



**Universidade Federal de Campina Grande**

**Centro de Engenharia Elétrica e Informática**

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

PRISCILA NUNES ARAGÃO

**ESTUDO DE PERDAS NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA  
COM PRESENÇA DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA USANDO O  
ATPDRAW**

Campina Grande, Paraíba.  
Maio de 2016

PRISCILA NUNES ARAGÃO

ESTUDO DE PERDAS NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA  
COM PRESENÇA DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA USANDO  
ATPDRAW

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Campina Grande  
como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no  
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Sistemas Elétricos

Orientador:

Professor Karcus M. C. Dantas, D. Sc.

Campina Grande, Paraíba.  
Maio de 2016

PRISCILA NUNES ARAGÃO

ESTUDO DE PERDAS NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA  
COM PRESENÇA DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA USANDO  
ATPDRAW

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade  
Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade  
Federal de Campina Grande como parte dos requisitos  
necessários para a obtenção do grau de Bacharel em  
Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Sistemas Elétricos

Aprovado em        /        /

**Professor Geoge Rossany Soares de Lira, D, Sc.**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Avaliador

**Professor Karcius M. C. Dantas, D.Sc.**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho à minha mãe, exemplo de coragem e dedicação. Aos meus irmãos, fonte inesgotável de apoio. A meu avô, referência de força e superação.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, em primeiro lugar, por colocar minha vida em suas mãos e fazer acontecer o melhor para mim.

Agradeço à minha mãe, Mirian, por nunca ter enfraquecido na longa e árdua tarefa de criar e educar a mim e aos meus irmãos, por ter procurado os melhores caminhos na vida e nos estudos para nós, por colocar nós, os filhos, acima de tudo.

Agradeço aos meus irmãos que nunca me deixaram ter a escolha de desistir. Sobretudo a minha gêmea, por sentir tudo o que sinto e por me completar sendo tudo o que não sou.

Agradeço aos meus sobrinhos que me proporcionaram a forma mais pura de amar.

Agradeço aos meus avós pelos cuidados e amor.

Agradeço também aos meus tios e tias que com todo apoio conseguiram ajudar minha mãe a fazer o papel de pai e mãe. Tenho pra sempre dentro de mim a gratidão por tudo o que fizeram.

Agradeço ao meu pai (*in memoriam*) pelas lembranças.

Agradeço a minha madrinha Aldenice, por ter me oferecido os primeiros e tão importantes passos nos estudos.

Agradeço ao meu orientador, Karcius Dantas, pela paciência, tempo dedicado, ajuda e sugestões extremamente necessárias.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou hoje.

## RESUMO

Nesse trabalho será abordado o estudo de um sistema elétrico de potência na presença de uma Geração Distribuída. Para se ter a interconexão de uma GD ao sistema sem ocasionar impactos, deve-se analisar a melhor localização e condição de operação dessa geração. Para isso é necessário um estudo do fluxo de potência dos sistemas, ou seja, é preciso entender o comportamento do sistema mediante cada alteração. Utilizando o *software* ATP Draw - que é um exemplo de aplicação confiável nos estudos para se monitorar, conhecer e, desta forma, poder controlar os sistemas de potência implementados, minimizando assim, as perdas econômicas, humanas e de tempo - um sistema de distribuição típico foi avaliado para achar a melhor localização e condição de operação de uma unidade de GD de modo a minimizar as perdas no sistema de distribuição. Os resultados obtidos mostram que o uso da Geração Distribuída para assistir a geração centralizada, trás muitos benefícios para o sistema, dentre eles a redução das perdas de potência ativa e a melhoria do nível de tensão fornecido.

**Palavras-chave:** ATP Draw®, Fluxo de Potência, Geração Distribuída, Perdas.

## ABSTRACT

In this work will be addressed the study of hum Electric Power System in the presence of a distributed generation. In order to have the interconnection of a GD without causing impacts to the system, we must analyze the best location and thus generating operational condition. This requires a study of the systems power flow , that is , one must understand the system behavior by each change. Using the ATP Draw software - which is an example of a reliable application in studies to monitor, know and thus to be able to control the implemented power systems, therefore minimizing economical, human and time losses - a typical distribution system was evaluated in order to find the best location of DG unit so as to minimize losses in the distribution system. The results show that the use of distributed generation to assist the centralized generation behind many benefits to the system, including the reduction of active power losses and improving the supplied voltage level.

**Keywords:** Distributed Generation, Power Flow, Losses, ATP Draw®.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Modelos de elementos de redes elétricas disponíveis no atpdraw. .... | 16 |
| Figura 2 - Sistema IEEE 13 barras. ....   | 17 |
| Figura 3 - Sistema IEEE 13 barras modelado via ATPDraw. ....                    | 20 |
| Figura 4 - Tensão nas barras em pu - Fase A. ....                               | 22 |
| Figura 5 - Tensão nas barras em pu - Fase B. ....                               | 23 |
| Figura 6 - Tensões nas barras em pu – Fase C. ....                              | 23 |
| Figura 7 - Perdas ativas nas linhas - Fase A. ....                              | 24 |
| Figura 8 - Perdas ativas nas linhas - Fase B. ....                              | 25 |
| Figura 9 - Perdas ativas nas linhas - Fase C. ....                              | 25 |
| Figura 10 – Tensão nas barras com e sem GD no sistema – Fase A. ....            | 27 |
| Figura 11 - Tensão nas barras com e sem GD no sistema - Fase B. ....            | 27 |
| Figura 12 - Tensão nas barras com e sem GD no sistema - Fase C. ....            | 28 |
| Figura 13 – Perdas Ativas no sistema com e sem a presença de GD – Fase A. ....  | 29 |
| Figura 14 - Perdas Ativas no sistema com e sem presença de GD – Fase B. ....    | 29 |
| Figura 15 Perdas Ativas no sistema com e sem presença de GD – Fase C. ....      | 30 |
| Figura 16 - Tensão nas barras com e sem GD no sistema – Fase A. ....            | 31 |
| Figura 17 – Tensão nas barras com e sem GD no sistema – Fase B. ....            | 31 |
| Figura 18 – Tensão nas barras com e sem GD no sistema – Fase C. ....            | 32 |
| Figura 19 - Perdas Ativas no sistema com e sem a presença de GD – Fase A. ....  | 32 |
| Figura 20 - Perdas Ativas no sistema com e sem a presença de GD – Fase B. ....  | 33 |
| Figura 21 - Perdas Ativas no sistema com e sem a presença de GD – Fase C. ....  | 33 |

# LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 - Injeções de potência ativa e reativa de cargas concentradas - IEEE 13 barras..... | 18 |
| Tabela 2 - Injeções de potência ativa e reativa de cargas distribuídas IEEE 13 barras. ....  | 18 |
| Tabela 3 - Injeções dos capacitores IEEE 13 barras. ....                                     | 18 |
| Tabela 4 - Configurações das linhas IEEE 13 barras. ....                                     | 19 |
| Tabela 5 - Dados nominais do transformador IEEE 13 barras. ....                              | 19 |
| Tabela 6 – Dados Nominiais do Transformador da Subestação IEEE 13 barras. ....               | 19 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|       |   |
|-------|---|
| GD    | Geração Distribuída   |
| PCH's | Pequenas Centrais Hidrelétricas   |
| MME   | Ministério de Minas e Energia   |
| ProGD | Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída<br>de Energia Elétrica |
| INEE  | Instituto Nacional de Eficiência Energética                               |
| IEEE  | Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos                       |
| ATP   | Alternative Transients Program  |
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica                                      |
| SDEE  | Sistema de Distribuição de Energia Elétrica                               |

# SUMÁRIO

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | Introdução .....                         | 8  |
| 2     | Embasamento Teórico.....                 | 9  |
| 2.1   | Geração Distribuída .....                | 9  |
| 2.1.1 | Benefícios da Geração Distribuída .....  | 11 |
| 2.2   | Sistema de Distribuição.....             | 12 |
| 2.3   | Fluxo de Potência .....                  | 13 |
| 2.4   | Perdas nas linhas.....                   | 13 |
| 3     | Material e Método.....                   | 14 |
| 3.1   | Software ATP.....                        | 15 |
| 3.2   | ATPDraw .....                            | 15 |
| 3.2.1 | Entrada e saída de dados .....           | 16 |
| 3.3   | Sistema IEEE 13 barras.....              | 17 |
| 4     | Resultados .....                         | 22 |
| 5     | Considerações.....                       | 34 |
| 6     | Conclusão.....                           | 37 |
|       | Bibliografia .....                       | 39 |
|       | Apêndice A .....                         | 41 |
| A.1   | Modelagem das cargas .....               | 41 |
| A.2   | Modelagem das linhas.....                | 43 |
| A.3   | Modelagem do transformador.....          | 44 |
| A.4   | Modelagem da fonte.....                  | 46 |
| A.4   | Modelagem dos bancos de capacitores..... | 48 |

# 1 INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, é visível o aumento da demanda de energia elétrica. Tanto na zona urbana, com o aumento da população e desenvolvimento de novas indústrias, quanto na zona rural, mais distante dos centros urbanos. Para que se tenha uma garantia que essas mudanças de demanda de energia mantenham o sistema operando tecnicamente e economicamente viável, é necessário um bom planejamento do sistema de distribuição.

Nos últimos anos e em todo o mundo o incentivo a criação e a evolução de tecnologias de geração com confiabilidade, aumento na eficiência energética, desempenho ambiental e uma prestação de serviços com maior qualidade de energia para que atendam a necessidade da comunidade em geral, está cada vez mais intensa.

No Brasil, a maior parte da geração de energia elétrica é de origem hidráulica. Com o racionamento de energia ocorrido em 2001 e atualmente com a crise hídrica que provoca os momentos de baixo volume nos reservatórios de água, a fragilidade do sistema de geração ficou exposta. Portanto, é necessário entrar em operação outros mecanismos de geração de energia já que esta sendo cada vez mais difícil a abertura de novas faixas de linhas de transmissão e a construção de novas hidrelétricas devido aos impactos ambientais que ocasionam.

Com a necessidade de novas fontes de energia alternativa, os órgãos reguladores vêm analisando o estudo dos impactos que sua utilização ocasiona no sistema [1]. No trabalho em questão, um sistema de distribuição típico será estudado com o intuito de abordar o impacto que uma Geração Distribuída ocasiona em um sistema.

Assim sendo, através de simulações do sistema de estudo, foi escolhido a melhor localização e a melhor condição de operação da Geração Distribuída com o objetivo de proporcionar ao sistema uma redução nas perdas de potência ativa e um aumento no nível de tensão nas barras onde o mesmo encontrava-se abaixo do nível adequado, estabelecido pela ANEEL [2].

## 2 EMBASAMENTO TEÓRICO

Energia tem sido um dos fatores importantes para o desenvolvimento econômico, político e social no mundo. Atualmente, no contexto energético mundial, a utilização da Geração Distribuída (GD), que é a produção de energia de forma descentralizada no próprio local ou próximo de onde essa energia é utilizada, vem ganhando destaque. A utilização da GD em complemento à geração centralizada visa reduzir as perdas do sistema, melhorar os níveis de tensão, aumentar a capacidade de transmissão, diminuir o tempo de implantação, dentre outros benefícios ao sistema. Por outro lado, se não bem localizada, a inserção de GD pode ocasionar fluxo bidirecional nas linhas de transmissão.

A decisão da localização ótima da geração de energia elétrica distribuída é complexa, pois envolve análises multivariadas. Dentre as ferramentas utilizadas nas análises de sistemas elétricos destacam-se as técnicas de modelagem matemática e simulação computacional dos sistemas elétricos de potência. Estas técnicas visam representar um fenômeno ou um comportamento físico para reduzir riscos na tomada de decisão, identificar problemas antes de suas ocorrências, e de excluir processos que não auxiliam nas análises quantitativas. Além do mais a modelagem matemática e simulação computacional permitem que seja investigada a viabilidade técnica e econômica de um projeto antes de sua execução.

Muito se tem estudado sobre a localização ótima da geração de energia elétrica distribuída, sendo propostas diversas estratégias e abordagens, cada método com suas características e objetivos.

### 2.1 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A Geração Distribuída (GD) vem ganhando importância mundial no atendimento a demanda de energia elétrica. Esse tipo de geração é caracterizada por ser uma geração elétrica realizada junto ou próxima do (s) consumidor (es) independente da potência, tecnologia e fonte de energia. As tecnologias de GD têm evoluído para incluir potências cada vez menores. A GD inclui:

- Co-geradores;
- Geradores que usam como fonte de energia, resíduos de combustíveis;
- Geradores de emergência;
- Geradores para operação no horário de ponta;
- Painéis foto-voltáicos;
- Pequenas Centrais Hidrelétricas – PCH's;
- Geradores eólicos.

Esse tipo de geração tem vantagem sobre a geração central, pois economiza investimentos em transmissão e reduz as perdas nesses sistemas, melhorando a estabilidade do serviço de energia elétrica, além de oferecer energia com qualidade mais elevada, pois a energia elétrica via fontes renováveis, como a solar, eólica e biomassa são mais eficientes e menos prejudiciais ao meio ambiente [3].

Segundo o Art. 14 do Decreto nº 5.163 de 30 de julho de 2004 é considerado Geração Distribuída à produção de energia elétrica proveniente de empreendimentos de agentes concessionários, permissionários ou autorizados, conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador, exceto aquela proveniente de empreendimentos: hidrelétricos com capacidade instalada superior a 30MW; e termelétricas, inclusive de cogeração, com eficiência energética inferior a 75% [4].

Segundo o Art. 15 do Decreto em questão, a contratação de energia elétrica proveniente de empreendimentos de geração distribuída será precedida de chamada pública promovida diretamente pelo agente de distribuição, de forma a garantir publicidade, transparência e igualdade de acesso aos interessados. No 1º parágrafo desse artigo (Art. 15), é afirmado que o montante total da energia elétrica contratada proveniente de empreendimentos de geração distribuída não poderá exceder a dez por cento da carga do agente de distribuição [4].

### 2.1.1 BENEFÍCIOS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A geração distribuída proporciona diversos benefícios, pelo fato de ser uma geração que se localiza próxima à carga. Além disso, permite o atendimento da demanda crescente de forma rápida, já que a construção de grandes usinas hidrelétricas, que é o modelo de geração mais usado no Brasil, é um processo demorado. Com isso a inserção de geração distribuída no sistema brasileiro tende a se tornar a cada ano mais comum, como tem ocorrido no exterior.

A GD tem vantagem sobre a geração central, pois economiza investimentos em transmissão e reduz as perdas nestes sistemas, melhorando a estabilidade do serviço de energia elétrica. Ela também proporciona um melhor aproveitamento da sazonalidade à qual alguns tipos de geração estão submetidos, fazendo com que haja uma melhor complementação à geração hidráulica. Dentre as suas vantagens, destacam-se (REBECHI, 2008; GUEDES, 2006; BARBOSA FILHO, 2013):

- Estímulo aos potenciais energéticos locais, promovendo a disponibilidade dos recursos energéticos mais abundantes no local de atendimento às cargas demandadas.
- Uso de geradores em pequena escala, reduzindo problemas relacionados aos resíduos, custo de implementação menor, já que as unidades geradoras são normalmente de pequeno porte, viabilizando seu uso.
- Fornecimento de serviços auxiliares ao sistema interligado, suprimindo a demanda de cargas locais e futuras demandas.
- Minimização das perdas técnicas e totais do sistema.
- Aumento da confiabilidade do sistema.
- Redução dos custos associados ao transporte de energia, já que os geradores distribuídos estão próximos aos centros de cargas.
- Risco menor de investimento e tempo de instalação.
- Redução dos investimentos em expansão da transmissão e distribuição de energia.
- Melhora nos perfis de tensão dos sistemas onde encontram-se inseridos.
- Melhora no fator de potência do sistema.

No Brasil, o Ministério de Minas e Energia (MME) lançou, em dezembro de 2015, o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD), para ampliar e aprofundar as ações de estímulo à geração de energia (em especial a solar fotovoltaica). O Programa pode movimentar pouco mais de R\$ 100 bilhões em investimentos, até 2030 [5].

Com a GD, torna-se possível obter maior eficiência energética. Por isso, o INEE (Instituto Nacional de Eficiência Energética) [6] tem trabalhado para derrubar eventuais imperfeições do mercado que dificultam o desenvolvimento desta forma de geração elétrica.

Para que o sistema opere em estabilidade, um ponto que deve ser bem analisado na GD é a sua interconexão ao mesmo, pois sua má localização pode ocasionar impactos no sistema elétrico ao qual será conectada. No entanto, uma boa localização da GD pode minimizar as perdas do sistema. Para descobrir a melhor localização da geração é necessário um estudo do fluxo de potência dos sistemas, ou seja, é preciso entender o comportamento do sistema mediante cada alteração. Através da análise do fluxo de potência pode-se conhecer o desempenho de sistemas sob o ponto de vista de operação ou planejamento.

## 2.2 SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

O sistema de distribuição de energia elétrica conecta sistemas de geração e transmissão com as instalações elétricas e equipamentos dos consumidores. A infraestrutura de interface entre a linha de transmissão e a rede de distribuição é a subestação (SE), da qual se originam os alimentadores. Entre as características físicas destacam-se: a topologia radial (potência flui da subestação para o consumidor), as múltiplas conexões (monofásicas, bifásica ou trifásica), as cargas de diferentes naturezas (potência, impedância ou correntes constantes), as linhas com resistências muitas vezes comparáveis às reatâncias (baixa relação entre reatância e resistência), entre outras (KERSTING, 2006) e (SHORT, 2003).

Os sistemas de distribuição de energia elétrica servem como ligação direta entre os sistemas de geração e transmissão de energia elétrica e a maioria dos consumidores residenciais, industriais, institucionais e agrícolas. A operação desses sistemas de uma forma que evite danos aos equipamentos, enquanto se mantêm baixas perdas de

potência ativa e altos níveis de serviço (confiabilidade e qualidade) tornou-se uma necessidade para estabilidade econômica e social. Assim, as operadoras têm de encontrar maneiras de obter altos níveis de confiabilidade ao mesmo tempo em que suportam um aumento na demanda.

Uma solução para suprir o aumento de demanda é a instalação de Unidade de Geração Distribuída (GD). Os sistemas de distribuição foram designados para operar um fluxo de potência radial e unidirecional, mas na presença de geração de energia dispersa na rede o fluxo não pode ser mais chamado de unidirecional. A integração de geradores distribuídos a sistemas com automação e gerenciamento de demandas pode causar problemas no fluxo de potência, na qualidade de energia, no controle de tensão, na redução das perdas, nos dispositivos de proteção, entre outros. Portanto, para se instalar essa GD e manter o sistema operando em altos níveis de serviço, é necessário um estudo prévio.

## 2.3 FLUXO DE POTÊNCIA

Fluxo de potência é o estudo feito nos sistemas elétricos de potência. Esse estudo fornece a solução de uma rede elétrica, para uma dada condição de operação, isto é, para uma dada condição de carga e geração, sujeita a restrições operativas e à ação de dispositivos de controle [7]. A análise do fluxo de potência é importante para se conhecer o desempenho de sistemas sob o ponto de vista de operação ou planejamento.

A inserção de geradores independentes em um sistema acarreta uma modificação no fluxo de potência inicial, gerando fluxos de potência multidirecionais. À vista disso, é fundamental uma análise do sistema quando se tem um projeto de acrescentar uma geração independente ao sistema em completo à geração central.

É possível obter o fluxo de potência em todos os pontos de um sistema, no entanto, deve-se conhecer ou determinar a tensão, a corrente e o fator de potência. Sabendo que o estudo do fluxo de potência é complexo, as ferramentas computacionais são muito utilizadas.

## 2.4 PERDAS NAS LINHAS

Em um processo de conversão de energia as perdas são inevitáveis. As perdas nos sistemas de transmissão são na maioria das vezes produzidas pelo aquecimento das extensas linhas de alta tensão e dos equipamentos a ela associados, que fazem à ligação das usinas geradoras às distribuidoras de energia.

Nos estudos de GD, as perdas estão diretamente vinculadas à distribuição do fluxo de potência, visto que ao ser inserido uma GD, o fluxo de potência passa a ser multidirecional, pois a presença dos geradores altera a distribuição do fluxo, alterando assim as perdas.

Alguns fatores influenciam as perdas na presença de geradores, tais como: a localização do gerador, a relação entre o nível de geração e a carga do sistema e a topologia da rede na qual o gerador está conectado. Uma GD devidamente localizada pode não só suprir uma geração adicional como também induz ao uso mais eficiente da rede diminuindo as perdas elétricas, melhorando o perfil de tensão do alimentador e até resolvendo questões de sobrecarga nos cabos dos alimentadores.

Uma vez que os locais de geração distribuída são preferencialmente próximos da carga, a GD contribui para a redução de perdas na rede ((IEA) 2002, BAYOD-RÚJULA, 2009). A geração local reduz a quantidade de energia que deve ser transmitida pela planta centralizada e evita às perdas de transmissão resultantes desse processo (BAYOD-RÚJULA, 2009).

Sob o ponto de vista econômico, é visto que a geração local reduz os custos de transmissão e de distribuição. Ressalta-se que cada barra em um sistema, tem um valor ótimo para a penetração de GD sob o ponto de vista de minimização das perdas. Observa-se que existem barras em que a injeção de potência pelos geradores não diminui significativamente as perdas elétricas. Isto acontece em barras que se encontram próximas á subestação.

### 3 MATERIAL E MÉTODO

Embora o crescimento da GD mostre inúmeras qualidades econômicas e ambientais, sua inserção no sistema de distribuição pode vir a trazer problemas na operação do sistema. Por este motivo, este trabalho buscou analisar as perdas de potência ativa geradas pela inclusão da Geração Distribuída em um sistema elétrico de potência, utilizando o programa ATP (Alternative Transients Program).

O sistema IEEE 13 [9] barras foi utilizado como base para o estudo da melhor localização de unidade de GD de forma a minimizar as perdas do sistema. Esse estudo foi feito através de um cenário com a inclusão de uma GD com uma potência de 10% da demanda média do sistema e posteriormente em nível de conhecimento, com uma potência maior.

Foi realizado o estudo do sistema elétrico escolhido com a busca de dados referentes aos valores de seus componentes. Posteriormente foi feita a modelagem e a representação do sistema, de acordo com os dados obtidos e com o cenário a ser simulado no programa ATP.

### 3.1 SOFTWARE ATP

O ATP (Alternative Transients Program) é um programa de simulação digital que permite a simulação de transitórios eletromagnéticos em sistemas de energia elétrica através do método baseado na utilização da matriz de admitância de barras. É um programa que possui uma grande variedade de ferramentas para a modelagem de sistemas.

Ao longo de 25 anos o ATP sofreu inúmeras modificações, dentre elas destaca-se a codificação dos dados de entrada, que seguia uma formatação rígida, e agora se faz por meio de interface gráfica. A essa evolução deu-se o nome ATPDraw que atua como núcleo central de onde o usuário pode controlar o processamento de qualquer outro programa, inclusive o ATP propriamente dito [10].

### 3.2 ATPDRAW

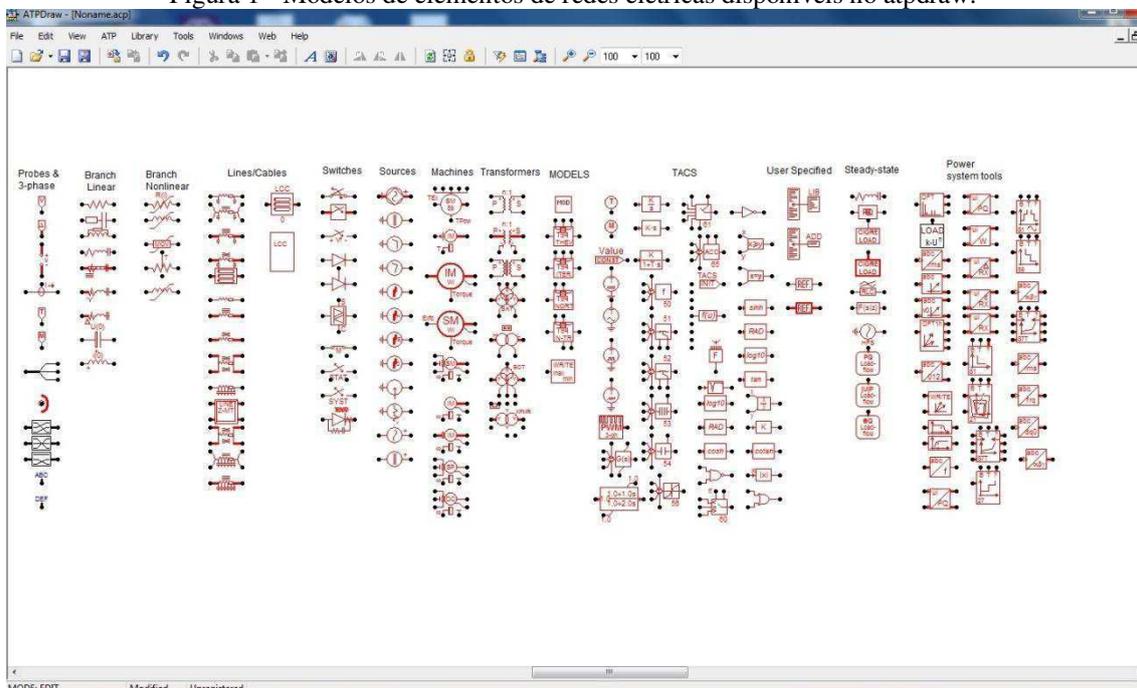
O ATPDraw é uma interface gráfica na plataforma de MS Windows do ATP, que consiste em uma versão do EMPT (Eletromagnetic Transient Program). Com o

ATPDraw pode-se construir circuitos elétricos convencionais, bastando apenas selecionar modelos pré- definidos dos principais elementos componentes de uma rede elétrica, reduzindo assim os esforços e o tempo despendido com programação. A construção das redes elétricas dispendo do ATP é realizada através de códigos escritos, enquanto que no software ATPDraw, as redes são construídas através de uma interface gráfica. Isso facilita a modelagem de sistemas elétricos com vários barramentos. Seu uso é ideal para gerar uma visão global dos valores de tensões e corrente em cada barramento (GHESSI, 2012).

Em complemento às funções do ATP e do ATPDraw, tem-se ainda uma série de programas que realizam análises gráficas das simulações efetuadas. Os programas que fazem esse tipo de análise são o PCPLOT, o TPLOT e o PLOTXY. Dos programas citados, o PLOTXY é considerado a alternativa mais aceita pelos usuários devido à simplicidade de instalação e utilização.

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

Figura 1 - Modelos de elementos de redes elétricas disponíveis no atpdraw.



Fonte: Autor- Software ATPDraw.

### 3.2.1 ENTRADA E SAÍDA DE DADOS

Os arquivos gerados pelo programa ATPDraw, possuem a extensão .ADP.

O ATPDraw propicia a criação dos arquivos de entrada de dados com base no circuito a ser simulado, que é construído graficamente com os modelos existentes no programa. Cada componente gráfico possibilita a inclusão dos parâmetros correspondentes em janelas próprias que ajustam os dados aos formatos de entrada requeridos pelo ATP, facilitando o trabalho do usuário e reduzindo a chance de erros nos dados dos modelos.

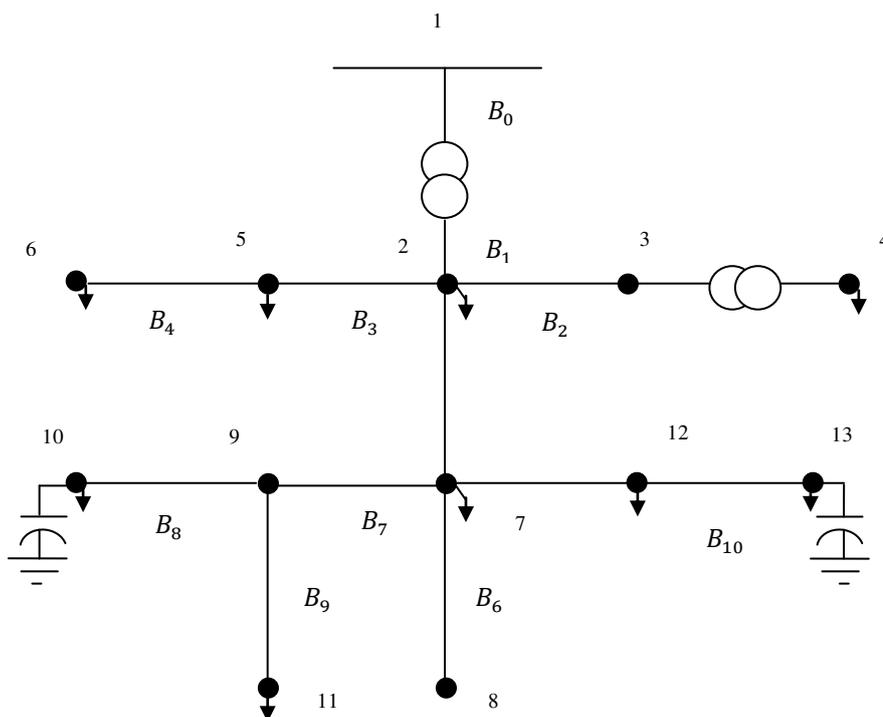
- Entrada: arquivo de entrada em formato texto;
- Saída: arquivo .LIS e arquivo .PL4;

Os arquivos de saída com terminação .LIS fornecem os resultados impressos e os arquivos de saída com terminação .PL4 fornecem a visualização dos gráficos.

### 3.3 SISTEMA IEEE 13 BARRAS

O diagrama unifilar desta rede é mostrado na Figura 2, as cargas e banco de capacitores em derivação estão representados pelas setas e bancos capacitivos respectivamente, ligados as barras.

Figura 2 - Sistema IEEE 13 barras.



Fonte: (Adaptado de IEEE, 1991)

O alimentador tem uma tensão de base de 4,16 kV e sua demanda total é de, aproximadamente, 4 MVA.

As injeções de potência ativa e reativa para cada fase com suas especificações de conexão e modelos e as injeções de potência reativa dos capacitores alocados nas barras 10 para o primeiro capacitor (monofásico), e na barra 13 para o segundo capacitor (trifásico), são apresentados nas tabelas abaixo.

O sistema IEEE [9] 13 barras possui números de fases diferentes por ramais e cargas com características desbalanceadas. Esse fato faz com que o SDEE seja em essência, naturalmente desbalanceado. Os dados do sistema são apresentados nas Tabelas de 1 a 6.

Tabela 1 - Injeções de potência ativa e reativa de cargas concentradas - IEEE 13 barras.

| Barra | Carga            | Fase-A |      | Fase-B |      | Fase-C |      |
|-------|------------------|--------|------|--------|------|--------|------|
|       |                  | kW     | kvar | kW     | kvar | kW     | kvar |
|       | Conexão - Modelo |        |      |        |      |        |      |
| 4     | Y-PQ             | 160    | 110  | 120    | 90   | 120    | 90   |
| 5     | Y-PQ             | 0      | 0    | 170    | 125  | 0      | 0    |
| 6     | D-Z              | 0      | 0    | 230    | 132  | 0      | 0    |
| 11    | Y-Z              | 128    | 86   | 0      | 0    | 0      | 0    |
| 7     | D-PQ             | 385    | 220  | 385    | 220  | 385    | 220  |
| 13    | Y-PQ             | 485    | 190  | 68     | 60   | 290    | 212  |
| 12    | D-I              | 0      | 0    | 0      | 0    | 170    | 151  |
| 10    | Y-I              | 0      | 0    | 0      | 0    | 170    | 80   |

Fonte: IEEE, 1991.

Tabela 2 - Injeções de potência ativa e reativa de cargas distribuídas IEEE 13 barras.

| Barra p | Barra q | Carga            | Fase-A |      | Fase-B |      | Fase-C |      |
|---------|---------|------------------|--------|------|--------|------|--------|------|
|         |         |                  | kW     | kvar | kW     | kvar | kW     | kvar |
|         |         | Conexão - Modelo |        |      |        |      |        |      |
| 2       | 7       | Y-PQ             | 17     | 10   | 66     | 38   | 117    | 68   |

Fonte: IEEE, 1991.

Tabela 3 - Injeções dos capacitores IEEE 13 barras.

| Barra | Fase-A | Fase-B | Fase-C |
|-------|--------|--------|--------|
|       | kvar   | kvar   | kvar   |
| 11    | 0      | 0      | 100    |
| 13    | 200    | 200    | 200    |

Fonte: IEEE, 1991.

| Ramos                | Seqüência das fases | Condutor da fase | Condutor do neutro | Espaçamento |
|----------------------|---------------------|------------------|--------------------|-------------|
|                      |                     | ACSR             | ACSR               | ID          |
| $B_0, B_1, B_5, B_6$ | BACN                | 556,500 26/7     | 4/0 6/1            | 500         |
| $B_2$                | CABN                | 4/0 6/1          | 4/0 6/1            | 500         |
| $B_3, B_4$           | CBN                 | 1/0              | 1/0                | 505         |
| $B_7$                | ACN                 | 1/0              | 1/0                | 505         |
| $B_8$                | CN                  | 1/0              | 1/0                | 510         |

Fonte: IEEE, 1991.

Tabela 5 - Dados nominais do Transformador IEEE 13 barras.

| Transformador | kVA | kV- primário | kV- secundário | R - % | X - % |
|---------------|-----|--------------|----------------|-------|-------|
| XFM - 1       | 500 | 4,16 - $Y_g$ | 0,48 - $Y_g$   | 1,1   | 2     |

Fonte: IEEE, 1991.

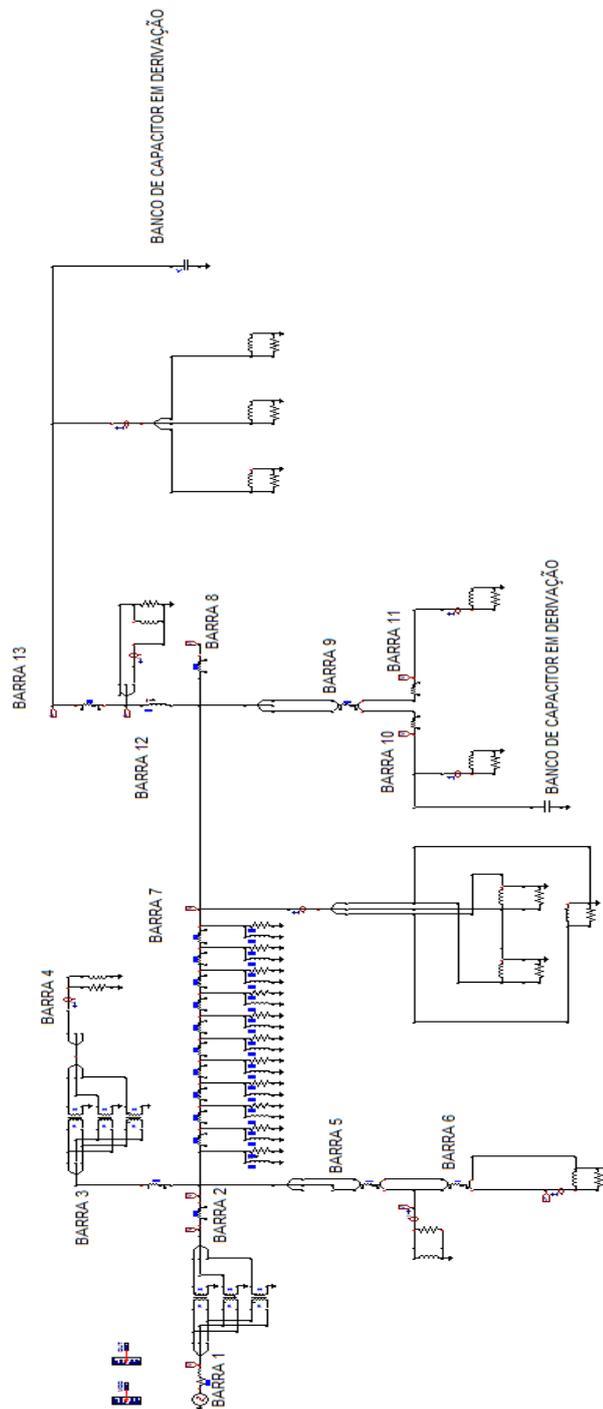
Tabela 6 – Dados Nominiais do Transformador da Subestação IEEE 13 barras.

| Transformador | MVA | kV- primário | kV- secundário | R - % | X - % |
|---------------|-----|--------------|----------------|-------|-------|
| SE            | 5   | 115 - $Y_g$  | 0,48 - $Y_g$   | 1     | 8     |

Fonte: IEEE, 1991.

Para a modelagem do sistema, foram usados os elementos descritos no Apêndice A. A Figura 3 mostra a modelagem desse sistema feito no *software* ATPDraw.

Figura 3 - Sistema IFEF. 13 barras modelado via ATPDraw



O sistema foi analisado a fim de certificar se o cenário precisaria de reforços. Para analisar o sistema foi feito um estudo das tensões nas barras. Com relação a as tensões contratadas junto à distribuidora, a ANEEL - revisão 5 [2] estabelece que:

a) a tensão a ser contratada nos pontos de conexão pelos acessantes atendidos em tensão nominal de operação superior a 1kV deve situar-se entre 95% e 105% da tensão nominal de operação do sistema no ponto de conexão.

De forma a minimizar as perdas no sistema, foi feito um estudo das perdas nas linhas, que foram calculadas através do fluxo de potência entre barras.

Para encontrar o melhor local para conexão da unidade de GD é necessário que seja feito uma série de testes na rede. Dessa forma, há uma grande possibilidade de combinações que devem ser analisadas.

Para a escolha da melhor localização da GD, foram levadas em considerações as menores perdas no sistema causadas pelo impacto da GD e aos limites de tensão de fornecimento estabelecidos para o ponto de conexão.

A potência fornecida pela Geração Distribuída foi escolhida levando em conta o limite de capacidade dado de acordo com a definição de GD: Considera-se geração distribuída, pequenas centrais elétricas com até 30MW de potência [3].

## 4 RESULTADOS

Com o arquivo .LIS fornecido pelo programa ATPDraw® foram obtidos os valores das tensões nas barras do sistema. As Figuras 4, 5 e 6 mostram as tensões das fases A, B e C nas barras antes da implantação da Geração Distribuída.

Para garantir que a tensão fornecida ao consumidor final esteja numa faixa aceitável, o órgão regulador estabelece limites com variações de tensão em torno de  $\pm 5\%$  do valor nominal de operação do sistema. Para pontos de conexão nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV, a ANELL [2] estabelece que o intervalo que garante uma tensão de atendimento adequada é igual ou superior a 0,93 p.u ou igual ou inferior a 1,05 p.u. Portanto, esses limites estabelecidos pela ANEEL também foram representados nos gráficos das tensões nas barras, com o objetivo de monitor os valores das tensões nas barras.

Figura 4 - Tensão nas barras em pu - Fase A.

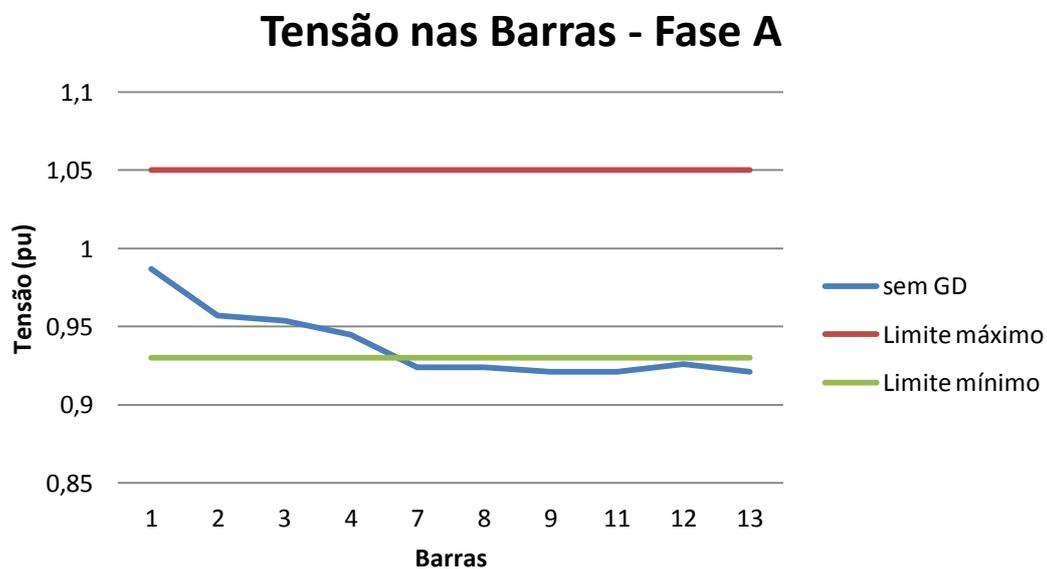


Figura 5 - Tensão nas barras em pu - Fase B.

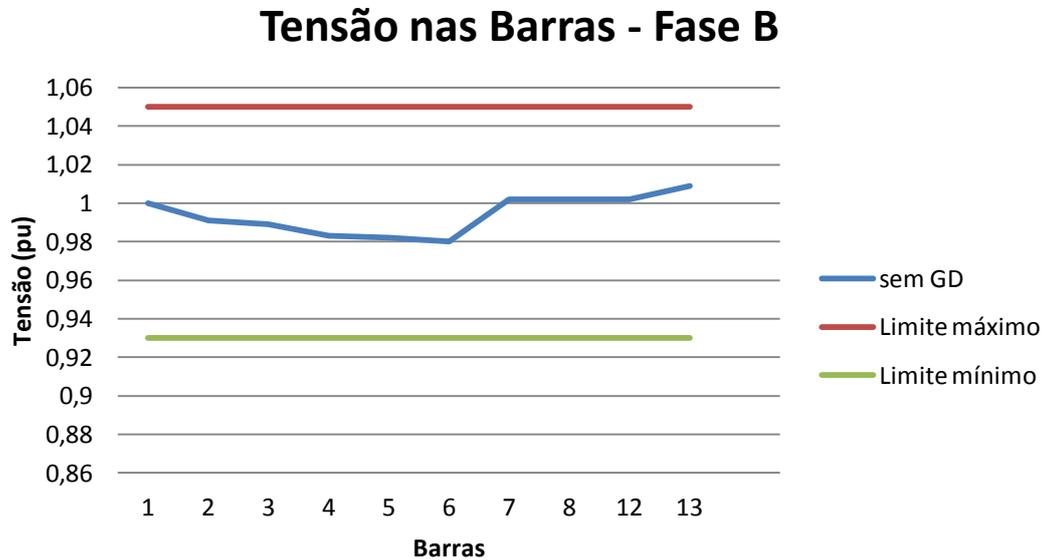
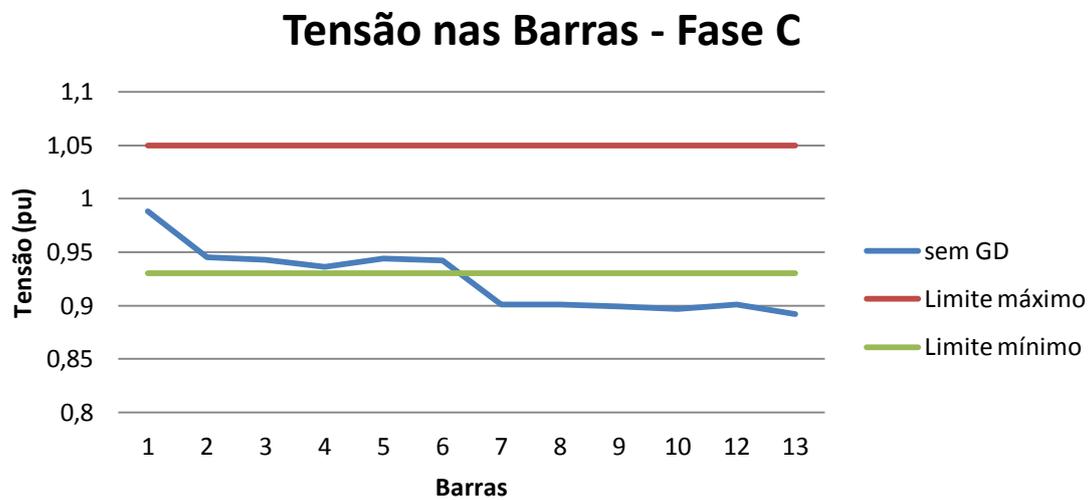


Figura 6 - Tensões nas barras em pu – Fase C.



Através da análise desses gráficos é notório que na fase B os valores das tensões nas barras encontram-se dentro do padrão estabelecido pela ANEEL [2]. Nas fases A e C existem barras com valores de tensão fora do padrão estabelecido pela ANEEL [2]. É fato que em sistemas com geração centralizada, a tensão apresenta valores mais

elevados próximos ao gerador e devido às quedas de tensões ao longo do sistema, a tensão vai sendo reduzida gradativamente.

Sabe-se pela literatura existente que um dos principais fatores que afetam a estabilidade da tensão é quando os sistemas de potência estão “estressados”, devido à falta de investimentos em geração e transmissão. Logo, sabe-se que problemas relacionados com regulação da tensão são fatos rotineiros nas empresas de distribuição de energia elétrica.

Com o arquivo .LIS fornecido pelo programa ATPDraw® também foram obtidos os valores das perdas ativas em cada trecho antes da presença de uma unidade de GD. Em posse dos valores das perdas calculadas pelo *software*, foi feito uma análise para efeito de entendimento. As perdas são representadas em porcentagens. Essas porcentagens são dadas em relação à potência ativa do sistema. Nas Figuras 7, 8 e 9, encontram-se os gráficos das perdas ativas em cada linha, antes da presença da geração distribuída.

Figura 7 - Perdas ativas nas linhas - Fase A.

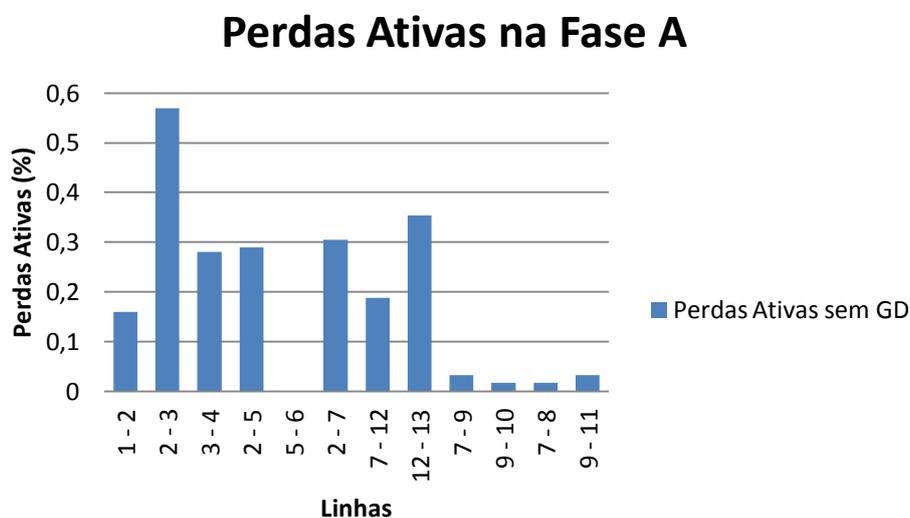


Figura 8 - Perdas ativas nas linhas - Fase B.

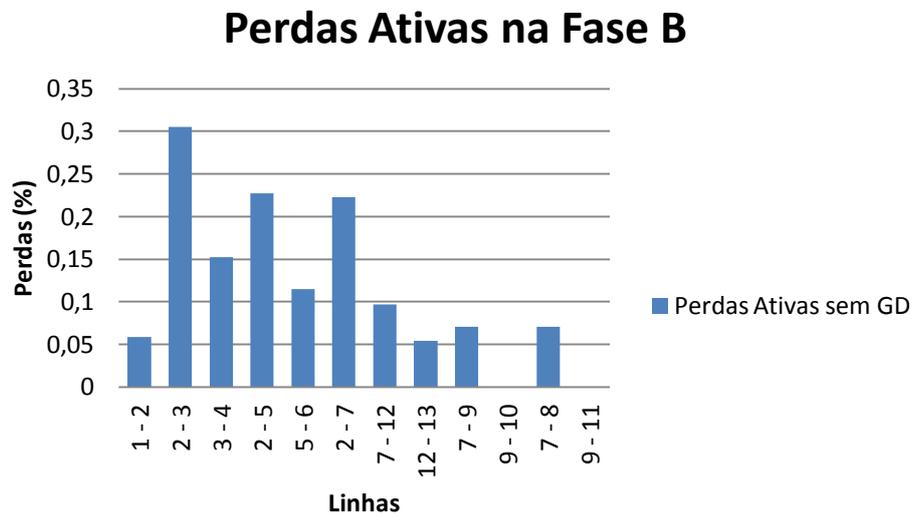
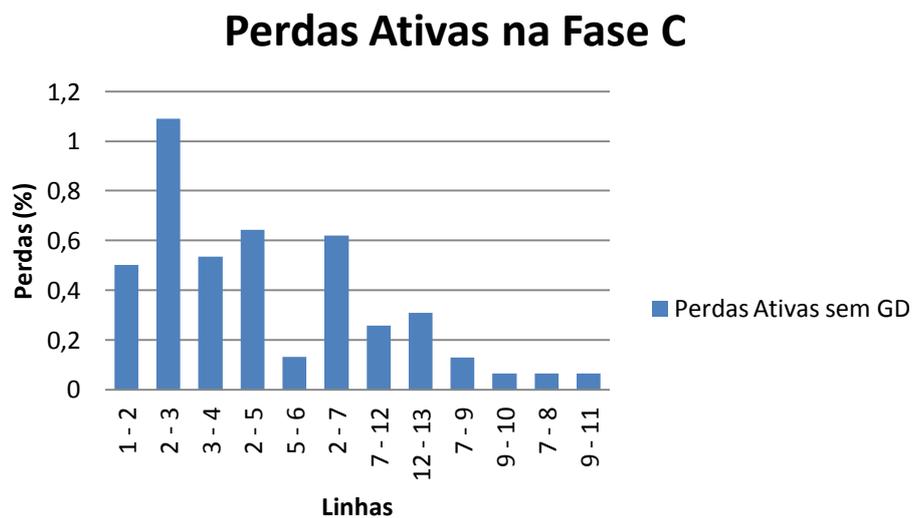


Figura 9 - Perdas ativas nas linhas - Fase C.



Observando o sistema, é possível observar que há necessidade de considerar a inserção de uma unidade de Geração Distribuída (GD). A introdução da GD pode

aumentar o nível de tensão nas barras e reduzir as perdas de potência ativa no sistema, pois oferece potência contribuindo com a geração centralizada para o atendimento das cargas do sistema.

O tipo de unidade de GD utilizada no trabalho em questão foi o tipo que possui potência ativa como injeção de energia, um fator de potência unitário. Como exemplo desse tipo de geração, tem-se a energia fotovoltaica, microturbinas e células de combustível com uma interface de eletrônica de potência.

A unidade de GD foi modelada como tensão constante (PV). A modelagem foi dada através de uma fonte de tensão na qual, a tensão foi especificada inicialmente para 1,0 pu e potência trifásica constante e igual a 10% da carga do agente, ou seja, uma potência igual a 400 kW..

O foco do trabalho é determinar uma melhor localização para se inserir uma unidade de Geração Distribuída, visando auxiliar o atendimento a demanda e ao mesmo tempo diminuir as perdas ativas nesse sistema e aumentar a tensão. Portanto, foram feitos testes com a inserção da unidade de GD no sistema para encontrar uma melhor localização que garantisse atingir os objetivos.

Para escolher a melhor localização para se inserir a GD, foram analisadas as barras que requeriam uma demanda de potência maior. Além da demanda, os níveis de tensão também foram um fator que influenciou na escolha da barra para inserir a unidade de GD.

As barras 7 e 13 possuem a maior quantidade de potência instalada. Portanto, a unidade de GD foi instalada na barra 8 visando atender a demanda dessas barras, o aumento do nível de tensão e propiciar a redução das perdas no sistema. A barra 8 foi escolhida por estar mais próxima das barras que possuem a maior potência instalada.

Nas Figuras abaixo, encontram-se a comparação das magnitudes das tensões antes e depois da inserção da unidade de GD.

Figura 10 – Tensão nas barras com e sem GD no sistema – Fase A.

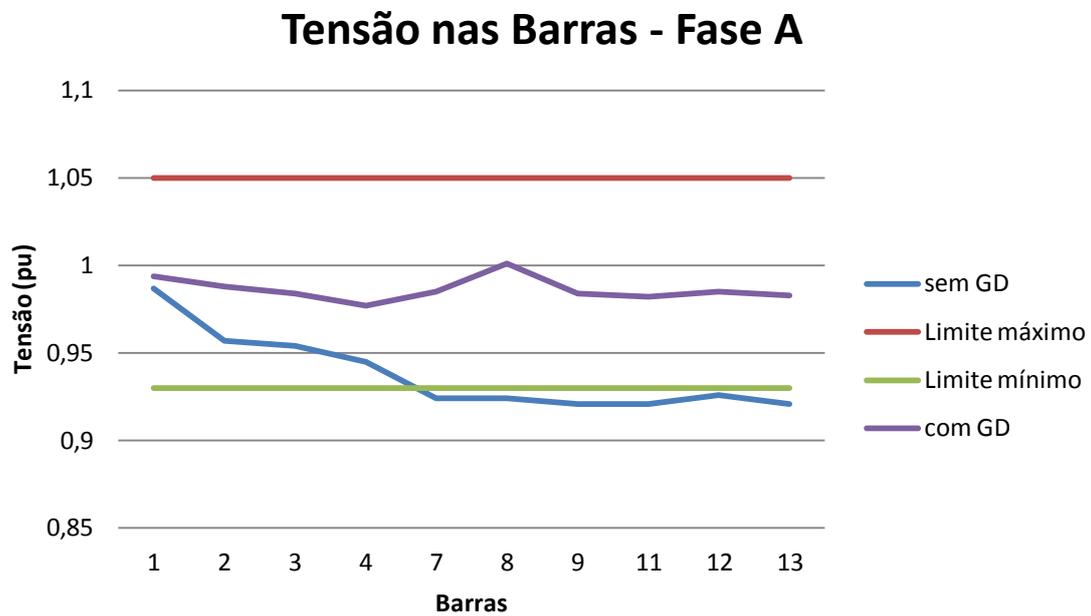


Figura 11 - Tensão nas barras com e sem GD no sistema - Fase B.

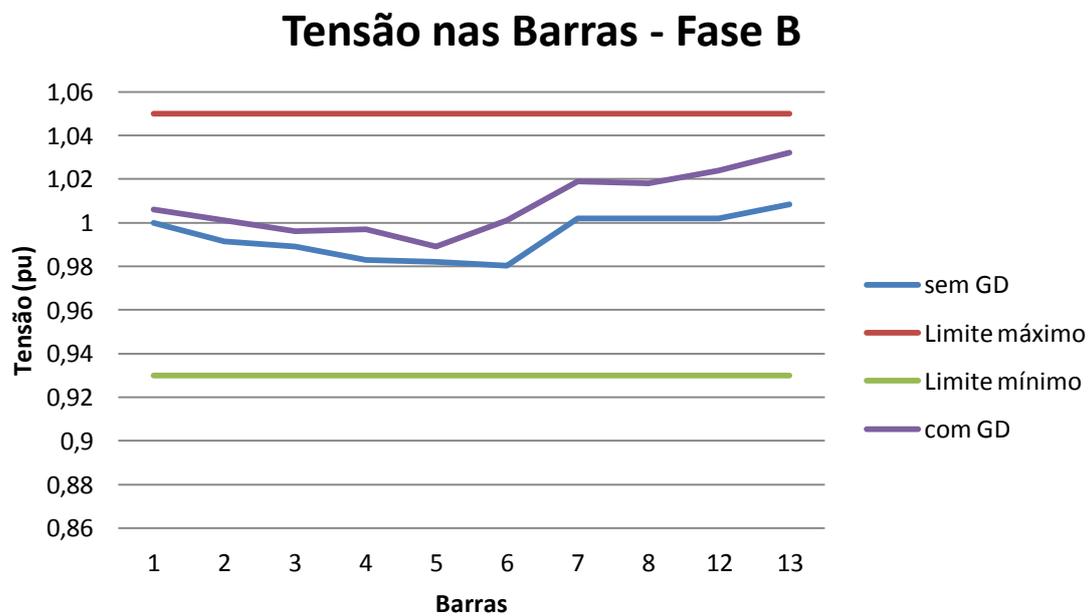
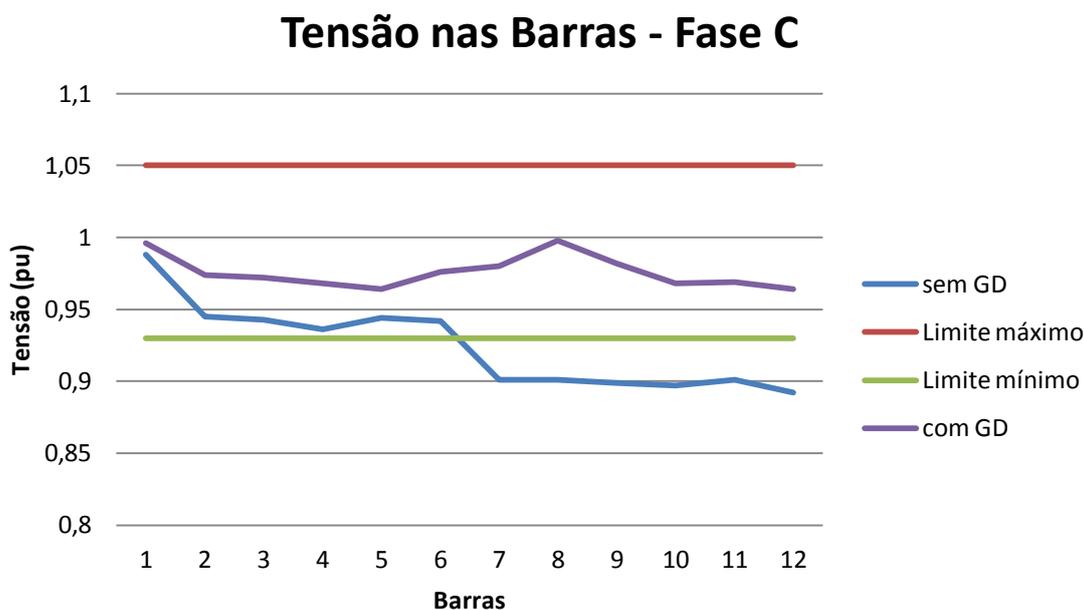


Figura 12 - Tensão nas barras com e sem GD no sistema - Fase C.



É possível notar nas Figuras 10, 11 e 12 um aumento no perfil das tensões depois que a GD foi inserida no sistema. Agora o perfil das tensões encontra-se dentro do intervalo determinado pela ANEEL [2]. Esse intervalo garante que a tensão está sendo entregue com valores adequados ao consumidor. A barra 8 encontra-se com o nível de tensão igual a 1,0 pu e as barras próximas a ela encontram-se com níveis próximos a esse valor, destacando as características do modelo de tensão constante (PV).

É sabido, através de estudos e pesquisas que a presença de GD reduz o uso e a atuação dos equipamentos reguladores instalados no sistema, fazendo com que venham atuar somente quando a produção da GD for menor que a demanda da carga. Pode-se concluir isso analisando os resultados alcançados nesse trabalho. Portanto, a inserção da GD pode contribuir positivamente para reduzir os problemas relacionados com variações de tensão.

Nas Figuras abaixo têm-se os gráficos que representam as perdas ativas após a inserção da unidade de GD. É dada a comparação das duas situações, com e sem a presença da Geração Distribuída no sistema, para todas as fases.

Figura 13 – Perdas Ativas no sistema com e sem a presença de GD – Fase A.

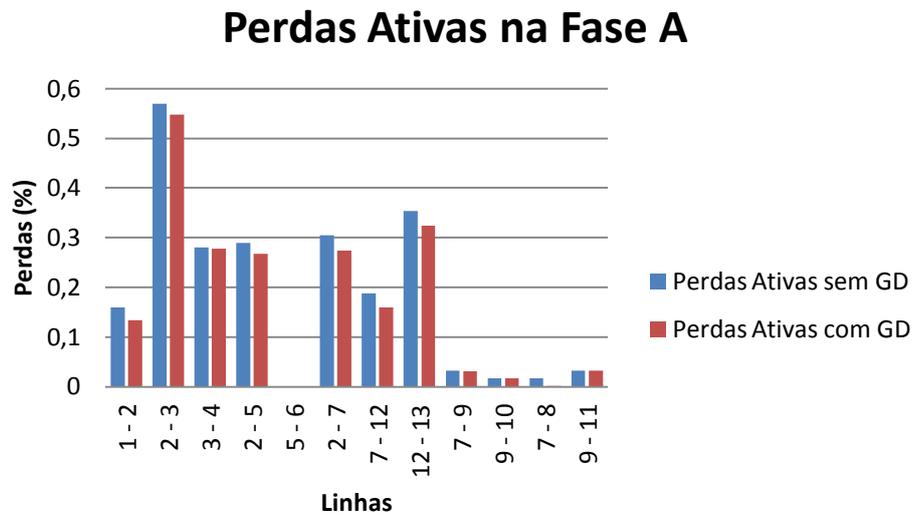


Figura 14 - Perdas Ativas no sistema com e sem presença de GD – Fase B.

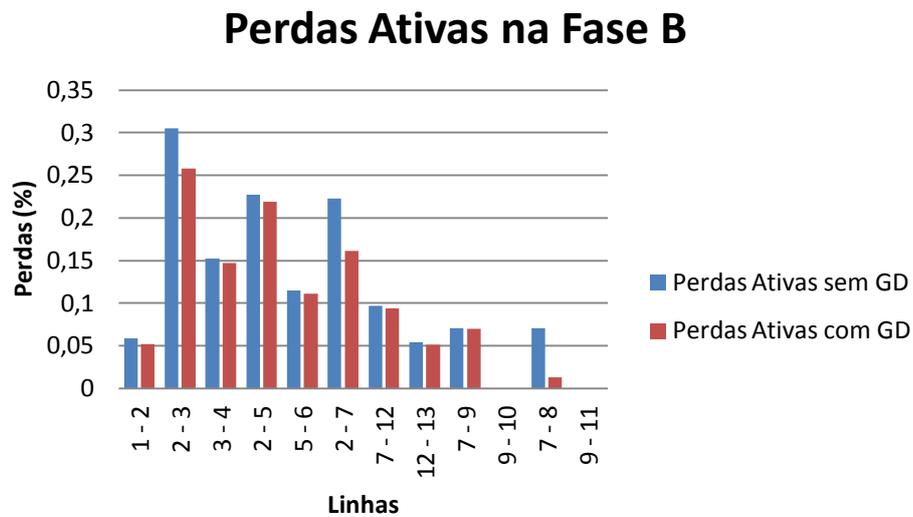
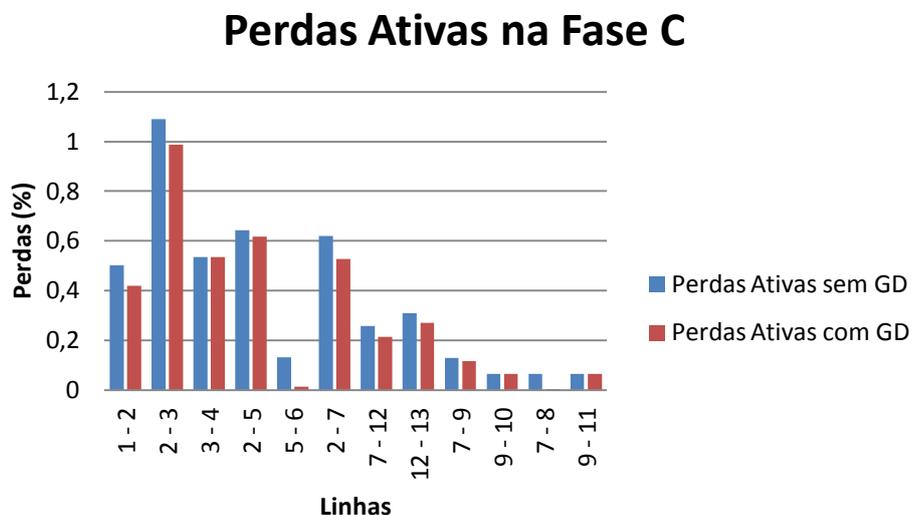


Figura 15 Perdas Ativas no sistema com e sem presença de GD – Fase C.



Através dessa comparação foi possível constatar que as perdas são diretamente proporcionais ao nível de carregamento do sistema. A presença de GD próximo à carga pode contribuir para minimização de tais perdas, uma vez que, o fornecimento de potência ativa à carga por parte da GD reduz a corrente que flui da subestação até o ponto de conexão da GD com o SDEE, reduzindo consequentemente as perdas [8].

Isso dá pelo fato de que após a inserção de uma unidade de geração, ocorre uma nova distribuição das cargas entre as unidades geradoras. Portanto, a unidade geradora estará contribuindo para o atendimento da demanda do sistema, fazendo com que as perdas diminuam e a tensão aumente.

Na tentativa de obter melhores resultados para a redução das perdas, foi feita uma nova análise no sistema através de um novo teste. Para o segundo teste, novamente usou-se uma modelagem de tensão constante (PV) para a unidade de GD. Foi especificado para esse teste uma tensão de 1,0 pu e uma potência trifásica constante e igual a 800 kW.

Abaixo encontram-se as Figuras que representam os perfis das tensões e as perdas no sistema após o segundo teste.

Figura 16 - Tensão nas barras com e sem GD no sistema – Fase A.

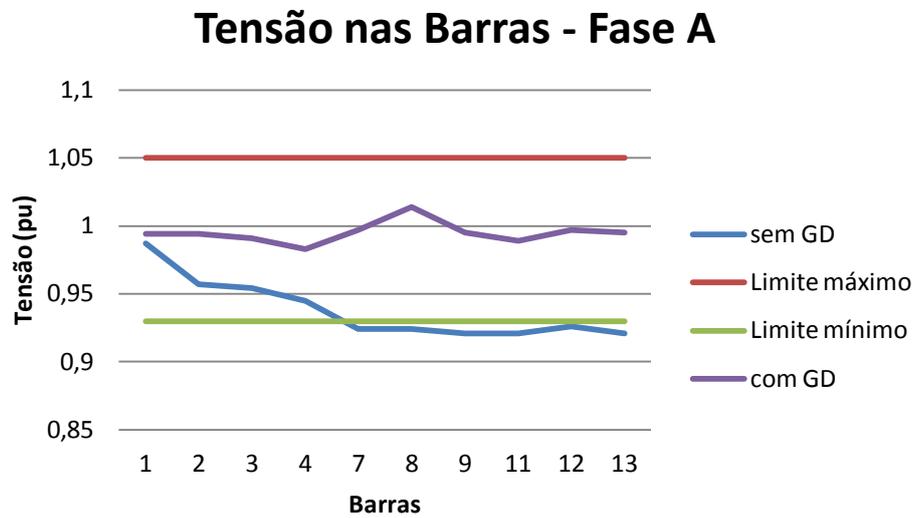


Figura 17 – Tensão nas barras com e sem GD no sistema – Fase B.

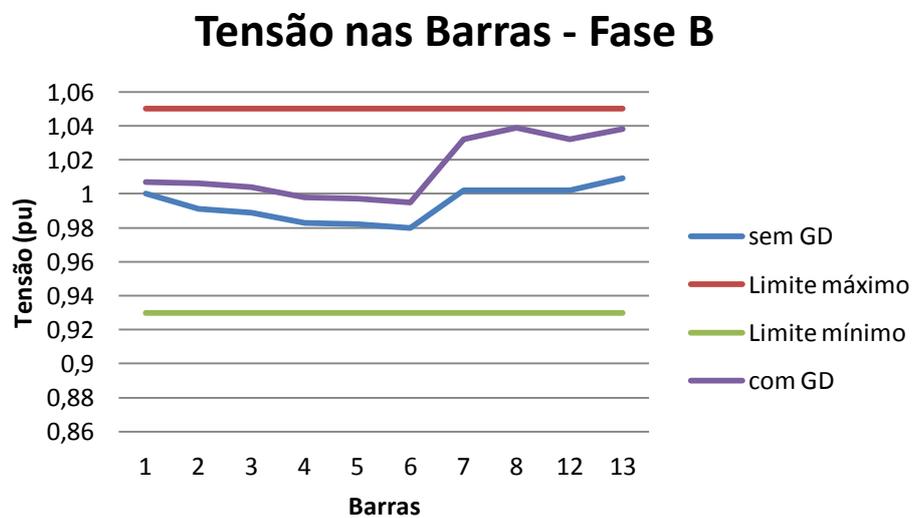
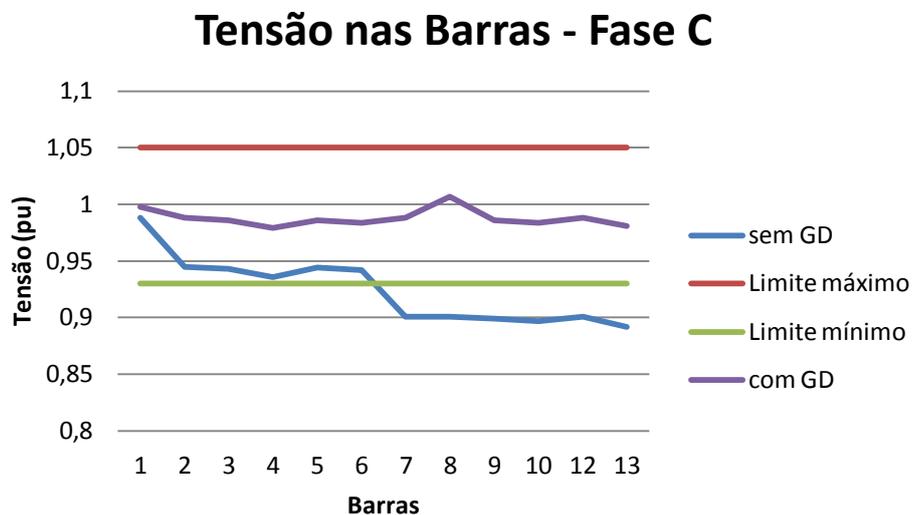


Figura 18 – Tensão nas barras com e sem GD no sistema – Fase C.



Abaixo encontram-se as Figuras referentes a comparação das perdas antes e depois de inserida a unidade de geração distribuída com potência trifásica constante e igual a 800 kW.

Figura 19 - Perdas Ativas no sistema com e sem a presença de GD – Fase A.

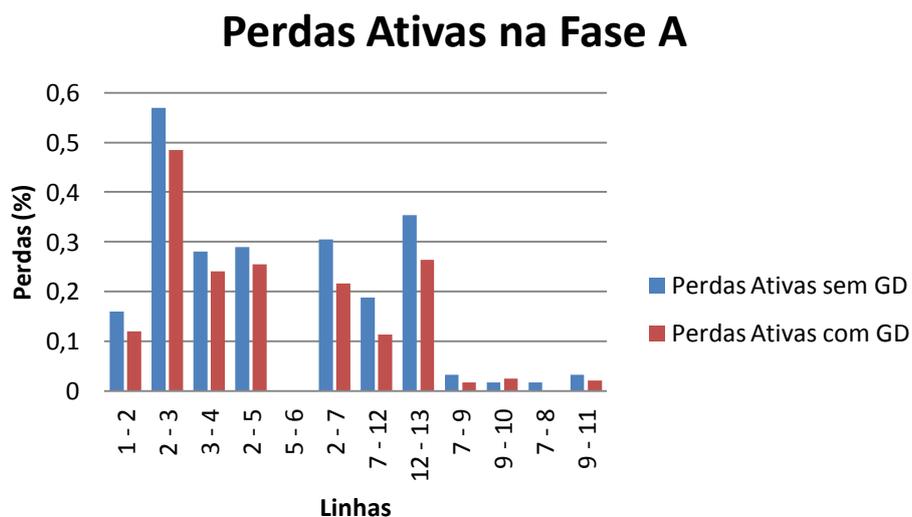


Figura 20 - Perdas Ativas no sistema com e sem a presença de GD – Fase B.

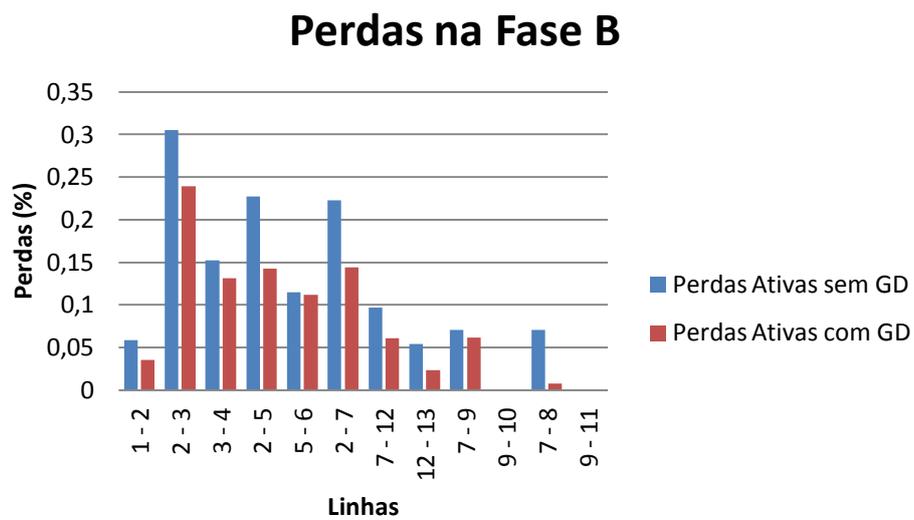
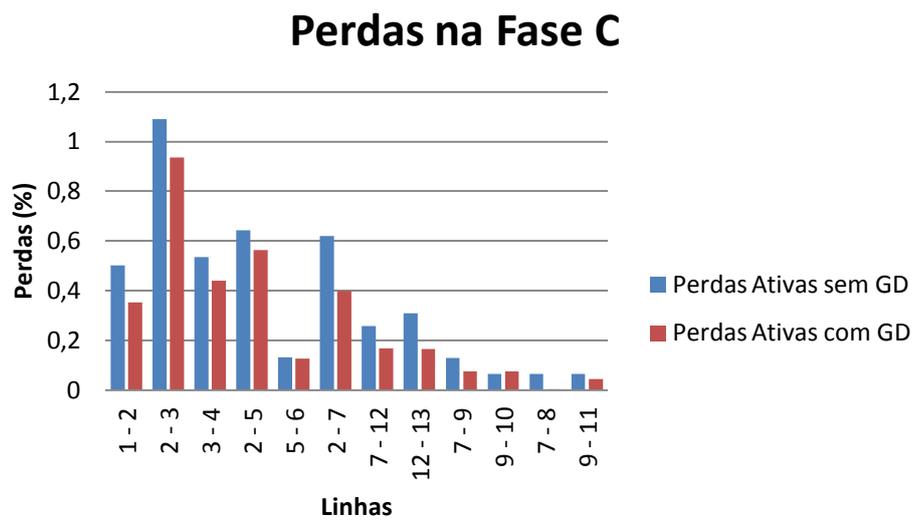


Figura 21 - Perdas Ativas no sistema com e sem a presença de GD – Fase C.



Foi observado nas Figuras 16, 17 e 18 o aumento do nível de tensão para algumas barras. Para algumas barras a fase B da tensão ficou próxima do limite máximo estabelecido pelo órgão regulador.

Foi percebido nas Figuras 19, 20 e 21, que retratam as perdas antes e depois da inserção da unidade de Geração Distribuída, que as perdas ativas nas linhas do sistema tiveram uma redução considerável.

Também foi visto nas Figuras 19, 20 e 21, que as perdas na linha 9-10 nas fases A e C foram maiores depois da presença da unidade de GD.

Como mencionado previamente, os sistemas de distribuição foram anteriormente projetados pressupondo um fluxo de energia elétrica unidirecional, desde o sistema de geração até a carga. O aparecimento de flutuações ou de um fluxo de potência inverso na rede elétrica, causados pela adição de GD, pode influenciar o sistema de distribuição em termos de perdas de energia, perfil de tensão, qualidade de energia ou proteção e segurança do sistema.

Portanto, a inserção de geradores independentes em um sistema ocasiona uma modificação no fluxo de potência inicial, gerando fluxos de potência multidirecionais, causando também modificações nas perdas do sistema. A mudança do sentido de fluxo é mais intensa principalmente quando a geração é maior que a carga [8]. Por conseguinte, de acordo com a realidade do sistema em teste, é necessário um dimensionamento adequado da geração independente e uma boa localização da mesma, de forma que o sistema se torne confiável e de qualidade.

## 5 CONSIDERAÇÕES

Analisando os resultados obtidos, fica claro que o nível de tensão aumentou, porém encontra-se dentro dos limites estabelecidos pela ANEEL [2]. Constata-se que a instalação de unidades de GD altera o perfil de tensão da rede de distribuição. Isso ocorre devido às variações no fluxo de potência. Também foi visto que as perdas tiveram uma redução satisfatória. Para uma unidade de GD com um nível de potência trifásica constante e igual a 20% da carga do agente as perdas ativas diminuíram consideravelmente em relação à unidade de GD de potência inferior.

Deve-se ter cuidado no valor da potência escolhido para a unidade de GD, tanto para seguir o padrão da definição de GD, quanto para se ter a precaução em relação a valores altos de tensão acima do limite pré-estabelecido.

Pelos resultados obtidos pode-se destacar que as vantagens de se introduzir a GD são inúmeras.

Ao analisar os testes feitos, pode-se notar grandes vantagens técnicas associadas à implementação adequada de unidade de geração distribuída. É importante entender que apenas com uma ótima localização e um dimensionamento adequado das instalações de GD se consegue obter resultados que cumpram os objetivos aos qual a integração de GD se propõe a resolver, como por exemplo, a redução das perdas no sistema.

Entre os diferentes benefícios técnicos citados em [3], foram observados, após os testes no sistema, os seguintes:

- Melhoria do perfil de tensão;
- Redução de perdas do sistema;
- O aumento da eficiência energética;
- Melhoria da confiabilidade e segurança do sistema;
- Melhoria da qualidade da energia;
- Redução das emissões de gases de efeito estufa a partir de centrais de energia centralizadas;
- Redução das cargas nas linhas de transporte e distribuição.

Já em termos de vantagens econômicas tem-se a economia de combustível, pois após a inserção da unidade de GD, o sistema agora é atendido não somente por a geração centralizada, mas também pela geração distribuída, sendo essa última tendo como principais fontes de produção as fontes renováveis. Também existe a economia nos custos de transmissão e distribuição e como consequência a redução do preço da eletricidade.

Assim, entre os diferentes benefícios econômicos citados em [4], foram observados, após os testes no sistema, os seguintes:

- Adiantamento do investimento em atualizações de instalações;
- Reduzido custo de operação e manutenção de algumas tecnologias de GD;

- Maior produtividade;
- Redução dos gastos com combustíveis devido ao aumento da eficiência energética;
- Aumento da segurança para cargas consideradas críticas.

Quanto às perdas ao longo da rede elétrica, a presença da unidade de GD impactou positivamente o sistema. Foi observado que as instalações de geração devem ser situadas em locais que proporcionem maiores reduções das perdas. Esses locais, quase sempre são próximos às cargas, próximos das zonas de consumo. Portanto, ficou evidenciado que em redes elétricas com elevadas perdas, uma unidade de GD bem dimensionada e estrategicamente localizada pode causar uma redução significativa das perdas. Seguindo o mesmo contexto, para uma determinada capacidade de GD, existe um local no sistema onde a ligação de unidade de geração torna mínimas as perdas de energia. A este local específico é comum identificá-lo de localização ótima.

Já sobre o controle da tensão, foi visto que dependendo do correto dimensionamento da unidade de GD que está sendo inserida no sistema, o resultado a respeito dos níveis de tensão é bastante satisfatório. Sabendo que o controle da regulação de tensão é geralmente baseado em fluxos de energia, um inadequado posicionamento da unidade de GD pode induzir grandes flutuações da tensão na rede (subtensões ou sobretensões), causando enormes variações no perfil de tensão. Mais uma vez, apenas com a correta instalação de unidades de GD é possível obter benefícios que auxiliem a rede elétrica.

## 6 CONCLUSÃO

Ficou evidenciado que a inserção da Geração Distribuída pode contribuir positivamente para minimizar os problemas relacionados com variações de tensão e também com a redução das perdas.

Para analisar o sistema de distribuição, foi necessário avaliar os valores dos perfis das tensões nas barras e as perdas ativas desse sistema. Ressalta-se que o fluxo de potência trata-se de um problema matemático, formado por um conjunto de equações diferenciais parciais, cuja solução permite determinar os valores de tensão e potência em cada um dos pontos do sistema em estudo. Sabendo que o estudo do fluxo de potência é complexo, as ferramentas computacionais são muito utilizadas.

Foi verificado que o uso de *softwares* como ferramenta para modelagem de sistemas elétricos é indispensável. A importância de se utilizar simulações visando representar um fenômeno ou um comportamento físico para reduzir riscos na tomada de decisão, identificar problemas antes de suas ocorrências, e de excluir processos que não auxiliam nas análises quantitativas, é notória.

A partir dos resultados obtidos, observou-se a diferença do sistema sem e com a presença da unidade de GD. Verificando esses resultados, foram percebidas mudanças satisfatórias no sistema de uma maneira geral.

Os benefícios alcançados com a introdução de GD na minimização das perdas, na melhoria do perfil de tensão e na fiabilidade do sistema de distribuição, fazem com que os estudos sobre a implementação desta tecnologia tenham uma elevada importância no contexto elétrico.

Os potenciais benefícios da produção distribuída dependem da localização e dimensão das unidades geradoras. O correto dimensionamento resultará em situações como a redução das perdas energéticas e o aumento dos níveis de fiabilidade de todo o sistema. Porém, um dimensionamento errôneo pode fazer com que as perdas em algumas regiões sejam maiores do que eram antes do acréscimo da unidade de GD. Esse aumento das perdas se dá como consequência da mudança do sentido de fluxo, sendo essa mais intensa especialmente quando a geração é maior que a carga.

Portanto, destaca-se que apenas com a determinação do local mais adequado e as dimensões apropriadas das unidades de GD se consegue obter resultados satisfatórios no que toca às melhorias que se podem efetuar no sistema elétrico, como por exemplo, prevenir a atuação indevida de dispositivos reguladores de tensão e da proteção do sistema, e evitar as perdas devido à distância das cargas para com a geração.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] LIMA, R.O., MELO, N.X., JUNIOR, B.F.S., BARBOSA, F.R., LINARD, F.M.A., LIRA, M.A.T. (2014). Estudo de Perdas no Sistema Elétrico de Potência com presença de Geração Distribuída usando ATPDraw. Artigo, Universidade Federal do Piauí.
- [2] ANEEL, PRODIST. Módulo 3 – Acesso no Sistema de Distribuição. Revisão 5 de 14 de dezembro de 2012. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=82>. acesso em fevereiro de 2016.
- [3] FILHO, Wilson Pereira Barbosa, AZEVEDO, Abílio César Soares. Geração Distribuída: Vantagens e Desvantagens. Disponível em: [http://www.feam.br/images/stories/arquivos/mudnacaclimatica/2014/artigo\\_gd.pdf](http://www.feam.br/images/stories/arquivos/mudnacaclimatica/2014/artigo_gd.pdf), acesso em Fevereiro de 2016.
- [4] DEC 5.163/2004 (DECRETO DO EXECUTIVO). Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2004-2006/2004/Decreto/D5163.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2004/Decreto/D5163.htm), acesso em Janeiro de 2016.
- [5] MME – Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <http://www.mme.gov.br>. acesso em Março de 2016.
- [6] INEE – Instituto Nacional de Eficiência Energética, Fórum de Co-Geração e Geração Distribuída. Geração Distribuída e Conexão ao Sistema Elétrico (Proposta de Revisão da Resolução ANEEL 281/99) 2002.(22pgs)
- [7] BORGES, Carmen L. T. Apostila Completa – Análise de Sistemas de Potência. Edição: HAZAN, Sergio S., GUERRA, Leonardo N. A. (2005). Departamento de Eletrotécnica, Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [8] OLIVEIRA, SELMA ALVES. (2016). Geração Distribuída Fotovoltaica: Avaliação dos Impactos Técnicos e um Breve Estudo de Viabilidade Econômica. Dissertação de Mestrado, Março/2016, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB.
- [9] IEEE. Disponível: [www.ewh.ieee.org/soc/pes/dsacomtestfeeders/index](http://www.ewh.ieee.org/soc/pes/dsacomtestfeeders/index) , acesso em Janeiro de 2016.
- [10] BACCA, Ivandro A. Introdução ATPDraw. (2007). Universidade Federal de Mato Grosso. Departamento de Engenharia Elétrica.
- [11] FONSECA, HUGO LEONARDO C. A. DA & LEAL, MÁRCIO FERNANDES. (2003). Análise de Transitórios Eletromagnéticos Utilizando o ATPDraw. Monografia

de Graduação, Publicação ENE 12/2003, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 134p.

# APÊNDICE A

## A.1 MODELAGEM DAS CARGAS

A rede de distribuição de energia elétrica é um segmento do sistema elétrico, composto pelas redes elétricas primárias (redes de distribuição de média tensão), e redes secundárias (redes de distribuição de baixa tensão). A função do sistema de distribuição é o fornecimento de eletricidade para os usuários de sua rede.

A carga que um alimentador de distribuição apresenta para análise é a soma das demandas dos consumidores conectados a essa rede. Os tipos de consumidores presente em um sistema de distribuição são os industriais, comerciais e residenciais. A demanda de cada consumidor é a média das cargas utilizadas pelos aparelhos eletrônicos individuais de cada consumidor em um determinado período de tempo.

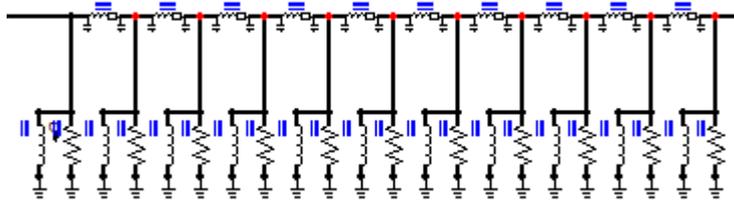
As cargas num sistema de distribuição são especificadas tipicamente pelas potências complexas dos consumidores. As cargas podem ser especificadas em: kVA e fator de potência, kW e fator de potência ou kW e kVAr. Podem ser trifásicas, bifásicas ou monofásicas. As cargas podem ser representadas por diferentes tipos de modelos em análises de fluxo de potência de redes de distribuição. Os modelos são os seguintes:

- Potência constante;
- Corrente constante;
- Impedância constante.

Esses modelos são inicialmente definidos pelas respectivas potências complexas por fase e vinculados a tensões de fase (fase-neutro) para cargas em estrela ou a tensões de linha (fase-fase) para cargas em delta. As cargas nos alimentadores podem ser representadas de forma distribuída ao longo da linha ou concentradas em pontos específicos.

As cargas de um sistema de distribuição podem, muitas vezes, serem representadas por uma distribuição contínua devido à proximidade em que se encontram

especialmente. As cargas distribuídas presente no trecho entre as barras 2 e 7 foram modeladas da seguinte maneira:

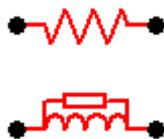


Componentes RLC trifásicos foram distribuídos de forma igualitária ao longo do trecho, sendo utilizadas a resistência e indutância para caracterizar essas cargas.



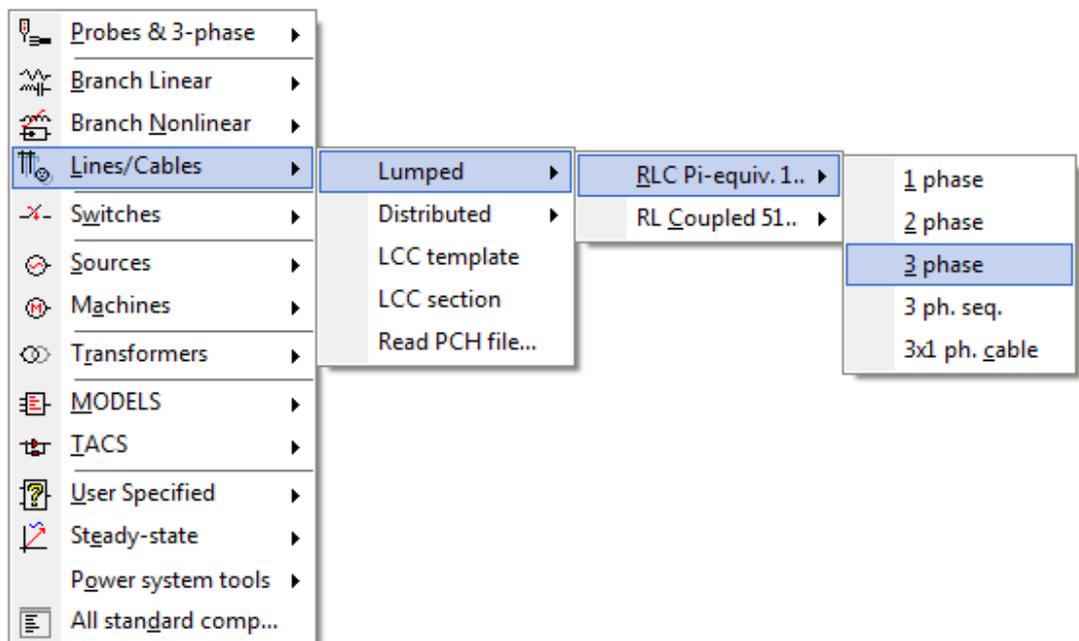
As mesmas foram separadas por modelos de linhas de transmissão dadas por o modelo RLC Pi – *equivalente 3phase*.

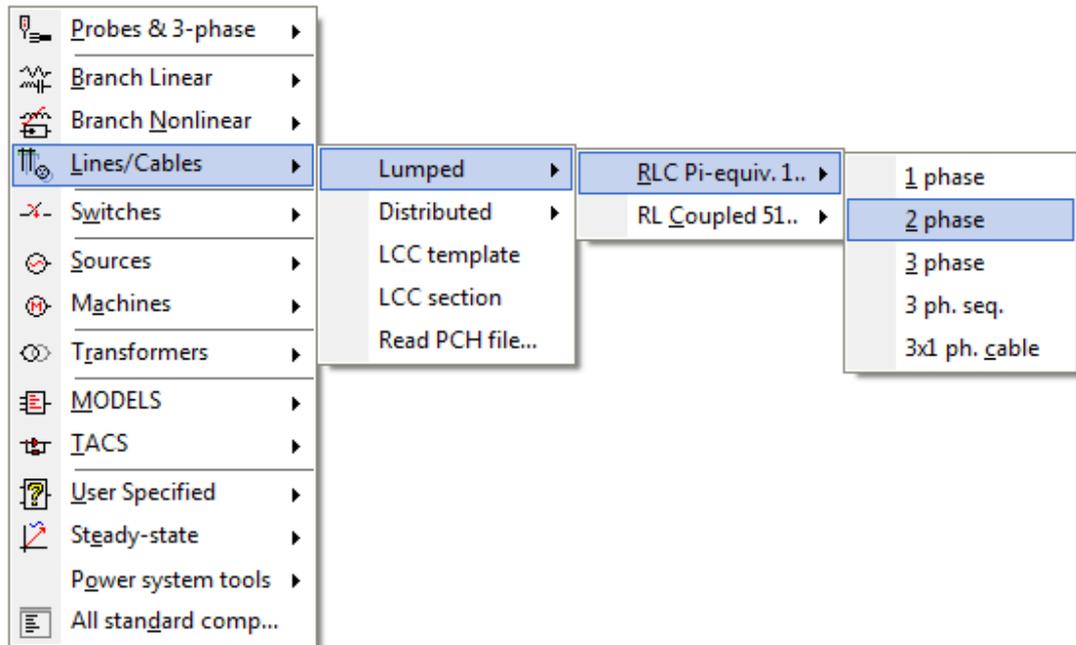
As cargas concentradas foram modeladas como cargas RL. Essa modelação se deu através de resistores e indutores. As mesmas foram conectadas em estrela (Y) ou delta, dependendo da característica da barra que a carga em questão estaria inserida.



## A.2 MODELAGEM DAS LINHAS

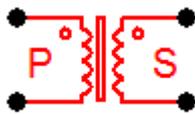
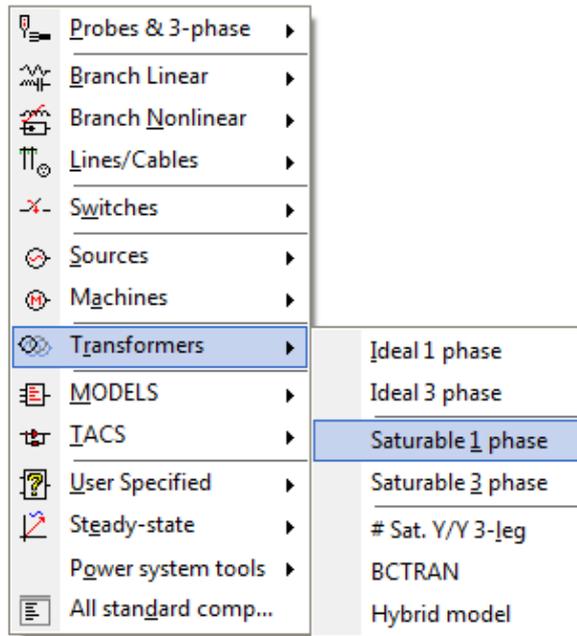
As linhas, de acordo com a localização foram modeladas como sendo trifásicas ou bifásicas. Os modelos de linhas de transmissão disponíveis no ATPDraw são bastante flexíveis e atendem as necessidades mais frequentes dos estudos de transitórios [1]. Nesse trabalho, as linhas de transmissão foram representadas por uma cadeia PI. O modelo usado foi RLC Pi – *equivalente 3phase e 2 phase*.





### A.3 MODELAGEM DO TRANSFORMADOR

No ATPDraw existem vários tipos de transformadores para ser usado na realização do modelamento da rede elétrica. Nesse trabalho, foi usado um transformador que se aproximasse do real, por isso foi escolhido o “*saturable 1 phase*”. Os dois transformadores do sistema são trifásicos, portanto foi usado banco de transformadores “*saturable 1 phase*” para a modelagem de cada transformador trifásico.



Para o transformador XFM-1, os parâmetros foram fornecidos aos componentes que representam o mesmo:

Component: TRAF0\_S

| DATA | UNIT  | VALUE    | NODE | PHASE | NAME |
|------|-------|----------|------|-------|------|
| Io   | Volts | 0        | P1   | A     |      |
| Fo   | Vs    | 0        | P2   | C     |      |
| Rmag | Ohms  | 0        | S1   | A     |      |
| Rp   | Ohms  | 0.001    | S2   | 1     |      |
| Lp   | Ohm   | 0        |      |       |      |
| Vip  | KV    | 4.16     |      |       |      |
| Rs   | Ohms  | 0.005069 |      |       |      |
| Ls   | Ohm   | 0.009216 |      |       |      |

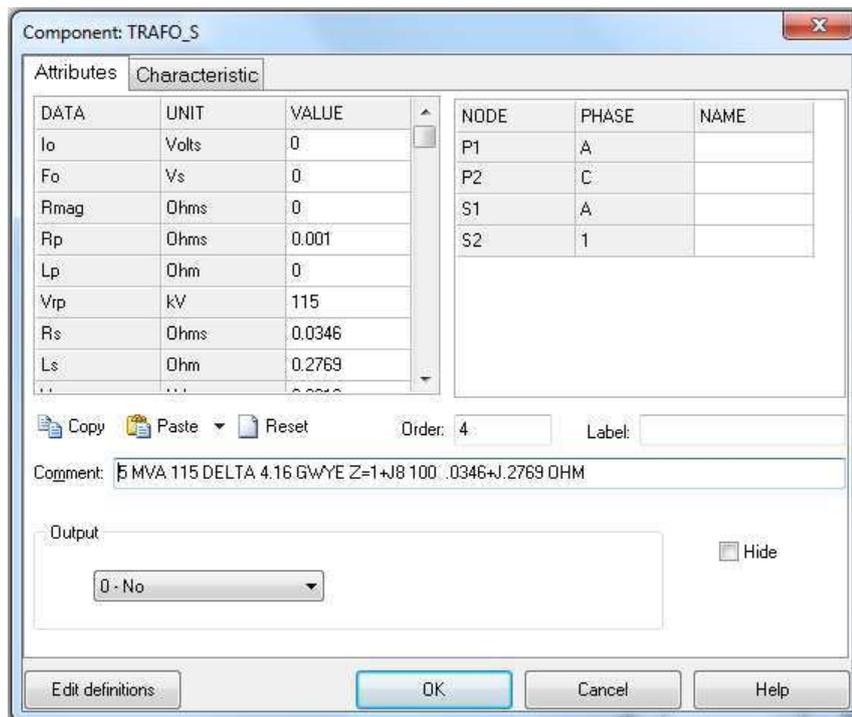
Copy Paste Reset Order: 5 Label:

Comment: 500 KVA 4.16DELTA/480 WYE Z=1.1+J2% .005069+J.009216 OHM

Output: 0 - No  Hide

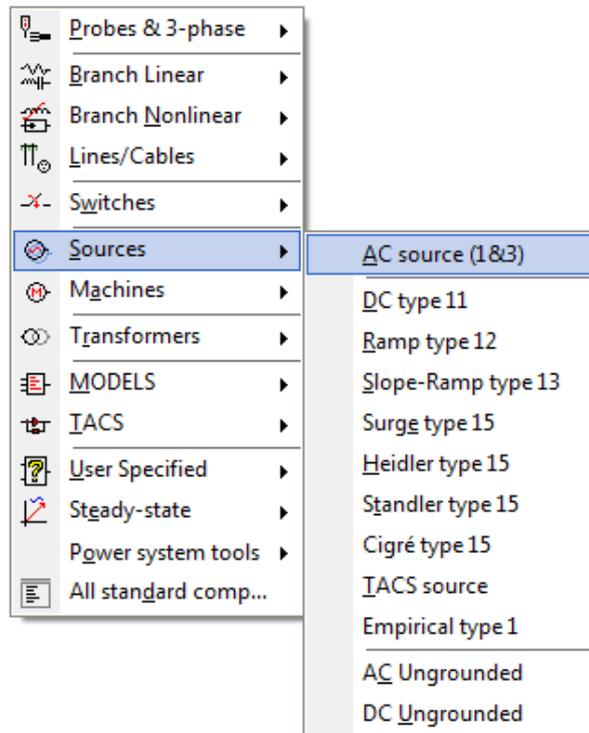
Edit definitions OK Cancel Help

Para o transformador da subestação, os parâmetros foram fornecidos aos componentes que representam o mesmo:



#### A.4 MODELAGEM DA FONTE

Para a fonte de tensão do sistema, foi utilizado o modelo “AC source (1&3)”. A modelagem da fonte foi através de uma fonte senoidal trifásica, amplitude RMS L-L e unidades de ângulos em graus: 0 grau, 120 graus e -120 graus para as fases A, B e C respectivamente.



Os parâmetros foram fornecidos ao componente:

Component: ACSOURCE

Attributes

| DATA        | UNIT    | VALUE  | NODE | PHASE | NAME |
|-------------|---------|--------|------|-------|------|
| AmplitudeA  | Volt    | 115000 | AC   | ABC   |      |
| Frequency   | Hz      | 60     |      |       |      |
| PhaseAngleA | degrees | 0      |      |       |      |
| StartA      | sec     | -1     |      |       |      |
| StopA       | sec     | 100    |      |       |      |

Copy Paste Reset Order: 100 Label:

Comment: 115 kV

Type of source:  Current  Voltage

Num phases:  Single  3-phase  3\*1-phase

Angle units:  Degrees  Seconds

Amplitude:  Peak L-G  RMS L-G  RMS L-L

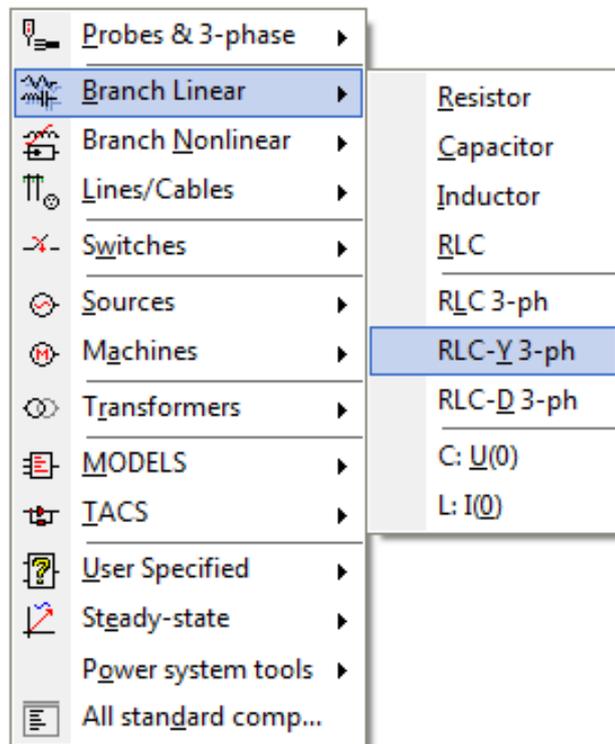
Grounding:  Grounded  Ungrounded

Hide

Edit definitions OK Cancel Help

## A.4 MODELAGEM DOS BANCOS DE CAPACITORES

Os bancos de capacitores presentes no sistema foram modelados através do elemento “*RLC-Y-3-ph*”, sendo fornecidos aos modelos de elementos apenas os valores capacitivos.



Os parâmetros foram fornecidos ao componente:

Component: RLCY3

Attributes

| DATA | UNIT    | VALUE |
|------|---------|-------|
| R_1  | Ohm     | 0     |
| L_1  | Ohm     | 0     |
| C_1  | $\mu$ F | 93.25 |
| R_2  | Ohm     | 0     |
| L_2  | Ohm     | 0     |
| C_2  | $\mu$ F | 93.25 |
| R_3  | Ohm     | 0     |
| L_3  | Ohm     | 0     |

| NODE | PHASE | NAME  |
|------|-------|-------|
| IN   | ABC   | BUS75 |
| OUT  | 1     |       |

Copy Paste Reset Order: 3 Label:

Comment:

Output

0 - No

Hide  
 \$Vintage.1

Edit definitions OK Cancel Help