

Lucas Grandez Cavalcante

**Alocação ótima de banco de capacitores para  
redução de perdas na rede de distribuição da  
UFPB**

João Pessoa

2017

Lucas Grandez Cavalcante

# **Alocação ótima de banco de capacitores para redução de perdas na rede de distribuição da UFPB**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da UFPB como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Universidade Federal da Paraíba – UFPB

Orientador: Prof. Clivaldo Silva de Araújo. Dr., UFPB

João Pessoa

2017

Cavalcante, Lucas Grandez

Alocação ótima de banco de capacitores para redução de perdas na rede de distribuição da UFPB/ Lucas Grandez Cavalcante. – João Pessoa, 2017-

51f il:

Orientador: Prof. Clivaldo Silva de Araújo. Dr., UFPB

Monografia (Curso de Graduação em Engenharia Elétrica) Campus I  
- UFPB / Universidade Federal da Paraíba.

1. Alocação ótima. 2. Simulação computacional. 2. Fluxo de potência. I. Clivaldo Silva de Araújo. II. Universidade Federal da Paraíba. III. Centro de energias alternativas e renováveis. IV. Alocação ótima de banco de capacitores para redução de perdas na rede de distribuição da UFPB.

Lucas Grandez Cavalcante

## **Alocação ótima de banco de capacitores para redução de perdas na rede de distribuição da UFPB**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da UFPB como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Banca examinadora

---

**Prof. Clivaldo Silva de Araújo. Dr.,  
UFPB**  
Orientador

---

**Prof. Yuri Percy Molina Rodriguez.  
Dr., UFPB**  
Avaliador 1

---

**Prof. Rogério Gaspar de Almeida. Dr.,  
UFPB**  
Avaliador 2

João Pessoa  
2017

# Agradecimentos

A Deus, sem O qual nada seria possível.

À minha mãe, Eunides Gomes Grandez de Araújo, pelo apoio incondicional. Obrigado, mãe.

À minha namorada, Rafaela Oliveira da Silva, pela paciência, incentivo e, sobretudo, pelo amor demonstrado.

Ao professor Clivaldo Silva de Araújo pela orientação e dedicação ao me ajudar neste trabalho.

Aos engenheiros da prefeitura universitária, Thenysson Viana Souza e Alysson Luiz, pela disponibilidade e desejo de ensinar.

Ao mestrando Alex Ferreira Moreira pela colaboração(grande!) na implementação da rede da UFPB.

Ao professor Yuri Percy Molina Rodriguez, sempre prestativo e disposto a auxiliar com valiosas sugestões.

A todos que colaboraram com a minha formação pessoal e profissional.

*“Não vos amoldeis às estruturas deste mundo,  
mas transformai-vos pela renovação da mente,  
a fim de distinguir qual é a vontade de Deus:  
o que é bom, o que Lhe é agradável, o que é perfeito.  
(Bíblia Sagrada, Romanos 12, 2)*

# Resumo

Este trabalho discute um novo posicionamento, baseado em simulações computacionais, para os bancos de capacitores localizados na rede de distribuição da Universidade Federal da Paraíba. Para isso, as características da rede de distribuição foram levantadas: transformadores, bancos de capacitores e demais parâmetros da rede. Obteve-se também, por meio de medição, a curva de carga durante um período específico de consumo. A partir dos dados coletados e cálculos de fluxo de potência, as perdas do sistema foram obtidas. Utilizou-se, então, um processo de otimização que considera os custos dos bancos de capacitores e as perdas, assim, obteve-se um novo posicionamento dos bancos na rede da UFPB com conseqüente diminuição da fatura da energia elétrica consumida. Em todo o processo, a ferramenta utilizada tanto no fluxo de carga quanto na otimização foi o *software DlgSILENT*®.

**Palavras-chave:** Otimização. Simulação computacional. Fluxo de potência.

# Abstract

This monography discusses a new positioning, based on computational simulation, for the capacitor banks located in the network of the Federal University of Paraíba. The installation of capacitors in distribution networks aims to reduce the losses resulting from the reactive energy of the system. The computational simulation used the software DlgSILENT and considered essential parameters for the optimization: cost of capacitor banks and electric energy.

**Keywords:** Capacitor placement. Computational simulation. Load flow.



# Lista de ilustrações

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Representação do sistema elétrico de potência. . . . .   | 14 |
| Figura 2 – Convenção de sinais para potência, fluxo e elementos <i>shunt</i> . . . . .  | 19 |
| Figura 3 – Modelo equivalente $\pi$ de uma linha de transmissão. . . . .  | 20 |
| Figura 4 – Correção do fator de potência ilustrado no triângulo das potências. . .  | 23 |
| Figura 5 – Espaçador da rede de distribuição da UFPB. . . . .   | 25 |
| Figura 6 – Alimentadores dentro do cubículo de medição. . . . .   | 27 |
| Figura 7 – Transformadores de potencial e de corrente do cubículo de medição. . .   | 27 |
| Figura 8 – Processo de aquisição de dados. . . . .  | 28 |
| Figura 9 – Tela com aquisição de dados. . . . .   | 28 |
| Figura 10 – Perfil de carga médio da UFPB. . . . .  | 30 |
| Figura 11 – A interface gráfica do <i>DIgSILENT PowerFactory</i> ® . . . . .  | 32 |
| Figura 12 – Parâmetros do elemento <i>external grid</i> . . . . .   | 33 |
| Figura 13 – Biblioteca <i>Junction/internal node</i> . . . . .  | 33 |
| Figura 14 – Procedimento para posicionar <i>Junction/internal node</i> . . . . .  | 34 |
| Figura 15 – Procedimento de criação da biblioteca de geometria dos condutores. . .  | 35 |
| Figura 16 – Procedimento de criação da biblioteca do condutor de 50 mm <sup>2</sup> . . . . .   | 36 |
| Figura 17 – Procedimento de criação da biblioteca de carga. . . . .   | 36 |
| Figura 18 – Procedimento para determinar potência da carga. . . . .   | 37 |
| Figura 19 – Rede completa da UFPB no <i>DIgSILENT PowerFactory</i> ® . . . . .  | 37 |
| Figura 20 – Localização dos bancos de capacitores na interface gráfica do <i>DlgSILENT</i><br>® antes e depois da otimização. . . . . | 42 |
| Figura 21 – Rede completa da UFPB no <i>DlgSILENT PowerFactory</i> ® . . . . .  | 47 |
| Figura 22 – Localização dos bancos de capacitores na interface gráfica do <i>DlgSILENT</i><br>® antes da otimização. . . . .          | 49 |
| Figura 23 – Localização dos bancos de capacitores na interface gráfica do <i>DlgSILENT</i><br>® depois da otimização. . . . .         | 51 |

# Lista de tabelas

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Dados gerais da rede elétrica da UFPB. . . . .  | 26 |
| Tabela 2 – Lista de transformadores da UFPB. . . . .   | 26 |
| Tabela 3 – Lista de bancos de capacitores da UFPB. . . . .   | 26 |
| Tabela 4 – Potência aparente, ativa e fator de potência médios da UFPB no período<br>estudado. . . . . | 29 |
| Tabela 5 – Consumo de cada tipo transformador em relação a sua potência nominal.                       | 31 |
| Tabela 6 – Posicionamento dos condutores da rede. . . . .  | 35 |
| Tabela 7 – Fator de potência das cargas sem os bancos de capacitores. . . . .                          | 40 |
| Tabela 8 – Localização dos bancos de capacitores antes e depois da otimização. . .                     | 41 |

# Lista de abreviaturas e siglas

|      |                                 |
|------|---------------------------------|
| MW   | Megawatts                       |
| kW   | Quilowatts                      |
| kWh  | Quilowatt hora                  |
| kV   | Quilovolts                      |
| kVAr | Quilovolt Ampère reativo        |
| UFPB | Universidade Federal da Paraíba |

# Sumário

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b>                                  | <b>13</b> |
| 1.1      | Objetivos  | 15        |
| 1.2      | Estrutura do trabalho                              | 16        |
| <b>2</b> | <b>FLUXO DE POTÊNCIA</b>                           | <b>17</b> |
| 2.1      | Formulação básica do fluxo de potência             | 17        |
| 2.2      | Expressões gerais dos fluxos                       | 19        |
| 2.3      | Métodos de solução das equações de fluxo           | 21        |
| 2.3.1    | Método de Newton-Raphson                           | 21        |
| <b>3</b> | <b>CORREÇÃO DE FATOR DE POTÊNCIA</b>               | <b>23</b> |
| <b>4</b> | <b>REDE DE DISTRIBUIÇÃO DA UFPB</b>                | <b>25</b> |
| 4.1      | Estrutura geral da rede                            | 25        |
| 4.2      | Aquisição de dados para a pesquisa                 | 26        |
| 4.3      | Distribuição das cargas                            | 30        |
| <b>5</b> | <b>O SOFTWARE DIGSILENT POWERFACTORY®</b>          | <b>32</b> |
| 5.1      | Implementação da rede                              | 32        |
| 5.2      | Alocação ótima de capacitores                      | 38        |
| 5.2.1    | Mudança na rede implementada                       | 39        |
| <b>6</b> | <b>RESULTADOS DA ALOCAÇÃO ÓTIMA DE CAPACITORES</b> | <b>41</b> |
| 6.1      | Redução de custos                                  | 42        |
| <b>7</b> | <b>CONCLUSÃO</b>                                   | <b>43</b> |
| 7.1      | Propostas de trabalhos futuros                     | 43        |
|          | <b>REFERÊNCIAS</b>                                 | <b>44</b> |
|          | <b>APÊNDICES</b>                                   | <b>45</b> |
|          | <b>APÊNDICE A – REDE DA UFPB</b>                   | <b>46</b> |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>APÊNDICE B – LOCALIZAÇÃO DOS BANCOS DE CAPACITORES NA INTERFACE GRÁFICA DO <i>DLGSILENT</i></b> |           |
| <sup>®</sup> <b>ANTES DA OTIMIZAÇÃO . . . . .</b>  | <b>48</b> |
| <b>APÊNDICE C – LOCALIZAÇÃO DOS BANCOS DE CAPACITORES NA INTERFACE GRÁFICA DO <i>DLGSILENT</i></b> |           |
| <sup>®</sup> <b>DEPOIS DA OTIMIZAÇÃO . . . . .</b>   | <b>50</b> |

# 1 Introdução

A principal tarefa dos sistemas elétricos de potência é fornecer energia elétrica aos consumidores, grandes ou pequenos, com a qualidade adequada, no instante em que for solicitada (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010). É preocupação do engenheiro electricista cada etapa do processo de geração, transmissão e distribuição da energia elétrica. Cada grande bloco deste sistema é descrito a seguir:

- Geração:

Converte alguma forma de energia em energia elétrica. De modo geral, as grandes empresas estatais ou privadas são normalmente as responsáveis pela geração de energia elétrica, devido ao expressivo aporte de capital necessário nesses empreendimentos. Nas usinas geradoras a energia elétrica é produzida em um nível de tensão da ordem de uma ou duas dezenas de quilovolts (ZANETTA JR, 2006). No Brasil, a maior parte da energia gerada vem de usinas hidrelétricas e térmicas. As hidrelétricas utilizam o potencial hidráulico para fornecer o conjugado motor ao gerador e produzem desde algumas dezenas de MW até milhares de MW. Por outro lado, as usinas térmicas usam, em sua maioria, óleo combustível ou carvão para obter o vapor necessário para produção de energia elétrica. Apesar de seu tempo de construção e custo de investimento serem sensivelmente mais baixos que a usina hidrelétrica, seu custo operacional é elevado, em virtude do preço do combustível. As usinas térmicas, portanto, funcionam como complemento às hidrelétricas e operam em função dos seus níveis de reservatório (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010) (FILHO, 2017).

- Transmissão:

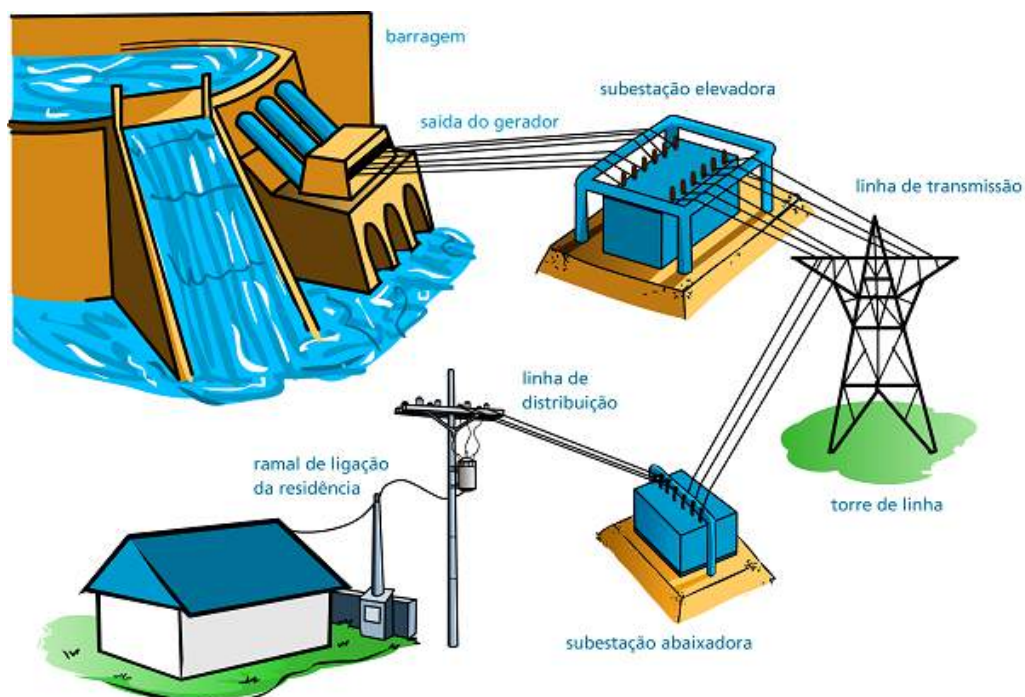
Transporta a energia elétrica dos centros de produção aos de consumo. Por razões econômicas, a transmissão é normalmente efetuada em tensões elevadas (por exemplo, 345 kV, 500 kV ou 750 kV). Devido a limitações físicas e de isolamento elétrico, os geradores não podem operar nesses níveis de tensão; tipicamente, com as tecnologias tradicionais, geradores operam na faixa de 10 kV a 30 kV. Assim, geradores que estão afastados dos centros de carga injetam sua potência gerada na rede através de transformadores elevadores que têm a função de transformar os níveis de tensão de geração para os níveis de tensão de transmissão, com a consequente redução dos níveis de corrente e, portanto, das perdas de transmissão (MONTICELLI; GARCIA, 2011). O sistema deve operar interligado. Tal interligação é exigida por várias razões, dentre elas, destacando-se a confiabilidade e a possibilidade de intercâmbio entre as áreas. A título de exemplo, a operação interligada permite que, nos meses de

verão, São Paulo exporte energia para o Paraná, e que no inverno importa energia do Paraná (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

- Distribuição:

Distribui a energia elétrica recebida do sistema de transmissão aos consumidores. Por razões práticas, a potência entregue aos centros de carga não pode, em geral, ser consumida nos níveis de tensão em que é feita a transmissão, dessa forma, subestações ocupam-se em realizar as interligações e compatibilizar os vários níveis de tensão. Isso acarreta um aumento correspondente dos níveis de corrente (e perdas), mas isso é normalmente aceitável, pois ocorre já nas proximidades das cargas (MONTICELLI; GARCIA, 2011). O elo de ligação entre o sistema de distribuição e de transmissão é chamado sistema de subtransmissão. Este sistema opera usualmente com tensão de 138 kV ou 69 kV. Os consumidores em tensão de subtransmissão são representados, geralmente, por grandes instalações industriais, estações de tratamento e bombeamento de água. Por outro lado, as subestações de distribuição, que são responsáveis pela transformação da tensão de subtransmissão para tensão de distribuição primária em 13,8 kV atendem aos consumidores primários e aos transformadores de distribuição que suprem a rede secundária, ou de baixa tensão em 220/380 V (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010). A figura 1 mostra uma representação do sistema elétrico de potência.

Figura 1 – Representação do sistema elétrico de potência.



Fonte: Site Mundo da elétrica. Acesso em Outubro 2017.

A rede de distribuição primária é o objeto de pesquisa deste trabalho. Mas diferente do estudo de circuitos elétricos, onde estamos acostumados a lidar com impedâncias fixas e obter soluções para equações lineares, o estudo de sistemas elétricos de potência não pode afirmar que uma barra, representando uma cidade ou uma indústria, tenha uma impedância para a terra estabelecida e que seja constante para as operações da rede. Assim, para solução da rede elétrica, suas equações são colocadas na forma de um problema de fluxo de potência. No cálculo do fluxo de potência, a maneira mais comum encontrada é admitir que a potência complexa absorvida pelas barras de carga tenha uma potência determinada e admitida constante. Como a potência complexa é o resultado do produto entre os fasores de corrente e tensão, temos como característica a não linearidade das equações envolvidas no problema do fluxo de potência (ZANETTA JR, 2006).

A resolução de um sistema elétrico por meio do fluxo de potência tem a finalidade de obter diversos parâmetros da rede, tais como (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010):

- Cálculo da potência e da corrente que fluem pelos trechos da rede.
- Cálculo das tensões nas barras da rede e, a partir disso, cálculo das perdas em termos de energia e potência.
- Determina os desequilíbrios de corrente e tensão para redes assimétricas ou com cargas desequilibradas.

Nesse contexto, a alocação de capacitores sob a ótica da redução de perdas e, por consequência, a diminuição no custo da energia elétrica, surge como um importante campo de estudo após os resultados do fluxo de potência.

Os capacitores podem ser vistos como uma fonte de energia reativa. Eles são instalados em sistemas de potência para compensar a energia reativa necessária nas reatâncias de linhas. Quando são utilizados de maneira apropriada, permitem, além da redução das perdas, correção de fator de potência, melhoria no perfil de tensões, controle dos fluxos de potência e aumento da capacidade do sistema. As perdas podem ser reduzidas pela aplicação de capacitores em pontos adequados da rede, elevando a energia reativa próximas às cargas (MENDES et al., 2013).

## 1.1 Objetivos

A finalidade deste trabalho é a alocação ótima dos bancos de capacitores existentes na rede da Universidade Federal da Paraíba. Para isso, a rede primária de distribuição foi implementada no *software DlgSILENT PowerFactory*<sup>®</sup> e utilizou-se sua função de alocação ótima de capacitores para estabelecer a melhor opção de lugar dos bancos já existentes na rede.



Na primeira parte do estudo foi obtida as distâncias entre as cargas da rede de média tensão com o uso de trena a laser. Em seguida, mediu-se a potência consumida no cubículo de medição geral da Universidade. Por fim, a rede foi simulada e obteve-se a alocação ótima dos bancos de capacitores em relação aos custos e perdas na rede.

## 1.2 Estrutura do trabalho

Este trabalho de Conclusão de Curso se divide em três partes: revisão da literatura, preparação da pesquisa e resultados. A primeira parte possui dois capítulos e aborda uma análise das publicações sobre os temas propostos.

A segunda parte discute as características gerais da rede de distribuição primária da UFPB e a sua implementação em *software*.

Por fim, a terceira parte apresenta os resultados da otimização dos bancos de capacitores da UFPB, bem como a redução de custos obtidas. Além disso, o capítulo 7 traz a conclusão deste estudo.

## 2 Fluxo de potência

Por cálculo do fluxo de potência (ou fluxo de carga) em uma rede de energia elétrica, entende-se a resolução do circuito elétrico que representa a rede. Ou seja, a determinação do estado da rede, da distribuição dos fluxos e de outras grandezas de interesse. Nesse tipo de problema, a modelagem do sistema é estática, significando que a rede é representada por um conjunto de equações e inequações algébricas. Os componentes de um sistema elétrico podem ser classificados em dois grupos: os que estão ligados entre um nó qualquer e nó terra, como é o caso de geradores, cargas, reatores e capacitores; e os que estão ligados entre dois nós quaisquer da rede, como é o caso de linhas de transmissão, transformadores e defasadores (MONTICELLI, 1983).

As equações básicas do fluxo de carga podem ser obtidas a partir da conservação de energia em cada nó da rede. Isto é, a potência ativa e reativa em cada nó da rede deve ser igual à soma das potências dos componentes internos que têm esse nó como um de seus terminais, isto equivale a se impor a Primeira Lei de Kirchhoff (Lei dos nós). Para expressar os fluxos de potências de componentes internos como funções das tensões é utilizada a Lei Ohm (MONTICELLI; GARCIA, 2011). A formulação básica do fluxo de carga é mostrada a seguir.

### 2.1 Formulação básica do fluxo de potência

Em um sistema elétrico, as barras são considerados condutores com resistência desprezível, pelo menos quando comparadas as impedâncias de linha e transformadores. Assim, elas podem ser representadas como nós elétricos nos quais a tensão é uma só em todas as partes do condutor. Na formulação mais simples do problema do fluxo de potência, para cada barra são associadas quatro variáveis, sendo duas dados do problema e duas incógnitas, então, para uma dada barra  $k$ , temos as seguintes variáveis (MONTICELLI, 1983):

- $V_k$  – magnitude da tensão nodal (barra  $k$ )
- $\theta_k$  – ângulo da tensão nodal
- $P_k$  – geração líquida (ou seja, geração menos a carga) de potência ativa
- $Q_k$  – injeção líquida de potência reativa

De acordo com as variáveis que serão fornecidas no problema e as variáveis que serão as incógnitas, podemos caracterizar os três tipos de barra mais frequentes e importantes (ZANETTA JR, 2006) (MONTICELLI; GARCIA, 2011):

- Barras de carga, do tipo 1, também conhecidas como PQ, nas quais conhecemos P e Q, restando determinar V e  $\theta$ .
- Barra de geração, ou do tipo 2, também conhecidas como do tipo PV, nas quais fixamos as grandezas P e V, dado que em uma usina hidrelétrica o operador dispõe de recursos para controlar a potência ativa, por meio de controle na turbina, e também da tensão, por meio da excitação dos geradores síncronos. Nessas barras resta determinar Q e  $\theta$ .
- Barra oscilante do tipo V $\theta$ , *swing*, ou do tipo 3. Nas quais, conhecemos V e  $\theta$ , restando determinar P e Q. A barra V $\theta$  também fornece a referência de ângulo para o sistema, além disso, é utilizada para fechar o balanço de potência do sistema, levando em conta as perdas de transmissão não conhecidas antes de se ter a solução final do problema.

A partir da aplicação da Primeira Lei de Kirchhoff, podemos estabelecer o conjunto de equações do problema de fluxo potência. Segundo (MONTICELLI, 1983), teremos duas equações para cada barra, cada uma delas representando o fato de as potências ativas e reativas injetadas em uma barra serem iguais à soma dos fluxos correspondentes que deixam a barra através de linhas de transmissão, transformadores e etc. As expressões são mostradas a seguir:

$$\begin{aligned} P_k &= \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \\ Q_k + Q_k^{sh}(V_k) &= \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \end{aligned} \quad (2.1)$$

em que

$k = 1, \dots, N$ , sendo N o número de barras da rede

$\Omega_k$  - conjunto das barras vizinhas a k

$V_k, V_m$  - magnitude das tensões das barras terminais do ramo k - m

$\theta_k, \theta_m$  - tensões das tensões das barras terminais do ramo k - m

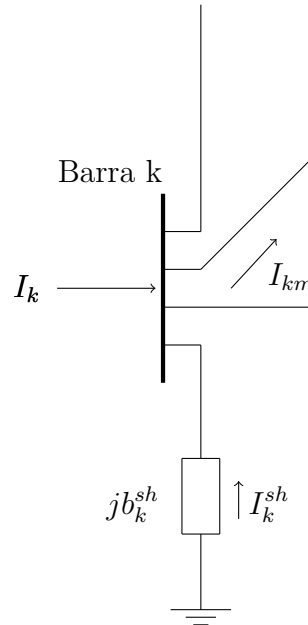
$P_{km}$  - fluxo de potência ativa no ramo k - m

$Q_{km}$  - fluxo de potência reativa no ramo k - m

$Q_k^{sh}$  - componente injeção de potência reativa devida ao elemento *shunt* da barra k

As expressões 2.1 foram montadas considerando-se a seguinte convenção de sinais: as injeções líquidas de potência são positivas quando entram na barra (geração) e negativas quando saem da barra (carga); os fluxos de potência são positivos quando saem da barra e negativos quando entram; para os elementos *shunt* das barras é adotada a mesma convenção das injeções. Essas convenções são mostradas na figura 2.

Figura 2 – Convenção de sinais para potência, fluxo e elementos *shunt*.



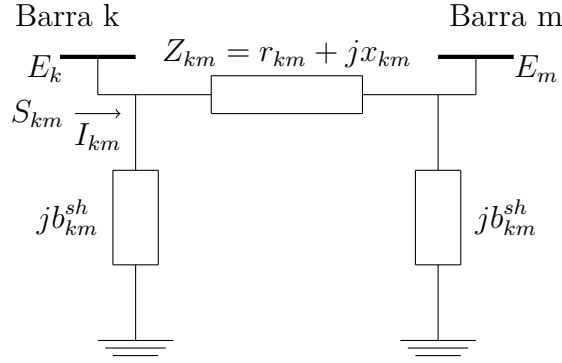
Fonte: Adaptada de (MONTICELLI; GARCIA, 2011)

O problema do fluxo de potência também apresenta restrições nas magnitudes das tensões nodais das barras PQ e nos limites nas injeções de potência reativa das barras PV:

$$\begin{aligned} V_k^{min} &\leq V_k \leq V_k^{max} \\ Q_k^{min} &\leq Q_k \leq Q_k^{max} \end{aligned} \quad (2.2)$$

## 2.2 Expressões gerais dos fluxos

Para exemplificar as expressões de fluxo de potência, será utilizado o modelo  $\pi$  de uma linha de transmissão, representada por três parâmetros: a resistência série  $r_{km}$ , a reatância série  $x_{km}$  e a susceptância *shunt*  $b_{km}^{sh}$ . A impedância do elemento série, por sua vez, será:  $Z_{km} = r_{km} + jx_{km}$ . O modelo é mostrado na figura 3.

Figura 3 – Modelo equivalente  $\pi$  de uma linha de transmissão.

Definindo  $E_k$  e  $E_m$  como as tensões de terminal de cada barra, temos as seguintes equações (MONTICELLI, 1983):

A corrente  $I_{km}$  é dada por:

$$I_{km} = y_{km}(E_k - E_m) + jb_{km}^{sh}E_k \quad (2.3)$$

em que

$$E_k = V_k e^{j\theta_k} \quad E_m = V_m e^{j\theta_m} \quad (2.4)$$

As expressões para o fluxo de potência ativa e reativa são obtidas a partir da equação de fluxo da potência complexa. O fluxo da potência complexa é mostrado a seguir:

$$S_{km}^* = P_{km} - jQ_{km} = E_k^* I_{km} \quad (2.5)$$

Substituindo 2.3 e 2.4 em 2.5, temos:

$$S_{km}^* = V_k e^{-j\theta_k} \cdot \left[ y_{km} (V_k e^{j\theta_k} - V_m e^{j\theta_m}) + jb_k^{sh} V_k e^{j\theta_k} \right] \quad (2.6)$$

$$S_{km}^* = V_k e^{-j\theta_k} y_{km} (V_k e^{j\theta_k} - V_m e^{j\theta_m}) + jb_k^{sh} V_k^2 \quad (2.7)$$

Os fluxos de potência ativa e reativa são obtidos identificando-se partes reais e imaginária dessa equação complexa e podem ser observados nas equações 2.8 e 2.9.

$$P_{km} = V_k^2 g_{km} - V_k V_m (g_{km} \cos \theta_{km} + b_{km} \sin \theta_{km}) \quad (2.8)$$

$$Q_{km} = -V_k^2 (b_{km} + b_{km}^{sh}) - V_k V_m (g_{km} \sin \theta_{km} - b_{km} \cos \theta_{km}) \quad (2.9)$$

As perdas por potência ativa e reativa na linha são dadas, respectivamente, por:

$$P_{km} + P_{mk} = g_{km} (V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos \theta_{km}) \quad (2.10)$$

$$Q_{km} + Q_{mk} = -b_{km}^{sh} (V_k^2 + V_m^2) - b_{km} (V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos \theta_{km}) \quad (2.11)$$

Em que

$g_{km}$  - Condutância do elemento série

$b_{km}$  - Susceptância do elemento série

$b_{km}^{sh}$  - Susceptância do elemento *shunt*

## 2.3 Métodos de solução das equações de fluxo

A seção 2.2 apresentou as expressões para o cálculo do fluxo de potência. Entretanto, a solução algébrica dessas equações não é prática. A única forma de resolvê-las é por meio do método iterativo. Nele, são atribuídos valores estimados para as tensões de barra desconhecidas e calculando um novo valor para cada tensão de barra a partir dos valores estimados nas outras barras, da potência real especificada e da potência reativa especificada ou do módulo de tensão especificada. Então, é obtido um novo conjunto de valores para as tensões em cada barra, o qual é usado para calcular outro conjunto de tensões de barra. Cada cálculo de um novo conjunto de tensões é chamado de iterações (STEVENSON, 1986).

Existem diferentes métodos iterativos para solução das equações de fluxo de potência: Gauss/Gauss-Seidel, Glimn-Stagg, Ward-Hale, Newton-Raphson. Dentre eles, os mais utilizados são o Gauss-Seidel e o Newton-Raphson. O método de Gauss possui uma aplicação mais simples, porém apresenta características de convergência mais lenta. Já o método de Newton, possui uma construção mais complexa, mas os resultados são alcançados com poucas iterações.

O método de Newton-Raphson, que é empregado pelo *software DlgSILENT Power-Factory*<sup>®</sup>, será detalhado a seguir.

### 2.3.1 Método de Newton-Raphson

O método de Newton-Raphson, também conhecido como método das tangentes, é um método geral para solução de equações não lineares. Esse método usa como base a expansão da série de Taylor para resolver o problema de fluxo de potência.

Considerando o seguinte conjunto de equações do problema do fluxo de potência (MONTICELLI, 1983):

$$\begin{aligned} \Delta P_k &= P_k^{esp} - P_k \\ \Delta P_k &= P_k^{esp} - V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} \Delta Q_k &= Q_k^{esp} - Q_k \\ \Delta Q_k &= Q_k^{esp} - V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} + B_{km} \cos \theta_{km}) \end{aligned} \quad (2.13)$$

Onde  $k = 1, \dots, N$  barras.  $K$  é o conjunto de barras vizinhas à barra  $k$ , inclusive  $k$ . O índice “esp” aponta os valores especificados de potência ativa e reativa. Já  $G$  e  $B$  são a condutância e a susceptância entre as barras  $k$  e  $m$ .

Representando as equações 2.12 e 2.13 na forma matricial, temos:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Em que a matriz que contém os elementos  $H$ ,  $L$ ,  $M$  e  $N$  é a matriz Jacobiana  $J$ :

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

No método de Newton, as componentes das tensões de nó  $\Delta V$  e  $\Delta \theta$  podem ser escritas na forma das diferenças  $\Delta P$  e  $\Delta Q$  e da matriz Jacobiana. Assim, é possível calcular novos valores para as tensões nas barras e potência injetadas. Por último, testa-se o critério de convergência 2.16. Se o critério for atendido, as iterações são interrompidas. Caso contrário, as iterações continuam enquanto um erro menor que o desejado não é alcançado.

$$\max(\Delta P, \Delta Q) < \text{Erro} \quad (2.16)$$

Como resultado, temos os valores de magnitude e fase das tensões nas barras. A partir desse ponto, pode-se encontrar outras variáveis de interesse do sistema estudado.

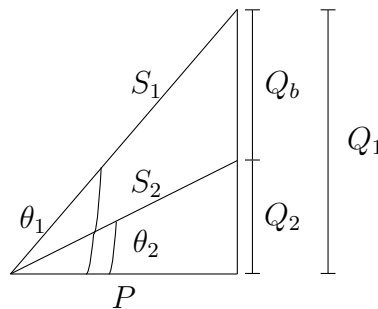
### 3 Correção de fator de potência

A maioria das cargas domésticas ou industriais alimentadas pela rede elétrica necessitam de dois tipos de potência: potência ativa e potência reativa. A potência reativa  $Q$  é uma medida de troca de energia entre a fonte e a parte reativa da carga. Logo, apenas a potência ativa  $P$  é a potência real consumida pela carga. Embora não se transforme em trabalho, a potência reativa é fundamental para equipamentos como: transformadores, motores e bobinas, pois tem a função de magnetizá-los. A potência reativa, no entanto, pode ser prejudicial caso esteja em excesso no sistema. As principais desvantagens pelo uso elevado da potência reativa são: aumento das perdas no sistema elétrico; diminuição da vida útil dos equipamentos devido ao aquecimento excessivo; aumento do custo da energia para o consumidor e a concessionária (ALEXANDER; SADIKU, 2013).

O indicativo utilizado para medir a relação entre potência ativa e reativa é o fator de potência. O fator de potência próximo de um mostra pouca necessidade de potência reativa em relação à potência ativa. O fator de potência pode ser elevado em um processo conhecido como correção de fator de potência.

O aumento do fator de potência sem alterar a tensão ou a corrente para carga original é chamado de correção de fator de potência. O processo consiste em acrescentar um elemento reativo (geralmente, um capacitor) em paralelo com a carga a fim de tornar o fator de potência próximo à unidade. Considerando a figura 4, que ilustra a correção do fator de potência no triângulo das potências, temos um exemplo de aumento de fator de potência.

Figura 4 – Correção do fator de potência ilustrado no triângulo das potências.



Seja um carga indutiva inicial com potência aparente  $S_1$ , temos (ALEXANDER; SADIKU, 2013):

$$P = S_1 \cos \theta_1, \quad Q_1 = S_1 \sin \theta_1 = P \operatorname{tg} \theta_1 \quad (3.1)$$



Para aumentarmos o fator de potência de  $\cos \theta_1$  para  $\cos \theta_2$  sem alterar a potência ativa  $P$ , a nova potência reativa deve ser:

$$Q_2 = P \cdot \operatorname{tg} \theta_2 \quad (3.2)$$

A diminuição da potência reativa é causada pelo capacitor (ou banco de capacitores) de potência  $Q_b$ . Logo, para o aumento do fator de potência de  $\cos \theta_1$  para  $\cos \theta_2$  é necessário um elemento reativo com a seguinte potência:

$$Q_b = Q_1 - Q_2 = P(\operatorname{tg} \theta_1 - \operatorname{tg} \theta_2) \quad (3.3)$$

A equação 3.3 demonstra que a instalação de capacitores junto a uma carga indutiva, por exemplo, limitaria a necessidade de fornecimento de potência reativa pela rede de energia elétrica, pois os capacitores forneceriam parte da potência reativa exigida pela carga. Assim, os prejuízos resultantes do baixo fator de potência seriam eliminados.

## 4 Rede de distribuição da UFPB

### 4.1 Estrutura geral da rede

A rede de distribuição primária do campus I da Universidade Federal da Paraíba possui uma tensão de 13,8 kV. Sua estrutura é compacta com utilização de espaçadores losangulares de 15 kV. A estrutura compacta tem a vantagem de permitir a convivência entre a rede de distribuição e a grande quantidade de árvores do campus. A figura 5 mostra o espaçador da rede compacta.

Figura 5 – Espaçador da rede de distribuição da UFPB.



Fonte: Site Ancora Industrial. Acesso em Agosto 2017.

A rede de distribuição tem início próximo à pista de atletismo onde a concessionária tem seu ponto de medição. A partir daí, se ramifica para atender as estruturas prediais ao longo do campus. A estrutura contém 80 transformadores, possui chaves a óleo e chaves do tipo faca. As chaves a óleo permitem a abertura da rede sob carga. Já as chaves faca possibilitam estabelecer um seccionamento visível nas linhas de distribuição. Ambas têm a função de realizar manobras na rede com fins de manutenção.

A UFPB se encontra na classe tarifária A4 azul e seu perfil de carga mostra um consumo mais alto durante o período fora de ponta e carga mais baixa na ponta(período do dia no qual o preço da energia é mais elevado). A seguir, na tabela 1, temos um quadro resumo com algumas características da rede elétrica da UFPB.

Tabela 1 – Dados gerais da rede elétrica da UFPB.

|                           |  |
|---------------------------|--|
| Tensão nominal            | 13,8 kV  |
| Classe tarifária          | A4 Azul  |
| Demanda contratada        | Fora de ponta: 5600 kW<br>Ponta(17:30 às 20:30): 3580 kW |
| Número de transformadores | 80   |
| Chaves a óleo             | 3  |
| Chaves faca               | 19   |
| Número de postes          | 253  |

Os 80 transformadores que compõem o sistema são abaixadores de tensão e possuem relação de transformação de 13,8 kV/ 380 V. A tabela 2 mostra o número de transformadores e a potência total instalada na UFPB.

Tabela 2 – Lista de transformadores da UFPB.

| Quantidade | Potência (kVA)     |
|------------|--------------------|
| 3          | 30                 |
| 7          | 45                 |
| 19         | 75                 |
| 12         | 112,5              |
| 25         | 150                |
| 11         | 225                |
| 3          | 300                |
| Total      | Potência Instalada |
| 80         | 10305 kVA          |

As concessionárias de energia elétrica cobram multa por excesso de energia reativa no sistema, para solucionar o problema, a Universidade ainda conta com grupos de capacitores instalados para correção de fator de potência. A tabela 3 mostra o número de bancos instalados e a potência total.

Tabela 3 – Lista de bancos de capacitores da UFPB.

| Quantidade | Potência (kVAR)    |
|------------|--------------------|
| 12         | 20                 |
| 4          | 30                 |
| Total      | Potência instalada |
| 16         | 360 kVAR           |

## 4.2 Aquisição de dados para a pesquisa

Para realização deste estudo, a coleta de dados foi feita junto aos engenheiros da prefeitura universitária no cubículo de medição da concessionária de energia. As informações

obtidas foram potência ativa (P) e fator de potência. A figura 6 mostra os alimentadores da UFPB dentro do cubículo de medição.

Figura 6 – Alimentadores dentro do cubículo de medição.



A estrutura de medição contém transformadores de potencial e de corrente que auxiliam na medição em 13,8 kV. A figura 7 mostra esses transformadores.

Figura 7 – Transformadores de potencial e de corrente do cubículo de medição.



O processo de aquisição dos dados são mostrados nas figuras 8 e 9.

Os valores foram obtidos a cada 15 minutos, no período de 6:30 às 17:00. Os dados utilizados foram levantados do dia 17/07/2017 até 25/07/2017. A fim de obter um perfil de carga mais fiel à realidade da UFPB, o fim de semana foi excluído.

Figura 8 – Processo de aquisição de dados.



Figura 9 – Tela com aquisição de dados.



A tabela 4 mostra a média dos valores de potência e fator de potência para os dias coletados. A potência aparente (S) foi calculado de acordo com a equação 4.1.

$$\text{Fator de potência} = \frac{P}{S} \tag{4.1}$$

Tabela 4 – Potência aparente, ativa e fator de potência médios da UFPB no período estudado.

| Horário | Média UFPB |                   |         |
|---------|------------|-------------------|---------|
|         | P (kW)     | Fator de potência | S (kVA) |
| 06:30   | 950,9      | 0,916             | 1038,1  |
| 06:45   | 1076,6     | 0,928             | 1159,9  |
| 07:00   | 1286,9     | 0,941             | 1367,9  |
| 07:15   | 1512,5     | 0,947             | 1597,3  |
| 07:30   | 1689,1     | 0,953             | 1771,4  |
| 07:45   | 1853,3     | 0,958             | 1934,7  |
| 08:00   | 1995,4     | 0,962             | 2074,4  |
| 08:15   | 2166,7     | 0,965             | 2244,5  |
| 08:30   | 2291,1     | 0,967             | 2370,0  |
| 08:45   | 2406,2     | 0,967             | 2488,0  |
| 09:00   | 2523,4     | 0,967             | 2607,9  |
| 09:15   | 2574,7     | 0,969             | 2657,1  |
| 09:30   | 2605,9     | 0,969             | 2689,1  |
| 09:45   | 2689,8     | 0,969             | 2774,6  |
| 10:00   | 2731,7     | 0,971             | 2814,4  |
| 10:15   | 2763,4     | 0,970             | 2848,5  |
| 10:30   | 2802,7     | 0,970             | 2888,5  |
| 10:45   | 2824,3     | 0,970             | 2909,9  |
| 11:00   | 2792,6     | 0,971             | 2877,0  |
| 11:15   | 2753,3     | 0,970             | 2838,4  |
| 11:30   | 2690,9     | 0,969             | 2775,8  |
| 11:45   | 2593,4     | 0,970             | 2674,5  |
| 12:00   | 2501,3     | 0,969             | 2582,2  |
| 12:15   | 2436,0     | 0,968             | 2516,0  |
| 12:30   | 2387,0     | 0,967             | 2468,5  |
| 12:45   | 2404,1     | 0,966             | 2487,5  |
| 13:00   | 2401,0     | 0,967             | 2482,6  |
| 13:15   | 2475,7     | 0,968             | 2557,5  |
| 13:30   | 2569,0     | 0,968             | 2654,3  |
| 13:45   | 2636,2     | 0,967             | 2724,2  |
| 14:00   | 2707,7     | 0,968             | 2795,7  |
| 14:15   | 2801,5     | 0,969             | 2889,8  |
| 14:30   | 2760,5     | 0,970             | 2845,8  |
| 14:45   | 2743,7     | 0,970             | 2828,9  |
| 15:00   | 2717,3     | 0,969             | 2803,4  |
| 15:15   | 2669,3     | 0,968             | 2755,8  |
| 15:30   | 2605,0     | 0,967             | 2693,0  |
| 15:45   | 2522,4     | 0,967             | 2607,4  |
| 16:00   | 2467,2     | 0,966             | 2552,8  |
| 16:15   | 2394,7     | 0,964             | 2482,0  |
| 16:30   | 2317,0     | 0,962             | 2407,4  |
| 16:45   | 2232,0     | 0,960             | 2323,9  |
| 17:00   | 2105,7     | 0,958             | 2197,0  |
| 16:45   | 2232,0     | 0,960             | 2323,9  |
| 17:00   | 2105,7     | 0,958             | 2197,0  |

A partir da tabela 4, foi obtido um perfil de carga da Universidade. O perfil, mostrado na figura 10, mostra a potência aparente média utilizada na UFPB em relação ao horário.

Figura 10 – Perfil de carga médio da UFPB.



### 4.3 Distribuição das cargas

A fim de analisar as perdas na rede de distribuição, o perfil de carga estudado neste trabalho será 2824,3 kW, 2909,9 kVA e fator de potência 0,97, de acordo com a tabela 4. O perfil, referente ao horário 10:45, foi escolhido pois representa o maior consumo na curva média diária da Universidade. Assim, representa também a maior quantidade de perdas nas linhas de distribuição.

Uma vez que a UFPB não possui medição em cada transformador e seria inviável realizar medições em 80 trafos, elaborou-se uma estratégia para determinar a potência consumida em cada transformador, conforme expressão 4.2.

$$\text{Potência consumida do transformador} = \frac{D}{S} \cdot P \quad (4.2)$$

Em que:

D é a demanda total da rede em kVA.

S é soma da potência nominal de todos os trafos da rede em kVA.

P é a potência nominal do trafo calculado em kVA.

Um transformador de 30 kVA, por exemplo, teria a seguinte potência segundo a equação 4.2.

$$\text{Potência consumida do transformador} = \frac{2909,9}{10305} \cdot 30 = 8,471 \text{ kVA} \quad (4.3)$$

Sabendo que o fator de potência médio da rede no horário é 0,97, a potência consumida no transformador de 30 kVA é:  $8,471 \text{ kVA} \cdot 0,97 = 8,21 \text{ kW}$ .

Assim, pode-se calcular a potência consumida em cada transformador. A tabela 5 mostra a potência ativa de cada tipo transformador em relação a sua potência nominal.

Tabela 5 – Consumo de cada tipo transformador em relação a sua potência nominal.

---

| Potência nominal (kVA) | Potência (kW) |
|------------------------|---------------|
| 30                     | 8,21          |
| 45                     | 12,32         |
| 75                     | 20,54         |
| 112,5                  | 30,81         |
| 150                    | 41,08         |
| 225                    | 61,62         |
| 300                    | 82,16         |

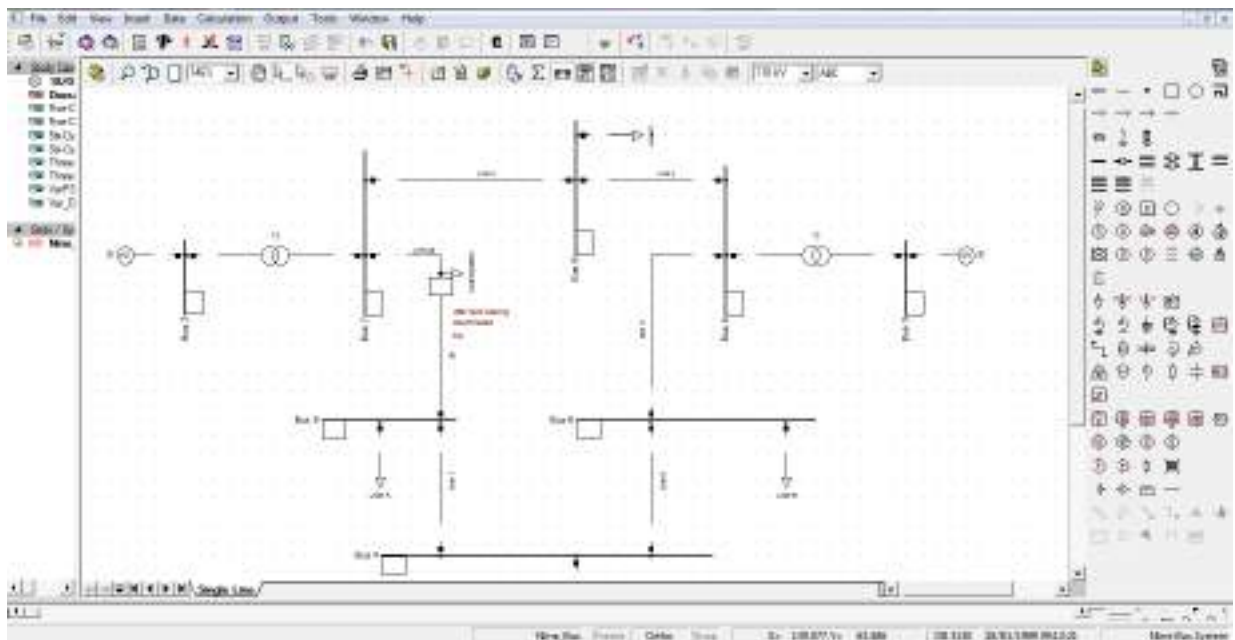
---



## 5 O software *DIgSILENT PowerFactory*®

O programa *DIgSILENT PowerFactory*® é uma ferramenta computacional para a análise de sistemas de energia elétrica industriais de transmissão e distribuição. Foi elaborado pela empresa *DIgSILENT (Digital SIMuLation and Electrical NeTwork)* no ano de 1976 e apresenta como vantagem a integração funcional geral, sua aplicabilidade à modelagem de redes de geração, transmissão, distribuição, industrial e a análise das interações dessas redes. Além disso, foi o primeiro *software* de análise de sistemas de potência com uma interface gráfica unifilar que inclui funções de desenhos, recursos de edição, cálculo estático e dinâmico dos sistemas de energia. Dentre suas funções destacam-se: cálculo de fluxo de potência, análise de curto-circuito, análise de harmônicos, alocação ótima de capacitores e fluxo de potência ótimo. A interface gráfica do programa e sua barra de ferramentas localizada à direita na imagem são mostrados na figura 11.

Figura 11 – A interface gráfica do *DIgSILENT PowerFactory*®



A seção 5.1 pretende descrever a implementação da rede da UFPB no *software*, conforme mostrado a seguir.

### 5.1 Implementação da rede

Para implementação da rede, foram utilizados quatro elementos encontrados na barra de ferramentas:

- *External grid*

É o barramento infinito: representa a ligação da rede da UFPB à rede da concessionária. O parâmetro *bus type* foi adotado como SL, ou seja, uma barra do tipo referência ou *swing*. Dessa forma, a barra serve de referência angular para as outras barras do sistema. A referência angular foi colocada em  $0^\circ$  e a magnitude da tensão em 1 p.u. A figura 12 mostra o elemento *external grid* e os parâmetros utilizados.

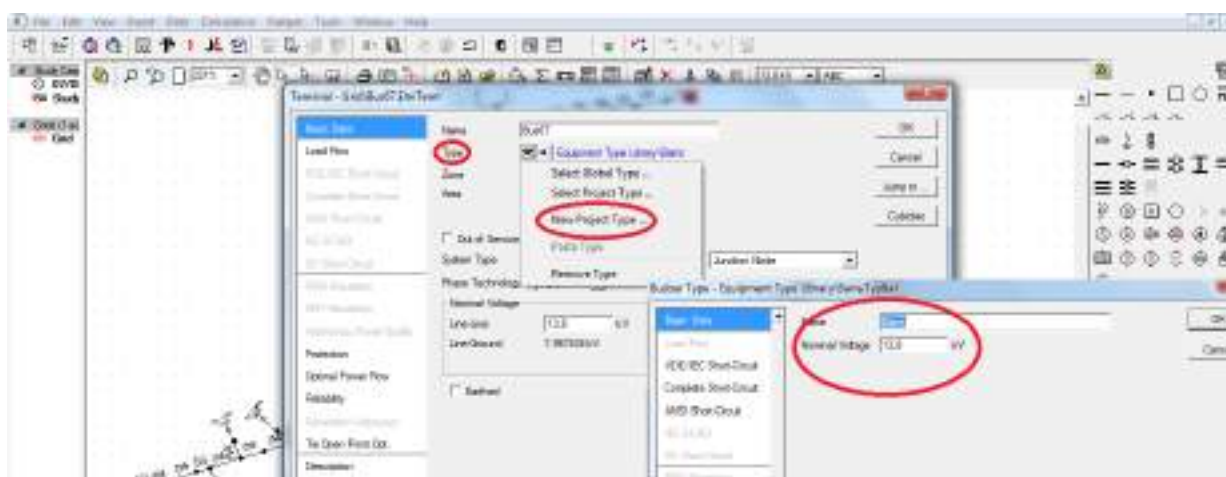
Figura 12 – Parâmetros do elemento *external grid*.



- *Junction/internal node*

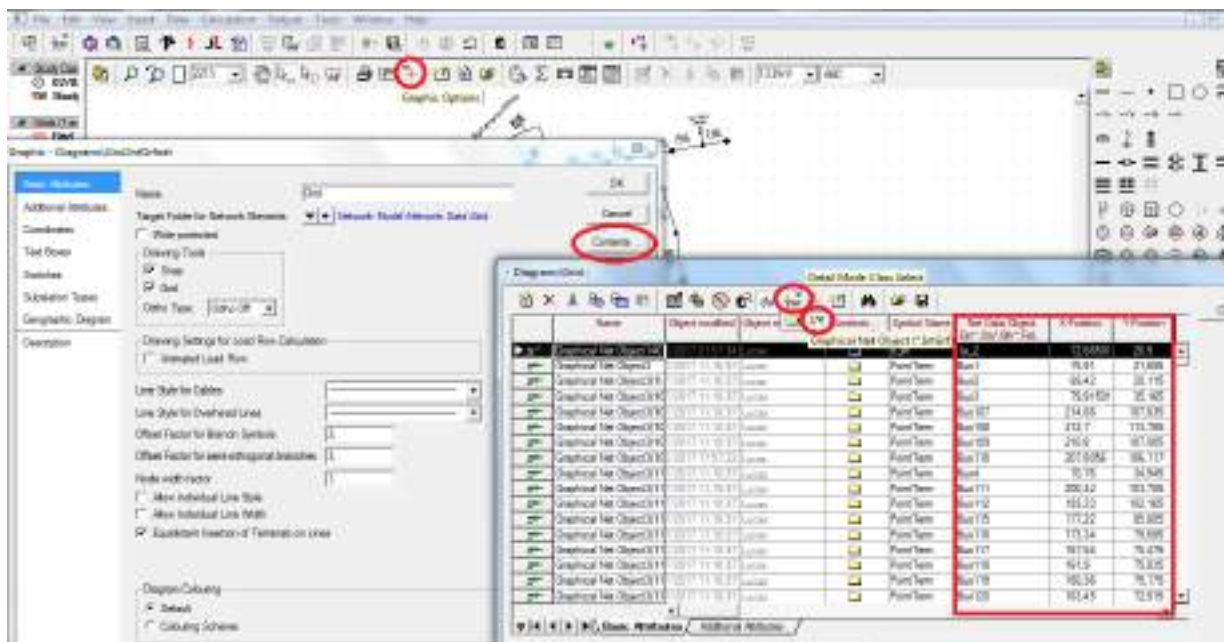
Para sua implementação, criou-se um biblioteca chamada barra, utilizando o seguinte procedimento ao selecionar o elemento: *type* → *new project type* → escolher o nome da biblioteca e a tensão nominal. A figura 13 mostra a criação da biblioteca.

Figura 13 – Biblioteca *Junction/internal node*.



Em seguida, foram colocados 253 *Junction/internal node*, que representam os postes da rede. Para colocação dos elementos no lugar exato, foram utilizadas coordenadas cartesianas, de acordo com o procedimento a seguir: *Graphic Options* → *Contents* → *Detail Mode Class Select* → *Graphical Net Object*, depois foi colocada a posição dos postes, segundo a rede da UFPB, em *X-Position* e *Y-Position* para cada objeto. A figura 14 mostra o procedimento.

Figura 14 – Procedimento para posicionar *Junction/internal node*.



- *Line*

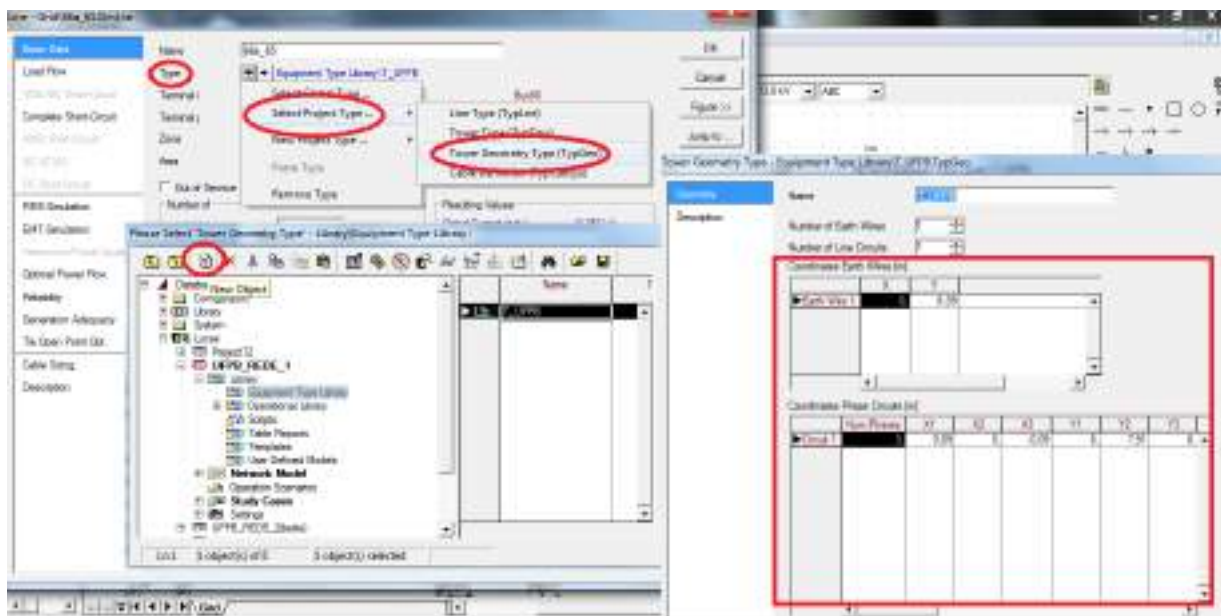
São as linhas de distribuição. A distribuição na UFPB é feita por meio da rede compacta com espaçadores de 15 kV, conforme foi visto na seção 4.1. Assim, era necessário a criação de uma biblioteca que apresentasse a rede de acordo com sua geometria. Foi criada, então, uma biblioteca do tipo *Tower Geometry Type (TypGeo)*, que permite a colocação de coordenadas cartesianas para cada condutor. Os dados referentes à distância entre os condutores foram obtidos junto à prefeitura universitária. A rede é composta por quatro condutores, sendo o condutor mais elevado é o cabo de sustentação, conhecido como mensageiro, os demais são condutores fase. Os dados foram colocados considerando como referência de altura o piso e a referência horizontal o centro do espaçador. A tabela 6 mostra os dados utilizados para criação da biblioteca de geometria dos condutores.

Tabela 6 – Posicionamento dos condutores da rede.

| Tipo de condutor            | Posição no eixo x (metros) | Posição no eixo y (metros) |
|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Condutor Terra (mensageiro) | 0                          | 8,09                       |
| Condutor fase 1             | 0,09                       | 8                          |
| Condutor fase 2             | 0                          | 7,91                       |
| Condutor fase 3             | -0,09                      | 8                          |

Para criação da biblioteca foi adotado o seguinte procedimento após a seleção da linha: *Type* → *Select Project Type* → *Detail Mode Class Select* → *Tower Geometry Type (TypGeo)* → *New object*, em seguida, foi colocado os valores conforme tabela 6. A figura 15 mostra a criação da biblioteca de geometria dos condutores.

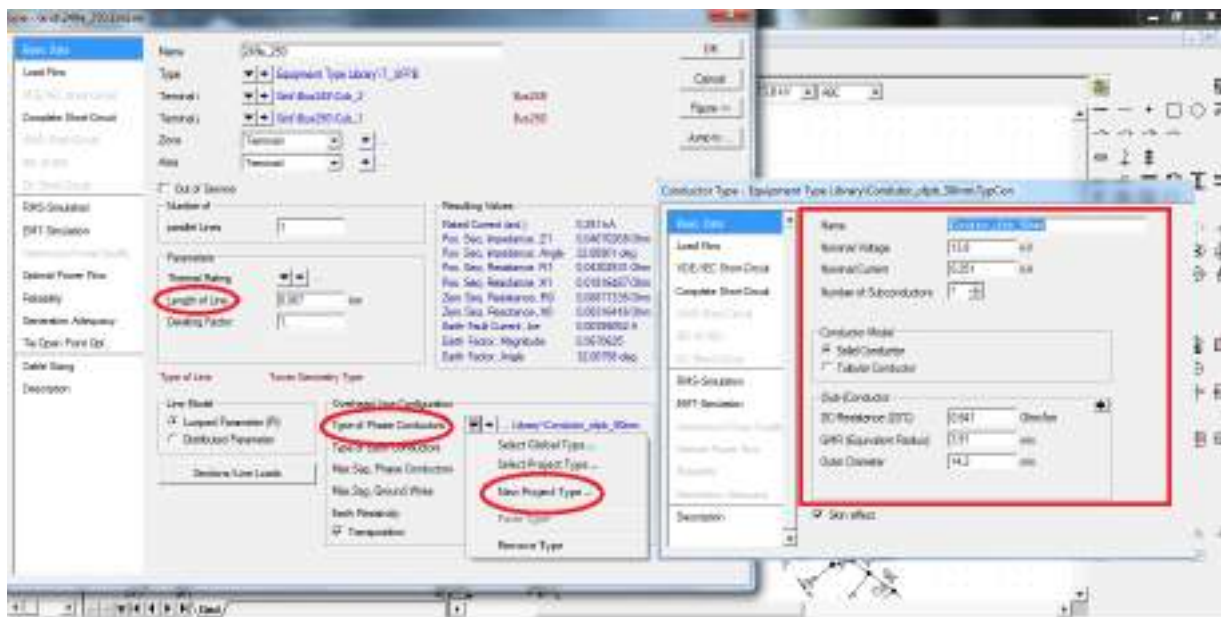
Figura 15 – Procedimento de criação da biblioteca de geometria dos condutores.



Por fim, deve-se colocar o comprimento da linha em *Length of Line* e criar as bibliotecas referentes às bitolas dos condutores. A rede da UFPB possui cabos com duas seções transversais:  $50 \text{ mm}^2$  e  $95 \text{ mm}^2$ . As informações referentes a cada condutor foram obtidas no catálogo da Nexans®, fabricante dos condutores. O procedimento de criação da biblioteca segue os passos a seguir após a seleção da linha: *Type of Phase Conductors* → *New Project Type*, em seguida, coloca-se os parâmetros obtidos no catálogo do fabricante. A figura 16 mostra a criação da biblioteca do condutor de  $50 \text{ mm}^2$ .



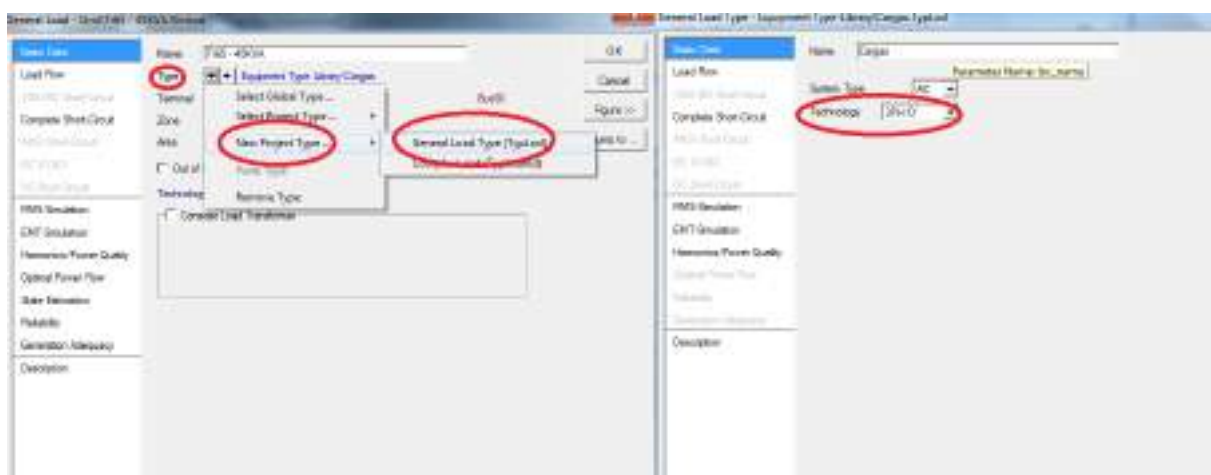
Figura 16 – Procedimento de criação da biblioteca do condutor de 50 mm<sup>2</sup>.



- *General Load*

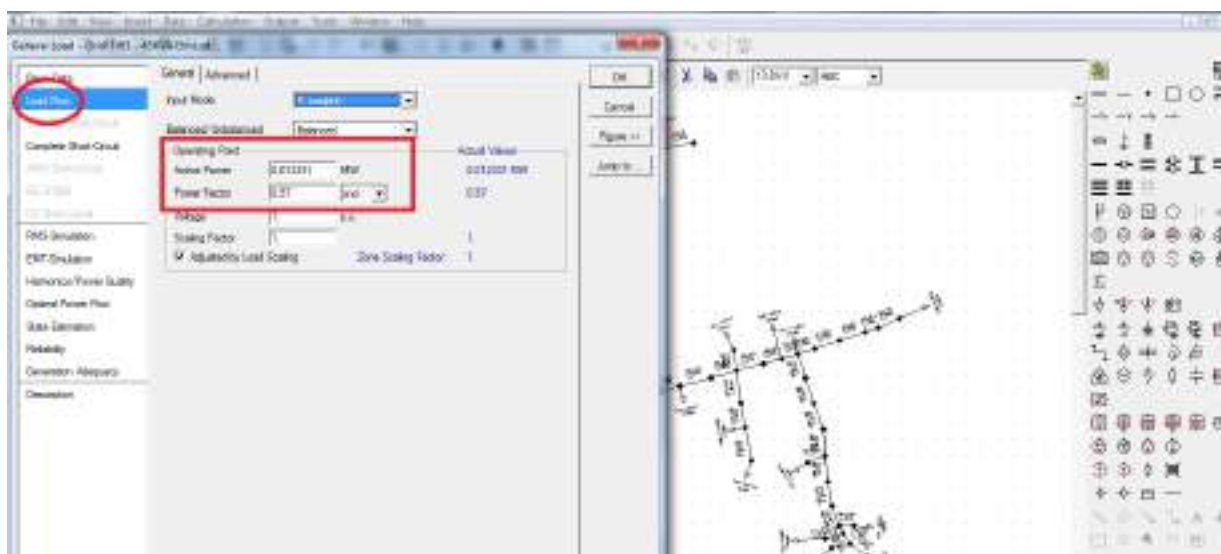
As cargas indicam a potência consumida em cada transformador da rede. Para sua implementação, foi criada uma biblioteca de cargas. Após selecionar a carga, temos o seguinte procedimento: *type* → *New project type* → *General Load Type (TypLod)* em seguida, colocou-se como uma carga trifásica ligada em delta, simbolizada no *software* por 3PH-D. A figura 17 mostra o procedimento.

Figura 17 – Procedimento de criação da biblioteca de carga.



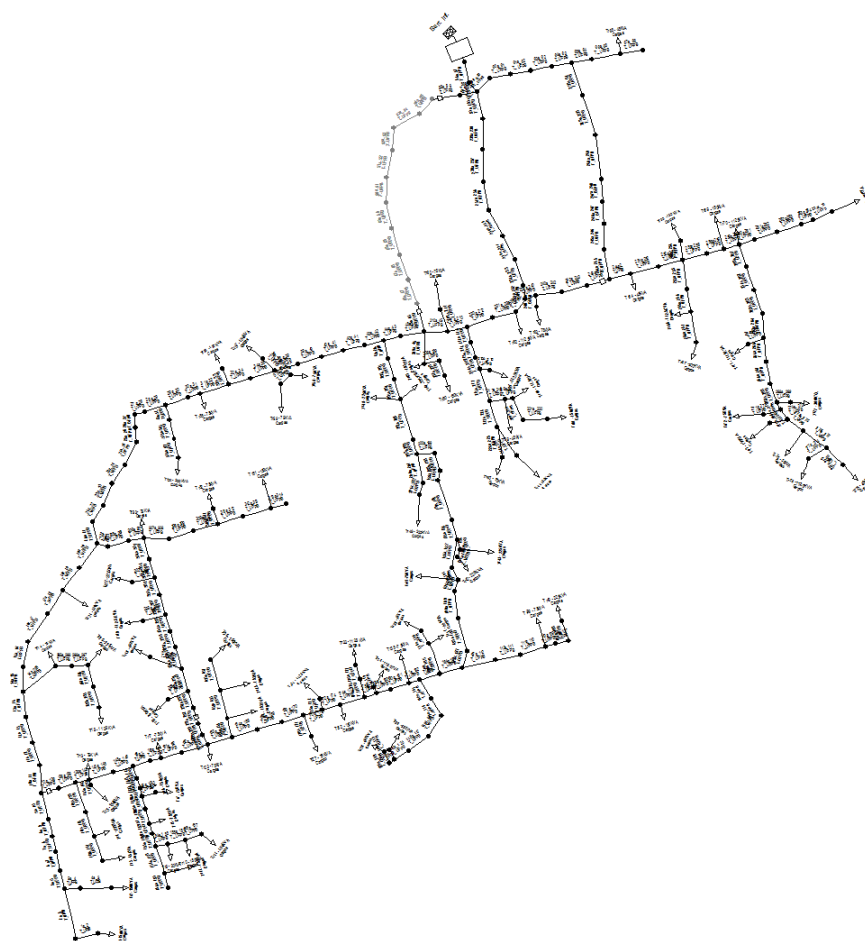
Em seguida, para determinar a potência da carga, deve-se selecionar a carga, depois a opção *Load Flow* e escolher o valor de potência ativa e o fator de potência referente àquela carga, conforme a figura 18.

Figura 18 – Procedimento para determinar potência da carga.



A figura 19 mostra a rede primária da UFPB completa montada no *software*.

Figura 19 – Rede completa da UFPB no *DIgSILENT PowerFactory*®



## 5.2 Alocação ótima de capacitores

Conforme visto na seção 4.1, a UFPB possui 16 bancos de capacitores na sua rede. A proposta deste trabalho é posicioná-los de maneira ótima, de forma a assegurar a maior redução das perdas nas linhas de distribuição. Para tanto, utilizou-se a função *Optimal Capacitor placement* (OCP) presente no *DlgSILENT PowerFactory*®. A função OCP é um algoritmo que minimiza o custo das perdas em uma rede de distribuição, propondo a instalação de novos capacitores nos terminais. O tamanho ideal e o tipo de capacitor são selecionados de uma lista de capacitores disponíveis inseridos pelo usuário. O algoritmo também considera o custo anual de tais capacitores e propõe novos capacitores para instalação apenas quando a redução de perda de energia excedem o custo anual do capacitor.

A fim de otimizar o custo anual total da rede, o algoritmo de otimização OCP utiliza a seguinte função objetivo:

$$CustoTotal = CPerdas + \sum_{i=1}^m (CCap_i) \quad (5.1)$$

Onde:

$CPerdas$  é o custo anual das perdas. Basicamente, é a perda  $I^2 \cdot R$  em todos os elementos da rede.

$CCap_i$  é o custo anual dos capacitores, conforme indicado pelo usuário na lista de capacitores disponíveis.  $m$  é o número total de capacitores a serem instalados.

Para encontrar o posicionamento ideal dos capacitores o *DlgSILENT*® aplica as seguintes etapas:

- Primeiro, uma análise de sensibilidade determina o candidato a melhor terminal; Isso envolve a avaliação do impacto sobre o custo total (perdas) pela conexão do maior capacitor disponível da lista de capacitores definida pelo usuário.
- Os terminais são classificados em ordem decrescente de redução total de custos. O terminal que fornece a maior redução de custos se torna o melhor candidato para um capacitor “novo”.
- A rotina de otimização avalia a redução de custos no terminal candidato usando cada capacitor disponível da lista definida pelo usuário, incluindo o custo de cada capacitor. O melhor capacitor é aquele que reduz o custo de forma mais significativa levando em conta também o custo anual desse capacitor.
- O algoritmo para, quando todos os terminais tiverem capacitores instalados ou a instalação de capacitores não puder reduzir mais custos.

Para efetuar o cálculo das perdas o *software* precisa do custo da energia elétrica e o custo anual de cada banco de capacitor. O preço atual do kWh no horário fora ponta é R\$ 0,3247. O preço dos bancos de capacitores foram fornecidos pela prefeitura universitária: R\$ 610,50 para o banco de 20 kVAR e R\$ 915,70 para o banco de 30 kVAR. Como o programa pede o custo anual do banco e, segundo o fabricante, os bancos possuem dez anos de vida útil, foram considerados o custo anual sendo R\$ 61,05 para o banco de 20 kVAR e R\$ 91,57 para o banco de 30 kVAR.

### 5.2.1 Mudança na rede implementada

Todos os 16 bancos de capacitores da UFPB estão instalados na rede, portanto, os dados obtidos no cubículo de medição consideram a existência dos bancos. Dessa forma, para realizar a alocação ótima dos bancos de capacitores, foi necessário simular a retirada dos bancos nos pontos da rede onde estão instalados. Conforme visto na figura 18, as cargas possuem dois parâmetros: potência ativa e fator de potência. Assim, para representar a retirada do banco naquele ponto foi realizada uma alteração no seu fator de potência. Para tanto, a equação 3.3 foi reorganizada, conforme mostra a equação a seguir:

$$\theta_1 = \text{tg}^{-1} \left( \frac{Q_b + P \cdot \text{tg} \theta_2}{P} \right) \quad (5.2)$$

Em que:

$\theta_1$  é o ângulo de fator de potência após a retirada do banco.

$\theta_2$  é o ângulo de fator de potência antes da retirada do banco.

$Q_b$  é a potência reativa do banco que está sendo retirado da carga.

$P$  é a potência ativa consumida na carga.

Como exemplo, será calculado o novo fator de potência para uma carga de 41,08 kW, fator de potência 0,97 e banco de capacitores de 20 kVAR.

$$\theta_1 = \text{tg}^{-1} \left( \frac{20\text{k} + 41,08\text{k} \cdot \text{tg} 14,07^\circ}{41,08\text{k}} \right) = 36,41^\circ \quad (5.3)$$

Logo, o novo fator de potência sem o banco de capacitores, será:  $\cos 36,41^\circ = 0,805$ .

A tabela 7 mostra o novo fator de potência das carga após a retirada dos bancos de capacitores.



Tabela 7 – Fator de potência das cargas sem os bancos de capacitores.

---

| Carga (kW) | Potência do banco a ser retirado da carga (kVAR) | Novo fator de potência |
|------------|--|------------------------|
| 61,62      | 30   | 0,805                  |
| 41,08      | 30   | 0,714                  |
| 41,08      | 20   | 0,805                  |
| 20,54      | 20   | 0,633                  |
| 12,32      | 20   | 0,47                   |

---

## 6 Resultados da alocação ótima de capacitores

Este capítulo apresentará os resultados da otimização dos capacitores da UFPB. Inicialmente, será mostrado os locais antes e após a otimização dos bancos de capacitores. A localização será mostrada em relação às barras adotadas no *software DlgSILENT*®. A tabela 8 mostra o resultado da realocação juntamente com a antiga disposição dos bancos.

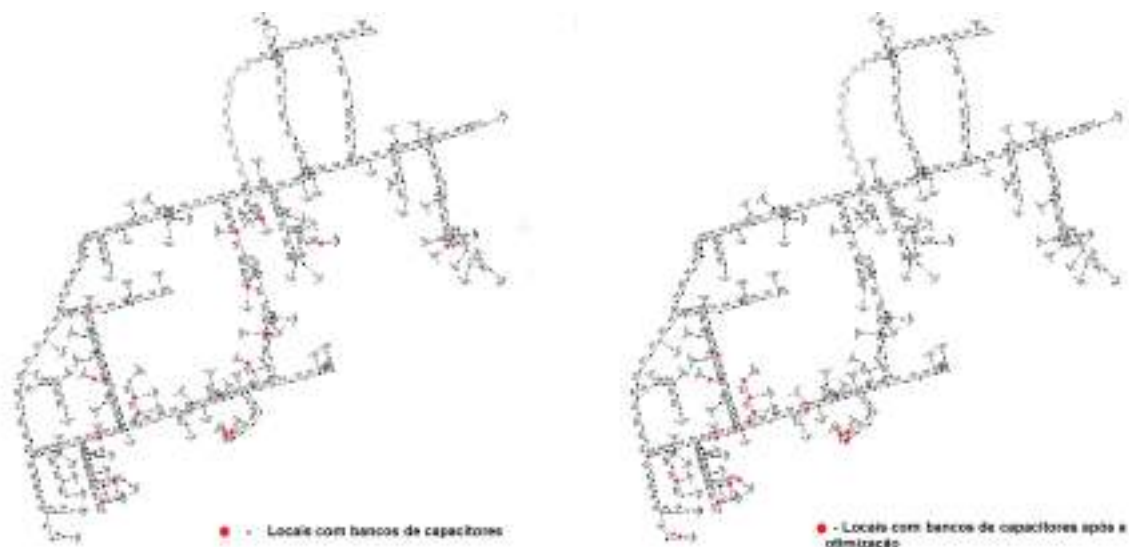
Tabela 8 – Localização dos bancos de capacitores antes e depois da otimização.

| Antes da otimização |                          | Depois da otimização |                          |
|---------------------|--------------------------|----------------------|--------------------------|
| Barra               | Potência do banco (kVAR) | Barra                | Potência do banco (kVAR) |
| 118                 | 30                       | 1                    | 20                       |
| 119                 | 20                       | 118                  | 20                       |
| 156                 | 30                       | 119                  | 20                       |
| 158                 | 20                       | 121                  | 20                       |
| 161                 | 20                       | 141                  | 30                       |
| 165                 | 20                       | 156                  | 30                       |
| 166                 | 20                       | 157                  | 30                       |
| 186                 | 20                       | 158                  | 30                       |
| 191                 | 20                       | 161                  | 20                       |
| 202                 | 20                       | 163                  | 20                       |
| 204                 | 30                       | 165                  | 20                       |
| 207                 | 20                       | 166                  | 20                       |
| 221                 | 30                       | 167                  | 20                       |
| 273                 | 20                       | 172                  | 20                       |
| 296                 | 20                       | 293                  | 20                       |
| 307                 | 20                       | 296                  | 20                       |

De acordo com a tabela 8, os bancos instalados nas barras 119, 156, 161, 165, 166 e 256 foram mantidos mesmo após a otimização, isso demonstra que tais bancos foram alocados de maneira correta para reduzir as perdas na rede. Os bancos das barras 118 e 158 já possuíam bancos instalados, entretanto, depois da otimização, houve mudança para bancos de potência diferente. O banco da barra 118 era de 30 kVAR e passou para 20 kVAR, já o banco da barra 158 passou de 20 kVAR para 30 kVAR. As barras 186, 191, 202, 204, 207, 221, 273, 307, que possuíam bancos antes da otimização, tiveram seus bancos retirados. Já as barras 1, 121, 141, 157, 163, 167, 172, 293 tiveram bancos instalados.

A figura 20 mostra na interface gráfica do *DlgSILENT*®, a localização dos bancos de capacitores antes e depois da otimização.

Figura 20 – Localização dos bancos de capacitores na interface gráfica do *DlgSILENT*® antes e depois da otimização.



## 6.1 Redução de custos

Considerando o período de um ano e custo da energia elétrica de R\$ 0,3247, a otimização apresentou a seguinte característica de custo:

- Antes da otimização
  - Perdas: R\$ 27506,20
- Depois da otimização
  - Perdas: R\$ 25010,53
  - Custos dos novos capacitores: R\$ 1098,90
  - Total: R\$ 26109,43
- Economia nos custos
  - Perdas: R\$ 2495,67
  - Total: R\$ 1396,77

As perdas representam R\$ 27506,20 no custo da energia no período de um ano. Após a realocação dos bancos, houve uma redução de R\$ 2495,67 no custo das perdas. Levando em conta o custo anual dos bancos de R\$ 1098,90, temos uma economia de R\$ 1396,77 por ano. Demonstrando, assim, a viabilidade financeira da instalação dos bancos capacitivos para o cenário estudado.

## 7 Conclusão

Este Trabalho de Conclusão de Curso propôs uma nova configuração para os bancos de capacitores do campus I da Universidade Federal da Paraíba. A otimização, visando a redução das perdas de energia, foi realizada por meio do *software DlgSILENT*<sup>®</sup>. Para tanto, utilizou-se a função *Optimal Capacitor placement* (OCP) disponível no programa.

Com a finalidade de representar a rede da UFPB de maneira precisa, foram realizadas medições de distância entre os transformadores, além disso, os dados de consumo e fator de potência foram obtidos no cubículo geral de medição da Universidade. Já a implementação das cargas, foi feita a partir de uma distribuição proporcional, de acordo com a potência nominal do transformador e a potência total consumida na rede.

Sabe-se que a utilização adequada dos capacitores possibilita a redução das perdas de energia. Nesse caso, verificou-se que o novo posicionamento dos capacitores proporcionou uma economia de R\$ 2495,67 por ano. Considerando o preço de aquisição dos capacitores, ainda se mantém uma redução de R\$ 1396,77 no custo anual com energia elétrica.

Acredita-se que este procedimento, ao conseguir reduzir as perdas, tem condições de se tornar uma ferramenta importante para os setores de planejamento da Universidade Federal da Paraíba.

### 7.1 Propostas de trabalhos futuros

Como proposta de trabalhos futuros, recomenda-se as seguintes linhas de pesquisa:

- (a) Avaliação da viabilidade dos bancos de capacitores sob diversos perfis de carga.
- (b) Realizar medições individuais dos transformadores, de modo a obter um retrato mais preciso da rede.
- (c) Utilização de outros métodos de otimização. Por exemplo: algoritmos evolutivos.

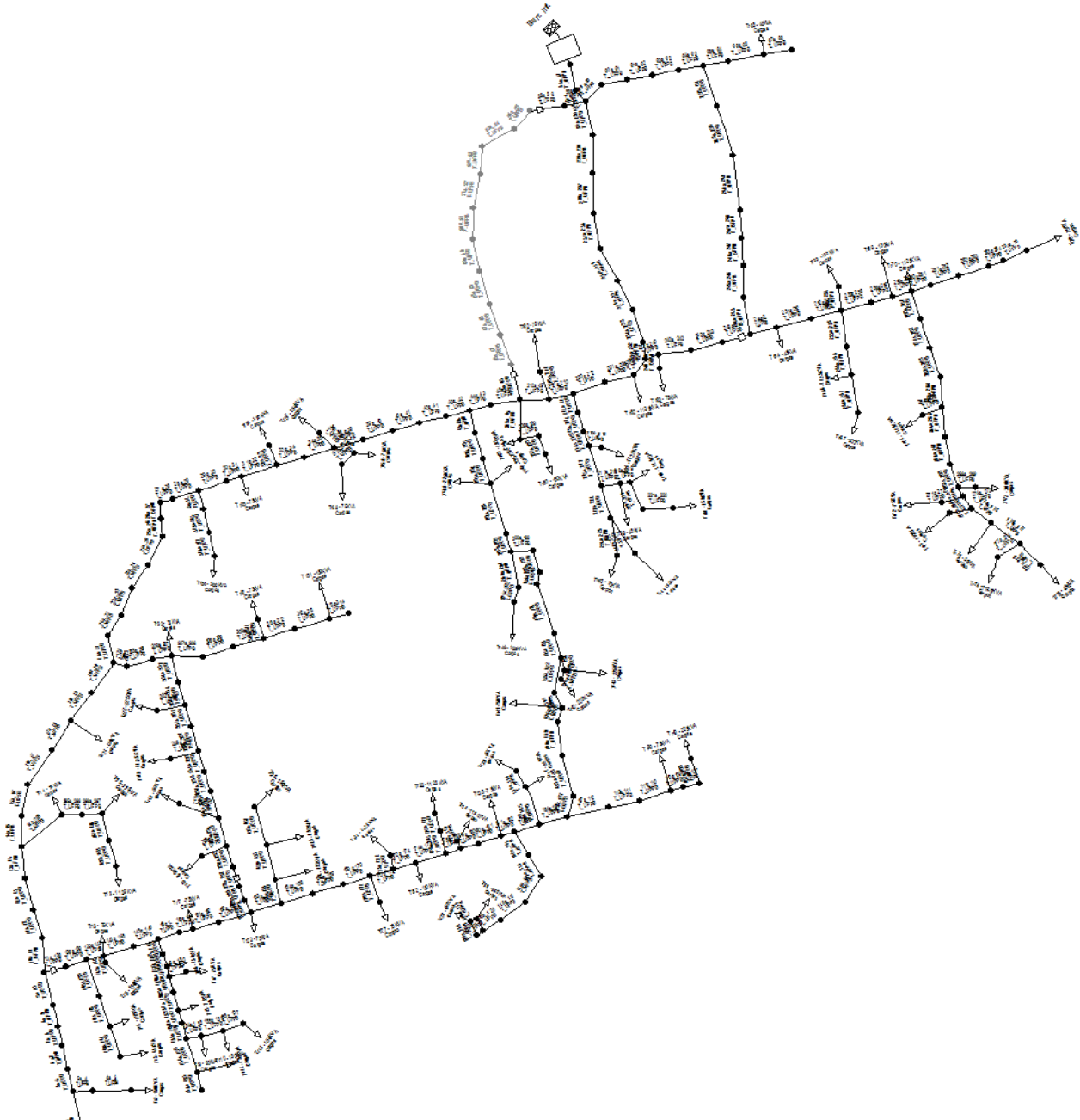
# Referências

- ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. *Fundamentos de circuitos elétricos*. [S.l.]: McGraw-Hill, 2013.
- D, D. G. *User's Manual: DlgSILENT GmbH*. [S.l.]: Alemanha, 2011.
- FILHO, J. M. *Instalações Elétricas Industriais*. [S.l.]: LTC, 2017.
- GLOVER, J. D.; SARMA, M. S.; OVERBYE, T. *Power System Analysis & Design, SI Version*. [S.l.]: Cengage Learning, 2012.
- KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B. D.; ROBBA, E. J. *Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica*. [S.l.]: Edgard Blücher, 2010.
- MENDES, A. et al. *Instalação de capacitores para redução de perdas em redes de distribuição de energia elétrica*. [S.l.]: Artigo, 2013.
- MONTICELLI, A. J. *Fluxo de carga em redes de energia elétrica*. [S.l.]: Edgard Blücher, 1983.
- MONTICELLI, A. J.; GARCIA, A. *Introdução a sistemas de energia elétrica*. [S.l.]: Editora Unicamp, 2011.
- SOUZA, J. S. d. *Dimensionamento ótimo de painéis fotovoltaicos usando enxame de partículas modificado para reduzir as perdas de energia e melhorar o perfil de tensão*. [S.l.]: Tese de mestrado, 2016.
- STEVENSON, W. D. *Elementos de análise de sistemas de potência*. [S.l.]: McGraw-Hill, 1986.
- ZANETTA JR, L. C. *Fundamentos de sistemas elétricos de potência*. [S.l.]: Editora Livraria da Física, 2006.

# Apêndices

# APÊNDICE A – Rede da UFPB

Figura 21 – Rede completa da UFPB no *DlgSILENT PowerFactory*®





APÊNDICE B – Localização dos bancos de capacitores na interface gráfica do *DlgSILENT*<sup>®</sup> antes da otimização

Figura 22 – Localização dos bancos de capacitores na interface gráfica do *DlgSILENT*<sup>®</sup> antes da otimização.



APÊNDICE C – Localização dos bancos de capacitores na interface gráfica do *DlgSILENT*<sup>®</sup> depois da otimização

Figura 23 – Localização dos bancos de capacitores na interface gráfica do DlgSILENT<sup>®</sup> depois da otimização.

