



Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Departamento de Engenharia Elétrica



Trabalho de conclusão de curso

Estudo e Avaliação Preliminar de Software para Alocação de Geração Distribuída

Gabriel Barbosa Figueiredo Silva

João Monlevade, MG
2023

Gabriel Barbosa Figueiredo Silva

**Estudo e Avaliação Preliminar de Software
para Alocação de Geração Distribuída**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Orientador: Prof. Me. Felipe Eduardo Moreira Cota

**Universidade Federal de Ouro Preto
João Monlevade
2023**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S586e Silva, Gabriel Barbosa Figueiredo.
Estudo e avaliação preliminar de software para alocação de geração distribuída. [manuscrito] / Gabriel Barbosa Figueiredo Silva. - 2023.
76 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Me. Felipe Eduardo Moreira Cota.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia Elétrica .

1. Energia elétrica - Distribuição. 2. Energia elétrica - Produção. 3. Geração distribuída de energia elétrica. 4. SIMULINK (Programa de computador). 5. Sistemas de energia elétrica. I. Cota, Felipe Eduardo Moreira. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621.31

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia Reis - CRB6-2431



FOLHA DE APROVAÇÃO

Gabriel Barbosa Figueiredo Silva

Estudo e Avaliação Preliminar de Software para Alocação de Geração Distribuída

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 29 de março de 2023

Membros da banca

Prof. Me. Felipe Eduardo Moreira Cota - Orientador(a) - Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. Carlos Henrique Nogueira de Resende Barbosa - Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. Thainan Santos Theodoro - Universidade Federal de Ouro Preto

Professor Felipe Eduardo Moreira Cota, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 05/04/2023



Documento assinado eletronicamente por **Felipe Eduardo Moreira Cota, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 13/04/2023, às 15:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0505075** e o código CRC **3CF6C8DB**.

Agradecimentos

A Deus, primeiramente, pela vida, por me permitir concluir esta etapa com saúde, por guiar minha caminhada e me dar coragem para enfrentar os desafios.

A minha noiva, Marina (Nina), por me mostrar que sou capaz de realizar todos meus sonhos, tenho apenas que confiar em mim. Por ser minha melhor amiga e por estar presente em todos os momentos em minha vida, sendo meu suporte e minha voz da razão. Sem ela, pouca coisa seria possível.

Aos meus pais, Valdete José da Silva e Marcia Regina da Silva, por sacrificar seus sonhos para que fosse possível realizar os meus, saibam que sou eternamente grato a vocês e tenho imenso orgulho de ser chamado de seu filho. Ao meu irmão, Igor, por toda a confiança e amizade diante das dificuldades.

Às minhas avós Nivalma Barbosa e Maria por seu carinho e cuidado durante minha vida.

Aos meus tios, por todo apoio financeiro e emocional durante a caminhada.

Aos meus professores que contribuíram em meu caminho até aqui, em especial ao professor Felipe Cota, por aceitar me orientar, pela paciência e por me tranquilizar em meus momentos de fraquejo.

Por fim, a todos meus amigos que percorreram o caminho comigo, pelas horas de estudo, pelo incentivo e principalmente, pela amizade. Nos momentos de maiores dificuldades nos apoiamos nunca deixando ninguém para trás.

"O medo é uma emoção natural, mas não pode paralisar a ação. É preciso ter coragem para enfrentar os desafios da vida, e confiar em si mesmo para superá-los"

– Ayrton Senna

Resumo

A geração distribuída de energia elétrica consiste na produção de energia em pequenas unidades próximas aos consumidores, sendo um modelo de geração que tem se tornado cada vez mais relevante em todo o mundo devido aos seus benefícios ambientais, econômicos e de segurança energética. Sendo assim, o presente trabalho avalia a utilização dos softwares Simulink e ETAP na intenção de comparar os resultados das simulações em diferentes cenários para que se torne evidente a importância da utilização de softwares na análise do sistema elétrico ao ser considerado as particularidades de cada projeto.

Palavras-chave: Geração distribuída, Simulink, ETAP, alocação otimizada, simulação, análise, benefícios ambientais.

Abstract

Distributed generation of electricity consists of the production of energy in small units close to consumers, being a generation model that has become increasingly relevant worldwide due to its environmental, economic and energy security benefits. Therefore, the present work evaluates the use of Simulink and ETAP software, with the intention of comparing the results of the simulations in different scenarios so that the importance of using software in the analysis of the electrical system becomes evident when considering the particularities of each project.

Keywords: Distributed generation, Simulink, ETAP, optimized allocation, simulation, analysis, environmental benefits.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Previsão de crescimento da potência instalada em GD no Brasil . . .	14
Figura 2 – Evolução da capacidade instalada existente e contratada do Sistema Interligado Nacional - SIN	22
Figura 3 – Ambiente de trabalho Simulink	42
Figura 4 – Bloco powergui no Simulink	43
Figura 5 – Cargas 1 e 2 referentes aos consumidores e seus parâmetros	44
Figura 6 – Carga 3 referente ao consumidor proprietário da geração distribuída e seus parâmetros	44
Figura 7 – Bloco referente ao modelo de linha de transmissão - modelo Pi . . .	45
Figura 8 – Representação da rede da concessionária e seus parâmetros	46
Figura 9 – Representação da geração distribuída e seus parâmetros	46
Figura 10 – Barramento utilizado e seus parâmetros	47
Figura 11 – Transformador trifásico da rede de distribuição	48
Figura 12 – Parâmetros do transformador trifásico da rede de distribuição . . .	48
Figura 13 – Transformador trifásico da geração distribuída	49
Figura 14 – Parâmetros do transformador trifásico da geração distribuída . . .	49
Figura 15 – Interface de edição do software ETAP	51
Figura 16 – Ícone para execução da simulação	51
Figura 17 – Barra de ferramenta para fluxo de potência	52
Figura 18 – Diagrama unifilar do sistema de nove barras com impedâncias dos ramos e tensões nominais das barras	54
Figura 19 – Simulação no software ETAP para um sistema 9 barras	55
Figura 20 – Simulação no software Simulink para um sistema 9 barras	55
Figura 21 – Sistema de distribuição de 5 barras que apresenta geração distribuída alocada	57
Figura 22 – Sistema de distribuição de 5 barras que apresenta geração distribuída alocada, desenvolvida para simulação no Simulink	57
Figura 23 – Sistema de distribuição de 5 barras que apresenta geração distribuída alocada, desenvolvida para simulação no ETAP	58
Figura 24 – Simulação de um sistema elétrico de 5 barras com indicação da primeira localidade para alocar a geração distribuída	60
Figura 25 – Simulação de um sistema elétrico de 5 barras com indicação da segunda localidade para alocar a geração distribuída	60

Figura 26 – Relação das perdas elétricas nas barras B e C para localização 1 - linha 2 km	61
Figura 27 – Relação das perdas elétricas nas barras 2 e 3 para localização 2 - linha 2 km	62
Figura 28 – Relação das perdas elétricas nas barras 2 e 3 na localização 1 - linha 50 km	63
Figura 29 – Relação das perdas elétricas nas barras 2 e 3 na localização 2 - linha 50 km	64
Figura 30 – Sistema 9 barras localidade 1	65
Figura 31 – Relação das perdas nas barras	66
Figura 32 – Bloco powergui no Simulink	74
Figura 33 – Relação entre o sinal real $a(t)$, o sinal analítico e o TVP.	74
Figura 34 – Sistema de distribuição de 5 barras que apresenta geração distri- buída alocada	75

Lista de tabelas

Tabela 1 – Tipos de geração distribuída por injeção na rede	30
Tabela 2 – Comparativo corrente de operação ETAP/Simulink	56
Tabela 3 – Corrente de operação sem Geração Distribuída	58
Tabela 4 – Corrente de operação com Geração Distribuída	59
Tabela 5 – Relação das perdas elétricas nas barras 2 e 3 para localização 1 - linha 2 km	61
Tabela 6 – Relação das perdas elétricas nas barras 2 e 3 para localização 2 - linha 2 km	61
Tabela 7 – Relação das perdas elétricas nas barras 2 e 3 na localização 1 - linha 50 km	63
Tabela 8 – Relação das perdas elétricas nas barras 2 e 3 na localização 2 - linha 50 km	63
Tabela 9 – Relação das perdas nas barras	65
Tabela 10 – Valores de corrente medidos em três barras diferentes para três métodos de simulação diferentes sem geração distribuída	75
Tabela 11 – Valores de corrente medidos em três barras diferentes para três métodos de simulação diferentes com geração distribuída	75

Lista de Siglas

ACL	Ambiente de Contratação Livre
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APP	Aerogerador de Pequeno Porte
APU	Unidade Auxiliar de Energia
BT	Baixa Tensão
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CMSE	Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico
CREG	Câmara de Regras Excepcionais para Gestão Hidroenergética
EFCR	Edificações Solares Conectadas à Rede
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FP	Fator de Potência
GD	Geração distribuída
GLP	Gás Propano Liquefeito
IEC	Comissão Eletrotécnica Internacional
INEE	Instituto Nacional de Eficiência Energética
KW	KiloWatt
mCH	Micro central Hidrelétrica
MME	ministério de Minas e Energia
MMGD	micro e Mini Geração Distribuída
MT	Média Tensão
MW	MegaWatt

ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PDE	Plano Decenal de Expansão de energia
PIE	Produtor independente de Energia elétrica
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PROINFA	Programa de incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
RESEB	Projeto de Reestruturação do Setor elétrico
RN	Resolução Normativa
SEB	Sistema Elétrico Brasileiro
SEP	Sistemas Elétricos de Potência
SFCR	Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede
SIN	Sistema Integrado Nacional
UHE	usina Hidrelétrica
WWEA	World Wind Energy

Sumário

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Motivações para a realização do trabalho	15
1.2	Objetivos	16
1.3	Organização do texto	16
2	REVISÃO GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	18
2.1	A Geração Distribuída (GD)	18
2.2	Evolução histórica da geração distribuída	18
2.3	O contexto brasileiro na geração de energia elétrica	20
2.3.1	Geração distribuída x Geração centralizada: Tecnologia e eficiência em pouco espaço requer estudo e preparo	22
2.4	Os principais obstáculos na implantação da GD e na utilização de fontes renováveis de energia	25
2.4.1	Barreiras de ordem institucional	25
2.4.2	Barreiras ambientais	26
2.4.3	Barreiras econômicas e políticas	26
2.4.4	Barreiras técnicas e tecnológicas	27
2.4.5	Barreiras na operação e integridade dos sistemas	27
2.4.6	Perdas nas redes elétricas	27
2.5	Principais modalidades de geração distribuída	28
2.5.1	Geração junto à carga	29
2.5.2	Autoconsumo remoto	29
2.5.3	Geração compartilhada	29
2.5.4	Empreendimento com múltiplas unidades consumidoras	29
2.6	Principais tipos de geração distribuída	30
2.6.1	Microturbina a gás	31
2.6.2	Micro centrais hidrelétricas (mCH)	32
2.6.3	Aerogeradores de pequeno porte	34
2.6.4	Célula combustível	35
2.6.5	Painéis solares fotovoltaicos	36
2.7	Aspectos positivos e negativos da GD	38
3	SIMULINK E ETAP NO ESTUDO DE SISTEMAS DE ENERGIA COM GD	41

3.1	Considerações iniciais	41
3.2	O software Matlab/Simulink	41
3.2.1	Configuração do Simulink na análise de alocação de GD	43
3.3	ETAP	50
3.3.1	Funcionamento	50
3.3.2	Interface	51
4	RESULTADOS	53
4.1	Sistema 1: Comparação dos valores das correntes nas cargas em um sistema de 9 barras	53
4.2	Sistema 2: Comparação dos valores das correntes nas cargas em um sistema de 5 barras	56
4.3	Sistema 3: alocação otimizada para um sistema de 5 barras	60
4.3.1	Situação 1: Linha PI 2 com 2Km	60
4.3.2	Situação 2: Linhas PI2 com 50Km	62
4.4	Sistema 4: alocação otimizada para um sistema de 9 barras	64
4.5	Ponderações: Simulink e ETAP	66
5	CONCLUSÃO	68
5.1	Conclusões	68
5.2	Sugestão para trabalhos futuros	69
	REFERÊNCIAS	70
A	ANEXO 1	73
A.1	Bloco PowerGui	73

1 INTRODUÇÃO

Os primeiros sistemas de geração de energia elétrica eram descentralizados e utilizavam corrente contínua. Contudo, foram substituídos pelo sistema trifásico de corrente alternada, em que, através dos transformadores, se é permitido diminuir ou elevar os níveis de tensão. Surgindo, assim, o sistema elétrico atual que possui o processo da geração, transmissão e distribuição da energia elétrica.

De maneira geral, sua concepção física sempre baseou-se na geração centralizada, inicialmente com pequenas usinas posicionadas próximas aos pontos de consumo e, mais tarde, com usinas de maior porte localizadas a distâncias relativamente longas dos centros de demanda (TARANTO et al., 2017).

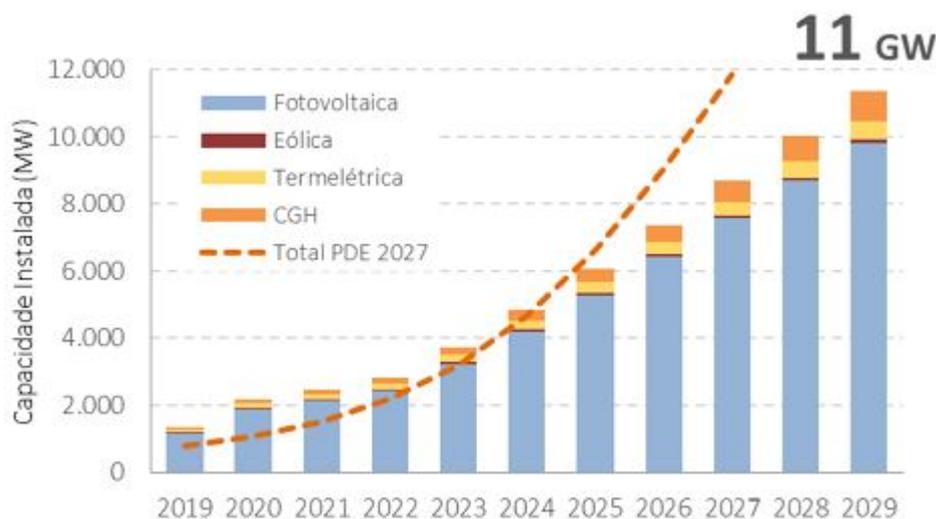
Por ser sistema centralizado, possui fluxo unidirecional, ou seja, o fluxo de energia flui da rede elétrica para a carga, e possuem uma geração de energia pouco diversificada, gerando dependência de determinada fonte de energia, perda no processo de transmissão e possuindo limitada capacidade de carga.

O mundo atual depende, para seu funcionamento, do abastecimento de fontes de energia modernas, tais como o carvão, o petróleo, o gás natural, a energia nuclear e a hidroeletricidade. Os quatro primeiros são as principais fontes energéticas primárias, porém não são renováveis e dispõem de reservas limitadas (BARROS, 2007).

Portanto, muitos países estão reduzindo as emissões de gases na atmosfera desde a elaboração do Protocolo de Kyoto. Em decorrência do Protocolo é inaugurado uma nova tendência de gerar energia localmente. Para tanto, as fontes de energia não convencionais/renováveis como gás natural, biogás, energia solar fotovoltaica, hidrogênio, calor combinado de processo (CHP), microturbinas e motores *Stirling* ganham destaque (BRAGA et al., 2019).

No Brasil, após a implantação da Resolução Normativa nº482/2012 pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) são estabelecidas as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica. Como consequência, estabelece-se uma crescente implantação de gerações distribuídas, conforme a Figura 20:

Figura 1 – Previsão de crescimento da potência instalada em GD no Brasil



Retirado de EPE, 2019

Na literatura, é possível notar diferentes trabalhos à respeito da alocação da geração distribuída.

Em Benitez et al. (2017) é realizado um estudo que propõe um método heurístico para otimizar o planejamento de redes aéreas de média tensão com a alocação de geração distribuída. Através de um algoritmo construtivo, o estudo propõe uma abordagem para determinar a melhor localização de geradores distribuídos na rede, considerando a redução de perdas técnicas e a melhoria da qualidade da energia.

Já Batista, Araujo e Penido (2020), realiza uma pesquisa que propõe um método de alocação ótima de geradores distribuídos em sistemas elétricos de distribuição, levando em consideração as incertezas da demanda. Propõe um modelo matemático que considera as incertezas da demanda e a localização ótima de geradores distribuídos para minimizar as perdas técnicas do sistema.

Em Abu-Mouti e El-Hawary (2011), é proposto um método de alocação e dimensionamento ótimo de geradores distribuídos em sistemas de distribuição de energia elétrica, utilizando o algoritmo colônia artificial de abelhas. O objetivo é maximizar a eficiência do sistema elétrico, minimizando as perdas técnicas e melhorando a qualidade da energia, levando em consideração as limitações das linhas de transmissão e a capacidade dos geradores distribuídos.

Contudo, foram observados poucos trabalhos à respeito da utilização do Simulink como principal sistema simulacional para análise de sistemas com geração distribuída. Trabalhos como, Antunes et al. (2016), que desenvolveu uma pesquisa que tinha como objetivo analisar o impacto da inserção de geração distribuída (GD)

na qualidade da energia elétrica em uma microrrede de baixa tensão. É realizada uma análise detalhada das variações de tensão, harmônicas, desequilíbrios e flicker na rede elétrica devido à inserção de GD.

E Campos et al. (2018), que apresenta a modelagem de sistemas de geração distribuída (GD) com motores de combustão interna convertidos a biogás.

Logo, o principal problema que este trabalho deseja investigar é a utilização do Simulink para análise de sistemas elétricos com alocação de geração distribuída. Através da realização de uma revisão bibliográfica a respeito da geração distribuída direcionando futuros estudos sobre alocação. Além de uma comparação de resultados entre o Simulink e o ETAP demonstrando aspectos distintos entre os dois softwares espera-se avaliar o uso do Simulink como software simulacional de sistemas elétricos.

1.1 Motivações para a realização do trabalho

A conexão de geradores distribuídos (GDs) na rede de distribuição deve ser precedida de uma série de estudos técnicos, visando determinar condições de operação, controle e proteção desses geradores. Esta medida faz com que sejam minimizados eventuais impactos negativos aos sistemas de energia elétrica (PEPERMANS et al., 2005).

A utilização de softwares para simulações de gerações distribuídas em redes de distribuição e geração vem sendo objeto de estudo na literatura de sistemas elétricos de potência.

Um tópico significativo relacionado a isso são os impactos dos geradores distribuídos nas perdas do sistema que estão relacionadas à distribuição de intensidade do fluxo de potência nas redes que compõem esses sistemas. Ou seja, uma GD consegue aumentar ou reduzir as perdas em um sistema, dependendo de sua localidade.

Tendo em vista a maior inserção de GD no mercado nacional e internacional, várias ferramentas simulacionais vem sendo utilizadas, pois fornecem uma maneira eficiente e precisa de modelar, testar e avaliar diferentes cenários e tecnologias. Como exemplo de ferramentas simulacionais pode-se citar o Simulink e ETAP.

Simulink e ETAP são dois softwares utilizados para simulação de sistemas elétricos. Ambos são ferramentas poderosas e úteis para projetistas e engenheiros que buscam simular e analisar o comportamento de sistemas elétricos. Contudo, o Simulink é uma ferramenta ampla e versátil em termos de recursos e aplicações.

O Simulink é projetado para modelagem e simulação de sistemas dinâmicos, podendo ser usado em uma ampla gama de setores. Este possui Interoperabilidade com outras ferramentas, sendo parte do pacote de ferramentas de engenharia do

MathWorks, com capacidade de integração com outras ferramentas de simulação como, por exemplo, o Matlab. O Simulink oferece ainda uma ampla gama de opções de visualização e análise, incluindo gráficos em tempo real e plotagem de dados em gráficos.

1.2 Objetivos

O objetivo geral do trabalho é realizar um estudo dos principais softwares de simulação de sistemas elétricos para aplicação na alocação de geração distribuída. Para isso, foi feita uma ampla revisão bibliográfica da geração distribuída. Nela foi considerado aspectos técnicos, econômicos e políticos.

Além disso, também é realizada uma análise preliminar dos softwares Simulink/Matlab e ETAP/Schneider Electric, considerando aspectos de implementação e precisão. Para este propósito usou-se um sistema teste de 9 barras e três geradores. Por fim, realiza-se um estudo preliminar da alocação ótima de geração distribuída através do método exaustivo, em que foi utilizado o mesmo sistema de teste de 9 barras.

Para a realização do objetivo geral do trabalho são listados alguns objetivos específicos:

- Estudar, compreender e fazer uma revisão bibliográfica sobre geração distribuída;
- Estudar, compreender e fazer uma revisão bibliográfica sobre os softwares de simulação ótima de geração distribuída;
- Realizar uma avaliação do Simulink e do ETAP;
- Analisar um estudo de caso de um sistema de 9 barras pelo método exaustivo;

1.3 Organização do texto

Para o melhor entendimento do trabalho, os capítulos estão organizados da seguinte forma:

No Capítulo 2, apresenta-se uma visão geral sobre a GD e a revisão bibliográfica sobre o assunto, abordando os artigos científicos pesquisados. Além também, de um estudo inicial sobre alocação otimizada com ênfase em trabalhos que exploram diferentes métodos de alocação para encontrar a barra ótima do sistema.

O Capítulo 3 contém a metodologia utilizada para a construção do trabalho. Nele, são realizadas comparações entre o Simulink e ETAP, além de demonstrar a configuração do Simulink na análise da alocação da geração distribuída.

O Capítulo 4 apresenta e discute os resultados obtidos da comparação entre os Softwares através da simulação de sistemas elétricos.

Finalmente, o Capítulo 5 destina-se à apresentação das conclusões finais do trabalho, e das sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

2 REVISÃO GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Neste capítulo serão definidos os conceitos de geração distribuída (GD), seus tipos, vantagens e desvantagens e serão apresentados suas principais características.

2.1 A Geração Distribuída (GD)

Segundo a PRODIST (2021), a geração distribuída é uma geração de energia elétrica de qualquer potência, que se conecta diretamente no sistema elétrico de distribuição. Também pode ser identificada através de instalações de consumidores podendo operar em paralelo ou de forma isolada.

De acordo com a ANEEL (2017), a microgeração distribuída pode ser definida como: central geradora de energia elétrica com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada ou fontes renováveis de energia elétrica. Ela é conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras. Já a minigeração distribuída: é uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas ou menor ou igual a 5 MW para cogeração qualificada.

2.2 Evolução histórica da geração distribuída

De acordo com Santos e Santos (2008), a produção de energia elétrica no local de consumo pela falta de redes de transporte e tecnologia quer fosse destinada à indústria, ao comércio, às residências ou à agricultura, foi à prática na primeira metade do século XX.

Sabe-se, portanto, que a geração distribuída não é novidade no setor elétrico, tanto no Brasil quanto no mundo. Há tempos atrás, a demanda energética era consideravelmente inferior aos parâmetros atuais e não havia a necessidade de construir grandes usinas geradoras. Por isso, antes mesmo do século XX, a geração era feita apenas para suprir a demanda energética local e a geração distribuída era majoritária. No entanto, a partir da década de 40, o desenvolvimento global e o crescimento populacional aumentaram a demanda energética global e motivaram a expansão das grandes usinas geradoras, alinhada com a disseminação dos centros urbanos que encareciam os espaços disponíveis e inviabilizavam grandes projetos próximo aos consumidores finais (NARUTO, 2017).

Com as melhorias técnicas nos transformadores e nas linhas de transporte de energia, com tensões cada vez maiores, passou-se a ser possível transportar mais potência, o que também proporcionou o desenvolvimento de geradores com uma capacidade de produção de energia cada vez mais elevada. Assim, fez com que o rendimento dos processos de produção de energia fossem aperfeiçoados (SANTOS; SANTOS, 2008).

As grandes unidades produtoras são hoje as que dominam o mercado de energia no mundo. No Brasil, dentre estas, podem se destacar fortemente as centrais hidrelétricas. A produção de energia centralizada através das grandes unidades produtoras demandam enormes investimentos de capital e infraestrutura, além de colossais espaços físicos para sua construção. Este feito só pode ser realizado por grandes empresas estatais ou grandes grupos privados que detém tais recursos, tornando, em vários países, o sistema de distribuição de energia praticamente monopolizado e refém destes agentes.

Porém, segundo Santos e Santos (2008), essa realidade vem mudando ao passar dos anos. Principalmente, devido às crises petrolíferas que começaram nos anos 70, ajudando fortemente ao aparecimento da co-geração e, mais timidamente, de outras formas de produção de energia local e distribuída.

Essa mudança é debatida no EPE (2022), que frisa que é importante destacar a diversificação da matriz a partir de investimentos em fontes renováveis diferente das hidrelétricas. Pode-se citar para exemplificar, as fontes, eólica, biomassa e fotovoltaica, complementada pela expansão de geração despachável, como as termelétricas a gás natural.

Como demonstrado nos ciclos anteriores, esta diversificação tende a aumentar a confiabilidade de suprimento devido ao efeito portfólio entre fontes e regiões do país, contribuindo para uma melhor gestão de risco de não atendimento à carga.

Logo no início dos anos 90, passou a existir competição no serviço de energia elétrica estimulando todos os participantes a apresentarem custos competitivos. Como resultado da transformação deste mercado, passam a ser produzidos novos equipamentos, sendo aumentada a atratividade em geração distribuída. Em alguns países, como Finlândia e Holanda, este tipo de produção já ultrapassa 40% das necessidades elétricas nacionais (SANTOS; SANTOS, 2008).

Por vezes, a introdução desta produção em boa parte dos países é bastante lenta, pois a transformação do mercado dar-se-a a taxas reduzidas por um lado, e por outro, porque a produção centralizada por parte dos agentes exigiu fortes investimentos a serem pagos, o que dificulta a liberalização do setor.

De acordo com o Instituto Nacional de Eficiência Energética – INEE (2022), a

GD tem vantagem sobre a geração centralizada. Isso porque, economiza investimentos em transmissão e reduz as perdas nos sistemas, melhorando a estabilidade do serviço de energia elétrica.

Já em 2004, ainda segundo o instituto, ocorre um grande avanço na GD que é mencionada na Lei 10.848/04 ¹ como uma das possíveis fontes de geração de energia. O detalhamento do Decreto 5.163/04 ² fornece características que ajudarão as empresas distribuidoras que até então se opunham a esta forma de geração a enxergarem na GD uma das formas de mitigar riscos de planejamento (INEE, 2022).

2.3 O contexto brasileiro na geração de energia elétrica

O racionamento de energia ocorrido no Brasil em 2001 evidenciou a fragilidade do sistema produtivo de energia elétrica, abrindo espaço para o fortalecimento de fontes alternativas de energia. Além disso, as restrições ambientais têm aumentado, o que torna cada vez mais difícil a abertura de novas faixas para linhas de transmissão.

Como já explicado anteriormente, apenas em 2004 com a Lei n° 10.848/04 de 15 de março de 2004 que dispõe sobre a comercialização de energia elétrica e que, pela primeira vez, cita-se a figura do Gerador Distribuído e com o Decreto n° 5.163/04, de 30 de julho de 2004 que a comercialização de energia elétrica é regulamentada.

Tal decreto foi o mais importante até o momento para a Geração Distribuída, uma vez que este delineou o mercado a ser atendido por tais geradores. Com o decreto, a GD deixa de ser considerada concorrente das distribuidoras e deixa de ser causa de perda de receita, e torna-se alternativa aos preços de mercado, que podem exigir preços muito elevados.

De acordo com Salgado (2015), o Brasil consolidou, ao longo de sua história, a tradição hidrelétrica. Este era o caminho natural para a expansão da geração de eletricidade no país, uma vez que o potencial hidrelétrico a ser explorado era imenso. As usinas eram construídas com grandes reservatórios plurianuais, ou seja, garantiam a geração mesmo que a hidrologia fosse muito desfavorável por vários anos seguidos.

Ainda segundo Salgado (2015), parte significativa destas usinas foi financiada, construída e operada pelo Estado até que as sucessivas crises, que atingiram o país na década de 80, reduziram a capacidade do governo de manter o ritmo de investimento necessário. O crescimento da carga continuava a ser atendido devido aos grandes reservatórios das usinas já em uso.

¹ Lei 10.848/04: Dispõe sobre a comercialização de energia elétrica.

² Decreto 5.163/04: Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica.

Devido à falta de capacidade do governo em relação a investimentos em tecnologia e infraestrutura, ocorre, na década de 90, o programa de reestruturação (RESEB) que culminou na sua desverticalização e privatização do setor. Logo, as empresas de geração passaram a competir entre si através dos leilões de energia realizados pelo governo. Ainda que os investimentos tenham sido retomados, não foram suficientes para conter o racionamento de 2001 causado por um grande período de estiagem (SALGADO, 2015).

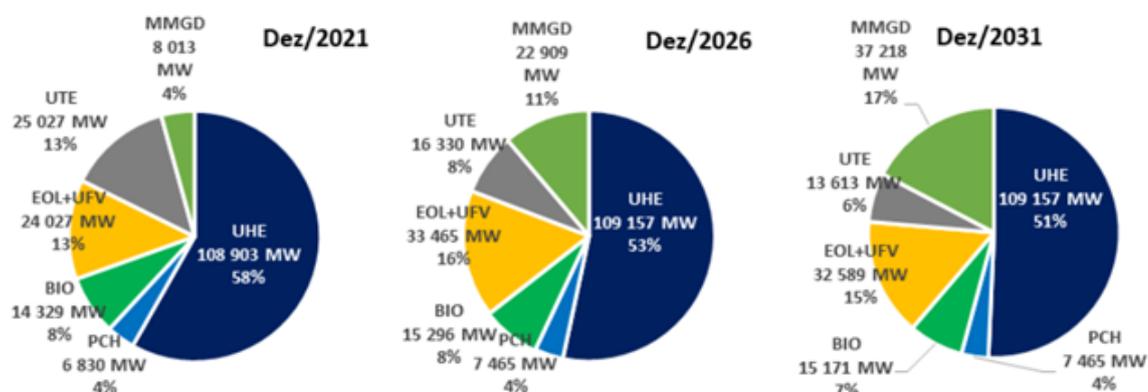
De acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia PDE 2031, EPE (2022), no Setor Elétrico Brasileiro - SEB 2021, foi marcado pela desafiadora situação de escassez hídrica, contornada graças à atenção e às ações coordenadas entre o Ministério de Minas e Energia (MME), instituições do setor e sociedade de forma geral, tanto no âmbito do Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE) quanto da Câmara de Regras Excepcionais para Gestão Hidroenergética (CREG).

Segundo a ANEEL, a energia afluenta às usinas hidrelétricas do Sistema Integrado Nacional (SIN) tem acumulado, nos últimos oito anos, consecutivos valores abaixo da média. Esse comportamento pode ser observado especialmente nos subsistemas SE/CO e NE, que somam 88% da capacidade máxima armazenável. Quando avaliado especificamente o período de outubro de 2020 a setembro de 2021, em 6 meses, foram registradas as afluências mais críticas dos últimos 91 anos. Além disso, 9 dos 12 meses se configuram entre os 5 piores de todo histórico (EPE, 2022).

Visto a atual conjuntura energética do país e a crescente demanda de carga provenientes das mais variadas origens, faz-se necessário uma constante expansão do sistema. De acordo com o EPE (2022), o Sistema Interligado Nacional – SIN, desde maio de 2021, contava com capacidade instalada de cerca de 178 GW de oferta centralizada com a participação das diversas fontes de geração. Os leilões realizados até agosto de 2021 e a perspectiva de entrada de empreendimentos viabilizados através do ACL (ambiente de contratação livre), que possui forte expansão de fontes renováveis, resultam em acréscimo de aproximadamente 17 GW de capacidade instalada no horizonte decenal.

A Figura 2 mostra a variação da composição da oferta existente e contratada ao longo dos anos de 2021, 2026 e 2031. São incluídos também a parcela de Micro e Mini Geração Distribuída (MMGD), devido a sua crescente relevância.

Figura 2 – Evolução da capacidade instalada existente e contratada do Sistema Interligado Nacional - SIN



Fonte: EPE, 2022

Observa-se que a participação absoluta hidrelétrica (UHE) na matriz se mantém praticamente inalterada durante o período avaliado. Identifica-se ainda um crescimento relevante das fontes eólica e solar fotovoltaica centralizada (EOL + UFV) que, juntas, acrescentam em torno de 9 GW na capacidade instalada já em implantação, de dezembro de 2021 até o final de 2031. É importante destacar ainda a redução de utilização das unidades termelétricas (UTE), que são consideradas fontes poluidoras, e um aumento considerável nas unidades de geração distribuída (MMGD) de 4% para 17% até em 2031.

2.3.1 Geração distribuída x Geração centralizada: Tecnologia e eficiência em pouco espaço requer estudo e preparo

De acordo com Santos e Santos (2008), a geração distribuída (GD) pode ser uma boa alternativa às formas tradicionais de produção de energia elétrica, para as diversas aplicações. As tecnologias recentes têm permitido que se construam geradores de dimensões bastante reduzidas, muito eficientes, seguros, fáceis de adquirir e de operar.

Ainda de acordo com Santos e Santos (2008), a produção de energia elétrica, em grandes quantidades para satisfazer as várias necessidades do consumo, tem sido obtida tradicionalmente com recurso a centros de dimensões consideráveis como:

- centrais térmicas de turbina a vapor;
- centrais de turbina a gás;

- motores de combustão interna;
- centrais hidroelétricas;
- centrais nucleares (SANTOS; SANTOS, 2008).

Já em contrapartida às enormes centrais convencionais e como meios complementares e alternativos de produção de energia elétrica, surgem, ao longo dos anos, novos tipos de centrais cujo desenvolvimento e estudo têm merecido o maior interesse, em vista da atual e futura situação das reservas energéticas dos combustíveis para os grandes centros geradores, bem como de preocupações relativas à poluição ambiental.

Partindo desse pressuposto, tais formas de produção de energia de menor dimensão são englobadas no conceito de geração distribuída GD, que podem incluir várias formas de produção de energia elétrica, quer sejam de fontes renováveis ou não. Podem se destacar dentre essas:

- microturbinas a gás;
- pilhas de células de combustível;
- grupo gerador Diesel
- co-geração;
- minihídricas;
- centrais de Biomassa;
- fotovoltaica;
- eólica (SANTOS; SANTOS, 2008).

Apesar de estarem presentes dentro do universo da geração de energia elétrica, existem diferenças entre a geração centralizada e a geração distribuída GD. No primeiro modelo, as usinas concentram uma alta potência de geração, e distribuem isso para os consumidores. Por outro lado, na GD, unidades menores geram em vários locais diferentes.

Segundo (SOUZA, 2012), A geração de forma centralizada ocasiona a projeção e implantação dos sistemas de distribuição para receber a potência nas subestações e distribuí-la entre os consumidores. Dessa forma, o fluxo de potência é proveniente de níveis de tensão mais altos para os mais baixos, fazendo com que a rede tenha um sentido unidirecional, caracterizando a distribuição como um elemento que não interage no quesito geração.

Todavia, ainda segundo (SOUZA, 2012), com a implantação de GD no sistema de distribuição pode ocorrer, dependendo da penetração desta geração, uma alteração no sentido do fluxo de potência, ou seja, ao invés de fluir da rede para as cargas, fluirá das cargas, que passarão a ser geradores, para a rede. Diante disso a rede de distribuição passa a ser um elemento que interage com a geração, podendo funcionar em qualquer sentido. Essa alteração no fluxo de potência nos sistemas de distribuição traz consequências técnicas e econômicas para o planejamento e implementação dessas soluções (SOUZA, 2012). Em seguida estão alguns fatores referente ao impacto nas redes pela GD que devem ser considerados.

- requisitos de segurança;
- qualidade dos equipamentos conectados à rede;
- qualidade da energia proveniente destes equipamentos;
- níveis de curto-circuito e proteção;
- capacidade de geração disponível;
- perdas elétricas;
- perfis de tensão em regime permanente.

Frigo (2013) pondera que a energia elétrica, assim como qualquer outro produto deve atender requisitos de qualidade. De modo geral, os parâmetros de qualidade da energia elétrica são relacionados à amplitude e à forma de onda da tensão disponibilizada.

Matos e Catalão (2013) complementam que existe ainda uma forte relação entre a GD e a qualidade da energia. Por um lado, a GD pode contribuir como um suporte para os problemas de qualidade de energia, como, por exemplo, no auxílio da melhoria da tensão fornecida em áreas de difícil acesso.

Porém, por outro lado, a implementação errada de unidades de geração na rede pode causar efeitos maléficos à qualidade da energia elétrica como, por exemplo, no caso de haver um excesso de conexões de geradores distribuídos concentrados numa linha específica, o que acarreta na diferença do fluxo de potência entre linhas da rede de distribuição, resultando em desvios consideráveis do perfil de tensão das linhas (MATOS; CATALÃO, 2013).

Santos e Santos (2008) explicam ainda sobre um importante ponto positivo e característico das centrais de GD frente à produção centralizada. Segundo os autores, as unidades de GD geralmente são unidades modernas que utilizam tecnologia

avançada, computadorizada e recentemente aperfeiçoada, permitindo otimizar o seu pleno funcionamento e manutenção. Já em contrapartida, na produção centralizada, muitas vezes tem-se infraestruturas com 20, 30 e até 50 anos ou mais de idade em funcionamento. Logo, usa-se sistemas mais velhos, com tecnologia inferior e cujo desempenho também é inferior e, de certa forma, limitado.

2.4 Os principais obstáculos na implantação da GD e na utilização de fontes renováveis de energia

De acordo com Romagnoli et al. (2005), devido ao fato da Geração Distribuída ser uma área ainda pouco consolidada em sistemas de energia elétrica e, não obstante, ter grande correlação com o uso de fontes renováveis, que, em sua maioria, apresentam pouca maturidade tecnológica. Além disso, obstáculos das mais diversas naturezas acrescentam riscos e incertezas à avaliação econômica, o que pode inibir significativamente os investimentos nestas novas fontes energéticas.

Segundo Romagnoli et al. (2005), existe uma série de barreiras encontradas nesse aspecto, que, dentre elas, é prudente citar:

- Barreiras de ordem institucional;
- Barreiras ambientais;
- Barreiras econômicas e políticas;
- Barreiras técnicas e tecnológicas
- Barreiras na operação do sistema; (ROMAGNOLI et al., 2005).

2.4.1 Barreiras de ordem institucional

Dentre as principais barreiras estão a estrutura tarifária das concessionárias que nem sempre refletem, de maneira correta, a real diferenciação dos custos do abastecimento; carência de informações quanto às regiões dentro da área de concessão da distribuidora que possuam alto custo marginal para expansão e a existência de monopólio natural na distribuição (SEVERINO, 2008).

De acordo com Painuly (2001), para que ocorra eficiência econômica na implantação da GD é preciso que haja competição entre os produtores também no nível da distribuição. Com isso, o consumidor passa ter a opção para adquirir energia de diferentes produtores. Assim sendo, é possível responder eficientemente a sinais de preços praticados pelas instituições.

2.4.2 Barreiras ambientais

Segundo Painuly (2001), aliado à falta de regulamentação para os requisitos de conexão, a burocracia excessiva na fase de permissão e obtenção de licenças ambientais pode atrasar a construção do empreendimento, além de aumentar seus custos operacionais.

Além das dificuldades na obtenção de licenças ambientais existe, segundo Severino (2008), a ausência de mensuração dos custos evitados e das externalidades ambientais, que são benefícios que se repercutem para toda a sociedade, mas não remuneram o investimento. Existe também a necessidade de instalação de sistemas de atenuação de ruído nos casos em que a fonte de GD causar poluição sonora inadequada à localidade em que foi instalada. Além de outras precauções que devem ser tomadas nesse sentido em relação à demais formas de poluições.

2.4.3 Barreiras econômicas e políticas

Barreiras econômicas e políticas são um dos principais fatores que impedem o pleno desenvolvimento e implementação da Geração Distribuída não só no Brasil como também em diversas partes do mundo. Dentre estes, podem-se destacar, segundo Severino (2008), uma pequena quantidade de instituições financiadoras dentro do setor, além de modelos atuais de negócios cada vez mais orientados para horizontes de curto prazo, o que impede, de certa forma, a utilização da GD.

O autor ainda debate sobre a tributação excessiva, que atua como forte desestímulo ao investimento; mensuração otimista da volatilidade de preços dos combustíveis fósseis, que reduz o risco relativo a esse aspecto e torna injusta a comparação econômica com empreendimentos de GD.

Também é discutido por Severino (2008) os elevados custos globais de aquisição de combustível, no caso de fontes de GD, que o utilizam; altas taxas para importação de equipamentos associados às diversas soluções que utilizam fontes alternativas; existência de mais subsídios para as fontes convencionais do que para as fontes alternativas; instabilidades macroeconômicas de diversas origens que diminuem a probabilidade de haver investimentos em novas fontes energéticas.

Por fim, são abordados os assuntos, como a insuficiência e/ou distribuição inadequada de recursos destinados a projetos de pesquisa e desenvolvimento na área; falta de infra-estrutura para implantação de fontes de GD; ausência de mais programas de incentivo, como o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), elevados custos das tecnologias de GD e, conseqüentemente, elevados custos da energia gerada por estas fontes (SEVERINO, 2008).

Com exceção do PROINFA, Romagnoli et al. (2005) explica que, no Brasil, não existem mais programas de incentivos às fontes renováveis que busquem novos investimentos nestas fontes com base em leilões, a exemplo dos leilões de NFFO (Non Fossil Fuel Obligation) na Inglaterra.

Apesar disso, o autor complementa que é de se reconhecer que o PROINFA foi um passo muito importante e, apesar de algumas inconsistências na primeira etapa e distorções na forma como foi implementado principalmente na forma como são fixados os preços, pode-se dizer que este foi um marco importante visando uma maior diversificação da matriz energética brasileira.

2.4.4 Barreiras técnicas e tecnológicas

Do ponto de vista tecnológico, Romagnoli et al. (2005) explica que existem ainda muitas tecnologias com pouca maturidade no mercado de GD. Portanto, podem apresentar elevados custos de implantação e/ou ainda não possuir índices de confiabilidade ainda plenamente satisfatórios.

2.4.5 Barreiras na operação e integridade dos sistemas

Segundo Willis (2018), existem alguns casos na literatura em que se menciona a Geração Distribuída como prejudicial à segurança do sistema, principalmente quando são utilizadas tecnologias que possuem uma característica de variabilidade natural de sua produção. Tais tecnologias fazem com que a fatia de mercado de fontes não despacháveis cresça. Como exemplo, pode-se citar os aerogeradores, os sistemas fotovoltaicos e alguns empreendimentos de cogeração que dão preferência à demanda de calor a ser utilizada.

Além da possibilidade de prejuízo à segurança energética do sistema, outras barreiras podem ser citadas, tais como: uma maior complexidade operativa em função dos fluxos bidirecionais de energia das novas topologias de rede para operação normal e para contingências; a pequena previsibilidade quanto à disponibilidade das fontes primárias de energia de caráter intermitente, como água, radiação solar e ventos; o aumento do investimento necessário para reduzir o fator de capacidade das fontes.

2.4.6 Perdas nas redes elétricas

A energia produzida pelas usinas tradicionais, que respondem pela maior parte da geração de eletricidade no Brasil, passa por uma longa e complexa jornada por redes de transmissão e distribuição e equipamentos como transformadores, cabos,

subestações e outros antes de chegar aos consumidores finais. Devido a esta rota complexa, a energia fornecida ao consumidor não é toda a energia produzida pela usina, a eletricidade é perdida ao longo do percurso e o consumidor só precisa pagar pela energia consumida.

Conseqüentemente, é importante que as concessionárias de rede mantenham o valor das perdas o mais baixo possível, a fim de maximizar o lucro e melhorar o serviço prestado ao consumidor. Esse objetivo é ainda mais importante para as concessionárias de redes de distribuição, pois há um maior índice de perdas nesse tipo de rede.

As perdas na rede de distribuição podem ser classificadas quanto a sua origem: perdas técnicas e não técnicas.

As perdas técnicas referem-se à quantidade de energia elétrica perdida durante o transporte e distribuição de energia. Isso ocorre devido a vários fatores, como resistência elétrica dos cabos, transformadores e equipamentos elétricos. Esse tipo de perda não pode ser eliminada, mas pode ser reduzida.

Dentro das perdas técnicas, pode-se ter as perdas ativas, que serão o parâmetro utilizado para obter a melhor alocação da geração distribuída.

As perdas ativas representam a maior proporção das perdas técnicas, ocorrem principalmente devido à conversão da energia elétrica em calor, quando a energia é transformada em outras formas de energia, como calor, luz e movimento.

2.5 Principais modalidades de geração distribuída

Desde 2012, os brasileiros têm acesso à geração distribuída de energia. Isso significa que todos os consumidores podem produzir a própria energia, desde que a mesma seja gerada a partir de fontes renováveis. Isto foi definido na Resolução Normativa 482³ da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Dentre elas pode-se citar:

- geração junto à carga;
- autoconsumo remoto;
- geração compartilhada;
- empreendimento com múltiplas unidades consumidoras

³ Resolução Normativa 482 (ANEEL): Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica

2.5.1 Geração junto à carga

A primeira modalidade criada é a mais utilizada por brasileiros que fazem parte da GD. O consumidor instala o seu próprio micro ou minigerador elétrico no mesmo local onde irá realizar o consumo. É o caso, por exemplo, de quem instala um sistema de energia solar residencial, no qual o painel solar é fixado sobre o telhado da residência e passa a gerar toda a energia que irá atender o consumo local.

2.5.2 Autoconsumo remoto

Modalidade oposta à geração junto à carga, ou seja, o consumidor pode instalar o seu gerador em outro imóvel que não aquele (ou aqueles) em que irá realizar o consumo da energia. No entanto, todas as residências precisam estar sob a mesma titularidade e localizados dentro da área de concessão ou permissão da mesma distribuidora, ou seja, tanto o imóvel que irá receber a instalação do gerador quanto os demais que irão usufruir da energia precisam estar registrados no nome da mesma pessoa física ou jurídica. Nesta última, incluídas matriz e filiais. O autoconsumo remoto é a segunda modalidade mais utilizada na GD e uma das três opções criadas pela RN 687⁴, que utilizam como base de seu funcionamento o sistema de créditos de energia.

2.5.3 Geração compartilhada

Modalidade que possibilita a reunião de dois ou mais consumidores para compartilhamento da geração de um mesmo sistema. Aqui, pessoas físicas ou jurídicas abrem, respectivamente, uma cooperativa ou consórcio e investem em um gerador que irá produzir a energia/créditos para atender todos os participantes, segundo a proporção de cada um deles que foi definida em contrato. Na geração compartilhada, o sistema gerador fica sob a titularidade do consórcio ou cooperativa e precisa ser instalado em local distinto das unidades consumidoras participantes, porém todos precisam estar na área de concessão ou permissão da mesma distribuidora.

2.5.4 Empreendimento com múltiplas unidades consumidoras

Modalidade de geração em empreendimentos com múltiplas unidades consumidoras.

⁴ RN 687: Esta resolução estabelece as condições gerais para a conexão de micro e minigeração distribuída de energia elétrica aos sistemas de distribuição de energia elétrica no país.

Nessa modalidade também é feita a união de participantes (condôminos) para investimento em um sistema central mas, neste caso, ele é instalado no próprio local, ou seja, em uma área comum do empreendimento. O sistema pode ser projetado para atender áreas de uso comum do condomínio, além de gerar os créditos que serão distribuídos aos condôminos de acordo com a sua participação e utilização deles para abater o consumo de suas respectivas unidades (casas, lojas etc.). Modalidade muito utilizada em condomínios residenciais, prédios comerciais e shoppings.

2.6 Principais tipos de geração distribuída

De acordo com Matos e Catalão (2013), as unidades de geração distribuída podem ser divididas de distintas formas. Algumas das formas de divisão mais conhecidas categorizam os tipos de geração quanto a capacidade de produção das unidades ou quanto as fontes de produção de energia.

Todavia, ainda segundo os autores, a mais recente e aceita forma de divisão baseia-se na capacidade de injeção de energia na rede. Esta categorização debruça-se fundamentalmente, no tipo de gerador e fonte de energia utilizada nas unidades produtoras (MATOS; CATALÃO, 2013).

Na Tabela 1 estão especificados os tipos de GD de acordo com a capacidade de injeção de energia na rede.

Tabela 1 – Tipos de geração distribuída por injeção na rede

Tipos de GD	Tipo de injeção de energia	FP
1	Potência ativa e reativa	$0 < FP < 1$
2	Potência ativa com consumo de potência reativa	$0 < FP < 1$
3	Apenas potência ativa	$FP = 1$
4	Apenas potência reativa	$FP = 0$

Fonte: adaptado de Matos e Catalão (2013)

Segundo Matos e Catalão (2013), o primeiro tipo indicado de GD está associado aos geradores síncronos. Através do controle da corrente de excitação deste motor é possível o fornecimento de energia tanto ativa quanto reativa. O segundo tipo está relacionado com geradores assíncronos, em particular em ligações com aerogeradores eólicos, que, embora consigam produzir energia ativa, precisam de energia reativa para a sua produção.

Ainda de acordo com os autores, o terceiro tipo refere-se somente à capacidade de produção de energia ativa, resultado da conversão de energia contínua em alternada. Esta transformação é feita através de módulos de eletrônica de potência conectados a painéis fotovoltaicos, microturbinas e células de combustível. O quarto tipo é muito similar ao primeiro, porém, neste caso, a corrente de excitação é fornecida na quantidade exata para que o sistema abasteça apenas energia reativa ao sistema (MATOS; CATALÃO, 2013).

Nos últimos anos, intensificou a inserção da GD no Brasil, caracterizado por gerações de médio e pequeno porte conectados em média tensão (MT). Contudo, conexões em baixa tensão começaram a ter expressividade no Brasil.

Partindo dessa ideia, apresentam-se os tipos de GD usualmente utilizados para conexão em redes de BT como microturbinas, microcentrais hidrelétricas, aerogeradores de pequeno porte e painéis solares fotovoltaicos.

2.6.1 Microturbina a gás

Dias et al. (2005) pondera sobre as microturbinas. Segundo o autor, é a designação que se dá às turbinas a gás que produzem potência elétrica entre 25 kW e 300 kW para algumas referências e até 500 kW para outras.

As microturbinas são derivadas de tecnologias de turbo alimentação de caminhões ou de pequenas turbinas de sistemas auxiliares da aviação (auxiliary power units - APUs). Podem ser unidades de simples estágio, fluxo radial e com velocidades de rotação entre 90.000 e 120.000 rpm, como também de múltiplos estágios e/ou menores velocidades de rotação (DIAS et al., 2005)

Mesmo sendo as microturbinas dispositivos cujo princípio de funcionamento termodinâmico e componentes construtivos se assemelham aos das turbinas a gás, Souza (2012) explica que estes dispositivos são singulares em diversos aspectos, o que explica sua classificação distinta.

No entanto, as primeiras microturbinas utilizadas em projetos de GD eram baseadas em adaptações de equipamentos que originalmente foram desenvolvidos para aplicações comerciais em transportes (geradores para aviões, para navios, para ônibus, etc.), ao invés de serem projetadas para a produção de energia elétrica (SOUZA, 2012).

Segundo Dias et al. (2005), as micro-turbinas são, na maioria, turbinas a gás, com um andar de expansão. O ar novo admitido é conduzido ao compressor onde a pressão é elevada até cerca de 70psig. Com o objetivo de aumentar o rendimento da micro-turbina, é usual integrar no sistema um recuperador de calor (regenerador)

que permite aproveitar o calor disponível nos gases de escape para aquecer o ar novo antes deste entrar na câmara de combustão.

Logo, o calor libertado na combustão eleva a temperatura da mistura ar-combustível e, conseqüentemente a sua pressão. Ao passar na turbina a mistura expande-se transmitindo energia mecânica ao eixo, acionando o compressor e o gerador (DIAS et al., 2005).

Souza (2012) explana que, as microturbinas operam basicamente aspirando e forçando o ar para dentro da turbina a alta velocidade (microturbinas operam com velocidades de rotação entre 50000 rpm e 100000 rpm) e pressão; o ar é misturado ao combustível e queimado na câmara de combustão, no qual o processo de queima é controlado para se obter a máxima eficiência e baixos níveis de emissão; os gases produzidos na combustão sofrem expansão nas palhetas da turbina realizando trabalho; os gases não aproveitados são emitidos na atmosfera.

O rendimento elétrico atingido das microturbinas com recuperador de calor é da ordem dos 30%. Em sistemas de cogeração o rendimento global pode atingir mais de 80%. Os últimos desenvolvimentos tecnológicos apontam para a utilização de materiais cerâmicos nas secções quentes da micro-turbina, o que permite atingir temperaturas mais elevadas e, conseqüentemente, rendimentos mais elevados (DIAS et al., 2005).

Os custos específicos de instalação das microturbinas no mercado americano, de acordo com Dias (2005), situam-se entre US\$700 e US\$1.300/kW. Estes incluem toda a parte física do equipamento, manuais, softwares e treinamento inicial.

Para o Brasil, estes custos são maiores devido a fatores como taxas de importação, transporte, implantação do sistema de fornecimento de combustível, entre outros, podendo representar um acréscimo de 30 a 50% dos valores mencionados. No entanto, os fabricantes de microturbinas estão trabalhando para um custo específico de instalação futuro, nos EUA, abaixo de US\$650/kW. Isto parece ser possível se o mercado se expandir e aumentar o volume de vendas (DIAS et al., 2005).

É importante ressaltar ainda que, apesar da maioria das microturbinas operarem a gás, as mesmas podem utilizar outros combustíveis, dentre eles a gasolina, gás propano liquefeito (GPL), diesel e querosene.

2.6.2 Micro centrais hidrelétricas (mCH)

De acordo com a ANEEL (2017), a geração de energia através de usinas hidrelétricas é a forma de obtenção de energia renovável mais empregada no mundo e, portanto, uma tecnologia bastante consolidada. No Brasil, terceiro maior produtor de hidroeletricidade no mundo e, por consequência, detentor de larga experiência

no assunto. Os órgãos competentes definem Micro central hidrelétrica (mCH) como sendo os aproveitamentos hidrelétricos com potência instalada até 100 kW.

Segundo Bertoncello (2011), a geração de eletricidade através de mini e micro centrais hidrelétricas, no Brasil, geralmente é realizada por autoprodutores que utilizam a energia para consumo próprio e, normalmente, estão ligados a empreendimentos agroindustriais. Em muitos casos, esses geradores não estão conectados às redes de distribuição, funcionando de forma isolada da rede.

No entanto, a conexão de geradores nas redes de distribuição das concessionárias está sujeita ao cumprimento de alguns requisitos mínimos exigidos em normativas ou normas técnicas publicadas por elas.

As mCHs se caracterizam por serem usinas hidrelétricas de porte muito pequeno que operam a fio d'água, ou seja, não têm necessidade de grande reservatório. Normalmente são empreendimentos de pequenas fazendas que aproveitam os recursos hídricos presentes na propriedade e usualmente, como explica Bertoncello (2011), são destinadas a alimentar pequenas cargas sem conexão com a rede elétrica.

Na maioria dos casos as mCHs são instaladas próximas ao curso hídrico. Através de uma tubulação adequada é direcionada uma vazão d'água conhecida, movimentando as pás de uma bomba-turbina e produzindo energia elétrica continuamente. Juntamente com um inversor de corrente é possível converter a energia elétrica contínua (CC) em alternada (CA). Ao mesmo tempo, a presença desse inversor permite um total aproveitamento da energia no mesmo local de instalação ou até para suprir a demanda de outros locais. Como resultado, as mCHs não causam nenhum tipo de impacto no curso hídrico, tornando-se, assim, uma tecnologia plenamente sustentável.

Como são aproveitamentos de pequeno porte, Souza (2012) explica que usualmente essas usinas apresentam represas de dimensões reduzidas que operam com variações mínimas, em nível praticamente constante. A energia potencial da água em um reservatório é transformada em energia cinética (ou em pressão) ou a própria energia cinética da correnteza do rio é utilizada para acionar a turbina hidráulica.

Isso depende das diferentes tecnologias de turbinas hidráulicas que podem ser empregadas. A escolha da turbina mais adequada depende de uma série de fatores: vazão da água, queda líquida, altitude do local de instalação, conformação da rotação da turbina com o gerador, altura de sucção, entre outros. Tal tecnologia é adequada para conexão em redes secundárias rurais.

2.6.3 Aerogeradores de pequeno porte

De acordo com Souza (2012), a energia eólica é a energia obtida a partir da movimentação de massas de ar, ou seja, do vento. Essa forma de energia é utilizada há muito tempo, principalmente na movimentação de barcos e em bombeamento de água.

O processo de conversão de energia com as turbinas eólicas, segundo o autor, acontece pelo contato do vento com as pás do cata-vento, transformando a energia cinética em energia elétrica. Com o giro das pás, obtém-se a energia mecânica que aciona o rotor do aerogerador, produzindo energia elétrica. A conversão de energia está diretamente relacionada à densidade do ar, à área coberta pela rotação das pás e à velocidade dos ventos (SOUZA, 2012).

De acordo com a WWEA (2013) e a International Electric Commission (IEC), que é o mais importante órgão de padronização, define um APP – Aerogerador de Pequeno Porte no padrão IEC 61400-2 como um rotor com área varrida menor que 200m², o que resulta em uma potência de saída de aproximadamente 50 kW.

A capacidade global instalada, de acordo com Rodrigues (2014), alcançou mais de 576 MW ao final de 2011, sendo que a China contabiliza 40% desse total e os Estados Unidos 35%. Mais de 120 MW de capacidade instalada de APP foram adicionados em 2011, o que contabiliza um crescimento mundial de 27% para esse ano.

O rotor são todas as partes rotativas do aerogerador, incluindo o cubo e as pás. A nacelle é parte intermediária entre o rotor e as pás. A nacelle não rotaciona com relação ao rotor, mas deve rotacionar com relação a torre suporte, em um movimento que é conhecido como guinada. O gerador elétrico realiza a conversão da potência mecânica em elétrica, já o leme posiciona o aerogerador na direção predominante do vento incidente (RODRIGUES, 2014).

A periodicidade dos ventos é um fator agravante na inserção desses empreendimentos no sistema elétrico. Souza (2012) pondera que a ocorrência irregular dos ventos e a variação da sua velocidade ao longo do ano contribuem como fator dificultador no cálculo preciso da capacidade de produção de energia dessa fonte. É prudente, ainda, destacar que a geração eólica juntamente com a geração solar fotovoltaica são as formas de produção de energia elétrica usando fontes renováveis que mais crescem no mundo.

2.6.4 Célula combustível

De acordo com Santos (2003), célula de combustível é um dispositivo que converte energia química em energia elétrica. Nesta reação eletroquímica são combinados um combustível e um oxidante (típicamente o combustível é o hidrogênio ou um composto que o tenha na sua constituição e o oxidante é o oxigênio) que reagem diretamente. O hidrogênio utilizado no processo pode ser obtido de diversas fontes: electrólise da água, gás natural, propano, metanol, ou outros derivados do petróleo, como qualquer hidrocarboneto.

Dias et al. (2005) explica que uma célula combustível é semelhante a uma bateria no sentido de que uma reação eletroquímica é usada para criar corrente elétrica. Os elétrons podem ser liberados por um circuito externo, através de conexões com as placas que formam o ânodo e o cátodo da célula. A diferença principal entre células a combustível e baterias é que as baterias possuem internamente uma provisão limitada de combustível, formada por uma solução eletrolítica e materiais sólidos, como é o caso da bateria de ácido sulfúrico e chumbo ou por reagentes sólidos secos, como as pilhas de carbono e zinco.

As células a combustível têm reações semelhantes, porém, os reagentes são gases (hidrogênio e oxigênio) que são combinados em um processo catalítico. Como o reagente pode ser fornecido à célula constantemente, a unidade nunca cessará sua produção de energia (DIAS et al., 2005).

Quando se trata de valores, Dias et al. (2005) explica que o preço específico das células a combustível é muito alto se comparado a outras tecnologias disponíveis para a geração de energia na mesma faixa de capacidade. O único produto disponível comercialmente hoje é a PureCell 200 (antiga PC-25TM), fabricada pela UTC que, segundo dados da Califórnia Energy Commission, custa aproximadamente US\$4.000/kW. O custo desta célula instalada, com potência de 200 kW, chega a US\$1.100.000,00, o que resulta em um custo ‘turn-key’ de aproximadamente US\$5.500/kW. Todavia, Espera-se que as células a combustível tenham mínimas exigências de manutenção. Os sistemas de alimentação de combustível e o sistema reformador podem necessitar de inspeção e manutenção periódicas (uma vez ao ano). A célula propriamente dita não requererá manutenção até o fim de sua vida útil. Em relação ao desempenho, o autor coloca que espera-se que as células a combustível alcancem eficiências da ordem de 40 a 60%. Eficiências mais altas, da ordem de 80 a 90%, são possíveis quando usadas em aplicações de cogeração. Outra característica promissora das células a combustível são as baixas emissões. Considerando que elas produzem eletricidade sem combustão, os produtos habituais de combustão não estão presentes. Além do mais, são silenciosas e possuem alta confiabilidade na operabilidade e geração.

2.6.5 Painéis solares fotovoltaicos

De acordo com o Imhoff et al. (2007), a energia solar fotovoltaica é definida como a energia gerada através da conversão direta da radiação solar em eletricidade. Isto se dá por meio de um dispositivo conhecido como célula fotovoltaica que atua utilizando o princípio do efeito fotoelétrico ou fotovoltaico.

Souza (2012) explica que a geração solar fotovoltaica é obtida através da conversão da energia luminosa do sol, através dos fótons, em energia elétrica. Para isso, utilizam-se tipos de células solares fabricadas basicamente de silício semicondutor, composto por diodos de junção PN espalhados sobre uma superfície. Quanto maior seu tamanho, maior será a capacidade de conversão do módulo.

O efeito fotovoltaico é gerado através da absorção da luz solar, que ocasiona uma diferença de potencial na estrutura do material semicondutor

Os painéis fotovoltaicos, que são o conjunto de módulos fotovoltaicos, produzem eletricidade em baixa tensão e em corrente contínua, sendo necessária a utilização de inversores para adequação com a rede elétrica (SOUZA, 2012).

A função básica de uma célula solar consiste em converter diretamente a energia solar em energia elétrica. A forma mais comum das células solares realizarem esta conversão é através do efeito fotovoltaico, como já supracitado.

Segundo Dias et al. (2005), existem três tipos principais de células solares:

- **células monocristalinas:** essas células representam a primeira geração. O seu rendimento elétrico é relativamente elevado (aproximadamente 16%, podendo subir até cerca de 23% em laboratório), mas as técnicas utilizadas na sua produção são complexas e caras. Isto posto, é necessária uma grande quantidade de energia em seu processo de fabricação, devido à exigência de utilizar materiais em estado muito puro e com uma estrutura de cristal perfeita;
- **células policristalinas:** essas células têm um custo de produção inferior por necessitarem de menos energia em sua fabricação, mas apresentam um rendimento elétrico inferior (entre 11% e 13%, obtendo-se até 18% em laboratório). Esta redução de rendimento é causada pela imperfeição do cristal devido ao sistema de fabricação;
- **células de silício amorfo (capa fina):** são as que apresentam o custo mais reduzido, mas, em contrapartida, o seu rendimento elétrico é também o mais reduzido (aproximadamente 8% a 10%, ou 13% em laboratório). As células de silício amorfo são películas muito finas, o que permite serem utilizadas como material de construção, tirando ainda o proveito energético.

Sistemas interligados nem sempre são desenvolvidos de forma a atender todas as possíveis cargas e demandas de consumo. Isto porque a distribuição heterogênea do desenvolvimento faz com que a extensão da rede para o atendimento de pequenas cargas distantes nem sempre seja economicamente viável. Surgem, então, os sistemas isolados, para os quais soluções de geração locais são adotadas pelo menos até que o aumento de demanda de energia que possa justificar a extensão da rede.

Logo, os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR), de acordo com Dias et al. (2005), são uma aplicação da tecnologia solar fotovoltaica na qual o arranjo fotovoltaico atua como fonte complementar ao sistema elétrico ao qual está conectado.

Existem basicamente dois tipos de SFCR: o primeiro é representado pelas grandes centrais fotovoltaicas que geram grandes pacotes de energia de forma centralizada. O segundo, de acordo com o autor, gera a energia de forma descentralizada, no local de consumo. Estes últimos são conhecidos como Edificações Solares Conectadas à Rede (EFCR). As grandes centrais fotovoltaicas têm sido instaladas obedecendo a duas razões fundamentalmente:

- como uma alternativa à geração centralizada de energia através de combustíveis de origem fóssil ou nuclear;
- como suporte aos sistemas de distribuição da concessionária, proporcionando-lhe maior estabilidade à tensão elétrica (DIAS et al., 2005).

Sobre a qualidade da energia fotovoltaica gerada, Dias et al. (2005) pondera que tal interconexão à rede elétrica pode produzir distorção harmônica na tensão da linha, incremento da carga reativa do alimentador e variações de tensão. Para evitar estes efeitos indesejáveis, a energia injetada à rede deve cumprir com padrões de qualidade bem definidos.

Os sistemas de energia fotovoltaica podem ser classificados em três categorias principais:

- **Sistemas autônomos ou isolados (OFF GRID):** de acordo com Gazoli, Villalva e Guerra (2012), são sistemas que não dependem da rede elétrica convencional para funcionar, sendo possível sua utilização em localidades carentes de rede de distribuição elétrica. Existem dois tipos de autônomos: com armazenamento e sem armazenamento. O primeiro pode ser utilizado em carregamento de baterias de veículos elétricos, em iluminação pública e, até mesmo, em pequenos aparelhos portáteis; enquanto o segundo, além de ser

frequentemente utilizado em bombeamento de água, apresenta maior viabilidade econômica, já que não utiliza instrumentos para o armazenamento de energia;

- **sistemas ligados à rede (ON GRID):** Pereira e Oliveira (2011) explicam que esses sistemas são aqueles que trabalham concomitantemente à rede elétrica da distribuidora de energia.. De forma sucinta, o painel fotovoltaico gera energia elétrica em corrente contínua e, após convertê-la para corrente alternada, é injetada na rede de energia elétrica. Tal conversão se dá pela utilização do inversor de frequência, que realiza a interface entre o painel e a rede elétrica;
- **sistema híbrido:** a associação de sistemas fotovoltaicos com demais fontes de energia fundamenta-se no sistema híbrido. O seu maior benefício é proporcionar energia elétrica (armazenada nas baterias), na privação de sol, ou seja, em dias de baixa, ou nenhuma, geração. No entanto, é apontado como um sistema complexo, já que necessita integrar diversas formas de produção de energia elétrica, como motores à diesel ou gás, ou por geradores eólicos (PEREIRA; OLIVEIRA, 2011).

2.7 Aspectos positivos e negativos da GD

Uma vez implantada corretamente e em locais adequados, a GD pode propiciar muitos benefícios aos consumidores, às concessionárias, à sociedade e ao sistema elétrico interligado, em comparação com as opções de geração (SEVERINO, 2008)

Benefícios aos consumidores (ROMAGNOLI et al., 2005 apud SEVERINO, 2008):

- quando implantadas com arranjo e tecnologias adequados, unidades de GD podem ter confiabilidade elevada, que podem se aproximar de 100%.
- unidades de GD podem suprir o consumidor com energia de ótima qualidade no que se refere a tensão, frequência, conteúdo harmônico, entre outros indicadores;
- usualmente a GD pode ser o meio mais econômico para se evitarem custos exorbitantes das concessionária;
- a GD geralmente é o único meio para prover energia elétrica para áreas afastadas da rede de distribuição e transmissão, tendo em vista que as tensões fornecidas para essas regiões usualmente atingem níveis críticos, devido à distância, danificando equipamentos elétricos das casas.

- com a GD a matriz energética é diversificada, evitando a dependência de um único tipo de recurso;
- com a utilização de recursos locais diminui-se também a necessidade de importação de recursos;
- aumentando o número de GD há uma maior competição entre as concessionárias, reduzindo assim as tarifas de energia;
- promove o desenvolvimento econômico local, principalmente em regiões onde não se chegava energia, aumentando a economia local através da criação direta e indireta de empregos;
- diminui o impacto ambiental, tendo em vista, a baixa emissão de poluentes.

Benefícios às concessionárias (ROMAGNOLI et al., 2005 apud SEVERINO, 2008):

- a GD reduz o custo da energia, uma vez que perdas ativas e reativas são diminuídas na rede, além de proporcionar uma estabilidade maior à tensão elétrica garantindo uma boa qualidade de energia além de adiar investimentos em subestações de transformadoras e em capacidade adicional de transmissão;
- por estar usualmente localizada próximo ao consumidor a confiabilidade da GD aumenta, uma vez que falhas devido às longas distâncias das linhas de transmissão são evitadas.
- permite uma redução de investimentos para demanda em horário de pico;
- unidades de menor capacidade minimizam os erros de planejamento, pois permitem incrementos de geração menores e ajustam-se melhor ao crescimento da demanda, além disso, facilitam manutenções programadas, pois reduzem o montante de capacidade instalada que se tornará indisponível;
- a GD apresenta maior modularidade e tempo de construção reduzido;
- a GD possui menores entraves burocráticos devido a problemas políticos e ambientais relacionados a concessões de faixas de servidão para novas redes de transmissão.

Benefícios ao sistema elétrico interligado (ROMAGNOLI et al., 2005 apud SEVERINO, 2008):

- redução do carregamento das redes, e conseqüentemente maior flexibilidade operativa;
- melhora no perfil de tensão dos ramais;
- redução nas perdas da rede;
- maior eficiência energética obtida pela operação conjunta da Geração distribuída e convencional;

Além das vantagens descritas anteriormente a GD também possui desvantagens, uma vez que, se mal parametrizada e localizada, pode aumentar as perdas dos sistemas. Ao inserir uma GD na rede as correntes de operação se alteram, afetando todo o sistema de proteção do sistema.

De acordo com Rodrigues (2006), as dificuldades de inserção em escala da GD estão, entre outras coisas, relacionadas aos problemas de compatibilidade com as redes elétricas de distribuição. Segundo o autor, os aspectos negativos da GD incluem:

- a grande complexidade, incluindo a técnica, no nível de operação do despacho centralizado;
- a existência de impactos importantes nos procedimentos de operação e de controle da rede de distribuição;
- a necessidade de integração e de gerenciamento da GD junto às redes de distribuição existentes, que têm grau de complexidade dependente da rede e da fonte de GD a ser instalada; e isso requer análise caso a caso e impõe custo adicional;
- o impacto que a presença de GD causa nos sistemas de proteção das atuais redes de distribuição;
- a necessidade de monitoração constante da qualidade da energia;
- a necessidade de novas configurações da rede de distribuição a fim de incorporar e explorar a GD já no seu planejamento;
- as dificuldades de se elaborarem normas claras e abrangentes face às especificidades de cada rede e da própria GD;
- os elevados custos envolvidos, que, apesar de decrescentes com o desenvolvimento das tecnologias de GD, notadamente são maiores que os custos da maioria das opções de geração centralizada (RODRIGUES, 2006)

3 SIMULINK E ETAP NO ESTUDO DE SISTEMAS DE ENERGIA COM GD

3.1 Considerações iniciais

Os estudos dos sistemas elétricos de potência a cerca da geração distribuída são normalmente realizados através de simulações computacionais. Neste contexto que os programas Simulink e ETAP serão empregados.

Para avaliar a possibilidade da utilização do Simulink em sistemas que possuem geração distribuída foi utilizado como objeto de comparação a simulação de Miranda, Alves e Ramos (2021), sendo necessário, replicar a simulação.

Uma estratégia utilizada para validar a simulação foi a comparação dos resultados com os resultados do trabalho base, além de estabelecer um comparativo dos resultados com a simulação do mesmo sistema no software *ETAP*, por ser um software muito robusto e que possui maior utilização para simulação de sistemas de potência no mercado.

3.2 O software Matlab/Simulink

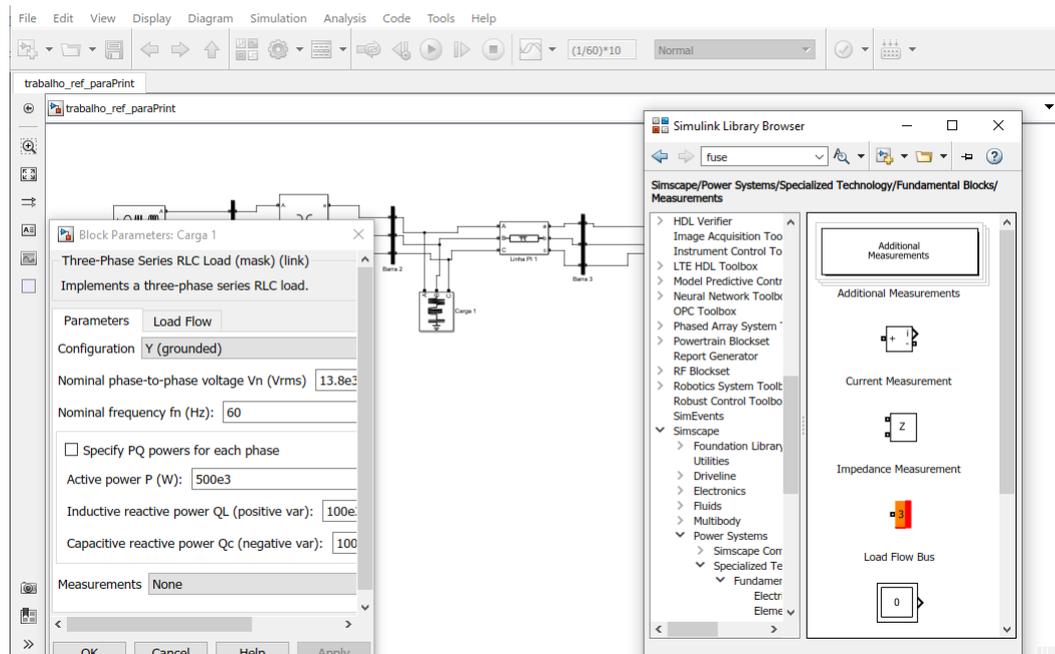
De acordo com Rodrigues, Seabra e Silva (2018), o MATLAB é um *software* interativo de alta performance para cálculos numéricos; modelação e simulação de sistemas dinâmicos; análise de propriedades dinâmicas de sistemas; projeto de sistemas de controle; medições e análise de sinais.

O Simulink é uma excelente ferramenta para usuários com pouca experiência em linguagens de programação e uma das inúmeras vantagens é a existência de uma ajuda online, o que substitui a necessidade do manual.

A figura 3 apresenta um pouco do ambiente de trabalho do Simulink. Na aba Simulink Library Browser é uma das principais janelas de ferramentas do software. Contém uma grande variedade de blocos pré-construídos e pré-configurados que representam componentes de sistemas dinâmicos, tais como sensores, atuadores, controladores, filtros e funções matemáticas. Estes blocos podem ser arrastados e soltos em uma janela de modelagem do Simulink, representado pelo ambiente na cor branca, para construir simulações. A library Browser permite que os usuários naveguem pelas diferentes categorias de blocos, pesquisem blocos específicos, personalizem bibliotecas e criem suas próprias bibliotecas de blocos personalizados.

O Simulink permite a modelagem de sistemas elétricos de potência, incluindo componentes de eletrônica de potência, controle e comunicação, em uma única plataforma integrada. Além disso, o Simulink também tem a capacidade de incorporar modelos de sistemas mecânico, hidráulicos e térmicos, o que pode ser útil em estudos de sistemas de energia híbridos.

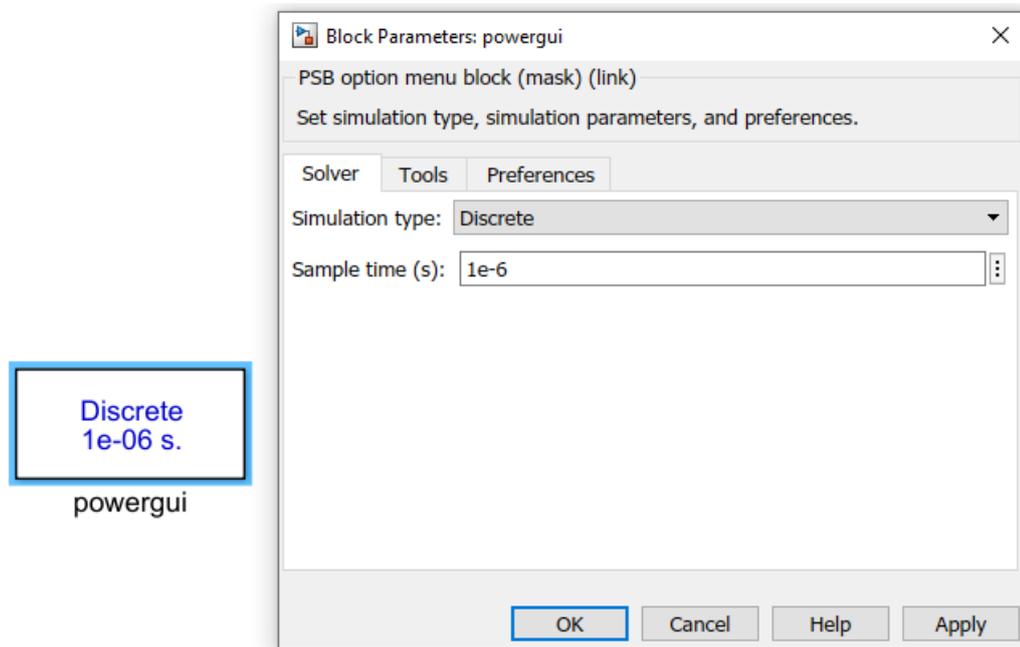
Figura 3 – Ambiente de trabalho Simulink



Fonte: Desenvolvido pelo autor

É importante destacar na figura 4 o bloco powerGui que permite selecionar o tipo de simulação para sistemas elétricos, possuindo dois tipos principais, os transitórios eletromagnéticos, onde é possível observar a onda de tensão e corrente variando senoidalmente e as simulações eletromecânicas, em que são desprezadas as variações eletromagnéticas considerando apenas as variações eletromecânicas de oscilação de tensão e velocidade das máquinas.

Figura 4 – Bloco powergui no Simulink



Fonte: Desenvolvido pelo autor

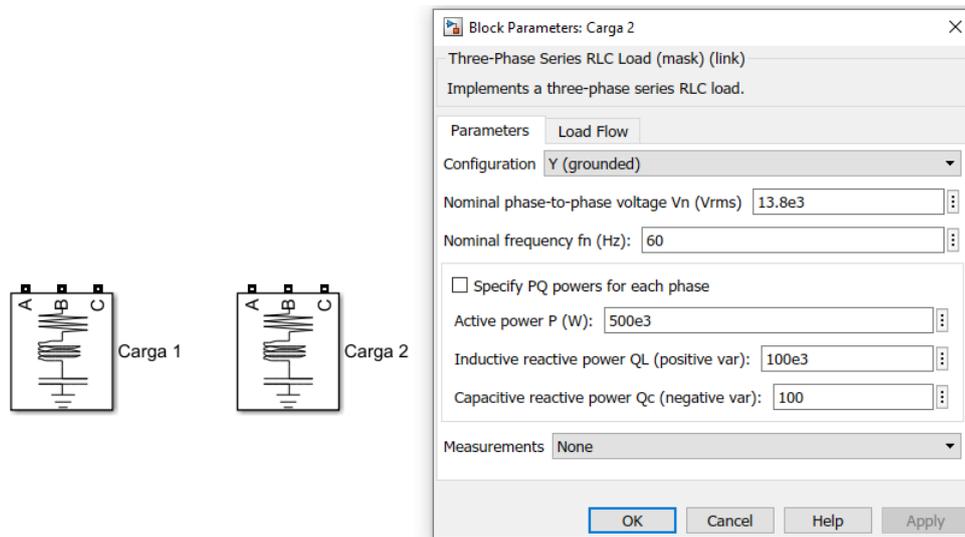
Já o ETAP, não realiza transitório eletromagnético apenas eletromecânico, obtendo um resultado fasorial para tensão e corrente.

3.2.1 Configuração do Simulink na análise de alocação de GD

A seguir serão discriminados os blocos com as configurações utilizadas para a simulação. Para a configuração do tempo de execução da simulação no Simulink é utilizado o conceito de steps. Para a simulação em questão foram utilizados 10 steps.

A figura 5 apresenta dois blocos indicados como carga 1 e 2, consumindo 500kW de potência ativa e 100 kVAR de potência reativa indutiva. Representando os usuários da rede.

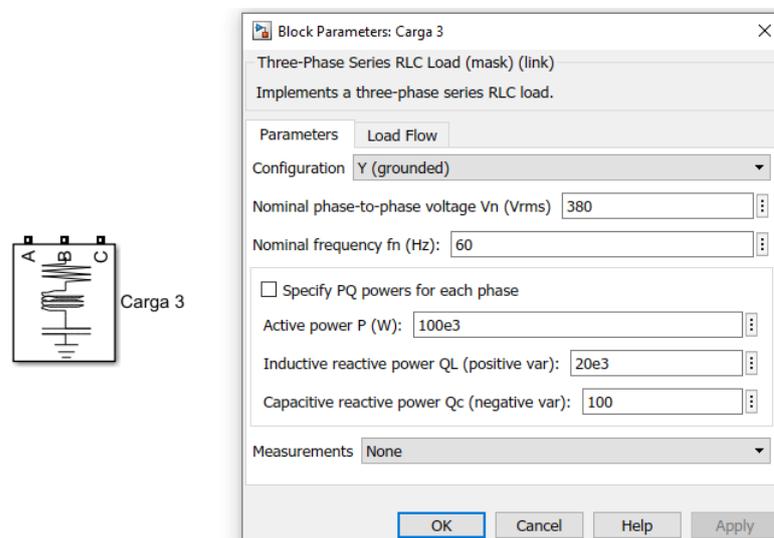
Figura 5 – Cargas 1 e 2 referentes aos consumidores e seus parâmetros



Fonte: adaptado de Miranda, Alves e Ramos (2021)

A Figura 6 representa uma carga trifásica de 100kW de potência ativa e 20kVAr de potência reativa indutiva.

Figura 6 – Carga 3 referente ao consumidor proprietário da geração distribuída e seus parâmetros

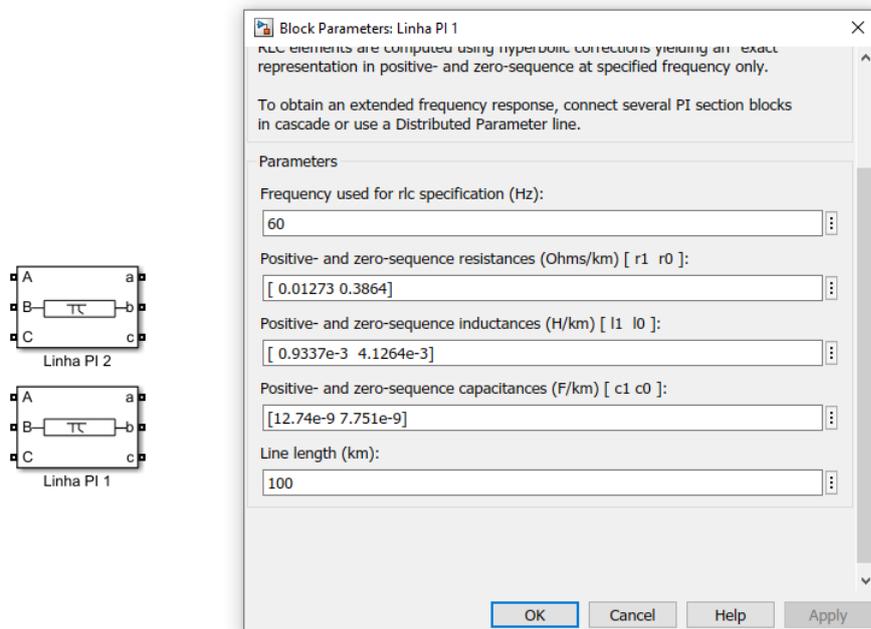


Fonte: adaptado de Miranda, Alves e Ramos (2021)

Na Figura 7 são representados os blocos referentes ao modelo de linha de transmissão utilizado na simulação. Os modelos linha PI representam a linha de distribuição trifásica. Por não ultrapassarem 100 km, linha PI 1 100km e linha PI

2 2km, na modelagem matemática de linhas curtas e médias, pode-se considerar o efeito dos parâmetros concentrados.

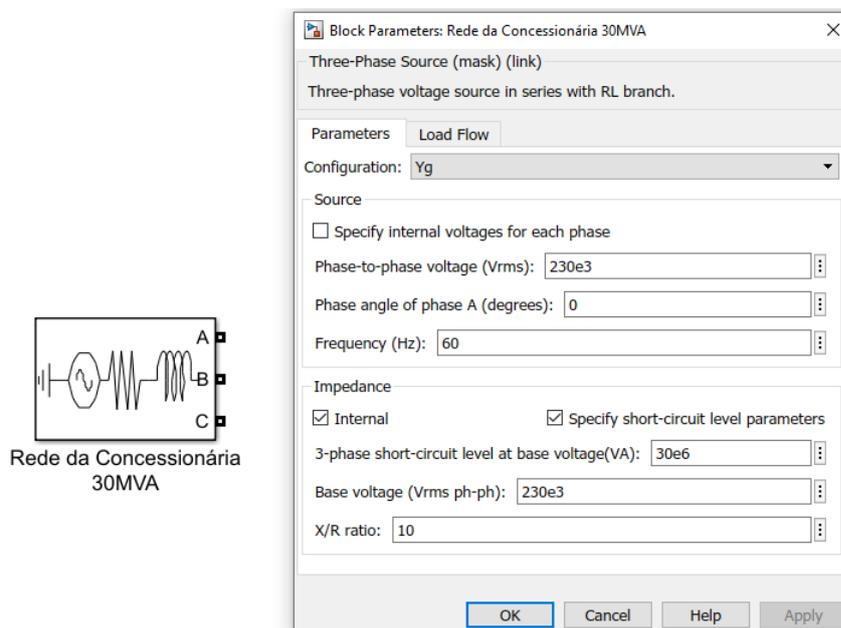
Figura 7 – Bloco referente ao modelo de linha de transmissão - modelo Pi



Fonte: adaptado de Miranda, Alves e Ramos (2021)

Na Figura 8 é representada a rede da concessionária. Foi utilizado o bloco de uma fonte trifásica para alimentar o sistema. Possui configuração Y aterrado, operando a uma frequência de 60Hz, tendo uma potência nominal de 30MVA, e tensão 230kV.

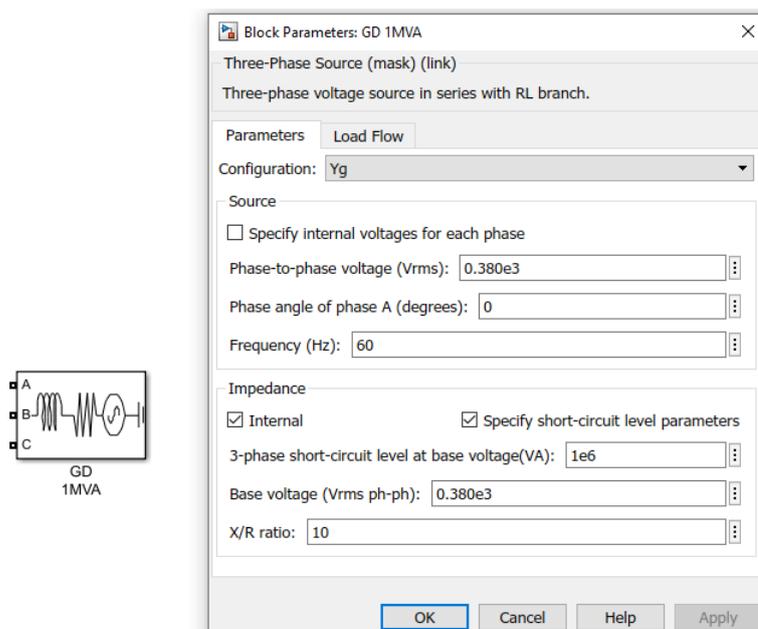
Figura 8 – Representação da rede da concessionária e seus parâmetros



Fonte: adaptado de Miranda, Alves e Ramos (2021)

A figura 9 representa o bloco utilizado para a geração distribuída. Utilizando as mesmas configurações da rede da concessionária, porém, com potência de 1MVA e tensão de 380V.

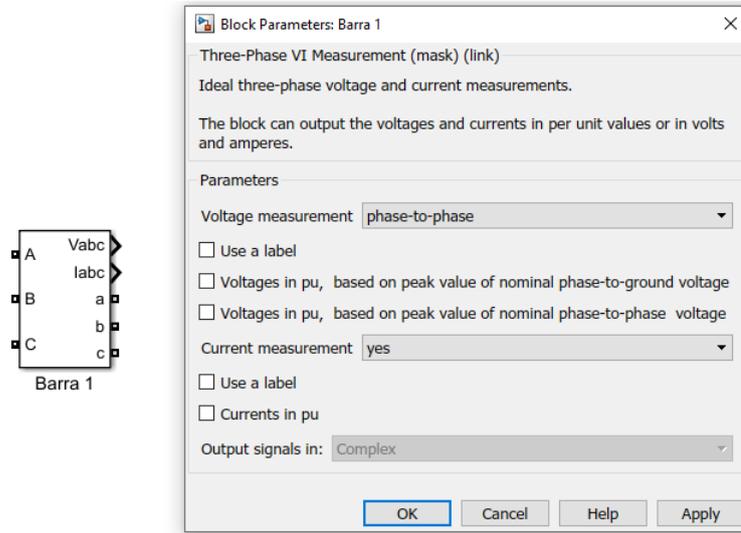
Figura 9 – Representação da geração distribuída e seus parâmetros



Fonte: adaptado de Miranda, Alves e Ramos (2021)

No Simulink, os barramentos do sistema possuem medição da tensão e corrente acoplados. A forma como as medições são apresentadas nas saídas dos barramentos pode ser visualizada na Figura 10.

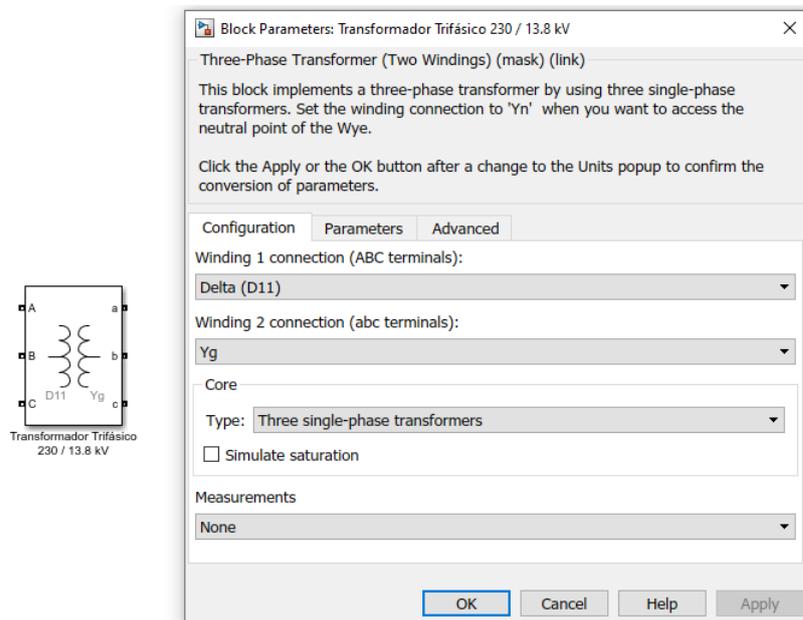
Figura 10 – Barramento utilizado e seus parâmetros



Fonte: adaptado de Miranda, Alves e Ramos (2021)

Na Figura 11, para modelar a rede de distribuição, foi empregado, após a fonte de alimentação trifásica, um transformador abaixador com configuração Delta-Y aterrado, com potência de 30MVA e que reduz a tensão do sistema de 230kV para 13,8kV.

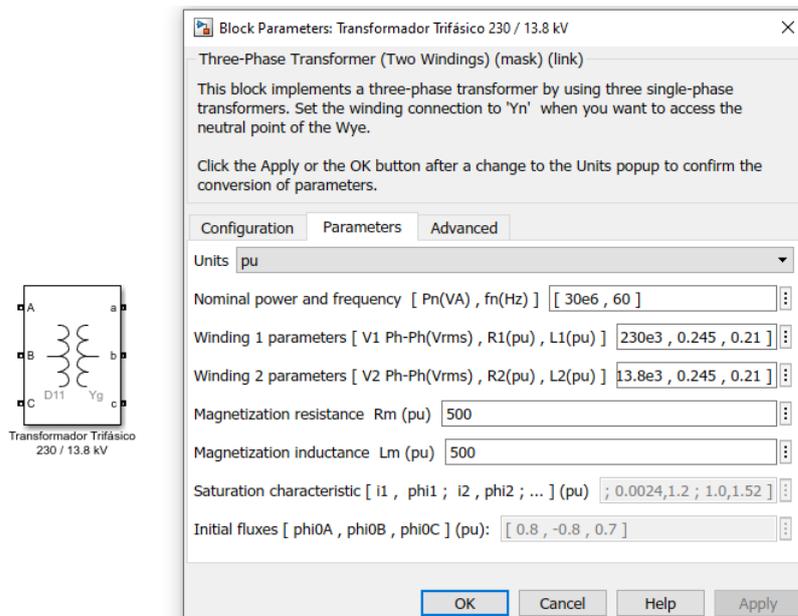
Figura 11 – Transformador trifásico da rede de distribuição



Fonte: adaptado de Miranda, Alves e Ramos (2021)

A Figura 12 indica os parâmetros internos do transformador. Como a potência nominal, frequência, enrolamentos, resistência e indutância de magnetização.

Figura 12 – Parâmetros do transformador trifásico da rede de distribuição

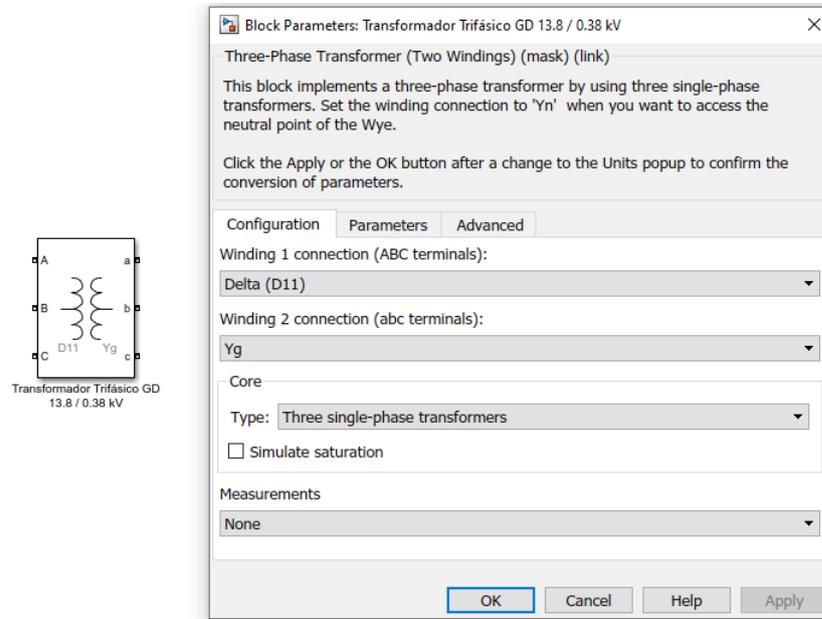


Fonte: adaptado de Miranda, Alves e Ramos (2021)

Nas Figuras 13 e 14 o transformador da geração distribuído é apresentado

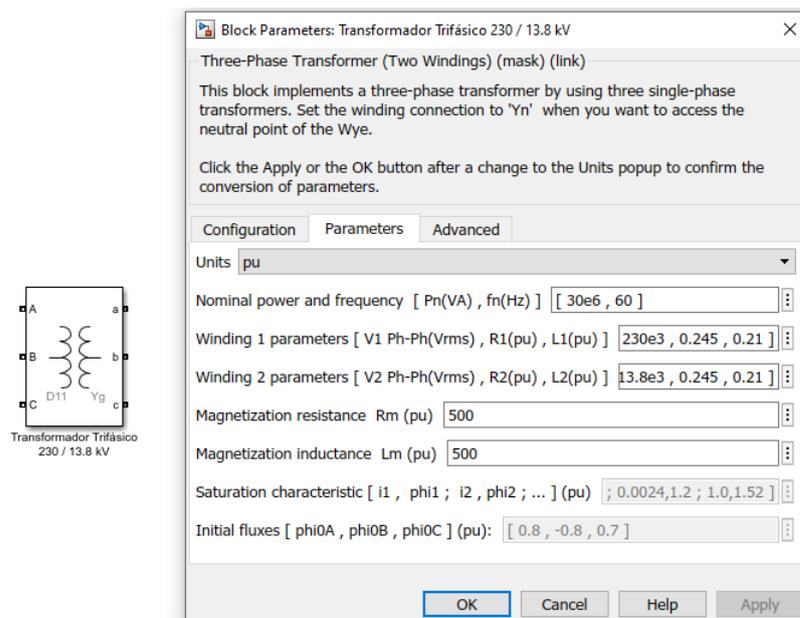
junto com seus parâmetros. O transformador reduz a tensão proveniente da rede de distribuição de 13,8kV para a tensão de 380V.

Figura 13 – Transformador trifásico da geração distribuída



Fonte: adaptado de Miranda, Alves e Ramos (2021)

Figura 14 – Parâmetros do transformador trifásico da geração distribuída



Fonte: adaptado de Miranda, Alves e Ramos (2021)

3.3 ETAP

O ETAP - Electrical Transient Analyzer Program é uma ferramenta para análise de projetos e teste para sistemas de energia. Projetado e desenvolvido para obter múltiplas visões com redes AC e DC, cabos, malhas de terra, painéis, arco, coordenação e seletividade de dispositivos de proteção e diagrama para sistemas de controle.

Através dos módulos de simulação, o ETAP pode utilizar dados em tempo real realizando monitoramento avançado, simulação em tempo real, otimização, sistemas de gerenciamento de energia e redução de carga em alta velocidade.

3.3.1 Funcionamento

O programa virtualiza a operação do sistema elétrico, o tornando bem próximo do real. Um exemplo de operação virtual do ETAP, assim que se altera o status de operação de algum motor no sistema a ser simulado, o programa instantaneamente indica no diagrama na linha específica a mudança de cor indicando qualquer problema.

O software possui integração de dados, permitindo que com a mesma entrada de dados possa ser realizado, como por exemplo, análise de fluxo de potência ou análise da redução da capacidade de um cabo estando no mesmo sistema. Através dessa integração de dados fornece consistência a todo o sistema e, assim, eliminando várias entradas e dados para um mesmo elemento economizando tempo.

O uso do ETAP não requer treinamento inicial e a empresa criadora do software oferece vários vídeos online para aprendizagem em inglês.

Há uma variedade de opções para apresentar ou visualizar o sistema elétrico. Uma das ferramentas mais poderosas do software é a rede composta e os elementos motores. Através dos elementos compostos, esse recurso permite anexar graficamente elementos da rede dentro deles próprios. Como, por exemplo, pode se citar uma rede elétrica complexa da qual possuirá várias redes internamente e através dessa ferramenta, mantém-se um diagrama limpo e organizado exibindo o que o usuário deseja.

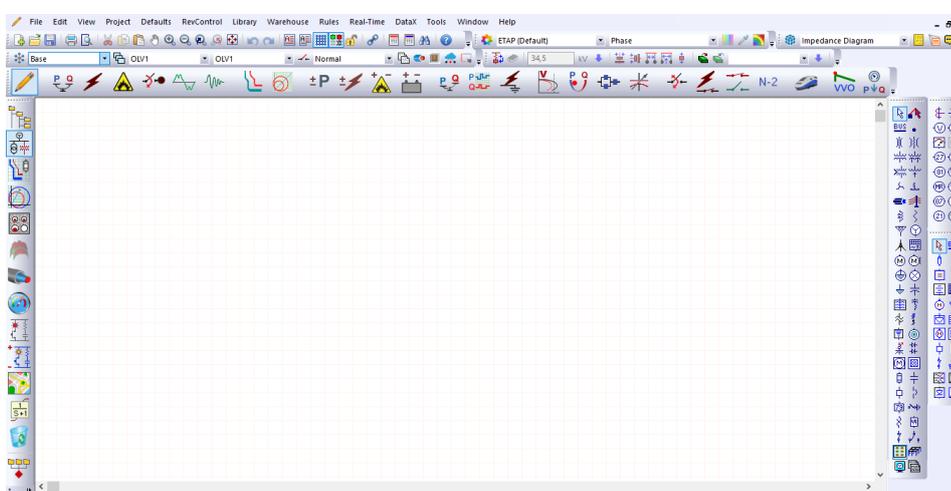
O software permite aos projetistas e engenheiros conceitualizar sistemas coletores, determinar o índice de força do vento e da energia solar fotovoltaica para a realização de conexão dessas redes. O ETAP inclui modelos abrangentes de energia renováveis combinados com cálculos de análise de sistemas de potência e preditiva, dimensionamento de equipamentos e verificação de campo de parques eólicos, parques solares e outros recursos de energia renovável distribuída. No entanto, o ETAP é um

software que pode exigir um hardware mais potente para a execução de simulações complexas.

3.3.2 Interface

O ETAP é um programa complexo para modelagem de sistemas elétricos, possibilitando de fluxo de potências, cálculo de curto circuito, estudo de harmônicos, coordenação e seletividade de proteção, análise de condutores, estudo de arco elétrico e entre outros.

Figura 15 – Interface de edição do software ETAP



Fonte: Autor

A Figura 15 ilustra a interface responsável pela edição e construção das simulações. Para a execução das simulações é necessário alterar o software para o modo "Load Flow", carregando assim o fluxo de potência. O ícone pode ser encontrado na figura 16.

Figura 16 – Ícone para execução da simulação



Fonte: Autor

O fluxo de potência do software é simples de ser executado, ao clicar no ícone da análise de fluxo de potência no sistema, abrirá uma nova barra ao lado direito do programa. Para realizar a análise, basta clicar no primeiro ícone da barra.

Para montagem do sistema, ou seja, criar barras, incluir cabos, transformadores, disjuntores, geração fotovoltaica, eólica, dispõe-se de uma barra de componentes. Essas barras mencionadas no texto estão indicadas na figura 17. A barra de componentes possui diversificação entre componentes a serem utilizados em rede AC e rede DC.

Figura 17 – Barra de ferramenta para fluxo de potência



Fonte: Autor

4 RESULTADOS

Para avaliar o Simulink em simulações com o geração distribuída foram realizadas simulações do mesmo sistema nos dois softwares, Simulink e ETAP. Foram realizados quatro testes para o uso do Simulink em sistemas que possuem geração distribuída.

1. Comparação das correntes medidas nas cargas do sistema de 9 barras entre o Simulink e o ETAP, para avaliar a mudança de contexto dos softwares;
2. Comparação das correntes medidas nas cargas do sistema de 5 barras, com e sem geração distribuída, entre o Simulink e o ETAP,
3. Comparação das perdas do sistema de 5 barras, alocando a geração distribuída em duas localidades, através da metodologia exaustiva, para alocação otimizada.
4. Comparação das perdas do sistema de 9 barras, alocando a geração distribuída em três localidades, através da metodologia exaustiva, para alocação otimizada.

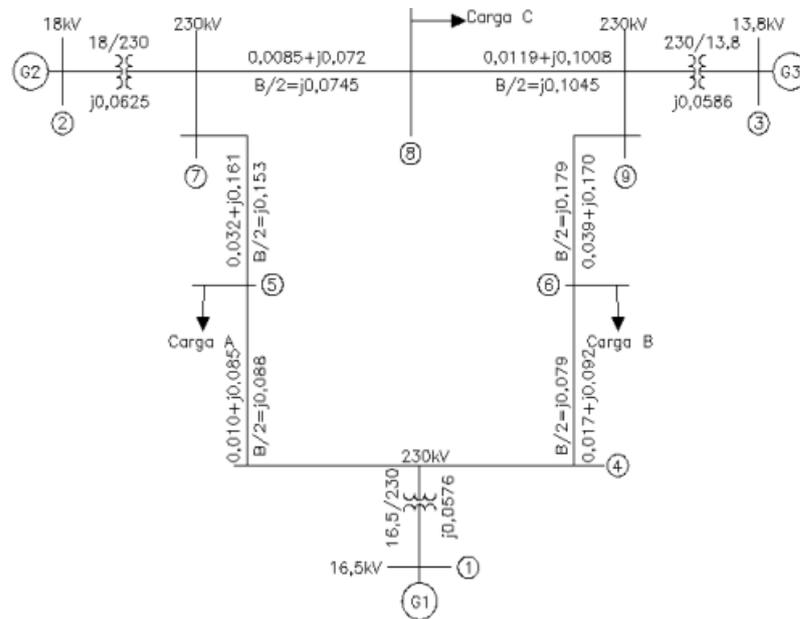
4.1 Sistema 1: Comparação dos valores das correntes nas cargas em um sistema de 9 barras

Sendo assim, o primeiro comparativo de resultados é demonstrado em um sistema composto por 9 (nove) barras sendo extraído da referência Vittal et al. (2019), bastante conhecida pelos engenheiros de sistemas de potência. Seu diagrama unifilar está ilustrado na figura 18 juntamente com os dados do diagrama unifilar das impedâncias dos ramos que são utilizados para calcular os parâmetros das linhas de transmissão e também dos transformadores.

O sistema possui 3 geradores. O gerador G1, conectado à barra 1, está ligado a barra 4 através de um transformador (T1) Δ - Y_g de 16,5/230 kV. Já a máquina G2, ligada à barra 2, conecta-se por meio de um transformador (T2) Δ - Y_g de 18/230kV à barra 7. Finalmente, o gerador G3, conectado à barra 3, possui um transformador (T3) Δ - Y_g de 13,5/230kV que o liga ao barramento 9.

Possui ainda 3 centros de cargas, 1, 2 e 3, conectadas às barras 5, 6 e 8, respectivamente, todas modeladas como impedância constante.

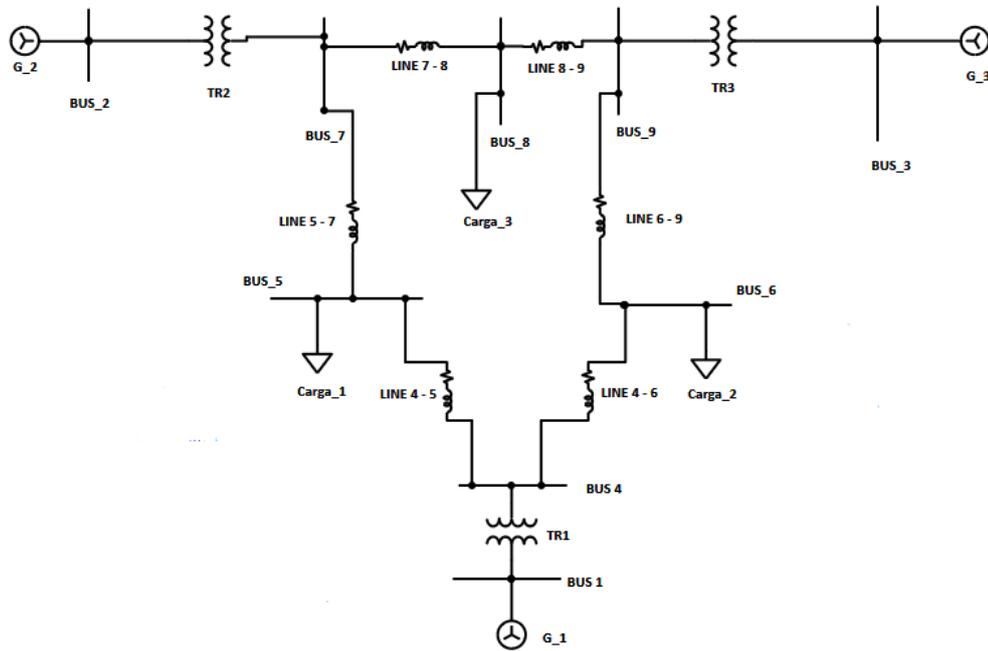
Figura 18 – Diagrama unifilar do sistema de nove barras com impedâncias dos ramos e tensões nominais das barras



Fonte: (VITTAL et al., 2019)

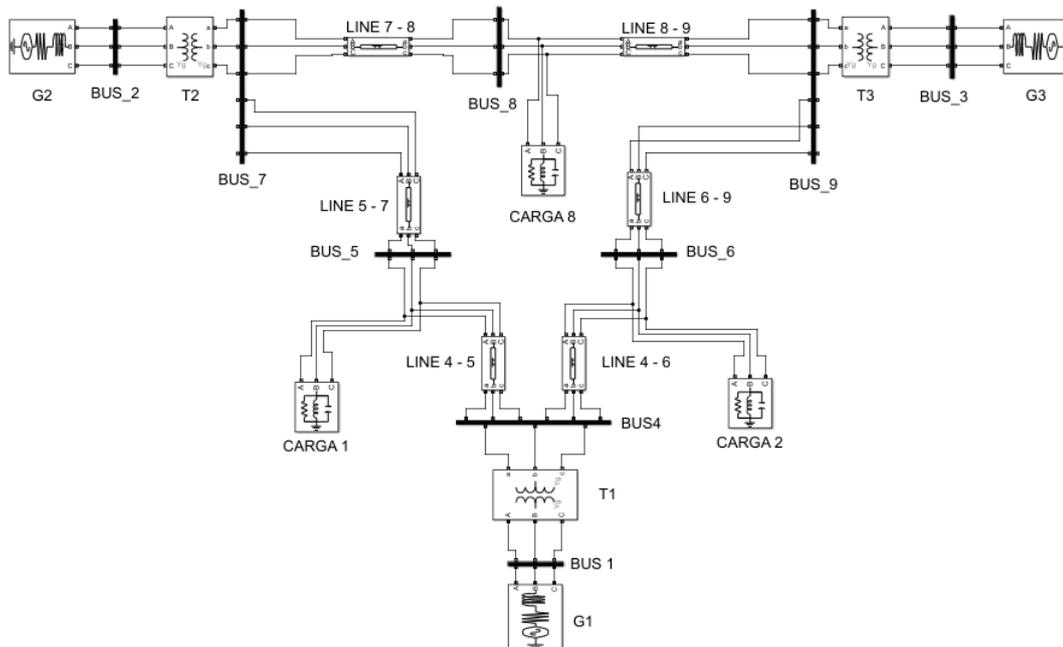
Para avaliar a possibilidade da mudança de contexto do ETAP para o Simulink, foi utilizada como estratégia a comparação dos resultados através da simulação do mesmo sistema. Foram comparados as correntes nas cargas nos dois softwares. A mudança de contexto do ETAP para o Simulink apresenta algumas diferenças, como, por exemplo, a entrada dos parâmetros do sistema.

Figura 19 – Simulação no software ETAP para um sistema 9 barras



Fonte: Próprio Autor

Figura 20 – Simulação no software Simulink para um sistema 9 barras



Fonte: Próprio Autor

Tabela 2 – Comparativo corrente de operação ETAP/Simulink

Cargas	ETAP	Simulink	DP
Carga 1	317,5 A	319,8 A	0,7%
Carga 2	224,9 A	229,2 A	1,87%
Carga 3	207,8 A	212,3 A	2,02%

*DP - Desvio padrão

Na Tabela 2 é realizado um comparativo entre as correntes de operações dos sistemas simulados no Simulink e ETAP, em que além dos valores das correntes é apresentado também o desvio padrão (DP) dos resultados. O desvio padrão indica o quanto um conjunto de dados é uniforme. Quanto mais próximo de 0 for o desvio padrão, mais homogêneo são os dados.

Nota-se que a mudança de contexto do ETAP para o Simulink é factível uma vez que o desvio padrão dos resultados é abaixo de 2%. A diferença dos valores advêm da configuração dos softwares que apresentam nuances em relação ao outro.

A possibilidade do uso do Simulink é importante tendo em vista que é um software que possui uma maior flexibilidade em relação à linguagem de programação, sendo muito utilizado em áreas acadêmicas para pesquisas.

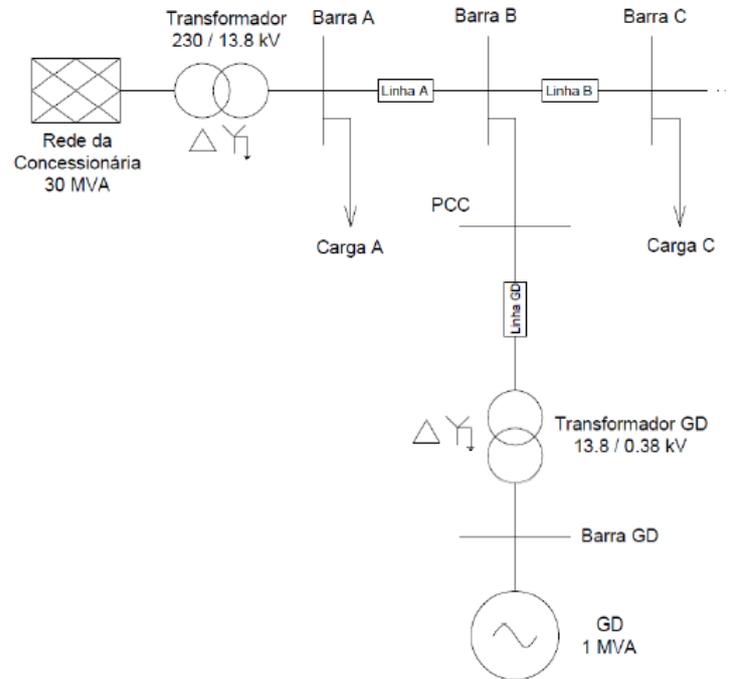
4.2 Sistema 2: Comparação dos valores das correntes nas cargas em um sistema de 5 barras

O sistema foi escolhido por utilizar geração distribuída como um de seus elementos. Observa-se que este contém uma rede da concessionária de 30MVA que está conectada a um transformador Δ - Y_g de 230/13,8kV conectado a barra A. As barras A, B e C são conectadas por linhas de transmissão, linha A de 100 km e linha B de 2 km. Na barra B é conectada a geração distribuída. Onde possuem um gerador de 1 MVA conectada a um transformador Δ - Y_g de 13,8/0,38 KV.

Para as linhas de transmissão foram utilizados o modelo matemático PI, que é usualmente empregado na modelagem matemática de transmissão e distribuição de energia, o qual é capaz de captar as principais características deste sistema.

Ainda, o caso base possui 3 cargas conectadas às barras A, C e GD. Cargas A e C com potência ativa de 500KV e carga na barra GD de 100KV. O diagrama do sistema está representado na figura 21

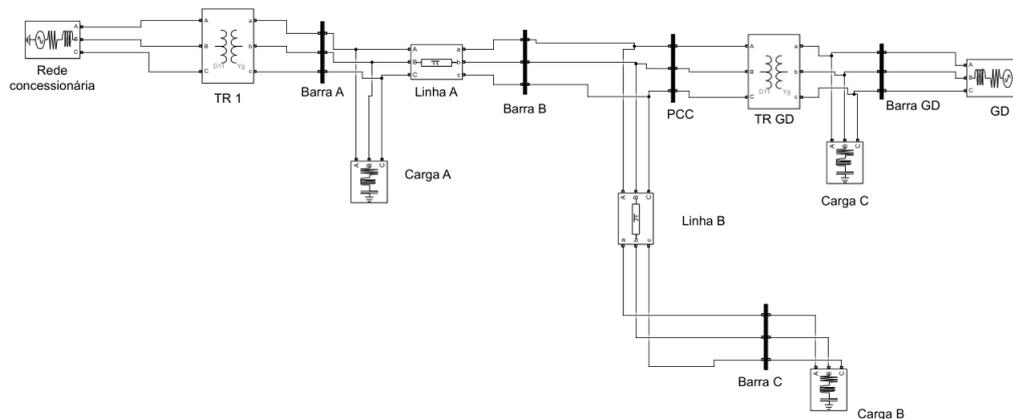
Figura 21 – Sistema de distribuição de 5 barras que apresenta geração distribuída alocada



Fonte: Miranda, Alves e Ramos (2021)

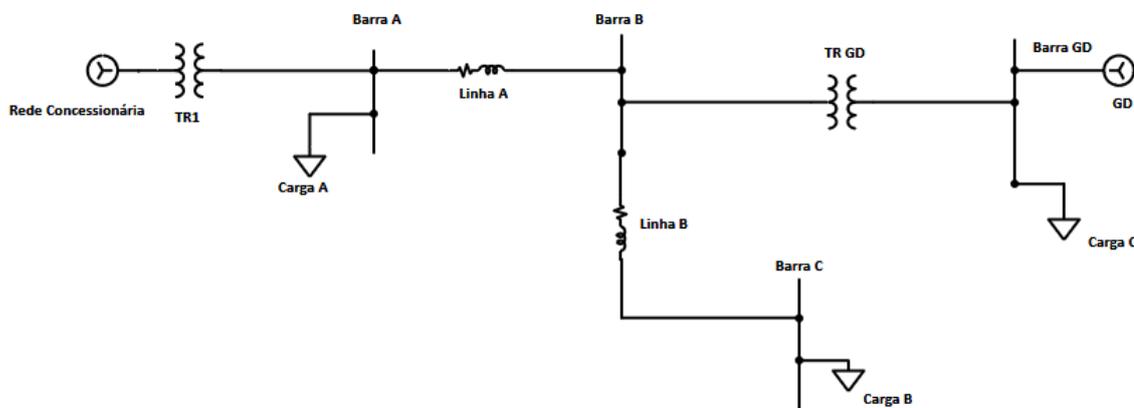
Os diagramas dos sistemas simulados no software Simulink e ETAP estão representados nas Figuras 22 e 23. Como descrito anteriormente os resultados provenientes das simulações foram comparados com o sistema do trabalho Miranda, Alves e Ramos (2021) para validação dos resultados.

Figura 22 – Sistema de distribuição de 5 barras que apresenta geração distribuída alocada, desenvolvida para simulação no Simulink



Fonte: Próprio autor

Figura 23 – Sistema de distribuição de 5 barras que apresenta geração distribuída alocada, desenvolvida para simulação no ETAP



Fonte: Próprio autor

Nas Tabelas 3 e 4 é demonstrado um comparativo entre os valores da corrente de operação que representa a corrente elétrica que flui em um sistema elétrico durante o seu funcionamento normal, com e sem a geração distribuída do trabalho de referência, com os valores obtidos pela simulação no Simulink e ETAP. Utilizou-se também o desvio padrão (DP) entre os valores do Simulink e ETAP, como forma de avaliar os resultados.

Na Tabela 3, nota-se que a barra A do trabalho de referência possui um valor de 40,42A, enquanto os valores do Simulink e ETAP possuem 40,43A e 41,8A, respectivamente. E um desvio padrão de 0,96%. Já na barra B, a corrente no valor de referência possui 20,32A e no Simulink e ETAP apresentam um valor de 20,32A e 20,9A, respectivamente, com um desvio padrão de 0,41%. Já, na barra C, a corrente no trabalho de referência possui um valor com maior divergência em relação ao Simulink e ao ETAP, essa diferença provém da diferença de paradigma dos softwares.

Tabela 3 – Corrente de operação sem Geração Distribuída

Barra	Referência	Autor		
		Simulink	ETAP	DP
A	40,42 A	40,43 A	41,8 A	0,96%
B	20,32 A	20,32 A	20,9 A	0,41%
C	18,62 A	20,34 A	20,9 A	0,39%

*DP - Desvio padrão

Já na tabela 4, verifica-se que, na barra A, o valor da corrente de operação no trabalho de referência foi de 31,62A, já no Simulink e ETAP os valores foram

31,62A e 36,7A, respectivamente, com um desvio padrão de 3,59%. Na barra B, a corrente no trabalho de referência foi de 21,7A e no Simulink e ETAP foram de 21,7A e 20,9A, respectivamente, e desvio padrão de 0,56%. Na barra C o valor da corrente no trabalho referência foi de 18,62A e no Simulink e ETAP de 18,62A e 19,9A com desvio padrão de 0,9%. Apenas na barra A o valor do desvio padrão divergiu das outras barras.

Tabela 4 – Corrente de operação com Geração Distribuída

Barra	Referência	Autor		
		Simulink	ETAP	DP
A	31,62 A	31,62 A	36,7 A	3,59%
B	21,70 A	21,70 A	20,9 A	0,56%
C	18,62 A	18,62 A	19,9 A	0,9%

*DP - Desvio padrão

Possivelmente, pela diferença de paradigma de simulação dos dois softwares, ou seja, são modelos diferentes, os resultados das correntes apresentados se tornam divergentes.

Contudo, observa-se que o desvio padrão entre os valores do ETAP e Simulink em apenas um caso não ficou abaixo do 1%. Levando-nos a congruência de resultados, avaliando de forma positiva a mudança de contexto do ETAP para o Simulink.

Tendo em vista a avaliação preliminar da mudança de contexto do ETAP para o Simulink para simulações de geração distribuída, de forma positiva. Foram também simulados a alocação otimizada da geração distribuída no sistema da figura 21, no software Simulink. Em que, através do método de tentativas exaustivas, a geração distribuída foi alocada em dois pontos, tendo como índice a menor perda técnica no sistema.

Os valores das perdas nas barras que serão apresentadas nas próximas tabelas, são referentes à comparação das perdas do sistema sem a alocação da geração distribuída. Para a seção 4.3 na barra 1, definida como barra de referência, foi encontrado a potência de 3,09MW, Este valor corresponde a 100% e será usado como valor base de referência para a construção das tabelas 5, 6, 7 e 8.

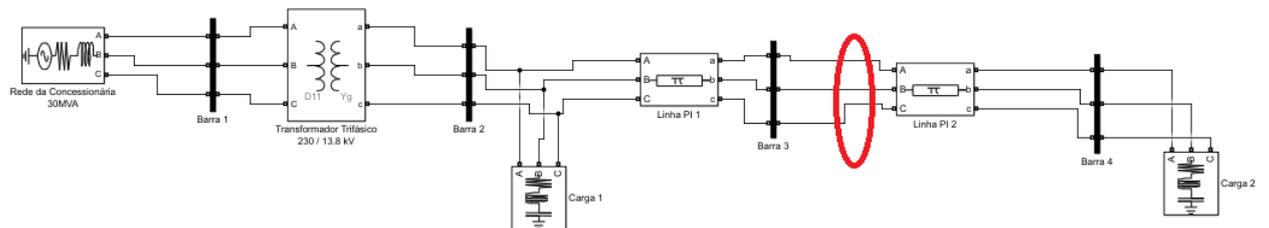
Já para a seção 4.4 foi utilizado a barra 2 da figura 30 como referência e encontrado um valor de 10,2MW. Este valor corresponde a 100% e será usado como valor base de referência para a construção da tabela 9

4.3 Sistema 3: alocação otimizada para um sistema de 5 barras

4.3.1 Situação 1: Linha PI 2 com 2Km

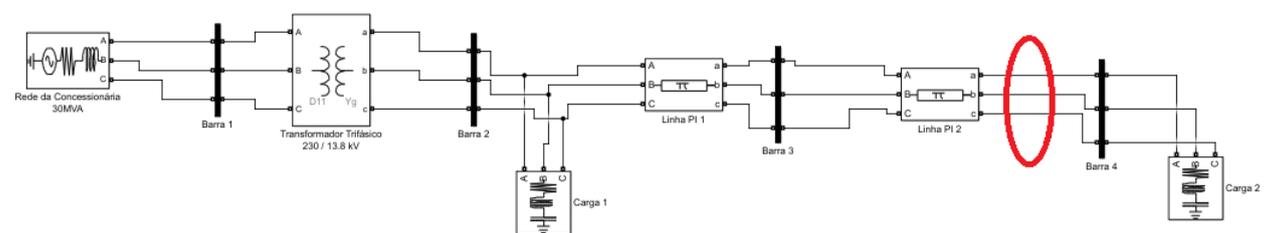
Nas Figuras 24 e 25 estão representados com um círculo vermelho a posição em que a geração distribuída foi posicionada. A linha PI 2 foi configurada para uma distância de 2km.

Figura 24 – Simulação de um sistema elétrico de 5 barras com indicação da primeira localidade para alocar a geração distribuída



Fonte: Desenvolvido pelo autor

Figura 25 – Simulação de um sistema elétrico de 5 barras com indicação da segunda localidade para alocar a geração distribuída



Fonte: Desenvolvido pelo autor

Os resultados obtidos em relação a posição da geração da Figura 24 são demonstrados na Tabela 5 e Figura 26.

Localização 1:

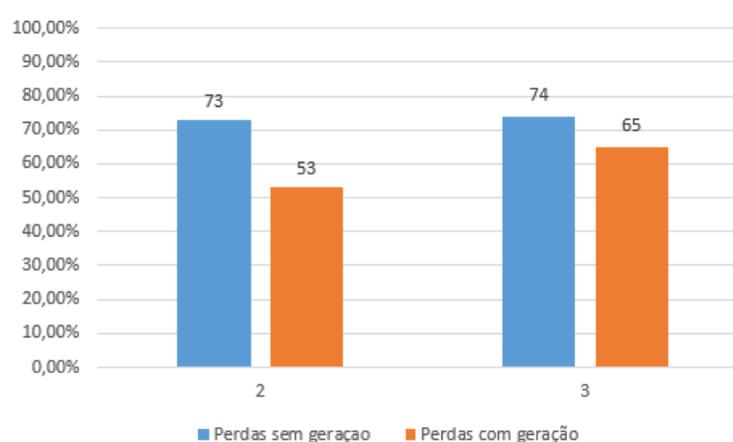
Na Tabela 5 e Figura 26 verifica-se a relação das perdas nas barras 2 e 3. As perdas técnicas do sistema com o uso da geração distribuída foram menores devido ao fato de quando uma geração distribuída é conectada ao sistema elétrico, parte da energia gerada é utilizada localmente, reduzindo a quantidade de energia que precisa ser transmitida pelo sistema de distribuição.

Tabela 5 – Relação das perdas elétricas nas barras 2 e 3 para localização 1 - linha 2 km

	Barras 2(%)	Barra 3(%)
Sem GD	73	74
Com GD	53	65

Valor base de referência considerado 100% como sendo as perdas calculadas no caso da seção 4.2

Figura 26 – Relação das perdas elétricas nas barras B e C para localização 1 - linha 2 km



Fonte: Desenvolvido pelo autor

Localização 2:

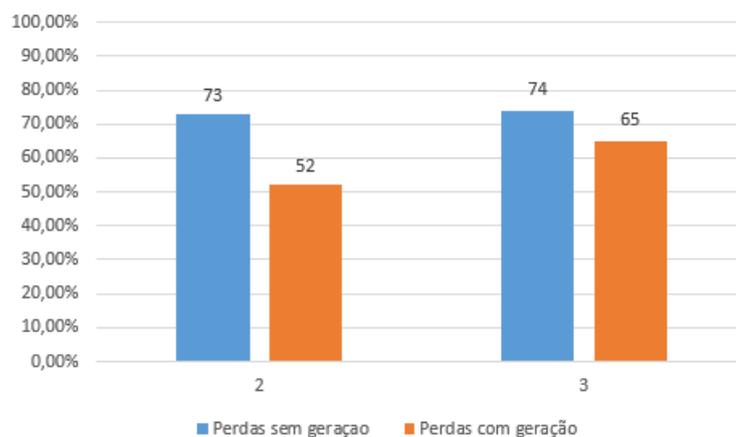
Na Figura 25, a geração distribuída está mais próxima do consumidor final. A Tabela 6 e Figura 27 representam a relação das perdas nas barras 2 e 3 com e sem o uso da geração distribuída.

Tabela 6 – Relação das perdas elétricas nas barras 2 e 3 para localização 2 - linha 2 km

	Barras 2(%)	Barra 3(%)
Sem GD	73	74
Com GD	52	65

Valor base de referência considerado 100% como sendo as perdas calculadas no caso da seção 4.2

Figura 27 – Relação das perdas elétricas nas barras 2 e 3 para localização 2 - linha 2 km



Fonte: Desenvolvido pelo autor

Através da análise dos valores percentuais das perdas, conclui-se que o uso da geração distribuída diminui as perdas do sistemas. É possível notar que, na barra 2, da localização 2, o percentual da perda foi ligeiramente menor em relação ao percentual da perda na mesma barra na localização 1. Isso decorre pelo fato da geração distribuída estar mais próxima ao consumidor final, pois reduz as perdas de transmissão ao longo do sistema elétrico. Como 2km é considerado uma distância pequena para sistemas eletricos, a diferença do percentual das perdas não é muito expressiva.

Agora, realizando a mesma análise da situação 1, a distância da linha PI 2 foi incrementada para 50km, aumentando a distância entre a geração e o consumidor final.

4.3.2 Situação 2: Linhas PI2 com 50Km

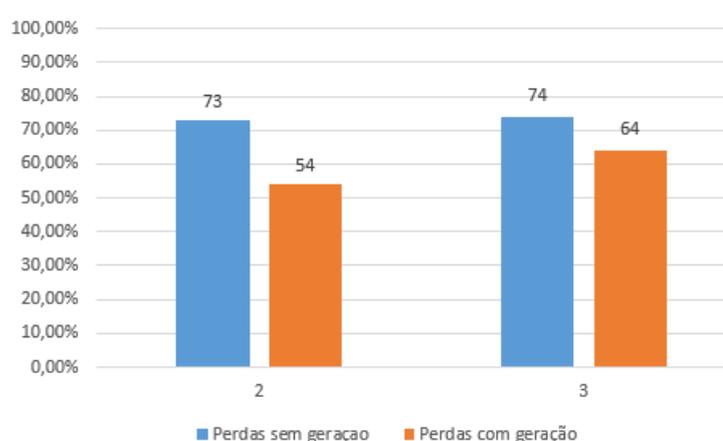
Localização 1: A tabela 7 e figura 28 demonstram o percentual de perdas das barras 2 e 3 em relação à barra 1. Novamente, as perdas técnicas do sistema com o uso da geração distribuída foram menores devido ao fato de quando uma geração distribuída é conectada ao sistema elétrico, parte da energia gerada é utilizada localmente, reduzindo a quantidade de energia que precisa ser transmitida pelo sistema de distribuição.

Tabela 7 – Relação das perdas elétricas nas barras 2 e 3 na localização 1 - linha 50 km

	Barras 2(%)	Barra 3(%)
Sem GD	73	74
Com GD	54	64

Valor base de referência considerado 100% como sendo as perdas calculadas no caso da seção 4.2

Figura 28 – Relação das perdas elétricas nas barras 2 e 3 na localização 1 - linha 50 km



Fonte: Desenvolvido pelo autor

Na localização 2:

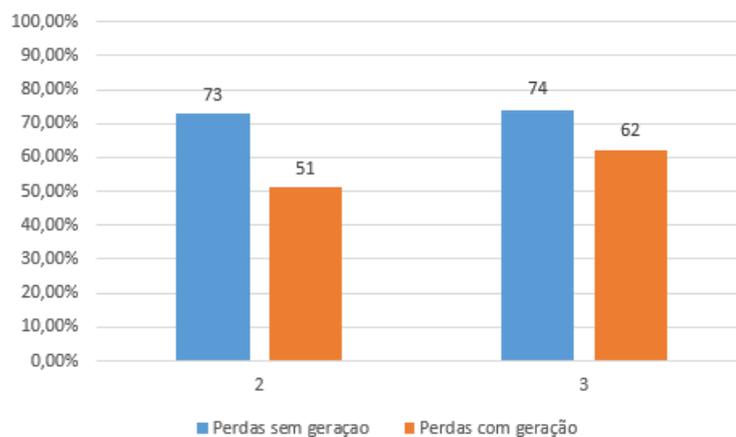
A tabela 8 e figura 29 representam a relação das perdas nas barras 2 e 3 com e sem o uso da geração distribuída. Outra vez, conclui-se que o uso da geração distribuída diminui as perdas do sistemas. Agora, com uma distância maior é possível notar que na barra 2 o percentual da perda foi menor em relação ao percentual da perda na mesma barra na figura 28. Isso decorre pelo fato da geração distribuída estar mais próxima aos consumidores finais, pois reduz as perdas de transmissão ao longo do sistema elétrico.

Tabela 8 – Relação das perdas elétricas nas barras 2 e 3 na localização 2 - linha 50 km

	Barras 2(%)	Barra 3(%)
Sem GD	73	74
Com GD	51	62

Valor base de referência considerado 100% como sendo as perdas calculadas no caso da seção 4.2

Figura 29 – Relação das perdas elétricas nas barras 2 e 3 na localização 2 - linha 50 km



Fonte: Desenvolvido pelo autor

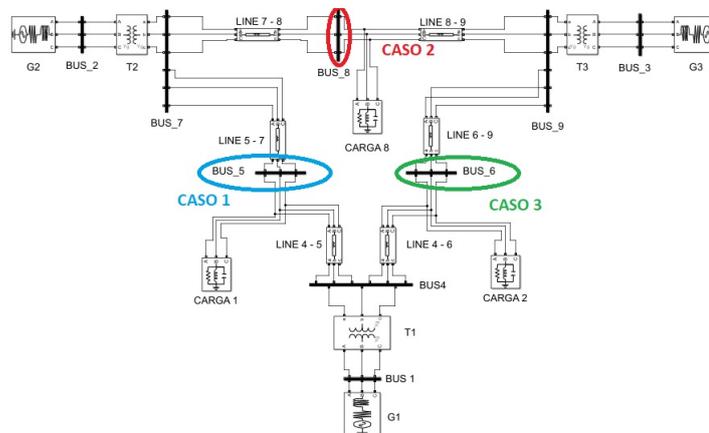
Após aumentar a distância da linha para 50 Km, é possível observar de forma mais contundente que as perdas na localidade 2 se tornam mais expressivas em comparação com a localidade 1. Devido ao fato das perdas dos sistemas elétricos estarem diretamente relacionadas à distância das linhas de transmissão, como observado na expressão 4.2.

4.4 Sistema 4: alocação otimizada para um sistema de 9 barras

Utilizando a metodologia de busca exaustiva no sistema da figura 18, tendo como parâmetro a menor perda no sistema, a geração distribuída de 1 MW foi aplicada em três localidades utilizando a barra 4 como referência.

Na figura 30, demonstra-se, com um círculo azul, vermelho e verde a primeira, segunda e terceira localidade em que alocou-se a geração distribuída

Figura 30 – Sistema 9 barras localidade 1



Fonte: Desenvolvido pelo autor

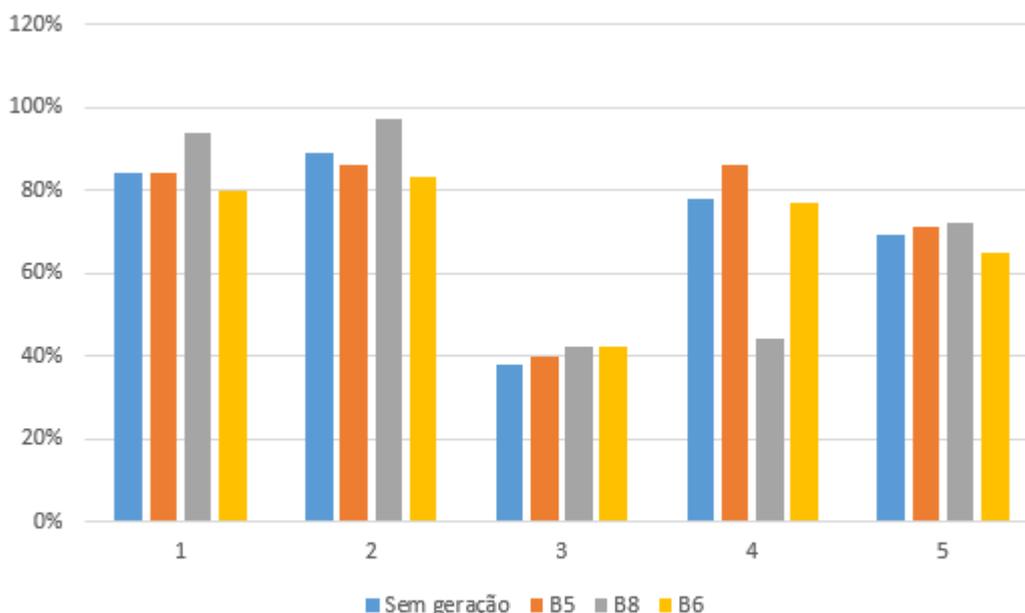
Na tabela 9 e figura 31 são exibidos os valores das perdas técnicas do sistema com e sem a geração distribuída.

Tabela 9 – Relação das perdas nas barras

Barra	Sem geração	B5	B8	B6
5	84%	84%	94%	80%
6	89%	86%	97%	83%
7	38%	40%	42%	42%
8	78%	86%	44%	77%
9	69%	71%	72%	65%

Valor base de referência considerado 100% como sendo as perdas calculadas no caso da seção 4.2

Figura 31 – Relação das perdas nas barras



Fonte: Desenvolvido pelo autor

Após análise das alocações nas barras pelo método exaustivo observa-se que a barra B6, o sistema apresentou redução no percentual das perdas técnicas do sistema em 4 das suas 5 barras. Sendo definida a localidade que possui a localidade mais adequada para a alocação da geração distribuída.

4.5 Ponderações: Simulink e ETAP

O Simulink e o ETAP são ferramentas computacionais com propósitos distintos. O Simulink é um ambiente de modelagem e simulação de sistemas dinâmicos, em que é possível modelar e simular sistemas em diversos campos, como mecânica, eletrônica e controle. Já o ETAP é um software de análise e simulação de sistemas elétricos de potência, que inclui funções como análise de curto-circuito, análise de estabilidade, análise harmônica e dimensionamento de equipamentos elétricos.

Em relação a inserção dos parâmetros, o Simulink e o ETAP também se diferem, no Simulink, os parâmetros são inseridos por meio de blocos específicos de simulação e suas propriedades. Geralmente, esses blocos são fornecidos pela biblioteca de blocos do Simulink ou criados pelo usuário. Para simular um sistema elétrico no Simulink é necessário criar modelos de bloco para representar as várias partes do sistema.

Para o ETAP, os parâmetros são inseridos por meio de uma interface gráfica do usuário, onde são especificadas as características do sistema elétrico, incluindo as configurações dos dispositivos elétricos, cabos, transformadores e geradores. O ETAP fornece bibliotecas de dispositivos elétricos padrão que podem ser usadas para modelar o sistema elétrico.

O ETAP, sendo uma ferramenta específica para sistemas elétricos, vem sendo muito utilizado em empresas especializadas para análises de sistemas. Contudo, através da comparação dos resultados observa-se que é possível utilizar o Simulink para a simulação de sistemas elétricos e em concomitância a utilizar para simulações de alocação otimizada, tendo em vista que muitas vezes o desvio padrão dos resultados ficaram abaixo dos 2%.

5 CONCLUSÃO

5.1 Conclusões

Com a crescente demanda energética no mundo, novas fontes de geração de energia estão sendo incentivadas, principalmente a geração distribuída. Isso ocorre devido à possibilidade de se utilizar fontes renováveis de energia. A necessidade de realizar testes mais confiáveis e precisos à respeito da integração da geração distribuída nos sistemas tradicionais vem aumentando. Sendo cada vez mais importante contar com ferramentas eficientes e precisas para análise e simulação de sistemas elétricos.

Foi realizada a avaliação para utilização do Simulink para análise de sistemas elétricos com alocação de geração distribuída através de duas situações simulacionais. Primeiramente, simulou-se um sistema de 9 barras nos dois softwares, Simulink e ETAP. Observou-se que o desvio padrão dos resultados ficou abaixo dos 2%, isso demonstra uma homogeneidade dos valores.

Em seguida, foi utilizado um sistema de 5 barras para comparar os valores com e sem a geração distribuída. Novamente foram utilizadas simulações no Simulink e ETAP. Na simulação sem a presença da geração distribuída o desvio padrão entre os dois softwares foi abaixo de 1%. Já com a alocação da geração distribuída o desvio padrão aumentou para aproximadamente 3%. Mostrando-se possível nesta primeira impressão a mudança de contexto entre ETAP e Simulink. A divergência dos valores, possivelmente se deu pela diferença de paradigma entre os softwares.

Para melhorar a eficiência energética é importante a correta localização da geração distribuída. Por conseguinte, foi necessário resolver o problema da alocação, apresentando um estudo direcionado a respeito de alocação otimizada para otimização do tempo em pesquisas na área. Além disso, também foram desenvolvidas duas situações com as mesmas simulações utilizadas para a comparação dos softwares.

Através do método exaustivo procurou-se a melhor alocação da geração distribuída levando em consideração a diminuição da perda elétrica no sistema.

Este trabalho abre o leque para mais um software de pesquisa para a análise de sistemas elétricos com alocação de geração distribuída. Beneficiando diretamente alunos e pesquisadores pois apresenta um direcionamento de vários trabalhos dos temas discutidos, além de apresentar comparações de simulações em dois sistemas comerciais.

O trabalho contribui para o avanço da pesquisa na área de geração distribuída,

ao mostrar que o Simulink pode ser uma alternativa viável para a simulação e análise da alocação de geração distribuída.

5.2 Sugestão para trabalhos futuros

A comparação entre Simulink e ETAP pode ajudar profissionais e pesquisadores a selecionar a ferramenta mais apropriada para suas necessidades. Desta forma, contribui para o desenvolvimento de sistemas elétricos mais eficientes, confiáveis e sustentáveis.

Indica-se como sugestão para trabalhos futuros:

- Avaliação do desempenho dos softwares Simulink e ETAP na simulação de sistemas elétricos em larga escala;
- Comparação do tempo de simulação e da precisão dos resultados obtidos no Simulink e ETAP para diferentes configurações de sistemas elétricos;
- Desenvolvimento de algoritmos de otimização para a alocação de sistemas de geração distribuída em redes elétricas, considerando diferentes variáveis, como custo de instalação, eficiência energética, impactos ambientais e sociais.
- Investigação da utilização de sistemas de armazenamento de energia para melhorar a alocação de geração distribuída em redes elétricas, permitindo maior flexibilidade e autonomia no uso de fontes de energia renovável.
- Estudo de técnicas para desenvolvimento de uma metodologia original para alocação de GD.
- Realizar o estudo das simulações utilizando os diferentes cenários do Simulink discreto e fasorial.

Referências

- ABU-MOUTI, F. S.; EL-HAWARY, M. Optimal distributed generation allocation and sizing in distribution systems via artificial bee colony algorithm. *IEEE transactions on power delivery*, IEEE, v. 26, n. 4, p. 2090–2101, 2011. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6029809>>. 14
- ANEEL. Agência nacional de energia elétrica-aneel. 2017. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/prt1997349mme.pdf>>. 18, 32
- ANTUNES, V. et al. Análise do impacto da inserção de geração distribuída na qualidade da energia elétrica em uma microrrede de baixa tensão. Araranguá, SC, 2016. 14
- BARROS, E. V. de. A matriz energética mundial e a competitividade das nações: bases de uma nova geopolítica. *Engevista*, 2007. Disponível em: <<https://www.uff.br/engevista/seer/>>. 13
- BATISTA, R. V.; ARAUJO, L. R. de; PENIDO, D. R. Alocação ótima de geradores distribuídos para redução de perdas em sistemas elétricos de distribuição considerando incertezas da demanda. In: *Congresso Brasileiro de Automática-CBA*. [S.l.: s.n.], 2020. v. 2, n. 1. Disponível em: <https://www.sba.org.br/open_journal_systems/index.php/cba/article/view/1736>. 14
- BENITEZ, E. E. et al. Algoritmo heurístico construtivo aplicado ao planejamento de redes aéreas de média tensão com a alocação de geração distribuída. In: . [S.l.]: Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2017. Disponível em: <<http://www3.fi.mdp.edu.ar/clagtee/2017/articles/02-017.pdf>>. 14
- BERTONCELLO, R. *Sistema de conexão de mini e micro centrais hidrelétricas às redes monofásicas das concessionárias*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2011. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/335/1/PB_PPSEE_M_Bertoncello%2c%20Ricardo_2011.pdf>. 33
- BRAGA, T. M. et al. Estudos de conexão à rede elétrica-desafios de qualidade de energia na implantação de geração distribuída na rede de distribuição de baixa tensão. Universidade Federal de Minas Gerais, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/32980/1/Monografia_Especializa%20c3%a7%20a3o%20Renov%20a1veis%20-%20Thiago%20Maciel%20Braga.pdf>. 13
- CAMPOS, B. A. P. et al. Modelagem de sistemas de geração distribuída com motores de combustão interna invertidos a biogás. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2018. 15
- DIAS, M. V. X. et al. Geração distribuída no brasil: oportunidades e barreiras. Universidade Federal de Itajubá, 2005. 31, 32, 35, 36, 37

- EPE. Plano decenal de expansão de energia – 2031. *PDE 2031 Revisão Final v2*, 2022. 19, 21
- FRIGO, M. M. Impacto da microgeração de energia elétrica em sistemas de distribuição de baixa tensão. 2013. 24
- GAZOLI, J. R.; VILLALVA, M. G.; GUERRA, J. Capítulo x energia solar fotovoltaica–sistemas conectados à rede elétrica. 2012. 37
- IMHOFF, J. et al. Desenvolvimento de conversores estáticos para sistemas fotovoltaicos autônomos. Universidade Federal de Santa Maria, 2007. 36
- INEE. O que é geração distribuída. *O que é Geração Distribuída (inee.org.br)*, 2022. 20
- MATOS, D.; CATALÃO, J. Geração distribuída e os seus impactes no funcionamento da rede elétrica: Parte 2. *Potência*, v. 1, n. 2, p. 3, 2013. 24, 30, 31
- MIRANDA, B. G.; ALVES, D. S.; RAMOS, L. Análise de curto-circuito e sistema de proteção em uma rede com geração distribuída utilizando o simulink. 2021. Disponível em: <<https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/53384/53384.PDF>>. 41, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 57, 75
- NARUTO, D. T. Vantagens e desvantagens da geração distribuída e estudo de caso de um sistema solar fotovoltaico conectado à rede elétrica. *Monografia de Graduação. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro*, p. 15, 2017. 18
- PAINULY, J. P. Barriers to renewable energy penetration; a framework for analysis. *Renewable energy*, Elsevier, v. 24, n. 1, p. 73–89, 2001. 25, 26
- PEPERMANS, G. et al. Distributed generation: definition, benefits and issues. *Energy policy*, Elsevier, v. 33, n. 6, p. 787–798, 2005. 15
- PEREIRA, F.; OLIVEIRA, M. Curso técnico instalador de energia solar fotovoltaica. *Porto: Publindústria*, 2011. 38
- PRODIST, P. Regras e procedimentos de distribuição - prodist. *Agência Nacional de Energia Elétrica–ANEEL*, 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/procedimentos-regulatorios/prodist>>. 18
- RODRIGUES, F. Programação da contratação de energia considerando geração distribuída no novo modelo do setor elétrico brasileiro. *Rio de Janeiro: UFRJ*, 2006. 40
- RODRIGUES, J.; SEABRA, E.; SILVA, L. F. D. Elaboração de uma biblioteca de exemplos de modelização de sistemas mecânicos utilizando a ferramenta matlab/simulink. *AEIPRO*, 2018. 41
- RODRIGUES, R. V. Simulação do desempenho de aerogeradores de pequeno porte. *Universidade Estadual de Campinas*, 2014. 34

- ROMAGNOLI, H. C. et al. Identificação de barreiras à geração distribuída no marco regulatório atual do setor elétrico brasileiro. Florianópolis, SC, 2005. 25, 27, 38, 39
- SALGADO, D. A. *Uma abordagem paramétrica do impacto da geração distribuída sobre as correntes de curto-circuito e na proteção de redes de distribuição*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2015. 20, 21
- SANTOS, F. A.; SANTOS, F. M. Geração distribuída versus centralizada. *m*, Instituto Politécnico de Viseu, 2008. 18, 19, 22, 23, 24
- SANTOS, F. M. S. M. dos. *Células de Combustível: Uma Tecnologia para a Geração Distribuída*. [S.l.]: Instituto Politecnico de Viseu (Portugal), 2003. 35
- SEVERINO, M. M. Avaliação técnico-econômica de um sistema híbrido de geração distribuída para o atendimento a comunidades isoladas da amazônia. 2008. 25, 26, 38, 39
- SOUZA, M. E. M. de. Impactos da geração distribuída nas redes de baixa tensão. Universidade Federal de Minas Gerais, 2012. 23, 24, 31, 32, 33, 34, 36
- TARANTO, G. et al. Impactos da difusão da micro e da mini geração no planejamento, na operação e na manutenção do sistema de distribuição. *GESEL—Grupo de Estudos do Setor Elétrico UFRJ, Rio de Janeiro*, 2017. 13
- VITTAL, V. et al. *Power system control and stability*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2019. 53, 54
- WILLIS, H. L. *Distributed power generation: planning and evaluation*. [S.l.]: Crc Press, 2018. 27

A Anexo 1

A.1 Bloco PowerGui

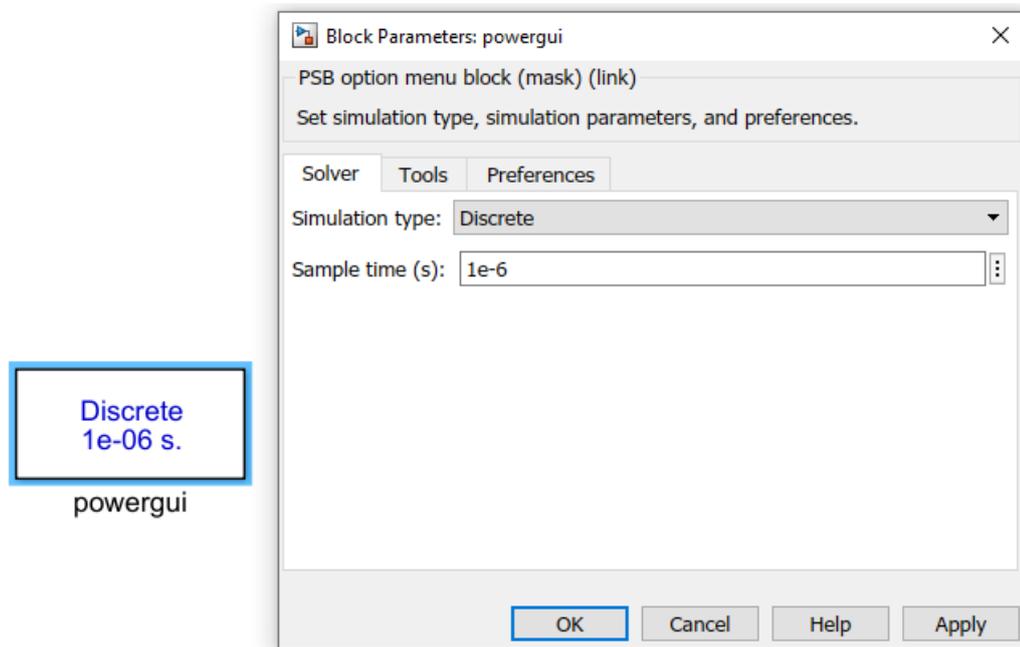
O bloco PowerGUI é uma ferramenta de simulação no Simulink que permite que os usuários interajam com modelos de Simulink usando um ambiente gráfico personalizado. Ele permite que os usuários definam parâmetros e variáveis de entrada, visualizem resultados de simulação e ajustem esses parâmetros e variáveis de entrada em tempo real para ver o efeito sobre a simulação.

O PowerGui é particularmente útil em casos em que os usuários precisem ajustar parâmetros de entrada para um sistema em tempo real ou para experimentar diferentes configurações de sistema. Ele também pode ajudar a entender como um modelo de Simulink funciona, permitindo a visualização das variáveis do sistema em tempo real.

Além disso, o PowerGui pode ser usado em combinação com outras ferramentas do Simulink, como o Simulink Design Optimization. Assim é possível encontrar soluções otimizadas para problemas complexos de engenharia. Ele também pode ser usado com outros blocos de Simulink, como o Simulink Real-Time Workshop que é utilizado para gerar código C para implantação em sistemas embarcados.

O PowerGui permite selecionar o tipo de simulação para sistemas elétricos e possui dois tipos principais, os transitórios eletromagnéticos, em que é possível observar a onda de tensão e corrente variando senoidalmente e as simulações eletromecânicas, em que são desprezadas as variações eletromagnéticas considerando apenas as variações eletromecânicas de oscilação de tensão e velocidade das máquinas. Na Figura 32 é apresentado o bloco PowerGui e seus parâmetros de escolhas

Figura 32 – Bloco powergui no Simulink

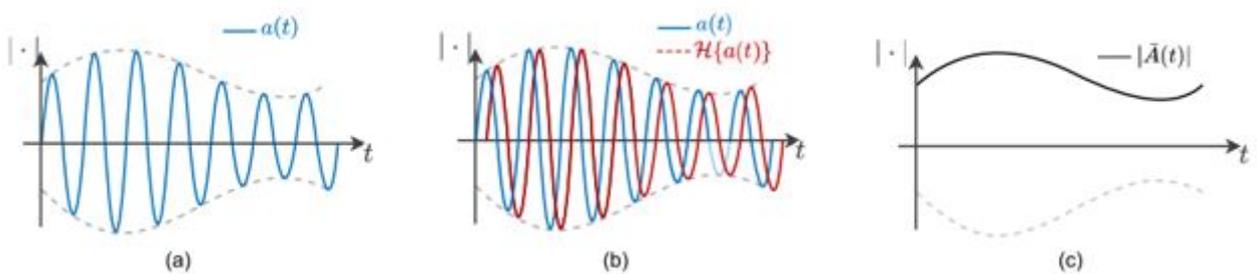


Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Já o ETAP, não realiza transitório eletromagnético. Apenas eletromecânico, obtendo um resultado fasorial para tensão e corrente.

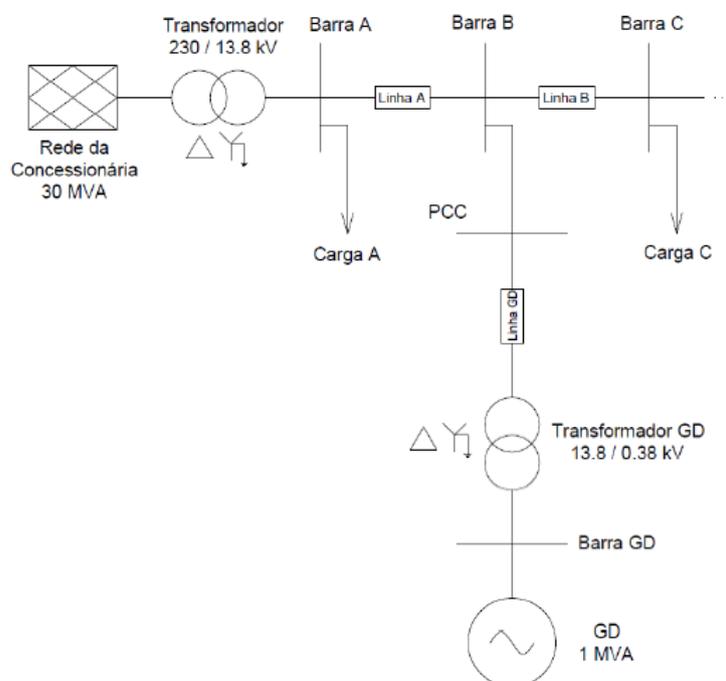
Na Figura 33, no item (a), observa-se o transitório eletromagnético, sendo possível observar a onda senoidal, e no item (c), observa-se apenas o "envelope" da onda senoidal, sendo o resultado da simulação eletromecânica.

Figura 33 – Relação entre o sinal real $a(t)$, o sinal analítico e o TVP.



Utilizando o sistema da Figura 34, foram simulados dois cenários, o primeiro sem a presença da geração distribuída e o segundo com a presença.

Figura 34 – Sistema de distribuição de 5 barras que apresenta geração distribuída alocada



Fonte: Miranda, Alves e Ramos (2021)

Para o sistema sem alocação da geração distribuída observa-se os seguintes resultados:

Tabela 10 – Valores de corrente medidos em três barras diferentes para três métodos de simulação diferentes sem geração distribuída

Barra	Referência	Autor		
		Simulink Discreto	Simulink Fasorial	ETAP
A	40,42 A	40,43 A	57,17 A	41,8 A
B	20,32 A	20,32 A	28,74 A	20,9 A
C	18,62 A	20,34 A	28,76 A	20,9 A

Já para o sistema com alocação da geração distribuída:

Tabela 11 – Valores de corrente medidos em três barras diferentes para três métodos de simulação diferentes com geração distribuída

Barra	Referência	Autor		
		Simulink Discreto	Simulink Fasorial	ETAP
A	31,62 A	31,62 A	44,7 A	36,7 A
B	21,70 A	21,70 A	30,68 A	20,9 A
C	18,62 A	18,62 A	26,33 A	19,9 A

A diferença entre os valores de corrente obtidos na simulação do mesmo sistema elétrico no Simulink e no ETAP podem ser diferentes por diversas razões, como na modelagem do sistema, configurações de simulação, resolução numérica e precisão dos parâmetros do sistema.

As configurações de simulação também podem variar entre as ferramentas, como por exemplo, os algoritmos de solução de equações diferenciais, métodos de integração numérica e tolerâncias de convergência.

Outro fator que pode influenciar na diferença dos resultados é a precisão dos parâmetros do sistema, como impedâncias e valores de tensão, que podem ter diferentes precisões e resoluções nas duas ferramentas.



ANEXO X - TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado “Estudo e Avaliação Preliminar de Software para Alocação de Geração Distribuída”

é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 14 de Abril de 2023 .

Gabriel Barbosa Figueiredo Silva
Nome completo do(a) aluno(a)