 e 33 estão inseridas GDs, que podem atender a demanda total ou parcial da barra ao qual está conectada, e das barras adjacentes, dependendo da capacidade de geração (tamanho) da GD.

Para atender a demanda de eletricidade de um ou vários pontos de consumo, a geração distribuída injeta novos fluxos de potência e elevam o perfil de tensão na rede, impactando no sistema.

Em uma rede de distribuição com geração centralizada, o gerenciamento e controle do fluxo de potência e do perfil de tensão são menos complexos de operar, em comparação à uma rede com múltipla inserção de geração distribuída. Desta forma, se faz necessário a adição de equipamentos de controle e proteção da rede, para evitar flutuação da tensão e sobrecarga do sistema (KEANE et al, 2010).

Devido ao fato dos sistemas elétricos de potência não terem sido projetados para responder à múltipla geração de energia, vários problemas técnicos devem ocorrer, como o fluxo bidirecional de potência, flutuação do perfil de tensão e a sobrecarga do sistema elétrico, gerando na instabilidade da rede elétrica. Para evitar estes problemas, as empresas de distribuição de energia elétrica devem tomar medidas de restrição e controle da inserção de geração distribuída na rede (MARINOPULOS et al, 2011).

Com o aumento da complexidade do gerenciamento e controle da rede, o planejamento passa ser uma atividade essencial para a estabilidade do sistema elétrico. Um planejamento adequado para a instalação de geração distribuída, em um ponto favorável na rede distribuição traz como consequência a redução das perdas de potência real e melhoria no perfil de tensão na rede (SINGHA et al, 2017).

O tamanho ou capacidade de geração de energia elétrica de uma GD, tem grande influência na redução das perdas na rede de distribuição. Diferentes tipos de GD estão disponíveis atualmente, que podem gerar desde poucos kW até 10 MW. As principais restrições para o tamanho das GDs são os limites de tensão da rede (para evitar sobrecarga no sistema), além dos limites de potência real, limites de potência reativa e os limites no fluxo de potência, para evitar o desbalanceamento da rede elétrica (ROJA e SUJATHA, 2016).

Além da capacidade de geração e localização adequada na rede, o tipo de geração distribuída, sendo renovável ou não renovável, também influencia na redução de perdas do sistema elétrico. Dependendo do tipo de tecnologia, a geração de energia pode entregar potência ativa, potência reativa ou ambas à rede de distribuição. A tomada de decisão pelo tipo de GD mais adequado a rede também faz parte do planejamento de inserção de geração distribuída (SINGH e SHARMA, 2017).

As GDs podem ser classificadas de acordo com a capacidade instalada de geração de energia elétrica (capacidade de geração) e o tipo de potência entregue à rede (tipo de tecnologia). Desta forma, é possível determinar o impacto que a inserção de uma determinada GD renovável (ou não renovável) terá na rede de distribuição elétrica (SINGH e SHARMA, 2017).

O tipo de GD, de acordo a tecnologia empregada, pode ser dividida em quatro categorias, conforme descrito na Tabela 2.

Tabela 2 – Tipos de Geração Distribuída

GD tipo 1	Entrega somente potência ativa à rede. Exemplos: painéis fotovoltaicos, sistemas solares e usinas à biogás.
GD tipo 2	Entrega potência ativa e reativa. Exemplos: turbinas eólicas, usinas de ondas, de marés e geotérmicas.
GD tipo 3	Entrega somente potência reativa. Exemplos: bancos de capacitores, indutores e motores síncronos.
GD tipo 4	Entrega potência ativa e absorve potência reativa. Exemplos: gerador eólico de indução de dupla alimentação.

Fonte: Adaptado de SINGH e SHARMA, 2017

O tipo de GD inserido na rede elétrica gera um determinado impacto, que deve ser alvo de análise, para o planejamento e operação do sistema de distribuição de energia elétrica. Em geral, a inserção de GD renovável entrega potência ativa e reativa permitindo a redução das perdas técnicas no sistema de distribuição da rede elétrica (SINGH e SHARMA, 2017).

As concessionárias de distribuição de energia elétrica, principalmente em países em desenvolvimento como o Brasil, enfrentam problemas de grande perda de potência e baixo perfil de tensão na ponta da rede de distribuição. De acordo com (ACHARYA et al, 2006), a inserção de GD pode contribuir para melhorar o perfil de tensão da rede de distribuição, diminuir as perdas, aumentar a qualidade do sistema e diminuir a volatilidade dos custos de geração de energia ocasionada pela variação dos preços dos combustíveis fósseis.

O planejamento adequado da inserção de geração distribuída na rede de distribuição gera benefícios à rede elétrica. Por meio de um planejamento bem executado, obtêm-se como resultado a redução das perdas técnicas e a melhoria do perfil de tensão na rede de distribuição. Estes são, em geral, os principais objetivos

do planejamento da inserção de geração distribuída. Uma vez alcançados estes objetivos, verifica-se uma melhoria da estabilidade e confiabilidade do sistema de distribuição (PESARAN et al, 2017).

Por outro lado, sem um planejamento e controle adequado, a inserção de GD na rede pode gerar instabilidade na rede elétrica (ROJA e SUJATHA, 2016).

Uma parte importante do planejamento, com a inserção da GD na rede, passa pelo cálculo do fluxo de carga (FC) ou fluxo de potência (FP). Através do cálculo do fluxo de potência, é possível calcular o perfil de tensão da rede e os fluxos de potência ativa e reativa. Com a inserção da geração distribuída, principalmente proveniente de fontes de energia renováveis no sistema elétrico, este cálculo se faz ainda mais necessário e importante (JANKOVIC e IVANOVIC, 2015).

Verifica-se, desta forma, que a inserção de geração distribuída, renovável ou não renovável deve ser analisada do ponto de vista técnico, para avaliação dos impactos que esta GD pode gerar na rede. Neste sentido, a inserção criteriosa possibilita efetivamente uma redução de perdas e a inserção de potência ativa e reativa na rede de distribuição (SINGHA et al, 2017).

A inserção de geração distribuída, tanto renováveis quanto não renováveis, tem se transformado em uma tendência mundial para suprir parte da demanda e reduzir os custos com energia elétrica dos consumidores. Porém, é de fundamental importância uma análise, sob diferentes aspectos, acerca de qual fonte de geração de energia é mais eficiente e quais seriam os impactos da inserção desta GD no sistema elétrico brasileiro.

Neste sentido esta pesquisa foi organizada em duas etapas, a saber:

A primeira etapa deste trabalho visa avaliar a eficiência das principais fontes de energia elétrica, tanto convencionais quanto renováveis, utilizadas no Brasil. Esta avaliação é feita utilizando metodologias de análise multivariável que permitem a verificação sob o ponto de vista técnico, econômico e ambiental.

A segunda etapa deste trabalho analisa os principais impactos da inserção da geração distribuída, que utilizam fontes renováveis ou não renováveis, no sistema elétrico brasileiro.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, são abordadas metodologias de análise multivariável para a comparação da eficiência de diferentes fontes de energia, renováveis e não renováveis, de energia elétrica no Brasil. Além disso, é apresentada uma metodologia para a realização de análises técnicas para inserção de geração distribuída no sistema elétrico brasileiro.

3.1 Metodologia para Análise da Eficiência de Fontes de Energia

Existem vários métodos para realizar análise multivariável e a escolha do método adequado é um dos critérios mais importantes (TRIANAPHYLLOU, 2000).

Para a avaliação de eficiência realizada neste trabalho foram escolhidos dois métodos, para efeito de comparação e análise os resultados: O método de Análise por Envoltória de Dados e o método PROMETHEE.

O método de Análise por Envoltória de Dados ou *Data Envelopment Analysis* (DEA), é uma das metodologias mais utilizadas para análise multicritério. O DEA é um método matemático de análise e comparação de eficiência das unidades analisadas, estabelecendo um indicador de avaliação da eficiência para estas unidades. Este método, oriundo da escola americana, faz uso de programação matemática para a determinação de unidades eficientes, sem interferência externa no resultado. O método DEA deve ser aplicado quando o decisor desconhece os critérios ou não tem preferências (FÄRE e GROSSKOPF, 1995).

O método PROMETHEE é um método de avaliação da eficiência de unidades, onde os critérios são analisados par a par entre as unidades, estabelecendo um índice de preferência para determinação da unidade eficiente. Este método, oriundo da escola francesa, permite a interferência de decisores externos, atribuindo pesos aos critérios. Este método pressupõe que o decisor externo tem conhecimento suficiente para estabelecer pesos sobre cada critério (ROMANO, 2015).

Neste sentido, este trabalho propõe-se a realizar uma análise comparativa da eficiência de fontes de energia, utilizando o método PROMETHEE e o método de Análise por Envoltória de Dados (DEA).

Dois trabalhos se destacam na literatura brasileira para o tratamento deste problema. A referência (DESTER, 2014) que utiliza o método PROMETHEE e a referência (LINS et al, 2006) que utiliza a Análise de Envoltória de Dados para a determinação da melhor fonte de geração de energia.

3.1.1 Método PROMETHEE

O PROMETHEE (*Preference Ranking Organization METHod for Enrichment of Evaluations*) é um método matemático de análise multivariável que auxilia os tomadores de decisão a encontrar uma melhor alternativa para um determinado problema que possui múltiplos critérios para serem levados em conta em uma avaliação (BRANS e MARESCHAL, 2005).

O método PROMETHEE é frequentemente utilizado em diversas áreas como no sistema bancário, investimentos, administração, medicina, química, turismo. Entretanto, recentes trabalhos apontam que o PROMETHEE pode ser utilizado para soluções técnicas, como no caso da escolha de painéis fotovoltaicos de junção múltipla (GIURCA et al, 2014).

O método PROMETHEE realiza a avaliação de critérios baseados em uma função de preferência, ou seja, a maximização ou minimização de um determinado critério para a escolha da melhor opção, a partir de comparações baseadas em uma análise par a par dos dados das unidades estudadas. As unidades são os objetos em estudo pelo método, como por exemplo as fontes renováveis de energia. Essas combinações são validadas conforme o número de ações e, então, é gerado um *ranking* das opções analisadas (SILVA, MORAIS, ALMEIDA, 2010).

O uso do método PROMETHEE requer dois tipos adicionais de informação para cada critério: um peso e uma função de preferência do critério. A primeira etapa do método consiste em estabelecer uma função de preferência e atribuir os pesos de acordo com a importância de cada critério adotado na análise.

A função de preferência caracteriza a diferença entre as avaliações obtidas por dois critérios da mesma grandeza, e varia de 0 a 1 (ROMANO, 2015).

Tem-se, então, três situações possíveis (ROMANO, 2015).

1. Se a diferença entre os critérios for superior ao grau de preferência o resultado da avaliação é 1.
2. Se esta diferença entre os critérios for inferior ao grau de preferência, o resultado da avaliação é 0.
3. E por último, se a diferença entre os critérios for próxima ao grau de preferência, o resultado da avaliação é o resultado de um valor calculado entre 0 e 1.

A próxima etapa consiste em agregar os graus de preferência de todos os critérios para cada par de decisões possíveis, segundo a Equação 4.

Para cada par de decisões possíveis “a” e “b”, é calculado um índice de preferência global (π). Seja C o conjunto de critérios considerados e w_j o peso associado ao critério j. $P_j(a,b)$ é o valor do grau de preferência de um critério j para duas decisões a e b.

$$\pi(a,b) = \sum_{j \in C} w_j \times P_j(a,b) \quad (4)$$

A atribuição de pesos aos critérios adotados pode possibilitar maior confiabilidade nos resultados obtidos na análise multicritério. Os pesos dos critérios são atribuídos por um decisor, que tem papel importante nesta metodologia. Desta forma, obtêm-se diferentes resultados, de acordo com o peso atribuído a um determinado critério (TAILLANDIER e STINCKWICH, 2013).

3.1.2 Método Análise de Envoltória de Dados

A Análise por Envoltória de Dados é uma técnica baseada em programação linear para determinar a eficiência relativa de unidades. Esta técnica baseia-se na medição da eficiência relativa entre unidades, considerando várias entradas e saídas e na identificação de unidades eficientes segundo critérios preestabelecidos, podendo também servir como um elemento comparador para uma unidade ineficiente, ou como um enfoque para o estabelecimento de metas eficientes para cada unidade produtiva (CHARNES e COOPER, 1978).

O uso do método DEA para medir a eficiência relativa de empresas e unidades produtivas tem-se mostrado bastante atrativo em diversos setores de aplicação. Este método pode apoiar as decisões dos agentes públicos e empresas privadas, ao indicar as fontes de ineficiência e as unidades que podem servir de referência às práticas adotadas (FÄRE e GROSSKOPF, 1995).

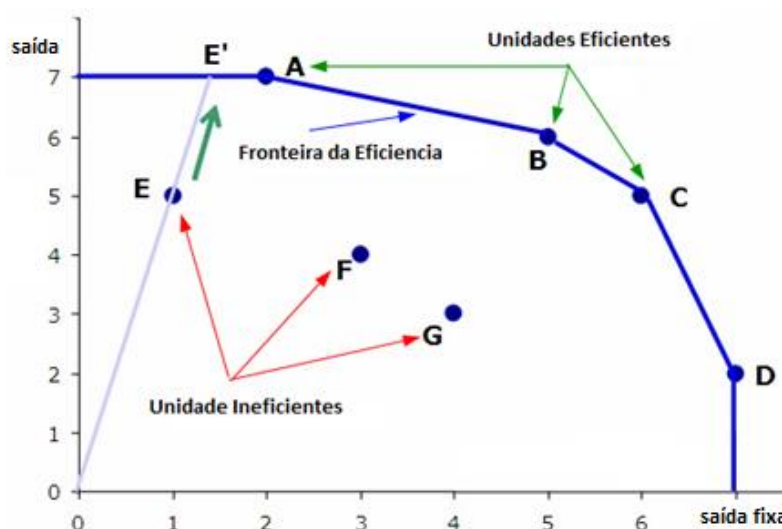
A abordagem por DEA, utiliza programação linear para estimar a fronteira da eficiência, que é um limite hipotético de eficiência das unidades estudadas, como apresentado na Figura 20. Esta metodologia é capaz de incorporar diversas entradas (recursos, insumos ou fatores de produção) e saídas (produtos) para o cálculo da eficiência de unidades tomadoras de decisão, designadas por DMUs ou *Decision Making Units* (BANKER, CHARNES, COOPER, 1984).

Por meio da resolução de problemas de programação linear (PPLs) o método DEA calcula a distância de cada unidade com relação à fronteira de eficiência. As unidades ou DMUs que se encontram neste limite são consideradas eficientes. Quanto mais distante da fronteira de eficiência, menos eficiente é a unidade.

A Figura 20 apresenta a eficiência relativa de diversas DMUs analisadas pelo DEA. As unidades *A*, *B*, *C* e *D* encontram-se no limite da eficiência relativa e são consideradas eficientes pelo método DEA. As unidades *E*, *F* e *G* estão distantes do limite de eficiência relativa, e, portanto, são consideradas ineficientes.

A distância entre o ponto *E* (ineficiente) e o ponto *E'* (eficiente) é uma medida de quanto falta para *E* ser considerado eficiente. Quanto mais distante *E* estiver de *E'* menos eficiente é a unidade.

Figura 20 - Fronteira da Eficiência das DMUs



Fonte: Adaptado de UNISINOS, 2017

Considere um conjunto com n unidades de decisão ($j = 1, \dots, n$) cada qual usando x_{ij} entradas ($i = 1, \dots, m$) e gerando s saídas y_{rj} ($r = 1, \dots, s$). Se os multiplicadores u_r e v_i , associados às saídas e entradas respectivamente e eficiência E_j de uma unidade j definida a partir do conceito tradicional, pode ser escrita conforme a equação 5 (ZHU, 2014):

$$E_j = \frac{\sum_{r=1}^s U_r Y_{rj}}{\sum_{i=1}^m V_i X_{ij}} \quad (5)$$

A equação (5) acima só é válida quando se conhece ou se atribui valores aos multiplicadores. Quando os multiplicadores não são conhecidos Charles et al. (1978) propôs o problema de programação matemática a seguir em (6):

$$E_o = \text{Max} \frac{\sum_{r=1}^s U_r Y_{ro}}{\sum_{i=1}^m V_i X_{io}} \quad (6)$$

$$\text{Sujeito à: } \sum_{r=1}^s U_r Y_{rj} - \sum_{i=1}^m V_i X_{ij} \leq 0 \quad \text{para todo } j$$

$$U_r, V_i > 0$$

Este é um modelo de programação não linear também conhecido como CCR (Charnes, Cooper and Rodes). Assumindo como unitário o maior valor para o denominador da função objetivo na Eq. 7 no sentido de tornar o problema linear, o problema acima pode ser reescrito como:

$$E_{CRSO} = \text{Max} \sum_{r=1}^s U_r Y_{ro}$$

$$\text{Sujeito à: } \sum_{r=1}^s U_r Y_{rj} - \sum_{i=1}^m V_i X_{ij} \leq 0$$

$$\sum_{i=1}^m V_i X_{io} = 1 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} U_r, V_i > 0 & \quad j = 1, \dots, m \\ & \quad r = 1, \dots, s \\ & \quad i = 1, \dots, m \end{aligned}$$

3.1.3 Estudos de Caso

Foram identificados, na literatura brasileira dois estudos de caso relevantes (LINS et al, 2006) e (DESTER, 2014) que apresentam a avaliação do desempenho de fontes de energia elétrica de forma sistêmica. Neles, as variáveis de decisão não são vistas somente sob a ótica econômica. Impõe-se a necessidade de incorporar a interdisciplinaridade, pela inclusão dos aspectos sociais e ambientais.

3.1.4 Conjunto de dados 1

Este primeiro caso (LINS et al, 2006) analisou diversas fontes renováveis utilizadas para geração de energia no cenário brasileiro, com exceção das grandes usinas hidroelétricas. Estas fontes renováveis foram denominadas como fontes alternativas de energia renovável (FAER), visto que as grandes usinas hidroelétricas são a fonte primária de geração no sistema elétrico brasileiro e também são consideradas como baseadas em fonte renovável.

Este estudo considera aspectos ambientais, sociais, técnicos, operacionais e econômicos na análise, visando a aplicabilidade de diversos critérios para geração de energia elétrica que não são puramente voltados à questão técnico-econômica.

Os dados de fontes de energia utilizados na avaliação do Caso 1 foram as usinas termoelétricas a gás natural, usinas de geração de energia eólica, painéis fotovoltaicos, as PCHs ou pequenas centrais hidrelétricas, usinas de aproveitamento de bagaço de cana, casca de arroz, incineração de rejeitos e gás de lixo, como apresentado na Tabela 5.

Cada fonte alternativa de energia foi analisada por Análise de Envoltória de Dados tendo como objetivo a maximização da eficiência considerando como:

Entradas (insumos): custo de operação e manutenção adicionados ao custo do combustível e custo de investimento.

Saídas (produtos): potencial de geração de energia, criação de empregos, emissão de gases poluentes na geração de energia.

Como a emissão de gases poluentes é uma saída indesejada seus valores, apresentados na Tabela 4 foram invertidos quando da realização dos cálculos.

A Tabela 3 apresenta os dados utilizados no conjunto de dados 1. Nesta tabela são listadas as fontes alternativas, o custo de investimento e operação e manutenção (O&M) e custo dos combustíveis (CC), emissão de gases por fonte, capacidade de geração de energia elétrica (EE) e empregos diretos gerados.

Tabela 3 – Entrada e Saída para as Fontes Renováveis

Fontes Alternativas de Energia Renováveis	Entrada		Saída		
	Custo		Ambiental	Técnico	Social
	O&M e CC	Investimento	Emissão de Gases	Geração de EE	Empregos
Termoelétrica - casca de arroz	300	6800	2,5504	1	24,98
Termoelétrica - GDL - gás de lixo	1001400	68000	1,0000	21,82	7,5
Termoelétrica - incineração de resíduos	1004000	12000	2,4759	14	23,37
BEM - reciclagem e incineração	1006400	92000	2,4325	18,74	11,91
Termoelétrica - DRANCO - biogás	1004200	85000	2,9931	18,32	15,13
PCH - pequena central hidroelétrica	270	21000	1,7030	12,79	21,49
Turbina eólica	7700	272200	1,7033	11,28	43
Solar fotovoltaica	300	49000	1,7563	8,28	76
Termoelétrica - bagaço de cana	250	133200	1,7191	66,81	14,96
Termoelétrica - UTE GN CC - gás natural	600	83200	1,5823	32,28	18
Termoelétrica - UTE GN Merchant - gás	600	81400	1,5454	28,28	27

Fonte: Adaptado de LINS et al, 2006

3.1.5 Conjunto de dados 2

O segundo conjunto de dados (DESTER, 2014), denominado como fontes geradoras de energia elétrica (FGEE), é composto por diversas fontes de energia convencionais e renováveis disponíveis no Brasil atualmente.

As fontes analisadas foram: usinas hidroelétricas de reservatório e a fio d'água; termoelétricas a gás natural, carvão, óleo combustível e nuclear; usinas eólicas *onshore* e *offshore*; termoelétricas a biomassa; solar fotovoltaica e heliotérmica e pequenas centrais hidroelétricas.

A Tabela 4 apresenta os dados utilizados no conjunto de dados 2.

Tabela 4 – Entrada e Saída para as Fontes de Energia

Fontes Geradoras de Energia Elétrica	Entrada		Saída		
	Custo		Ambiental	Técnico	Social
	O&M e CC	Investimento	Emissão de Gases	Geração de EE	Empregos
UHE-cr - hidroelétrica barragem	11,3	1250	4,082	55	1,2
UHE-fd - hidroelétrica fio d'água	11,3	1250	7,874	55	1,2
PCH - hidroelétrica pequena	11,3	2000	5,051	55	1,2
BIO - termoelétrica a biomassa	46	1100	0,591	58	4,4
UTE-ol - termoelétrica a óleo	28	800	0,418	97	0,47
UTE-gs - termoelétrica a gás nat	57,5	806	1,157	94	0,65
UTE-gc - termoelétrica a gás	57,5	900	1,776	94	0,65
EOL-on - eólica na terra	46	1740	7,040	30	0,36
UTE-nu - termoelétrica nuclear	138	2000	5,260	90	0,61
SOL-te - solar térmica	1000	4909	9,510	20	6,6
UTE-ca - termoelétrica a carvão	57,8	1500	0,645	92	0,86
EOL-of - eólica no mar	46	3625	5,780	30	0,36
SOL-fo - solar fotovoltaica	1000	10000	0,924	15	6,6

Fonte: Adaptado de DESTER, 2014

A pesquisa realizada por DESTER (2014) utilizou o método PROMETHEE para análise multivariável. De forma semelhante, o estudo realizado, neste trabalho, analisou dados agrupados em três grandes blocos, a saber:

Aspectos técnicos como potencial de geração de energia elétrica; **aspectos econômicos** como custo de investimento, operação e manutenção do sistema; **aspectos socioambientais** como geração de empregos e emissão de gases poluentes na atmosfera. As principais diferenças entre os conjuntos de dados são os tipos de fontes de geração de energia estudadas.

Por um lado, o estudo realizado por LINS et al (2006) teve o objetivo de analisar e comparar a eficiência de diversas fontes de energia elétrica que poderiam servir como alternativa às grandes centrais hidroelétricas, predominantes no sistema elétrico brasileiro. Conforme citado anteriormente, foram analisadas usinas termoelétricas a bagaço de cana de açúcar, casca de arroz, gás de lixo e incineração de resíduos; turbinas eólicas, células fotovoltaicas e pequenas centrais hidroelétricas.

Por outro lado, o estudo feito por DESTER (2014) teve o objetivo de analisar e comparar a eficiência de todos os tipos de fontes de energia em uso no Brasil. Como já mencionado, este estudo analisou as usinas termoelétricas a gás natural, carvão, biogás, diesel, nuclear e biomassa; turbinas eólicas instaladas no mar e na terra, painéis fotovoltaicos e painéis térmicos, grandes usinas hidroelétricas de barragem e de fio d'água, pequenas centrais hidroelétricas.

3.2 Metodologia Para Análise da Inserção de Geração Distribuída

A inserção de geração distribuída no sistema elétrico causa impactos no sistema de distribuição. A inserção de GD pode gerar fluxos de corrente bidirecionais e alterar o perfil de tensão na rede. Como a rede de distribuição não foi projetada para operar com fluxos de corrente bidirecionais, sem um planejamento e sistemas de controle adequado, a inserção de GD pode gerar instabilidade na rede elétrica (ROJA e SUJATHA, 2016).

A geração distribuída bem planejada gera uma série de benefícios à rede, como a redução de perdas de potência real e melhoria do perfil de tensão ocasionando maior estabilidade e confiabilidade ao sistema (PESARAN et al, 2017).

A avaliação dos efeitos causados pela inserção de geração distribuída na rede elétrica pode ser obtida pelo cálculo do fluxo de potência ou fluxo de carga (FC)

da rede de distribuição, também conhecida por método FC. Esta metodologia utiliza os dados do sistema de distribuição para executar os cálculos de FC. As principais informações são os dados das barras da rede (nós); das linhas de distribuição e suas respectivas resistências e impedâncias; das tensões nas barras e das correntes passantes por todas as linhas da rede (BLENGINI, 2016).

Através dos métodos de FC, torna-se possível calcular o fluxo de potência ativa e reativa, avaliar as alterações no perfil de tensão nas barras da rede e calcular as perdas do sistema de distribuição (BLENGINI, 2016).

Como relatado acima, a redução das perdas no sistema de distribuição e a melhoria no perfil de tensão estão entre os principais efeitos causados pela inserção de geração distribuída no sistema elétrico. Neste sentido, o cálculo do fluxo de carga deve ser parte essencial no planejamento da inserção de geração distribuída no sistema de distribuição elétrico (PESARAN et al, 2017).

As perdas técnicas por efeito Joule estão relacionadas com as resistências das linhas da rede de distribuição e as correntes que passam por estas linhas. A redução do fluxo de corrente, vinda do alimentador principal do sistema, possibilita a redução das perdas de todo o sistema (BLENGINI, 2016).

Este trabalho propõe a utilização do método FCO (Fluxo de Corrente Ótimo) que busca a otimização do fluxo de corrente nas redes de distribuição com múltiplas inserções de GD, ou múltiplos ponto de geração (BLENGINI, 2016).

3.2.1 Método FCO (Fluxo de Corrente Ótimo)

As redes de distribuição de energia elétrica operam com níveis de média e baixa tensão, fazendo com que a corrente passante por suas linhas seja relativamente alta. Uma corrente elevada passando por linhas de transmissão podem gerar perdas sensíveis na rede de distribuição (BLENGINI, 2016).

O método FCO torna-se eficiente e aplicável a redes de distribuição que possuem múltiplos pontos de geração distribuída, pois propõe a otimização do fluxo de corrente passante pelas linhas da rede de distribuição.

Isto se faz possível através da inserção da geração distribuída em um ponto na rede que possibilite a maior redução das perdas. Um fluxo menor de corrente (8) passando pelas linhas da rede de distribuição leva à menor perda do sistema (BLENGINI, 2016).

Para obter a menor perda do sistema, faz-se necessário calcular o fluxo de corrente mínimo (8) que passa por todas as linhas da rede de distribuição. Desta forma, a função objetivo da programação linear busca obter a corrente mínima necessária que deve ser injetada pela subestação, que vem a ser o somatório de todas as correntes, para atender as cargas do da rede de distribuição.

$$\text{Minimizar } \sum_{g=1}^G i_g \quad (8)$$

Onde,

i_g – Corrente complexa injetada na barra g

G – Conjunto de barras de geração em um sistema de GD

A primeira etapa do método FCO tem por objetivo o cálculo do fluxo de corrente ótimo. Para realizar os cálculos são utilizadas como base as leis de Kirckhoff, conforme segue:

A Lei das Correntes ou dos Nós de Kirchhoff (KCL) estabelece que a soma das correntes entrantes em uma barra (ou nó) é igual a soma das correntes que fluem para fora desta barra (BLENGINI, 2016).

A Lei das Tensões ou das Malhas de Kirchhoff (KVL), vista em (9), estabelece que a soma das tensões em um circuito fechado é igual a zero, conforme vista na Equação (8) (BLENGINI, 2016).

$$V_{km} = I_{km} \times Z_{km} \quad (9)$$

Sendo,

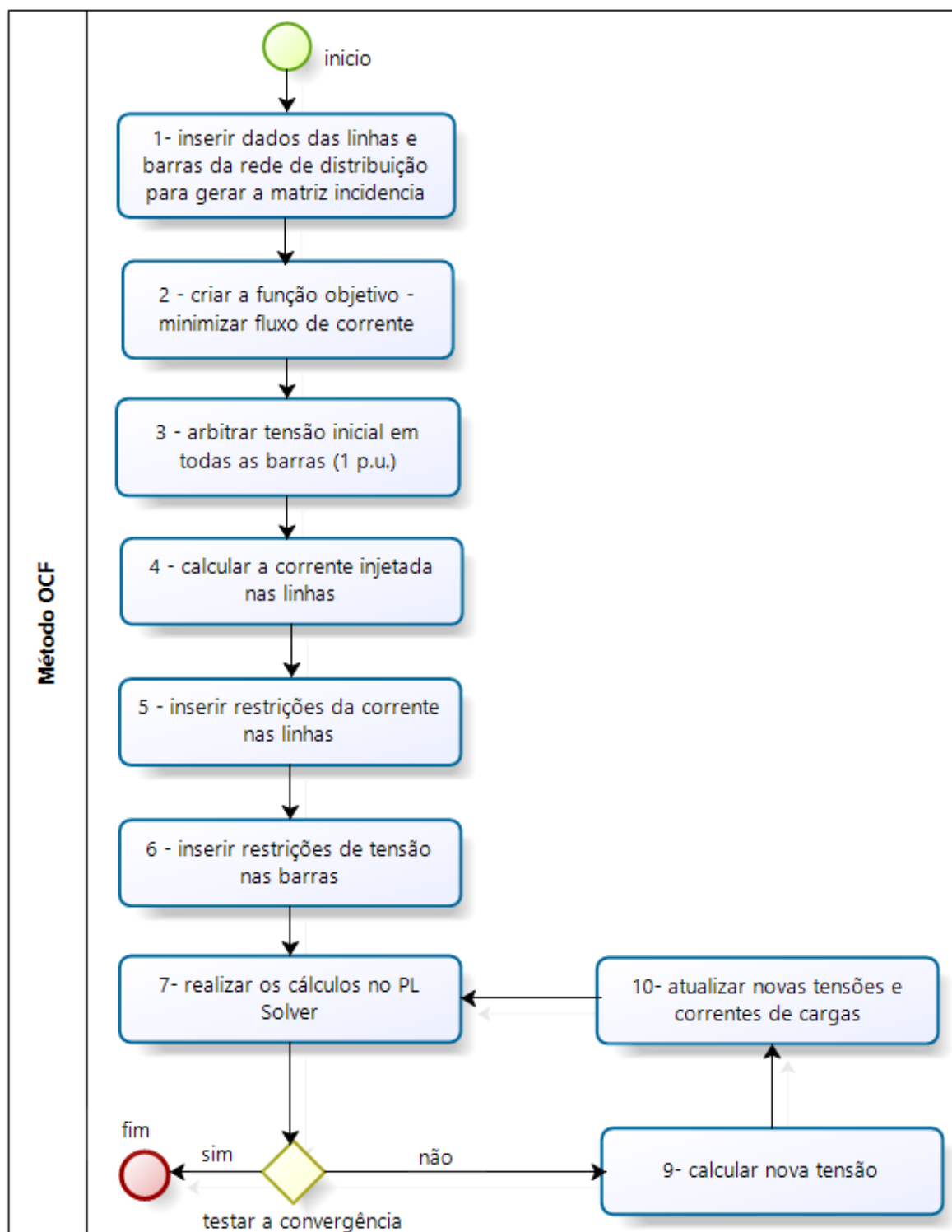
V_{km} – é a diferença de tensão entre as barras k e m

I_{km} – é a corrente na linha entre as barras k e m

Z_{km} – é a impedância entre as barras k e m

A Figura 21 apresenta um fluxograma com a descrição dos principais passos do método FCO (Fluxo de Corrente Ótimo).

Figura 21 - Fluxograma do Método FCO



Fonte: Adaptado de BLENGINI, 2016

A seguir, tem-se um detalhamento dos dez passos do fluxograma do método FCO (Fluxo de Corrente Ótimo):

- 1) Inserir os dados das linhas e barras da rede de distribuição, com as respectivas resistências e impedâncias das linhas do sistema, para gerar a matriz incidência.
- 2) Criar a função objetivo: minimizar o fluxo de corrente. Equação (6)
- 3) Atribuir uma tensão a todas as barras da rede (1 p.u.), para início da primeira iteração dos cálculos.
- 4) Calcular a corrente passante em todas as linhas que interligam as barras, iniciando pelas linhas terminais da rede de distribuição em direção à barra de alimentação do sistema, mostrada em (10):

$$I_{km} = I_m + \sum_i^j I_{mj} \in F_m \quad (10)$$

Sendo,

I_{km} – corrente da linha entre as barras k e m

I_m - corrente injetada na barra m (carga)

F_m – O conjunto de barras alimentadas pela barra m

- 5) Inserir restrições da corrente nas linhas (11), que corresponde ao limite inferior e superior da passagem de corrente pelas linhas:

$$I_{min} \leq I_{km} \leq I_{max} \quad (11)$$

- 6) Inserir restrições das tensões nas barras (11), que corresponde ao limite inferior e superior de tensão para evitar sobrecarga do sistema)

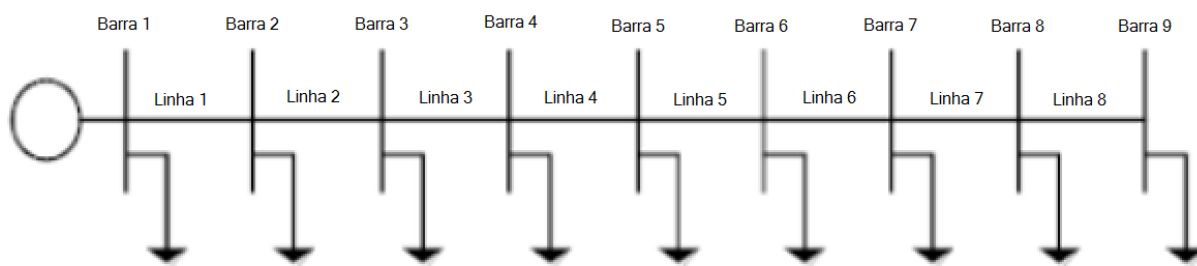
$$V_{min} \leq V_k \leq V_{max} \quad (12)$$

- 7) Realizar os cálculos de Programação Linear (PL) utilizando o Solver (8).
- 8) Testar a convergência. Se o fluxo de potência convergiu, calcular as perdas de potência em cada linha e o total da rede.
- 9) Se necessário, recalcular nova tensão com os novos valores da corrente
- 10) Atualizar a informação da nova tensão nas barras e verificar se o fluxo de carga convergiu. Se o fluxo não convergiu, reiniciar os cálculos com os novos valores de tensão até a convergência do fluxo de potência.

Os primeiros passos do método correspondem à criação da matriz de incidência com os dados da rede e a inserção da função objetivo. Também podem ser definidos os limites de corrente das linhas e de tensão nas barras da rede.

Uma matriz de incidência corresponde a uma representação de um grafo de uma rede de distribuição, através de uma matriz bidimensional (barras/linhas). Para uma rede com n nós (barras) e m arcos (linhas), a matriz de incidência é uma matriz com m linhas e n colunas. A Figura 22 apresenta um exemplo de uma rede de distribuição radial hipotética, com 9 barras, onde a barra 1 é o alimentador principal do sistema.

Figura 22 – Rede de 9 Barras



Fonte: Adaptado de SIRJANI et al, 2010

A matriz de incidência, vista na Tabela 5, adotou como exemplo a rede de nove barras da Figura 22. Na matriz foi utilizada a convenção de marcar o sentido do fluxo de entrada da linha como positivo (+1) e o fluxo de saída como negativo (-1).

Tabela 5 – Exemplo de Matriz Incidência da Rede de 9 Barras

Dados	linha 1	2	3	4	5	6	7	8
barra 1	-1	0	0	0	0	0	0	0
2	1	-1	0	0	0	0	0	0
3	0	1	-1	0	0	0	0	0
4	0	0	1	-1	0	0	0	0
5	0	0	0	1	-1	0	0	0
6	0	0	0	0	1	-1	0	0
7	0	0	0	0	0	1	-1	0
8	0	0	0	0	0	0	1	-1
9	0	0	0	0	0	0	0	1

Fonte: do Autor, 2017

A matriz de incidência possui propriedades que são responsáveis pela eficiência de aplicações do método de fluxo em redes através do método de programação linear (BLENGINI, 2016).

O método FCO é um método iterativo que pode obter a resposta em n iterações. Para o cálculo da corrente, realizada na primeira iteração, é necessário

atribuir uma tensão inicial conhecida (1 p.u.), servindo como caso base para os cálculos. Para o cálculo das correntes passantes por cada linha na rede de distribuição, aplica-se a Lei das Correntes de Kirchhoff (RANA et al, 2014).

A próxima etapa do método FCO realiza o cálculo da tensão em cada uma das barras, a partir da barra de alimentação principal, até a última barra de carga da rede de distribuição. Uma vez realizado os cálculos, as tensões que continham a informação do caso base são atualizadas. Para o cálculo das tensões aplica-se a KVL - Lei das Tensões de Kirchhoff (RANA et al, 2014).

O próximo passo faz o teste de convergência. Se a convergência for bem-sucedida, o processo é finalizado, senão, faz-se a atualização das tensões e reinicia-se o processo pelo cálculo das correntes.

Quando o processo é finalizado, as tensões obtidas nas barras da rede correspondem ao perfil de tensão da rede de distribuição.

Uma vez calculadas as correntes injetadas nas barras e as correntes passantes por cada linha, também se torna possível calcular as perdas em cada linha da rede de distribuição, descrita em (5).

Como as redes de distribuição são extensas, as maiores perdas de potência ocorrem na ponta da rede de distribuição. A localização da geração distribuída na rede de distribuição tem influência direta na redução das perdas (CAMILO et al, 2017).

O cálculo do total das perdas (P) de uma rede de distribuição (ROJA e SUJATHA, 2016) é obtido por (13):

$$P = \sum_{i=1}^N I_i^2 R_i \quad (13)$$

Onde:

N são as barras de uma rede de distribuição

I é a corrente passante em uma linha de distribuição

R é a resistência da linha de distribuição

Para ser possível calcular as perdas totais do sistema de distribuição, é preciso calcular os fluxos de corrente e as tensões na presença de GD.

Com a informação obtida do perfil de tensão e das perdas técnicas da rede de distribuição é possível avaliar o impacto da inserção de uma ou de múltiplas gerações distribuídas na rede elétrica.

3.2.2 Estudos de caso

Este estudo de caso analisa os impactos da inserção de geração distribuída renovável em uma rede de distribuição de 33 barras.

Baseado nesta informação, foi aplicada a metodologia de cálculo de fluxo de corrente ótimo (FCO), para verificar mudanças no perfil de tensão da rede elétrica a analisar alterações nas perdas técnicas da rede de distribuição com a inserção de geração distribuída renovável.

O estudo de caso é dividido em dois cenários, que tiveram como base os dados disponíveis na referencia (RAJARAN et al, 2015).

3.2.3 Cenário 1 – Rede de 33 Barras sem GD

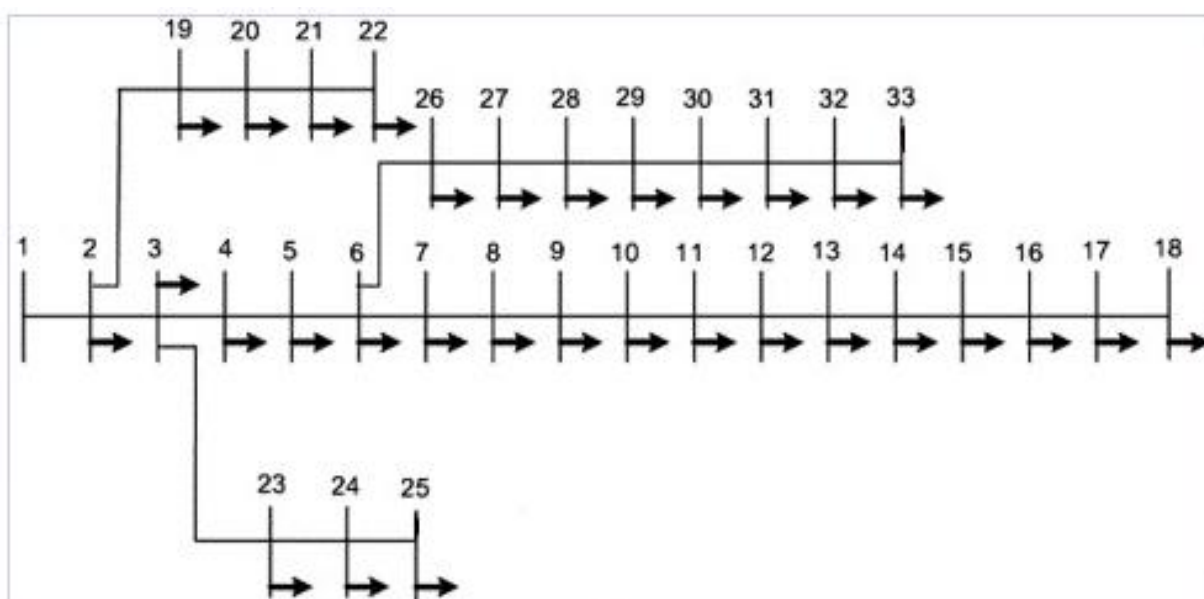
O primeiro cenário analisado (caso base) uma rede de distribuição radial de 33 barras do IEEE (RAJARAN et al, 2016), onde a subestação está localizada na barra 1. Este sistema de distribuição não possui inserção de geração distribuída em nenhuma barra.

Esta rede possui uma tensão nominal do alimentador de 12,66 kV com cargas representadas por potência ativa (P) e reativa (Q) constantes.

A capacidade total de potência da rede é de 3715 kW (P) e 2300 kVAr (Q).

A Figura 23 apresenta esta rede, utilizada para testes:

Figura 23 – Cenário 1 – Rede de 33 Barras sem GD



Fonte: Adaptado de RAJARAN et al, 2016

Os dados de entrada da rede são utilizados para determinação da matriz incidência, que é um passo essencial para o método FCO.

As informações da rede de distribuição de 33 barras, apresentada na Figura 23, são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Dados de Entrada do Cenário 1

Linha	Barra Origem	Barra Destino	R	X	P(kW)	Q (kVar)
1	1	2	0.0922	0.0477	100	60
2	2	3	0.493	0.2511	90	40
3	3	4	0.366	0.1864	120	80
4	4	5	0.3811	0.1941	60	30
5	5	6	0.819	0.707	60	20
6	6	7	0.1872	0.6188	200	100
7	7	8	17.114	12.351	200	100
8	8	9	1.03	0.74	60	20
9	9	10	1.04	0.74	60	20
10	10	11	0.1966	0.065	45	30
11	11	12	0.3744	0.1238	60	35
12	12	13	1.468	1.155	60	35
13	13	14	0.5416	0.7129	120	80
14	14	15	0.591	0.526	60	10
15	15	16	0.7463	0.545	60	20
16	16	17	1.289	1.721	60	20
17	17	18	0.732	0.574	90	40
18	2	19	0.164	0.1565	90	40
19	19	20	15.042	13.554	90	40
20	20	21	0.4095	0.4784	90	40
21	21	22	0.7089	0.9373	90	40
22	3	23	0.4512	0.3083	90	50
23	23	24	0.898	0.7091	420	200
24	24	25	0.896	0.7011	420	200
25	6	26	0.203	0.1034	60	25
26	26	27	0.2842	0.1447	60	25
27	27	28	1.059	0.9337	60	20
28	28	29	0.8042	0.7006	120	70
29	29	30	0.5075	0.2585	200	600
30	30	31	0.9744	0.963	150	70
31	31	32	0.3105	0.3619	210	100
32	32	33	0.341	0.5302	60	40

Fonte: Adaptado de RAJARAN et al, 2016

3.2.4 Cenário 2 – Rede de 33 Barras com GD

O segundo cenário (RAJARAN et al, 2017) utiliza as mesmas informações contidas no caso base: uma rede de distribuição radial de 33 barras do IEEE (RAJARAN et al, 2016), com geração localizada na barra da subestação, trifásica e equilibrada. Esta rede de distribuição possui três inserções de geração distribuída.

Da mesma forma, a barra de alimentação principal desta rede possui uma tensão nominal de 12,66 kV com cargas representadas por potência ativa (P) e reativa (Q) constantes, impedância (Z) constante, admitância (Y) constante, corrente (I) constante e 100% de carregamento. A capacidade total de potência da rede é de 3715 kW (P) e 2300 kVAr (Q).

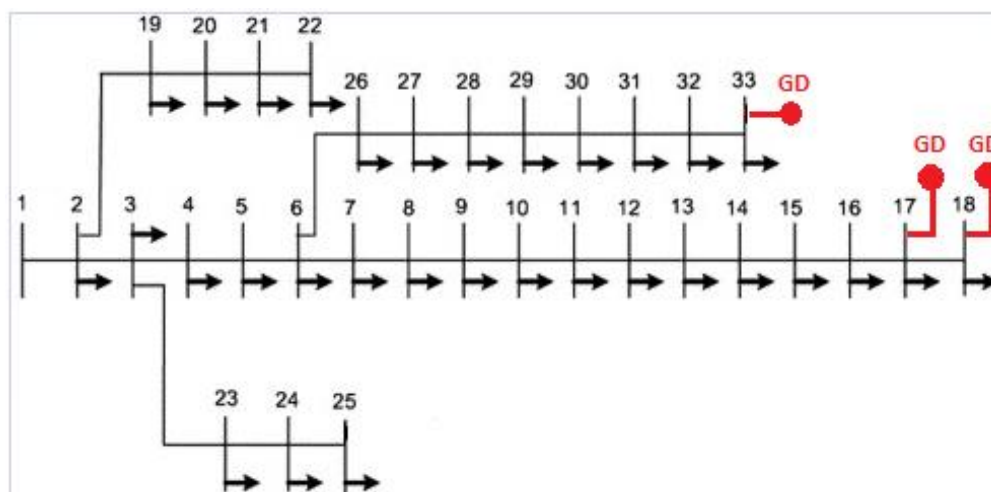
A geração distribuída é representada pela inserção de três pequenos geradores, que injetam apenas potência ativa no sistema.

A inserção da GD possui as seguintes restrições e pressupostos:

1. Somente é permitida uma GD por barra.
2. A GD possui capacidade máxima de geração de 2 MW por barra.
3. O limite superior de tensão é de 1,05 p.u e o inferior é de 0,90 p.u.
4. As GDs foram inseridas nas barras 17,18 e 33.
5. O cálculo de fluxo de carga utiliza potência constante.
6. A tensão no barramento primário é de 1.0 p.u.

A Figura 24 apresenta a rede de distribuição com a inserção de 3 GDs.

Figura 24 – Cenário 2 – Rede de 33 Barras com GD



Fonte: Adaptado de RAJARAN et al, 2016

As informações desta rede de distribuição, apresentada na Figura 24, são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Dados de Entrada do Cenário 2

Linha	Barra Origem	Barra Destino	R	X	P(kW)	Q (kVar)	Geração
1	1	2	0,092	0,048	100	60	<i>feeder</i>
2	2	3	0,493	0,251	90	40	
3	3	4	0,366	0,186	120	80	
4	4	5	0,381	0,194	60	30	
5	5	6	0,819	0,707	60	20	
6	6	7	0,187	0,619	200	100	
7	7	8	1,711	1,235	200	100	
8	8	9	1,030	0,740	60	20	
9	9	10	1,040	0,740	60	20	
10	10	11	0,197	0,065	45	30	
11	11	12	0,374	0,124	60	35	
12	12	13	1,468	1,155	60	35	
13	13	14	0,542	0,713	120	80	
14	14	15	0,591	0,526	60	10	
15	15	16	0,746	0,545	60	20	
16	16	17	1,289	1,721	60	20	
17	17	18	0,732	0,574	90	40	
18	2	19	0,164	0,157	90	40	
19	19	20	1,504	1,355	90	40	
20	20	21	0,410	0,478	90	40	
21	21	22	0,709	0,937	90	40	
22	3	23	0,451	0,308	90	50	
23	23	24	0,898	0,709	420	200	
24	24	25	0,896	0,701	420	200	
25	6	26	0,203	0,103	60	25	
26	26	27	0,284	0,145	60	25	
27	27	28	1,059	0,934	60	20	
28	28	29	0,804	0,701	120	70	
29	29	30	0,508	0,259	200	600	
30	30	31	0,974	0,963	150	70	
31	31	32	0,311	0,362	210	100	
32	32	33	0,341	0,530	60	40	
33	34	17	0,341	0,5302	60	40	GD
34	35	18	0,341	0,5302	60	40	GD
35	26	33	0,341	0,5302	60	40	GD

Fonte: Adaptado de RAJARAN et al, 2016

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo são apresentados os resultados da aplicação da metodologia descrita no capítulo anterior. Da mesma forma, são feitas análises dos resultados apresentados.

4.1 Resultados da Análise de Eficiência das Fontes de Energia

4.1.1 Análise do 1º Conjunto de Dados pelo DEA

Para a classificação das fontes alternativas renováveis de geração de energia o cenário 1 utilizou o método DEA (LINS et al, 2006), enquanto o cenário 2 adotou o método Promethee, (DESTER, 2014).

Utilizando as informações fornecidas pelo primeiro grupo de dados (LINS et al, 2006) foi feita uma análise multivariável utilizando o DEA, para o cenário 1. O resultado desta análise encontra-se sintetizado na Tabela 8, onde há uma lista de FAERs, com o respectivo *ranking* de fontes de energia obtido pelo DEA.

Este resultado aponta como unidades eficientes, aquelas classificadas com índice de eficiência 1 e unidades menos eficientes, as com índices de eficiência menores que 1. Neste cenário os pesos das unidades estudadas foram calculados pela solução do problema de otimização para determinação das unidades eficientes. Este *ranking* pode ser visto na Tabela 8.

Tabela 8 - *Ranking* de FAERs Utilizando o DEA

Fontes Alternativas de Energia Renováveis	FAERs Eficiência	FAERs Ranking
Termoelétrica - casca de arroz	1	1º
Termoelétrica - GDL - gás de lixo	1	2º
Termoelétrica - incineração de resíduos	1	3º
BEM - reciclagem e incineração	0,9367	4º
Termoelétrica - DRANCO - biogás	0,7932	5º
PCH - pequena central hidroelétrica	0,6722	6º
Turbina eólica	0,4711	7º
Solar fotovoltaica	0,4021	8º
Termoelétrica - bagaço de cana	0,3948	9º
Termoelétrica - UTE GN CC - gás natural	0,3954	10º
Termoelétrica - UTE GN Merchant - gás	0,3921	11º

Fonte: Adaptado de Lins et al, 2006

O gráfico da Figura 25 mostra uma escala de eficiência onde as usinas de incineração de rejeitos, gás de lixo e casca de arroz são as que apresentaram melhor desempenho.

As usinas PCH, eólica e solar fotovoltaica foram ranqueadas em uma posição intermediária. As usinas termoelétricas a gás natural, que em relação às outras usinas desta lista, emitem mais gases poluentes na geração de energia, ficaram nas últimas posições.

Nota-se que as fontes de energia que obtiveram maior grau de eficiência, dentro dos parâmetros selecionados, são aquelas que apresentam um alto índice de geração de empregos, baixa emissão de gases poluentes, associado a um grande potencial de geração de energia (LINS et al, 2006).

Os resultados aqui obtidos são ligeiramente diferentes dos encontrados em Lins et al, uma vez que o autor optou por impor restrições às entradas e saídas das DMUs em análise.

Figura 25 – Eficiência das FAERs pelo DEA.



Fonte: Autor, 2017

Destaca-se que embora estas unidades tenham um alto custo associado ao kW gerado em comparação a fontes convencionais (REN21,2015) fazem uso de materiais com menor impacto ambiental e permitem a geração de maior número de empregos.

4.1.2 Análise do 2º Conjunto de Dados pelo DEA

Utilizando as informações do segundo conjunto (DESTER, 2014) foi realizada outra análise utilizando o DEA. Neste conjunto de dados existe uma relação maior de fontes alternativas em conjunto com fontes convencionais, lista que passa a ser denominada Fontes Geradoras de Energia Elétrica (FGEEs). Os resultados do *ranking* de fontes de geração de energia elétrica podem ser vistos na Tabela 9.

Os resultados desta análise, apontam para uma colocação favorável às fontes de geração de energia elétrica que maximizem a geração de energia, gerem empregos diretos e indiretos no setor, possuam baixo risco à saúde (emissão de gases poluentes), com menor investimento de implantação e baixo custo de operação e manutenção da usina

Tabela 9 - *Ranking* de FGEEs Utilizando o DEA

Fontes Geradoras de Energia Elétrica	FGEEs Eficiência	FGEEs Ranking
UHE-cr - hidroelétrica barragem	1	1º
UHE-fd - hidroelétrica fio d'agua	1	2º
PCH - hidroelétrica pequena	1	3º
BIO - termoelétrica a biomassa	1	4º
UTE-ol - termoelétrica a óleo	1	5º
UTE-gs - termoelétrica a gás nat	0,99	6º
UTE-gc - termoelétrica a gás	0,97	7º
EOL-on - eólica na terra	0,63	8º
UTE-nu - termoelétrica nuclear	0,61	9º
SOL-te - solar térmica	0,55	10º
UTE-ca - termoelétrica a carvão	0,55	11º
EOL-of - eólica no mar	0,25	12º
SOL-fo - solar fotovoltaica	0,16	13º

Fonte: Adaptado de Dester, 2014

As usinas hidroelétricas apresentam-se como as mais eficientes, ranqueadas nas primeiras colocações, na Figura 26, seguidas das usinas termoelétricas de biomassa, óleo combustível e gás natural, que possuem grande capacidade de geração de energia aliada à alta disponibilidade para esta geração.

As usinas Termoelétricas a biomassa, óleo e gás natural aparecem da 4ª até a 7ª posição. A colocação intermediária destas usinas deve-se ao fato de apresentarem uma boa capacidade de geração e disponibilidade de produção de energia elétrica, porém com maior emissão de gases em comparação às usinas hidroelétricas (EPE, 2016).

Figura 26- Eficiência das FGEEs pelo DEA.



Fonte: Autor, 2017

As usinas termoelétricas nucleares e a carvão apresentam alto custo de investimento, operação e manutenção associado a um elevado risco à saúde, fatores que influenciaram na sua baixa colocação no *ranking*, apesar de serem usinas com grande potencial de geração de energia elétrica e alta disponibilidade para geração.

As usinas eólicas aparecem na 8ª colocação. Estas usinas eólicas têm maior disponibilidade para geração de energia elétrica do que os painéis fotovoltaicos, especialmente em áreas costeiras do nordeste e sudeste brasileiro, onde o vento é mais constante (AMARANTE, 2000).

Os painéis fotovoltaicos são dependentes da irradiação solar para a produção de energia elétrica obtendo uma baixa disponibilidade para geração de energia; o potencial de geração de energia está entre os mais baixos encontrados entre as fontes de energia estudadas; a geração de empregos pode ser um dos impactos positivos desta fonte.

4.1.3 Análise do 1º Conjunto de Dados pelo PROMETHEE

Foi utilizando o mesmo conjunto de dados apresentado na referência (LINS et al, 2006) e aplicado o método Promethee, com o objetivo de comparar as classificações obtidas pelas duas metodologias de análise multicritério. Uma nova lista de FAERs e sua respectiva classificação podem ser vistas na Tabela 10.

É importante ressaltar que no método DEA os pesos atribuídos a cada critério são calculados de forma matemática, para que possa ser obtido um sistema eficiente e equilibrado.

O método Promethee permite a interferência de um **decisor humano**, que pode atribuir pesos aos critérios escolhidos na análise, alterando o resultado obtido. A Tabela 10 mostra o resultado obtido.

Tabela 10 - *Ranking* de FAERs Utilizando o PROMETHEE

Fontes Alternativas de Energia Renováveis	FAERs Eficiência	FAERs Ranking
Termoelétrica - Casca de Arroz	0,4319	1º
Termoelétrica - UTE GN Merchant	0,3789	2º
Solar Fotovoltaica	0,3650	3º
Pequena Central Hidroelétrica - PCH	0,3602	4º
Termoelétrica - Bagaço de Cana	0,3539	5º
Termoelétrica - Incineração	0,3421	6º
Termoelétrica - GDL - Gás de Lixo	0,2978	7º
Termoelétrica - UTE GN CC - Gás Natural	0,2764	8º
Termoelétrica - DRANCO - Biogás	0,2267	9º
Usina Eólica	0,1638	10º
Termoelétrica - BEM - Reciclagem	0,1010	11º

Fonte: Adaptado de Lins et al, 2006

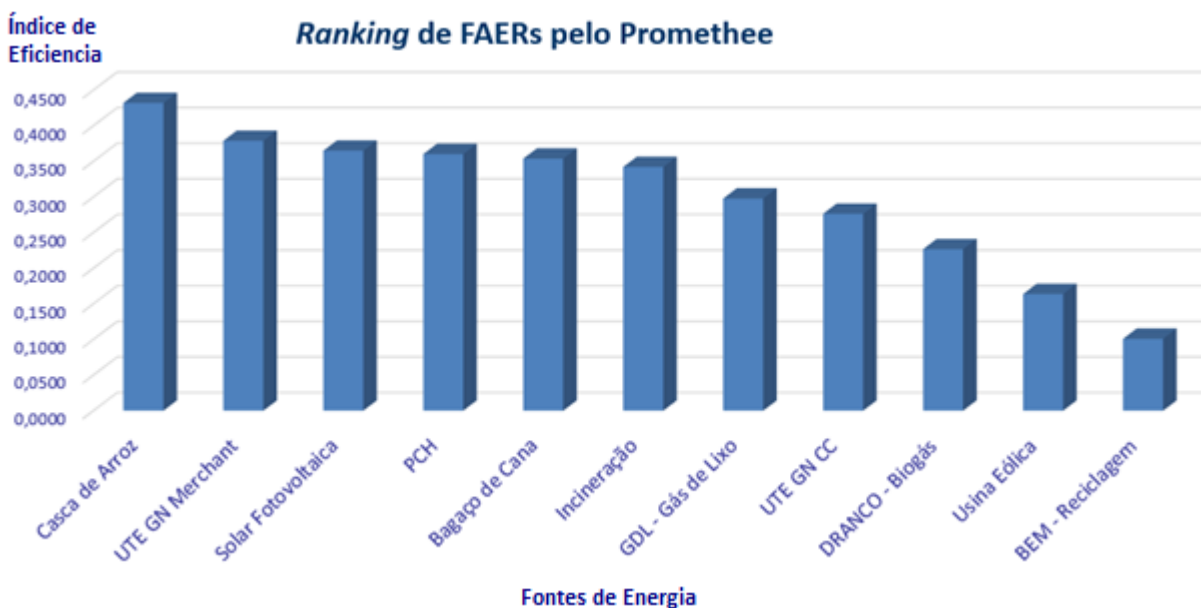
Para simular um ambiente equilibrado, foram utilizados os mesmos pesos para os diferentes critérios utilizados. Inicialmente, foi atribuído ao conjunto de dados econômicos (custo de investimento e operação e manutenção) o peso 0,33.

O mesmo ocorrendo para o conjunto de dados técnicos (geração de energia). Os dados socioambientais (geração de emprego e emissão de gases poluentes) ficaram com peso 0,34.

O balanceamento dos pesos faz com que nenhum critério tenha prioridade sobre o outro, possibilitando um equilíbrio dos critérios adotados no cálculo.

O resultado pelo método Promethee é apresentado na Figura 27. Neste conjunto de dados foram utilizados pesos equivalentes, proporcionais para cada critério adotado.

Figura 27 - Eficiência das FAERs pelo Promethee.



Fonte: Autor, 2017

Na anlise do Promethee houve uma mudana de posioes no *ranking* em relao ao DEA onde as usinas termoeletricas de Casca de Arroz e a Gs Natural aparecem nas primeiras colocaoes. Como existe um balanceamento dos pesos atribuídos aos critrios, as usinas mais bem colocadas so as que obtiveram boa pontuao em todos os critrios.

Verifica-se que as usinas que possuem um equilbrio entre tcnica (gerao de energia), custos (investimento e operao), gerao de empregos e contribuio positiva para o meio ambiente (emisso de gases poluentes) ficaram em destaque no *ranking*, e obtiveram as melhores colocaoes.

A mudana de posioes das fontes de energia alternativas em comparao com o resultado obtido no *ranking* DEA, mostrado na Figura 25, demonstra que o mtodo utilizado influencia diretamente no resultado obtido.

4.1.4 Análise do 2º conjunto de dados pelo PROMETHEE

Esta análise utiliza o segundo conjunto de dados apresentado na referência (DESTER, 2014) para se obter um *ranking* utilizando a metodologia Promethee. O objetivo, da mesma forma, é comparar os resultados obtidos das duas metodologias de análise multicritério, para este conjunto de dados. O resultado do DEA pode ser visto na Tabela 9 e o resultado do Promethee na Tabela 11.

Tabela 11 - *Ranking* de FGEEs Utilizando o PROMETHEE

Fontes Geradoras de Energia Elétrica	FGEEs Eficiência	FGEEs Ranking
UHE-fd - hidroelétrica fio d'água	0,6598	1º
UHE-cr - hidroelétrica barragem	0,6274	2º
PCH - hidroelétrica pequena	0,6042	3º
UTE-nu - termoelétrica nuclear	0,4630	4º
EOL-on - eólica na terra	0,3843	5º
SOL-te - solar térmica	0,3705	6º
BIO - termoelétrica a biomassa	0,3611	7º
EOL-of - eólica no mar	0,3589	8º
UTE-gc - termoelétrica a gás	0,3587	9º
SOL-fo - solar fotovoltaica	0,3496	10º
UTE-ol - termoelétrica a óleo	0,3447	11º
UTE-gs - termoelétrica a gás nat	0,3263	12º
UTE-ca - termoelétrica a carvão	0,2661	13º

Fonte: Adaptado de Lins et al, 2006

Utilizando o método Promethee, com o segundo grupo de dados de fontes de energia elétrica, foram obtidos os resultados apresentados na Figura 28.

Verifica-se que o *ranking* obtido neste cálculo não apresenta variações nas primeiras colocações, com relação aos resultados obtidos anteriormente pelo DEA (Figura 26) onde há um predomínio das usinas hidroelétricas, mostrando-se novamente que fontes de energia mais viáveis atendem aos critérios técnicos, econômicos, ambientais e sociais.

Comparando os resultados apresentados no gráfico da Figura 26 (DEA) com os da Figura 28 (Promethee), observa-se uma alteração significativa no *ranking* apresentado a partir da 4ª posição. As usinas nucleares, usinas eólicas e solares subiram várias posições enquanto que as usinas termoelétricas a óleo, gás e a carvão ficaram nas últimas colocações.

Por meio desta comparação, conclui-se que o *ranking* obtido utilizando a metodologia Promethee foi em diversos aspectos diferente do *ranking* obtido utilizando o DEA.

Figura 28- Eficiência das FGERS pelo Promethee.



Fonte: Adaptado de Dester, 2014

4.1.5 Análise: Atribuição de pesos diferentes no PROMETHEE

A metodologia Promethee analisa diversos critérios das unidades escolhidas de acordo com um peso atribuído a um determinado critério.

No caso verificado neste estudo, a geração de energia elétrica é um dos fatores mais relevantes, mas também estão sendo considerados os fatores econômicos, como custo de geração e manutenção, além de fatores sócio ambientais.

O Promethee permite a alteração dos pesos, de acordo com a priorização de critérios dada por um agente externo, um decisor, que em geral é o analista pesquisador que realiza os cálculos.

A ação do decisor externo atribuindo pesos aos critérios, gera impactos diretos no resultando obtido no *ranking* da metodologia Promethee. O mesmo não ocorre na metodologia DEA, onde o peso é calculado matematicamente para atender um cenário de maior eficiência e, portanto, não é atribuído de forma aleatória.

O DEA avalia a eficiência relativa de um conjunto de unidades entre si, buscando pelas unidades mais eficientes por um processo matemático sem interferência externa.

Este fato determina uma diferença importante entre as metodologias DEA e Promethee: a interferência direta do decisor no resultado da avaliação.

No sentido de avaliar esta influência foram feitas simulações atribuindo pesos distintos entre diferentes cenários, onde foram priorizados critérios econômicos ou técnicos ou socioambientais. Os pesos atribuídos a cada cenário seguem a metodologia adotada na referencia (DESTER, 2014).

No primeiro cenário, em vermelho na Tabela 12, um peso maior foi atribuído ao critério econômico (60%), seguido pelo critério técnico (20%) e por último o critério socioambiental (20%).

No segundo cenário, em laranja na Tabela 12, os pesos foram distribuídos de forma equivalente, sendo atribuído ao critério econômico (33%), seguido pelo critério técnico (33%) e socioambiental (34%).

No terceiro cenário, em amarelo na Tabela 12, um peso menor foi atribuído ao critério econômico (20%), e atribuído maior peso aos critérios técnico (40%) e ao critério socioambiental (40%).

Foram realizados cálculos pelo método Promethee com os novos pesos, para cada um dos cenários acima, com o objetivo de comparar os *rankings* obtidos.

A Tabela 12 mostra o resultado para o 1º conjunto de dados utilizados.

Tabela 12 - *Ranking* Comparativo de FAERs

1º Conjunto de Dados (Lins, 2006)				
	<i>Ranking</i>	<i>Ranking</i> Promethee	<i>Ranking</i> Promethee	<i>Ranking</i> Promethee
	DEA	1º Cenário (econ+)	2º Cenário (equi)	3º Cenário (econ-)
1º	Casca de Arroz	Casca de Arroz	Casca de Arroz	Casca de Arroz
2º	GDL - gás de lixo	PCH - hidro	UTE GN Merchant	UTE GN Merchant
3º	Incineração	Solar Fotovoltaica	Solar Fotovoltaica	Solar Fotovoltaica
4º	BEM - reciclagem	UTE GN Merchant	PCH - hidro	Bagaço de Cana
5º	DRANCO - biogas	Bagaço de Cana	Bagaço de Cana	PCH - hidro
6º	PCH - hidro	Incineração	Incineração	Incineração
7º	Usina Eólica	GDL - gás de lixo	GDL - gás de lixo	GDL - gás de lixo
8º	Solar Fotovoltaica	UTE GN CC	UTE GN CC	UTE GN CC
9º	Bagaço de Cana	DRANCO - biogas	DRANCO - biogás	DRANCO - biogás
10º	UTE GN CC	Usina Eólica	Usina Eólica	Usina Eólica
11º	UTE GN Merchant	BEM - reciclagem	BEM - reciclagem	BEM - reciclagem

Fonte: Autor, 2017

Nota-se que a mudança de pesos no Promethee gera uma alteração no *ranking* dependendo do peso dado a um determinado critério. Todavia, mesmo com a alteração substancial dos pesos do Promethee, apenas três fontes de energia mudaram de posição: UTE GN Merchant, PCH e Bagaço de Cana. Entretanto, verifica-se que há uma sensível diferença entre o *ranking* do DEA em comparação ao *ranking* do Promethee.

A Tabela 13 mostra o resultado da mesma análise, utilizando os mesmos critérios e cenários para o 2º conjunto de dados.

Tabela 13- *Ranking* Comparativo de FGEEs

	2º Conjunto de Dados (Dester, 2014)			
	<i>Ranking</i>	<i>Ranking</i> Promethee	<i>Ranking</i> Promethee	<i>Ranking</i> Promethee
	DEA	1º Cenário (econ+)	2º Cenário (equi)	3º Cenário (econ-)
1º	UHE-cr	UHE-fd	UHE-fd	UHE-fd
2º	UHE-fd	UHE-cr	UHE-cr	UHE-cr
3º	PCH	PCH	PCH	PCH
4º	BIO	UTE-nu	UTE-nu	UTE-nu
5º	UTE-ol	EOL-on	EOL-on	EOL-on
6º	UTE-gs	SOL-te	SOL-te	SOL-te
7º	UTE-gc	BIO	BIO	BIO
8º	UTE-ca	EOL-of	EOL-of	UTE-gc
9º	UTE-nu	UTE-gc	UTE-gc	EOL-of
10º	SOL-te	SOL-fo	SOL-fo	SOL-fo
11º	EOL-on	UTE-ol	UTE-ol	UTE-ol
12º	SOL-fo	UTE-gs	UTE-gs	UTE-gs
13º	EOL-of	UTE-ca	UTE-ca	UTE-ca

Fonte: Autor, 2017

Neste caso, verifica-se que mesmo com a alteração dos pesos para os conjuntos de dados, os resultados permaneceram praticamente inalterados. Visto que o princípio metodológico do Promethee é de comparação par a par, nota-se que os resultados somente se alteram com fontes que tem dados equivalentes ou próximos. Entretanto, verifica-se também que os *rankings* obtidos são diferentes dos apresentados pelo DEA.

4.1.6 Comparação dos Resultados: DEA versus PROMETHEE

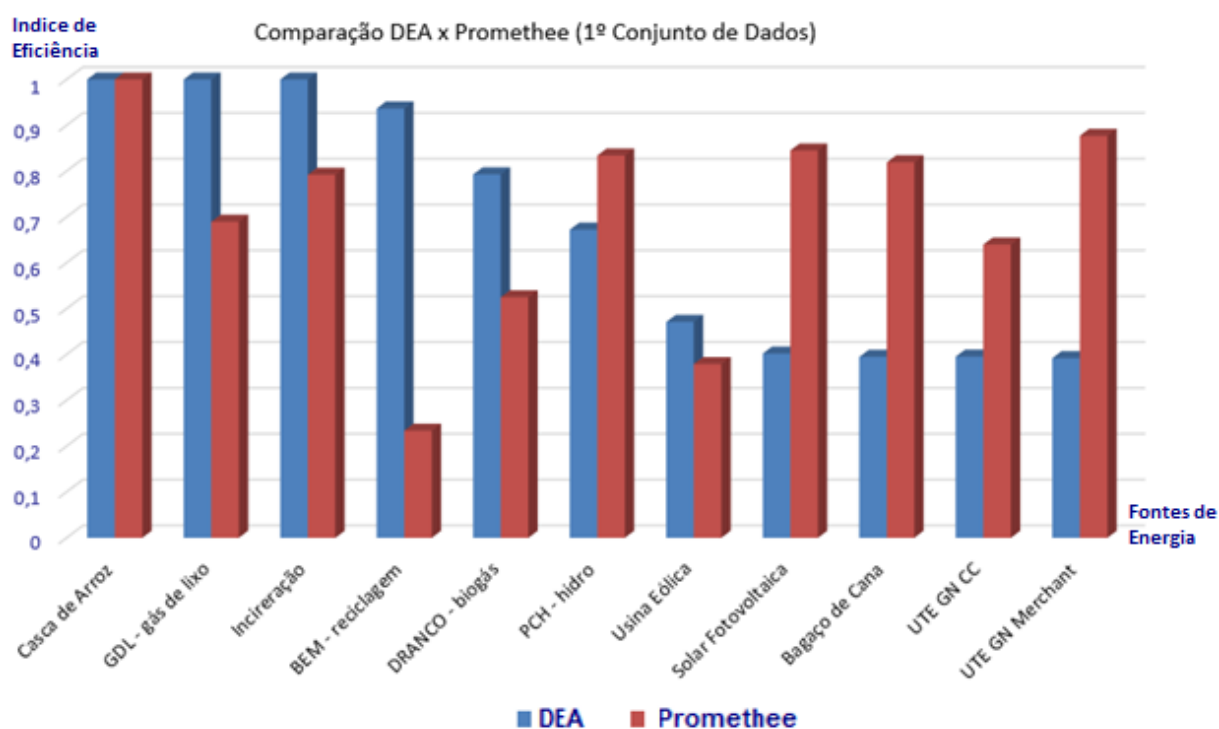
Para efeito de comparação entre as metodologias, verifica-se que tanto o DEA quanto o Promethee possuem vantagens e desvantagens. A facilidade e objetividade do DEA na obtenção dos resultados são fatores positivos, entretanto o DEA não permite alteração nos pesos dos critérios, o que pode se tornar um fator importante em uma decisão, dado que é facilmente modificado no Promethee.

O método DEA trouxe resultados de acordo com o tipo de análise matemática comparativa inerente a este método. O mesmo ocorre com o método Promethee. Os *rankings* de fontes de energia obtidos pelos diferentes métodos foram significativamente diferentes: Mesmo alterando os pesos dos critérios, verifica-se que o *ranking* do Promethee permaneceu com resultados semelhantes, entretanto significativamente divergentes dos resultados obtidos no DEA.

Para o conjunto de dados 1, verifica-se significativa diferença entre o resultado do DEA e o resultado obtido pelo Promethee.

O gráfico da Figura 29 apresenta a comparação dos resultados obtidos utilizando a metodologia DEA e Promethee para o conjunto 1 de dados.

Figura 29- DEA x Promethee - 1º Conjunto de Dados

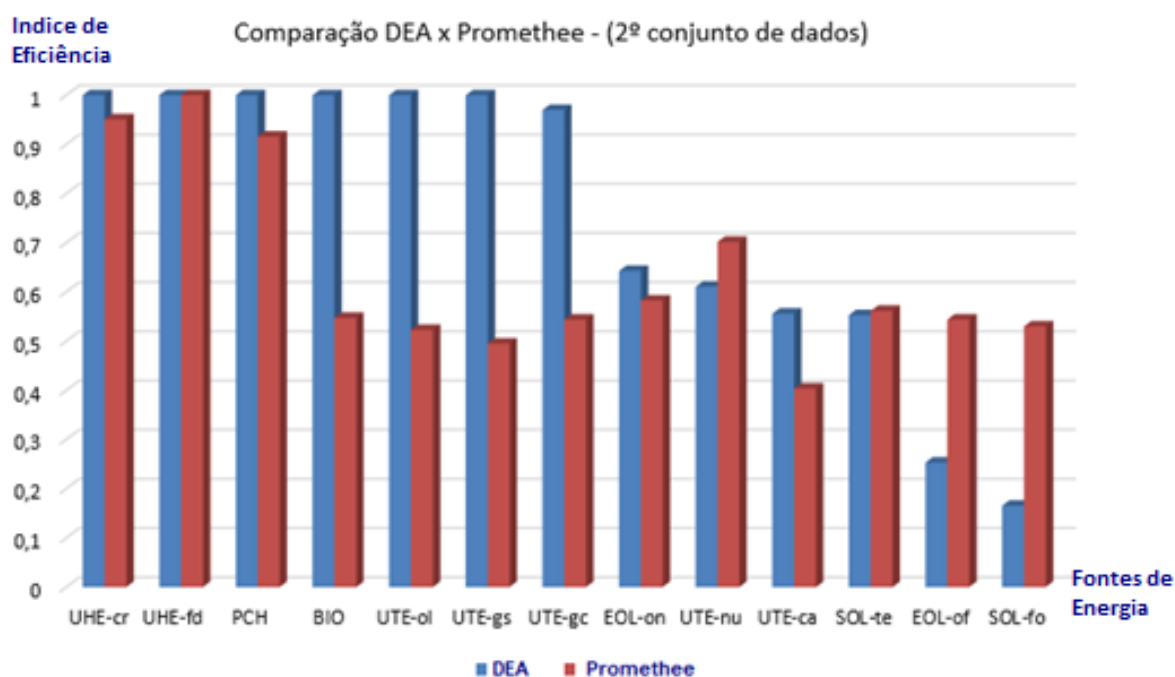


Fonte: Autor, 2017

Verifica-se que, independente do conjunto de dados analisado, tanto o conjunto 1 quanto o conjunto 2, os resultados obtidos foram sensivelmente diferentes entre as duas metodologias multicritério utilizadas.

O gráfico da Figura 30 apresenta a comparação dos resultados obtidos utilizando a metodologia DEA e Promethee para o 2º conjunto de dados.

Figura 30- DEA x Promethee - 2º Conjunto de Dados



Fonte: Autor, 2017

Desta forma, constata-se que as diferenças entre as metodologias apontam para resultados diferentes. Verifica-se que o método empregado tem influência direta no resultado, portanto é essencial conhecer bem a metodologia e os objetivos à que ela se propõe.

O método DEA deve ser aplicado quando o decisor desconhece os critérios ou não tem preferências enquanto o método Promethee parte do ponto em que o decisor tem conhecimento suficiente para o estabelecimento de ponderações sobre cada critério das unidades em análise.

4.2 Resultados da Análise Técnica de Inserção de GD

4.2.1 Análises da Rede de 33 Barras sem GD

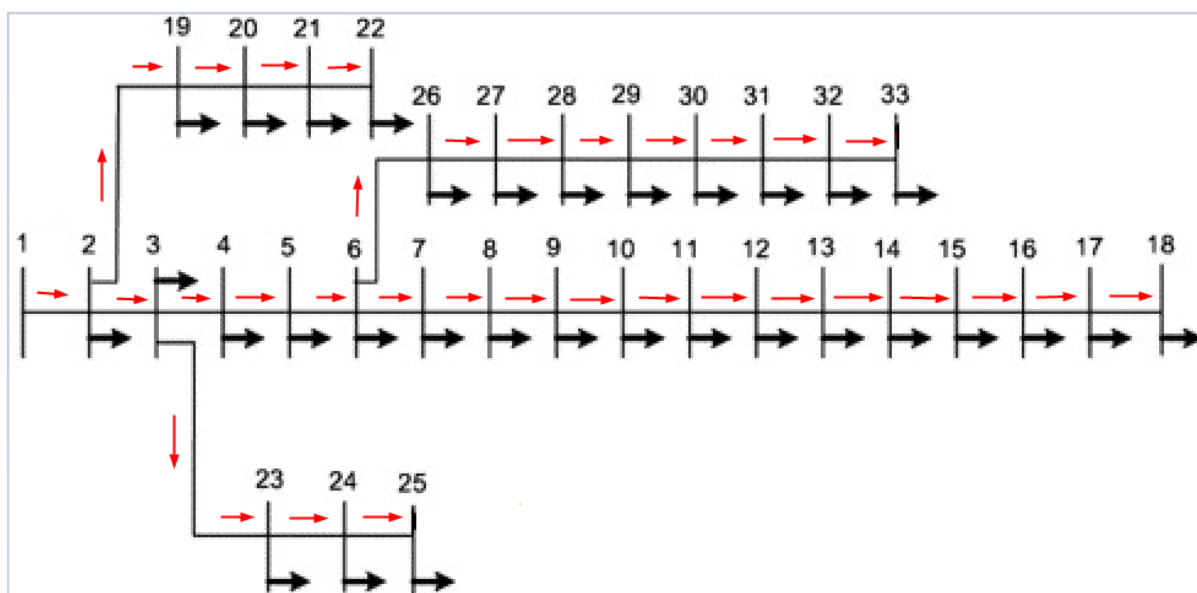
Os resultados da rede de 33 barras sem geração distribuída foram obtidos aplicando o método FCO (Fluxo de Corrente Ótimo). As informações utilizadas para elaboração da matriz incidência neste cenário são os dados contidos na Tabela 8.

Neste cenário base, denominado cenário A, foram realizadas três análises: fluxo de corrente, perfil de tensão e perdas

4.2.1.1 Análise do Fluxo de Corrente da Rede de 33 Barras sem GD

A rede de 33 barras sem geração distribuída possui uma única fonte de geração centralizada, localizada na barra 1 do sistema de distribuição. Todo o fluxo de corrente flui através desta barra, para atender a demanda dos diversos pontos de consumo da rede. Não há fluxos bidirecionais de corrente na rede de distribuição, pois não há outros pontos de geração no sistema. A Figura 31 apresenta o fluxo unidirecional da corrente, em vermelho, pela rede de distribuição no cenário A.

Figura 31- Fluxo de Corrente – Rede 33 Barras sem GD.



Fonte: Adaptado de RAJARAN et al, 2016

Em uma rede radial, com geração centralizada, as perdas vão se acumulando ao longo da rede. Isto ocorre quando a corrente passante pelas linhas de distribuição, que possuem resistências, gera calor (efeito Joule). Uma consequência direta deste efeito são as grandes perdas de potência ativa na ponta da rede de distribuição.

A Tabela 14 contém os valores obtido das correntes passantes em cada linha do sistema de distribuição, utilizando o método FCO. O sentido da corrente, com sinal positivo (+) demonstra que há apenas um sentido para o fluxo de corrente.

Na aplicação do método FCO são obtidos os valores da corrente real (Ir) que passam por cada linha do sistema de distribuição, necessários para o cálculo da equação (13) de perdas técnicas.

Tabela 14- Valores das Correntes – Rede 33 Barras sem GD

Linha	Ir - Corrente Real (p.u.)
1	3,920148
2	3,920148
3	3,457771
4	2,410278
5	2,28716
6	2,225138
7	1,160378
8	0,94947
9	0,735792
10	0,671233
11	0,606293
12	0,557654
13	0,492651
14	0,427275
15	0,296415
16	0,230575
17	0,164758
18	0,098825
19	0,362106
20	0,271822
21	0,181262
22	0,090653
23	0,95593
24	0,864046
25	0,432673
26	1,00161
27	0,938312
28	0,874823
29	0,81055
30	0,680606
31	0,458629
32	0,294957
33	0,06562

Fonte: Autor, 2017

4.2.1.2 Análise do Perfil de Tensão da Rede de 33 Barras sem GD

Um outro resultado obtido com a aplicação do método FCO é o perfil de tensão da rede de distribuição. O perfil de tensão tem comportamento análogo ao da corrente, variando ao longo da rede. Neste cenário, o cálculo do FCO foi executado sem levar em consideração as restrições ou limites de tensão da rede.

A Tabela 15 contém as informações do perfil de tensão da rede.

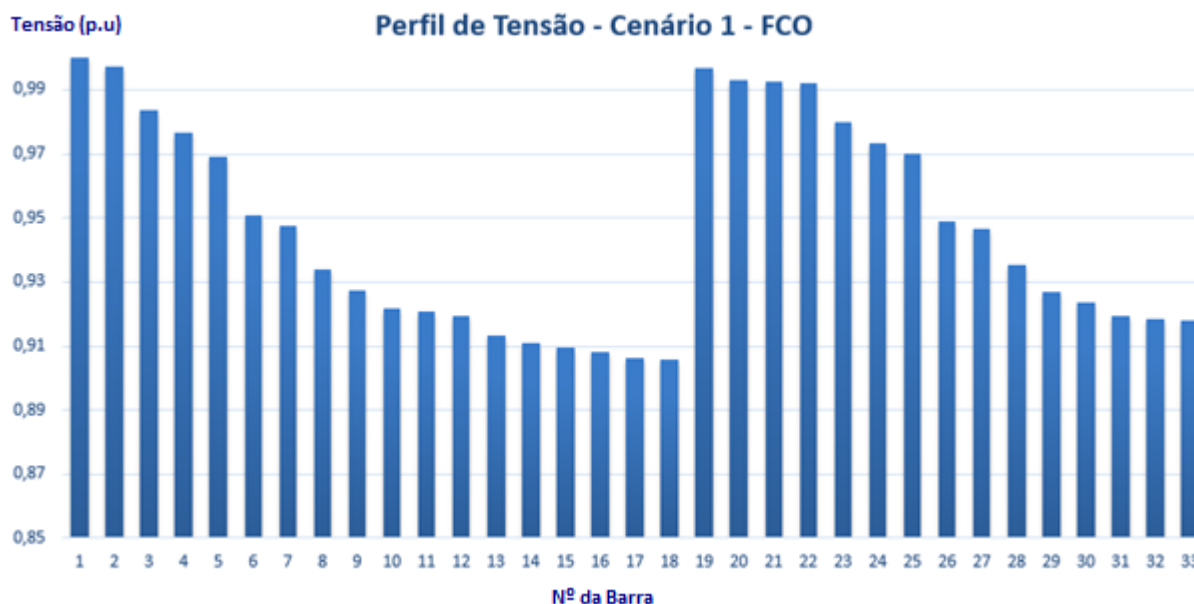
Tabela 15- Perfil de Tensão da Rede 33 Barras sem GD

Linha	Barra Origem	Barra Destino	Módulo de Tensão (p.u)
1	0	1	1,000000
2	1	2	0,997308
3	2	3	0,983608
4	3	4	0,976422
5	4	5	0,969205
6	5	6	0,950801
7	6	7	0,947395
8	7	8	0,933842
9	8	9	0,927547
10	9	10	0,921767
11	10	11	0,920918
12	11	12	0,919445
13	12	13	0,913313
14	13	14	0,911071
15	14	15	0,909681
16	15	16	0,908315
17	16	17	0,906281
18	17	18	0,905679
19	2	19	0,996801
20	19	20	0,993255
21	20	21	0,992567
22	21	22	0,991934
23	3	23	0,980051
24	23	24	0,973397
25	24	25	0,970129
26	6	26	0,948987
27	26	27	0,946499
28	27	28	0,935110
29	28	29	0,926988
30	29	30	0,923493
31	30	31	0,919377
32	31	32	0,918483
33	32	33	0,918202

Fonte: Autor, 2017

A variação do perfil de tensão no cenário A, com a rede de 33 barras sem GD, é mostrada na Figura 32, utilizando os dados da Tabela 17.

Figura 32- Gráfico do Perfil de Tensão da Rede 33 Barras sem GD.



Fonte: Autor, 2017

A variação do perfil de tensão pode ser verificada da barra 1 até a barra 18, que possui a menor tensão da rede. Entre a barra 1 e a barra 18, a variação máxima do perfil de tensão é de 9,43%. A barra 19 tem conexão direta com a barra 2, ambas com praticamente com a mesma tensão, fato que ocorre também com as barras 3-23 e 6-26. Somente a barra 1, por se tratar da alimentadora de toda a rede possui uma tensão de 1 p.u.

4.2.1.3 Análise das perdas na Rede de 33 Barras sem GD

Em uma rede radial de grande extensão, como a rede representada no cenário A as perdas são significativas. As perdas por efeito Joule vão se acumulando ao longo da rede e são mais expressivas na ponta da rede de distribuição.

Para o cálculo das perdas foi aplicada a Equação 13. Os dados utilizados neste cálculo estão disponíveis nas Tabelas 8 e 16. Desta forma, pode-se obter as perdas da rede de distribuição.

O total de perdas na rede sem geração distribuída é de 22,75 (MW).

4.2.2 Análises da Rede de 33 Barras com GD

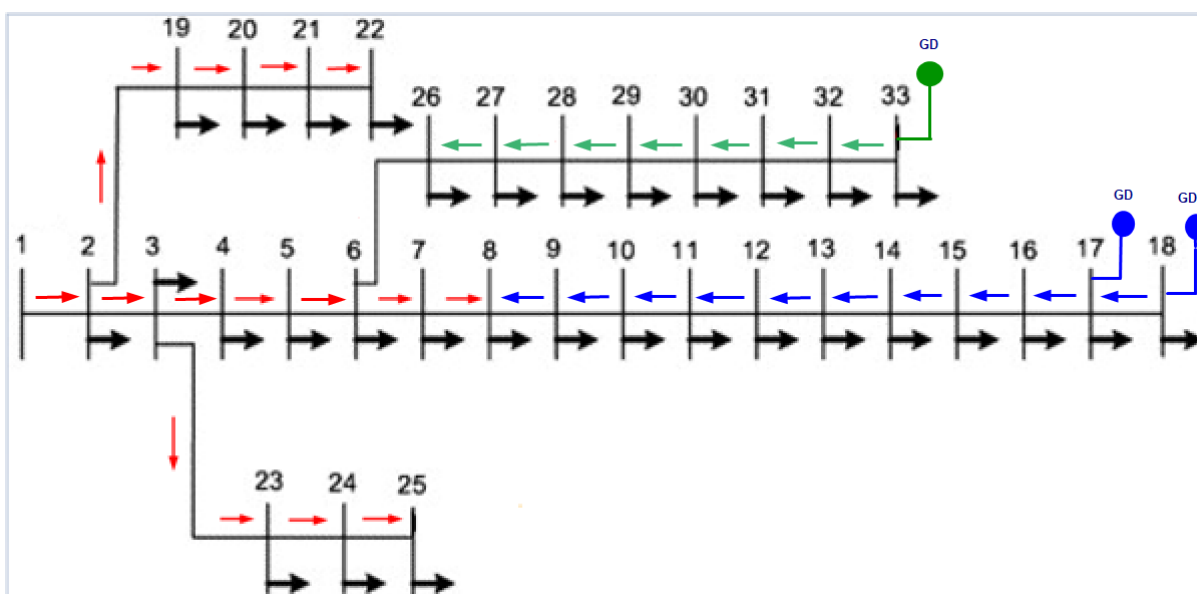
Os resultados da rede de 33 barras com geração distribuída foram obtidos, da mesma forma, aplicando o método FCO (Fluxo de Corrente Ótimo). As informações utilizadas para elaboração da matriz incidência neste cenário, denominado cenário B, são os dados contidos na Tabela 9.

4.2.2.1 Análise do Fluxo de Corrente da Rede de 33 Barras com GD

Neste cenário, a subestação ou alimentação principal do sistema continua localizada na barra 1, entretanto nesta rede encontram-se outros pontos de geração para atender a demanda dos pontos de consumo da rede. As GDs estão inseridas no sistema nas barras 17, 18 e 33.

A Figura 33 apresenta o fluxo bidirecional da corrente passante. Em vermelho é o fluxo de corrente proveniente da barra 1, a barra principal de alimentação. Em azul e verde estão os fluxos no sentido oposto, provenientes da geração distribuída.

Figura 33- Fluxo de Corrente – Rede 33 Barras com GD.



Fonte: Adaptado de RAJARAN et al, 2016

A Figura 33 apresenta que a inserção de geração distribuída na barra 33 faz com que esta GD atenda a demanda da barra 33 até a barra 26. As GDs inseridas na barra 17 e 18, por sua vez, atendem à demanda da barra 18 até a barra 8. A barra de alimentação principal, localizada na barra 1 fica responsável por atender o restante da rede, ou seja: da barra 1 até 8, 23 até 25 e 19 até 22.

A Tabela 18 contém os valores das correntes com a inserção de GD. Os valores obtidos neste cenário demonstram que há dois sentidos da corrente: um com sinal positivo (+), vindo da barra 1 e outro com sinal negativo (-), vindo das GDs. Isto demonstra que há um fluxo de corrente bidirecional com a inserção de GDs na rede.

Tabela 16- Valores das Correntes – Rede 33 Barras com GD

Linha	Ir - Corrente Real (p.u.)
1	2,212294
2	2,212294
3	1,750463
4	0,711754
5	0,59031
6	0,529458
7	0,40712
8	0,202764
9	-0,002998
10	-0,064808
11	-0,126719
12	-0,173301
13	-0,23537
14	-0,297522
15	-0,422086
16	-0,483823
17	-0,545649
18	-0,499909
19	0,361677
20	0,271499
21	0,181047
22	0,090545
23	0,947899
24	0,856781
25	0,429024
26	0,061179
27	-0,18369
28	-0,244946
29	-0,306551
30	-0,430821
31	-0,648861
32	-0,803992
33	-1,021139

Fonte: Autor, 2017

4.2.2.2 Análise do Perfil de Tensão da Rede de 33 Barras com GD

Através do método FCO, obtêm-se o perfil de tensão da rede de distribuição, para o cenário B, onde há a inserção de GDs no sistema.

A Tabela 19 contém as informações do perfil de tensão da rede.

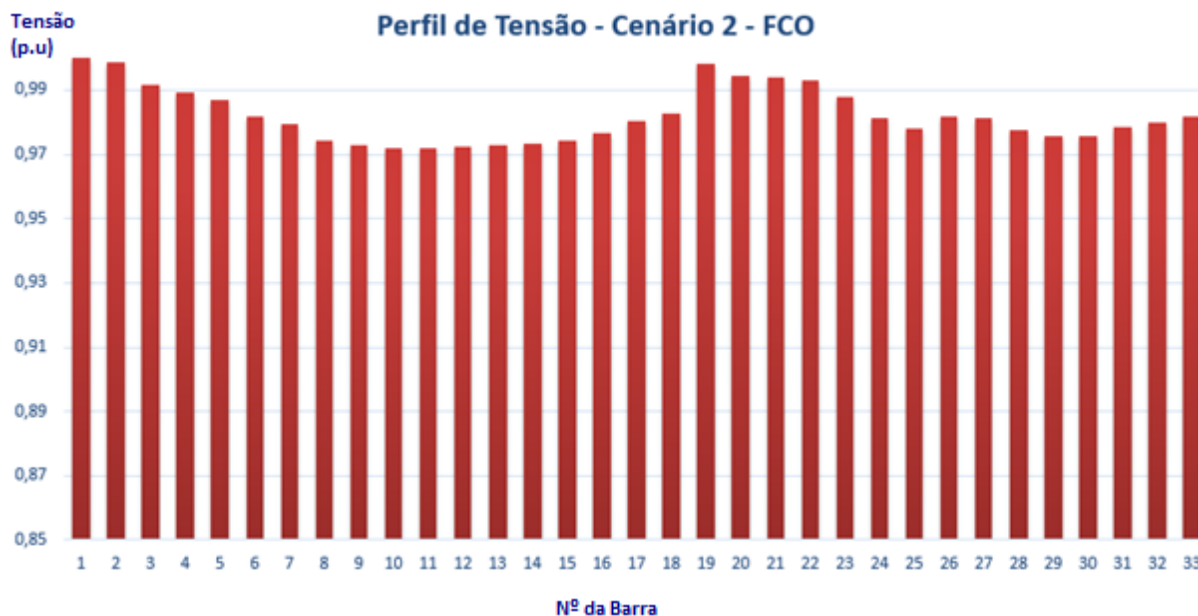
Tabela 17- Perfil de Tensão da Rede 33 Barras com GD

Linha	Barra Origem	Barra Destino	Módulo de Tensão (p.u)
1	0	1	1,000000
2	1	2	0,998477
3	2	3	0,991471
4	3	4	0,989169
5	4	5	0,987106
6	5	6	0,981948
7	6	7	0,979548
8	7	8	0,974239
9	8	9	0,972844
10	9	10	0,971943
11	10	11	0,97199
12	11	12	0,972228
13	12	13	0,972944
14	13	14	0,97321
15	14	15	0,974473
16	15	16	0,976466
17	16	17	0,98033
18	17	18	0,98249
19	2	19	0,99797
20	19	20	0,994428
21	20	21	0,993741
22	21	22	0,993109
23	3	23	0,987942
24	23	24	0,981343
25	24	25	0,978102
26	6	26	0,98186
27	26	27	0,981343
28	27	28	0,977784
29	28	29	0,975606
30	29	30	0,975702
31	30	31	0,978497
32	31	32	0,979781
33	32	33	0,981897

Fonte: Autor, 2017

A variação do perfil de tensão do cenário B, rede de 33 barras com GD, é apresentada na Figura 34, utilizando os dados da Tabela 19.

Figura 34- Perfil de Tensão da Rede 33 Barras sem GD



Fonte: Autor, 2017

O gráfico da Figura 34 demonstra uma melhora sensível do perfil de tensão em todas as barras da rede, quando comparado a Figura 32 (caso base, sem inserção de GD). A variação do perfil de tensão pode ser verificada da barra 1 até a barra 10, que neste cenário possui a menor tensão na rede. Entre a barra 1 e a barra 10, a variação máxima do perfil de tensão é de 2,8%.

4.2.2.3 Análise das perdas na Rede de 33 Barras com GD

Em uma rede radial de grande extensão, como a do cenário B, comuns no sistema elétrico brasileiro, as perdas são significativas. Entretanto com a inserção de GDs na rede de distribuição, obtêm-se uma redução nas perdas.

Utilizando os dados contidos nas Tabelas 9 e 18 e aplicando a equação 13, obtemos as perdas da rede de distribuição com inserção de GDs.

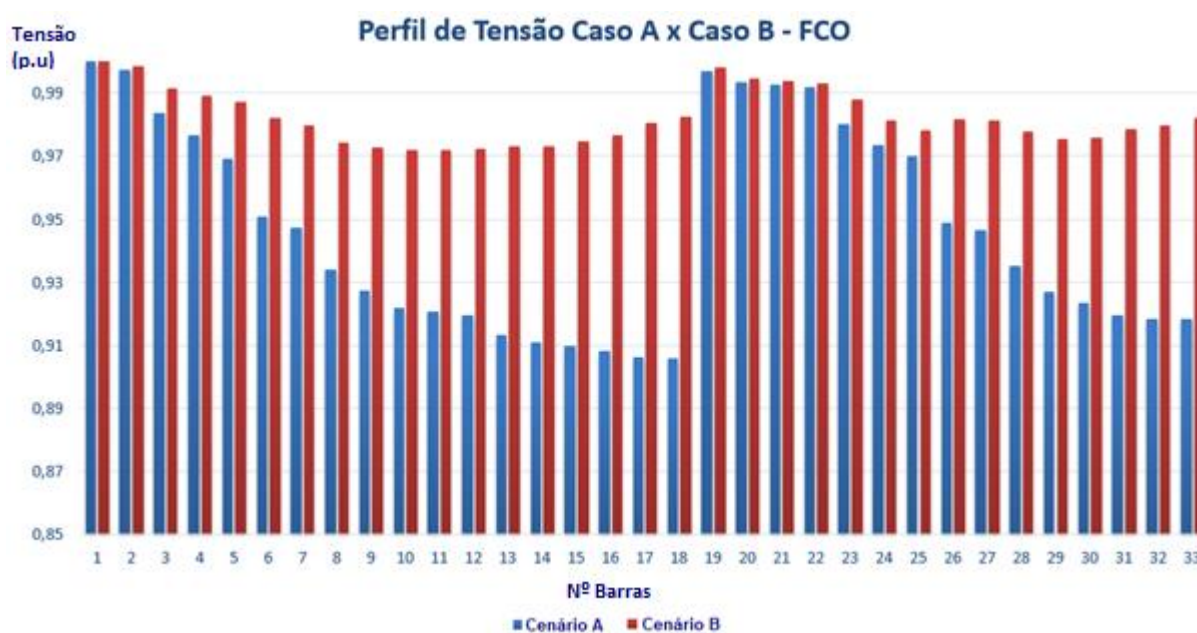
O total de perdas na rede com geração distribuída é de 8,44 (MW).

4.2.3 Comparação Entre os Cenários A e B

Um dos principais objetivos da inserção de geração distribuída em uma rede de distribuição elétrica é a melhoria do perfil de tensão e a redução das perdas.

A Figura 35 apresenta o perfil de tensão no cenário A (sem GD) em contraste com o cenário B (com GD), uma rede de 33 barras. Este gráfico demonstra uma melhora significativa no perfil de tensão, neste cenário, com a inserção de GDs.

Figura 35- Mudança no Perfil de Tensão da Rede



Fonte: Autor, 2017

Neste sentido, a outra correlação a ser analisada é entre as perdas do cenário A (sem GD) em relação as perdas do cenário B (com GD). As perdas estão associadas com o fluxo de corrente que flui pela rede de distribuição. Quanto menor a corrente, menor a perda do sistema.

No cenário A (sem GD) o fluxo de corrente na linha 1 é de 3,92 (Tabela 18), enquanto no cenário B (com GD) o fluxo de corrente na mesma linha é de 2,21 (Tabela 18), o que representa uma redução de 43,62% no fluxo de corrente.

Com relação as perdas do sistema, no cenário A foi obtido um resultado de 22,47 MW e no cenário B foi obtido um resultado de 8,44 MW. Isto representa uma redução de perdas de 62,40 % com a inserção de GD na rede de distribuição.

5 CONCLUSÃO

A diversificação da matriz energética e a redução da dependência do uso de fontes convencionais para a geração de energia elétrica, mitigando a emissão de gases de efeito estufa na atmosfera, são pretensões de praticamente todos os países.

A geração distribuída tem se transformado em uma tendência para suprir parte da demanda energética. A inserção de GDs, renováveis ou não, em uma rede de distribuição elétrica muda o paradigma do sistema elétrico, de uma rede centralizada, para um sistema descentralizado, com múltiplas gerações baseadas em fontes renováveis.

No caso do Brasil, a geração distribuída, vinda de fontes renováveis tem papel fundamental, pelo fato do país possuir altos índices de irradiação solar, ventos, marés e abundância de recursos hídricos, fatores que estimulam o crescimento da utilização das fontes de energia renováveis.

As avaliações de diversas fontes de energia para geração de eletricidade realizadas neste trabalho evidenciam que a metodologia adotada no estudo comparativo entre fontes de geração de energia é extremamente relevante e influencia o resultado do objeto em estudo.

Este trabalho avaliou as fontes de energia sob os três principais pilares da sustentabilidade: o econômico, o social e o ambiental. Para esta avaliação foram utilizados dois métodos multivariáveis distintos: o DEA e o Promethee, que possuem características distintas e, portanto, levaram a resultados de avaliação distintos.

O resultado de eficiência do DEA aponta para fontes de energia que ainda são pouco utilizadas para geração de energia elétrica, como a casca de arroz e usinas de incineração de resíduos. Isto demonstra que devem ser desenvolvidas políticas de incentivo a utilização destas fontes de energia.

O resultado de eficiência do método PROMETHEE aponta usinas que utilizam fontes de energia renováveis, como as usinas hidroelétricas. Isto demonstra que a decisão pelo uso destas usinas para geração de energia elétrica no Brasil, foi uma decisão correta. Entretanto, as restrições técnico-ambientais limitam a expansão de novas usinas hidroelétricas. Este trabalho demonstrou que outras fontes de energia devem ser fomentadas para atender à crescente demanda energética nacional.

Neste sentido, o *ranking* mostra a viabilidade da utilização de fontes renováveis, como biomassa, eólica e fotovoltaica que são opções viáveis para diversificação da matriz energética brasileira.

Assim, o trabalho constatou que fontes de energia renováveis, sob o ponto de vista econômico, técnico e socioambiental, que atendem as questões ambientais, com geração de energia elétrica à um custo marginal aceitável, obtiveram melhor classificação frente às usinas convencionais.

Desta maneira, os pequenos geradores (GD) que utilizam fontes renováveis terão um papel decisivo na geração de energia nos próximos anos, sendo importante conhecê-las sob os mais variados aspectos, possibilitando a escolha da melhor fonte para geração de energia.

A análise técnica da inserção de geração distribuída é um aspecto fundamental no planejamento do sistema elétrico de distribuição. Esta análise permite avaliar os efeitos causados pela inserção de GD no sistema elétrico.

Os resultados desta análise demonstraram que a inserção bem planejada de GD na rede de distribuição pode gerar impactos positivos como a melhoria do perfil de tensão da rede e redução das perdas técnicas. Estes fatores possibilitam a maior estabilidade e confiabilidade do sistema elétrico.

Por outro lado, a múltipla inserção de geração distribuída na rede elétrica aumenta sensivelmente a complexidade de operação da rede, demandando por sistemas de controle e proteção das redes.

Como trabalhos futuros, pode-se sugerir a análise de outros aspectos relacionados a inserção de GD, como por exemplo: custos de geração de energia elétrica por tipo de GD, dimensionamento da capacidade de geração da GD, efeitos por tipo da GD e a melhor localização desta na rede de distribuição.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABINEE - Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica. **Propostas para Inserção da Energia Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira**. 2012

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5460. Sistema Elétrico de Potência**. 2008

ABUR, Ali. **A modified linear programming method for distribution system reconfiguration**. Electrical Power & Energy Systems. 1996

ACHARYA, Naresh; PUKAR Mahat, N. MITHULANANTHAN. **An analytical approach for DG allocation in primary distribution network**. 2006

ACKERMANN Thomas; ANDERSSON, Goran; SÖDER, Lennart. **Distributed Generation: A Definition**. 2000

ALMEIDA, M. P. **Qualificação de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede**. 2012. 161p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Energia. Universidade de São Paulo, 2012.

ALVES, D.A; SILVA, L.C.P; CASTRO, C.A.; COSTA, V.F. **Parameterized fast decoupled power flow methods for obtaining the maximum loading point of power systems Part I. Mathematical modeling**. 2004

AMARANTE, Odilon; **Wind/hydro Complementary Seasonal Regimes in Brazil**. Wilhelmshaven. 2000

AMARANTE, Odilon; BROWER, Michael; ZACK, John; SÁ ; Antonio Leite . **O Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. 2001

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. Brasília. 2008. Disponível em <<<http://www.aneel.gov.br>>>. Acesso em 04/04/2017

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Caderno Temático Micro e Minigeração Distribuída**. 2016

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Energia Hidráulica - Capacidade Instalada**. 2008

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa 482**. 2012

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa 687**. 2015

ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica. Energia Eólica. Disponibilidade de Recursos.** 2003. Pg.94. Disponível em <<[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica\(3\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica(3).pdf)>> Acesso em 03/04/2017.

ANEEL. **Matriz Energética Brasileira.** Disponível em <<<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>> Acesso em 10/04/2017

ARBOIT, Nathana Karina Swarowski; DECEZARO Samara Terezinha; AMARAL Gilneia Mello do; LIBERALESSO Thiago, MAYER Vinicio Michael; KEMERICH Pedro Daniel da Cunha. **Potential of Geothermal Energy Use in Brazil - Review.** 2013

BANKER R., A. Emrouznejad, H. Bal, I. Alp, M. Ali Cengiz, **Data Envelopment Analysis and Performance Measurement: Proceedings of the 11th International Conference of DEA,** Samsun, Turkey, June 2013

BANKER, R.D., CHARNES, A. and COOPER, W.W. "**Some Models to Estimate Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis**", Management Science, 1984

BARACCO, Ronaldo Pereira; LOURENÇO Sérgio Ricardo; LEVENHAGEN, Ronaldo Savarino; CASSIANO, Douglas Alves. **Análise Técnica e Financeira de Usina Híbrida Eólica Fotovoltaica.** Ciência & Engenharia. 2015

BARBOSA, Wilson Pereira. AZEVEDO, Abílio César Soares. **Geração Distribuída: Vantagens e Desvantagens.** 2014

BEN. **Balanco Energético Nacional. Análise Energética e Dados Agregados.** Pg 14. 2016

BLENGINI Neto, Adolfo. **Ambiente multimétodos para otimização de operações em sistemas de distribuição de energia elétrica generalizados.** Campinas: PUC-Campinas, 2016.

BRACIANI, Urian. **Estrutura de Custos para Implantação das Usinas de geração De Energia Elétrica no Brasil.** UFSC. 2011

BRAGA, Renata Pereira. **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos e Aplicações.** Departamento de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da UFRJ. 2008

- BRANDÃO, Danilo Iglesias. **Sistema de geração fotovoltaico multifuncional**. 2013. 134 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia de Bauru, 2013
- BRANS, J.P., MARESCHAL, B.: J. Figueira, S. Greco, and M. Ehrgott, editors, **PROMETHEE Methods**. In **Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys**. Springer Verlag, Boston, Dordrecht: pages 163-196.2005
- CAMARGO, Ivan. **Conversão de Eletromecânica em Energia Elétrica**. Universidade de Brasília. Maio de 2007
- CAMILO, Henrique Fernandes; UDAETA Miguel Edgar Morales; GIMENES, André Luiz Veiga Gimenes; GRIMONI, Jose Aquiles Baesso. **Assessment of photovoltaic distributed generation – Issues of grid connected systems through the consumer side applied to a case study of Brazil**. 2017
- CARLEY, Sanya. **Distributed generation: An empirical analysis of primary motivators**. 2009
- CASTALDI, Duane; CHASTAIN, Eric; WINDRAM, Morgan; ZIATYK. **A Study of Hydroelectric Power: From a Global Perspective to a Local Application**. The Pennsylvania State University. 2013
- CAVALHEIRO, Ellen Marianne Bernal. **Otimização das Configurações de Redes de Distribuição de Energia Elétrica com Fontes Distribuídas**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação da Unicamp. 2016
- CELLI C., LODDO M., PILO F., ABUR A. **On-Line Network Reconfiguration For Loss Reduction in Distribution Networks With Distributed Generation**. 2005
- CEPEL, UFPE. **Atlas Solarimétrico do Brasil**. 2000
- CHARNES, A., COOPER, W. **Measuring the Efficiency of Decision Making Units**, European Journal of Operational Research, 429-444. 1978
- CIREN. **International Conference Of Electricity Distributors**. Disponível em <<<http://www.cired.be>>> Acesso em 15/04/2017
- COPPE. Universidade do Rio de Janeiro. **Usina de Ondas**. Disponível em <<<http://www.coppe.ufrj.br/pt-br/a-coppe/coppe-produtos/usina-de-ondas>>> Acesso em 10/04/2017

CRESESB. **Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito**. 2012

CRESESB. **SunData Potencial Solar.Variação Anual do Índice Solarimétrico em Campinas**. 2017

DESCATEAUX, Paul, ASTUDILLO, Miguel F, AMOR Mourad Ben. **Assessing the life cycle environmental benefits of renewable distributed generation in a context of carbon taxes: The case of the Northeastern American market**. 2016

DESTER, Mauricio. **Estudo Comparativo das Tecnologias para Produção de Energia Elétrica Utilizando Análise Multicritério e Seu Uso Como Ferramenta de Apoio no Planejamento da Expansão da Energia Elétrica**. UFRJ, 2014.

DOE. US Department of Energy. Quadrennial Energy Review. **Transforming The Nation's Electricity System**. January 2017

DOI. US Department of Interior. **Hydroelectric Power. Managing Water in the West**. 2005

EI. Energy Informative. **Off Grid Solar Systems**. Disponível em <<<http://energyinformative.org/grid-tied-off-grid-and-hybrid-solar-systems/>>> Acesso em 27/04/2017

EIA. **Energy from Moving Air: How Uneven Heating of Water and Land Causes Wind**. US Energy Information Administration. November 2016.

EIA. U.S. Energy Information Administration. **Monthly Energy Review March 2017**

ELIASSOM, Einar Tjörvi; THORHALLSSON Sverrir; STEINGRIMSSOM Benedikt. **Geothermal Power Plants. Short Course on Geothermal Drilling, Resource Development and Power Plants**. 2011

EPE. Boletim Energético Nacional. **Participação de renováveis na matriz energética**. Empresa de Pesquisa Energética. 2016

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2030**. Rio de Janeiro: EPE, 2007.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Projeção da Demanda de Energia Elétrica para os Próximos 10 anos**. 2015

ESHA. European Small Hydropower Association - **Guide on How to Develop a Small Hydropower Plant**. 2004

ESTEFEN, Segen. **Ocean Energy Development in Brazil. Ocean Structures and Subsea Engineering**. COPPE – Federal University of Rio de Janeiro. November 2015

FÄRE, R., GROSSKOPF, S. “**Environmental decision models with joint outputs**”. Economics Working Paper Archive. Washington University, US. 1995

FERREIRA, V.H.; ZANGHIB R. Zanghib; FORTES, M.Z.; SOTELOA, G.G.; SILVA, R.B.M.; SOUZA J.C.S.; GUIMARÃES C.H.C.; GOMES S. **A survey on intelligent system application to fault diagnosis in electric power system transmission lines**. 2016

FLEMING, Fernanda Pereira. **Avaliação do Potencial de Energias Oceânicas no Brasil**. 2012

FORTES, M, Z. FERREIRA, V, H. **Conceitos Iniciais para Dimensionamento de Sistema Fotovoltaico Em Residencias**. Faculdade de Engenharia da UFF e UFJF. Junho de 2013

FRERIS, L. Infield D. **Renewable energy in power systems**. John Wiley and Sons; 2008.

GALDINO, Marco; LIMA, Jorge; RIBEIRO, Cláudio; SERRA, Eduardo. **O Contexto das Energias Renováveis no Brasil**. Revista da Direng. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL. 2009

GOMES, Carla da Gama Soares. **Noções de Geração de Energia Utilizando Algumas Fontes de baixo Impacto Ambiental**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola de Engenharia. 2010

GOMES, Gabriel Meneghetti Faé; VILELA, Antônio César Faria, ZENB, Leandro Dalla Zenb, OSORIO Eduardo. **Aspects for a cleaner production approach for coal and biomass use as a decentralized energy source in southern Brazil**. Journal of Cleaner Production. 2013

GONZALES, Abel. **Lições aprendidas en Fukushima sobre Proteção Radiológica**. Congresso Regional IRPA – Rio, Brazil; 18-4-2013

GWEC. Global Wind Energy Council. **Global Wind Energy Outlook 2016: Wind Power to dominate power sector growth.** 2016

HARRIES D. **Average annual solar production in Western Australia.** In: Speidel S, editor. EMC Solar; 2013

HIRATA, Miguel - **Uma Introdução ao Aproveitamento da Energia Eólica;** Departamento de Mecânica e Energia - COPPE, UFRJ -2004.

HOTTEL, H. C. **“A simple model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmospheres,”** Solar Energy, vol. 18, no. 2, pp. 129 – 134, 1976.

HUDA, A; ŽIVANOVIC, R. **Large-scale integration of distributed generation into distribution networks: Study objectives, review of models and computational tools.** 2017

HUNG, Duong Quoc; MITHULANANTAHN, Nadarajah. **Multiple Distributed Generator Placement in Primary Distribution Networks for Loss Reduction.** 2013

HYDRO. **Learn how Hydro brings power to your home.** Disponível em <<<http://www.poweryourknowledge.com/wind.html>>> Acesso em 02/04/2017.

IEA PVPS. **Photovoltaic Power Systems Programme. Snapshot of Global Photovoltaic Markets** Report. 2015

IEA. **International Energy Agency.** Disponível em <<<http://www.iea.org>>> Acesso em 15/04/2017

IEA. International Energy Agency. **Energy Technology Perspectives. Organization for Economic Cooperation & development.** Paris, 2012.

IEA. International Energy Agency. **Energy Technology Perspectives. Organization for Economic Cooperation & development.** Paris, 2014.

IEA. International Energy Agency. **World Energy Outlook.** 2016

IEA. US Energy Information Administration. **International Energy Outlook 2016.** Pg 1 até 6. 2016

IEEE PES **Smart Grids** (2016), Disponível em <<<https://twitter.com/search?q=The%20%23SmartGrid%20Opportunity%20-20%40solarcity%27s%20interpretation%20of%20the%20smart%20grid&src=typd>>> Acesso em 16/04/2017

IEEE. **Institute of Electrical and Electronics Engineers**. Disponível em <<<http://www.ieee.org>>> Acesso em 15/04/2017

INEE. Instituto Nacional de Eficiência Energética. **Conservação de Energia e Emissões de Gases do Efeito Estufa no Brasil**. 39p, 2014.

IRENA. International Renewable Energy Agency. **Rethinking Energy 2017: Accelerating the global energy transformation**. Abu Dhabi. 2017

IRENA. **Tidal Energy Technology 2017: Accelerating the global energy transformation**. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. 2017

JANKOVIC, Stanko; IVANOVIC, Bojan. **Application of combined Newton–Raphson method to large load flow models**. 2015

JU, Yuntao; WU, Wenchuan; ZHANG, Boming. **Convergence problem in forward/backward sweep power flow method caused by non-positive-sequence impedance of distributed generators and its solution**. 2017

KALOGIROU, S. A. **Solar energy engineering: processes and systems**. 1ª edição, Academic Press, Elsevier, EUA. 2009

KARRI, Madhav. **Thermoelectric Power generation System Optmization Studies**. Department of Mechanical and Aeronautical Engineering. PHD Dissertation. 2011

KEANE, Andrew; OCHOA, Luis F.; VITTAL, Eknath; DENT, Chris J.; HARRISON, Gareth P. **Enhanced Utilization of Voltage Control Resources With Distributed Generation**. 2010

KRAUTNER, Stefan; BARROS, Marcele; VARELLA, Veronica. **Turbinas Eólicas**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola de Engenharia. 1999

LINS, Marcos Estellita et al. **Avaliação de Desempenho das Fontes Alternativas de Energia no Brasil utilizando a Análise Envoltória de Dados**. XXXVIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. Goiania. 2006

LIU, B. Y. H.; JORDAN, R. C. **The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation**. *Solar Energy*, [S.l.], v. 4, p. 1-19, 1960.

LUMBREERAS, Sara; RAMOS, Andrés; BANES-CHICHARRO, Fernando. **Optimal transmission network expansion planning in real-sized power systems with high renewable penetration**. 2017

MAGNOLI, D.; SCALZARETTO. R. **Geografia, espaço, cultura e cidadania**. São Paulo: Moderna, 1998

MALAGUETA, Diego. **Geração Heliotérmica - Princípios e Tecnologias**. 2012

MARINOPOULOS, A.G.; ALEXIADIS M.C.; DOKOPOULOS P.S. **Energy losses in a distribution line with distributed generation based on stochastic power flow**. 2011

MIRANDA, Arthur Biagio Canedo Montesano. **Análise de Viabilidade Econômica de um Sistema Fotovoltaico Conectado a Rede**. Departamento de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da UFRJ. 2014

MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Água, Um Recurso Cada Vez Mais Ameaçado**. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/estruturas/sedr_proecotur/_publicacao/140_publicacao09062009025910.pdf>> Acesso em 09/04/2017.

MME. Ministério de Minas e Energia. **Resenha Energética Brasileira. Exercício 2015**. Pg 9. Maio de 2016.

MOURA, Ailson P.; MOURA, Adriano Aron F. **Newton–Raphson power flow with constant matrices: A comparison with decoupled power flow methods**. Original Research Article International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 46, March 2013.

NEI. Nuclear Energy Institute. **Cost & Benefits Analyses**. Disponível em <<<http://https://www.nei.org/Issues-Policy/Economics/Cost-Benefits-Analyses>>> Acesso em 07/04/2017.

NOWAK, S. **PV Systems: Developments and Issues**, presentation at IEA workshop, Paris, 3 February, 2014.

NRC. United States Nuclear Regulatory Commission. **Nuclear Reactors: Backgrounder on the Three Mile Island Accident**. Last Reviewed/Updated Friday, December 12, 2014

NYHOLM, Emil; ODENBERGER, Mikael; JOHNSON Filip. **An economic assessment of distributed solar PV generation in Sweden from a consumer perspective – The impact of demand response**. 2017

OLADE. ORGANIZACIÓN LATINOAMERICANA DE ENERGÍA. **Curso de la Generación Distribuida**. SABA System. 2011.

OLIVA, Sebastian. **Residential energy efficiency and distributed generation - Natural partners or competition?** Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017

OLIVEIRA FILHO, Cassio Mauri. **Metodologia para estudo de implantação de uma usina heliotérmica de receptor central no Brasil**. Escola Politécnica da UFRJ. 2014

OZKALE, Celal. **Decision analysis application intended for selection of a power plant running on renewable energy sources**. 2016

PEREIRA, Carolina Oliveira. **Como funciona uma termoeétrica**. Disponível em <<<http://caroldaemon.blogspot.com.br/2013/09/como-funciona-uma-termoeletrica.html>>> Acesso em 21/04/2017.

PESARAN, Mahmoud; HUY, Phung Dang; RAMACHANDARAMURTHY Vigna. **A review of the optimal allocation of distributed generation: Objectives, constraints, methods, and algorithms**. 2017

POHEKAR. S.D. **Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014

PURCHALA K., R. BELMANS, K. LEUVEN, L. EXARCHAKOS, A.D. HAWKES. **Distributed generation and the grid integration issues**. Imperial College London. 2006

RAJARAN,R; KUMAR,K; RAJASEKAN,N. **Power system reconfiguration in a radial distribution network for reducing losses and to improve voltage profile using modified plant growth simulation algorithm with Distributed Generation (DG)**. Energy Reports. 2015

RANA, A D; J B DARJI; M PANDYA. **“Backward / Forward Sweep Load Flow Algorithm for Radial Distribution System.”** IJSRD - International Journal for Scientific Research & Development 2, nº 1 (2014): 398-400.

REN21. **Renewable Energy Policy Network for the 21st Century**. Global Status Report. Berlin. 2015

REN21. Renewables 2016. Global Status Report. **Geothermal Energy Report**. 2016

- REN21. Renewables 2016. Global Status Report. **Hydro**. 2016
- REN21. Renewables 2016. Global Status Report. **Market and Industry Trends**. 2016
- REN21. Renewables 2016. Global Status Report. **Ocean Energy Report**. 2016
- ROJA, Vadimgadu; SUJATA Dr.M.S. **A Review of Optimal DG Allocation in Distribution System for Loss Minimization**. 2016
- ROMANO, Bruno Picolli. **Aplicação do Método PROMETHEE I, II e V para priorização de ativos financeiros**. Unicamp. 2015
- ROSEMBERG,A; SELVARAJ,S and SHARMA, S. **A Novel Dual-Rotor Turbine for Increased Wind Energy Capture**. Department of Aerospace Engineering, Iowa State University, USA. 2014
- RUTHER, Ricardo. **Edifícios Solares Fotovoltaicos: O Potencial da Geração Solar Fotovoltaica Integrada a Edificações Urbanas e Interligadas à Rede Elétrica Pública no Brasil**. Florianópolis: Labsolar, 2004
- SAJID, Muhammad; HASSAN, Ibrahim; RAHMANB, Aziz. An overview of cooling of thermoelectric devices. 2017
- SEAGEN. **SeaGen Tidal Turbine Begins Full Operation in Northern Ireland**. Disponível em <<<http://www.seageneration.co.uk/>>> Acesso em 08/05/2017
- SILVA, Fábio Monteiro. **Fontes de Energia mais Empregadas na Geração de Energia Elétrica**. Universidade Federal de Rondônia. Departamento de Física. 2010
- SILVA, V. B. S.; MORAIS, D. C.; ALMEIDA, A. T. **A multi criteria group decision model to support watershed committees in Brazil**. Water Resources Management, 2010.
- SINGH Bindeshwar; SHARMA Janmejy. **A review on distributed generation planning**. 2017
- SINGHA, Bindeshwar; PALA, Charitra; MUKHERJEEB V.; TIWARIC, Prabhakar; YADAVA Manish Kumar. **Distributed generation planning from power system performances viewpoints: A taxonomical survey**. 2017
- SIRJANI R.; MOHAMED A.; SHAREEF H. **Optimal Capacitor Placement in a Radial Distribution System using Harmony Search Algorithm**. Journal of Applied Sciences. 2010

SKONE, Timothy; KRYNOCKMICHELLE, Michelle; JAMIESON Matt. **Life-Cycle Analysis of Thermoelectric Power Generation in the United States**. 2017

SORIA, Rafael; PEREIRA, Joana Portugal; SZKO, Alexandre; MILANI, Rodrigo; SCHAEFFER Roberto. **Hybrid concentrated solar power (CSP)–biomass plants in a semiarid region: A strategy for CSP deployment in Brazil**. 2015

SOUDI, Saeid. **Distribution System Planning With Distributed Generations Considering Benefits and Costs**. Modern Education and Computer Science. 2013

SPEIDEL, Stuart; BRAÜNL, Thomas. **Leaving the grid—The effect of combining home energy storage with renewable energy generation**. 2016

SUNLAB. Sistema Solar Fotovoltaico. Disponível em <<http://www.sunlab.com.br/Paineis_solares_caracteristicas.htm>> Acesso em: 20 mar 2017.

TAILLANDIER, Patrick. Serge STINCKWICH. **Using the PROMETHEE multi-criteria decision making method to define new exploration strategies for rescue robots**. IEEE International Symposium Rescue Robotics (SSRR), 2013

TAMANDANI, Shahryar; HOSSEINA, Majid; ROSTAMI, Mohammad; KHANJANZADEH, Amir. **Using Clonal Selection Algorithm to Optimal Placement with Varying Number of Distributed Generation Units and Multi Objective Function**. World Journal Control Science and Engineering. 2014

TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno. **Energia Renovável: Hidraulica, Biomassa, Eolica, Solar, Oceanica**. EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, 2016

TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno. **Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear**. EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, 2016

TREWBY, John. Royal Academy of Engineering. **Wind Energy. Implications of Large-Scale Deployment on the GB Electricity System**. April 2014.

TRIANAPHYLLOU. Evangelos. **Multi-Criteris Decision Making Methods: A Comparative Study**. Department of Industrial and Manufacturing Engineering. College of Engineering. Louisiana State University. USA. 2000

UN WATER. United Nations Inter Agency Mechanism on All Freshwater Related Issues, Including Sanitation. **Water World. Water Development Report.** 2017

UN. United Nations. **The Paris Agreement.** Disponível em <<http://unfccc.int/paris_agreement/items/9485.php>> Acesso em: 13 mai 2017.

UNISINOS - **What is Data Envelopment Analysis.** 2016. Fonte <<<http://gmap.unisinos.br/en-GB/knowledge-areas/data-envelopment-analysis-dea>>> Acesso em 15/02/2017

VERAS, Julio Cezar de Cerqueira. **Análise Experimental dos Efeitos Termoelétricos em Geradores Termoelétricos.** Dissertação de Mestrado. UFPB. 2014

VILLALVA, Marcelo Gradella; GAZOLI, Jonas Rafael. **Energia Solar Fotovoltaica - Conceitos e Aplicações - Sistemas Isolados e Conectados À Rede.** Editora Érica - São Paulo, 2012

WBA. World Bioenergy Association. **Global Bioenergy Statistics.** 2016

WEF. Wind Energy Foundation. **How the Winds Works. Report: Wind Energy Would Provide Benefits for Iowa Businesses.** January 2017.

WER. World Energy Resources. **Comparative Primary Energy Consumption Over The Past 15 years.** g 4. 2016

ZHOU, Y; LI, Y.P; HUANG, G.H.; ZHOU, Y. **A robust approach for planning electric power systems associated with environmental policy analysis.** 2013

ZHU, Joe. **Quantitative models for performance evaluation and benchmarking: data envelopment analysis with spreadsheets.** Springer. Third Edition. 2014