

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

JOSÉ EUSTÁQUIO DO CARMO JÚNIOR

**FLUXO DE CARGA PROBABILÍSTICO EM SDEE NA PRESENÇA DE GERAÇÃO
DISTRIBUÍDA POR MEIO DO *SOFTWARE* OPENDSS**

GOIÂNIA

2017

JOSÉ EUSTÁQUIO DO CARMO JÚNIOR

**FLUXO DE CARGA PROBABILÍSTICO EM SDEE NA PRESENÇA DE GERAÇÃO
DISTRIBUÍDA POR MEIO DO *SOFTWARE* OPENDSS**

Projeto de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Lina Paola Garcés Negrete, Dr^a

GOIÂNIA

2017

***Dedicado aos três mais importantes:
José, Luciara e Gabriela***

Agradecimentos

Esta monografia não é apenas uma demonstração de desenvolvimento intelectual, mas também é uma clara manifestação de aprendizado pessoal, autodisciplina e resiliência. Logo, embora esses valores não estejam explícitos nas próximas páginas, é oportuno mantê-los sempre à vista, semelhante à maneira com que esta monografia foi elaborada.

Destaco ainda que, embora a autoria formal deste trabalho seja única, a completa autoria estende-se através fronteiras e oceanos. Portanto, citar e agradecer a todos os seus contribuidores pareceu-me longo. Não obstante, atreverei-me a registrar os mais sinceros e respeitados agradecimentos a seguir:

À Providência Divina por agir de maneira misteriosa, ainda que tão sábia, conduzindo-me através dos altos e baixos da vida

Aos amados pais pelo amor, pela paciência e pelos constantes esforços que me permitiram chegar até aqui

À estimada irmã e amiga, Gabriela, por ser o meu modelo primordial de ser humano e por ter me mostrado “o caminho das pedras” desde a minha infância

Aos entes queridos que já se foram por terem me transmitido a sabedoria que nunca será encontrada em nenhuma sala de aula ou livro algum

À docente e orientadora Lina Paola por ser tão dedicada, atenciosa e por ter orientado este trabalho com o coração aberto e mente serena. ¡*Muchas gracias!*

Aos docentes Enes Marra e Sérgio Pimentel pelo empenho desenvolvido na micro usina fotovoltaica da Escola de Engenharia e pela disponibilização dos dados meteorológicos necessários para este trabalho

Aos amigos, inúmeros e de tantos lugares, por sempre me terem me aceitado como sou e me ensinarem a ser uma pessoa melhor a cada dia

Aos docentes do curso de Graduação de Engenharia Elétrica que se dedicam à legítima formação da futura geração de engenheiros. Obrigado por me mostrarem como crescer, romper limites e ser um profissional lúcido, consciente e ético.

Aos docentes do curso de Graduação de Engenharia Elétrica que fingem e dissimulam a legítima formação da futura geração de engenheiros. Muito obrigado por me mostrarem as consequências causadas por profissionais que não são lúcidos, nem conscientes e muito menos éticos.

*“ A vida é ter **coragem** e ir em direção ao **desconhecido**. ”*

Trecho do filme “A vida secreta de Walter Mitty” (2014)

RESUMO

A crescente demanda de energia elétrica o aumento da parcela de energias renováveis nas matrizes energéticas e a modernização dos sistemas de distribuição de energia elétrica (SDEE) tem impulsionado a expansão de sistemas de geração distribuída (GD), trazendo diversos benefícios técnicos, ambientais e econômicos a todos os agentes envolvidos na operação e planejamento do sistema. Alguns desses benefícios observados nas redes de distribuição sob influência de GD são: diminuição de perdas de potência ao longo da rede, melhoria dos perfis de tensão, aumento na confiabilidade e diminuição das emissões de gás carbônico quando consideradas fontes renováveis. Não obstante, faz-se necessário que as concessionárias de distribuição estudem e analisem os desafios técnicos provenientes dessa nova tendência de geração. Nesse sentido, o desenvolvimento de ferramentas e simulações robustas para estudos da inserção de GD em SDEE são importantes no planejamento, controle e otimização das redes de distribuição. Em um primeiro momento, é proposto o uso do programa OpenDSS juntamente com a linguagem de programação MATLAB, elucidando-se o potencial desses aplicativos em estudos de SDEE. Posteriormente, é desenvolvida uma modelagem probabilística da GD provinda de fontes energéticas fotovoltaicas, eólicas e hidráulicas, haja vista a natureza estocástica presente nos recursos primários dessas fontes. Por fim, consideram-se diferentes cenários de estudo para a avaliação de impactos, através de um fluxo de carga probabilístico, nas perdas de potência e também nos perfis de tensão quando simulados sistemas de distribuição de teste e reais.

Palavras chave: Fluxo de potência, Fontes renováveis, Geração distribuída, OpenDSS, Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica.

ABSTRACT

The increasing demand for electric energy, the increase of the share of renewable energies in the energy consumption and the modernization of the electric energy distribution systems (EEDS) has driven the expansion of distributed generation systems (DG), bringing several technical, environmental and economic advantages for all the parts involved in the operation and planning of the electrical grid. Some of these benefits observed in the distribution networks under influence of DG are: reduction of power losses along the network, improvement of voltage profiles, increase in reliability and reduction of carbon dioxide emissions when renewable energy sources are used. Nevertheless, it is necessary that the distribution concessionaires study and analyze the technical challenges arising from this new generation trend. In this regard, the development of robust tools and simulations to study the insertion of DG in EEDS are important in the planning, control and optimization of distribution networks. At first, it is proposed the use of OpenDSS program along with the MATLAB programming language, elucidating the potential of these applications in EEDS researches. Subsequently, a probabilistic modeling of DG from photovoltaic, wind and hydraulic energy sources is developed, given the stochastic nature present in the primary resources of these sources. Finally, different study scenarios are considered for the evaluation of impacts of DG through a probabilistic load flow, in power losses and in the voltage profiles when test and real distribution systems are simulated.

Keywords: Distributed Generation, Electric Power Distribution Systems, Power Flow, Renewable Sources, OpenDSS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação do sistema elétrico brasileiro	14
Figura 2 SDEE com georreferenciamento, simulado no OpenDSS, com pontos sugeridos (em amarelo) para a alocação ótima de sistemas de GD.	21
Figura 3 Classificação dos principais elementos presentes no OpenDSS	22
Figura 4 Relação entre o OpenDSS e MATLAB através da interface COM	24
Figura 5 Representação gráfica da definição de probabilidade para variáveis contínuas..	29
Figura 6 – Relação entre uma fdp e sua respectiva fda.	30
Figura 7 Relação dentre a função de densidade acumulada de probabilidade e variáveis aleatórias.	31
Figura 8 Representação de um sistema FV implementado no OpenDSS.....	35
Figura 9 Fluxograma com as principais etapas da SMC no OpenDSS e MATLAB...	41
Figura 10 - Representação gráfica dos perfis de consumo típicos utilizados	42
Figura 11 - Potência Média Diária Fornecida por uma fonte eólica durante 100 iterações	44
Figura 12 Sistema de Distribuição de Teste IEEE-4	46
Figura 13 - Perdas médias de potência diária para cada caso	47
Figure 14 - Sistema de Distribuição de Teste IEEE-34	49
Figura 15 - Perdas médias de potência diária para cada caso	50
Figura 16 - Perfil de Tensões Médias para a fase A - IEEE - 34.....	51
Figura 17 - Perfil de Tensões Médias para a fase B - IEEE - 34.....	51
Figura 18 - Perfil de Tensões Médias para a fase C - IEEE - 34.....	51
Figura 19 - Perfil de Tensão Média para o ajuste do caso 5 (fase A) - IEEE - 34	53
Figura 20 - Perfil de Tensão Média para o ajuste do caso 5 (fase B) - IEEE - 34	53
Figura 21 - Perfil de Tensão Média para o ajuste do caso 5 (fase C) - IEEE - 34	53
Figura 22 - Representação do sistema prático de 135 barras.....	54
Figura 23 - Perfil de Tensões Médias para a fase A - Sistema 135 barras	56
Figura 24 - Perfil de Tensões Médias para a fase B - Sistema 135 barras	56
Figura 25 - Perfil de Tensões Médias para a fase C - Sistema 135 barras	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Capacidade instalada de geração elétrica no Brasil (MW).....	16
Tabela 2 Distribuições de Probabilidade e respectivas Funções de Densidade de Probabilidade.....	31
Tabela 3 - Resultado do Teste KS para as amostras de irradiação solar	36
Tabela 4 - Resultados do Teste KS para a amostras de velocidade dos ventos.....	38
Tabela 5 - Resultados do Teste KS para a amostras de vazão hídrica.....	39
Tabela 6 Perfis de consumo típicos utilizados (valores em pu).....	43
Tabela 7 Pontos de conexão em Tensão Nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV	45
Tabela 8 - Alocação das unidades geradoras para cada cas.....	49
Tabela 9 - Alocação das unidades geradoras para cada caso.....	55
Tabela 10 - Comparação de perdas entre os casos.....	55

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABREDE – Associação Brasileira de Distribuidoras de Energia Elétrica

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

COM – Modelo Objeto Componente

DLL – Biblioteca de Dinâmica de Dados

EMC – Escola de Engenharia Elétrica Mecânica e Computação

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

EPRI – Electric Power Research Institute

fda – Função de distribuição Acumulada

pu – por unidade

fdp – Função densidade de Probabilidade

FV - Fotovoltaico

GD – Geração Distribuída

IEEE – Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos

KS – Kolmogorov Smirnov

MATLAB – Matrix Laboratory

MME - Ministério de Minas e Energia

PRODIST - Procedimentos de Distribuição

PV – Fotovoltaico

SDEE – Sistema de Distribuição de Energia Elétrica

SEB – Sistema Elétrico Brasileiro

SMC – Simulação de Monte Carlo

SFV – Sistemas Fotovoltaicos

UFG – Universidade Federal de Goiás

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	13
1.1 O Sistema Elétrico Brasileiro.....	13
1.2 A Geração Distribuída no Brasil	15
1.3 Justificativa.....	18
1.4 Objetivos	18
1.5 Organização do documento	19
CAPÍTULO 2: O SIMULADOR DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO – OpenDSS	20
2.1 Características Gerais.....	20
2.2 Representação de Elementos	22
2.4 Conexão entre o OpenDSS e ambiente MATLAB.....	23
CAPÍTULO 3 – MODELAGEM PROBABILÍSTICA DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	26
3.1 Aspectos Gerais.....	26
3.2 Método de Monte Carlo.....	27
3.2.1 Funções de Densidade de Probabilidade.....	28
3.2.2 Função de Distribuição Acumulada.....	29
3.2.3 Geração de Números Aleatórios: o Método da Transformação Inversa.....	31
3.2.4 Teste de Kolmogorov–Smirnov	32
3.3 Modelo Probabilístico para Fontes Fotovoltaicas	34
3.4 Modelo Probabilístico para Fontes Eólicas	36
3.5 Modelos Probabilísticos para Fontes Hidráulicas.....	38
CAPÍTULO 4 – TESTES E RESULTADOS	40
4.1 Metodologia dos Testes	40
4.2 Sistema de Distribuição IEEE - 4	45
4.3 Sistema de Distribuição IEEE - 34	47
4.4 Sistema Real de Distribuição de 135 Barras.....	54
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

1.1 O Sistema Elétrico Brasileiro

O desenvolvimento adequado dos sistemas elétricos é primordial no progresso socioeconômico nas sociedades contemporâneas, haja vista que a energia elétrica figura como um recurso fundamental para os setores agrário, industrial e comercial. Afinal, as populações atuais necessitam que bens e serviços estejam disponíveis para uso, sendo necessária alguma forma de energia para oferecer apoio mecânico, térmico e elétrico a todas essas atividades (ANEEL, 2008a; KERSTING, 2008). Estima-se que o consumo de energia elétrica industrial e residencial cresceu 0,9% e 2,9%, respectivamente, em dezembro de 2016 quando comparado com o mesmo mês do ano anterior (EPE, 2016b). Essa estatística reflete a inevitabilidade do Sistema Elétrico Brasileiro (SEB) em ser mantido em pleno funcionamento e propiciar o desenvolvimento econômico brasileiro através de uma operação estável, confiável frente à demanda energética nacional.

Com 4290 empreendimentos de geração de energia, cerca de 127 mil km de linhas de transmissão e 77 milhões de consumidores (STAROSTA, 2015), o SEB oferece complexidade em termos de operação, planejamento e manutenção, como ilustrado na figura 1, pois é localizado em um país que está em franco desenvolvimento, com dimensões continentais e elevada população. Sob essa perspectiva, o SEB passou por profundas mudanças operacionais e regulatórias na década de 90, dentre as quais destaca-se a criação da primeira agência reguladora do Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e a desverticalização dos segmentos de Geração, Transmissão, Distribuição e Comercialização (ANEEL, 2008b). Adicionalmente, a concepção do Sistema Interligado Nacional (SIN), composto por usinas geradoras, linhas de transmissão e ativos de distribuição, contribuiu para possibilitar maior robustez e confiabilidade na operação do setor elétrico nacional (ANEEL, 2008b; ONS, 2017), além de permitir o despacho central do sistema através de um único operador, o Operador Nacional do Sistema (ONS), conforme prevê a Lei 9648/98. Além disso, a subdivisão do SIN em 4 subsistemas (Sul, Sudeste Centro Oeste, Nordeste e Norte) e a interconexão desses através de linhas de transmissão permite o intercâmbio de energia elétrica despachada centralmente pelo ONS frente à dinâmica do mercado de demanda e dos regimes hidrológicos vigentes.

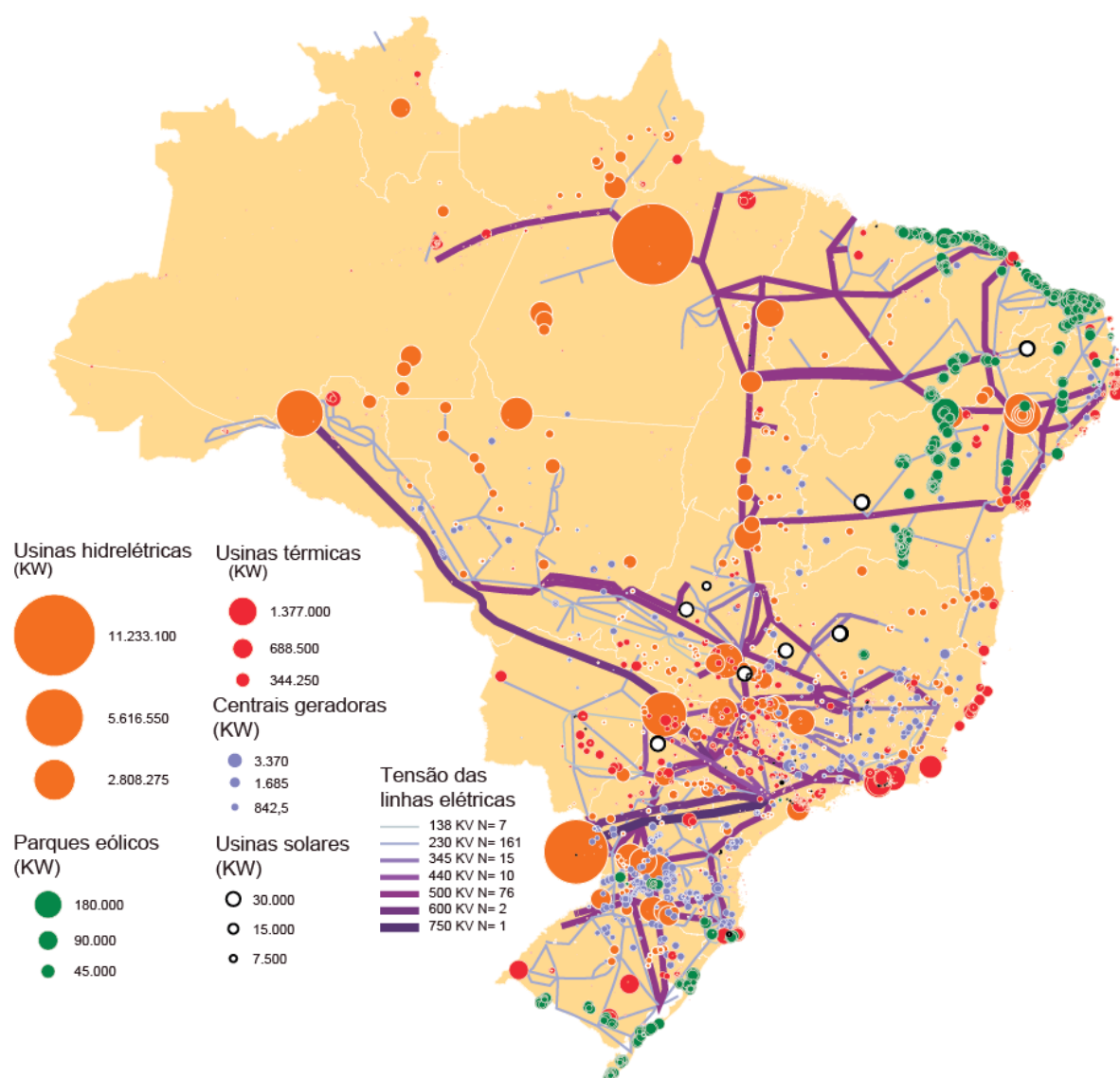


Figura 1 - Representação do sistema elétrico brasileiro

Dentre os diversos segmentos do SEB, o segmento de Distribuição é o mais próximo dos consumidores e é onde estão inseridas as empresas de distribuição de energia elétrica. Essas destinam-se primordialmente a transportar a energia advinda de fontes de geração de energia elétrica, conduzida através das linhas de transmissão até as proximidades dos centros consumidores em tensões a partir de 69 kV e até 1000kV. Após a transmissão de energia elétrica, o processo de distribuição de energia elétrica é concretizado usualmente em 2 etapas. No início, há a distribuição dita primária, a qual ocorre em subestações abaixadoras, onde os níveis de tensão advindos das linhas de transmissão são ajustados para valores padronizados nas redes de distribuição primária, normalmente entre 2,3 kV e 44 kV (ABRADEE, 2017). Posteriormente, através das linhas de distribuição na rede

primária, a energia elétrica é direcionada aos transformadores de distribuição, onde inicia-se a distribuição secundária. Nesses transformadores o nível de tensão é normalmente abaixado para aqueles normalmente ofertados aos consumidores, 220 ou 110 V, mesmo que consumidores com alta demanda, tais como indústrias, podem ser conectadas diretamente à distribuição primária e solicitar tensões em níveis diferentes (ABRADEE, 2017).

1.2 A Geração Distribuída no Brasil

A capacidade total instalada de geração elétrica alcançou 140.858 MW em 2015, representando um aumento de 6,945 MW em relação ao ano anterior (EPE, 2016a). Embora esse aumento tenha sido refletido em um crescimento do SEB e motivado pela intensificação na demanda de energia elétrica, foi estimado que as perdas nas redes de transmissão representaram 20,1% da potência que fluiu pelo SIN em 2015 (EPE, 2016b). Reconhece-se que perdas de potência são intrínsecas à qualquer etapa de transmissão de energia elétrica haja vista a distância entre os centros de geração de energia elétrica e os centros de consumo. Portanto, a minimização de perdas de energia no setor elétrico figura como um dos principais objetivos na operação do SEB. Aliado a esse cenário, o campo de pesquisa e desenvolvimento científico na área de Sistemas de Energia tem trazido diversas fontes renováveis de energia mais próximas aos consumidores, com destaque à energia fotovoltaica. Verificase o histórico no país na queda do custo de módulos fotovoltaicos ao longo dos últimos anos. O custo da implantação de um sistema fotovoltaico em território brasileiro, incluindo equipamentos, mão de obra, materiais e serviços de instalação atingiu R\$ 21 Wp e apresenta clara tendência de redução ao longo dos próximos anos (GALDINO, 2012).

Corroborando com esse cenário, os índices do cenário energético brasileiro também retratam o aumento da penetração das fontes de energia renováveis na geração de energia. A Empresa de Pesquisas Energética, EPE, estima que 39,4% do crescimento na geração de energia entre 2015 e 2016 sejam atribuídos a fontes de energias renováveis, conforme nota-se na Tabela 1.

Diante dessa nova tendência de geração de energia, a Geração Distribuída (GD) tem sido uma nova abordagem presente no setor elétrico. Quando definida acerca de seu propósito e localização, a GD caracteriza-se pela geração de energia

a GD caracteriza-se pela geração de energia elétrica resultante de um conjunto de instalações que são conectadas diretamente à rede de distribuição de energia

Tabela 1 - Capacidade instalada de geração elétrica no Brasil (MW) Fonte: Adaptado de EPE, 2016b

	Ano 2011	Ano 2012	Ano 2013	Ano 2014	Ano 2015
Usinas Hidrelétricas	78.347	79.956	81.132	84.095	86.002
Usinas Termelétricas	31.243	32.778	36.528	37.827	39.393
PCH	3.896	4.101	4.620	4.790	4.840
CGH	216	236	266	308	395
Usinas Nucleares	2007	2.007	1.990	1.990	1.990
Usinas Eólicas	1.426	1.894	2.202	4.888	7.630
Solar	1	2	5	15	21
Total	117.136	120.974	126.743	133.913	140.271

elétrica resultante de um conjunto de instalações que são conectadas diretamente à rede de distribuição de energia elétrica com a finalidade de injeção de potência ativa na rede (ACKERMANN *et al*, 2001). Embora os estudos sobre GD tenham recebido destaque recentemente, não há ainda uma definição unificada aceita para defini-la. Em termos de potência, o Cigré (*Conseil International des Grands Réseaux Électriques* – Conselho Internacional de Grandes Redes Elétricas) identifica como GD fontes de energia descentralizadas com potência menor do que 100MW. Já o instituto de pesquisa ERPI (*Electric Power Research Institute*) reconhece como GD a geração com potência de “alguns quilowatts até 50 MW” (idem).

As classificações e definições de GD também sobre alterações conforme as agências regulatórias de cada país. No caso do Brasil, a ANEEL define como GD a produção de energia elétrica por meio de pequenas centrais elétricas que usam fontes renováveis de energia e são classificadas em termos de potência instalada. Nesses termos, unidades de GD com potência instalada menor ou igual a 75 kW são denominadas como unidades de micro geração. Quando a potência é superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas e 5 MW para demais fontes, a classificação utilizada é mini geração (ANEEL, 2012).

Se a projeção de 2,7 milhões de aderentes à GD se confirmarem até 2030, o Brasil evitará a emissão de 29 milhões de toneladas de gás carbônico (CO₂) na atmosfera, o que se alinha com as metas renováveis do Brasil com a Organização das Nações Unidas de alcançar 23% de participação de energias renováveis no fornecimento de energia elétrica e alcançar 10% de ganhos de eficiência no setor

elétrico até 2030 (MME, 2015). Os benefícios da maior inserção de GD também se estendem no setor elétrico, passando por concessionárias e consumidores. De acordo com Kersting (2008), ao usufruir da GD, os consumidores têm a possibilidade de aproveitar os benefícios de cogeração de energia, permitindo que o excesso de energia gerado seja repassado à concessionária local, resultando na redução de despesas com energia elétrica e ainda na elevação da confiabilidade do serviço de energia elétrica. Para as concessionárias e outras entidades no setor elétrico, por outro lado, pode-se usar a GD para reduzir eventuais sobrecargas nos sistemas de transmissão e distribuição. Adicionalmente, as concessionárias passam a contar com mais um recurso para lidar com falhas na rede, protegendo o consumidor final, melhora em termos de qualidade de energia, pois o uso de GD pode melhorar índices como queda de tensão, regulação de tensão, perfis de tensão e perdas de energia (KERSTING, 2008).

Com o aumento da penetração da GD no Brasil, políticas de incentivo e de regulação vem sendo tomadas. Em 2015, o MME lançou o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica no intuito de fomentar e ampliar os estímulos à GD, com foco à energia FV, com o investimento acumulado de R\$ 100 bilhões até 2030 (MME, 2015b). No aspecto regulatório, a ANEEL realiza audiências e consultas públicas, as quais resultam nas resoluções normativa desde 2010. Dentre elas, uma das mais importantes foi a Resolução Normativa REN nº 482/2012. A partir dela, os consumidores brasileiros passaram a contar com a possibilidade de se envolverem na geração ou cogeração de energia elétrica, inclusive fornecer excedente energético para a rede de distribuição local. Objetivando-se o aperfeiçoamento das normativas, foi publicada a publicação da Resolução Normativa - REN nº 687/2015, a qual revisou a REN nº 482/2012 e a seção 3.7 do Módulo 3 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST). As principais contribuições da atualização dizem respeito à simplificação dos procedimentos de solicitação de acesso das unidades de GD dos consumidores à rede, refletindo na diminuição de 82 para 34 dias o prazo para as concessionárias realizarem a conexão de unidades com até 75 kW. Adicionalmente, desde janeiro de 2017 os consumidores podem solicitar e acompanhar os pedidos de solicitação de conexão de suas unidades geradoras via internet. Foram aprimoradas também as regras sobre os créditos de geração de

energia excedente por parte dos consumidores. Com a nova resolução, o prazo de validade dos créditos passou de 36 para 60 meses (ANEEL, 2015).

1.3 Justificativa

A crescente demanda pelo aumento da parcela de energias renováveis nas matrizes energéticas e a modernização dos sistemas de distribuição de energia elétrica (SDEE) tem impulsionado a expansão de sistemas de geração distribuída (GD), beneficiando concessionárias elétricas e consumidores. Como foi exposto nos tópicos anteriores, os principais benefícios para SDEE sob influência de GD são: diminuição de perdas de potência ao longo das redes de distribuição, melhoria dos perfis de tensão e confiabilidade e melhoria da capacidade de transmissão de energia.

Não obstante, faz-se necessário que as concessionárias de distribuição estudem e analisem os desafios técnicos provenientes dessa nova tendência de geração. Ao estarem preparadas para diversos cenários de demanda e considerar a GD como outra fonte para suprir a demanda de energia elétrica, as empresas de distribuição estarão melhor preparadas para acompanhar os avanços no setor elétrico. Nesse sentido, o desenvolvimento de ferramentas e simulações robustas para estudos da GD em SDEE são importantes no planejamento, controle e otimização das redes.

1.4 Objetivos

Por meio dos estudos realizados nesta monografia, os seguintes objetivos são alcançados:

- Apresentar o OpenDSS como uma ferramenta robusta e viável em estudos da operação e planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica
- Desenvolver uma interface de interação entre os programas OpenDSS e o MATLAB, visando a simulação de diversos cenários possíveis de operação
- Desenvolver uma modelagem probabilística apropriada para GD advinda de fontes renováveis dos tipos fotovoltaica, eólica e hídrica
- Avaliar os impactos técnicos da inserção de GD na operação de sistemas de distribuição de energia elétrica

1.5 Organização do documento

Encontram-se 5 capítulos reunidos neste documento, incluindo o capítulo 1 que tem cunho introdutório e é finalizado neste subitem.

O capítulo 2 destina-se à apresentação do programa utilizado neste projeto de conclusão de curso, o OpenDSS. São expostas as características principais deste recurso computacional, tais como o seu histórico, suas principais funcionalidades, formas de representação e abstração dos sistemas de distribuição e seus principais componentes. O funcionamento dessa ferramenta computacional em associação ao ambiente e linguagem de programação MATLAB é tratado também naquele capítulo.

As abordagens estatísticas e probabilísticas utilizadas neste trabalho que permitem considerar a natureza aleatória da geração de energia por parte dessas fontes eólicas, fotovoltaicas e hídricas em sistemas de GD são apresentadas no capítulo 3, com atenção especial destinada à simulação de Monte Carlo. A partir dessas técnicas apresentadas naquele capítulo, é possível realizar o cálculo do fluxo de carga probabilístico, fazendo com que as simulações computacionais de SDDEs sob efeito de GD se aproximem ainda mais à dinâmica observada em um sistema real.

No capítulo 4 são apresentados os resultados das simulações no OpenDSS para o cálculo de fluxo de carga probabilístico, em sistemas de distribuição de teste desenvolvidos pelo Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) os quais se baseiam em testes para soluções computacionais que se dedicam à resolução de problemas de fluxo de carga. Para a validação do uso OpenDSS neste projeto, 2 sistemas teste do padrão IEEE são analisados sob diferentes cenários de simulação. O estudo principal desenvolvido é exposto também ao longo do capítulo 4, onde os impactos do funcionamento de unidades de GD em um sistema real são apresentados e discutidos. Assim, o fluxo de carga probabilístico é executado com a finalidade de estimar as perdas técnicas em redes de distribuição, além de avaliar as alterações causadas nos perfis de tensão devido à adição de unidades de GD, cujas modelagens são abordadas conforme os métodos discutidos no capítulo 3.

Por fim, as considerações finais quanto às conclusões e interpretação dos resultados obtidos das simulações propostas no capítulo 4 são abordadas no capítulo 5, no qual também são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2: O SIMULADOR DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO – OpenDSS

2.1 Características Gerais

Experimentos envolvendo a operação de SDEE não são normalmente praticáveis em laboratórios devido à complexa dinâmica e dimensões associadas a esses sistemas e, portanto, é necessário utilizar simuladores computacionais destinados a esses fins. Sendo assim, dentre os diversos recursos disponíveis no mercado, o OpenDSS (*The Open Distribution System Simulator*) foi escolhido para ser utilizado neste trabalho principalmente por abranger a maior parte das simulações no domínio da frequência necessárias para estudos de análise e planejamento de redes de distribuição. Adicionalmente, o OpenDSS tem sido destacado no setor elétrico brasileiro como o simulador indicado pela ANEEL para ser empregado nos cálculos de fluxo de carga destinados à estimação de perdas técnicas em sistemas de distribuição de média e baixa tensão, conforme a Nota Técnica nº 0057/2014-SRD (ANEEL, 2014).

Dentre as variadas funcionalidades e úteis características do OpenDSS, a análise e planejamento de sistemas de distribuição (tanto aqueles organizados radialmente ou em malha) é um grande atrativo do programa, pois permite a simulação de sistemas de distribuição com topologias complexas. É possível simular também sistemas que não são necessariamente equilibrados e sob qualquer frequência de operação (DUGAN, 2013). Adicionalmente, as soluções do fluxo de potência dos sistemas implementados no OpenDSS podem ser realizadas de maneira instantânea (chamado de modo *snapshot*) ou ainda em intervalos de tempo bem definidos tais como dias, anos ou qualquer outro regime especificado previamente pelo usuário. Podem ser conduzidas também simulações para o estudo de harmônicas, faltas (equilibradas e desequilibradas), contingenciamento e crescimento de sistemas. Os resultados das simulações podem ser exportados diretamente para arquivos de texto ou planilhas eletrônicas de análise de dados. Gráficos recorrentes nos estudos de SDDE tais como os de perfis de tensão, curvas de demanda e georeferenciamento dos sistemas podem ser gerados e salvos no próprio ambiente do programa, contribuindo para uma compreensão mais aprofundada do problema a ser estudado, como exemplificado na figura 2.

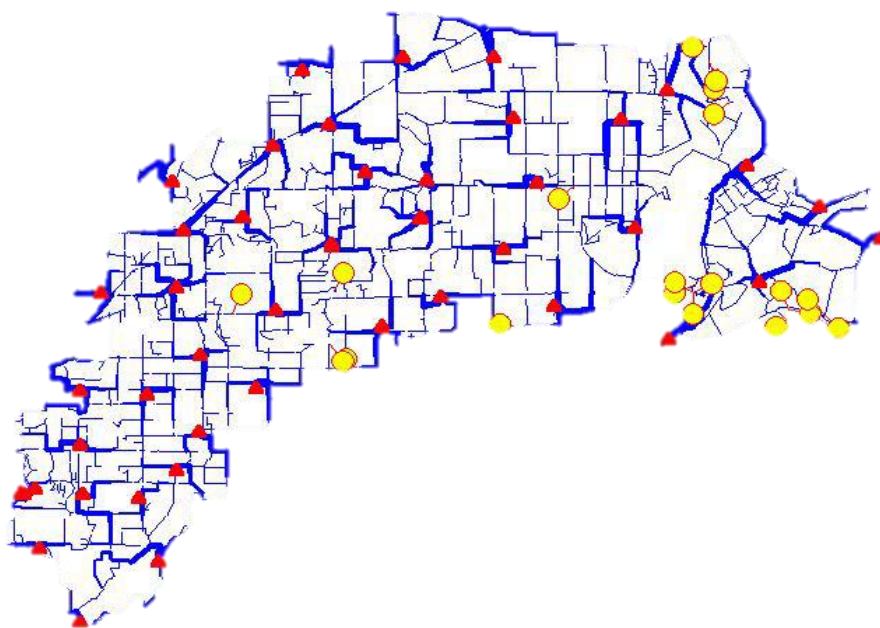


Figura 2 SDEE com georreferenciamento, simulado no OpenDSS, com pontos sugeridos (em amarelo) para a alocação ótima de sistemas de GD. Fonte: EPRI, 2012

O desenvolvimento do OpenDSS data desde 1997 quando o programa ainda era mantido e comercializado pela companhia Electrotek Concepts. Em 2004, o programa foi adquirido pelo EPRI (*Electric Power Research Institute*), um instituto de pesquisa norte americano na área de Sistemas de Energia e Potência, com sede localizada no estado da Califórnia. Desde então, seus desenvolvedores têm atualizado as suas versões em vista da modernização e mudanças do setor energético, como Redes Inteligentes (*Smart Grids*) e fontes renováveis de energia. Em 2008, o programa foi disponibilizado ao público sob uma licença de código aberto, o que permitiu aos usuários consultar, redistribuir, utilizar e modificar o OpenDSS sem nenhum custo adicional ou infração contra direitos autorais. A disponibilização em código aberto é uma das razões pelas quais o OpenDSS é tão bem aceito e tem sido utilizado pela comunidade acadêmica nos últimos anos, pois permite a sua expansão através da adição de novos recursos sem ser aqueles encontrados na versão original do programa e funções criadas pelos próprios usuários de acordo com as próprias necessidades (EPRI, 2012; DUGAN, 2013).

2.2 Representação de Elementos

Com a elaboração do modelo de um sistema real, é possível abstrair os seus principais componentes em ordem a obter inferências sobre seus comportamentos e elaborar estratégias para controlá-los. Sob essa perspectiva, sistemas e elementos inseridos em simulações computacionais devem ser capazes de realizar uma abstração simples e realista dos desempenhos de seus correspondentes reais. Enquanto que a simplicidade traz a possibilidade de manipulação e entendimento do objeto de simulação sem exagerada complexidade, a realidade aproxima os modelos computacionais quanto maior o grau de fidelidade possível ao sistema real (RUBINSTEIN e KROESE, 2008). O OpenDSS representa SDEE e seus elementos em objetos organizados na estrutura disposta na figura 3.

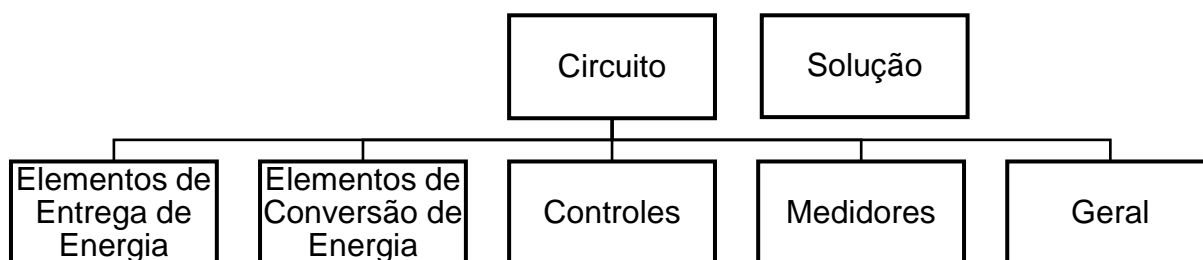


Figura 3 Classificação dos principais elementos presentes no OpenDSS

Nota-se que o objeto Circuito é a entidade mais geral na hierarquia, que reúne todos os outros elementos a serem adicionados. Associado a cada objeto Circuito declarado no OpenDSS, há um objeto Solução o qual é composto por grandezas básicas utilizadas pelo programa: matrizes de tensões nodais, admitância nodal e de corrente. A partir das grandezas, é possível efetuar o cálculo de todas as soluções que possam ser solicitadas pelo usuário, como por exemplos perdas ativas e reativas no circuito e por elementos, correntes de falta, harmônicas, dentre outras disponíveis no programa.

Os Elementos de Entrega de Energia (Elementos Passivos) representam um meio de transferir energia entre diferentes barras ou terminais. Dessa maneira, os elementos mais comuns nessa categoria são transformadores, linhas de transmissão, capacitores e reatores, os quais são representados no OpenDSS através de suas respectivas matrizes de admitância. Semelhantemente, os Elementos de Conversão (Elementos Ativos) de energia são responsáveis pela conversão de energia elétrica para outra forma ou vice versa, os quais são cargas,

geradores e fontes de corrente e tensão. Na resolução do fluxo de potência esses elementos são representados em uma matriz de corrente injetada no circuito elétrico.

O restante dos objetos adiciona comportamentos e funcionalidades mais complexas aos modelos de SDDE. Reguladores de tensão, relés, fusíveis e chaves são elementos sob a categoria Controle, pois são responsáveis por alterar a topologia do sistema de distribuição ou o fluxo de potência ao longo de um sistema elétrico. Os elementos inseridos na categoria Medidores representam equipamentos responsáveis por amostrar e armazenar grandezas do circuito, sendo elementos como monitores, sensores de energia e sensores. Por fim, as abstrações de parâmetros como geometria e dados de condutores, curvas de carga e curvas de crescimento de demanda são modeladas sob a categoria Geral.

2.4 Conexão entre o OpenDSS e ambiente MATLAB

Embora o OpenDSS possa ser utilizado independentemente, reunindo uma variedade de recursos e funcionalidades, os estudos em sistemas de distribuição são altamente dinâmicos, englobando continuamente diversos métodos de análise, como algoritmos de otimização, e tecnologias, como o desenvolvimento de Redes Inteligentes (DUGAN, 2013; EPRI, 2009). De maneira semelhante, os usuários também dispõem de projetos que apresentam necessidades e funções muitas vezes inéditas e não disponíveis ainda no OpenDSS ou ainda que são difíceis de serem implementadas no ambiente de programação do programa. Por exemplo, estruturas de programação chamadas de laços de repetição não são nativas da sintaxe de programação do programa, dificultando a implementação de diversos algoritmos populares de otimização e heurística, muitos dos quais são recorrentes em estudos de operação e planejamento em Sistemas de Energia.

Uma solução implementada pelos desenvolvedores do OpenDSS para simplificar essa e outras problemáticas foi de permitir o uso do OpenDSS de maneira embarcada em outros aplicativos que permitem a análise de dados, Excel e MATLAB, e com linguagens de programação mais populares entre desenvolvedores de programas, tais como Python e C#. O uso do OpenDSS associado a outros programas é implementado através do recurso chamado de COM (*Component Object Model* - Modelo de Objeto de Componente), o qual foi desenvolvido pela Microsoft em 1993 com o fim de automatizar a comunicação de aplicações que são

programadas em diferentes linguagens e construídas sob diferentes arquiteturas de software. Essa funcionalidade é estratégica e crítica para o desenvolvimento de estudos mais elaborados de SDEE que demandam maior número de manipulações computacionais, estruturas de programação mais elaboradas ou ainda que demandem certo grau de automatização de processos e tarefas. Além disso, o uso da interface COM é acessível para usuários que não tenham longa experiência com o desenvolvimento de software, permitindo que eles não precisem se modificar com o código fonte do OpenDSS ou desenvolvendo DLLs (*Dynamic Link library* - Bibliotecas de Vínculo Dinâmico) personalizadas, pois são processos de elevada complexidade e por isso mais acessíveis a experientes desenvolvedores de programas. A sintaxe detalhada para o uso da interface COM e conexão com outros programas é encontrada nos manuais de referência do OpenDSS (DUGAN, 2013; EPRI, 2009).

Neste estudo, o OpenDSS foi utilizado como um simulador de SDEE e controlado por meio do programa de computação científica MATLAB, conforme é elucidado na figura 4. Portanto, sob o ponto de vista da interface COM presente no OpenDSS (OpenDSSEngine.dll), o programa MATLAB comporta-se como um cliente, pois ele é a entidade que solicita as simulações e seus resultados do OpenDSS e é ainda o aplicativo onde os resultados das simulações são enviados para serem manipulados e analisados. Analogamente, o OpenDSS funciona como um servidor pois responde os pedidos do cliente (resultados e dados sobre as simulações executadas).

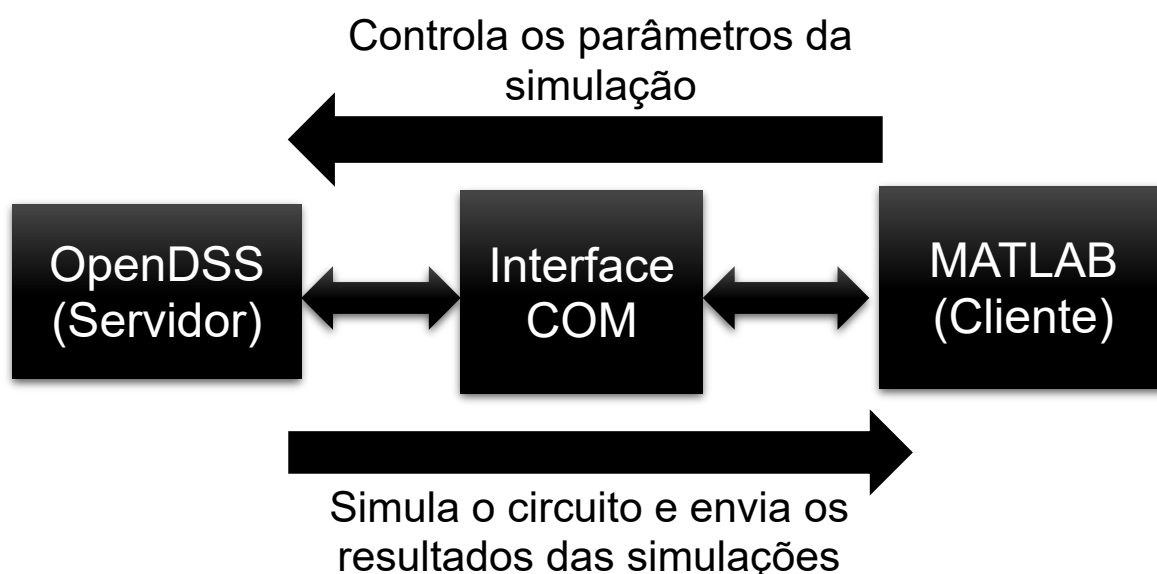


Figura 4 Relação entre o OpenDSS e MATLAB através da interface COM

Entre o cliente e servidor, há a interface COM que gerencia a comunicação entre essas duas entidades através de uma série de abstrações computacionais (métodos, propriedades e interfaces).

Assim, as definições dos circuitos (topologias, elementos, valores de tensão de base, potências de curto circuito, dentre outros), técnicas de análise e soluções são definidos nos códigos do OpenDSS, o qual simula a dinâmica de um sistema de distribuição, disponibilizando os resultados dos cálculos de fluxo de carga aos usuários. Do outro lado, o programa MATLAB é utilizado para a programação de todos os algoritmos (em linguagem MATLAB) de técnicas de análise, como a simulação de Monte Carlo, manipulação de dados e confecção de gráficos de interesse para análise. Ressalta-se que os dois programas citados anteriormente são programados em linguagens distintas e desenvolvidos sob arquiteturas de software também diferentes e, portanto, o uso da interface COM foi necessário para que ocorra a comunicação adequada entre os dois recursos.

CAPÍTULO 3 – MODELAGEM PROBABILÍSTICA DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

3.1 Aspectos Gerais

As fontes de GD são caracterizadas principalmente por não ofertarem energia a uma taxa constante ao longo do tempo, isto é, a potência elétrica entregue por essas fontes é variável no decorrer do tempo (SHORT, 2006). Essa característica reside na natureza dos próprios recursos energéticos primários empregados em cada fonte de GD, uma vez que eles dependem primordialmente de fenômenos naturais, os quais são intrinsecamente aleatórios. (SHORT, 2006; KERSTING, 2002). Por exemplo, a irradiação solar é alterada em função da intensidade dos raios solares nas unidades fotovoltaicas, sendo as mudanças de sombreamento e temperatura nas placas fotovoltaicas os principais fatores relacionados a essas variações. Já nos geradores eólicos o recurso variável é o vento, o qual pode assumir diferentes velocidades e direções ao longo do dia, provocando mudanças nas tensões e correntes de saída das turbinas eólicas. Já em centrais hidrelétricas, a vazão de água depende majoritariamente do regime hídrico de cada rio, estando este diretamente relacionado a índices de precipitação e outras condições meteorológicas.

Nota-se, portanto, que a potência elétrica gerada a partir das fontes citadas anteriormente é uma variável estocástica, pois pode assumir uma série de valores incertos no tempo. Ao contrário de unidades geradoras de energia elétrica com despacho central de energia, tais como grandes centrais elétricas, nucleares e termelétricas, a potência injetada nos sistemas elétricos por meio de GD não é previamente conhecida pelos operadores de um sistema elétrico, e, portanto, acrescentando incertezas na geração na operação de um sistema elétrico. Nessa perspectiva, os SDEE que contam com GD devem ser analisados a partir de um fluxo de carga dito probabilístico, no qual as incertezas associadas à GD sejam propriamente representadas e consideradas nos cálculos de fluxo de carga, contrapondo-se ao fluxo de carga estático ou determinístico, onde as potências injetadas pelas unidades de geração permanecem com suas características praticamente fixas ao longo do tempo.

Para tanto, os modelos probabilísticos das fontes de energia que caracterizam as unidades de GD devem ser desenvolvidos. Esses modelos estabelecem as distribuições de probabilidade que melhor descrevem o

fornecimento de energia de cada fonte de GD. Adicionalmente, são necessárias simulações que consigam emular a geração de valores aleatórios no sentido de considerar as incertezas presentes na geração de energia, semelhante ao como é verificado na natureza.

3.2 Método de Monte Carlo

Dentro da conjuntura da 2ª Guerra Mundial, o projeto Manhattan foi responsável pela origem das primeiras bombas atômicas no mundo, tendo sido conduzido nos Estados Unidos da América durante década de 40. Um dos desafios científicos mais importantes que foram enfrentados durante o projeto foi o cálculo de difusão de nêutrons da bomba atômica de hidrogênio, um desafio de natureza estocástica (THOMOPOULOS, 2013). Esse problema motivou o desenvolvimento de simulações realizadas conforme a técnica que são atualmente referidas como métodos de Monte Carlo, um codinome dado pelos cientistas von Neumann e Ullman, idealizadores da técnica. As simulações de Monte Carlo (SMC) se baseiam em sucessivas amostragens de variáveis aleatórias para a estimação de resultados também aleatórios, em sistemas onde o comportamento futuro pode ser analisado através de modelos probabilísticos adequados de acordo com fenômeno de interesse. Esse método tem mostrado ser viável, robusto e confiável, além de ser utilizado com sucesso em diversos estudos de domínios do conhecimento como Ciências Naturais, Sociais, Econômicas, Engenharias, por exemplo (RAYCHAUDHURI, 2008).

Na SMC, para cada conjunto de parâmetros de entrada obtém-se um respectivo conjunto de valores de saída. Os valores para variáveis de entrada são obtidos por meio de amostragens desses parâmetros através de variáveis aleatórias que são inseridas através de distribuições probabilísticas. As distribuições de probabilidade que caracterizam as variáveis de interesse são determinadas por meio de testes de ajustes entre as distribuições teorizadas e empíricas, um processo que depende de dados históricos sobre os fenômenos estudados, permitindo assim a identificação da distribuição de probabilidade que melhor descreve as variáveis de entrada (THOMOPOULOS, 2013). Através dos testes de ajuste de hipótese, os parâmetros das distribuições de probabilidade são estimados, o que permite análise e caracterização dos parâmetros de saída. As sucessivas repetições garantem a convergência das SMC por meio da Lei Forte dos Grandes Números, isto é,

conforme o aumento do número de observações de uma série de variáveis aleatórias, a média aritmética de todas as observações aproxima-se ao valor esperado da distribuição de probabilidade das variáveis da série. Uma abordagem com maior rigor matemático, incluindo as demonstrações, teoremas e provas matemáticas pertinentes para a Lei Forte dos Grandes Números, é encontrada em Rubinstein e Kroese (2008).

Conforme apresentado em Raychaudhuri (2008), as etapas comumente necessárias para executar uma SMC são:

1. Identificar a Distribuição de Probabilidade das variáveis de interesse: considerando a natureza probabilística das variáveis envolvidas, é necessário obter a distribuição de probabilidade apropriada seguida por essas variáveis. Esse passo é normalmente feito com o histórico das variáveis aleatórias de interesse.
2. Gerar um modelo estático do problema: para cada problema, identificam-se as variáveis de entrada e de saída. Em seguida, procura-se um modelo determinístico que se assemelhe o máximo possível ao processo aleatório de interesse
3. Amostrar as variáveis de entrada: as variáveis aleatórias escolhidas são simuladas aleatoriamente durante n vezes, inseridas no modelo do problema e os resultados de interesse são obtidos.

A seguir, o processo descrito brevemente acima é explicado com maiores detalhes e com as fundamentações teóricas pertinentes.

3.2.1 Funções de Densidade de Probabilidade

A relação entre variáveis aleatórias e as probabilidades de ocorrência de cada uma delas em eventos pode ser expressa e analisada através de gráficos, tabelas ou expressões matemáticas. Algebricamente, a expressão matemática que relaciona variáveis aleatórias e as suas respectivas probabilidades de ocorrência recebe o nome de função de densidade de probabilidade (fdp). Diz-se que, se x é uma variável aleatória contínua, então há uma função f definida para todo reais x pertence $-\infty$ e ∞ que é denominada de fdp de x . Por definição, f satisfaz a seguinte propriedade:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) \, dx = 1$$

Interpreta-se, então, que a soma de todas as probabilidades de ocorrência da variável x é 1 em qualquer valor incluído em $-\infty$ e $+\infty$, sendo f também definida nesse mesmo intervalo de valores.

Assim, define-se como a probabilidade de X assumir valores entre a e b , $P\{a \leq X \leq b\}$, como:

$$P\{a \leq X \leq b\} = \int_a^b f(x) \, dx$$

Geometricamente, essa expressão equivale a uma área sob a curva de $f(x)$ entre os pontos a e b , em um gráfico x versus $f(x)$, com uma dada distribuição de probabilidade, equivalente a operação de integração numérica descrita na equação acima, representado graficamente pela figura 5.

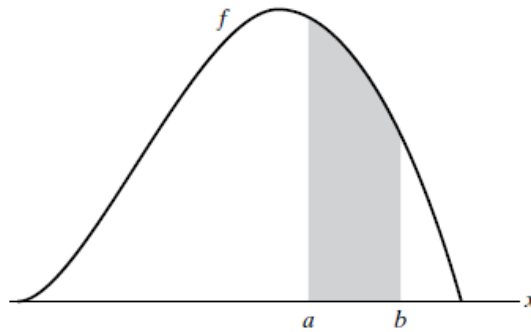


Figura 5 Representação gráfica da definição de probabilidade para variáveis contínuas.

Fonte: Rubinstein e Kroese (2008).

3.2.2 Função de Distribuição Acumulada

Através de uma fdp é possível também determinar a probabilidade que uma variável aleatória, com uma dada distribuição de probabilidade, seja encontrada com um valor menor ou igual a um valor qualquer. A função que representa essa probabilidade é a função de distribuição acumulada, fda. Portanto, seja x uma variável aleatória contínua com fdp $f(x)$, $F(a)$ é uma fda de x e representa a probabilidade de que x assuma um valor menor ou igual a a . $F(a)$ é expressa algebricamente como

$$F(a) = P\{-\infty \leq X \leq a\} = \int_{-\infty}^a f(x) dx$$

Observa-se, portanto, a seguinte relação entre as fdp e fdas, isto é, $F(a)$ e $f(a)$

$$\frac{d(F(a))}{da} = f(a)$$

Essa relação algébrica é também representada graficamente: enquanto a probabilidade descrita por uma fdp é representada por uma área, a mesma probabilidade representada por uma fda é equivalente graficamente a um ponto, conforme figura 6.

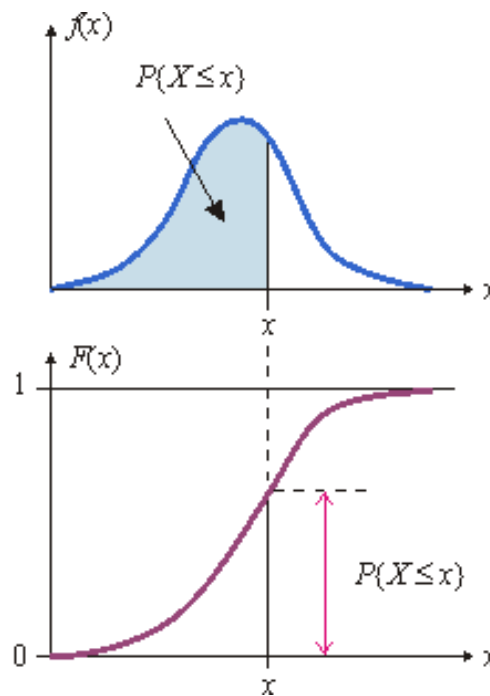


Figura 6 – Relação entre uma fdp e sua respectiva fda. Fonte: http://daad.wb.tu-harburg.de/uploads/pics/cdf-pdf-1_03.gif

Algumas distribuições de probabilidade recorrentes em estudos de Probabilidade e suas respectivas fdp são dispostas na tabela a seguir. Os parâmetros e suas formulações matemáticas de cada equação podem ser encontrados em Rubinstein e Kroese (2008).

Tabela 2 Distribuições de Probabilidade e respectivas Funções de Densidade de Probabilidade

Distribuição de Probabilidade	Função de Densidade de Probabilidade - $f(x)$
Normal	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$
Binomial	$\binom{n}{x} p^x (1-p)^{n-x}$
Poisson	$e^{-\lambda} \frac{\lambda^x}{x!}$
Weibull	$\alpha\lambda(\lambda x)^{\alpha-1} e^{-\lambda x^\alpha}$

3.2.3 Geração de Números Aleatórios: o Método da Transformação Inversa

A amostragem de variáveis aleatórias a partir de distribuições de probabilidade é um dos processos mais importantes no decorrer de uma SMC. Esse processo é possível a partir da obtenção de números aleatórios na tentativa de emular os fenômenos estocásticos em análise no modelo da simulação. Uma estratégia que pode ser implementada é relacionar as variáveis de interesse às probabilidades de ocorrência de cada uma delas por meio da fda, conforme mostra a figura abaixo.

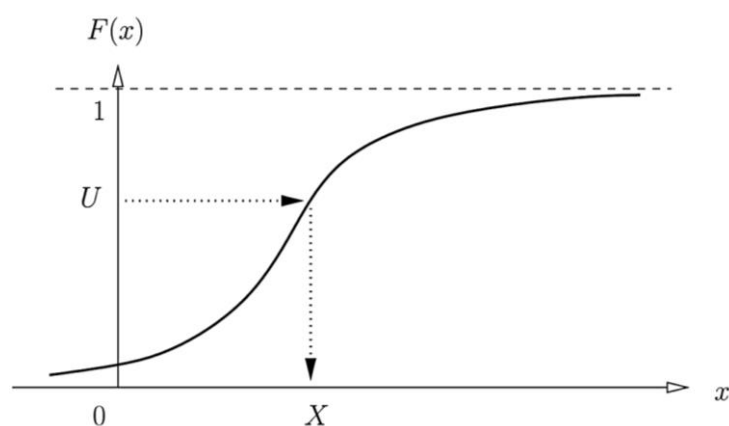


Figura 7 Relação dentre a função de densidade acumulada de probabilidade e variáveis aleatórias. Fonte: Rubinstein e Kroese, 2008

Números aleatórios podem ser gerados no intervalo entre 0 e 1, os quais representam a probabilidade de ocorrência de uma certa variável aleatória. Assim, por meio de alguma função matemática, esses mesmos números aleatórios podem ser relacionados aos valores de suas correspondentes variáveis aleatórias. O processo descrito anteriormente é a base de um dos métodos mais diretos e fáceis

de serem utilizados na simulação de variáveis aleatórias e se chama Método da Transformação Inversa, o qual é sustentado pela seguinte proposição:

Seja x uma variável aleatória contínua entre 0 e 1. Para qualquer distribuição de probabilidade contínua F , se é possível definir uma variável aleatória X através da relação

$$X = F^{-1}(x)$$

então a variável X tem uma função de distribuição de probabilidade F .

Como consequência dessa proposição, é possível simular uma variável aleatória X a partir de uma distribuição de probabilidade F . Para tanto, basta que a função inversa (F^{-1}) seja analítica e que o número aleatório x seja obtido. Portanto, o Método da Transformação Inversa é extremamente conveniente para ser executado computacionalmente, haja vista as diversas linguagens de programação que podem ser utilizadas para executar esse método, as quais já contam as distribuições de probabilidade mais utilizadas nas literaturas e rotinas computacionais específicas para aplicações em probabilidade e estatística.

3.2.4 Teste de Kolmogorov–Smirnov

As variáveis aleatórias presentes no cálculo de potência de fontes de GD podem apresentar certas distribuições de probabilidade, as quais contam com as suas respectivas funções de probabilidade, acumuladas e de densidade. Portanto, a partir do método descrito na secção anterior e com o conhecimento da distribuição de probabilidade de uma variável aleatória, é possível simular os seus valores através de sua função de probabilidade inversa. Para tanto, nota-se a necessidade de determinar a distribuição de probabilidade que melhor representa o comportamento de uma variável aleatória.

Uma maneira de determinar a distribuição de probabilidade mais adequada para as variáveis aleatórias é feita a partir dos chamados Testes de Aderência. Esses testes verificam se as hipóteses iniciais acerca das distribuições de probabilidade conjecturadas sobre as frequências encontradas nas populações amostradas são estatisticamente significativas e, logo, se podem ser aceitas para descrever determinado fenômeno. Genericamente, para conduzir os testes de

aderência, é necessário primeiro elencar duas hipóteses, chamadas de hipótese de nulidade (H_0) e hipótese alternativa (H_1), as quais são por definição mutuamente excludentes. Normalmente, o experimentador declara a sua suspeita inicial em H_0 e, por sequência, faz uma suposição contrária em H_1 . Se um certo conjunto de dados A parecem variar conforme uma distribuição normal, por exemplo, as hipóteses a serem incluídas em um teste de aderência são:

H_0 - O conjunto de dados A é proveniente de uma distribuição normal

H_1 - O conjunto de dados A não é proveniente de uma distribuição normal

Dado um intervalo de confiança alfa (α), a decisão de aceitar ou rejeitar H_0 depende da comparação do estatístico do teste de aderência realizado com os valores padronizados e publicados para o teste.

Dada a natureza das observações deste trabalho, escolheu-se utilizar o teste de Kolmogorov–Smirnov (KS) para determinar as funções de probabilidade mais adequadas para cada fonte de energia de GD. O teste KS é não paramétrico e compara amostras distribuições de frequências empíricas com distribuições teóricas com a finalidade de atestar se são iguais ou distintas e apresenta como vantagens não exigir que nenhuma consideração sobre a normalidade dos dados seja assumida pois independem da maneira da forma da população das quais as amostras foram obtidas. Adicionalmente, o estatístico do teste é facilmente calculável e não há restrições formais para os tamanhos das amostras.

Os procedimentos para realizar um teste KS para são os seguintes:

- Reorganização dos dados amostrados em ordem crescente
- Determinação dos desvios absolutos de acordo com a expressão:

$$\epsilon_i = |FEi - FOi|,$$

de maneira que FEi (frequência acumulada esperada) e FOi (frequência acumulada observada) correspondem às probabilidades de que a variável aleatória em análise seja menor ou igual ao dado i . A probabilidade FEi é calculada a partir da equação de distribuição de probabilidade teórica em hipótese e $FOi = i / n$.

- Cálculo do estatístico do teste dado por: $D = \max |FEi - FOi|$
- Determina-se, então, o estatístico de tabelado D^α .

- Avaliação das hipóteses: se $D < D^\alpha$, aceita-se H_0 . Caso contrário, rejeita-se H_0 .

Embora a decisão do teste é dada em função da comparação entre D e D^α , no pacote computacional empregado para os testes de ajustes usa o chamado valor p (valor descritivo do teste) realizar as inferências sobre os testes de aderência. O valor p representa a probabilidade de obter-se o valor de estatístico do teste tão grande quanto aquele que é obtido quando H_0 é verdadeira (TRIOLA, 2009). Com consequência, H_0 aceita-se se $p > \alpha$ e rejeita-se caso ocorra o contrário.

3.3 Modelo Probabilístico para Fontes Fotovoltaicas

Localizado na sua maior parte na região intertropical, o Brasil possui elevada disponibilidade do recurso solar em seu território na maior parte do ano, o que permite o desenvolvimento de regiões onde o custo da eletrificação convencional ainda é elevado (ANEEL, 2008b; GALDINO, 2012). A tecnologia das células fotovoltaicas vem evoluindo ao passar dos anos, atualmente pode-se encontrar células testadas em laboratório com eficiência de conversão de energia de até 26,3% (IEEE, 2017). Células solares convertem energia solar em energia elétrica por meio do efeito fotoelétrico: a excitação da radiação solar nas placas fotovoltaicas provoca a ejeção de elétrons confinado em uma junção pn, provocando uma diferença de potencial entre os 2 terminais da junção pn (ANEEL, 2008b). Ou seja, a partir da irradiação solar presente na forma de irradiação solar, é possível obter energia elétrica por meio de SFV, os quais tem como principais componentes os módulos fotovoltaicos e os inversores de potência.

Com as recentes atualizações no OpenDSS, foi incluído um modelo acurado para geradores fotovoltaicos no inventário de fontes de energia a serem utilizadas no programa, representado na figura 8. Esse modelo é facilmente personalizável, inclusive devido à característica de código aberto do OpenDSS. As variáveis a serem declaradas para a constituição do modelo são: irradiância base (irradiância máxima no período de análise), curva de irradiação em análise (podendo ser diárias, anuais ou sob um regime específico), temperatura ambiente base, curva de temperatura (ponto de máxima potência versus temperatura), conexão da instalação da fonte (delta ou estrela), tensão de base, fator de potência, curvas de potência (potência versus temperatura) e de eficiência (eficiência versus potência) (DUGAN,

2011). A modelagem probabilística desenvolvida neste projeto para uma unidade geradora fotovoltaica considera a irradiância solar (W/m^2) como variável aleatória a ser simulada em um regime horário ao longo de 24 horas.

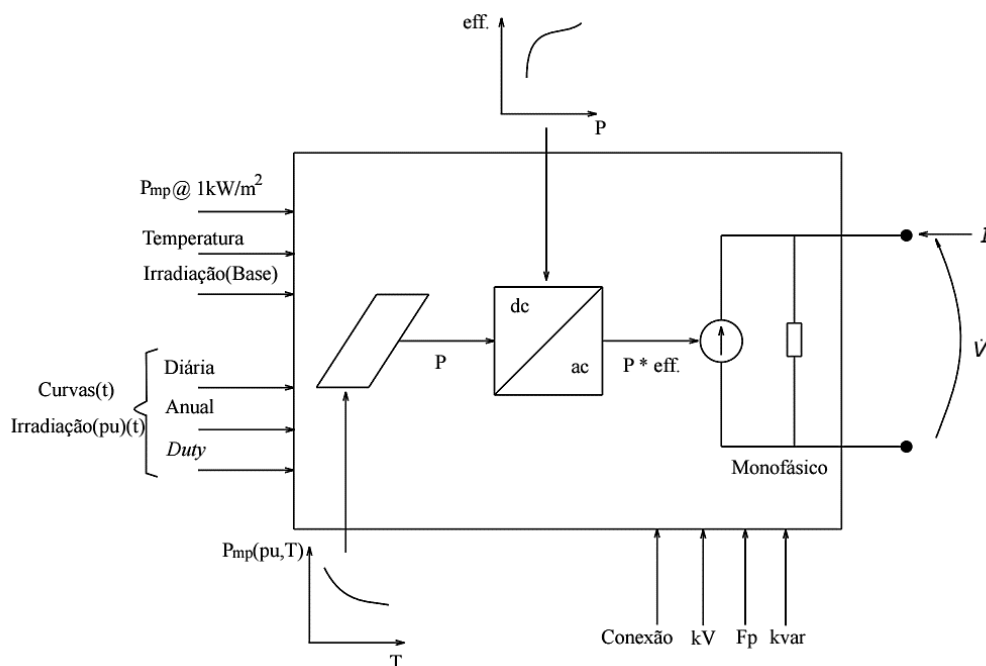


Figura 8 Representação de um sistema FV implementado no OpenDSS.

Com o modelo pré definido de um unidade geradora fotovoltaica, os valores obtidos das SMC serão inseridos no modelo do OpenDSS para obter-se a potência elétrica injetada no SDEE ao longo de 24 horas.

Os valores de irradiância solar utilizados no teste KS foram obtidos através de amostras da estação meteorológica localizada na micro usina fotovoltaica da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computação (EMC) da Universidade Federal de Goiás (UFG). Foram amostradas as irradiâncias horárias durante 24 horas em um dia típico de verão (1º de março de 2016), as quais mostraram média aritmética de $22,528 \text{ kW/m}^2$ e desvio padrão de $404,450 \text{ kW/m}^2$. As características físicas do sistema fotovoltaico simulado é um sistema fotovoltaico trifásico com tensão de $0,38 \text{ kV}$, potência nominal do inversor variável entre $400 - 850 \text{ kVA}$, dependendo do sistema, e fator de potência unitário, potência nominal do painel de kW para 25°C e irradiância nominal de $1,4 \text{ kW/m}^2$

Dentre as distribuições de probabilidade, a que melhor representou a distribuição das irradiâncias solares foi a distribuição de Weibull. Utilizando-se do

teste KS para uma amostra e com nível de significância (alfa) de 5%, foram avaliadas as seguintes hipóteses:

H_0 – As amostras de irradiância solar representam uma distribuição de Weibull

H_1 - As amostras de irradiância solar não representam uma distribuição de Weibull

Como os valores de p para a amostra são maiores do que 0,05 (5%), é possível afirmar que não há evidências suficientes para refutar a hipótese H_0 . Logo, as amostras de irradiância solar amostradas não diferem estatisticamente daquelas provenientes de uma distribuição de Weibull à um nível de significância de 5%. Na tabela abaixo, dispõem-se os resultados do teste, incluindo o valor p , fatores de forma (Fator 1) e de escala (Fator 2) para cada amostra analisada.

Tabela 3 - Resultado do Teste KS para as amostras de irradiação solar

	Valor p	Fator 1	Fator 2
Dia Típico de Verão	0,0670	61,7267	0,4242

3.4 Modelo Probabilístico para Fontes Eólicas

Dentre as energias renováveis, a energia eólica compõe 4,7% da Oferta Interna de Energia Elétrica, composto por 316 usinas instaladas no país, sendo o estado do Rio Grande do Norte o de maior proporção (34,5%). Um gerador eólico transforma a energia cinética presente no vento em energia elétrica ao provocar o giro das hélices do rotor (ANEEL, 2008b). Nesse sentido, portanto, para obter-se a representação probabilística da potência gerada por um gerador eólico, é necessário modelar a velocidade do vento através de uma função densidade de probabilidade.

A modelagem probabilística desenvolvida neste projeto para uma unidade geradora eólica considera a velocidade do vento (m^2/s) como variável aleatória a ser simulada em um regime horário ao longo de 24 horas. Até a sua versão mais recente, o OpenDSS não traz um modelo pré definido para uma fonte de energia eólica, ao contrário do que é verificado para as unidades fotovoltaicas. Não obstante, é proposta uma modelagem própria na relação da velocidade do vento e potência elétrica injetada no sistema. É conhecido que a potência elétrica gerada por uma

turbina eólica depende da velocidade do vento, v , com potenciação de terceira ordem, sendo representada através da seguinte equação (WEG,2013):

$$P = \frac{1}{2} \pi C_p \gamma R^2 v^3 \eta$$

Na equação acima, η é a eficiência do gerador, considerada como 0,90. A parcela C_p representa o coeficiente aerodinâmico de potência do rotor, usualmente avaliado em 0,45. A massa específica do ar γ é considerada homogênea e com valor de 1,225kg /m³. O termo R é o raio do rotor da turbina, em metros, usualmente na ordem de grandeza de 28 m em geradores de até 1 MW. Os valores obtidos das simulações de Monte Carlo serão inseridos no modelo do OpenDSS para obter-se a potência elétrica injetada no SDEE ao longo de 24 horas.

As amostras de valores de velocidade dos ventos que são utilizadas no teste KS foram obtidas através da estação meteorológica localizada na usina fotovoltaica da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computação (EMC) da Universidade Federal de Goiás (UFG). Foram amostradas as velocidades durante 24 horas em um dia típico de verão (1º de março de 2016). As amostras obtidas foram analisadas e apresentaram uma média de velocidade de vento igual a 0,99 m/s e desvio padrão 1,831 m/s, insuficientes para garantir viabilidade energética de uma unidade geradora baseada em energia eólica na localidade da estação meteorológica, pois a maioria dos geradores eólicos utilizados são projetados para entregar potência nominal com velocidades do vento a partir de 10m/s (MARTINS, 2012). Portanto, para os fins do estudo probabilístico proposto, as observações de velocidade amostradas foram ajustadas proporcionalmente até que a média das observações alcançasse 10m/s. As características elétricas da fonte eólica são: tensão nominal de 0,38 kV, potência nominal variável entre 400 - 850 kW de acordo com o sistema em estudo, e fator de potência unitário.

Utilizando-se do teste KS para uma amostra e com nível de significância de 5%, são avaliadas as seguintes hipóteses:

H_0 – As amostras de velocidades eólicas representam uma distribuição de Weibull

H_1 - As amostras de velocidades eólicas não representam uma distribuição de Weibull

Como os valores de p para a amostra foram maiores do que 5%, afirma-se que não há evidências suficientes para refutar a hipótese H_0 . Logo, as amostras de velocidades eólicas não diferem estatisticamente daquelas provenientes de uma distribuição de Weibull a um nível de significância de 5%. Na tabela abaixo, dispõem-se os resultados do teste, incluindo o valor p , fatores de forma (Fator 1) e de escala (Fator 2) os quais são usados no cálculo da função de Weibull.

Tabela 4 - Resultados do Teste KS para a amostras de velocidade dos ventos

	Valor p	Fator 1	Fator 2
Dia Típico de Verão	0,4128	2,3078	0,8472

3.5 Modelos Probabilísticos para Fontes Hidráulicas

Dado o elevado potencial hídrico no Brasil, a fonte de energia hídrica figura como a mais representativa na matriz energética nacional. Nesse sentido, dentre as diversas classificações de usinas hidrelétricas, Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH) são aquelas com potência instalada menor do que 30 MW 50 MW, enquanto que as Pequenas Centrais Geradoras Hidrelétricas (PCH) são unidades de aproveitamento de um potencial hidráulico com potência instalada entre 3 MW e 30 MW (ANEEL, 2015). O fluxo empreendido pelas águas ao giram os rotores dos geradores localizados nas usinas hidrelétricas, provocando a conversão de energia elétrica. Logo, para obter a representação probabilística da potência gerada por uma PCH é necessária a modelagem estatística da vazão (m^3/s). A modelagem probabilística desenvolvida neste projeto para PCH considera a vazão da água como a variável aleatória a ser simulada em um regime horário ao longo de 24 horas. Sendo uma fonte renovável fora do escopo do desenvolvimento do programa, o OpenDSS não oferece um modelo pré definido para uma nenhuma central elétrica. É proposto, então, um modelo que relacione a vazão de um rio e a potência elétrica gerada por uma PCH localizada no mesmo afluente calculada pela seguinte expressão (SANTOS, 2002):

$$P = Q g H \rho \eta$$

P é a potência elétrica gerada pela PCH, em W. η é o rendimento total do aproveitamento hidrelétrico do processo de conversão. ρ representa a densidade da água (kg/m^3), g é a aceleração da gravidade, utilizada como uma constante igual a $9,8 \text{ m/s}^2$. Q é a vazão volumétrica do afluente (m^3/s). H é a altura da barragem da PCH, medida em metros. Para a executar a simulação, o rendimento total foi considerado como 0,90 comumente encontrado em usinas hidrelétricas. A densidade da água é considerada constante e equivalente a 1000 kg m^3 . A altura da barragem da PCH utilizada foi de 10m. As características elétricas do sistema hidrelétrico simulado é tensão de 0,64 kV, potência nominal do 850 MW e fator de potência unitário.

As amostras de valores de vazão volumétrica que são utilizadas no teste KS foram obtidas através da estação de medição hidrológica da Agência Nacional de Águas (ANA). A estação escolhida é a Jataí Montante 1, no município de Perolândia, estado de Goiás. As medições de vazão volumétrica são referentes ao Rio Claro, afluente do Rio Paranaíba, parte da bacia hidrográfica Paraná. Para avaliar o regime hidrológico, foram amostradas as vazões do afluente em um dia para as simulações, sendo um dia típico de verão (1º de março de 2016).

Utilizando-se do teste KS para uma amostra e com nível de significância de 5%, são avaliadas as seguintes hipóteses:

H_0 – As amostras de vazão hídrica representam uma distribuição de Weibull

H_1 - As amostras de vazão hídrica não representam uma distribuição de Weibull

Com os valores de p para cada mostra maiores do que 5%, é possível afirmar que não há evidências suficientes para refutar a hipótese H_0 . Logo, as amostras de vazão hídrica não diferem estatisticamente daquelas provenientes de uma distribuição de Weibull a um nível de significância de 5%. Na tabela abaixo, dispõem-se os resultados do teste, incluindo o valor p , fatores de forma (Fator 1) e de escala (Fator 2) os quais são usados no cálculo da função de Weibull.

Tabela 5 - Resultados do Teste KS para a amostras de vazão hídrica

	Valor p	Fator 1	Fator 2
Dia Típico de Verão	0,2251	22,8143	38,7094

CAPÍTULO 4 – TESTES E RESULTADOS

4.1 Metodologia dos Testes

A metodologia desenvolvida nos capítulos anteriores é testada primeiramente a seguir com SDEE desenvolvidos pela IEEE. Em seguida, a mesma metodologia é utilizada para um sistema de distribuição real. Os algoritmos que analisam os resultados obtidos das simulações realizadas no OpenDSS foram programados na linguagem MATLAB, os quais reúnem 10 rotinas de execução e mais de 2000 linhas de código. Para a execução do teste KS e de funções de probabilidade, foi utilizado o pacote adicional *Statistics and Machine Learning Toolbox™*, de próprio desenvolvimento da MathWorks™. Resumidamente, os seguintes procedimentos são utilizados na análise dos sistemas de distribuição neste trabalho:

- 1- Criação da interface COM no ambiente MATLAB e conexão com o OpenDSS
- 2- Execução do fluxo de carga determinístico no circuito analisado em sua configuração original para a obtenção dos valores das grandezas que serão usadas para a elaboração do caso Base, isto é, referência para os outros casos
- 3- Execução do fluxo de carga probabilístico no circuito analisado com as configurações personalizadas. Nesta etapa ocorre a:
 - 3.1 – Alocação aleatória dos perfis de consumo (residencial, comercial e industrial) para as cargas do SDEE
 - 3.2 – Adição das unidades de GD (eólica, fotovoltaica ou/e hidráulica) no circuito original
 - 3.3 – Execução da simulação de Monte Carlo por 100 interações para a obtenção dos valores das variáveis aleatórias de cada modalidade de fonte GD (irradiância solar, velocidade eólica ou vazão hídrica)
 - 3.4 - Solução do circuito durante 100 vezes por meio do fluxo de carga com os valores de potência geradas pelas unidades de GD adicionada em 3.2 e perfis de consumo em 3.1
 - 3.5 - Obtenção variáveis de interesse para a interpretação de resultados

O processo completo é apresentado a seguir no fluxograma (figura 9).

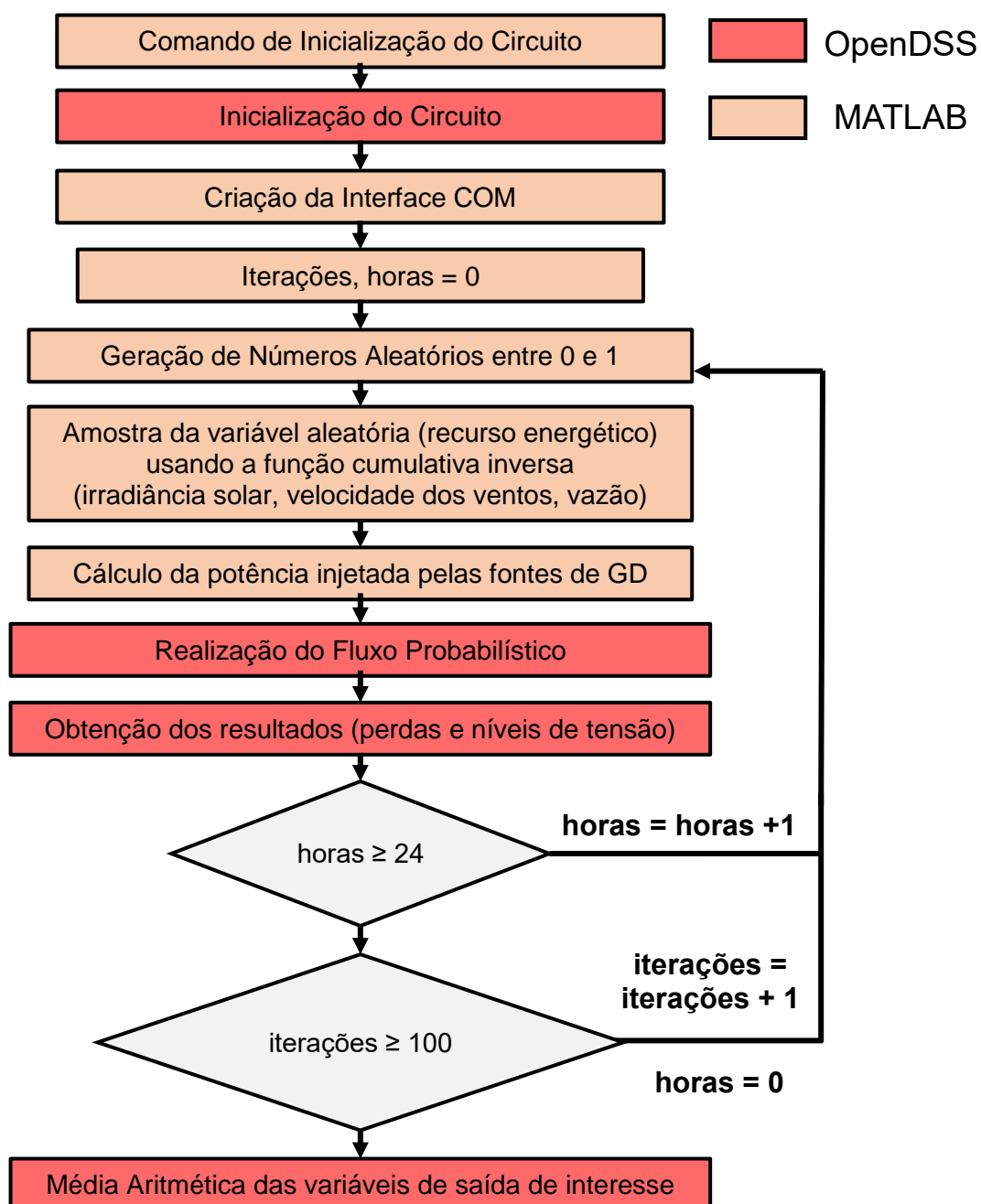


Figura 9 Fluxograma com as principais etapas da SMC no OpenDSS e MATLAB

Para as avaliações do efeito da GD sob as perdas técnicas de potência ativa em SDDE, os circuitos testados são resolvidos primeiramente através do fluxo de carga padrão do OpenDSS em plenas configurações originais, isto é, sem a adição de nenhuma unidade de GD. Assim, a simulação utilizada desenvolve-se em regime diário com resolução horária, visando obter o valor perdas ativas no sistema em 1 dia. Com o emprego da SMC são obtidos 100 valores de valores de perdas ativas diárias em um sistema de distribuição, sendo que os valores de perdas diárias utilizados para a análise e interpretação dos resultados consistem na média aritmética de todos aqueles obtidos das simulações.

As potências nominais para cada fonte de GD foram determinadas no sentido de garantir a penetração de 20% da potência diária injetada pelas unidades de GD no sistema. Em outras palavras, em todas as 100 iterações as potências injetadas pelas unidades de GD deve representar no máximo 20% da potência diárias proveniente da subestação.

Para assegurar maior fidelidade nas simulações, valores de irradiância solar superiores que aproximadamente a constante solar ($1367 \pm 20 \text{ W/m}^2$) foram substituídos pelo valor máximo de irradiância no dia usado para análise. Semelhantemente, valores de velocidade de ventos maiores do que 15 m/s, o máximo suportado pelo modelo do aerogerador proposto, foram substituídos pela máxima velocidade eólica que o aerogerador opera com segurança (15 m/s).

Acerca do consumo das unidades consumidoras, utilizaram-se 3 perfis típicos de consumo: residencial, comercial e industrial. Cada tipo de consumidor possui comportamentos de carga e picos de demanda característicos e são apresentados na tabela 6 e na figura 10.

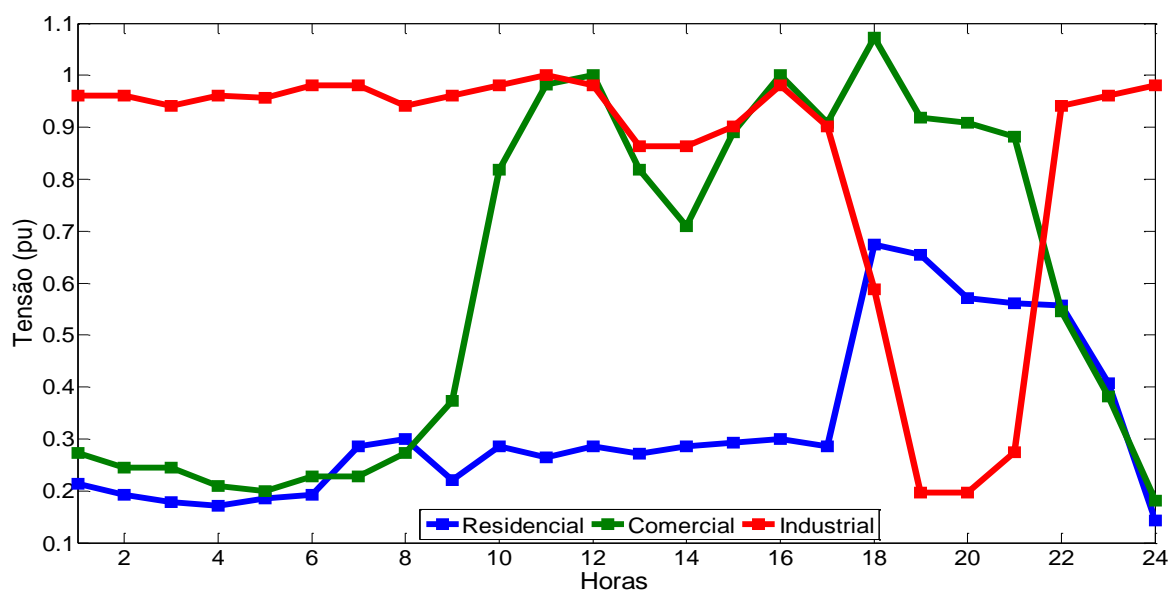


Figura 10 - Representação gráfica dos perfis de consumo típicos utilizados

Para cada sistema analisado, os perfis de consumo foram alocados aleatoriamente em todos os pontos de carga presentes no sistema. Na curva de carga com características residenciais existe um aumento significativo de consumo entre as 18h e 21h, quando começa a diminuir, mantendo-se baixa durante a madrugada e praticamente constante durante o dia. Já os consumidores comerciais podem ser caracterizados pelo grande aumento de consumo por volta das 08h, mantendo-o moderadamente constante com leve redução por volta das 12h,

apresentando um pico no início do horário de ponta. Os consumidores industriais podem ser classificados tanto por ramo de atividade quanto por faixa de consumo ou nível de tensão de fornecimento, representados pelo consumo elevado e constante durante as 24 horas do dia.

Tabela 6 Perfis de consumo típicos utilizados (valores em pu).

Hora	Perfil		
	Residencial	Comercial	Industrial
1	0,21428	0,27272	0,96078
2	0,19285	0,24545	0,96078
3	0,17857	0,24545	0,94117
4	0,17142	0,20909	0,96078
5	0,18571	0,2	0,95686
6	0,19285	0,22727	0,98039
7	0,28571	0,22727	0,98039
8	0,3	0,27272	0,94117
9	0,22142	0,37272	0,96078
10	0,28571	0,81818	0,98039
11	0,26428	0,98181	1
11	0,28571	1	0,98039
12	0,27142	0,81818	0,86274
13	0,28571	0,70909	0,86274
14	0,29285	0,89090	0,90196
15	0,3	1	0,98039
16	0,28571	0,90909	0,90196
17	0,67428	1,07272	0,58823
18	0,65428	0,91818	0,19607
19	0,57142	0,90909	0,19607
20	0,56142	0,88181	0,27451
21	0,55714	0,54545	0,94117
22	0,40714	0,38181	0,96078
23	0,14285	0,18181	0,98039
24	0,21428	0,27272	0,96078

Fonte: Adaptado de QUEIROZ, 2013, p. 43

Afim de compreender melhor a como o comportamento da potência entregue pelas fontes de GD aos sistemas, apresenta-se a seguir o perfil de potência média diária gerada por cada fonte de GD ao longo de 100 iterações. Para uniformizar a análise, todas as fontes foram simuladas assumindo uma potência nominal a 700 kW.

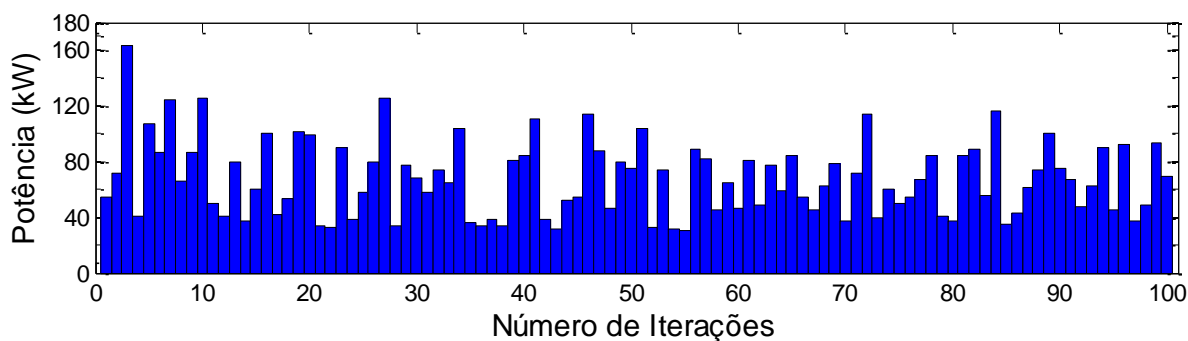


Figura 11 - Potência Média Diária Fornecida por uma fonte eólica durante 100 iterações

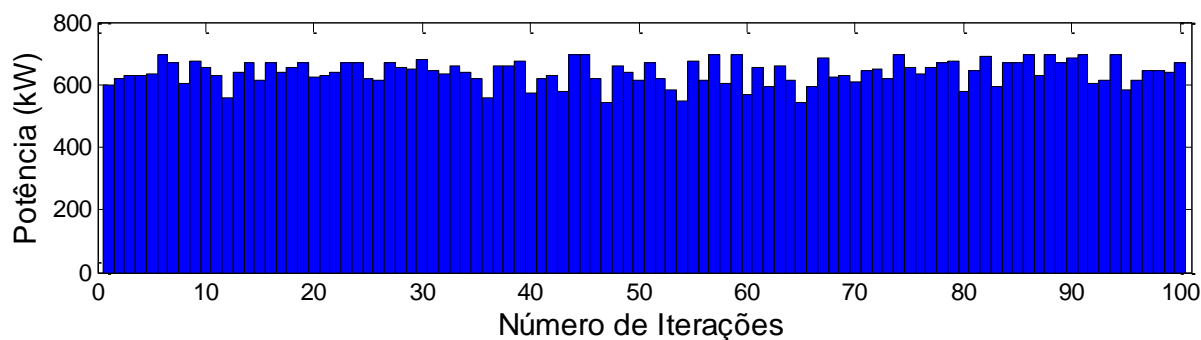


Figura 10 - Potência Média Diária Fornecida por uma fonte PV durante 100 iterações

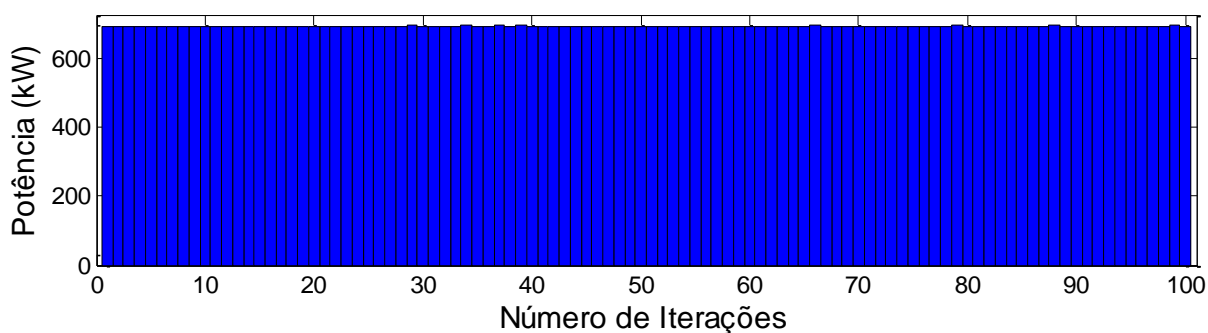


Figura 11 - Potência Média Diária Fornecida por uma fonte hidráulica durante 100 iterações

A potência injetada pela fonte hidráulica, figura 11, diferencia-se das demais por ser muito mais firme, isto é, sofre poucas alterações ao longo das iterações e aproxima-se ao valor nominal de 700 kW. A série de amostras analisadas da potência entregue por uma fonte hidráulica apresentou média aritmética e desvio padrão de $695,3430 \pm 1,4082$ kW, evidenciando, então, a menor intermitência para a

fonte hidráulica. Em seguida, as amostras de potência entregue pela fonte FV, figura 10, apresentaram como valor de média aritmética de 639,1343 kW e desvio padrão de 38,3384 kW, o maior desvio padrão dos 3 casos, isso pois os valores de irradiância solar sofrem alterações significativas ao longo de um dia devido a efeitos externos como sombreamento e mudança de temperatura. Por fim, a fonte eólica, figura 9, apresenta a menor potência injetada média na entrega de potência 67,6342 kW e desvio padrão de 27,076 kW. Essa estimativa aponta mais uma vez a baixa viabilidade do local de coleta de dados para a instalação de centrais eólicas de energia, uma vez que, em média, o valor de potência média entregue pela fonte eólica não alcança nem 10% do valor nominal de potência dos aerogeradores utilizados.

Objetivou-se também obter os perfis de tensão das barras da SDEE para avaliar as alterações provocadas pela adição de unidades de GD. Para a análise de níveis de tensão, são consideradas as especificações do módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) da ANEEL, como é resumido na tabela abaixo.

Tabela 7 Pontos de conexão em Tensão Nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV.
Adaptado de ANEEL (2014)

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$0,93 \text{ TR} \leq \text{TL} \leq 1,05 \text{ TR}$
Precária	$0,90 \text{ TR} \leq \text{TL} < 0,93 \text{ TR}$
Crítica	$\text{TL} < 0,90 \text{ TR}$ ou $\text{TL} > 1,05 \text{ TR}$

4.2 Sistema de Distribuição IEEE - 4

Embora o SDEE de teste de 4 barras não tenha sido publicado oficialmente juntamente com os demais no artigo original em 1992, ele foi desenvolvido também pela Sociedade de Potência e Energia do IEEE em 1991 e figura como o SDEE mais simples utilizado para simulações em Distribuição de Energia Elétrica. Trata-se de um circuito fictício, trifásico equilibrado, em configuração radial, com 4 barras, 2 linhas de transmissão aéreas, um transformador abaixador 12,47 kV - 4,16 kV e uma carga concentrada ao final da rede, ilustrado conforme figura 12. Demais informações detalhadas sobre esse sistema podem ser encontradas em Kersting (2012), bem como no banco de dados do IEEE. A sua simplicidade permite testes

que envolvam todas as diferentes conexões de transformadores trifásicos, bem como circuitos com cargas desequilibradas e estudos de faltas ao longo do sistema.

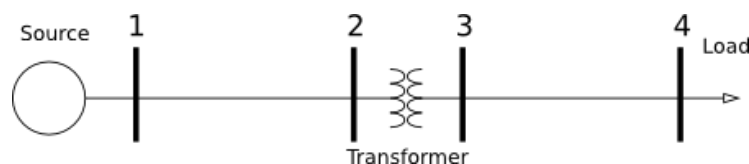


Figura 12 Sistema de Distribuição de Teste IEEE-4

Com base na metodologia exposta na seção anterior, foram elencados 4 casos para ser simulados:

Caso 1 – Caso Base, sem nenhuma alteração

Caso 2 - Adição de uma unidade de GD eólica à barra 4

Caso 3 - Adição de uma unidade de GD PV à barra 4

Caso 4 - Adição de uma unidade de GD hidráulica na à barra 4

Como há apenas 1 carga nesse sistema de distribuição, não se justifica a adição do que mais de 1 unidade de GD nas simulações, conforme os critérios de penetração de GD estabelecidos na seção “Metodologia dos Testes”. A conexão entre as fontes geradoras nos casos mencionados ao sistema ocorre por meio de um transformador trifásico, 0,64 kV - 4,16 kV, 1000 kVA, com impedância de dispersão de 5.75Ω , e conexão $\Delta - Y$. As três unidades de GD adicionadas contam com potência nominal trifásica de 800 kVA, tensão nominal trifásica de 0,38 kV e fator de potência unitário.

As simulações realizadas trazem os resultados esperados: a inserção de unidades de diferentes fontes de energia primárias de GD altera o fluxo de potência do SDEE, provocando assim a redução das perdas de potência ativa no sistema testado em proporções também diferentes. Analiticamente, a conexão de unidades de GD nas proximidades de maior demanda de carga, isto é, próximo à barra 4, causa a elevação das tensões em todas as barras próximas à nova fonte de geração, pois parte da potência demandada pela carga agora é ofertada pela fonte de GD.

A partir diminuição das perdas no circuito em diferentes proporções para cada caso simulado, conforme a figura 13, tornam-se claras a variabilidade e intermitência do fornecimento de energia por parte de unidades de GD. Em termos percentuais, a inserção de uma fonte eólica reduziu as perdas de potência ativa no sistema 1,839 % em relação ao Caso 1, a menor redução entre o restante dos casos.

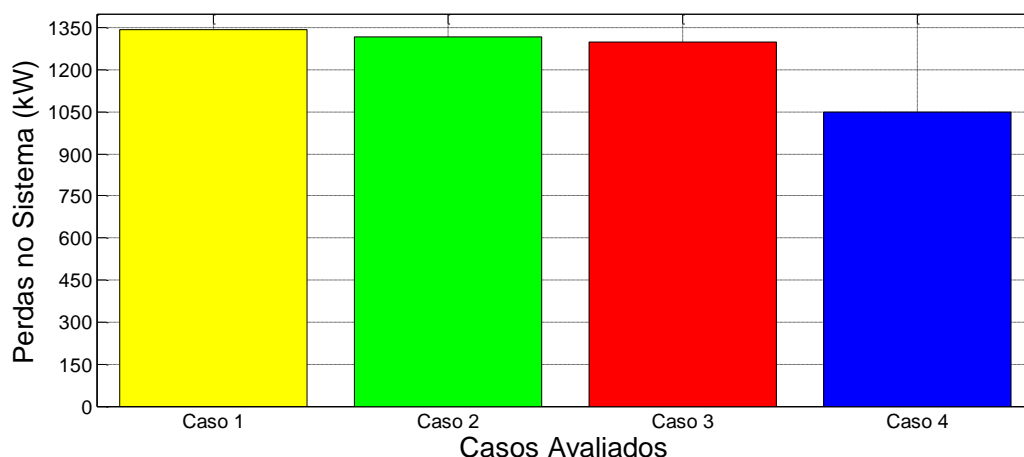


Figura 13 - Perdas médias de potência diária para cada caso

Essa observação pode ser justificada por meio da variação da velocidade dos ventos, indispensável para o funcionamento dos aerogeradores. Ao longo de 24 horas os valores de velocidade eólica sofrem elevadas alterações. No conjunto de dados utilizado, os valores de velocidade de vento têm como média aritmética de 10,54 m/s e desvio padrão de 7,32 m/s. Como consequência, a potência nominal da unidade de GD eólica não é entregue integralmente na maior parte das 24 horas, como foi explicitado anteriormente na figura 9, e por isso, a potência diária injetada pela GD apresenta também elevadas variações.

Já o Caso 3 apresenta uma diminuição de 3,238% de perdas no sistema em relação ao Caso base, isto pois já que a variação de irradiação solar ao longo de um dia provoca menores alterações na potência entregue por unidade de GD FV do que a do caso anterior. Com isso, ao longo das 100 iterações conduzidas, em algumas a potência injetada pelo SFV chega a valores próximos da potência nominal da fonte.

Por fim, o Caso 4 é aquele que proporcionou maior redução de potências ativas no SDEE (21,778%). Na unidade hidrelétrica, o perfil de vazão hídrica analisado tem desvio padrão de apenas 0,588 m³/s. Dessa forma, maior parte da potência nominal de unidade de GD pôde ser entregue ao sistema, causando assim o menor índice de perdas no SDEE testado quando comparado ao Caso 1.

4.3 Sistema de Distribuição IEEE - 34

O sistema IEEE-34 é uma adaptação de um sistema real encontrado na cidade de Arizona, nos Estados Unidos. A operação do sistema ocorre sob a tensão nominal de 24,9 kV na maioria das barras e 4,16 kV em uma única barra. Esse sistema é principalmente caracterizado por ser extenso, trifásico desequilibrado,

agrupa dois reguladores de tensão para manter perfis de tensão adequados, capacitores em *shunt* para compensação de reativos, além de carregamento concentrado nas extremidades e carregamento distribuído na porção central do sistema. Sua topologia é mostrada na figura 14. Informações detalhadas sobre esse sistema podem ser encontradas em Kersting (2001), incluído no banco de dados do IEEE. Diante da adição de unidades de GD, das quais espera-se melhorias no perfil de tensão no circuito, os 2 reguladores de tensão presentes no IEEE-34 são removidos para o desenvolvimento das simulações

Considerando a maior complexidade do sistema IEEE-34 em relação ao IEEE-4, são elencados 5 casos para ser simulados:

Caso 1 – Caso Base, sem nenhuma alteração

Caso 2 - Adição de 2 unidades de GD fotovoltaica nas barras 832 e 852, ambas com injeção equilibrada de potência

Caso 3 - Adição de 2 unidades de GD, uma eólica e uma hidráulica, nas barras 852 e 832, ambas com injeção equilibrada de potência

Caso 4 - Adição de 2 unidades de GD, uma eólica na barra 832, com carga equilibrada, e uma fotovoltaica na barra 852, com injeção desequilibrada de potência

Caso 5 - Adição de 3 unidades de GD, uma eólica e hidráulica nas barras 832 e 852, ambas com carga equilibrada, e uma fotovoltaica na barra 854, com injeção equilibrada de potência

A conexão entre as fontes geradoras nos casos mencionados ao sistema ocorre por meio de um transformador trifásico, 0,64 kV - 24,9 kV, com potência nominal entre 350 e 1000 kVA, conforme cada caso, com impedância de dispersão de 5.75Ω , e conexão Δ - Y.

A escolha dos barramentos a serem utilizados baseou-se em localizações com maior concentração de carga e que, portanto, permitiriam a maior distribuição da potência injetada pelas unidades de GD alocadas, sendo as barras 832, 852, e 854 elencadas para a alocação de GD.

As unidades de GD adicionadas contam com potências nominais dispostas na tabela 8. Destaca-se que nos casos 4 e 5 as fontes FV injetam potência no sistema com diferentes potências por fase tendo em vista atender as cargas desbalanceadas 852 e 854.

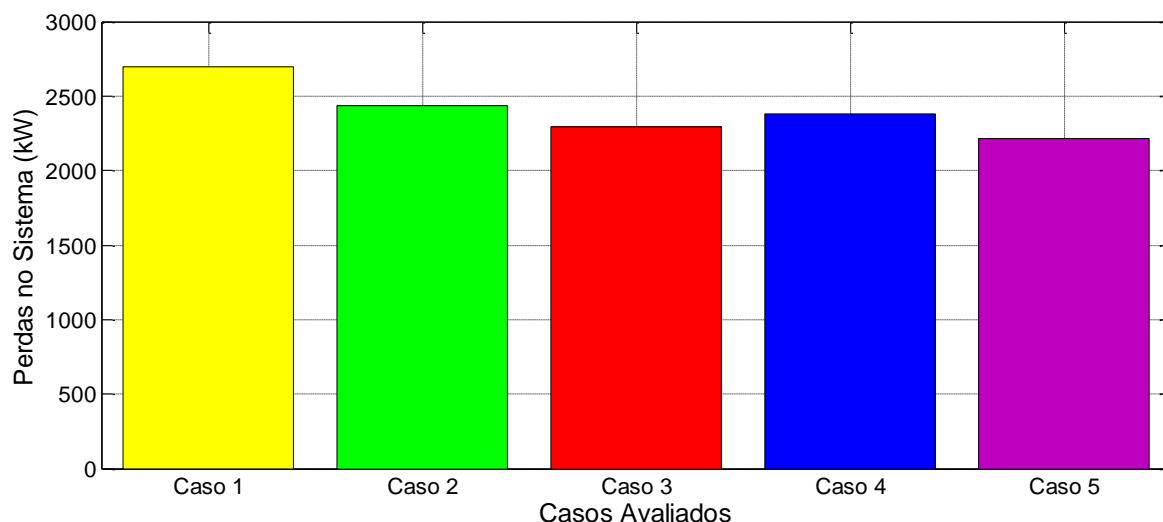


Figura 15 - Perdas médias de potência diária para cada caso

Considerando-se que o IEEE-34 é um sistema desequilibrado, a análise de tensões por fase em cada barramento faz-se necessária e é apresentada nas figuras 16, 17 e 18. Para definir os perfis de tensão, os valores de tensão de cada fase foram obtidos através da média aritmética entre os 100 valores de cada tensão obtida nas iterações das SMC. Assim, os valores médios de tensão por fase são utilizados nos perfis de tensão.

Um aspecto relevante que pode ser observado nos resultados é que à medida que as barras se distanciam da subestação, isto é, da barra 1, as tensões médias são reduzidas de 1,05 pu até valores próximos de 0,87 pu. A barra com menor tensão em cada fase foi a barra 31 (fases A e B) e 27 (fase C), um fenômeno verificado em todos os casos analisados. No Caso 1, a tensão naquela barra assumia o valor médio de 0,8711 pu referenciado à fase A. Com o desenvolvimento dos casos, esse valor foi elevado a um valor máximo de 0,8854 pu no Caso 5, representando um aumento de aproximadamente 1,43%, o maior aumento de tensão naquela barra quando comparado ao restante dos casos. Essa constatação aponta a necessidade de maiores ações de correção de tensão naquela barra, a qual pode ser alcançada com a adição de mais uma fonte de GD em suas proximidades.

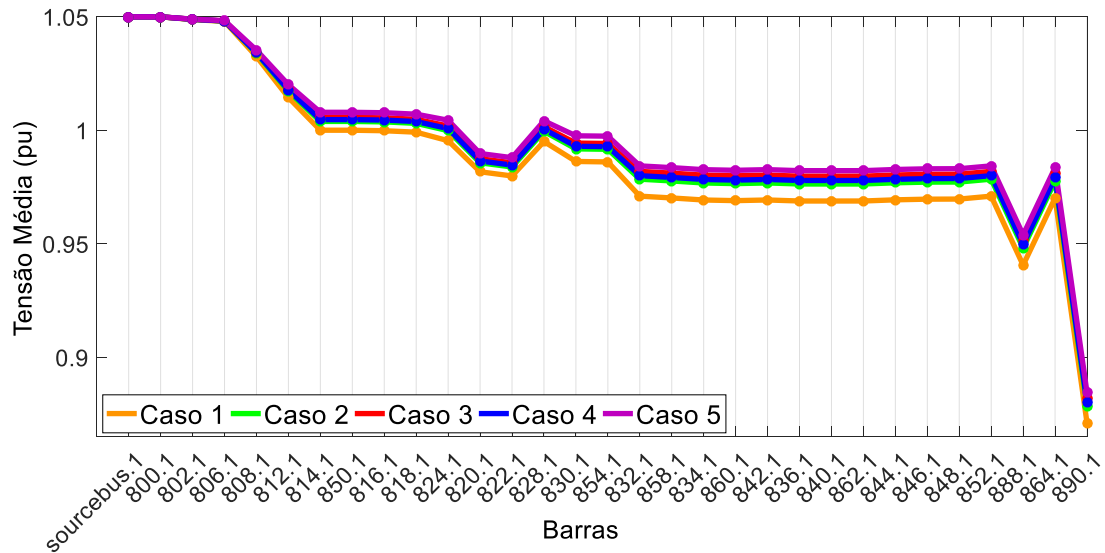


Figura 16 - Perfil de Tensões Médias para a fase A - IEEE - 34

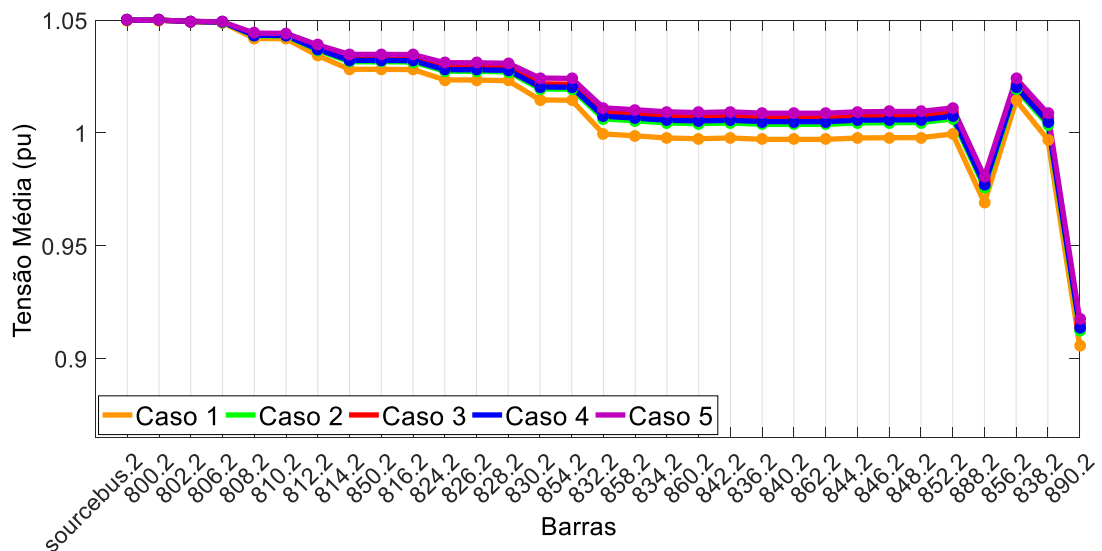


Figura 17 - Perfil de Tensões Médias para a fase B - IEEE - 34

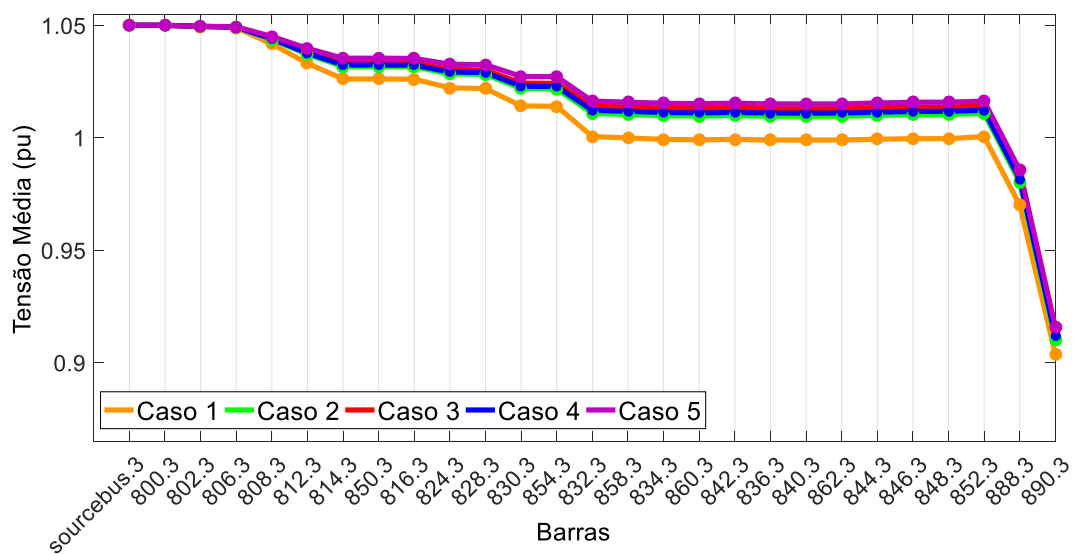


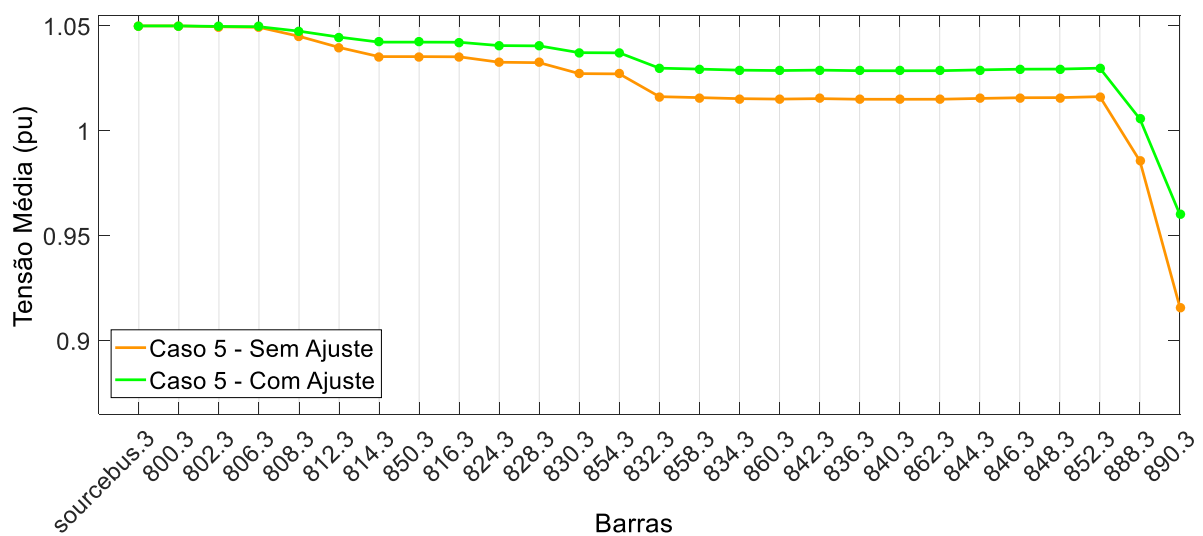
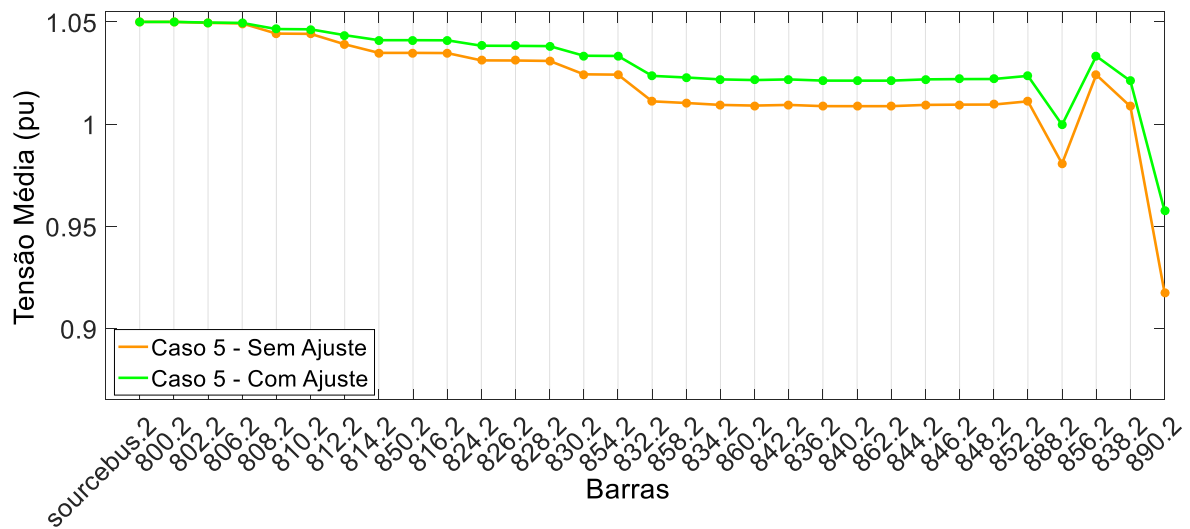
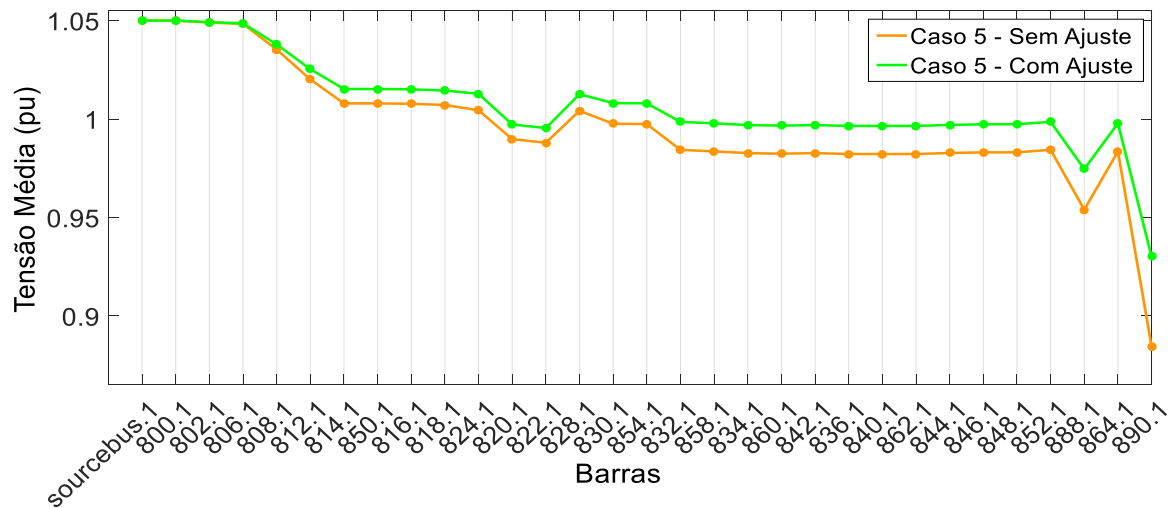
Figura 18 - Perfil de Tensões Médias para a fase C - IEEE - 34

Por outro lado, é observado um perfil de tensão praticamente constante ao longo das barras entre barras 832 e 848, as quais há carregamento distribuído. Enquanto que no Caso 1 referenciado para a fase A (a fase com o menor valor de tensão para essas barras) o valor médio de tensão no trecho foi de 0,9669 pu, no Caso 5 essas mesmas 12 barras foram elevadas para um valor médio de 0,9828 pu, uma variação aproximadamente uniforme de 1,59%. Nas fases B e C, essa mesma série de 12 barras apresentou um valor médio de 0,9988 pu e foram elevadas para 1,012 pu, um aumento de 1,32%.

Tendo em vista que o Caso 5 foi aquele com melhor desempenho quando comparado ao caso base, é conveniente analisá-lo com mais atenção sob o ponto de vista de variações de tensão médias nas barras mais precárias. Foi selecionada a barra 890 para análise pois nela ocorreram tensões abaixo de 0,93 pu, o limite entre o nível de tensão de atendimento adequado e precário pelas regulações da ANEEL. Em 100 iterações realizadas, 67,74% (fase A), 67,74% (fase B), 77,78% (fase C) das tensões obtidas por simulação na barra 890 encontram-se abaixo do limite da tensão de atendimento adequada.

Com isso, a análise dos perfis de tensão mostra um afundamento de tensão no barramento 890 com valor de tensão abaixo de 0,93 pu para as três fases analisadas e para todos os casos. Ao verificar a alocação de cargas do sistema, verifica-se que a carga concentrada na barra 890 é de 450,0 kW e 225,0 kVAR, a segunda mais elevada de todo o sistema. Propõe-se, portanto, a adição de uma unidade de GD naquela barra afim de melhorar a tensão naquele barramento e elevá-lo a um valor aceitável de tensão. Então, a barra 890 foi adicionada uma unidade de GD FV de potência nominal 790 kVA e fator de potência unitário no sentido de corrigir essa anomalia.

Com a nova adição de GD à barra 890, é possível notar a melhoria de tensão naquela barra e em outras vizinhas nas 3 fases, conforme figuras 19, 20 e 21. Levando em consideração as 100 iterações, a tensão média da barra 890 foi elevada para um valor de 0,9302 pu, uma medida já dentro da faixa de tensão adequada preconizada pela ANEEL para o sistema. Depois do ajuste 41,94% (fase A), 38,71% (fase B) e 44,44% (fase C) das tensões médias obtidas por simulação na barra 890 encontram-se abaixo de 0,93 pu.



Como efeito adicional, as barras próximas também sofreram elevações de tensão. Na operação real desse mesmo sistema, a adição de reguladores de tensão, por exemplo, poderia ser empregada para elevar a tensão na barra 890. Não obstante, o foco do presente trabalho justificou a adição de uma unidade GD para corrigir a anomalia de tensão.

Por fim, não foi notada nenhuma anomalia ou instabilidade na operação do sistema, como valores de sobre tensão e perdas de potência maiores do que as do caso base em nenhum dos casos anteriores.

4.4 Sistema Real de Distribuição de 135 Barras

O sistema real 135 barras, trifásico desequilibrado, opera sob tensão nominal de 13,8 kV, com potência nominal de 7,065 MVA e localiza-se no estado de São Paulo e encontra-se representado na figura 22. Todos os alimentadores são aéreos e o circuito pode ter sua topologia reconfigurada por meio das chaves 17 chaves seccionadoras, 3 religadores automáticos e 13 chaves fusíveis. Todas as cargas são trifásicas, pontuais e apresentam fator de potência 0,92 atrasado. Esse SDEE tem sido utilizado e disponibilizado pelos pesquisadores do Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica (LaPSEE), Universidade do Estado de Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Unesp), campus Ilha Solteira, para análises de problemas de distribuição de energia elétrica, como de confiabilidade, alocação ótima de dispositivos de proteção. Maiores detalhes sobre todas as cargas presentes no circuito podem ser encontrados em LaPSEE (2017).

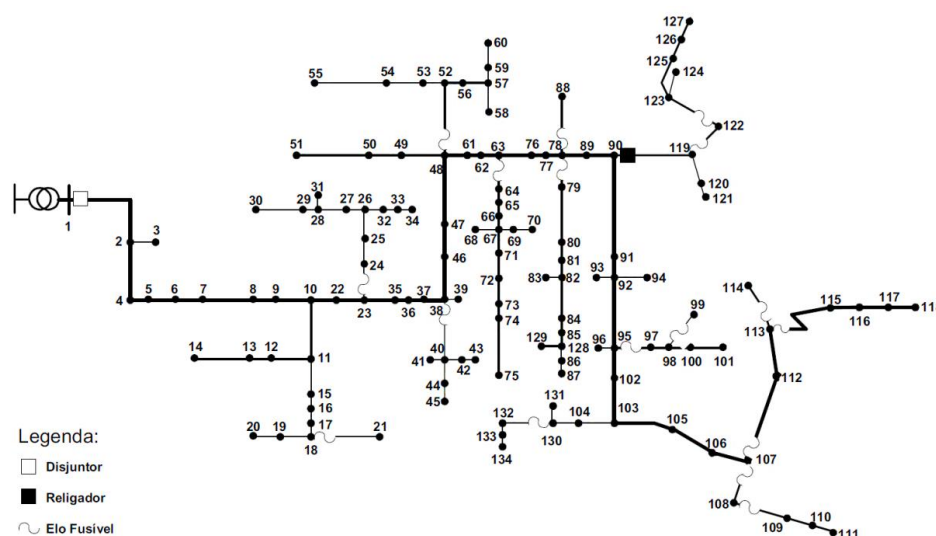


Figura 22 - Representação do sistema prático de 135 barras. Fonte: Pereira et al, 2008

Para a conexão de unidades de GD, as fontes geradoras são conectadas por meio de transformadores trifásicos, 0,64 kV - 13,8 kV, entre 350 e 850 kVA, com impedância de dispersão de 5.75Ω , e conexão Δ - Y, de acordo com cada fonte de GD, conforme tabela abaixo.

Tabela 9 - Alocação das unidades geradoras para cada caso

	Potência Nominal da Unidade (kW)	Potência do Transformador de Conexão (kVA)	Barra de Conexão
Fonte Eólica	700	750	67
Fonte Fotovoltaica	850	850	119
Fonte Hidráulica	300	350	95

As barras destinadas para a alocação de GD foram escolhidas com o critério de maior demanda de potência. Dessa maneira, a energia injetada pelas unidades de GD pode ser distribuída às áreas com maior concentração de no longo do SDEE.

A comparação entre o Caso Base e o Caso Teste mostra que as perdas do sistema foram reduzidas em 21,98 %, um efeito que era esperado.

Tabela 10 - Comparação de perdas entre os casos

	Caso Base	Caso Teste
Perdas Diárias Médias (kW)	1707,44	1332,11
Diferença com o Caso Base (%)	0	21,98

Em relação às tensões das barras do sistema, o Caso Base apresentou todas tensões médias conforme as normativas preconizadas pelas ANEEL, conforme retratado nas figuras 23, 24 e 25. A menor tensão média obtida por barra, considerando as SMC, foi 0,9733 pu na barra 121 (fase A). Portanto, a adição de GD ao sistema melhorou o perfil de tensão, mas não de forma a corrigir nenhuma violação de tensão, haja vista que não havia nenhuma no Caso Base.

Nesse sentido, a conexão de unidades de GD provocou a elevação média de tensão por barra de 0,2409 % na fase A, 0,2565 % na fase B e 0,1800 % na fase C. No caso base, a menor tensão média verificada foi 0,9706 pu, na barra 120, na fase A. Com a introdução dos sistemas de GD no sistema, a tensão média passou a assumir 0,9733 pu, o que representa um aumento de 0,27 %.

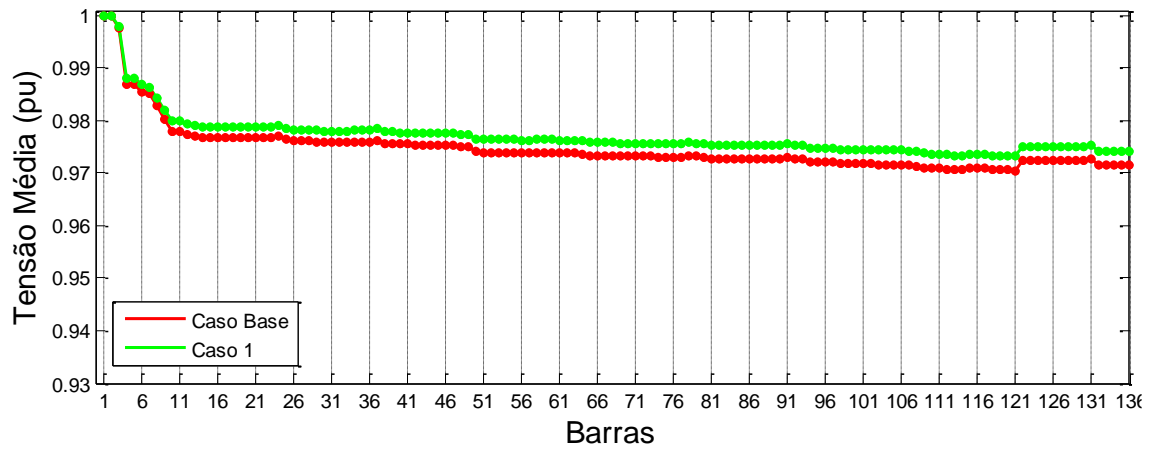


Figura 23 - Perfil de Tensões Médias para a fase A - Sistema 135 barras

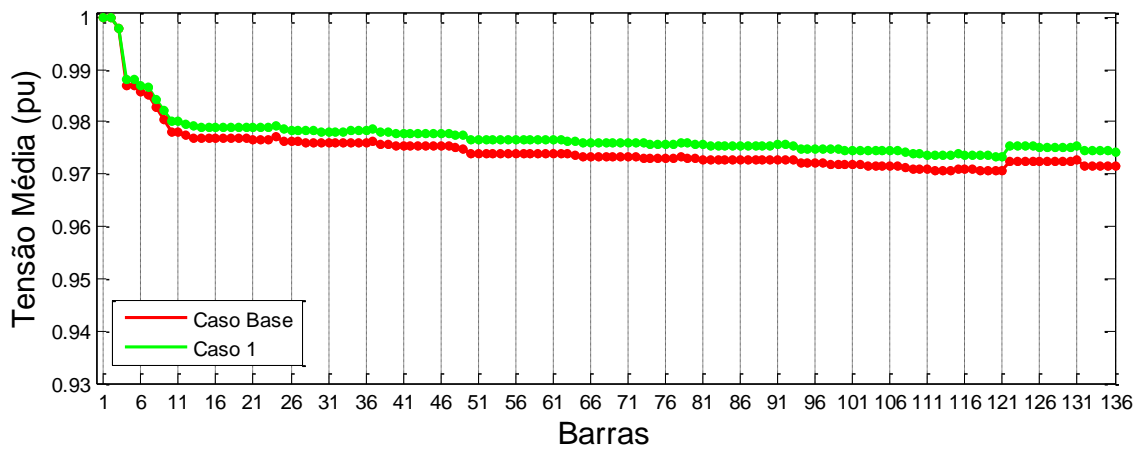


Figura 24 - Perfil de Tensões Médias para a fase B - Sistema 135 barras

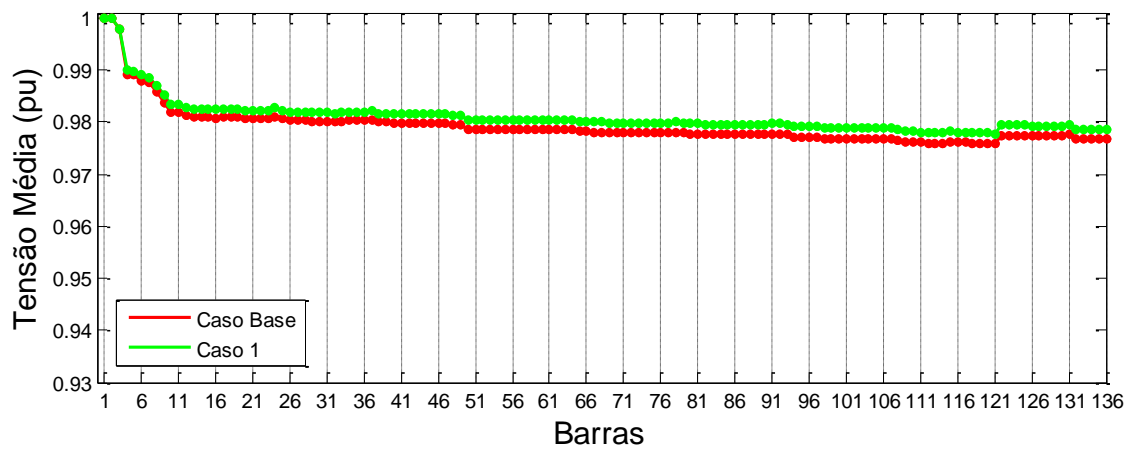


Figura 25 - Perfil de Tensões Médias para a fase C - Sistema 135 barras

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Diante dos estudos e resultados apresentados, observa-se o aumento de complexidade de um SDEE sob a presença de GD, uma característica decorrente do aumento de incertezas na geração de energia e da mudança do fluxo de potência no sistema. Nesse sentido, o OpenDSS é validado como uma ferramenta capaz de lidar com essas novas características e ainda ser versátil para o planejamento, operação e otimização de SDEE, principalmente com utilização de maneira embarcada com outros aplicativos aumente ainda mais as possibilidades de análise, como foi o caso da linguagem MATLAB neste trabalho. Demonstrou-se, então, também sua potencialidade e aplicabilidade em casos reais de Distribuição de Energia Elétrica.

As modelagens probabilísticas das fontes de energia eólica, fotovoltaica e hidráulica e o uso da SMC também se mostraram capazes de capturar o comportamento de SDEE reais, incorporando as incertezas decorrentes da inserção de GD e representá-los em um contexto de simulação, a partir do qual inferências úteis podem ser feitas para fins de planejamento e operação de SDEE.

As vantagens principais do uso de GD em SDEE foram verificadas no decorrer das simulações, em especial a elevação de tensão nos barramentos e diminuição de perdas de potência ativa na rede de distribuição. Mesmo com um índice de penetração relativamente pequeno (20%), foram observadas mudanças significativas na dinâmica dos SDEE testados. Sob esse mesmo índice de penetração, problemas como sobretensão e instabilidade na rede não foram verificados, sendo uma das principais preocupações de concessionárias de distribuição de energia elétrica quando se trata da adição arbitrária de unidades de GD.

Para maior aprofundamento deste trabalho, bem como exploração de novas pesquisas fomentadas por este projeto, futuros trabalhos podem vislumbrar o desenvolvimento das seguintes temáticas:

- Análise de sensibilidade em relação à penetração de GD em SDEE
- Análise de contingência em SDEE sob o efeito de GD
- Desenvolvimento de uma interface gráfica baseada em código aberto para melhor experiência do usuário do OpenDSS
- Aperfeiçoamento da SMC e comparação de outras metodologias para considerar incertezas na GD

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

____. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. ed Brasília: 2008b. 236 p.

____. **Relatório ANEEL 10 anos**. Brasília: 2008a. 129 p. Disponível em: <http://www.ieee.org.br/wp-content/uploads/2014/05/EspacoIEEE_set2013.pdf>.

Acesso em: 3 de março de 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**, v. 7. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/modulo-8>>. Acesso em 28 de maio de 2017.

____. Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012. **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, e dá outras providências**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 11 de junho de 2017.

____. Nota Técnica nº 0057/2014-SRD/ANEEL, de 11 de junho de 2014 **Aprimoramento da metodologia de cálculo de perdas na distribuição regulamentada no Módulo 7 – Cálculo de Perdas na Distribuição do PRODIST**. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2014/026/documento/nota_tecnica_0057_srd.pdf>. Acesso em: 11 de junho de 2016.

ACKERMANN, T. ANDERSSON, SÖDER, L. G. **Distributed generation: a definition**. Electric Power Systems Research, Vol. 57, n. 3, 2001, pp. 195-204, ISSN 0378-7796. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7796\(01\)00101-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7796(01)00101-8). Acessado em: 11 de março de 2017.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015. Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos**

Procedimentos de Distribuição – PRODIST. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 1 de março de 2017.

____. **Micro e minigeração distribuída: sistema de compensação de energia elétrica.** 2 ed. Brasília: 2016. (Cadernos temáticos ANEEL) Disponível em: <http://www.ieee.org.br/wp-content/uploads/2014/05/EspacoIEEE_set2013.pdf>. Acesso em: 10 de junho de 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA. **Perdas na Distribuição: baixa tensão, altos prejuízos.** 11 de setembro de 2013. Disponível em: <<http://www.abradee.com.br/imprensa/artigos-e-releases/1018-perdas-na-distribuicao-baixa-tensao-altos-prejuizos-reportagem-especial-canal-energia>>. Acesso em: 01 de junho de 2017.

CREDER, H., **Instalações Elétricas** 16. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. 470 p.

DUGAN, R. C., **OpenDSS PVSystm Element Model.** Palo Alto: Electric Power Research Institute, 2011.

DUGAN, R. C. **Reference Guide: The Open Distribution System Simulator (OpenDSS).** Palo Alto: Electric Power Research Institute, 2013.

ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. **OpenDSS: Introductory Training Level 1.** Palo Alto: Electric Power Research Institute, 2009.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (BRASIL). **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2016 ano base 2015,** 2016a. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/Forms/Anurio.aspx>>. Acesso em: 11 de março de 2017.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (BRASIL). **BEN 2016: Energia renovável cresce na matriz elétrica brasileira,** 2016b. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/mercado/Paginas/BEN2016EnergiaRenov%C3%A1velCresce>>

amatrizel%C3%A9tricabrasileira.aspx?CategorialD=>. Acesso em: 11 de março de 2017.

IEEE Distribution Planning Working Group Report ,**“Radial distribution test feeders”**, IEEE Transactions on Power Systems, August 1991, Volume 6, Number 3, pp 975-985.

IEEE. Distribution System Analysis Subcommittee. **Radial Test Feeders: 34-bus feeder**. IEEE, 17 de setembro de 2010. Disponível em: <<http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/>>. Acesso em: 13 de março de 2017.

IEEE. **Efficiency of Silicon Solar Cells Climbs**. IEEE Spectrum, 27 de maio de 2017. Disponível em: <http://spectrum.ieee.org/energywise/energy/renewables/efficiency-of-solar-cells-continues-to-climb>. Acesso em: 13 de maio de 2017.

GALDINO, M. **Análise de Custos Históricos de Sistemas Fotovoltaicos no Brasil**, IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferência Latino-Americana da ISES – São Paulo, Brasil; Set 2012. p. 1–8.

KERSTING, W. H. **Radial distribution test feeders**, 2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37194), Columbus, Ohio, 2001, pp. 908-912, vol.2. doi: 10.1109/PESW.2001.916993

KERSTING, W. H. **Distribution System Modeling and Analysis**. Boca Raton: CRC Press, 2002.

LaPSEE. **Sistema prático 135 barras**. Disponível em: http://www.dee.feis.unesp.br/lapsee/TestSystems/135_bus_feeder.pdf. Acesso em: 15 de maio de 2017.

MARTINS, Mário R. P. F., **Trânsito De Energia Trifásico Probabilístico**. 2012. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2012. Disponível em: <<https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/1099922/1/TRANSITO%20DE%20ENERGIA%20TRIFASICO%20PROBABILISTICO%20-%20Dissertacao%2057634.pdf>>. Acesso em: 26 out. 2013

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Ações de estímulo à geração distribuída, com base em fontes renováveis**, 2015a. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/3013891/15.12.2015+Apresenta%C3%A7%C3%A3o+ProGD/bee12bc8-e635-42f2-b66c-fa5cb507fd06?version=1.0>>. Acesso em: 11 de março de 2017.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Brasil lança Programa de Geração Distribuída com destaque para energia solar**, 2015b. Disponível em: >. Acesso em: 11 de março de 2017.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA. Homepage, 2017. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/-/entenda-setor/evolucao-setor.aspx>>. Acesso em: 11 de março de 2017.

Pereira, Rodrigo A. F.; Silva, Luis G. W. da; Mantovani, José R. S.. **Algoritmo baseado em fundamentos de tensão para localização de faltas em alimentadores de distribuição de energia elétrica**. SBA: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica. Sociedade Brasileira de Automática, v. 19, n. 3, p. 337-349, 2008. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/29080>>.

QUEIROZ, P. V. S. **Mensuração do Consumo de Energia Elétrica: Algoritmo para Detecção de Potenciais Usuários da Termoacumulação como Alternativa para Deslocamento de Carga**. 2013. 166 p. Dissertação (Mestrado) – Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

RAYCHAUDHURI, S. **Introduction to Monte Carlo simulation**, 2008. Winter Simulation Conference, Austin, TX, 2008, pp. 91-100. doi: 10.1109/WSC.2008.4736059

RUBINSTEIN, R. Y.; KROESE, Dirk P. **Simulation and the Monte Carlo method**. Hoboken, N.J. John Wiley & Sons: 2008

SANTOS, R. dos. **Padronização de Projetos Elétricos de Pequenas Centrais Hidrelétricas**. 2002. 196 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Energia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2002.

SHORT, T. A. **Electric power distribution equipment and systems**. Boca Raton: Taylor & Francis, 2006. 320 p

STAROSTA, J. **O sistema elétrico brasileiro**. O Setor Elétrico. São Paulo, Ed. 116, p.86-97, 2015. Disponível em: <http://www.osetoreletrico.com.br/web/documentos/guias_setoriais/ed-116_Pesquisa-Prestadores-de-servi%C3%A7os-para-GTD.pdf>. Acesso em: 11 de março de 2017.

THOMOPOULOS, N. **Essentials of Monte Carlo Simulation** Nova Iorque, NY: Springer, 2013. 174p

TRIOLA, Mario F. **Introdução à estatística** 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 696 p. ISBN 9788521615866 (broch.)

WEG. **Geração de Energia Eólica – Tecnologias Atuais e Futuras**. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-geracao-de-energia-eolicatecnologias-atuais-e-futuras-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 5 maio de 2017