

Eixo Temático: Inovação e Sustentabilidade

IMPACTO DAS FONTES DE ENERGIAS RENOVÁVEIS NA QUALIDADE DE ENERGIA

IMPACT OF RENEWABLE ENERGY SOURCES IN ENERGY QUALITY

Magdiel Schmitz, William Ismael Schmitz, Daniel Pinheiro Bernardon, Vinícius Jacques Garcia e Iochane Garcia Guimarães

RESUMO

A recente regulamentação de conexão de tecnologias ambientalmente sustentáveis, como painel fotovoltaico e gerador eólico, no sistema elétrico incentivou a sua disseminação. A inserção dessas fontes renováveis em sistemas de distribuição melhora os níveis de qualidade de energia elétrica, em especial na adequação aos níveis de tensão. Este trabalho apresenta como principal contribuição um estudo do impacto de geração distribuída nos níveis de tensão em sistemas de distribuição através da modelagem de um sistema de distribuição e de uma fonte de geração distribuída, juntamente com os principais componentes necessários para a instalação. Para modelagem e simulação é apresentado o software ATP program (Alternative Transient Program), representando os principais componentes elétricos em estudo. Os estudos são apresentados através de gráficos e representação do circuito, exibindo o comportamento dos sistemas e os níveis de tensão sem e com a inserção de geração distribuída. Os resultados apontam uma contribuição significativa da geração distribuída na qualidade de energia.

Palavras-chave: tecnologias sustentáveis, geração distribuída, qualidade de energia, sistemas de distribuição, ATPDraw.

ABSTRACT

The recent regulation of the connection of environmentally sustainable technologies, such as photovoltaic panel and wind generator, in the electrical system encouraged its dissemination. The insertion of these renewable sources into distribution systems improves the levels of electric power quality, especially in adjusting the voltage levels. This work presents as main contribution a study of the impact of distributed generation on voltage levels in distribution systems through the modeling of a distribution system and a distributed generation source, together with the main components needed for the installation. For modeling and simulation, the ATP program (Alternative Transient Program) software is presented, representing the main electrical components under study. The studies are presented through graphs and circuit representation, showing the behavior of the systems and voltage levels without and with the inclusion of distributed generation. Results indicate a significant contribution of the distributed generation in the energy quality.

Keywords: sustainable technologies, distributed generation, energy quality, distribution systems, ATPDraw.

1 INTRODUÇÃO

A partir da aprovação da Resolução Normativa (REN) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) nº 482/12 (ANEEL, 2012), posteriormente revisado pela REN 687/15 (ANEEL, 2015), a conexão de sistemas de geração distribuída (GD), como eólica e solar, à rede elétrica tornou-se regulamentada, incentivando a sua disseminação e, com isso, contribuindo de forma intensiva na alteração da matriz energética brasileira. Até o momento já são 11.394 usinas de geração distribuídas instaladas, com um total de 130.699,50 kW de potência instalada (ANEEL, 2017) de energia limpa e renovável. Pelo referido motivo, tais gerações deixaram de serem consideradas apenas como gerações pontuais para o sistema e passaram a receber devida atenção no que se refere às normas e procedimentos para sua devida inserção à rede elétrica, de forma a garantir aos consumidores qualidade da energia fornecida.

O crescente interesse pelas fontes renováveis no Brasil é devido em grande parte à criação de programas como o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia (PROINFA) e o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD) por parte do Governo Federal, que aparecem como um estímulo necessário devido ao atraso científico-tecnológico para com as fontes alternativas de energia. Os incentivos concedidos por estes programas provocam uma diversificação da matriz energética, impulsionando uma grande quantidade de projetos que hoje encontram-se hoje em adiantado estágio de estudos. A execução destes estudos é uma etapa crucial para a análise do comportamento dinâmico e permanente dos sistemas ao serem inseridos na rede, assim como para análise técnica de melhoramento de níveis de tensão e alívio de carregamento das linhas.

A GD pode ser compreendida como a geração elétrica realizada junto ou próxima aos consumidores, podendo contribuir para reduzir as perdas elétricas, aliviar o congestionamento nas linhas de transmissão, melhorar a estabilidade do sistema, reduzir os custos da eletricidade para o consumidor final (Pepermans et al., 2005) e melhorar o perfil de tensão (Dondi et al., 2002). Este trabalho aborda o impacto da GD no perfil de tensão de uma rede de distribuição. Dessa forma, uma rede hipotética é modelada no software ATPDraw, apresentando dois estudos de caso de forma a analisar os efeitos causados, assim como apresentar e descrever um sistema base para futuras simulações de inserção de GD no sistema elétrico, apresentando um passo a passo da modelagem do sistema. A utilização do ATPDraw como ferramenta de simulação dinâmica para análise técnica do sistema elétrico apresenta grande versatilidade na modelagem de sistemas, sendo amplamente utilizado por empresas e concessionárias do setor elétrico nacional.

2 IMPACTO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO

No Brasil, a localização cada vez mais distante dos aproveitamentos hidrelétricos disponíveis, as restrições ambientais e o alto custo associado à viabilização de grandes empreendimentos de geração tornam a utilização de GD uma opção atraente a ser considerada na expansão do sistema elétrico brasileiro (Falcão, 2013). Isto motivou a ANEEL a produzir resoluções favoráveis, direta ou indiretamente, às gerações distribuídas.

A REN 482/12 (ANEEL, 2012) estabeleceu as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica, mediante o qual a energia injetada na rede poderá compensar o consumo de energia nos meses subsequentes. Em 2015 a ANEEL atualizou a REN 482/12, passando a ser denominada REN 687/15 (ANEEL, 2015). Em suma, a ANEEL tornou mais fácil para que as pessoas e empresas possam produzir a sua própria energia a

partir de fontes renováveis (solar, eólica, hidráulica e de biomassa). As principais alterações realizadas foram:

- Estabelecimento das modalidades de autoconsumo remoto e geração compartilhada: abrindo as portas para a geração em terrenos afastados do local de consumo (mas ainda na área da mesma distribuidora), denominado “Autoconsumo remoto” e para vizinhos que queiram participar do sistema de compensação de energia;
- Ampliação do prazo de compensação dos créditos de energia para 60 meses.
- Microgeração distribuída: Central geradora com potência instalada até 75 kW.
- Minigeração distribuída: Central geradora com potência instalada acima de 75 kW e menor ou igual a 5 MW (sendo 3 MW para fonte hídrica).

A GD conectada às redes de distribuição, particularmente na média e baixa tensão, introduz novas questões na operação dessas redes. A maior autonomia em relação às tarifas de mercado pode afetar o faturamento da concessionária, mas também pode postergar investimentos na rede, aliviando alimentadores carregados ou, quando combinadas com medidas como a tarifa branca, servindo como uma ótima ferramenta de controle da demanda, controlando o consumo em horário de pico de demanda. A GD também ajuda a aumentar a confiabilidade do sistema, tornando-o mais robusto em caso de interrupções na rede, e a melhorar a qualidade da energia fornecida (Pepermans et al., 2005). As redes de distribuição no geral apresentam topologia radial, com o fluxo de potência circulando nos alimentadores da rede do sentido da geração para a carga, gerando perdas e, com isso, queda de tensão ao longo deste sentido. As GDs podem ser uma ótima opção para melhorar esses níveis de tensão sem controle de potência reativa adicional (Golovanov et al., 2013), instalando-as nos pontos mais extremos da rede, conforme será visto nos estudos de caso adiante.

3 QUALIDADE DA ENERGIA

Entende-se como qualidade de energia elétrica o quão bem ela pode ser aproveitada pelos usuários. Para isto, se faz necessário o acompanhamento de várias grandezas elétricas através das quais é possível determinar se a energia entregue pela concessionária está ou não dentro dos padrões estabelecidos pela agência reguladora ANEEL.

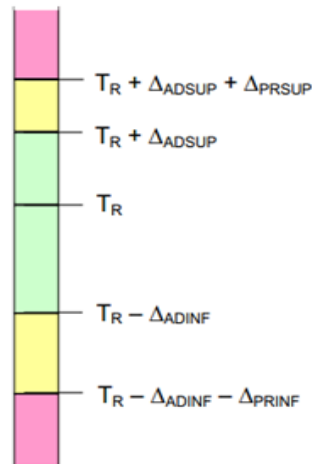
Dentro dos critérios analisados estão a continuidade do fornecimento e a conformidade com determinados parâmetros em regime permanente ou transitório que, de acordo com a ANEEL (ANEELb, 2017), são:

- Tensão em regime permanente;
- Fator de potência;
- Harmônicos;
- Desiquilíbrio de tensão;
- Flutuação de tensão;
- Variações de tensão de curta duração;
- Variação de frequência.

O parâmetro a ser analisado no presente artigo será a tensão em regime permanente na faixa entre 1 kV até 69 kV, atuando no auxílio de uma manutenção preditiva a fim de minimizar possíveis efeitos de subtensão.

De acordo com o PRODIST (ANEELb, 2017), mais precisamente o módulo 8 o qual trata da qualidade do produto, surge o termo “conformidade de tensão elétrica”, em que fica definido como o processo de comparação da tensão medida por medição apropriada com o valor de referência, especificando como adequado, precário ou crítico (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

Figura 1 – Faixas de tensão em relação à de referência.



Fonte: ANEELb (2017).

Onde:

Tensão de referência (TR);

Faixa adequada de tensão ($TR - \Delta ADINF$, $TR + \Delta ADINF$);

Faixas precárias de tensão ($TR + \Delta ADINF$, $TR + \Delta ADINF + \Delta PRSUP$ ou $TR - \Delta ADINF - \Delta PRINF$, $TR - \Delta ADINF$);

Faixas críticas de tensão ($>TR - \Delta ADUSP + \Delta PRSUP$ ou $<TR - \Delta ADINF - \Delta PRINF$).

Entende-se como:

$\Delta ADUSP$ (variação adequada superior);

$\Delta PRSUP$ (variação precária superior);

$\Delta ADINF$ (variação adequada inferior);

$\Delta PRINF$ (variação precária inferior);

Estes valores podem também serem definidos em forma de p.u., ou porcentagem, de acordo com ANEELb (2017), conforme o **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, onde fica definido como variação adequada inferior ($\Delta ADINF$) um valor de 7% em uma variação abaixo do valor de referência que caracteriza uma subtensão. Entre 90% e 93% do valor de referência, situado em uma faixa de 3% fica localizada a variação precária inferior ($\Delta PRINF$) e abaixo disto fica definido como situação crítica. Todos estes valores referem-se à subtensões do sistema.

Quadro 1 - Faixa de tensões em relação à tensão nominal de 1 kV até 69 kV

Tensão de atendimento (TA)	Faixa de variação da tensão de leitura (TL) em relação à tensão de referência (TR)
Adequada	$0.93TR \leq TL \leq 1.05TR$
Precária	$0.90TR \leq TL < 0.93TR$
Crítica	$TL < 0.90TR$ ou $TL > 1.05TR$

Fonte: ANEELb (2017).

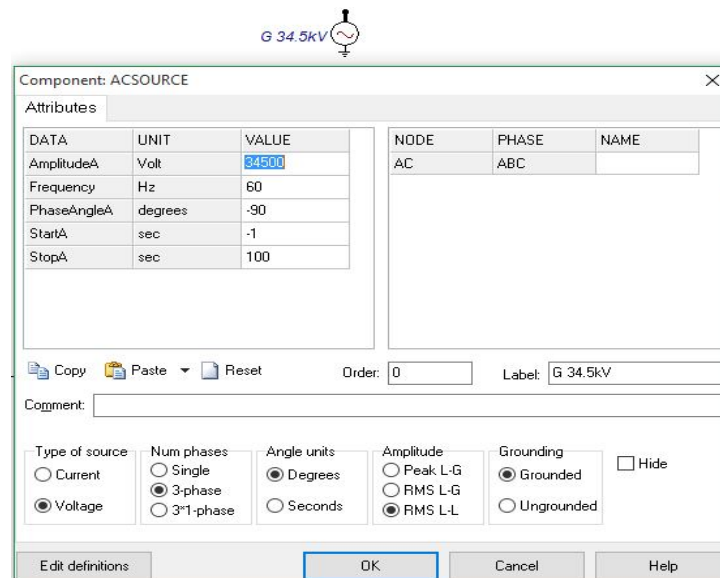
3 MODELAGEM

A correta modelagem dos elementos de um sistema elétrico é crucial para uma adequada representação do modelo e obtenção dos resultados. Para isso, utilizou-se o ATPDraw, uma ferramenta para simulação dinâmica de sistemas elétricos de potência largamente usada por empresas e concessionárias do setor. Para simulação de sistemas de distribuição, com inserção de geração distribuída, faz-se necessário a inserção de diversos modelos de elementos componentes dos geradores, filtro de harmônicos, fontes de tensão, cargas e modelagem da linha.

2.1 FONTES

No ATPDraw as fontes são representadas por geradores trifásicos e simétricos, ou seja, sistema trifásico em que as tensões nos terminais dos geradores são senoidais, de mesmo valor máximo, e defasadas entre si de 120°. Para a parametrização da fonte no ATPDraw basta informar a amplitude, frequência e a fase (Figura 2).

Figura 2 – Modelagem da fonte AC no ATPDraw.



Fonte: autores.

2.2 REDES ELÉTRICAS

O transporte de energia elétrica em um sistema de potência é realizado através das redes elétricas, e o seu desempenho depende quase exclusivamente de sua geometria, ou seja, de suas características físicas. Os parâmetros das redes são representados por uma impedância em série, resistência e reatância, e uma admitância em paralelo. Para a simulação utilizou-se a configuração 601 (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) do modelo de distribuição da IEEE (IEEE, 2009) e inserido no modelo PI do ATPDraw (Figura 3 – Modelagem da rede modelo PI no ATPDraw.Figura 3).

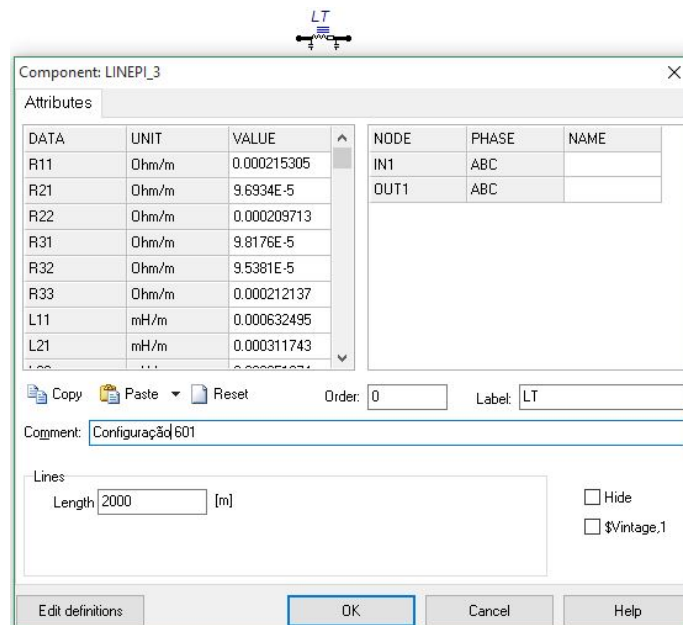
Quadro 2 – Impedâncias da configuração 601 IEEE de sistema de distribuição

Z (R +jX) em ohms por metro					
0,000215305	0,000632495	9,69341E-05	0,000311743	9,81769E-05	0,000263213

		0,000209713	0,000651074	9,53807E-05	0,000239166
				0,000212137	0,000642997
B em micro Siemens por metro					
	0,003914524		-0,001240136		-0,000782619
			0,003703195		-0,000460872
					0,003503672

Fonte: IEEE (2009).

Figura 3 – Modelagem da rede modelo PI no ATPDraw.

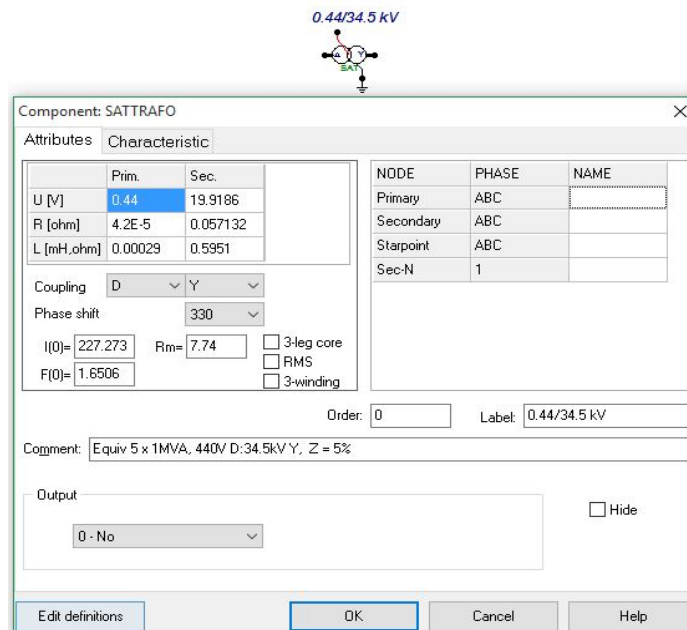


Fonte: autores.

2.3 TRANSFORMADOR

O ATP Draw necessita das impedâncias equivalentes para representação do transformador, além das tensões no primário e secundário e tipo de ligação (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

Figura 4 – Transformador modelado no ATPDraw.

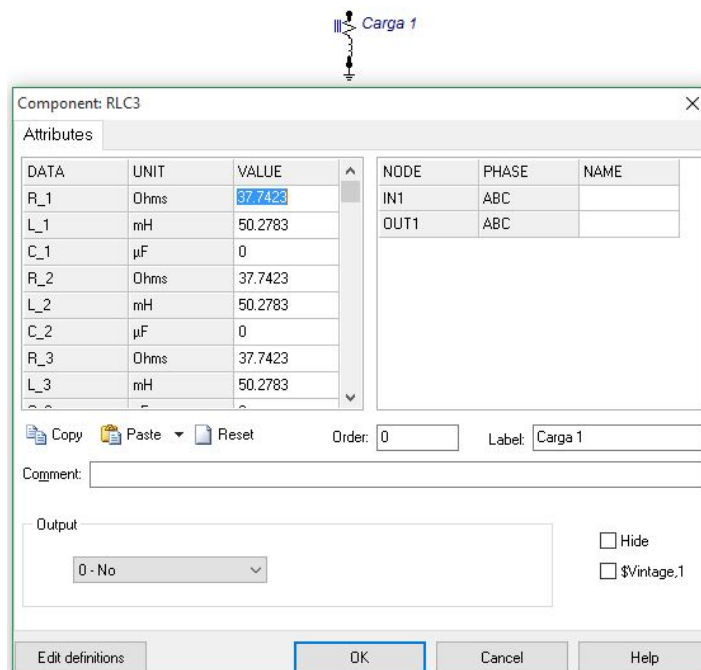


Fonte: autores.

2.4 CARGAS

As cargas elétricas podem ser equilibradas ou desequilibradas, sendo representadas por um conjunto de impedâncias complexas $Z = R + jX$. A potência absorvida por uma carga depende de sua natureza, e pode variar em função da tensão a ela aplicada. Optou-se em representar as cargas elétricas no ATPDraw como sendo de impedância constante com a tensão, sendo modeladas como segue (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

Figura 5 – Cargas elétricas modeladas no ATPDraw.

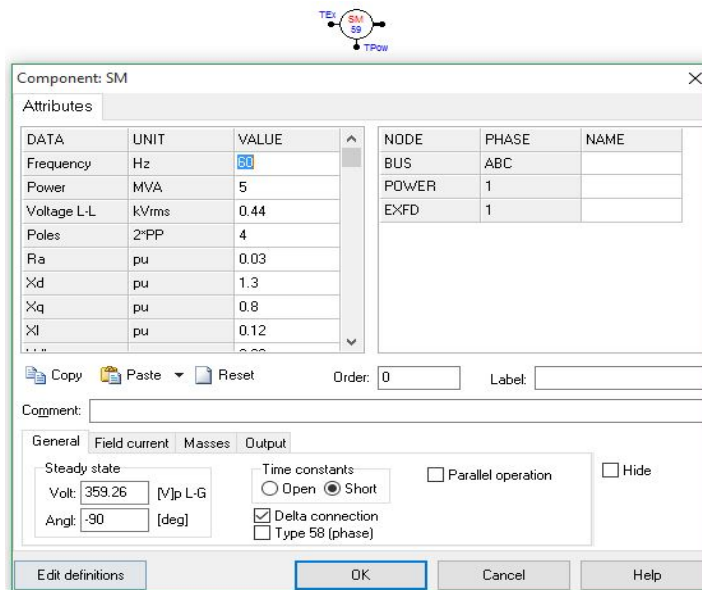


Fonte: autores.

2.5 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

O conjunto de geração distribuída (GD) é composto por um gerador síncrono, bloco RLC e transformador. Considera-se neste caso, para simular a geração distribuída de 5MVA, o modelo que consiste no bloco SM 59 sem controle, do ATP (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). Os parâmetros a serem informados no gerador são frequência, potência, tensão de linha rms, tensão de fase de pico, ângulo de fase e impedâncias internas.

Figura 6 – Gerador síncrono modelado no ATPDraw.



Fonte: autores.

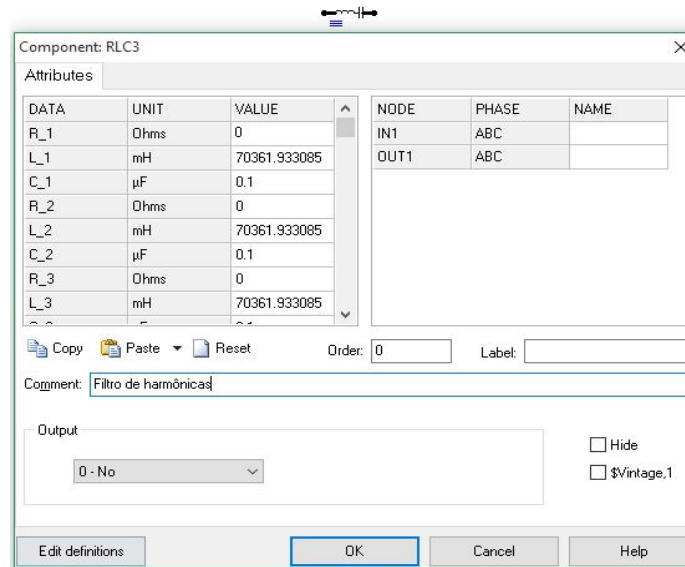
2.6 FILTRO LC

O modelo SM 59 sem controle é eficaz quando o tempo de duração do transitório eletromagnético é expressivamente pequeno se comparado aos tempos de controles da máquina síncrona, como os reguladores de velocidade e de tensão. Para filtrar as harmônicas que causam um assincronismo da máquina síncrona, calculou-se um filtro LC (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) passa banda (LOPES, 1996), de modo a permitir somente a passagem da frequência da rede (60HZ), conforme a equação 1 abaixo.

$$LC = \frac{1}{(2\pi f)^2} \quad (1)$$

Encontrando valores de $L = 7.036,20$ mH e $C = 0,1\mu\text{F}$.

Figura 7 – Filtro de harmônica para GD modelado no ATPDraw.



Fonte: autores.

Com isso eliminaram-se as harmônicas, fazendo a máquina síncrona estável.

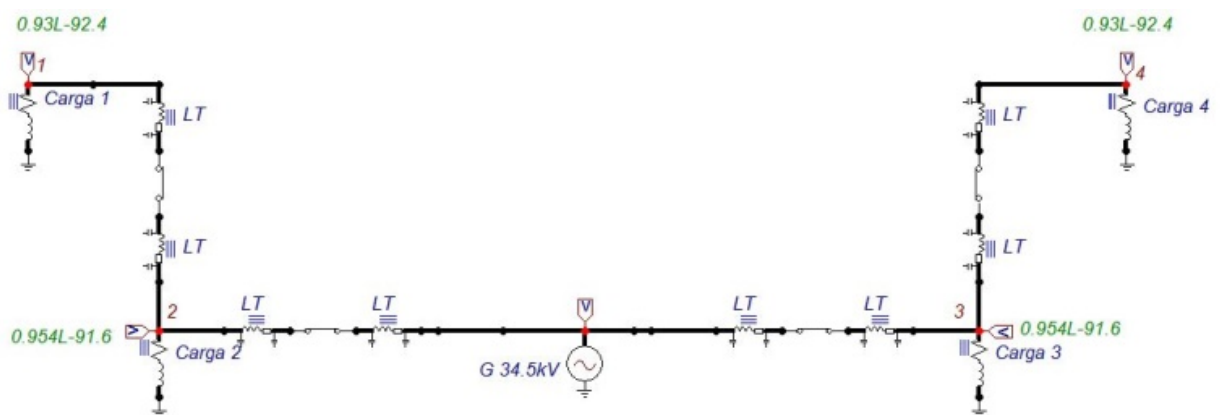
4 SIMULAÇÃO NO ATPDRAW

Para análise dos impactos da inserção de geração distribuída nos níveis de tensão de um sistema elétrico de distribuição, simulou-se no ATPDraw um sistema elétrico de distribuição com topologia da **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, fazendo análise dos níveis de tensão antes e após a inserção da minigeração.

4.1 SIMULAÇÃO DA REDE SEM GD

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta o sistema elétrico, sem inserção de minigeração, simulado no software ATPDraw, onde pôde-se ver os níveis de tensão em cada carga.

Figura 8 – Rede de distribuição modelada no ATPDraw

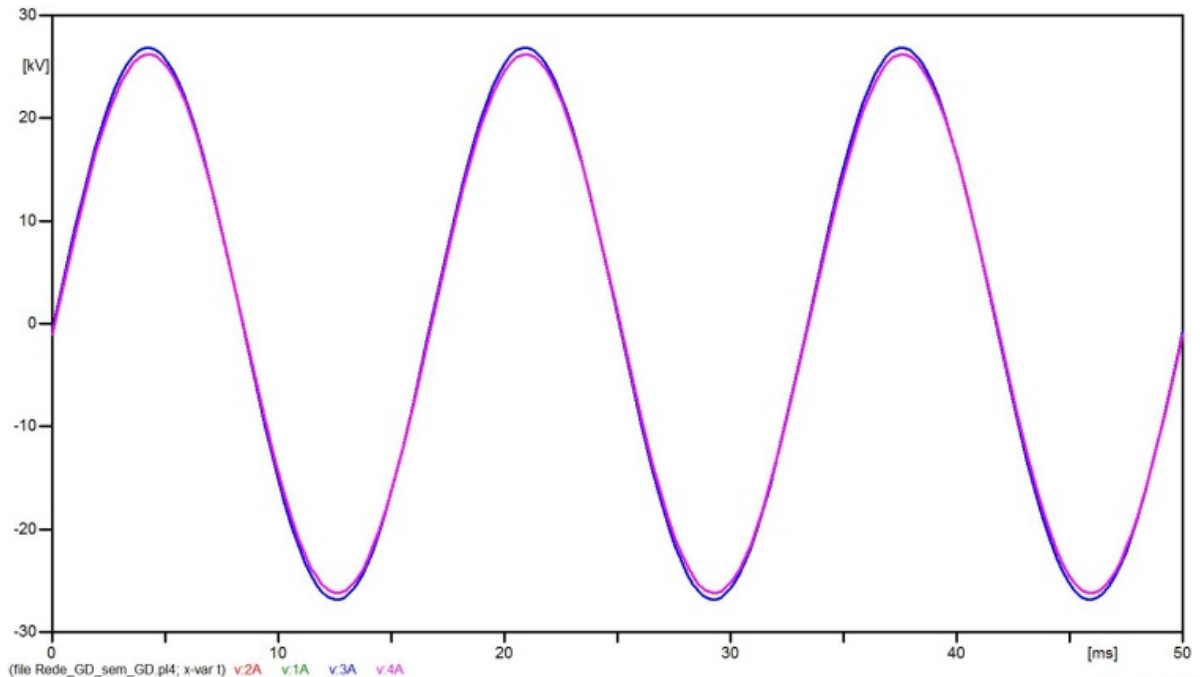


Fonte: autores.

Os níveis de tensão em cada uma das cargas podem obtidos pela **Erro! Fonte de referência não encontrada.**. Nela estão sendo representadas as formas de onda nas cargas 1, 2,

3 e 4 sem a inserção da minigeração. Percebe-se que o valor de tensão é de aproximadamente 27 kV (0.95 p.u.) (cargas 2 em vermelho e 3 em rosa), havendo um aprofundamento no nível de tensão no final da rede de distribuição para aproximadamente 26 kV (0.93p.u.) (cargas 1 em verde e 4 em rosa). Essas tensões são valores de pico de fase ($V_{fpico} = V_{Lrms} \times \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$).

Figura 9 – Tensões nas cargas 1, 2, 3 e 4 sem minigeração

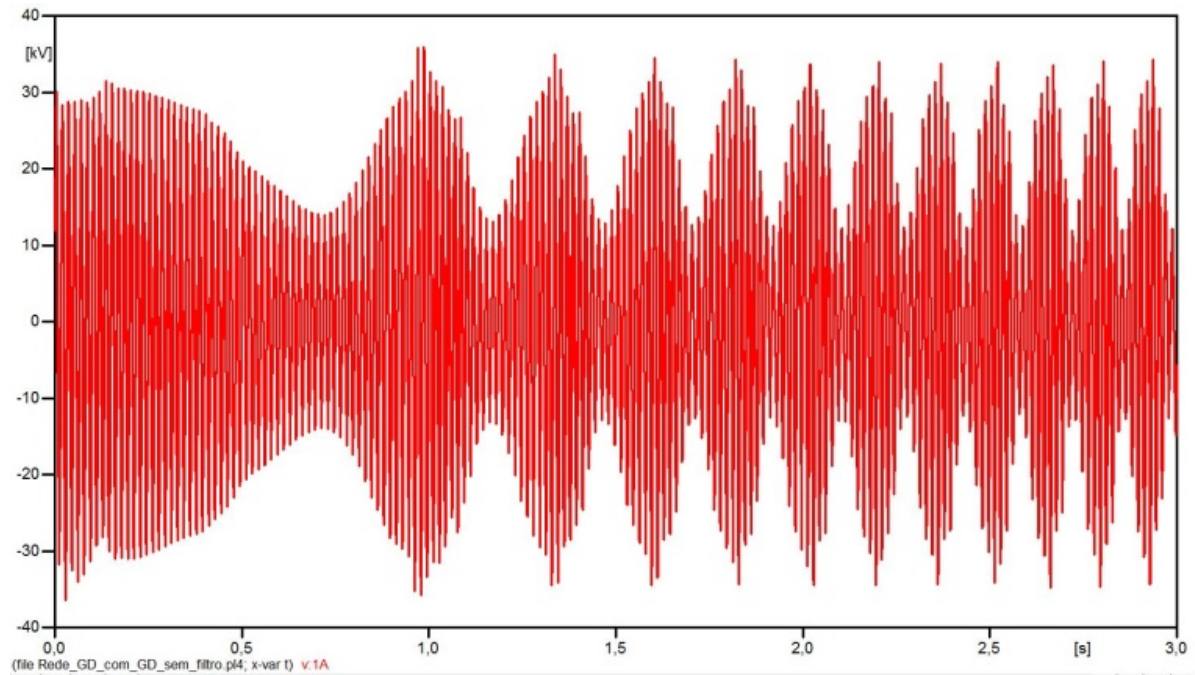


Fonte: autores.

4.2 SIMULAÇÃO DA REDE COM GD

Com a inserção do gerador síncrono, foi necessário inserir também o filtro LC de modo a manter a estabilidade do gerador. A Figura 10 apresenta a tensão na carga 1, local onde foi inserida a geração distribuída, antes da inserção o filtro, podendo ver a instabilidade da máquina.

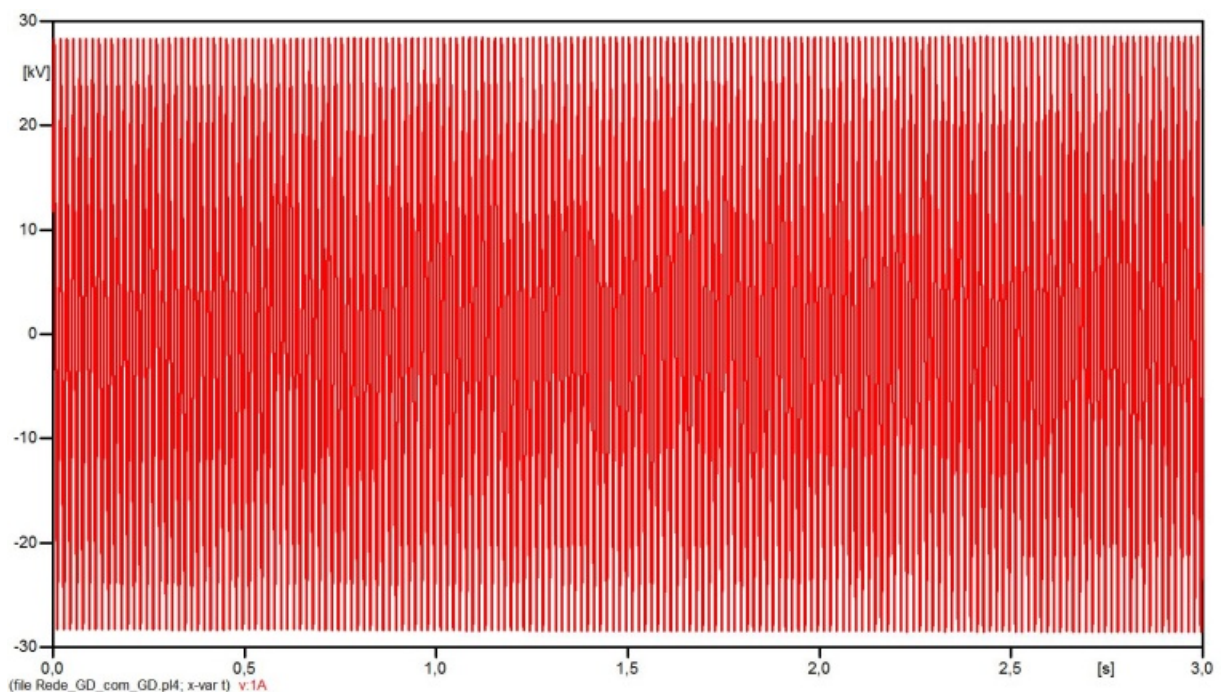
Figura 10 – Tensão na carga 1 (Local da GD) sem filtro



Fonte: autores.

A Figura 11 ilustra a tensão na carga 1, local da GD, onde se pode ver a estabilidade da máquina obtida com o filtro LC calculado.

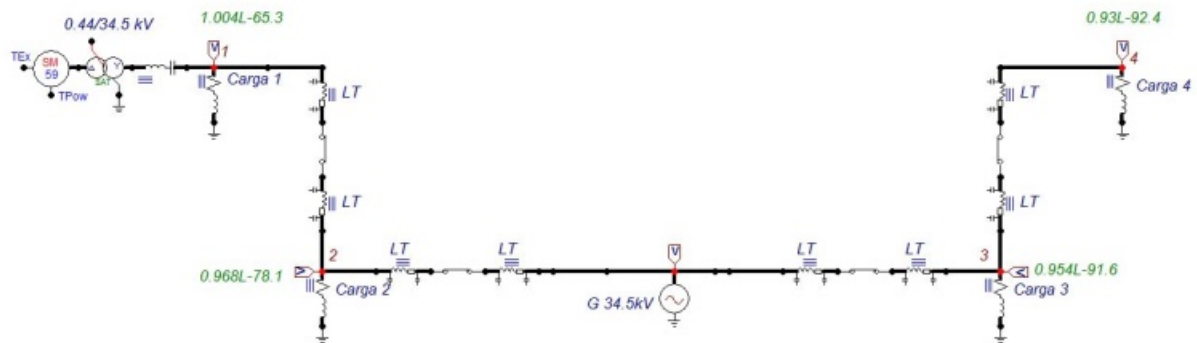
Figura 11 – Tensão na carga 1 (Local da GD) com filtro



Fonte: autores.

A Figura 12 apresenta o sistema elétrico com inserção de minigeração simulado no software ATPDraw, onde pode-se ver os níveis de tensão em cada carga.

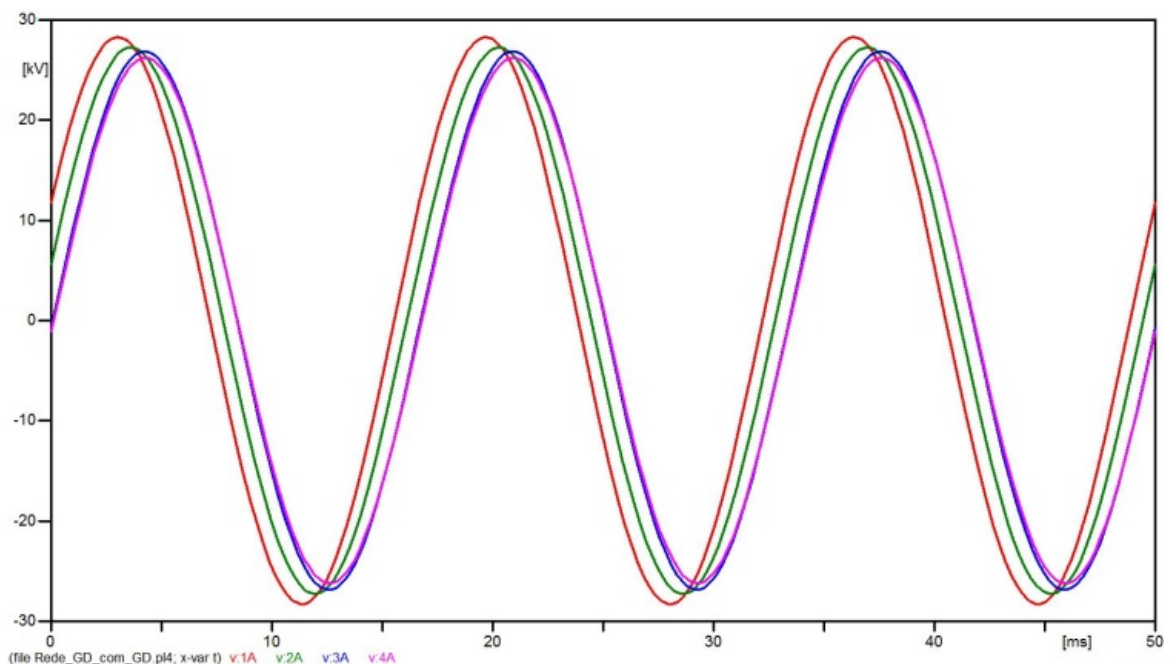
Figura 12 – Rede de distribuição modelada no ATPDraw



Fonte: autores.

Os níveis de tensão em cada uma das cargas podem ser obtidos pela Figura 13. Nela estão sendo representadas as formas de onda nas cargas 1, 2, 3 e 4 sem a inserção da minigeração. Percebe-se que o valor de tensão na carga 1 (em vermelho), local onde foi inserida a geração distribuída, é de aproximadamente 28 kV (1.004 p.u.), havendo uma melhora no nível de tensão, assim como indiretamente na carga 2, com 27,2 kV (0.968 p.u.).

Figura 13 – Tensões nas cargas 1, 2, 3 e 4 com minigeração



Fonte: autores.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Observou-se uma melhora significativa nos níveis de tensão das cargas 1 e 2 próximas da minigeração de 5 MVA inserida, comprovando a viabilidade técnica da inserção da geração distribuída. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra a melhora nos níveis de

tensão, adequando os níveis de tensão precários, próximo de críticos, no final da rede, para níveis adequados, melhorando a qualidade da energia entregue e reduzindo as perdas no sistema.

Tabela 1 – Tensões nas cargas 1, 2, 3, e 4 com e sem GD

	Tensão em p.u.		Melhora na tensão %
	Sem GD	Com GD	
Carga 1	0.930	1.004	7.95
Carga 2	0.954	0.968	1.46
Carga 3	0.954	0.954	0
Carga 4	0.930	0.930	0

Fonte: autores.

6 CONCLUSÃO

As tecnologias de geração distribuída ambientalmente sustentáveis estão chegando ao Brasil, trazendo grandes vantagens, como a redução de perdas, menor necessidade de grandes projetos de geração, oportunidades maiores de participação dos consumidores no atendimento à demanda, melhora na qualidade de energia com a adequação nos perfis de tensão, entre outros. Porém, trazem consigo problemas técnicos e econômicos que precisam ser bem equacionados e resolvidos para permitir um crescimento adequado desse tipo de geração. A correta modelagem e análise técnica do comportamento dos geradores, das redes e dos outros componentes elétricos envolvidos requer capacitação dos engenheiros e ferramentas de análise ainda não usualmente presentes em nossas empresas de distribuição.

Neste trabalho simulou-se uma rede de distribuição e analisou-se o seu comportamento com a inserção de minigeração de 5 MVA com o intuito de visualizar os níveis de tensão e comportamento da máquina síncrona. O trabalho introduziu a ferramenta ATPDraw como possível solução do problema modelagem e simulação de sistemas elétricos de distribuição com inserção de GD, com estudo de transitórios e regime permanente. O complexo modelamento destes circuitos pode servir de base para futuros estudos com fontes renováveis. Com o estudo de várias simulações, pôde-se compreender melhor o comportamento e a forma de ajuste dos componentes utilizados nos circuitos simulados, principalmente: geração distribuída e seus componentes, transformador, fonte AC, linha de distribuição e cargas.

Com os estudos de caso pôde-se verificar uma melhora significativa nos perfis das tensões do sistema, demonstrando a importância da geração distribuída na melhora dos níveis de tensão da rede. A adequação dos níveis de tensão acarreta em uma energia de melhor qualidade entregue aos consumidores residenciais, comerciais e industriais, reduzindo perdas de energia no sistema, danos e mal funcionamento nos equipamentos das indústrias e residências. Todos estes benefícios vem atrelados à uma geração de energia limpa e renovável.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012**. Brasil. ANEEL, 2012. [Online]. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em Junho de 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015**. Brasil. ANEEL, 2015. [Online]. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em Junho de 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Outorgas e registros de geração: Unidades consumidoras com geração distribuída**. Brasil. ANEELa, 2017. [Online]. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/outorgas/geracao/-/asset_publisher/mJhnKLi7qcJG/content/registro-de-central-geradora-de-capacidade-reduzida/655808>. Acesso em Junho de 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST. Módulo 8 – Qualidade da energia elétrica**. Brasil. ANEELb, 2017. [Online]. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo8_Revisao_8/9c78cfab-a7d7-4066-b6ba-cfbd3058d19>. Acesso em Junho de 2017.

DONDI, P., et al. **Network integration of distributed power generation**. Journal of Power Sources 106, 1–9. 2002.

FALCÃO D. M. **Impacto da mini e microgeração distribuída nas redes de distribuição de energia elétrica**. O Setor Elétrico. IEEE. 2013. [Online]. Disponível em: <http://www.ieee.org.br/wp-content/uploads/2014/05/EspacoIEEE_set2013.pdf>. Acesso em Junho de 2017.

GOLOVANOV N. et al. **Power quality assessment in small scale renewable energy sources supplying distribution systems**. Energies. MDPI. 2013. Vol. 6. 634-645. doi: 10.3390/602034.

IEEE. **IEEE 13 Node Test Feeder**. IEEE Power Engineering Society, 2009. [Online]. Disponível em: <<http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/index.html>>. Acesso em junho de 2017.

LOPES, A. **Análise de circuitos**. Editora Fittipaldi Ltda. São Paulo. 1996.

PEPERMANS, G. et al. **Distributed Generation: Definition, benefits and issues**. Journal of Energy policy. Vol. 33, 787-798. 2005.