

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ**

Breno Araujo Lopes

**D-FACTS: UMA ANÁLISE DOS DISPOSITIVOS NO CONTROLE DE  
SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO**

Curitiba,

2018

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ**

Breno Araujo Lopes

**D-FACTS: UMA ANÁLISE DOS DISPOSITIVOS NO CONTROLE DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná como requisito do grau de Engenheiro.

Orientador: Prof. Dr. Odilon Luís Tortelli

Curitiba,

2018

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha família, especialmente aos meus pais, por entenderem a importância que essa formação tem para mim e nunca me julgarem durante meu percurso.

Agradeço aos meus amigos, meu irmão, Caio, e minha namorada, Gabriela, por serem um porto seguro e alívio nos momentos de dificuldade.

Aos colegas de curso que dividiram responsabilidades, atividades e momentos comigo.

Ao corpo docente, técnico e todo tipo de trabalhador da UFPR, especialmente do curso de engenharia elétrica, por permitir que eu aprendesse e aproveitasse deste meio por tantos anos.

À todos profissionais da ciência e tecnologia que ao decorrer de séculos construíram o conhecimento que estudo hoje.

“Felicidade é a satisfação com o ser e não com o ter. Ela é extremamente gratuita, pois é uma sensação puramente interna. Muitas vezes, fatores externos não são favoráveis e, mesmo assim, a felicidade vem.”

Renato Janine Ribeiro

## RESUMO

O sistema de distribuição de energia brasileiro tende a tomar novas características nas próximas décadas que irá torná-lo mais similar aos sistemas de transmissão, essas características como o sistema malhado no lugar do radial e o surgimento de geração distribuída podem levar a complicações ou melhoras do sistema de distribuição de energia, buscar avaliar essas mudanças é importante para estar preparado para esse novo horizonte, as mudanças em geral são avaliadas pelo ponto de vista do perfil de tensão da linha, sendo assim, os problemas podem ser afundamentos causados por grandes cargas ou sobretensões na linha, tendo os dados que definem as características de um sistema pré-determinado resta buscar soluções para as dificuldades que tendem a aparecer, as soluções propostas nesse trabalho são D-FACTS, Distributed Flexible AC Transmission System, em paralelo a rede, são estudados os dispositivos D-SVC e D-STATCOM, ambos são capazes de melhorar o desempenho do perfil de tensão em regime permanente, sendo que o D-STATCOM apresenta uma representação mais simples e melhor desempenho. Conclui-se a necessidade de dispositivos para melhorar o desempenho da Sistema Elétrico de Potência, mas há necessidade de mais estudos sobre o seu funcionamento.

Palavras-chave: D-FACTS, Sistema de distribuição, geração distribuída, sistema malhado.

## **ABSTRACT**

The Brazilian power distribution system tends to new characteristics in the next few decades which will make it more similar to the power transmission system, this characteristics like meshed power system in the place of the radial system and the emergence of distributed generation can lead to complications or improvements in the power distribution system, evaluate this changes is important to be prepared to this new horizon, the changes in general are measure by the point of view of tension in the power line, meaning that the problems can be tensions sinking caused by overloads or over tensions, having the data that define the characteristics of a pre-determined system finding the solutions for the difficult which show up is the next step, the proposed solutions are the D-FACTS, Distributed Flexible AC Transmission System, connected in parallel with the network, are studied the dispositive D-SVC and the D-STATCOM, both are capable of improving the tension profile being the D-STACOM better for having a simpler representation and better overall performance. Concludes that has a necessity for a dispositive that improves the performance of the Power System, but there also a need for more studies about its operation.

Keywords: D-FACTS, distribution system, distributed generation, meshed system.

## Sumário

<b>Lista de Figuras</b> .....	8
1. INTRODUÇÃO.....	9
1.1. OBJETIVOS .....	12
1.1.1. Objetivos Gerais .....	12
1.1.2. Objetivos Específicos.....	12
1.2. JUSTIFICATIVA .....	13
2. REFERÊNCIAL TEORICO .....	14
2.1. OS DISPOSITIVOS D-FACTS, STATCOM E SVC. ....	14
2.2. MODELOS DE LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO .....	16
2.3. SEP E O SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO .....	18
2.4. GERAÇÃO DISTRIBUIDA .....	19
2.5. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA .....	20
2.6. METODO DE SOLUÇÃO DO PROBLEMA.....	22
3. METODOS APLICADOS E RESULTADOS .....	25
4. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS .....	38
REFERÊNCIAS.....	39

## Lista de Figuras

Figura 1: Projeções para a microgeradores entre 2017 e 2024 (ANEEL 2017).	9
Figura 2: Perdas do sistema de distribuição entre 2000 e 2016 (ABRADEE, 2016) .....	11
Figura 3: Static VAR Compensator, SVC (GITIBIN, 2015) .....	15
Figura 4: Modelo de D-STATCOM (GITIBIN, 2015) .....	16
Figura 5: Modelo de linha curta (FUCHS, 1977) .....	17
Figura 6: Sistema Radial e sistema malhado (PORTELINHA, 2016). .....	19
Figura 7: Fluxo do algoritmo para solução de fluxo de Potência por Newton-Raphson. ....	24
Figura 8: Fluxograma que descreve a obtenção de um valor para $B_{svc}$ . ....	27
Figura 9: Representação do D-STATCOM com um barra com o dispositivo conectado através de um TP. ....	28
Figura 10: Representação Radial e Malhada do sistemas usados na simulação (PORTELINHA, 2016). ....	30
Figura 11: Perfil de Tensão nas barras sem sobrecarga (O Autor). ....	31
Figura 12: Perfil de Tensão nas barras com Sobrecarga (O Autor). ....	31
Figura 13: Perfil de Tensão com D-SVC sem Sobrecarga (O Autor). ....	32
Figura 14: Perfil de Tensão com D-SVC com Sobrecarga (O Autor). ....	33
Figura 15: Perfil de Tensão Com D-STATCOM sem sobrecarga (O Autor). ....	34
Figura 16: Perfil de Tensão Com D-STATCOM com sobrecarga. (O Autor). ...	34
Figura 17: Comparação das tecnologias dos D-FACTS (O Autor). ....	36

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil vê uma crescente vontade da população e do poder público para implementar a geração distribuída, GD, no seu sistema energético, um exemplo é a ação do Ministério de Minas e Energia, MME, que lança o Programa de Geração de Distribuída de Energia Elétrica em 2015 visando exatamente a criação de ambiente promissor para o uso das GDs e movimentar mais 100 bilhões de reais, até 2030. No setor privado o banco Santander reduziu a taxa de financiamento para os dispositivos de geração de energia solar e aumentou a carteira de crédito destes dispositivos.

A ANEEL em 2017 projeta que em 2024 haverá quase novecentas mil unidades de microgeração no Brasil, Figura 1, sendo que a maioria absoluta dessa quantidade é de unidades residenciais, mesmo que esse número mostre um crescimento muito promissor de unidades de geração distribuída, isso representa um decréscimo aproximado de 30% das expectativas antes colocadas, umas das hipóteses para a queda dessa perspectiva é a falta de estímulos para essa modalidade.

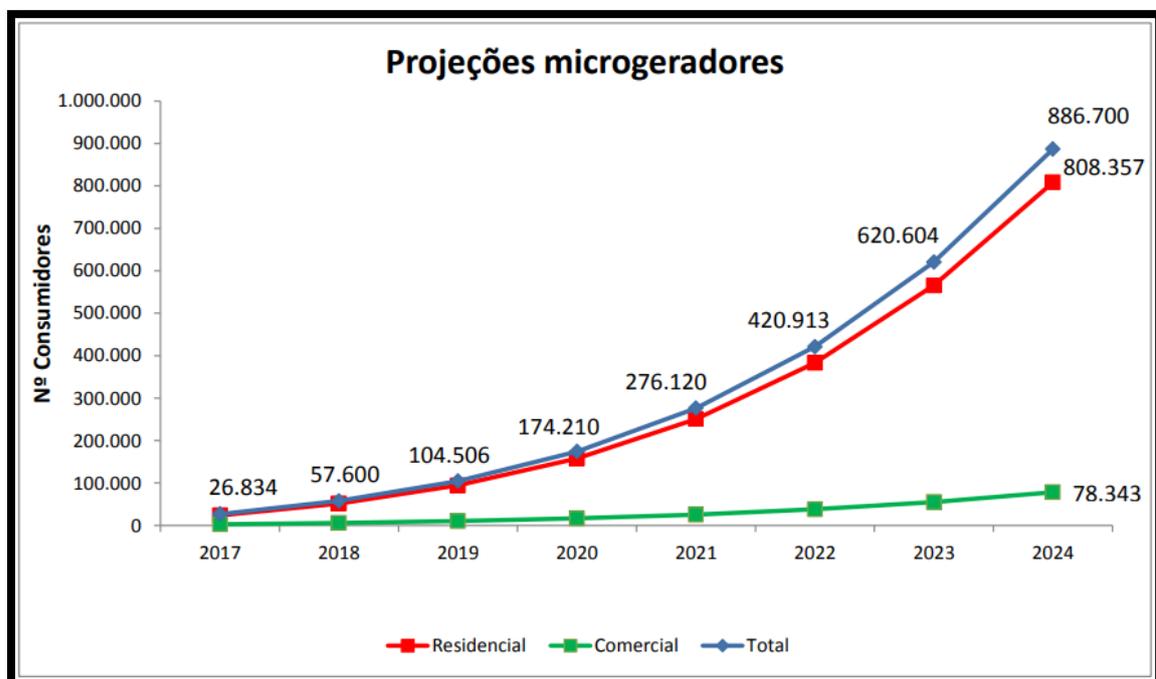


FIGURA 1: PROJEÇÕES PARA A MICROGERADORES ENTRE 2017 E 2024 (ANEEL 2017).

O dado que a ANEEL trás é que a maior parte da energia gerada é por painéis fotovoltaicos, representando 99% das instalações e 70% da energia,

seguida pela eólica com menos de 1% das instalações, mas com quase 10% da energia. Isso significa que a maior parte da energia da geração distribuída prove de uma fonte volátil, que varia por condição do clima e com a hora do dia, causando variações na rede, afirmando a necessidade de controle na distribuição.

Para suportar essas mudanças será necessário repensar e melhorar o sistema de distribuição de energia para que ele seja capaz de suportar as variações de energia causada por esses dispositivos.

O sistema de distribuição de energia apresenta aspectos de controle diferentes do sistema de transmissão de energia, mas recebe menos esforços para o controle de fluxo de potência e de eficiência energética.

Um das características do sistema de distribuição é sua relação R/X, relação entre a parte real e imaginária da impedância, que é mais alta na distribuição, a relação R/X tem efeitos sobre o controle do sistema e qualidade do sistema, pois afeta como o sistema entrega energia ativa e reativa e mantém o nível de potência, GITIBIN e col (2015) aponta já que a esses aspectos podem elevar as chances de não convergência de métodos tradicionais como o Newton-Raphson, método desacoplado rápido e suas algumas de suas versões.

Sem melhorar esses aspectos pode-se aumentar as perdas na distribuição que já são mais graves que as na transmissão, a ABRADDEE, Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica, informa em relatórios anuais suas perdas técnicas e comerciais que giram em média em torno de 13,5%, seus esforços para reduzir as perdas estão nas comerciais, como furtos de energia e fraudes na rede, mas é possível reduzir perdas técnicas, na Figura 2 é possível ver que as perdas técnicas na distribuição são maiores que as comerciais, através de melhorias na distribuição.

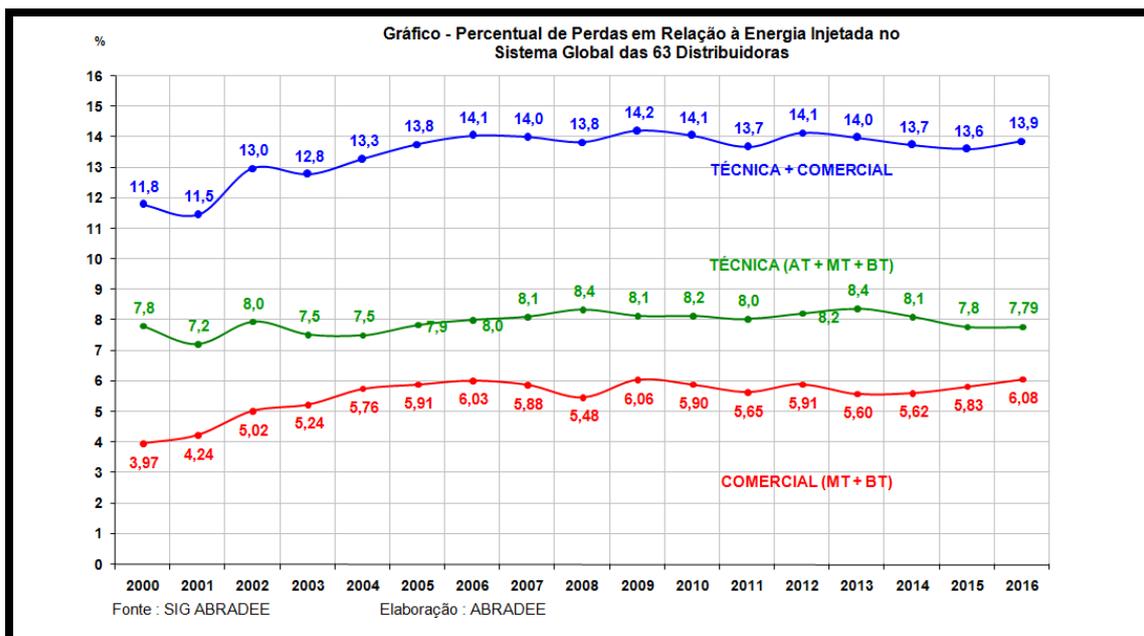


FIGURA 2: PERDAS DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO ENTRE 2000 E 2016 (ABRADEE, 2016)

O sistema de transmissão de energia recebeu os dispositivos de controle de fluxo necessário para apresentar o melhor fator de potência possível, toda via, o sistema de distribuição começa agora a receber estudos para implementação dessas tecnologias, eles chegam somente agora, pois, a rede elétrica de distribuição começa a receber as características da transmissão, como o fluxo bidirecional e a geração de energia, isso se deve precisamente por causa de incremento na rede de tecnologias como a GD.

Para controlar o fluxo de energia e nível de tensão de redes de distribuição se usa dispositivos que tem por objetivo injetar potência reativa na rede para controlar os níveis de fluxo de potência e tensão de barra. Esses dispositivos são conhecidos como D-FACTS, Distributed Flexible AC Transmission System, baseados em dispositivos chamados FACTS, Flexible AC Transmission System, e que tem o funcionamento similar e voltado para a transmissão.

Entre esses dispositivos se destacam o D-STATCOM (Distribution- static synchronous condenser) e o D-SVC (Distribution – Static VAR Compensator), o primeiro pode trocar energia ativa e reativa com a linha de transmissão, a partir de um nível de tensão e ângulo de fase inserido no dispositivo ele muda de referência, assim, mudando quando energia ele troca com a linha.

O D-SVC controla uma impedância que pode ser chaveada em alta velocidade, dessa forma ele pode variar entre um valor capacitivo e indutivo e controlando, por exemplo, o nível de tensão em uma barra do circuito.

GITIBIN e col.(2015, 11f) comparam os dois dispositivos chegam a conclusão que estes tem desempenho similar apesar de suas diferenças construtivas, as diferenças estão no seu desempenho em transiente, que são de menor importância para o estudo, as diferenças de operação resultam em diferenças de implementação em software dessas tecnologias.

Esse trabalho visa mostrar os desempenhos destes dispositivos D-FACTS escolhidos em cenários comparativos múltiplos para analisar a qualidade dos dois citados e compara-los, essa comparação permite analisar a viabilidade dos dispositivos e apontar a necessidade da implementação destes para que o sistema elétrico de distribuição apresente viabilidade.

## **1.1. OBJETIVOS**

Os objetivos que se busca com esse trabalho estão apresentados na sequência.

### **1.1.1. Objetivos Gerais**

Se busca mostrar a iminência da geração distribuída no SEP apontando suas vantagens e como contornar os seus obstáculos utilizando a tecnologia dos D-FACTS.

### **1.1.2. Objetivos Específicos**

- Mostrar um método de operação do D-SVC.
- Mostrar um método de operação do D-STATCOM.
- Comparar as vantagens e desvantagens entre os dois métodos e com a literatura especializada.
- Escolher o melhor método para a melhor tecnologia.
- Usar em problemas de otimização de linhas de distribuição em diferentes topologias, sendo elas: com e sem GD; aplicando topologia linear e malhada.

## **1.2. JUSTIFICATIVA**

No cenário nacional já está estabelecida a vontade de se ir em direção de fontes de energia sustentáveis e GD, para esses novos meios de gerar energia funcionarem dentro do SIN é necessário a atualização do SEP, pois com esse novo aspecto o sistema de distribuição como a ficar mais similar ao sistema de transmissão, a tecnologia do D-FACTS entra exatamente nesse aspecto, permitindo que o sistema opere com múltiplos tipos de variação de tensão causada por intemperes do sistema e pelas próprias características da energia. No perfil brasileiro a maior parte das instalações de GD são painéis solares, mais de 99% das instalações, essa faixa que cresce principalmente entre pessoas físicas para consumo próprio, pela característica intermitente de geração desse tipo se justifica a utilização de GD para o controle de linhas de distribuição. O trabalho busca provar como é funcional essa tecnologia e como ela é importante para que se tenha um sistema elétrico funcional e com menos falhas.

## 2. REFERÊNCIAL TEORICO

### 2.1. OS DISPOSITIVOS D-FACTS, STATCOM E SVC.

Os dispositivos do tipo FACTS, Flexible AC Transmission System, aparecem como soluções para o sistema de transmissão de energia, para manter a qualidade da energia e o melhor fluxo de potência nos sistemas de transmissão, esses dispositivos que funcionam a base de componentes eletrônicos e são implementados em paralelo com a carga ou em série na linha, hoje se vive um momento de estudo para que dispositivos similares sejam implementados na distribuição, esses dispositivos são chamados de D-FACTS. Esse trabalho foca em dois dispositivos que são ligados em paralelo com a carga o D-STATCOM e o D-SVC.

O comportamento dos dispositivos pode ser visto a partir da injeção de reativo na rede, a equação que define o reativo implementado na rede é:  $Q = B \cdot |V|^2$ , descrita por FUCHS (1977). Ao comparar os dispositivos pela descrição de TAYYAB (2015) e GITIBIN (2015) se constata que o SVC atua em cima da susceptância,  $B$ , e que o STATCOM atua na tensão da barra,  $|V|$ . Sendo assim logo de inicio vemos que o potencial de ação do STATCOM é o quadrado de SVC, logo se espera que o STACOM possa atuar com melhor capacidade que o SVC, esse resultado é comprovado pelas análises em regime permanente.

GITIBIN define o dispositivo chamado D-SVC que funciona através de um rápido chaveamento de uma impedância ligada a carga de uma barra do sistema de distribuição, a Figura 3 ilustra o esquemático do dispositivo.

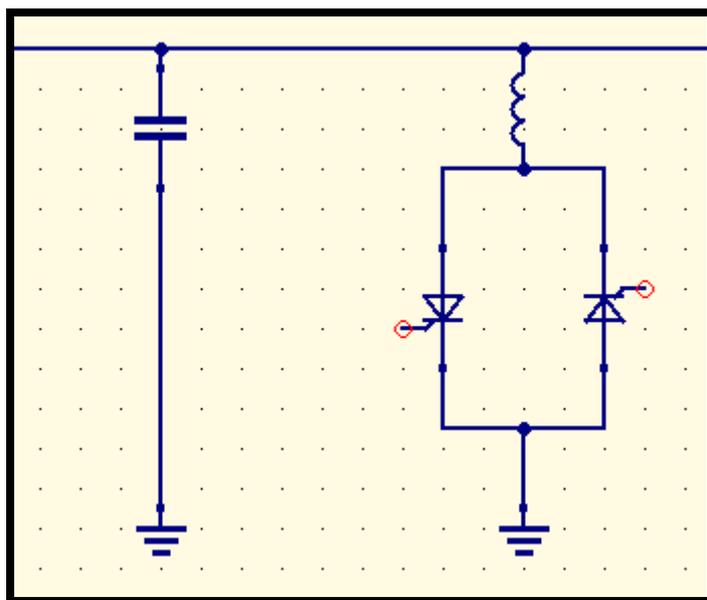


FIGURA 3: STATIC VAR COMPENSATOR, SVC (GITIBIN, 2015)

O dispositivo de controle deve atuar sobre os tiristores decidindo com qual frequência estes devem ser chaveados para gerar um valor de susceptância que melhora o desempenho do nível de tensão ou fluxo de potência na barra do circuito aonde o dispositivo está instalado.

Ainda no artigo de GITIBIN ele diz que as características dos SVC em geral piores que a do STATCOM, principalmente em regime de transição, entre elas estão, maior sensibilidade a harmônicas, resposta mais lenta, não responde bem para variações abruptas, mas em regime permanente ele mantém a qualidade.

O D-STATCOM, Distributed static synchronous compensator, por sua vez é construtivamente mais complexo, isso se reflete no seu funcionamento, que apresenta os já citados melhores desempenhos. Uma descrição básica de seu funcionamento seria que ele é um dispositivo de injeção de corrente controlável ligado em paralelo a carga, a Figura 4 mostra o esquemático de seu design. O D-STATCOM é capaz de trocar energia ativa e reativa com a linha de distribuição. Essa troca de energia pode ser controlada a partir da magnitude e ângulo de fase da tensão do D-STATCOM.

Se o nível de tensão do D-STATCOM é mantido acima da tensão da linha de distribuição o dispositivo vai fornecer energia reativa para a linha e se o

ângulo da tensão do dispositivo estiver tendendo aos valores de tensão da linha o D-STATCOM vai fornecer energia ativa, portanto, controlando a magnitude e o ângulo da tensão do D-STATCOM ele pode suprir energia ativa e reativa para a linha de distribuição.

O D-STATCOM é um equipamento eletrônico de potência, mas não se utiliza de chaveamentos de tiristores, sendo assim é mais confiável por não gerar harmônicos.

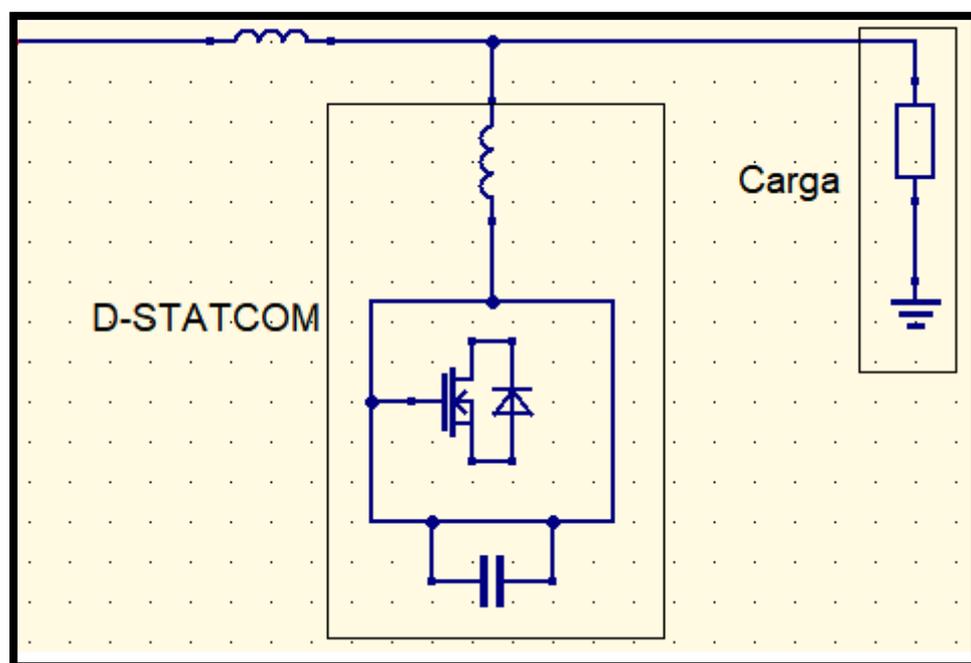


FIGURA 4: MODELO DE D-STATCOM (GITIBIN, 2015)

Controla os níveis de tensão e fluxo da linha de transmissão, por suas características essa carga será muito mais reativa do que ativa.

## 2.2. MODELOS DE LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO

As linhas de distribuição são sempre menores que 80km de extensão, portanto, para ser modeladas usa-se um modelo pi de linhas curtas, descrito por (FUCHS, 1977). Esse modelo considera apenas os primeiros termos de cada da série que descreve uma linha de transmissão de energia.

Nesse modelo a capacitância da linha é muito pequena e pode ser desprezada, pois, não traz impactos sobre o resultado. A linha acaba sendo apresentada por dois parâmetros em série, uma resistência e uma indutância.

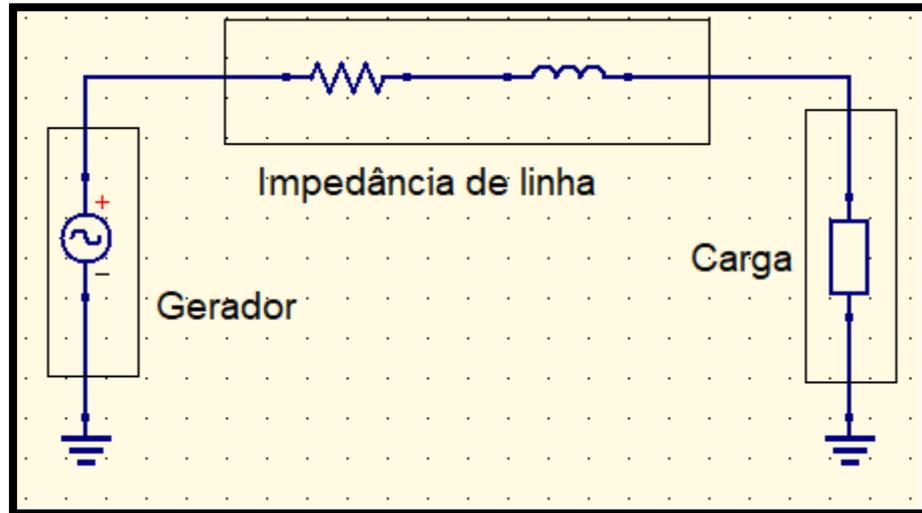


FIGURA 5: MODELO DE LINHA CURTA (FUCHS, 1977)

$$Z = (R + j\omega L)l,$$

Onde  $Z$  é a impedância série em ohms,  $R$  é a resistência por unidade de comprimento em ohms por quilometro,  $L$  é a indutância por unidade de comprimento em Henrys por quilometro,  $\omega$  é a velocidade angular em radianos por segundo e por fim  $l$  é o comprimento da linha. Para tornar mais simples se define  $x = \omega L$ , pois a frequência angular não deve variar dentro de uma linha, e  $r = Rl$ .

As equações que definem o modelo pi são:

$$V_S = V_R + ZI_R \text{ e}$$

$$I_S = I_R,$$

na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix},$$

$V_s$  e  $I_s$  são tensão e corrente nas barras de entrada e  $V_R$  e  $I_R$  são a tensão e corrente nas barras de saída, respectivamente.

### **2.3. SEP E O SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO**

Em termos gerais o Sistema Elétrico de Potência, SEP, do Brasil é dividido em geração, transmissão e distribuição. Esse trabalho deverá explicar superficialmente os sistemas de geração e transmissão e explanar mais sobre a distribuição.

A geração são os mecanismos usados para gerar a energia usada no SEP brasileiro, a geração do Brasil em sua maior parte é feita em grandes blocos de energia longe dos sistemas consumidores, esses blocos em maior parte das vezes são gerados com energia hidroelétrica a 60 Hz, frequência usada domesticamente no Brasil, algumas usinas são termoelétricos, usando combustão tipicamente de fontes fósseis, muitos dos sistemas térmicos no Brasil não estão interligados no Sistema Integrado Nacional principalmente na região norte do país, por último temos uma variedade enorme de fontes geradoras como energia eólica, solar, marítima, geotermal, duas importantes nucleares em Angra dos Reis.

A transmissão são os sistemas de altíssimas tensões que tem por objetivo levar a energia aos sistemas consumidores, linhas de tensão de transmissão podem chegar a 500km e tensões de 250kV, eles conectam as unidades geradoras e dão estabilidade ao sistema, tem poderosíssimos transformadores e sistemas de controle para garantir a qualidade do sistema como um todo.

Por fim se tem a distribuição, é a parte do sistema próxima aos consumidores, com baixas tensões, muitas vezes já no nível de consumo, tem sido desleixado muitas vezes pelas próprias operadoras, os dispositivos transformadores quase nunca recebem manutenção, optando pela troca quando apresentam defeitos fatais, não há uma forma eficaz de controle de energia do sistema de distribuição ainda.

Na distribuição costuma se considerar apenas uma barra conectada com geração de energia, a distribuição é puramente radial, isso significa que o fluxo de energia acontece em apenas um sentido, um sistema malhado em que as

barras são conectadas de forma que se obtém um sistema circular é proposto como uma nova configuração, Figura 6, que aproveita melhor o sistema, sendo assim quando mais distante dessa barra maior a queda de tensão em relação a ideal, assim como na transmissão uma parte da energia é perdida através de efeitos físicos de operação, essa perda é chamada de perda técnica, alguns aspectos dela são irremediáveis, como a perda por efeito Joule, toda via a queda de tensão é tratável.

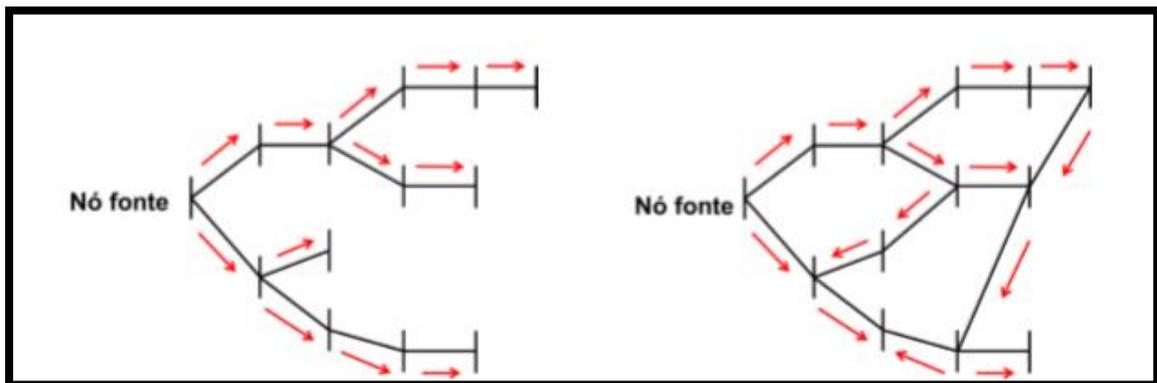


FIGURA 6: SISTEMA RADIAL E SISTEMA MALHADO (PORTELINHA, 2016).

## 2.4. GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A Geração Distribuída, GD, são as tecnologias de geração de energia aplicadas por consumidores locais, sejam essas pessoas físicas ou jurídicas, então se entende como geração distribuída um indivíduo que instala na sua casa um painel solar, ou uma empresa que tem um pequeno gerador para consumo próprio.

A GD é quase que exclusivamente uma forma de microgeração, a NTC905200, define microgeração como:

Central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.

A cogeração qualificada é a cogeração que atende as normas da ANEEL, a cogeração em si é a produção simultânea e sequenciada de energia elétrica e mais formas de energia, a partir de um combustível.

Mais de 99% das instalações de geração distribuída do Brasil são painéis solares, gerando 70% da energia, por isso seu exemplo é o mais importante de ser tratado. Políticas públicas e iniciativas privadas buscam já incentivar a GD.

A GD se torna um atrativo por permitir ao usuário reduzir sua conta de luz, após o custo inicial de instalação a GD costuma exigir pouca manutenção e ser uma fonte confiável de energia, ou seja, que apresenta poucas falhas, outro fator que atrai o consumidor ao GD é o pouco impacto ambiental que causa na sociedade, os painéis solares não degradam grandes áreas como as usinas elétrica e não emitem gases de efeito estufa como as termoelétricas, painéis solares após sua vida útil podem ser reciclados minimizando seus impactos.

## 2.5. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

O objetivo é encontrar valores de magnitude e ângulo das tensões das barras dos sistemas em análise e com eles é possível encontrar as potências injetadas nas barras, para tal primeiro é necessário modelar o problema, primeiro se caracteriza cada barra que apresenta quatro variáveis, duas incógnitas e duas variáveis, elas são:

**V<sub>k</sub>** – Magnitude de tensão da barra k,

**θ<sub>k</sub>**- Ângulo da tensão da barra k,

**P<sub>k</sub>** – geração menos carga ativa na barra k,

**Q<sub>k</sub>** – geração menos carga reativa na barra k.

Se adota a seguinte lógica para distinguir as barras a partir das variáveis e incógnitas escolhidas para cada:

**Barras tipo PQ** – Variáveis P<sub>k</sub> e Q<sub>k</sub>, incógnitas V<sub>k</sub> e θ<sub>k</sub>. Estas são as barras que apresentam apenas cargas conectadas, são geralmente a maioria em sistemas convencionais.

**Barras tipo PV** – Variáveis P<sub>k</sub> e V<sub>k</sub>, incógnitas Q<sub>k</sub> e θ<sub>k</sub>. As barras PV são barras de geração, onde se conhece o nível de tensão sendo gerado no sistema, barras com GD ou geradores são do tipo PV, portanto, sistemas de distribuição mais modernos iram ter mais barras PV.

**Barras tipo V $\theta$**  – Variáveis  $V_k$  e  $\theta_k$ , incógnitas  $P_k$  e  $Q_k$ . Barras de referência do sistema, está associado geralmente com uma barra de grande geração, essa barra tem por objetivo ser o referencial de ângulo do sistema para o cálculo recebendo assim geralmente o ângulo zero.

As potências ativas e reativas em cada barra são iguais aos somatórios dos fluxos de potência ativa e reativa que deixam cada barra através daquilo que nela está conectado. Isso deriva das leis de Kirchoff e quer dizer que em cada barra o valor de potência que nela aparece pode ser descrito a partir das potências que fluem em direção a ela. Essa expressão é dada matematicamente por:

$$P_k = V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \text{ e}$$

$$Q_k = V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) .$$

**$V_k$  e  $V_m$**  – magnitudes de tensão nas pontas do ramo entre  $k$  e  $m$ ;

**$\theta_k$  e  $\theta_m$**  – ângulos de tensão nas pontas do ramo entre  $k$  e  $m$ ;

**$G_{km}$ ,  $B_{km}$**  – coeficientes da matriz de admitância, são parâmetros físicos das linhas analisadas.

**$K$**  – Barra  $k$  e suas vizinhas;

Para resolver o problema este tem que ser dividido em dois, o subsistema 1 que busca resolver uma matriz que tem como incógnitas magnitude e ângulo da tensão nas barras, ou seja, as incógnitas das barras PQ,  $V_k$  e  $\theta_k$ ,  $\theta_k$  na barra PV e na barra V $\theta$  nada será resolvido.

O subsistema 1 será uma matriz que tem o tamanho de duas vezes as barras PQ mais a quantidade de barras PV, isso se deve a quantidade de incógnitas a serem resolvidas para essas barras.

$$g(V, \theta) = \begin{bmatrix} \partial P & \partial Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{esp} - P(V, \theta) \\ Q_{esp} - Q(V, \theta) \end{bmatrix} = 0$$

**$P_{esp}$**  – vetor de injeção de potência ativa das barras PQ e PV.

**$Q_{esp}$**  – vetor de injeção de potência reativa das barras PQ.

$\Delta P$  – desvio de potência ativa.

$\Delta Q$  - desvio de potência reativa.

Para solucionar esse sistema deve ser utilizado um método iterativo, pois o sistema é não-linear, além disso sobra ainda as injeções de potência ativa e reativa na barra  $V\theta$  e reativa nas barras PV que configuram o subsistema 2, toda via, usando os valores de magnitude e ângulo de tensão estes podem ser obtidos diretamente pelas equações de determinam as potências por barra.

Modelado o problema, o Matpower pode utilizar uma variedade de métodos para encontrar as incógnitas que definem o problema de fluxo de potência.

## 2.6. METODO DE SOLUÇÃO DO PROBLEMA

O método escolhido para solucionar dentro do MatPower o problema de fluxo de potência é o método de Newton-Raphson. Este método é iterativo, como já foi dito o problema tratado aqui é não-linear, por essa característica que métodos como o que vai ser apresentado são necessários, o apresentado aqui tem base em Monticelli (1983).

O método consiste em determinar o vetor  $\Delta x$  que representa um vetor de correção da magnitude e ângulo de tensão nas barras, para determinar  $\Delta x$  deve-se encontrar a solução de:

$$g(x^v) = -J(x^v)\Delta x^v$$

Onde  $J(x)$  é a matriz Jacobiana e “v” o número de iterações realizadas, se obtém está matriz realizando as derivadas parciais de todas as funções, no caso são as injeções de potência, por todas variáveis, que são o ângulos e magnitudes das tensões. A matriz resultante é:

$$J(x) = J(V, \theta) = \begin{bmatrix} \frac{\partial(\Delta P)}{\partial \theta} & \frac{\partial(\Delta P)}{\partial V} \\ \frac{\partial(\Delta Q)}{\partial \theta} & \frac{\partial(\Delta Q)}{\partial V} \end{bmatrix} = \begin{vmatrix} H & N \\ M & L \end{vmatrix}$$

Os elementos **H**, **N**, **M** e **L** são dados por duas expressões, uma para elementos em que  $k$  é diferente de  $m$ , e outro para  $k$  igual a  $m$ :

$$H_{km} = \partial P_k / \partial \theta_m = V_k V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}),$$

$$H_{kk} = \partial P_k / \partial \theta_k = -Q_k - V_k^2 B_{kk}$$

$$N_{km} = \partial P_k / \partial V_m = V_k (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km})$$

$$N_{kk} = \partial P_k / \partial V_k = V_k^{-1} (P_k + V_k^2 G_{kk})$$

$$M_{km} = \partial Q_k / \partial \theta_m = -V_k V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km})$$

$$M_{kk} = \partial Q_k / \partial \theta_k = P_k - V_k^2 G_{kk}$$

$$L_{km} = \partial Q_k / \partial V_m = V_k (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km})$$

$$L_{kk} = \partial Q_k / \partial V_k = V_k^{-1} (Q_k + V_k^2 G_{kk})$$

O que deve acontecer é que em cada iteração aparece um valor de  $\Delta V$  e  $\Delta \theta$  que corresponde a um valor incremental para o valor de magnitude e ângulo da tensão.

$$\begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix}$$

$$\Delta P(V^v, \theta^v) = H(V^v, \theta^v) \Delta \theta^v + N(V^v, \theta^v) \Delta V^v$$

$$\Delta Q(V^v, \theta^v) = M(V^v, \theta^v) \Delta \theta^v + L(V^v, \theta^v) \Delta V^v$$

$$\theta^{v+1} = \theta^v + \Delta \theta^v$$

$$V^{v+1} = V^v + \Delta V^v$$

O algoritmo para solução é apresentado na Figura 7:

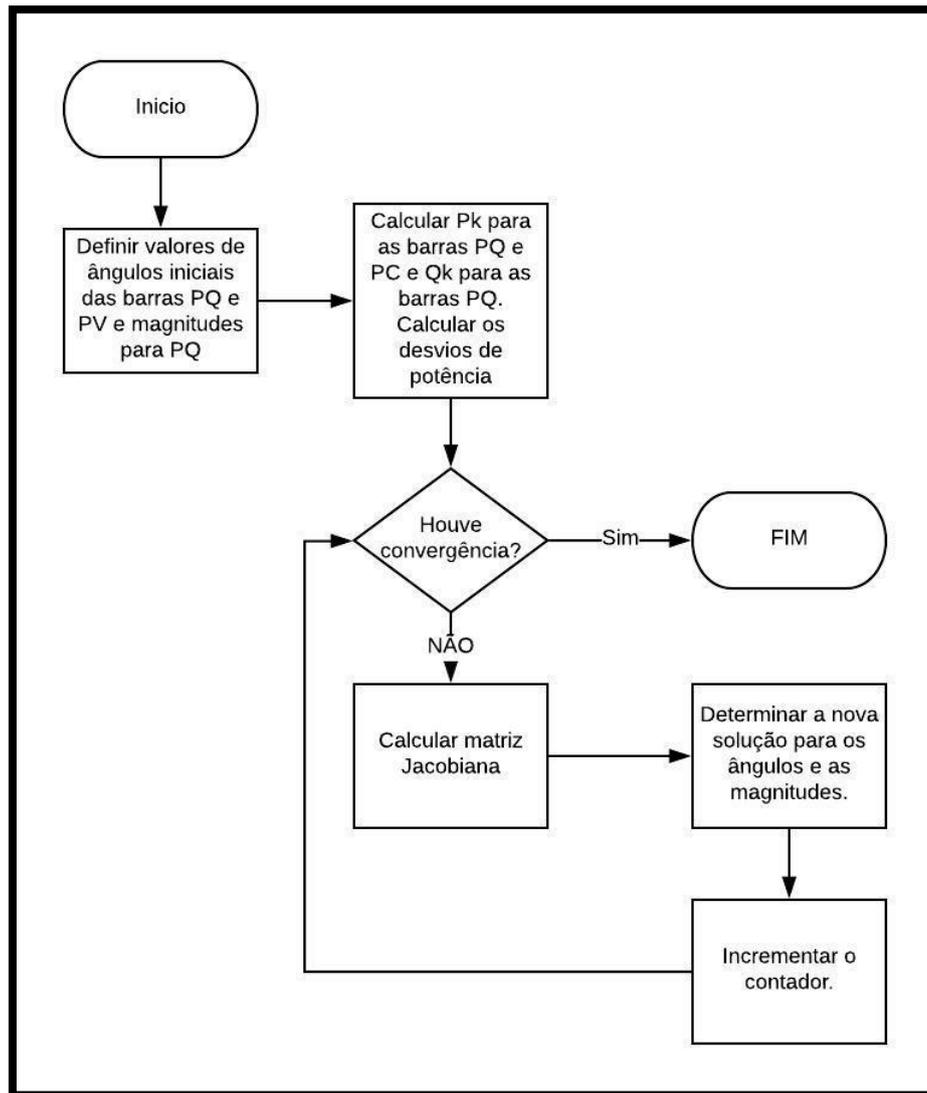


FIGURA 7: FLUXO DO ALGORITMO PARA SOLUÇÃO DE FLUXO DE POTÊNCIA POR NEWTON-RAPHSON.

Ao definir os valores de ângulo iniciais, tipicamente se usa zero, pois estes não saem muito dessa margem, os valores de magnitude são tipicamente 1 aproveitando da normalização por unidade. Ao realizar essa operação se resolve o subsistema 2.

Quando há convergência ao resultado pode-se cessar o processo.

Depois de calcular a matriz Jacobiana usa-se esses resultados para encontrar uma nova solução para os ângulos e magnitudes de tensão, a solução do sistema linear resulta no valor de  $\Delta V$  e  $\Delta \theta$ .

### 3. METODOS APLICADOS E RESULTADOS

#### 3.1. FERRAMENTAS UTILIZADAS

A plataforma usada para simular a rede de distribuição desse trabalho é o MatPower 6.0, software livre de simulação do problema de fluxo de potência em regime permanente.

MatPower roda no GNU Octave, que é uma linguagem computacional de alto nível feita para computação matemática, solucionando problemas lineares e não-lineares utilizando métodos numéricos. Com interface em linhas de comando é altamente compatível com o MatLab, porém é um software livre.

#### 3.2. SIMULAÇÃO DOS D-FACTS

##### 3.2.1. D-SVC

O método usado para o D-SVC é sutilmente diferente do que se vê na literatura geralmente, por exemplo, GITIBIN (2015) usa uma modelagem que depende de um ângulo chaveamento de tiristores para determinar  $B_{SVC}$ . Define-se por uma equação que contém as variáveis do dispositivo e um valor de gatilho para os tiristores do D-SVC que determinam a injeção de potência, movendo esse valor de gatilho se consegue determinar o valor da injeção de potência na linha, assim pode ter mecanismos de controle atuando sobre esse gatilho, portanto, é importante comparar o método aplicado nesse ao da literatura para que se tenha garantia da veracidade dos dados recolhidos. GITIBIN (2015) usa a seguinte expressão:

$$B_{SVC} = \frac{1}{X_c X_L} \left[ X_L - \frac{X_c}{\pi} [2(\pi - \alpha_{SVC}) + \sin(2\alpha_{SVC})] \right],$$

$X_C$  representa uma impedância capacitiva em paralelo e  $X_L$  representa uma indutância capacitiva conectada em série as chaves tiristorizadas,  $\alpha_{SVC}$  é o ângulo de gatilho do D-SVC, para múltiplos ângulos haverá uma potência injetada diferente pelo valor de  $B_{SVC}$  determinado, o algoritimo implementado nesse projeto pula essas etapas, sendo assim mais rápido para determinar o valor de  $B_{SVC}$ , mas menos condizente com a realidade.

Para simular a operação do D-SVC são eleitas barras de interesse, essas barras apresentam o desempenho inferior e importância na qualidade do sistema, nessas barras é implementado um valor de susceptância em paralelo, geralmente capacitiva, o MatPower coloca essa susceptância em forma de uma potência que é injetada na barra.

No modelo aplicado nesse trabalho se usa um algoritmo que decide sozinho o valor desta susceptância, chamada de  $B_{svc}$ . esse método busca uma situação pré-determinada para tensão da barra que está instalado o D-SVC, assim deve se tomar cuidados para que o nível de potência injetada não seja grande demais causando o efeito oposto do que se espera no sistema. No fluxograma da Figura 5 está o processo usado para determinar o valor de  $B_{svc}$ .

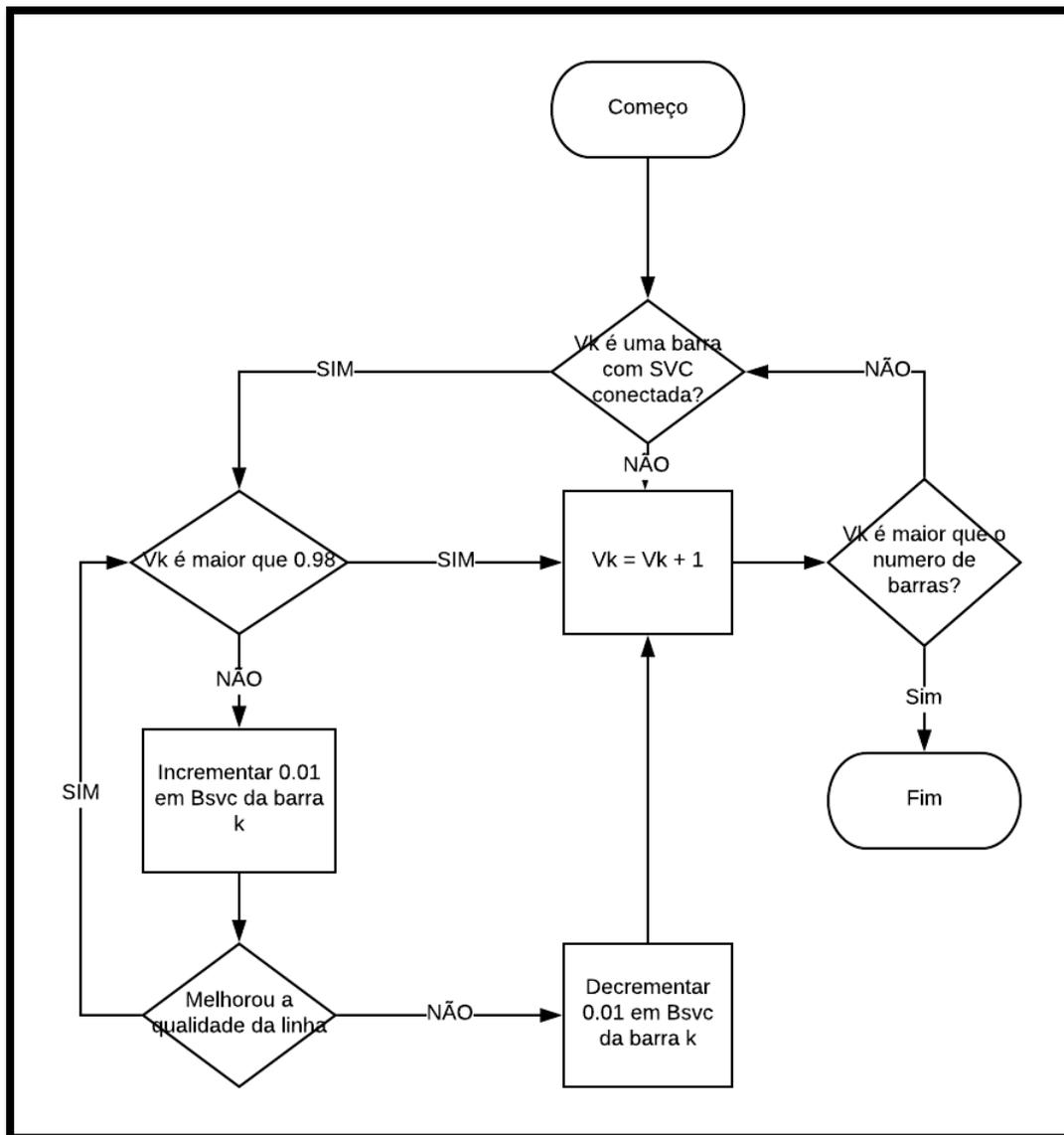


FIGURA 8: FLUXOGRAMA QUE DESCREVE A OBTENÇÃO DE UM VALOR PARA Bsvc

O fluxograma mostra a seguinte lógica: o sistema começa fazendo uma varredura para encontrar uma barra que tenha um D-SVC conectada, ao encontrar ele checa se essa barra alcançou o valor de tensão em p.u. pré-estabelecido, se não tiver alcançado ele incrementa um valor de Bsvc, que por sua vez aumenta a injeção de potência na linha, se essa injeção de potência for o suficiente para alcançar o valor de tensão p.u. ele vai para a próxima barra, se não alcançar ele incrementa Bsvc de novo para tentar chegar no valor, se em um acréscimo ele acabar prejudicando a qualidade do perfil de tensão, ele decrementa um valor de Bsvc e passa para a próxima barra com D-SVC, repete o processo até varrer todas as barras.

### 3.2.2. D-STATCOM

O D-STATCOM tem uma implementação muito mais simples que o D-SVC, é apenas necessário que se defina uma nova barra que representa o D-STATCOM, essa barra tem a tensão ideal do sistema de 1 p.u., essa nova barra é conectada à barra que possui o D-STATCOM, nos parâmetros de linha entre a barra nova e a barra D-STATCOM se inclui os valores de indutância do TP, transformador de potencial, necessário para conectar o dispositivo na barra.

Assim o D-STATCOM é representado por uma linha e uma barra como visto na Figura 6.

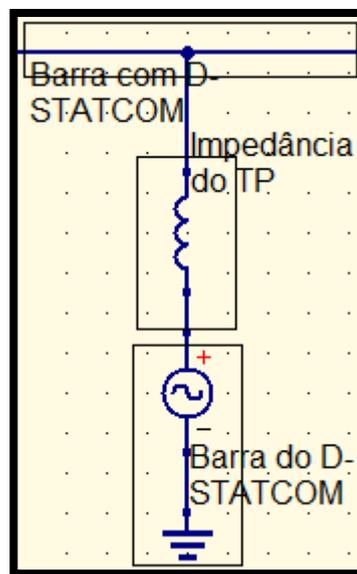


FIGURA 9: REPRESENTAÇÃO DO D-STATCOM COM UM BARRA COM O DISPOSITIVO CONECTADO ATRAVÉS DE UM TP.

O D-STATCOM sempre irá apresentar o valor ideal de tensão na barra que foi conectado, nas barras próximas eleva notoriamente a qualidade do sistema é elevado, toda via, deve-se se estar atento as cargas conectadas e a quantidade de energia implementado no sistema.

### 3.3. SISTEMAS SIMULADOS

O sistema simulado é um caso para um sistema de 69 barras com valores compatíveis com a distribuição, todo sistema está em 13.8 kV, a configuração do



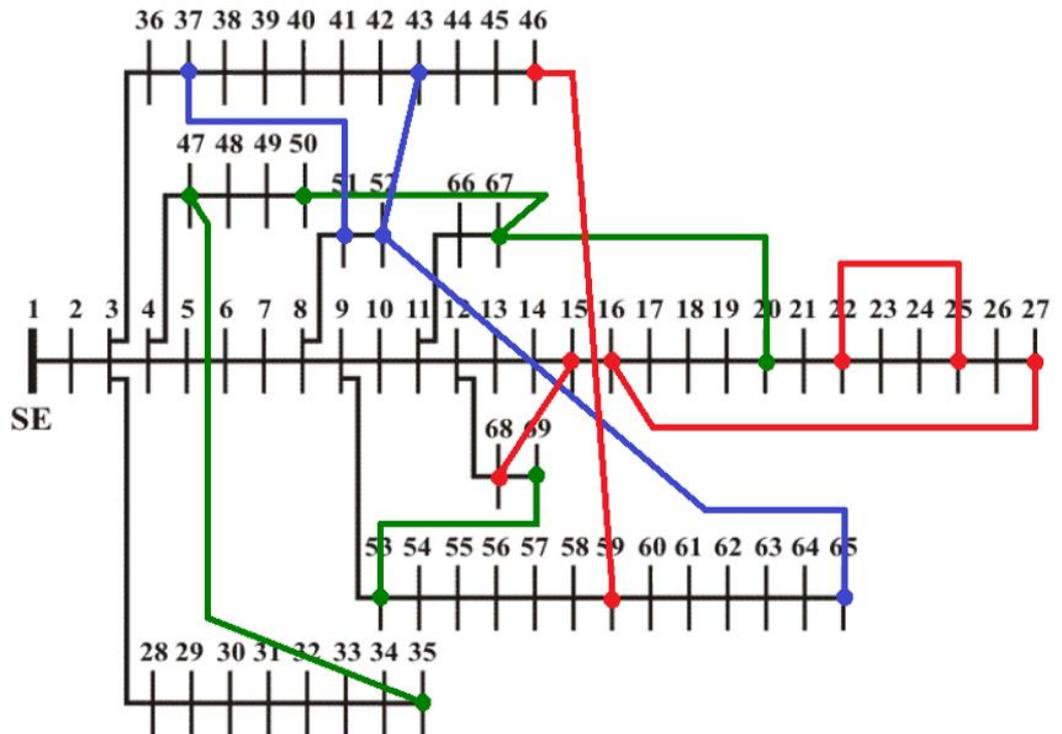
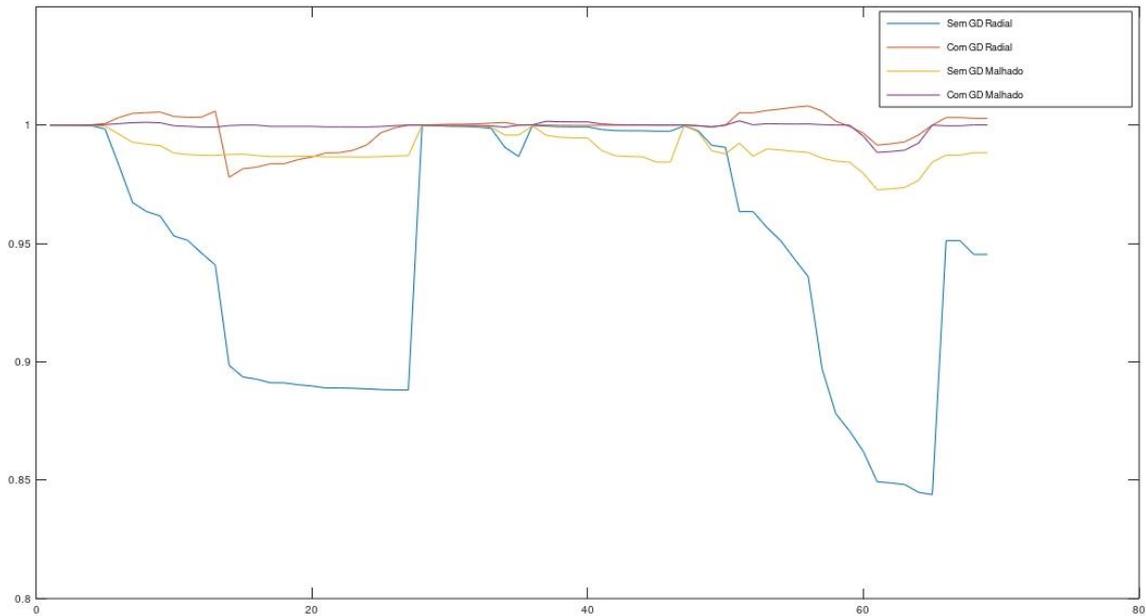


FIGURA 10: REPRESENTAÇÃO RADIAL E MALHADA DO SISTEMAS USADOS NA SIMULAÇÃO (PORTELINHA, 2016).

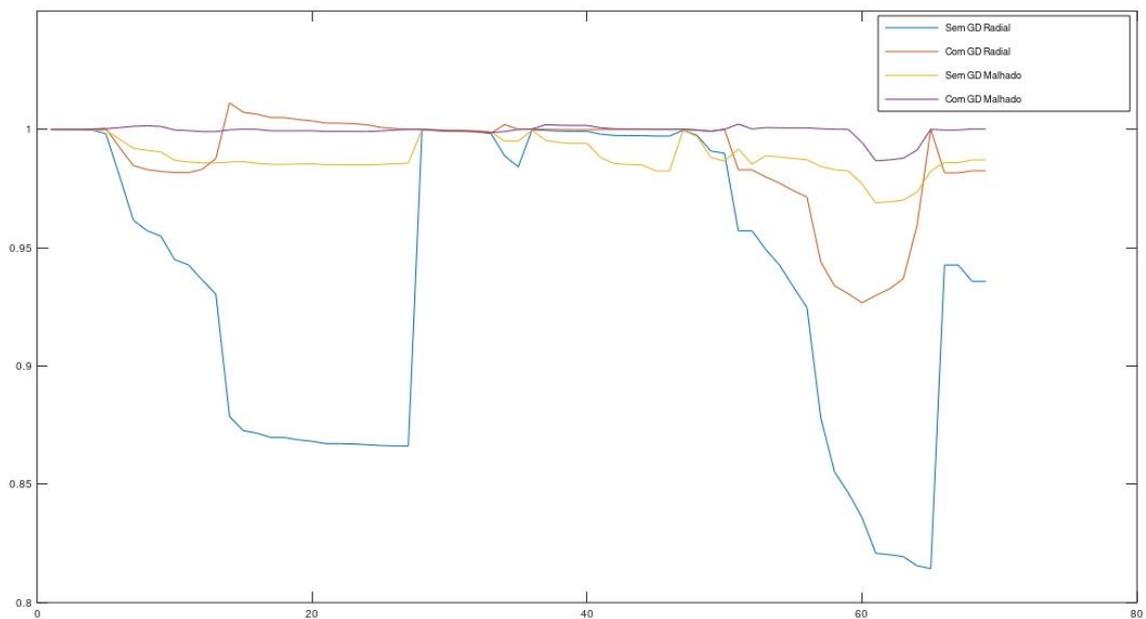
Quando se simula o sistema com GD as seguintes barras foram escolhidas aleatoriamente: 27, 35, 46, 50 e 65. Elas são reclassificadas como barras do tipo PV, tem sua capacidade de geração limitada em relação a barra de geração original.

### 3.4. RESULTADOS

Os resultados seguem em linhas gerais o esperado do sistema, nos sistemas radiais as tensões tendem a sofrer maior queda da sua magnitude quanto mais longe estão das barras geradoras, na Figura 11 e Figura 12 vemos os dois perfis de tensão, a magnitude de tensão por barra



**FIGURA 11: PERFIL DE TENSÃO NAS BARRAS SEM SOBRECARGA (O AUTOR).**



**FIGURA 12: PERFIL DE TENSÃO NAS BARRAS COM SOBRECARGA (O AUTOR).**

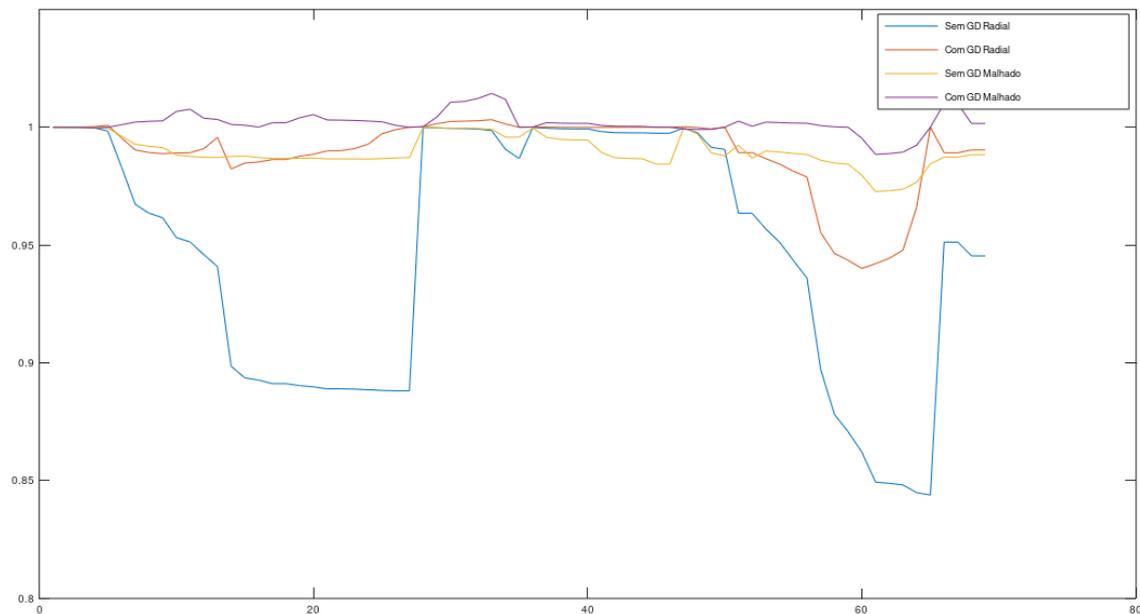
Quando o sistema é radial e sem geração distribuída a queda de tensão é muito abrupta, as barras que estão mais distantes da geração de energia podem ter quedas superiores a 20%, o aumento da carga desse sistema prejudica ainda mais o nível de tensão.

O sistema malhado permite que os níveis de tensão fiquem melhor distribuídos na rede, nenhuma parte fica realmente distantes da fonte geradora.

A GD permite elevar a potência disponível na rede permitindo um melhor perfil de tensão do sistema.

Tanto a GD quanto o fato de ser malhado aumentam a qualidade do perfil de tensão do sistema de energia, quando os dois estão associados se tem um perfil de tensão excelente, muito próximo de uma situação ideal.

Na Figura 13 e Figura 14 se observa o mesmo sistema com um D-SVC operando nas barras 27 e 65.



**FIGURA 13: PERFIL DE TENSÃO COM D-SVC SEM SOBRECARGA (O AUTOR).**

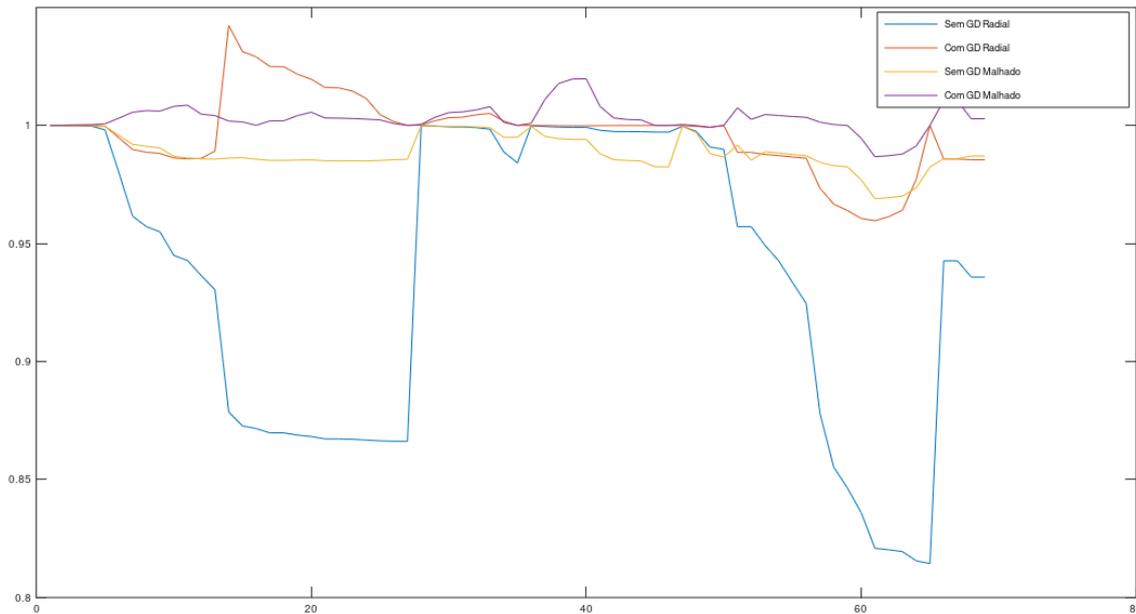


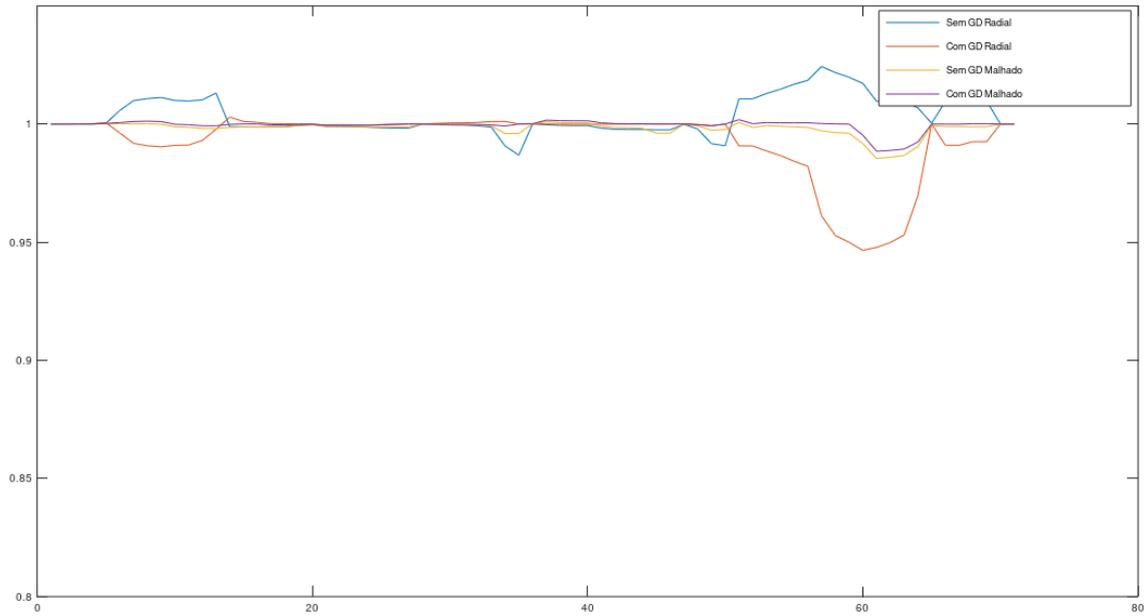
FIGURA 14: PERFIL DE TENSÃO COM D-SVC COM SOBRECARGA (O AUTOR).

Logo no início podemos ver uma melhora significativa da qualidade das magnitudes de tensão no caso sem GD e na linha radial, esse efeito é o esperado para essa configuração, toda via, quando a GD é inserida no caso radial se tem sobretensão na linha, a hipótese do que está ocorrendo é que com aumento de energia disponível a rede tente não ter aonde escoar-la, quando há a situação de GD, mas o circuito está malhado a energia se distribui melhor, chegando próximo a uma situação ideal.

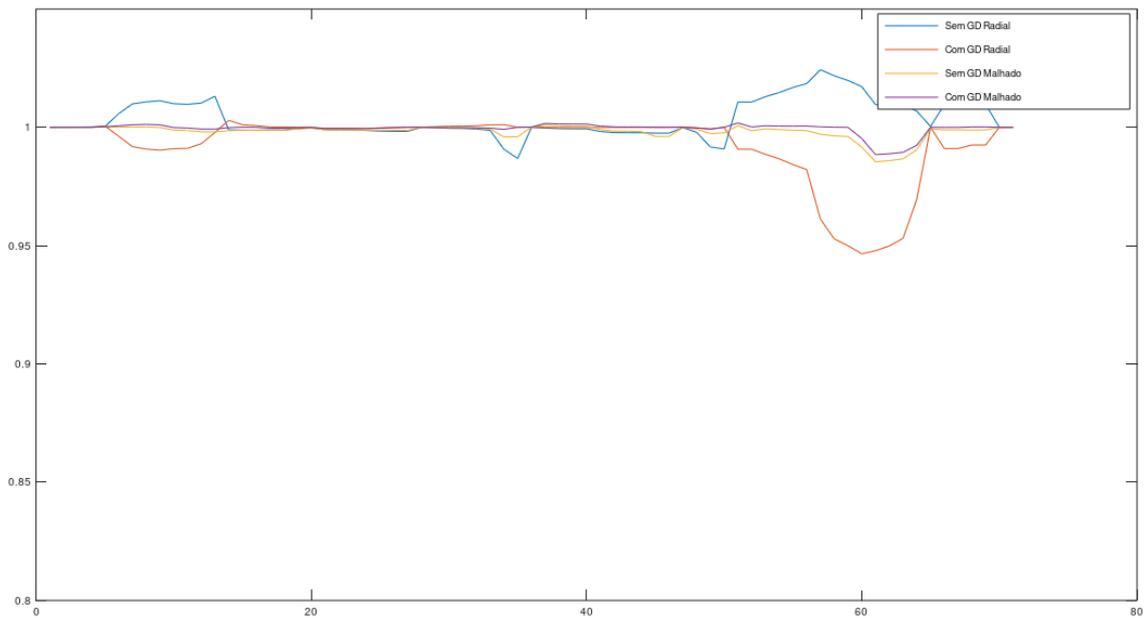
O algoritmo aplicado só permite que o D-SVC opere em capacitivo, sendo assim, mais um agravante para sobrecargas, pois é necessária uma aplicação indutiva para corrigir esses problemas.

Quando se faz o aumento de carga da rede em 20% há o esperado afundamento de tensão da linha, mas para as situações de sobrecarga esse afundamento acaba por melhorar a condição do perfil de tensão.

Nos últimos casos testados coloca-se nas barras 27 e 65 o D-STATCOM, os efeitos podem ser vistos nas Figuras 15 e 16.



**FIGURA 15: PERFIL DE TENSÃO COM D-STATCOM SEM SOBRECARGA (O AUTOR).**



**FIGURA 16: PERFIL DE TENSÃO COM D-STATCOM COM SOBRECARGA. (O AUTOR).**

Como indicado pela literatura o D-STATCOM gerou os melhores cenários, ele permitiu injetar potência ativa tanto capacitiva quanto indutiva, melhorando o desempenho em todos os cenários.

Os demais efeitos observados em outros casos estão aqui também, porém com menor efeito pela ação do D-STATCOM que melhorou a qualidade deste perfil de tensão.

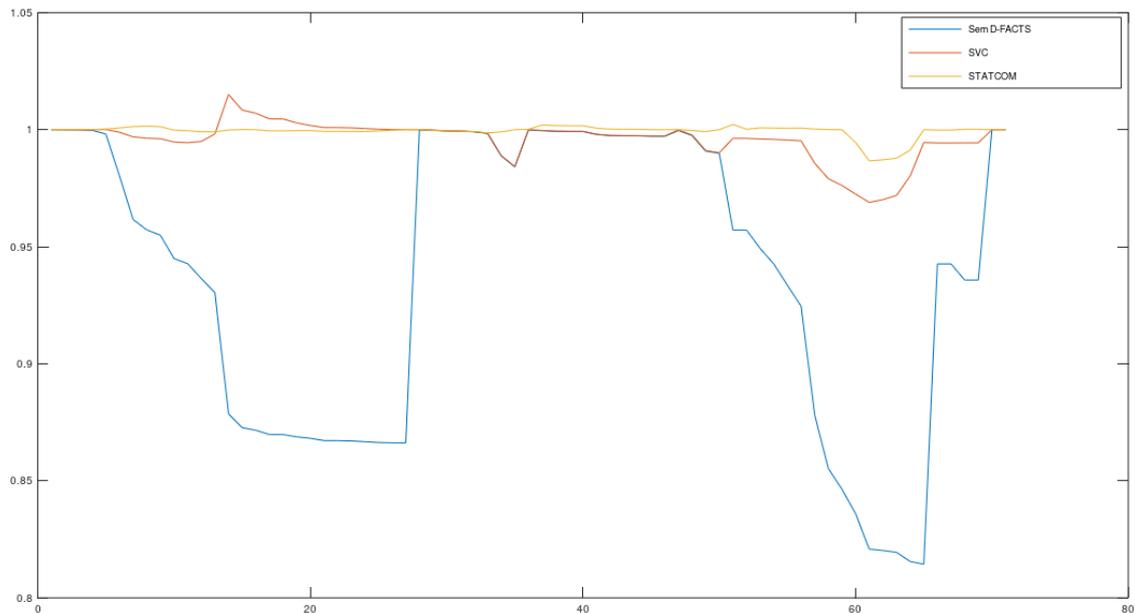
Comparando o D-SVC e o D-STATCOM o D-STATCOM teve o desempenho melhor, em todos os cenários sempre, isso se dá pelo fato do seu mecanismo de funcionamento que injeta a potência sempre ideal e atua sobre a tensão do sistema, sendo assim muito mais efetivo.

Uma forma simples de observar a atuação dos dois dispositivos é através da equação que define a injeção de potência reativa na linha por uma barra,

$$Q = |V|^2 * B.$$

O D-SVC atua sobre a susceptância, tipicamente aumentado, o que ocorre é que a magnitude de tensão da expressão atua de forma quadrática limitando sua eficácia, portanto, o D-STATCOM que atua sobre a magnitude de tensão vai ter um efeito muito mais notável no sistema.

Na Figura 17 há a comparação das duas tecnologias empregadas e também há o caso de não haver D-FACTS, esse exemplo torna claro a qualidade de cada tecnologia em comparação.



**FIGURA 17: COMPARAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DOS D-FACTS (O AUTOR).**

Na Tabela 1 há uma comparação entre algumas barras, estas barras estão em condição de sobrecarga, essa comparação permite ver a melhora dos valores de magnitude de tensão quando usada a tecnologia D-FACTS.

<b>BARRA</b>	<b>S/ D-FACTS</b>	<b>D-SVC</b>	<b>D-STATCOM</b>
6	0,9802	0,9989	1,0007
7	0,9616	0,9969	1,0013
8	0,9572	0,9964	1,0015
28	0,9999	1,0000	1,0000
29	0,9997	0,9998	0,9997
30	0,9994	0,9995	0,9994
44	0,9974	0,9974	1,0001
45	0,9972	0,9973	1,0000
46	0,9972	0,9973	1,0000
63	0,8194	0,9719	0,9878
64	0,8155	0,9802	0,9912
65	0,8144	0,9945	1,0000

**TABELA 1: COMPARAÇÃO DOS VALORES DE TENSÃO COM AS TECNOLOGIAS D-FACTS (O AUTOR).**

Para melhor visualizar os efeitos das tecnologias na Tabela 2 está as médias dos desvios em cada um dos casos, apenas os valores absolutos foram considerados, sem D-FACTS, com D-SVC e com D-STATCOM.

	Sem D-FACTS	D-SVC	D-STATCOM
Soma dos desvios	4,37255	0,39470	0,08654
Média dos desvios	0,06337	0,00572	0,001254

TABELA 2: DIMINUIÇÃO DOS DESVIOS CAUSADO POR CADA TECNOLOGIA D-FACTS (O AUTOR).

Dividindo a média dos desvios sem D-FACTS com cada uma das duas tecnologias pode-se vislumbrar um fator de melhora da qualidade do perfil de energia por cada tecnologia. O D-SVC melhora a qualidade da média do desvio em 11,05 vezes e o D-STATCOM melhora a qualidade do perfil de tensão em 50,53, o D-STATCOM melhora o perfil de tensão em relação ao D-SVC em 4,56 vezes.

#### **4. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS**

A qualidade do perfil de energia é umas das principais características do SEP e foco desse trabalho, pode-se ver que o afundamento de tensão do sistema é muito grave e pode ser recorrente em situações de sobrecarga é ainda pior e pode causar o desligamento da rede.

Características que o sistema de distribuição pode passar a ter daqui em diante com GD e característica malhada podem melhorar o desempenho de energia em alguns sentidos, distribuindo melhor a carga, mas isso não é garantia de nenhuma forma, portanto, a melhor forma de se garantir um sistema de distribuição de energia de qualidade é aplicar as tecnologias aqui estudadas.

Tanto o D-SVC como o D-STATCOM apresentaram melhoras significativas na qualidade da energia do sistema de distribuição diminuindo os desvios de tensão em até 30%, mas o D-STATCOM apresentou melhores características e apresenta qualidades melhores para o sistema.

Para se tomar uma decisão definitiva de qual é o melhor dispositivo se deve ainda observar outros efeitos da implementação dos D-FACTS, como o efeito sobre o ângulo de tensão e sobre o fluxo de potência, ainda pode-se observar as características práticas desses dispositivos, como os custos de instalação e a praticidade de se adquirir, instalar e manter tal dispositivo.

## REFERÊNCIAS

BRASIL. ANEEL. . **Atualização das projeções de consumidores residenciais e comerciais com microgeração solar fotovoltaicos no horizonte 2017-2024**. Brasília: Aneel, 2017.

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA. **NTC905200: ACESSO DE MICRO E MINIGERAÇÃO DISTRIBUÍDA AO SISTEMA DA COPEL**. 2 ed. Curitiba: Governo do Paraná, 2018. 100 p.

FUCHS, Rubens Dario. **Transmissão de Energia Elétrica: Linhas Aéreas; teoria das linhas em regime permanente**. Rio de Janeiro: LTC/EFEI, 1977. 280 p.

GITIBIN, Roghayeh; HOSEINZADEH, Faramarz. **Comparison of D-SVC and D-STATCOM for performance enhancement of the distribution networks Connected WECS including voltage dependent load models**. 2015. 11 f. Artigo em periódico - Curso de Engenharia Elétrica, Department Of Electrical Engineering, Great Tehran Electrical Distribution Co, Tehran, 2015.

MONTICELLI, Alcir José. **Fluxo de carga em redes de energia elétrica**. 1. ed. Campinas, SP: Edgar Blütcher LTDA, 1983. 164 p.

SANAM, Joseph; GANGULY, Sanjib. **Impact of Distribution STATCOM Allocation on Radial Distribution Networks**. 2015. 5 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Department Of Electrical Engineering, National Institute Of Technology (india), Rourkela, 2015.

SARADVA, Piyushkumar M.; PANDYA, Mahesh H.; KADIVAR, Ketan T.. **Application of D-STATCOM to Control Power Flow in Distribution Line**. 2016. 6 f. Artigo em periódico - Curso de Engenharia Elétrica, Department Of Electrical Engineering, Escola de Engenharia de Lukhdhirji, Morbi, 2016.

TAYYAB, Muhammad Arslan et al. **Distributed Generation Effects on Voltage Profile of Distribution Grid with SVC and Smart Inverter**. IEEE Power & Energy Society General Meeting. Denver, f. 5. 2015

ZIMMERMAN R. D.; S'ANCHEZ C. E. Murillo; THOMAS R. J.. **Matpower: SteadyState Operations, Planning and Analysis Tools for Power Systems**

**Research and Education**, Power Systems, IEEE Transactions on, vol. 26, no. 1, pp. 12–19, Feb. 2011. <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRS.2010.2051168>