

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
ENGENHARIA ELÉTRICA

MAYARA GOMES DELANHESE

**MELHORIA DO PERFIL DE TENSÃO EM REDES DE ENERGIA  
ELÉTRICA VIA ALOCAÇÃO ÓTIMA DE BANCO DE CAPACITORES**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO  
2018

MAYARA GOMES DELANHESE

**MELHORIA DO PERFIL DE TENSÃO EM REDES DE ENERGIA  
ELÉTRICA VIA ALOCAÇÃO ÓTIMA DE BANCO DE CAPACITORES**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR.

Orientador: Prof. Dr. André Luís Shiguemoto

Coorientador: Prof. Dr. Edson Aparecido Rozas Theodoro

CORNÉLIO PROCÓPIO  
2018



**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
**Campus Cornélio Procópio**  
**Departamento Acadêmico de Elétrica**  
**Curso de Engenharia Elétrica**



## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Mayara Gomes Delanhese**

**Melhoria do perfil de tensão em redes de energia elétrica via alocação ótima de bancos de capacitores**

Trabalho de conclusão de curso apresentado às hs do dia como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof(a). Dr(a). André Luis Shiguemoto - Presidente (Orientador)

---

Prof(a). Dr(a). Edson Aparecido Rozas Theodoro - (Coorientador)

---

Prof(a). Dr(a). Marcelo Favoretto Castoldi - (Membro)

---

Prof(a). Dr(a). Danilo Hernane Spatti - (Membro)

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por minha vida, por cada nova oportunidade e pelas pessoas que colocou em meu caminho.

Aos professores André Luís Shiguemoto e Edson Aparecido Rozas Theodoro muito obrigado pela orientação inestimável para o desenvolvimento desse trabalho, sempre com paciência e profissionalismo, além da amizade e ensinamentos que contribuíram com a minha formação técnica e pessoal.

Aos professores Danilo Hernane Spatti e Marcelo Favoretto Castoldi agradeço pelas sugestões e comentários que colaboraram com o aprimoramento desse trabalho.

As professoras Gabriela Shiguemoto e Maria Eugenia Dajer que sempre dispostas estiveram disponíveis e me auxiliaram em diversos momentos da graduação e do desenvolvimento deste trabalho.

A todos os meus professores nesse período de graduação agradeço pelos ensinamentos que contribuíram significativamente para a minha formação.

A minha família agradeço por todo o esforço e incentivo para que eu pudesse cumprir com esta etapa de formação, especialmente à minha mãe Vera Gomes Delanhese, meu pai Valdeir Delanhese e minha irmã Bruna Gomes Delanhese.

Aos amigos Giovana Pereira, Gustavo Oseki, John Resende, José Campos, Julia Lopes, Julio Buzanelli, Laryssa Urata, Lucas de Souza Acosta, Pamela Ribeiro, Paulo Stachuk, Renan Mainardes, Saulo Cardoso, Tayane Nicolao da Fonseca, Vinicius Lourenço Del Campo, Vitória Previdente Pereira os quais tive o prazer de conviver nesse período de graduação.

Aos amigos que mesmo distantes se fizeram presentes e essenciais nessa etapa Bruna Maciel, Lívia Gonçalves e Luís Stelmastchuk.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná campus Cornélio Procópio e aos seus colaboradores agradeço pela oportunidade de realizar o curso de graduação.

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.” (José de Alencar).

## RESUMO

DELANHESE, M.G. **Melhoria do perfil de tensão em redes de energia elétrica via alocação ótima de banco de capacitores**. 2016. 53 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2018.

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de uma modelagem matemática para a resolução do problema de alocação ótima de bancos de capacitores no sistema de transmissão de energia elétrica, com o objetivo de melhorar o perfil da magnitude de tensão e, conseqüentemente, reduzir as perdas de potência ativa e reativa da rede. A formulação proposta utiliza equações de Fluxo de Potência Ótimo (FPO), e é resolvida pelo software de otimização LINGO, que apresenta soluções de ajustes ótimos para o sistema tratado. O sistema teste é utilizado para mostrar a precisão do modelo matemático, assim como também a eficiência da modelagem proposta para resolver o problema de alocação dos bancos e a melhoria do perfil de tensão no Sistema Elétrico de Potência.

**Palavras-chave:** Alocação de banco de capacitores. Fluxo de potência ótimo. Otimização. LINGO. Sistemas Elétricos de Potência.

## ABSTRACT

DELANHESE, M.G. **Optimal capacitor placement for voltage profile improvement in power systems.** 2018. 53 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2018.

This work shows the development of a mathematical modeling to solve the problem of optimal allocation of capacitor banks in the electric power transmission system with the objective of improving the voltage magnitude profile and consequently reducing the active and reactive power losses in the system. The proposed formulation uses optimum power flow (FPO) equations and is solved by LINGO the optimization software, which presents optimal adjustment solutions for the treated system. The test system is used to show the accuracy of the mathematical model as well as the proposed modeling efficiency to solve the problem of bank allocation and the improvement of the voltage profile in the Electric Power System.

**Keywords:** Capacitor Bank Allocation. Optimum power flow. Optimization. LINGO. Electrical Power System.

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
FPO	Fluxo de Potência Ótimo
ONS	Operador Nacional do Sistema
SFE	Superintendência de Fiscalização dos Serviços de Eletricidade
SEP	Sistema Elétrico de Potência



## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 1 - Representação esquemática de geração, transmissão, distribuição e consumo de energia elétrica.....</b>	<b>18</b>
<b>FIGURA 2 - Modelo equivalente <math>\Pi</math> de uma linha de transmissão.....</b>	<b>23</b>
<b>FIGURA 3 - Perdas no sistema de potência.....</b>	<b>30</b>
<b>FIGURA 4 - Sistema de 5 barras.....</b>	<b>31</b>
<b>FIGURA 5 - Tela inicial do software LINGO.....</b>	<b>33</b>
<b>FIGURA 6 - Informações gerais do software LINGO.....</b>	<b>34</b>
<b>FIGURA 7 - Barra genérica (i) .....</b>	<b>35</b>
<b>FIGURA 8 – Diagrama unifilar do sistema de 16 barras.....</b>	<b>38</b>
<b>FIGURA 9 - Estado inicial do SEP de 16 barras.....</b>	<b>41</b>
<b>FIGURA 10 - Estado do SEP de 16 barras com bancos de capacitores alocados.....</b>	<b>43</b>

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Tensão Nominal igual ou superior a 230kV.....	27
TABELA 2 - Tensão Nominal igual ou superior a 69 kV e inferior a 230kV.....	27
TABELA 3 – Dados do sistema de 5 barras.....	31
TABELA 4 - Resultados do sistema de 5 barras.....	31
TABELA 5 - Sistema de 5 barras com reativos .....	32
TABELA 6 - Resultados do sistema de 5 barras com reativos.....	32
TABELA 7 – Dados de barra.....	39
TABELA 8 – Dados de linha.....	40
TABELA 9 – Barras com violação de tensão.....	41
TABELA 10 – Resultados do sistema de 16 barras LINGO.....	42
TABELA 11 - Valores de tensão e ângulo dados pelos softwares LINGO e ANAREDE.....	44

## LISTA DE SÍMBOLOS

$k$	Número de barras na rede
$\Omega_k$	Conjunto das barras vizinhas da barra $k$
$V_k$	Módulo da tensão na barra $k$
$P_k$	Potência ativa líquida calculada na barra $k$
$Q_k$	Potência reativa líquida calculada na barra $k$
$\theta_k$	Ângulo da tensão na barra $k$
$Q_k^{sh}$	Potência reativa devido ao elemento <i>shunt</i> da barra $k$
$b_k^{sh}$	Susceptância <i>shunt</i> ligada à barra $k$
$n$	Número total de barras do sistema
$P_i^{esp}$	Potência ativa na barra $i$ especificada
$Q_i^{esp}$	Potência reativa na barra $i$ especificada
$\alpha_i$	Variável binária que representa a conexão (ou desconexão) do banco de capacitores na barra $i$
$g_{ij}$	Condutância série no ramo $i$ - $j$
$V_i$	Magnitude das tensões das barras $i$
$V_j$	Magnitude das tensões das barras $j$
$\theta_{ij}$	Diferença entre os ângulos das tensões das barras terminais do ramo $i$ - $j$
$b_{ij}^{sh}$	Susceptância <i>shunt</i> no ramo $i$ - $j$
$b_{ij}$	Susceptância série no ramo $i$ - $j$
$z_{km}$	Impedância série no ramo $k$ - $m$
$r_{km}$	Resistência série no ramo $k$ - $m$
$x_{km}$	Reatância série no ramo $k$ - $m$
$y_{km}$	Admitância série no ramo $k$ - $m$
$f_n$	Variável de folga

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1 OBJETIVOS.....	15
1.1.1 Objetivo geral.....	15
1.1.2 Objetivos específicos.....	15
1.2 MOTIVAÇÕES.....	16
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	17
<b>2 SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA.....</b>	<b>18</b>
2.1 SEGMENTAÇÃO DO SISTEMA.....	18
2.1.1 Transmissão de energia elétrica.....	19
2.2 FLUXO DE POTÊNCIA .....	20
2.2.1 Formulação básica.....	20
2.2.2 Linhas de transmissão.....	22
2.3 FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO.....	23
2.4 REGULAÇÃO DE TENSÃO.....	26
2.4.1 Níveis de tensão.....	26
2.5 BANCOS DE CAPACITORES.....	28
2.6 PERDAS NO SISTEMA.....	29
<b>3 METODOLOGIA PROPOSTA.....</b>	<b>33</b>
3.1 LINGO.....	33
3.2 MODELAGEM.....	35
<b>4 TESTES E RESULTADOS.....</b>	<b>38</b>
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>45</b>
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	46
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>47</b>
<b>ANEXO.....</b>	<b>51</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O avanço e o crescimento econômico de qualquer país estão profundamente atrelados aos serviços e consumo de energia elétrica, que aumentam exponencialmente através dos anos nos países em desenvolvimento como, por exemplo, no Brasil. Neste âmbito, a vertente tecnológica desempenha um papel fundamental quando se visa maior qualidade e eficiência da mesma ao ser produzida, transmitida e distribuída.

Com o objetivo de estabelecer procedimentos concernentes aos padrões de qualidade destaca-se a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Tal agência normatizou e padronizou as atividades técnicas relacionadas aos sistemas de transmissão de energia elétrica. Também produziu o manual de fiscalização da transmissão que estipula a sistematização relacionada às atividades e condutas implicadas na supervisão do fornecimento de serviço pertinente e do funcionamento dos dispositivos e sistemas pela Superintendência de Fiscalização dos Serviços de Eletricidade (SFE). Assim como a reconhecimento dos fatores que estão danificando ou que possam vir a danificar a qualidade das atividades, das instalações de transmissão das companhias de energia elétrica, de acordo com o determinado na legislação e/ou acordado no contrato de concessão. (ANEEL b, 2004).

O sistema elétrico de potência como um todo age como ferramenta de conversão e transporte de energia, e pode ser dividido entre: os centros geradores, linhas de transmissão e sistemas de distribuição e consumidores (BLATT, 2016). Com a expansão dos centros consumidores de forma não planejada, há um aumento na distância entre as cargas a serem supridas e fonte provedora, o que implica em uma distorção no perfil de tensão e conseqüentemente compromete a qualidade da energia a ser fornecida pelo sistema (JÚNIOR,2009). De modo a controlar a tensão no sistema, dispositivos como banco de capacitores são inseridos propiciando a regulação de tensão e a minimização das perdas ativas e reativas no sistema, tornando-o mais eficaz (COSTA,2016).

A excelência que pode ser fornecida ao realizar-se a incorporação de reguladores deriva de como estes são introduzidos no sistema. O ponto está em estabelecer a categoria do banco de capacitores, que pode ser automático ou fixo, a sua potência e localização. Dentre os capacitores disponíveis no mercado, os bancos de capacitores fixos não modificam a injeção de reativos apesar da variação da carga,

e permanecem em funcionamento ininterrupto (GUEDES, 2006). Em razão dos altos custos de instalação e manutenção dos capacitores automáticos, os bancos fixos são comumente mais utilizados.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivos estudar, propor e resolver um modelo matemático para o problema de alocação ótima de banco de capacitores em um sistema de transmissão de energia elétrica.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Identificar todos os componentes necessários para a geração de um modelo a ser aplicado em um Sistema Elétrico de Potência (SEP);
- Desenvolver um modelo matemático para a aplicação do Fluxo de Potência Ótimo (FPO) no problema de alocação de bancos de capacitores;
- Verificar o estado do sistema, validando o modelo, após o estudo de otimização no software LINGO.

## 1.2 MOTIVAÇÕES

Através da atualização do padrão energético brasileiro, modificações estão transcorrendo nos campos de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Com o novo padrão do setor elétrico, houve um aumento da competitividade fazendo com que as companhias se atentem a qualidade do serviço fornecido.

Para que haja concorrência, as empresas precisam reduzir o dispêndio, e entre os muitos aspectos atuais, a configuração mais frequentemente levantada para a diminuição é a minimização das perdas e da violação dos limites de tensão, tencionando também, o custo mínimo na compra de materiais (SZUVOVISKI, 2008).

Dado que diversas unidades de geração auferem injeções de potência nos sistemas elétricos e que os mesmos proveem potência para um variado número de cargas que usualmente estão situadas em extensões geográficas de amplas proporções, o trabalho de preservar a tensão dentro dos limites exigidos consegue tornar-se muito abstrusa. O monitoramento da tensão é vastamente assegurado como tendo estreitos laços com o controle da potência reativa. No entanto, em virtude da excessiva quantidade de variáveis de controle que podem ser operadas, juntamente com o alto número de restrições atribuídas a operação do sistema, a correta escolha e arranjo dos equipamentos para a realização de tais ações configuram um dos maiores reptos da engenharia na área de potência. (SOARES, 2010)

Assim, estudos sobre a localização ótima da instalação dos bancos de capacitores mostram-se propícios e necessários a fim de se obter os benefícios desejados.



### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

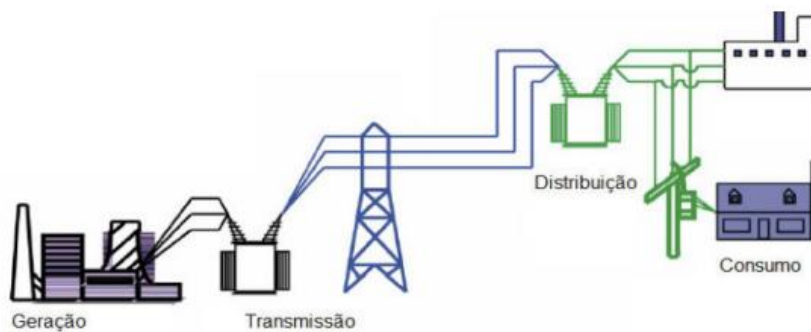
Este trabalho apresenta a importância da alocação de bancos de capacitores e como eles são relevantes para a diminuição das perdas e para manter os limites de tensão em níveis aceitáveis. O modelo proposto segue critérios de análise pré-estabelecidos, e os estudos de otimização são realizadas com o software LINGO. O capítulo 2 deste trabalho apresenta a estrutura de um SEP, seus segmentos e uma breve revisão do problema de fluxo de potência e fluxo de potência ótimo. A regulação de tensão nas redes e os bancos de capacitores são apresentados a seguir.

No capítulo 3 é apresentada a metodologia proposta com informações sobre o software a ser utilizado, a modelagem sugerida, a configuração e os dados do sistema teste utilizado. Os resultados experimentais encontram-se no capítulo 4. O último capítulo apresenta as considerações finais do trabalho.

## 2. SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

Um sistema elétrico de potência pode ser compreendido como sendo estruturado através de sistemas de geração, transmissão, distribuição e consumo, envolvendo uma área geográfica, conforme a Figura 1. Atualmente no Brasil o sistema de energia consiste em usinas de geração que conduzem energia por meio de sistemas de média e baixa tensão até os consumidores. O fluxo comumente é unidirecional e a energia é deferida e controlada por centros de operação, os quais possuem requisitos já definidos (GARCIA e DUZZI, 2012).

**Figura 1 - Representação esquemática de geração, transmissão, distribuição e consumo de energia elétrica.**



Fonte: DA CUNHA, 2011.

### 2.1 SEGMENTAÇÃO DO SISTEMA

Um dos segmentos do sistema é a geração da energia elétrica. Nela uma tensão alternada é gerada e é representada por uma onda em forma de senóide, tendo frequência fixa e amplitude variada conforme o módulo do atendimento: baixa, média ou alta tensão. A onda senoidal mantém a frequência constante enquanto se propaga pelo sistema e altera sua amplitude conforme trafega pelos transformadores. Ao se conectarem ao sistema elétrico, os consumidores recebem o produto (resultado do processo) e o serviço (processo criativo) oferecido por este sistema (LEÃO, 2009).

Conectando as usinas de geração de energia elétrica às áreas de consumo está a rede de transmissão. Geralmente, o número de consumidores, com alto consumo de energia, conectados às redes de transmissão, predominantemente de linhas aéreas, é baixo.

Visto que a segurança é de suma importância para as redes, estas são constantemente monitoradas e gerenciadas por um centro de controle, a fim de se prevenir a descontinuidade no suprimento. Por fim, as redes de distribuição fazem parte do segmento responsável pela alimentação dos consumidores industriais de médio e pequeno porte, comerciais e residenciais (LEÃO, 2009).

### 2.1.1 Transmissão de energia elétrica

Devido ao elevado grau de consumo e à inviabilidade de estocagem de tais níveis de energia elétrica utilizados, é necessário que haja sistemas de transmissão acessíveis que assegurem o fornecimento da energia das usinas geradoras até os consumidores. Porém, novos temas surgem, como dilatação dos cabos, compensação de impedância de linha, entre outros, que demonstram um amplo questionamento na área técnico-econômica no que diz respeito a localizar o ponto ótimo de variáveis, como potência, nível de tensão, distância, tecnologia e recursos financeiros disponíveis. (GARCIA; JUNIOR, 2017)

Sistemas de subtransmissão suprem as subestações do sistema de distribuição, com níveis de tensão distintos: 34.5 kV, 69 kV, 88 kV, 115 kV e 138 kV. Tensões de 230 kV podem alimentar sistemas de distribuição, embora tornem as subestações mais caras devido ao nível de tensão presente no projeto. Os circuitos de subtransmissão são normalmente supridos pelos troncos das linhas de transmissão em subestações de subtransmissão.

O projeto e a evolução de configurações de circuitos de subtransmissão dependem de alguns fatores como: possibilidades de investimentos, onde as cargas necessitam de alimentação incluindo expansão, qual a distribuição de tensões dos circuitos, por onde passa a linha de transmissão, etc.

A maioria dos circuitos é aérea ao longo de rodovias e avenidas principais, ou seja, onde há espaço para seu trânsito e manutenção dentro das cidades. Algumas linhas de subtransmissão são subterrâneas, aproveitando a possibilidade do uso de cabos de isolamento sólidos que permitem custos de investimento mais razoáveis.

Linhas de subtransmissão podem ser projetadas e operadas de formas diferentes. As de tensões inferiores (69 kV ou menos) tendem a ser como linhas de distribuição,

com sistemas radiais, usando postes ao longo de rodovias, com reguladores e religadores. Já as tensões de subtransmissão acima de 69 kV costumam ser operadas como linhas de transmissão, com arranjos em anéis e malhas, torres de transmissão e cabos para-raios. (GARCIA; JUNIOR, 2017)

## 2.2. FLUXO DE POTÊNCIA

Os estudos de fluxo de potência são utilizados nas análises de segurança, nas fases de projeto, planejamento da expansão e na operação propriamente dita dos sistemas, podendo ser utilizados apenas para análise da rede ou integrar estudos mais complexos, como os de otimização, estabilidade, controle e supervisão (SILVA, 2016).

O problema baseia-se em encontrar o ponto de equilíbrio (estado estacionário), também conhecido como regime permanente de um sistema de potência. Ou seja, dada a carga que as barras de consumo demandam, e a potência fornecida pelos geradores, busca-se obter todas as tensões de barra e potência complexa que estão fluindo por todos os componentes dessa rede (EXPÓSITO et al, 2011).

### 2.2.1. Formulação básica

A formulação fundamental do problema caracteriza que a cada barra da rede são associadas quatro variáveis, (BECKHÄUSER et al, 2015):

- $V_k$  - Magnitude da tensão nodal na barra  $k$ ;
- $\theta_k$  - Ângulo da tensão nodal na barra  $k$ ;
- $P_k$  - Potência ativa líquida calculada na barra  $k$ ;
- $Q_k$  - Potência reativa líquida calculada na barra  $k$ .

Somente duas variáveis em cada barra são conhecidas inicialmente, as duas restantes são incógnitas e serão obtidas através da solução do fluxo de potência. Assim, as barras do sistema podem ser classificadas em três tipos:

1. Barra de referência ou barra  $V\theta$  (ou Slack): são dados  $V_k$  e  $\theta_k$  e são calculados  $P_k$  e  $Q_k$  ;
2. Barra de geração ou barra PV: são dados  $P_k$  e  $V_k$  e são calculados  $Q_k$  e  $\theta_k$ ;

3. Barras de carga ou barra PQ: são dados  $P_k$  e  $Q_k$  e são calculados  $V_k$  e  $\theta_k$ .

Para cada barra as equações de um problema de fluxo de potência aplicam a primeira lei de Kirchhoff, na qual as potências ativas e reativas em uma barra são iguais a soma dos fluxos que deixam a barra por meio das linhas de transmissão e transformadores (BECKHÄUSER et al, 2015).

Deste modo, as seguintes equações são formuladas:

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} P_{km} (V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad (2.1)$$

$$Q_k + Q_k^{sh} = \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km} (V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad (2.2)$$

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

$\Omega_k$  = conjunto das barras vizinhas da barra k;

$V_k, V_m$  = magnitudes das tensões das barras k-m;

$\theta_k, \theta_m$  = ângulos das tensões das barras 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 da injeção de potência reativa devido ao elemento shunt da barra k;

$$Q_k^{sh} = b_k^{sh} * V_k^2, \quad (2.3)$$

sendo  $b_k^{sh}$  a susceptância *shunt* ligada à barra k.

As restrições de operação de um problema de fluxo de potência são formadas por:

1. Limites das tensões nas barras PQ:

$$V_k^{min} \leq V_k \leq V_k^{max} \quad (2.4)$$

2. Limites de injeções de potência reativa das barras PV:

$$Q_k^{min} \leq Q_k \leq Q_k^{max} \quad (2.5)$$

A solução do fluxo de potência é o empregada extensamente nas áreas de operação e de planejamento, como um instrumento de atividade independente ou como sub-rotina dentro de um sistema mais complexo como análise de estabilidade, problemas de otimização, simuladores para treinamento, entre outros (EXPÓSITO et al, 2011).

### 2.2.2. Linhas de transmissão

O modelo equivalente  $\pi$ , extensivamente utilizado e representado pela Figura 8, de uma linha de transmissão, é determinado por três parâmetros: a resistência série  $r_{km}$ , a reatância serie  $x_{km}$  e a susceptância shunt  $b_{km}^{sh}$ .

A impedância série é dada por:

$$z_{km} = r_{km} + jx_{km} \quad (2.6)$$

A admitância série será:

$$y_{km} = g_{km} + jb_{km} = z_{km}^{-1} = \frac{r_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} - j \frac{x_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \quad (2.7)$$

Sendo assim, a condutância série  $g_{km}$  é dada por:

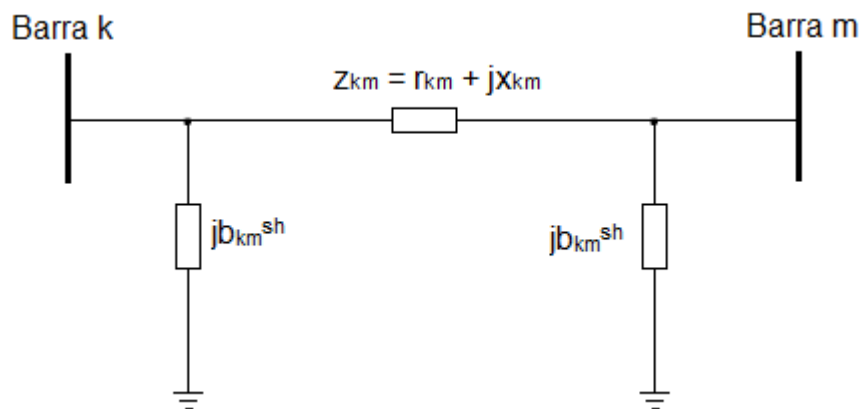
$$g_{km} = \frac{r_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \quad (2.8)$$

E a susceptância série  $b_{km}$  por:

$$b_{km} = - \frac{x_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \quad (2.9)$$

Quando o modelo  $\pi$  representa uma linha de transmissão tem-se  $r_{km}$  e  $x_{km}$  positivos, o que implica  $g_{km}$  positivo e  $b_{km}$  negativo (tipo indutivo). Já o elemento  $b_{km}^{sh}$  é positivo, pois o shunt é do tipo capacitivo. (MONTICELLI, 1983)

Figura 2 - Modelo equivalente  $\Pi$  de uma linha de transmissão



Fonte: Adaptado MONTICELLI, 1983.

### 2.3. FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO

O propósito do Fluxo de Potência Ótimo (FPO), é fornecer o melhor estado de operação de um sistema elétrico, determinado por uma função objetivo (custo). Essa problemática não é de caráter simplório, visto que a solução a ser descoberta tem a obrigatoriedade de respeitar os limites de operação dos equipamentos que constituem a rede, além de atender outras limitações (BORGES e ALVES, 2010).

Assim, pode-se dizer que o FPO se fundamenta em estabelecer uma condição de atividade (um fluxo de potência) de uma rede elétrica respeitando tanto suas restrições físicas quanto operacionais, dessa forma é possível que o fluxo de potência almejado otimize a função custo (objetivo), que informa o desempenho do sistema (MELO e CHÁVEZ, 1998).

Um FPO admite a otimização de diferentes funções objetivos que estão sujeitas a restrições de igualdade do fluxo de carga e também aos limites de operação aplicados por meio das grandezas elétricas. O FPO pode abranger as restrições referentes ao caso base e sobre um bloco de conjunturas de pós-contingências escolhidas (EXPÓZITO, 2011).

#### 3.2.1. Forma geral do problema

A forma geral para se demonstrar problemas de FPO devem está expressa na seguinte configuração geral de um problema de programação não-linear:

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } f(x) \\ & \text{Sujeito a } g(x) = 0 \\ & \quad l \leq x \leq u \end{aligned}$$

em que:

- $x$  é um vetor com as variáveis de decisões explícitas, abrangendo as variáveis de controle (magnitude das tensões nas barras de geração, compensação de reativos em paralelo, potência ativa dos geradores, etc) e as variáveis dependentes que não são funções (ângulo de fase das tensões, magnitude das tensões das barras de carga, potência reativa dos geradores, etc);
- $f$  é a função escalar que representa um dado objetivo de otimização da operação ou do planejamento do SEP, tal como o custo da geração, perdas de potência no sistema de transmissão, corte de carga para tornar operativo um sistema não operativo, etc;
- $g$  é um vetor não linear que contem as equações usuais de balanço de potencia nas barras, ocasionalmente aumentado por algumas restrições especiais de igualdade, tal como o fluxo de potência entre sistemas numa operação ou fluxos que são estabelecidos em um determinado valor, etc;
- $l$  e  $u$  são vetores de limites inferiores e superiores sobre as variáveis  $x$ , relacionados aos limites físicos dos equipamentos e a operação do sistema.

Alguns objetivos são comumente empregados em problemas de FPO, para o caso base e nas configurações de contingências, como (SOARES, 2010):

- Minimização de custos de geração;
- Minimização de perdas ativas;
- Minimização de corte de carga afim de corrigir violações de restrições como sobrecargas em circuitos, problemas de tensão;
- Minimização do movimento de variáveis de controle: onde se determina o menor número de dispositivos de controle a serem ajustados;
- Maximização do fluxo de potência ativa: maximiza o fluxo de potência ativa através de um conjunto de circuitos;



- Maximização da carga em um conjunto de barras mantendo o mesmo fator de potência da carga;
- Maximização da potência transferida entre duas barras: para otimizar a função objetivo especificada, podem ser utilizadas as seguintes variáveis de controle:
  - Potência reativa de bancos de capacitores e indutores chaveais, de compensadores síncronos, de compensadores estáticos;
  - Tapes dos transformadores com dispositivos LTC;
  - Tensão terminal dos geradores;
  - Ângulo dos defasadores controlando fluxo de potência ativa;
  - Corte de carga, etc;

O conjunto de restrições pode ser formado por um ou mais limites descritos a seguir:

- Limites sobre as tensões das barras;
- Limites sobre os fluxos nos circuitos (MVA, MW e/ou MVA<sub>r</sub>);
- Limites sobre os tapes dos transformadores com dispositivos LTC;
- Limites sobre os ângulos dos defasadores;
- Limites sobre as gerações de potência ativa e potência reativa;
- Intercambio de potência ativa e reativa entre áreas, etc.

Idealmente a formulação e FPO deve possibilitar a demarcação de controles e limites distintos na condição base e nas configurações de contingências (SOARES, 2010).

## 2.4. REGULAÇÃO DE TENSÃO

Para legislar, fiscalizar e indutar os agentes do mercado de energia criou-se a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). A partir de então, estão sendo requeridos índices de qualidade de atendimento cada vez mais rigorosos em todos os setores (GAPERIN, 2008). Segundo sua resolução nº 505 de novembro de 2001 (ANEEL a, 2001):

“Compete à ANEEL regular os serviços de energia elétrica, expedindo os atos necessários ao cumprimento das normas estabelecidas pela legislação em vigor, estimulando a melhoria do serviço prestado e zelando, direta e indiretamente, pela sua boa qualidade, observando, no que couber, o disposto na legislação vigente de proteção e defesa do consumidor.” (ANEEL, resolução 505/2001)

Afim de cumprir seu ofício a ANEEL dispõe de normas e procedimentos obrigatórios para definir padrões e responsabilidades. E são dadas algumas definições, como:

- Unidade Consumidora atendida em Alta Tensão: unidade consumidora atendida em tensão nominal igual ou superior a 69 kV;
- Unidade Consumidora atendida em Média Tensão: unidade consumidora atendida em tensão nominal maior que 1 kV e menor que 69 kV;
- Unidade Consumidora atendida em Baixa Tensão: unidade consumidora atendida com tensão nominal igual ou inferior a 1 kV;

### 2.4.1. Níveis de tensão

Segundo o manual de fiscalização da transmissão, os valores de tensão em regime permanente nos pontos de conexão, deve atender os requisitos que constam na resolução da ANEEL nº 505/2001.

Em seu roteiro de fiscalização apresenta-se que deve ser realizada a verificação dos valores de tensão e se os mesmos atendem os requisitos que constam das tabelas a seguir, previamente estabelecidos na Resolução da ANEEL nº 505/2001.

Tabela 1 - Tensão nominal igual ou superior a 230 kv

<b>Classificação da Tensão de Atendimento (TA)</b>	<b>Faixa de variação da Tensão de Leitura (TL) em relação à Tensão Contratada (TC)</b>
Adequada	$0,95 TC \leq TL \leq 1,05 TC$
Precária	$0,93 TC \leq TL < 0,95 TC$ ou $1,05 TC < TL \leq 1,07 TC$
Crítica	$TL < 0,93 TC$ ou $TL > 1,07 TC$

Fonte: Adaptado de ANEEL b.

Tabela 2 - Tensão nominal superior a 1 kv e inferior a 230 kv

<b>Classificação da Tensão de Atendimento (TA)</b>	<b>Faixa de variação da Tensão de Leitura (TL) em relação à Tensão Contratada (TC)</b>
Adequada	$0,93 TC \leq TL \leq 1,05 TC$
Precária	$0,90 TC \leq TL < 0,93 TC$
Crítica	$TL < 0,90 TC$ ou $TL > 1,05 TC$

Fonte: Adaptado de ANEEL b.

## 2.5. BANCOS DE CAPACITORES

Existem inúmeros métodos para se melhorar os níveis de tensão em redes de energia elétrica. Em (GÖNEN, 1986) é exposto uma lista destas possibilidades, sendo:

- Utilização de equipamentos reguladores de tensão na subestação, transformadores com comutador de derivações sem ou sob carga;
- Bancos de capacitores na subestação;
- Balanceamento das cargas no alimentador;
- Aumento da secção dos cabos;
- Aumento do número de fases;
- Transferência de carga para outros alimentadores;
- Aumento do nível a tensão primária do alimentador;
- Inserção de bancos de capacitores em série ou em paralelo ao alimentador.

A escolha de uma das configurações possíveis afim de se corrigir a tensão deriva das particularidades de cada sistema. A seleção mais usual é a utilização de bancos de capacitores, por seu baixo custo e fácil instalação.

Eles são utilizados para corrigir reativos indutivos da rede de energia elétrica, entretanto as consequências da correção podem ser verificadas de diversos modos resultando de onde o capacitor foi instalado e de sua capacidade.

Estes resultados de modo geral são (GÖNEN, 1986):

- Liberação da capacidade de geração;
- Liberação da capacidade de transmissão;
- Liberação da capacidade das subestações;
- Redução das perdas de energia;
- Redução da queda de tensão ao longo do alimentador;
- Liberação da capacidade do alimentador;

Os capacitores podem ser instalados de dois modos: em derivação ou em série com o alimentador.

Os bancos de capacitores ligados em derivação são utilizados para compensar as perdas do sistema e garantir níveis seguros de tensão em condições

de carregamento elevado. A desvantagem da sua utilização é que a geração de reativos é proporcional ao quadrado da tensão, logo, em uma queda de tensão no sistema, o capacitor em derivação fornecerá uma quantidade menor de reativos exatamente no momento em que o sistema mais necessitará dos mesmos. (BLATT, 2016)

Os capacitores conectados em série balanceiam a reatância indutiva da linha propiciando uma elevação da tensão instantânea com o aumento da carga, sendo assim comparado com um regulador de tensão que se relaciona proporcionalmente com as variações de corrente. Como desvantagem há o trabalho na proteção do capacitor e no controle, resultando na pouca utilização dos capacitores em série nas redes de distribuição. (PENHA, 2016)

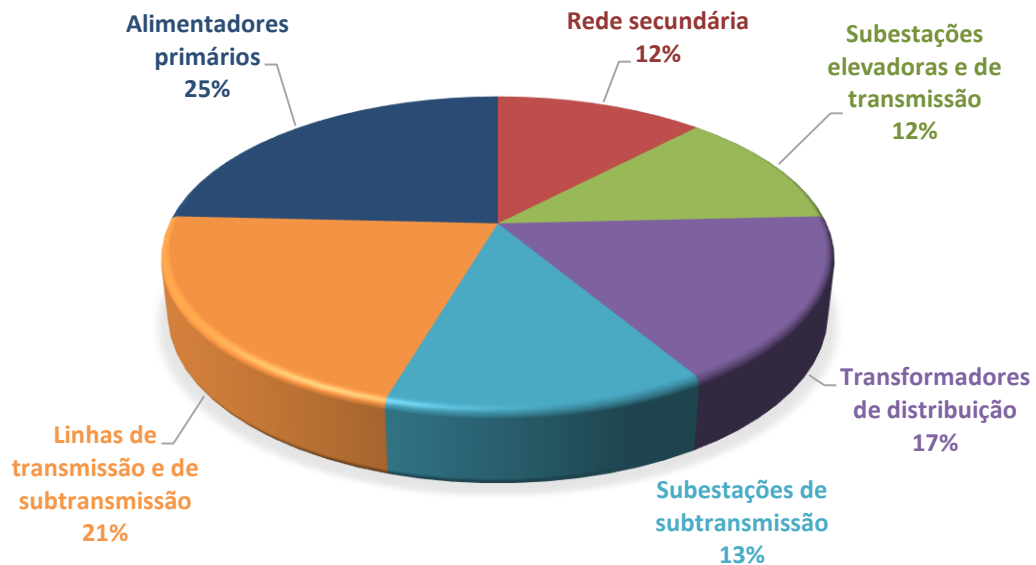
Os capacitores em série são utilizados para compensar a reatância indutiva das linhas de transmissão. A energia reativa indutiva da linha é reduzida (compensada) pela energia reativa capacitiva dos capacitores em série. Isso contribui para o aumento do limite de transmissão de potência através da redução das perdas reativas das linhas, além de proporcionar melhoria na estabilidade da tensão. A geração de reativos de um capacitor em série aumenta com o quadrado da corrente. Logo, um aumento no fluxo de potência em uma linha de transmissão, que normalmente provoca uma diminuição na tensão, faz com que o capacitor série gere mais VARs devido ao aumento da corrente, reduzindo o afundamento de tensão provocado pelo aumento do fluxo de potência na linha. (BLATT, 2016)

## 2.6. PERDAS NO SISTEMA

Diante do aumento da demanda por eletricidade, se torna indispensável a gestão e a racionalização do uso de energia. Dessa forma, deve-se combater o desperdício e reduzir ao máximo as perdas do sistema. E devido a essa necessidade que o estudo de métodos para a diminuição destas é de extrema importância (GUEDES, 2006).

As perdas nos sistemas de potência podem ser divididas através de seus subsistemas componentes conforme a Figura 3.

**Figura 3 - Perdas no sistema de potência**

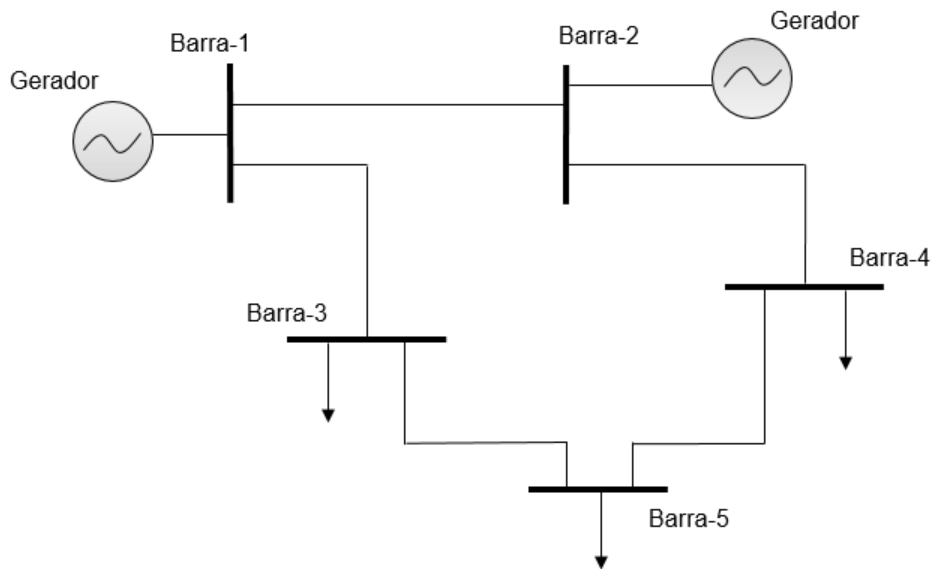


Fonte: Adaptado GUEDES, 2006.

Como apresentado, grande parte das perdas se concentra nos sistemas de transmissão. Em decorrência da redução dessas perdas implica-se a diminuição também nas perdas na rede secundária e em outros pontos do sistema, além de aumento da capacidade do sistema com maior estabilidade, evitando riscos de queda de tensão e desligamentos.

Para exemplificar como a alocação de reativos interfere direta e substancialmente nas perdas do sistema, será utilizado um sistema de 5 barras (Figura 4), e seus dados analisados pelo sistema ANAREDE, programa computacional da área de sistemas elétricos de potência desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) e utilizado pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) no Brasil.

**Figura 4 – Sistema de 5 barras**



Fonte: Autoria própria.

O sistema proposto apresenta uma barra de geração tomada como referência angular do sistema (Barra 1), uma barra de geração (Barra 2) e três barras de carga (Barra 3, Barra 4 e Barra 5). Os dados da simulação utilizando o software ANAREDE são apresentados em anexo e nas tabelas a seguir.

**Tabela 3 – Dados do sistema de 5 barras**

Barra	Tipo	Tensão	Ângulo
1	Slack (referência)	1.0	0.0
2	Geração	1.03	0.0
3	Carga	1.0	0.0
4	Carga	1.0	0.0
5	Carga	1.0	0.0

Fonte: Autoria própria.

Os resultados apresentados após a análise do sistema, o valor para geração encontrado foi de 863,1 MW e 153,3 MVar e para as perdas 73,1 MW e 153,3 MVar.

**Tabela 4 – Resultados do sistema de 5 barras**

Geração MW/ MVar	Perdas MW/ MVar
863.1	73.1
153.3	153.3

Fonte: Autoria própria.

Posteriormente reativos de 70 MVar e 80 MVar foram alocados nas barras de carga 4 e 5 respectivamente conforme mostra a Tabela 5.

**Tabela 5 – Sistema de 5 barras com reativos**

Barra	Tipo	Tensão	Ângulo	Reativos (MVar)
1	Slack (referência)	1.0	0.0	-
2	Geração	1.03	0.0	-
3	Carga	1.0	0.0	-
4	Carga	1.0	0.0	70
5	Carga	1.0	0.0	80

Fonte: Autoria própria.

A diferença obtida entre os valores anteriores e após a adição dos reativos foram de 859,1 MW e 4,6 MVar para a geração e 69,1 MW e 145,5 MVar para as perdas.

**Tabela 6 – Resultados do sistema de 5 barras com reativos**

Geração MW/ MVar	Perdas MW/ MVar
859.1	69.1
4.6	145.5

Fonte: Autoria própria.

Os resultados observados mostram que após a alocação dos reativos, ainda que de forma aleatória, ocasionou um notável alívio ao sistema através da diminuição da geração e uma diminuição de 5,47% do valor das perdas ativas e 5,08% das perdas reativas.

Dentre as variadas possibilidades para a redução das perdas encontram-se o redimensionamento das linhas e de transformadores, regulação de tensão, controle do fluxo de reativos, até mesmo a utilização de um sistema tarifário que instigue a utilização da energia elétrica de forma mais racional.

Será analisada a utilização da alocação de bancos de capacitores para colaborar com a minimização das perdas através do uso de um software de otimização.



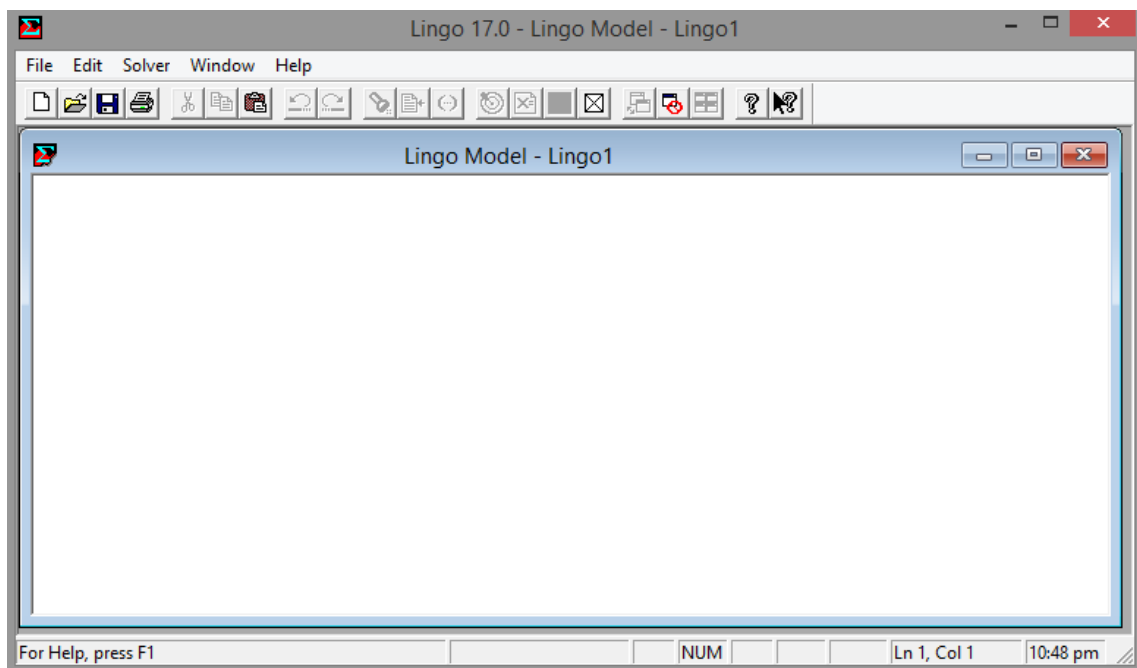
## METODOLOGIA PROPOSTA

### 3.1. LINGO

O software LINGO é um ambiente para a formulação, resolução e análise de problemas de otimização linear ou não-linear.

A leitura dos dados pode ser feita diretamente no LINGO ou até mesmo através de um arquivo no bloco de notas ou uma planilha do Excel. O texto das equações do modelo é independente da plataforma utilizada e é idêntico para todas elas. Leves diferenças existem para plataformas não-windows (*command line*) (JÚNIOR e SOUZA, 2004). A Figura 5 mostra a interface da tela inicial do software.

**Figura 5 - Tela inicial do software LINGO**



**Fonte: Software LINGO.**

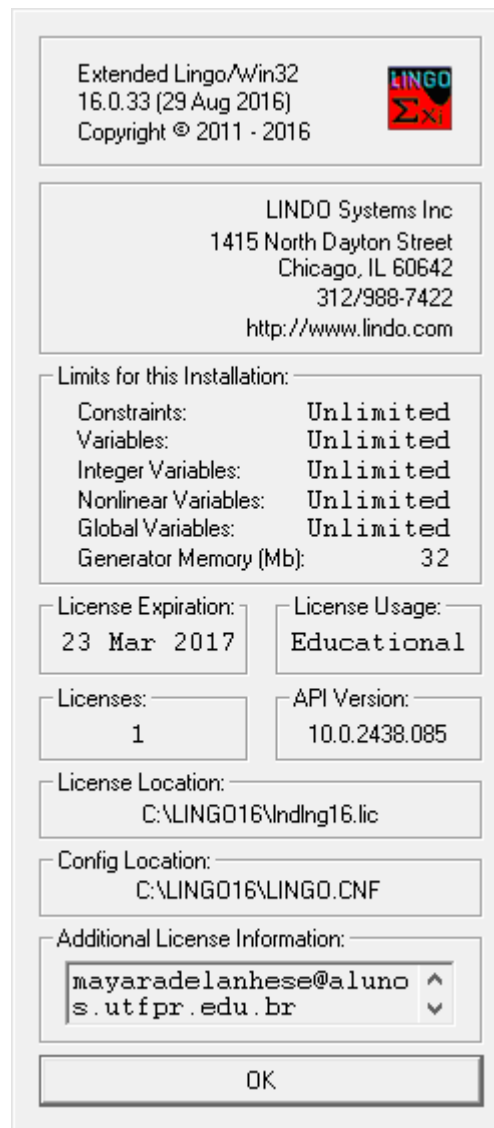
Por padrão, uma variável no LINGO tem um limite inferior de zero e um limite superior infinito. Foi necessária a utilização da variável @FREE que remove o limite inferior de zero e permite que uma variável tenha valores negativos, tornando-o sem restrições de sinal ou livre. A variável pode ser usada em um modelo em qualquer lugar em que se insere uma restrição.

Essas características foram fundamentais na sua utilização no referido trabalho, pois durante a resolução do processo o software levava as variáveis a

assumirem valores negativos e isso conduzia a não satisfação das restrições de positividade, consequentemente a não resolução do problema.

A versão utilizada do programa com uma licença educacional permite a utilização de variáveis ilimitadas e é mostrada pela Figura 6.

**Figura 6 - Informações gerais do software LINGO**



**Fonte: Software LINGO.**

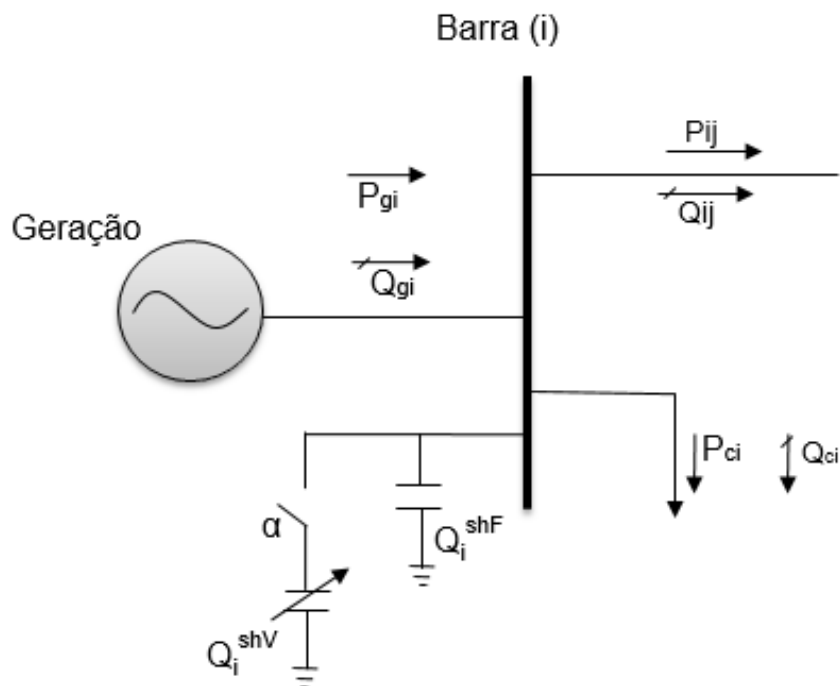
Dentre o referencial bibliográfico estudado, não houve precedentes da utilização do LINGO para a resolução de problemáticas na área de Sistemas Elétricos de Potência.

### 3.2. MODELAGEM

O problema pode ser distinguido matematicamente como um problema de programação não linear de grande porte, podendo ter milhares de variáveis e restrições. Desta maneira todo o procedimento de modelagem destes problemas incluindo a formulação da função objetivo e das restrições em geral, vem a ser um desafio.

A Figura 7 apresenta a representação de uma barra genérica (i), com os principais componentes necessários para se desenvolver a modelagem aplicada.

Figura 7 - Barra genérica (i)



Fonte: Autoria própria.

A modelagem matemática proposta tem como função objetivo minimizar a potência reativa devida ao elemento shunt variável a ser alocada e apresenta como função objetivo a equação a seguir:

$$\text{Min } f_{\text{custo}} = \sum_{j \in n} Q_j^{\text{shV}} \quad (3.1)$$

Onde

$n$  = barras do sistema,

$Q_j^{shV}$  = componente da injeção potência reativa devida ao elemento shunt variável da barra j,

Sujeita as seguintes restrições:

- Limites de tensão, segundo regulamentação

$$0,95 \leq V_k \leq 1,05, \quad \forall i \in n \quad (3.2)$$

- Limites de operação, equações do fluxo de potência

$$P_i = (V_i)^2 * g_{ij} + V_i * V_j * \sum_{j \in \Omega_i} (g_{ij} * \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad , j \in n \quad (3.3)$$

$$P_i - P_i^{esp} = 0 + f_n \quad (3.4)$$

$$Q_i = - (V_i)^2 * ((b_{ij} + b_{ij}^{sh}) + (Q_i^{sh} * \alpha_i) + \sum_{j \in \Omega_i} (V_i * V_j * (g_{ij} * \sin \theta_{ij} + b_{ij} \cos \theta_{ij}))) \quad (3.5)$$

$$Q_i - Q_i^{esp} = 0 + f_n \quad (3.6)$$

Onde,

$P_i$  = potência ativa na barra i,

$P_i^{esp}$  = potência ativa na barra i especificada;

$V_i$  = magnitude das tensões das barras terminais no ramo i,

$V_j$  = magnitude das tensões das barras terminais no ramo j,

$g_{ij}$  = condutância série no ramo i-j

$b_{ij}$  = Susceptância série no ramo i-j

$b_{ij}^{sh}$  = Susceptância shunt no ramo i-j

$\theta_{ij}$  = ângulo das tensões das barras terminais do ramo i-j,

$Q_i$  = potência reativa na barra i,

$Q_i^{esp}$  = potência reativa na barra i especificada;

$\alpha_i$  = variável binária que representa a conexão (ou desconexão) na barra i,

$f_n$  = variável de folga.

Foram adotadas variáveis de folga com o valor de  $10^{-4}$  a fim de converter inequações do tipo menor ou igual em restrições de igualdade.

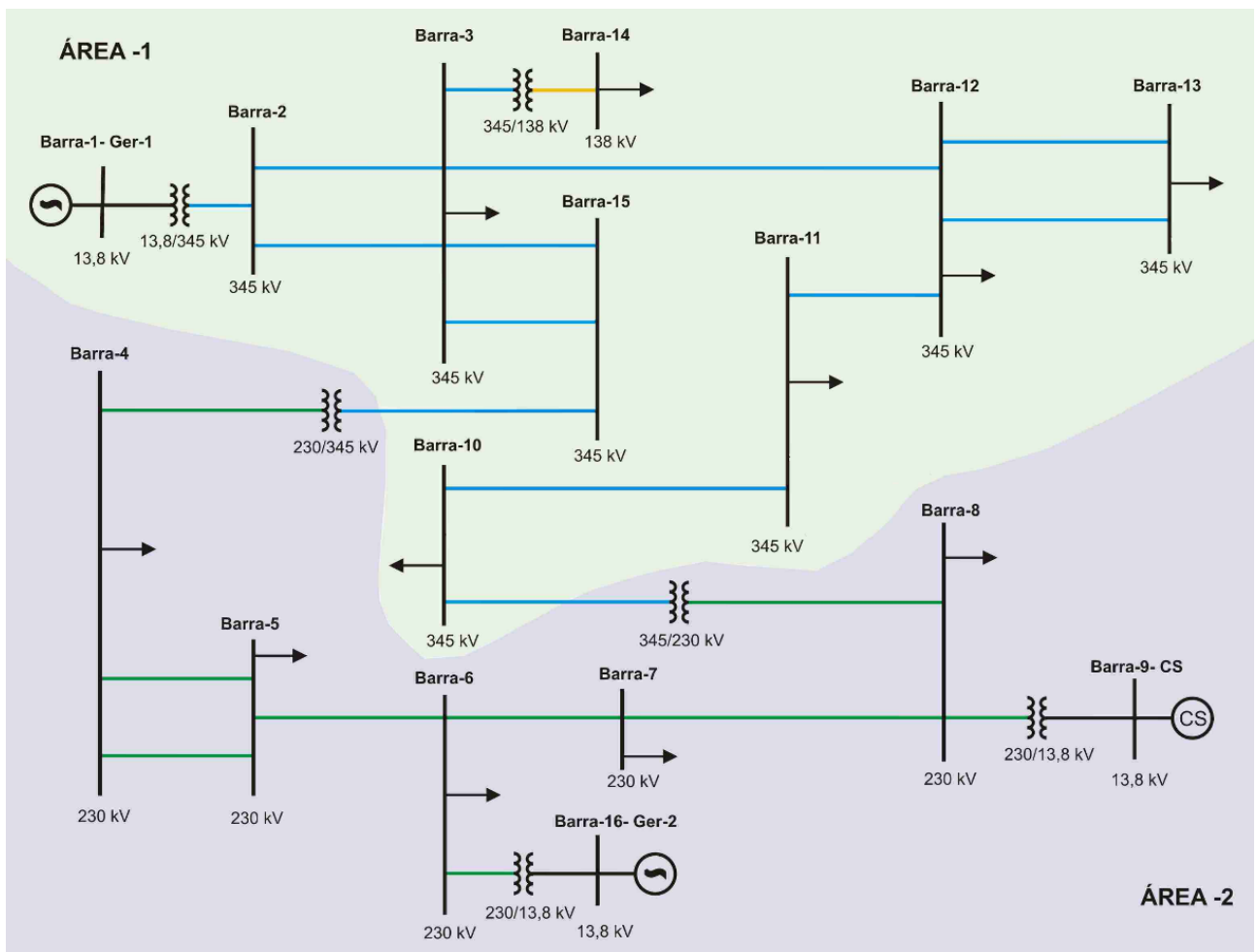
Para este trabalho foi-se desenvolvida a modelagem para a resolução do FPO do sistema através do software LINGO.

A configuração do sistema e seus dados são mostrados no capítulo a seguir.

### 3. TESTES E RESULTADOS

O sistema de 16 barras utilizado está representado na Figura 8. Para a análise do mesmo foram utilizados os dados de barra e de linha apresentados nas tabelas 7 e 8 respectivamente.

**Figura 8 – Diagrama unifilar do sistema de 16 barras**



Fonte: Adaptado ALVES, 2007.

Tabela 7 - Dados de Barra

Nº	Nome	Tipo	Faixa		Área
			Min	Max	
1	Gerador-1	PV	0,95	1,05	1
2	Barra-2	PQ	0,95	1,05	1
3	Barra-3	PQ	0,95	1,05	1
4	Barra-4	PQ	0,95	1,05	2
5	Barra-5	PQ	0,95	1,05	2
6	Barra-6	PQ	0,95	1,05	2
7	Barra-7	PQ	0,95	1,05	2
8	Barra-8	PQ	0,95	1,05	2
9	Síncrono	PV	0,95	1,05	2
10	Barra-10	PQ	0,95	1,05	1
11	Barra-11	PQ	0,95	1,05	1
12	Barra-12	PQ	0,95	1,05	1
13	Barra-13	PQ	0,95	1,05	1
14	Barra-14	PQ	0,95	1,05	1
15	Barra-15	PQ	0,95	1,05	1
16	Gerador-2	v $\theta$	0,95	1,05	2

Fonte: Adaptado ALVES, 2007.

Coluna	Descrição
Nº	Número de identificação da barra.
Nome	Nome de identificação da barra.
Tipo	Corresponde ao tipo de barra a ser representado nos dados de fluxo de potência, onde: Tipo v $\theta$ = Barra de referência ou swing Tipo PV = Barra de tensão regulada ou de geração Tipo PQ = Barra de carga
Faixa	Faixa de tensão correspondente aos níveis máximos e mínimos de tensão que a barra pode operar em regime permanente, em pu.
Área	Número de identificação da área elétrica ou subsistema ao qual a barra pertence.

Tabela 8- Dados de Linha

Sequência Positiva e Negativa								
De	Para	Nº	Tensão	R <sub>+</sub>	X <sub>+</sub>	B	Cn	Ce
1	2	1	345	0	1,5	0	520	572
2	3	1	345	0,45	4,96	84,8	300	330
2	3	2	345	0,45	4,96	84,8	300	330
3	12	1	345	0,24	2,64	45,05	300	330
3	15	1	345	0,79	8,38	30,63	200	220
3	15	2	345	0,79	8,38	30,63	200	220
4	5	1	230	0,69	7,37	26,95	200	220
4	5	2	230	0,69	7,37	26,95	200	220
5	6	1	230	0,50	5,36	19,6	200	220
6	7	1	230	0,60	6,37	23,28	200	220
7	8	1	230	0,47	5,03	18,38	200	220
10	11	1	345	0,34	3,72	63,6	300	330
11	12	1	345	0,39	4,34	74,2	300	330
12	13	1	345	0,22	2,48	42,4	300	330
12	13	2	345	0,22	2,48	42,4	300	330

Fonte: Adaptado ALVES, 2007.

Coluna	Descrição
De	Número de identificação da barra de origem.
Para	Número de identificação da barra de destino.
Nº	Número de identificação do circuito.
Tensão	Tensão nominal de operação do circuito, em kV.
R <sub>+</sub>	Resistência equivalente de sequência positiva do circuito, em %.
X <sub>+</sub>	Reatância equivalente de sequência positiva do circuito, em %.
B	Susceptância shunt total do circuito, em Mvar.
Cn	Capacidade de carregamento do circuito em condições normais de operação, em MVA.
Ce	Capacidade de carregamento do circuito em condições de emergência, em MVA.

O estado inicial do SEP antes da alocação dos bancos de capacitores pode ser observado na Figura 13, assim como os valores violados de tensão nas barras, obtido a partir da resolução do fluxo de potência no software ANAREDE.



Figura 9– Estado inicial do SEP de 16 barras

Arquivo Procurar Visualizar																
														Lin:	Col:	
CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V10.00.02																
PAG. 1																
RELATORIO DE BARRAS CA DO SISTEMA * AREA 1 *																
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X																
NUM.	BARRA NOME	TENSÃO			GERACAO		INJECAD EQUIV		CARGA		ELO CC		SHUNT		MOTOR	
		TP	MOD	ANG	Mw	Mvar\	MW	Mvar	MW	Mvar	Mw	Mvar	Mvar	EQUIV	Mw	Mvar
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X																
					CE	Mvar						SHUNT	L			
1	GERAD1	1	1.030	8.3	350.0	167.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
2	BARRA2	0	1.007	5.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
3	BARRA3	0	0.913	-4.9	0.0	0.0	0.0	0.0	47.0	31.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
4	BARRA4	0	0.951	-6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	60.0	30.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
5	BARRA5	0	0.981	-4.8	0.0	0.0	0.0	0.0	31.0	20.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
6	BARRA6	0	1.005	-2.6	0.0	0.0	0.0	0.0	17.0	12.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
7	BARRA7	0	0.959	-6.0	0.0	0.0	0.0	0.0	15.0	44.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
8	BARRA8	0	0.939	-8.4	0.0	0.0	0.0	0.0	39.0	24.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
9	SINCRO	1	1.010	-8.4	0.0	57.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
10	BARRA10	0	0.869	-11.3	0.0	0.0	0.0	0.0	42.0	90.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
11	BARRA11	0	0.871	-11.3	0.0	0.0	0.0	0.0	70.0	58.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
12	BARRA12	0	0.881	-9.0	0.0	0.0	0.0	0.0	90.0	56.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
13	BARRA13	0	0.860	-10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	59.0	84.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
14	BARRA14	0	0.843	-8.5	0.0	0.0	0.0	0.0	57.0	69.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
15	BARRA15	0	0.939	-6.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
16	GERAD2	2	1.030	0.0	188.1	106.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X																
GERACAO		INJ EQV		CARGA		ELO CC		SHUNT		EXPORT		IMPORT		PERDAS		
Mw/	Mvar	Mw/	Mvar	Mw/	Mvar	Mw/	Mvar	Mvar/	EQUIV	Mw/	Mvar	Mw/	Mvar	Mw/	Mvar	
538.1	0.0	0.0	0.0	527.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.1	0.0	
331.4	0.0	0.0	0.0	518.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-186.6	0.0	

Fonte: Autoria própria.

Tabela 9 – Barras com violação de tensão

Barra	Limite inferior	Tensão	Desvio de tensão
3	0.950	0.913	0.037
8	0.950	0.939	0.011
10	0.950	0.869	0.081
11	0.950	0.871	0.079
12	0.950	0.881	0.069
13	0.950	0.860	0.090
14	0.950	0.843	0.107
15	0.950	0.939	0.011

Fonte: Autoria própria.

Para todos os valores ALFAS adotou-se valor unitário, a fim de permitir ao otimizador a alocação de reativos em qualquer barra do sistema.

Para as relações de transformação dos transformadores também foi-se adotado valor unitário.

Dados da solução encontrada:

- Valor da função objetivo encontrada: 0.9696787
- Total de iterações do solver: 31
- Tempo de execução decorridos: 2.86
- Total de variáveis: 98
- Variáveis não lineares: 41
- Total de restrições: 86
- Restrições não lineares: 28

Os valores obtidos para cada barra do sistema no software LINGO apresentam-se na tabela a seguir:

**Tabela 10 - Resultados do sistema de 16 barras LINGO**

Barra	V	$\theta$	P	Q	$Q^{sh}$
1	1.030000	0.1329166	-	-	-
2	1.022483	0.8304602E-01	0.000000	0.1000000E-04	0.000000
3	0.9791214	-0.8727644E-01	-0.4700000	-0.3100000	0.000000
4	0.9888246	-0.1140109	-0.6000000	-0.3000000	0.000000
5	1.004228	-0.8286609E-01	-0.3100000	-0.2000000	0.000000
6	1.016215	-0.4436451E-01	-0.1700000	-0.1200000	0.000000
7	0.9841329	-0.1014458	-0.1500000	-0.4400000	0.000000
8	0.9738282	-0.1417774	-0.3900000	-0.2400000	0.000000
9	1.010000	-0.1417761	0.1000000E-04	-	-
10	0.9500000	-0.1837992	-0.4200000	-0.9000000	0.2963058
11	0.9551009	-0.1829909	-0.7000000	-0.5800000	0.000000
12	0.9622666	-0.1487826	-0.9000000	-0.5600000	0.000000
13	0.9500000	-0.1637943	-0.5900000	-0.8400000	0.2606966
14	0.9500000	-0.1383444	-0.5700000	-0.6900000	0.4126763
15	0.9894803	-0.1027279	0.1000000E-04	0.1000000E-04	0.000000
16	1.030000	-	-	-	-

Fonte: Autoria própria.

Coluna	Descrição
V	Magnitude das tensões na barra
$\Theta$	Ângulo das tensões das barras terminais em radianos
P	Potencia ativa na barra
Q	Potência reativa na barra
$Q^{sh}$	Componente da injeção potência reativa devida ao elemento shunt variável da barra

Na solução alcançada observa-se valores de reativos nas barras 10, 13 e 14. Na Figura 14 pode ser verificado o estado do SEP no software ANAREDE após a alocação dos reativos encontrados por meio do LINGO.

Figura 10 – Estado do SEP de 16 barras com bancos de capacitores alocados

Arquivo Procurar Visualizar

lin:25 col:132

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA - PROGRAMA DE ANALISE DE REDES - V10.00.02 PAG. 1

RELATORIO DE BARRAS CA DO SISTEMA \* AREA 1 \*

NUM.	BARRA NOME	TENSÃO		GERACAD		INJECAO		EQUIV		CARGA		ELO CC		SHUNT		MOTOR		
		TP	MOD	ANG	MW	Mvar\	MW	Mvar	MW	Mvar	MW	Mvar	MW	Mvar	Mvar	EQUIV	MW	Mvar
1	GERAD1	1	1.030	7.6	350.0	60.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	BARRA2	0	1.022	4.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	BARRA3	0	0.979	-5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	47.0	31.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	BARRA4	0	0.989	-6.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	60.0	30.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	BARRA5	0	1.004	-4.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	31.0	20.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	BARRA6	0	1.016	-2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.0	12.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	BARRA7	0	0.984	-5.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	15.0	44.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	BARRA8	0	0.974	-8.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	39.0	24.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	SINCR0	1	1.010	-8.1	0.0	29.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	BARRA10	0	0.950	-10.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	42.0	90.0	0.0	0.0	26.7	0.0	0.0	0.0	0.0
11	BARRA11	0	0.955	-10.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	70.0	58.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	BARRA12	0	0.962	-8.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	90.0	56.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	BARRA13	0	0.950	-9.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	59.0	84.0	0.0	0.0	23.5	0.0	0.0	0.0	0.0
14	BARRA14	0	0.950	-7.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	57.0	69.0	0.0	0.0	37.2	0.0	0.0	0.0	0.0
15	BARRA15	0	0.989	-5.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	GERAD2	2	1.030	0.0	185.7	60.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

GERACAD	INJ	EQV	CARGA	ELO	CC	SHUNT	EXPORT	IMPORT	PERDAS
Mw/	Mw/	Mw/	Mw/	Mw/	Mw/	Mvar/	Mw/	Mw/	Mw/
Mvar	Mvar	Mvar	Mvar	Mvar	Mvar	EQUIV	Mvar	Mvar	Mvar
535.7	0.0	527.0	0.0	87.5	0.0	0.0	0.0	0.0	8.7
150.5	0.0	518.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-280.0

Fonte: Autoria própria.

Em ambos os softwares, todas as barras que apresentavam violação de tensão tiveram seus valores corrigidos para dentro dos limites estabelecidos anteriormente.

Vale ressaltar que no software LINGO os ângulos das tensões são dados em radianos, diferentemente do ANAREDE que trabalha com as mesmas grandezas em graus. Entretanto a solução encontrada é análoga conforme mostrado na Tabela 11.

Tabela 11 – Valores de tensão e ângulo dados pelos softwares LINGO e ANAREDE

Barra	Software LINGO		Software ANAREDE	
	Tensão	Ângulo (graus)	Tensão	Ângulo (graus)
1	1.030000	7.615	1.030	7.6
2	1.022483	4.758	1.022	4.8
3	0.9791214	-5.000	0.979	-5.0
4	0.9888246	-6.532	0.989	-6.5
5	1.004228	-4.747	1.004	-4.7
6	1.016215	-2.541	1.016	-2.5
7	0.9841329	-5.812	0.984	-5.8
8	0.9738282	-8.123	0.974	-8.1
9	1.010000	-8.123	1.010	-8.1
10	0.9500000	-10.530	0.950	-10.5
11	0.9551009	-10.484	0.955	-10.5
12	0.9622666	-8.524	0.962	-8.5
13	0.9500000	-9.384	0.950	-9.4
14	0.9500000	-7.922	0.950	-7.9
15	0.9894803	-5.885	0.989	-5.9
16	1.030000	-	1.030	-

Fonte: Autoria própria.

Na geração do sistema verificou-se que os valores iniciais de 538,1 MW e 331,4 MVar tornaram-se 535,7 MW e 150,5 MVar após a aplicação dos capacitores. Já as perdas de 11,1 MW anteriores, passaram a ser de 8,7 MW.

Uma relevante melhora foi alcançada no sistema com a diminuição de expressivos 21,63% das perdas ativas.

#### **4. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A verificação de que um grande desafio das concessionárias de energia elétrica é atender os consumidores com níveis de tensão adequados motivou a realização deste trabalho. A proposta foi desenvolver uma formulação linear inteira mista para resolver o problema de alocação ótima de bancos de capacitores em sistema de transmissão de energia elétrica.

O sistema teste de 16 barras foi utilizado para mostrar a precisão do modelo matemático desenvolvido, assim como a eficiência do mesmo na solução do problema de alocação de capacitores utilizando software LINGO.

Nota-se que o modelo proposto com o objetivo de minimizar a quantidade reativos a serem alocados e possibilitando a alocação em qualquer uma das barras do sistema, permitiu o encontro de uma solução dentro das restrições estipuladas e ainda reduziu as violações de tensão de todas as barras que anteriormente apresentavam valores violados, melhorando assim o perfil da magnitude de tensão, estando os mesmos agora dentro dos limites adequados exigidos e uma visível diminuição das perdas no sistema.

## 5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir desse trabalho surgiram novos possíveis estudos para o problema da alocação ótima de bancos de capacitores, os quais são sugeridos como trabalhos futuros:

- Ampliação da metodologia para a consideração na função objetivo das perdas do sistema elétrico na alocação dos bancos de capacitores, entre outras variações da função custo.
- Maiores estudos sobre a influência da variável binária no conjunto de restrições.
- Realizar a análise do sistema segmentando-o em áreas e comparar os resultados das alocações com a resolução da alocação para o sistema completo.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – (ANEEL a). Resolução nº505, de 26 de novembro de 2001. **Conformidades dos níveis de tensão em regime permanente nos sistemas de energia elétrica.** Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 27 nov. 2001. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/>>. Acesso em: 17 set. 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – (ANEEL b). **Manual de fiscalização da transmissão.** – Brasília: ANEEL, 2004. 274p.

ALVES, Waschington Fernandes. **Proposição de sistemas-teste para análise computacional de sistemas de potência.** 2007. 332 f. Dissertação (Pós-Graduação em Computação) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2007.

ALVES, Raiani P. **Alocação Ótima de Reguladores de Tensão em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Radiais Usando uma Formulação Linear Inteira Mista.** 2012. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia Ilha Solteira, 2012.

BECKHÄUSER F., José A.; FERNANDES, Alison M.; ROA, Cleriston C. **Estudo e análise do fluxo de potência ótimo utilizando o programa FLUPOT.** 135 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

BLATT, JAIR J. F. **Proposta de instalação de regulador de tensão em uma rede de distribuição primária a partir da análise do perfil de tensão.** 2016. 80f. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul– UNIJU. Santa Rosa, RS, 2016.

BORGES, Carmen L. T.; ALVES, Juliana M. T. **Análise de Segurança Estática em Sistemas de Potência.** 2010. 66 f. Universidade Federal do Rio de Janeiro Escola Politécnica Departamento de Engenharia Elétrica. 2010.

COSTA, M. M. **Alocação Ótima de Bancos de Capacitores em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica: Abordagem para Redes Monofásicas e Trifásicas**. 2016. 90f. Universidade Federal de Ouro Preto. Departamento de Engenharia Elétrica. 2016.

DA CUNHA, F. C. R. **Operação Do Sistema Elétrico De Distribuição Do Estado Do Ceará**. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, p. 85. 2011.

DALCIN, Joel A. **Adequação dos níveis de tensão em um sistema elétrico de distribuição em média tensão – estudo de caso**. 2013. 126 f. Dissertação (Graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2013.

DE SOUZA, José Ricardo da Mata Soares; TUMA, Rogério. **Proteção de linhas de transmissão com compensação série**. Disponível em: <<https://www.osestoreletrico.com.br/protecao-de-linhas-de-transmissao-com-compensacao-serie/>>. Acesso em: 29 nov. 2017.

EXPÓSITO, Antonio G.; CONEJO, Antonio J.; CAÑIZARES, Claudio. **Sistemas de energia elétrica: análise e operação**. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011, 554 p.

GARCIA, Douglas A. A; DUZZI, Francisco. E. **Aspectos de sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica**. O Setor Elétrico, v. 7, n.73, p.62-68, fev. 2012. ISSN 1983-0912.

GARCIA, Douglas; JUNIOR, Francisco Elio Duzzi. **Tópicos de sistemas de transmissão e de distribuição de energia elétrica**. Disponível em: <[http://www.osestoreletrico.com.br/wp-content/uploads/documentos/fasciculos/Ed74\\_fasc\\_distribuicao\\_cap2.pdf](http://www.osestoreletrico.com.br/wp-content/uploads/documentos/fasciculos/Ed74_fasc_distribuicao_cap2.pdf)>. Acesso em: 14 set. 2017.

GUEDES, Larissa de Matos. **Localização e dimensionamento de unidades de geração distribuída em redes de distribuições radiais**. 2006. 95 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade de Brasília, Brasília, 2006.



- GÖNEN, T. **Electric power distribution systems engineering**. New York: McGraw Hill, 1986. 739 p.
- JÚNIOR, Benvindo R P. **Alocação Otimizada de Bancos de Capacitores em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Através de Metaheurísticas Multiobjetivo**. 2009. 193 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2009.
- JUNIOR, A. C. G., SOUZA, M. J. F. **Softwares de otimização: manual de referência**. Universidade Federal de Ouro Preto, 2004. 72 p.
- LEÃO, Ruth. **GTD – Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica**. Centro de Tecnologia Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, 2009.
- MELO, Nilo A. F.; CHÁVEZ, José R. A. **Implementação de um algoritmo para o problema de fluxo de potência ótimo utilizando o método sequencial quadrático**. 1998. CCT - Universidade Estadual Do Norte Fluminense. 1998
- MONTICELLI, Alcir J. **Fluxo de carga em redes de energia elétrica**. São Paulo: E. Blücher; Rio de Janeiro: Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Brasil), 1983, 164p.
- PENHA, Mauricio. **Análise de capacitores de alta tensão através de equipamento protótipo MEDCAP**. 113f. Instituto De Tecnologia Para O Desenvolvimento (LACTEC). Curitiba, 2016.
- SILVA, David M. K. **Fluxo de potência para sistemas de distribuição considerando redução de barras**. 2016. 73 p. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2016.
- SOARES, Carlo Eduardo Ferreira. **Análise de ferramenta de fluxo de potência ótimo na otimização de sistema real de subtransmissão**. 2010. 129 f. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

**SZUVOVIVSKI, ITAMAR. Alocação simultânea de bancos de capacitores e reguladores de tensão em sistemas de distribuição usando algoritmos genéticos e fluxo de potência ótimo. 2008. 207 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.**

**ANEXO**



