

**INSTITUTO FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**RAYANE RAINER LEAL**

**OTIMIZAÇÃO DA ALOCAÇÃO DE CAPACITORES SHUNT  
PARA AUMENTO DA MARGEM DE CARGA EM SISTEMAS  
ELÉTRICOS DE POTÊNCIA, UTILIZANDO ALGORITMO  
GENÉTICO**

**FORMIGA – MG**

**2017**

**RAYANE RAINER LEAL**

**OTIMIZAÇÃO DA ALOCAÇÃO DE CAPACITORES SHUNT  
PARA AUMENTO DA MARGEM DE CARGA EM SISTEMAS  
ELÉTRICOS DE POTÊNCIA, UTILIZANDO ALGORITMO  
GENÉTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal  
de Minas Gerais, como requisito para obtenção do  
título de bacharel em Engenharia Elétrica.

**Orientador:** Prof. Dr. Renan Souza Moura

**FORMIGA – MG**

**2017**

**RAYANE RAINER LEAL**

**OTIMIZAÇÃO DA ALOCAÇÃO DE CAPACITORES SHUNT  
PARA AUMENTO DA MARGEM DE CARGA EM SISTEMAS  
ELÉTRICOS DE POTÊNCIA, UTILIZANDO ALGORITMO  
GENÉTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal  
de Minas Gerais como requisito para obtenção do  
título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Avaliado em: 10 de novembro de 2017.

Nota: \_\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Renan Souza Moura

---

Prof. Dr. Ulysses Rondina Duarte

---

Prof. Aline Fraga Silva

## RESUMO

Um sistema elétrico de potência é constituído por diversos elementos com funções variadas. Para inserir qualquer elemento no sistema, deve-se observar a existência de algum parâmetro máximo, para este elemento, que possa causar problemas operacionais caso seja violado. Este parâmetro máximo é denominado como a capacidade de hospedagem e quando excedido pode levar o sistema ao colapso de tensão. Os capacitores shunt são elementos utilizados para o aumento da margem de carga dos sistemas, por meio de uma compensação de potência reativa. Determinar a melhor alocação destes elementos nos sistemas é fundamental, pois o excesso de potência reativa pode levar os sistemas ao colapso de tensão. Portanto, este trabalho pretende avaliar a capacidade de hospedagem de capacitores shunt instalado nos sistemas elétricos de potência com a utilização do algoritmo genético. O algoritmo genético realiza diversas operações para determinar em quais barras do sistema serão inseridos os capacitores shunt, bem como o valor da capacitância. O algoritmo genético utiliza uma função para comparar o desempenho entre as possíveis soluções. Neste trabalho o desempenho consiste no aumento da margem de carga com a alocação dos capacitores. A margem de carga é obtida pelo método da curva PV, portanto para cada possível solução gerada pelo AG uma curva PV é traçada identificando um possível aumento da margem de carga e se o sistema está operando de forma estável. O trabalho foi desenvolvido por simulações computacionais através da plataforma MATLAB R2014a. A metodologia foi testada nos sistemas de teste IEEE 14, 30 e 57 barras, permitindo verificar a existência de um limite de potência reativa que pode ser inserido nos sistemas. A metodologia foi testada nos sistemas teste de 14, 30 e 57 barras do IEEE e em todos os sistemas ocorreram um aumento considerável da margem de carga.

**Palavras chave:** Capacidade de Hospedagem, Estabilidade de Tensão, Curva PV, Algoritmo Genético.

## ABSTRACT

An electric power system consists of several elements with varied functions. To insert any element in the system, it should be noted that there is some maximum parameter for this element that can cause operational problems if it is violated. This maximum parameter is called hosting capacity and when exceeded can lead the system to voltage collapse. Shunt capacitors are elements used to increase the load range of the systems by means of a reactive power compensation. Determining the best to the allocation of these elements in the systems is fundamental, because the excess of reactive power can lead the systems to the collapse of tension. Therefore, this work intends to evaluate the capacity of hosting shunt capacitors installed in power electrical systems with the use of genetic algorithm. The genetic algorithm performs several operations to determine in which buses the system will be inserted shunt capacitors, as well as the value of the capacitance. The genetic algorithm uses a function to compare performance among possible solutions. In this work the performance consists in increasing the load margin with the allocation of the capacitors. The load margin is obtained by the PV curve method, so for each possible solution generated by the AG a PV curve is drawn identifying a possible increase in the load margin and if the system is operating in a stable way. The work was developed by computational simulations through the MATLAB R2014a platform. The methodology was tested in the IEEE 14, 30 and 57 bar test systems, allowing to verify the existence of a reactive power limit that can be inserted in the systems. In all systems, there was a considerable increase in the load margin and an increase in the busbar voltage profile.

**Keywords:** Host Capacity, Voltage Stability, PV Curve, Genetic Algorithm

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1: Classificação de estabilidade de sistemas de potência.....	17
Figura 2. 2: Sistema de duas barras. ....	27
Figura 2. 3: Variação de grandezas elétricas como função de $Z_I/Z_C$ . ....	30
Figura 2. 4: Curva PV para diferentes fatores de potência. ....	31
Figura 2. 5: Margem de Estabilidade de Tensão (MET). ....	32
Figura 2. 6: Curvas PVs - chaveamento de capacitores. ....	34
Figura 2. 7: Existência de uma potência máxima mesmo com capacidade infinita de suporte de potência reativa. ....	35
Figura 2. 8: Algoritmo genético básico. ....	39
Figura 2. 9: Simulação de seleção por roleta. ....	42
Figura 2. 10: Cruzamento em um ponto. ....	43
Figura 4. 1: Curva PV do sistema de 14 barras, sem capacitores <i>shunt</i> . ....	52
Figura 4. 2: Curva PV do sistema de 30 barras, sem capacitores <i>shunt</i> . ....	52
Figura 4. 3: Curva PV do sistema de 57 barras, sem capacitor <i>shunt</i> . ....	53
Figura 4. 4: Curva PV do sistema de 14 barras com capacitores <i>shunt</i> . ....	54
Figura 4. 5: Curva PV do sistema de 30 barras com adição de capacitores <i>shunt</i> . ....	56
Figura 4. 6: Curva PV do sistema de 57 barras com adição de capacitores <i>shunt</i> . ....	59

## LISTA DE TABELA

Tabela 2.1: Analogia entre a genética e o algoritmo genético.....	38
Tabela 4.1: Área Crítica dos sistemas de 14, 30 e 57 barras.....	50
Tabela 4.2: Margem de carga dos sistemas sem adição de capacitores shunt.....	53
Tabela 4.3: Tensão nos barramentos do sistema de 14 barras no ponto de máximo carregamento.....	54
Tabela 4.4: Tensão nos barramentos do sistema de 30 barras no ponto de máximo carregamento.....	56

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- SEP - Sistemas Elétricos de Potência
- PV - Potência ativa versus tensão
- AG - Algoritmo Genético
- HVDC - *High voltage direct current* ( Corrente contínua de alta tensão )
- CA - Corrente alternada
- CC - Corrente contínua
- MTP - Máxima Transferência de potência
- MET - Margem de estabilidade de tensão
- QV - Potência reativa versus tensão
- DNA - Ácido Desoxirribonucleico
- PQ - Potência ativa versus potência reativa
- IEEE - *Institute of Electrical and Electronic Engineers* ( Instituto de engenheiros eletricitistas e eletrônicos)

## SUMÁRIO

RESUMO.....	04
ABSTRACT.....	05
LISTA DE FIGURA.....	06
LISTA DE TABELA.....	07
LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS.....	08
SUMÁRIO.....	09
CAPITULO 1 – INTRODUÇÃO .....	11
1.1    INTRODUÇÃO .....	11
1.2    MOTIVAÇÃO .....	12
1.3    OBJETIVOS .....	12
1.4    ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	13
CAPITULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1    INTRODUÇÃO .....	14
2.2    ESTUDOS DE ESTABILIDADE DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA.....	14
2.2.1    Classificação do tipo de estabilidade .....	15
2.2.2    Formas do fenômeno de estabilidade .....	17
2.2.3    Revisão histórica das questões de estabilidade.....	23
2.3    CURVA PV E MARGEM DE ESTABILIDADE DE TENSÃO .....	26
2.3.1    Teorema da Máxima Transferência de Potência .....	27
2.3.2    Curva do tipo PV .....	30
2.4    CAPACIDADE DE HOSPEDAGEM DE CAPACITORES SHUNT .....	33
2.4.1    Influência da compensação reativa em estabilidade de tensão.....	34
2.5    ALGORITMO GENÉTICO .....	35
2.5.1    Computação evolutiva .....	35
2.5.2    Terminologia biológica .....	37
2.5.3    Elementos do algoritmo genético.....	38
2.5.4    Representação e geração da população .....	39
2.5.5    Função avaliação de aptidão.....	40
2.5.6    Operador seleção.....	40
2.5.7    Operador cruzamento .....	42
2.5.8    Operador de mutação .....	43
2.5.9    Módulo de população .....	43

2.5.10	Convergência do algoritmo .....	44
2.5.11	Aplicações dos algoritmos genéticos.....	44
<b>CAPITULO 3 – METODOLOGIA.....</b>		<b>45</b>
<b>3.1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>45</b>
<b>3.2</b>	<b>REPRESENTAÇÃO DO PROBLEMA .....</b>	<b>45</b>
<b>3.3</b>	<b>FUNÇÃO DE AVALIAÇÃO .....</b>	<b>46</b>
3.3.1	Curva PV .....	47
<b>3.4</b>	<b>POPULAÇÃO INICIAL .....</b>	<b>47</b>
<b>3.5</b>	<b>OPERADORES GENÉTICOS .....</b>	<b>48</b>
<b>3.6</b>	<b>CONVERGÊNCIA DO ALGORITMO.....</b>	<b>48</b>
<b>3.7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>49</b>
<b>CAPITULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>		<b>50</b>
<b>4.1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>50</b>
<b>4.2</b>	<b>DETERMINAÇÕES BÁSICAS PARA APLICAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO.....</b>	<b>50</b>
4.2.1	Área crítica .....	50
4.2.2	Curva PV sem capacitores shunt.....	51
<b>4.3</b>	<b>RESULTADOS SISTEMA 14 BARRAS IEEE.....</b>	<b>53</b>
<b>4.4</b>	<b>RESULTADOS SISTEMA 30 BARRAS IEEE.....</b>	<b>55</b>
<b>4.5</b>	<b>RESULTADOS SISTEMA 57 BARRAS IEEE.....</b>	<b>58</b>
<b>4.6</b>	<b>DISCUSSÕES GERAIS.....</b>	<b>59</b>
<b>CAPITULO 5 – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....</b>		<b>61</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>		<b>62</b>
<b>ANEXO A.....</b>		<b>64</b>
<b>ANEXO B.....</b>		<b>66</b>
<b>ANEXO C.....</b>		<b>68</b>

## CAPITULO 1 – INTRODUÇÃO

### 1.1 INTRODUÇÃO

Garantir que os Sistemas Elétricos de Potência (SEP) cumpram o objetivo de fornecer energia elétrica aos consumidores, dentro de seus limites operacionais, tem se tornado uma tarefa cada vez mais complexa. Dentro deste cenário surgem estados críticos de operação, nos quais os sistemas não devem ser submetidos. Um dos principais responsáveis por levar um sistema elétrico à algum estado crítico é o risco de instabilidade de tensão.

Situações de contingência, capazes de provocar instabilidades na tensão dos SEPs, são comuns e resultam em grande parte nas interrupções, parciais ou totais, do fornecimento da energia elétrica. A fim de contornar esse problema e promover um aumento de carga do sistema o operador pode intervir manualmente ou por meio de ações de controle (MALANGE, 2008). Estas intervenções podem resultar na inserção de novos elementos, os quais podem resultar em condições operativas inesperadas e causar ainda mais interrupções no sistema, caso não seja feito um correto dimensionamento (MOURA et al., 2013; LOPES e SOUZA, 2003).

Assim, conhecer o valor máximo que um determinado elemento pode operar em um sistema elétrico de potência é fundamental. Este valor máximo é definido como a capacidade de hospedagem e deve ser calculada para diversos equipamentos que são inseridos no sistema elétrico (BOLLEN, 1960).

Quando um elemento é adicionado ao sistema elétrico de potência, busca-se ampliar a sua margem de carregamento (PAIVA, 2007; GUIMARÃES et al., 2011). Margem de carregamento é definida como a distância entre o ponto operativo e o seu máximo carregamento. Esta margem é normalmente calculada analisando-se uma curva denominada como curva PV (potência versus tensão), amplamente utilizada nos estudos de estabilidade de tensão.

A inserção de novas linhas de transmissão, subestações, ou ainda a inclusão de equipamentos de compensação reativa e controle da rede são alguns meios de aumentar a margem de carga de um sistema elétrico. Devido à viabilidade e aos custos envolvidos, a compensação reativa apresenta-se vantajosa com relação às demais ações. Esta compensação

pode ser feita por capacitores conectados em paralelos (shunt) com as barras dos sistemas (CONDEGA, 2013).

No entanto, a escolha adequada de valores de capacitores shunt e suas localizações, com a finalidade de obter uma otimização da compensação reativa, não é tarefa trivial frente à complexidade da rede. Dessa forma, torna-se importante o desenvolvimento de ferramentas computacionais para dar suporte à tomada de decisão dos planejadores e operadores dos SEPs, visando a aplicação mais adequada possível dos recursos destinados à melhoria do sistema. Neste contexto, o presente trabalho propõe a implementação de uma ferramenta capaz de realizar a alocação ótima de capacitores shunt ao longo dos SEPs. Para este fim, serão realizadas simulações computacionais por meio da plataforma MATLAB R2014a.

## **1.2 MOTIVAÇÃO**

Os capacitores shunt têm se mostrado a alternativa econômica mais viável para maximizar a carga de um sistema elétrico de potência. Entretanto, se utilizado de forma inadequada pode deixar os sistemas sobrecompensados, fato que pode levar, rapidamente, o sistema à instabilidade de tensão. Sendo assim, a identificação dos pontos mais adequados para a alocação destes equipamentos de forma a otimizar o desempenho do sistema e evitar sua sobrecompensação é um dos problemas a serem revolidos pelos planejadores do mesmo. Além da localização, deve-se estabelecer o valor de capacitância que atende este objetivo.

Com o intuito de contornar o problema relacionado à alocação desses equipamentos, definir o melhor valor de capacitância e evitar uma sobre compensação, este trabalho pretende apresentar uma metodologia baseada em Algoritmos Genéticos e curva PV. A alocação de capacitores, bem como seu valor, são definidos pelo algoritmo genético, tendo como referência a tradicional análise de curvas PV usada para avaliar a estabilidade de tensão dos sistemas em estudo.

## **1.3 OBJETIVOS**

O objetivo geral do trabalho é implementar um algoritmo computacional para a alocação de capacitores shunt em sistemas de transmissão usando AG e, para atingir este objetivo, foram desenvolvidas as seguintes etapas:

- a. Estudo sobre as influências da compensação reativa *shunt* na estabilidade de tensão do sistema.
- b. Revisão dos conceitos de técnicas de Inteligência Artificial, com foco nos AGs;
- c. Desenvolvimento de uma metodologia para a alocação dos capacitores *shunt* utilizando os AGs e a curva PV;
- d. Implementação de um algoritmo computacional para a alocação dos capacitores no sistema de transmissão;
- e. Validação do algoritmo em sistemas teste.

#### **1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

A estrutura adotada no trabalho segue a seguinte organização: após a introdução feita neste capítulo, é apresentada a revisão bibliográfica elaborada sobre o tema no capítulo 2. O capítulo 3 apresenta a metodologia proposta e sua aplicação nos sistemas teste. O capítulo 4 apresenta os resultados da metodologia, bem como sua influência nos sistemas teste; finalmente, o capítulo 5 apresenta as considerações finais e trabalhos futuros.

## CAPITULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos de potência modernos são caracterizados por serem extensivamente interconectados e pela crescente dependência de sistemas de controle para permitir a utilização plena das reservas existentes. Isto permite que o fornecimento de energia elétrica com confiabilidade e economia seja o maior determinante para o progresso industrial e a consequente melhoria na qualidade de vida (PADIYAR, 2008).

O aumento da demanda por energia elétrica, juntamente com restrições ambientais e de recursos, representa vários desafios aos planejadores do sistema. A geração situada longe dos centros de consumo, com o intuito de explorar as vantagens da energia hidráulica que se encontra em locais remotos, exigem longos caminhos para despachar a energia elétrica produzida até os centros de consumo. Contudo, as restrições de direito de construção de novas linhas de transmissão levam à sobrecarga das linhas existentes, além de impulsionar a busca por novas soluções tecnológicas e, assim, explorar os altos limites térmicos de carregamento das linhas de transmissão em extra alta tensão (PADIYAR, 2008).

Dentro deste contexto, estudos de estabilidade de tensão tem auxiliado os operadores de sistemas elétricos de potência na tomada de decisão.

### 2.2 ESTUDOS DE ESTABILIDADE DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Segundo (KUNDUR et al., 2004),

*“Estabilidade em sistemas de potência é a habilidade de um sistema de potência, para uma determinada condição inicial de operação, de recuperar um estado operacional de equilíbrio após ter sido submetido a um distúrbio físico, com a maioria das variáveis do sistema delimitadas de modo que praticamente todo o sistema permaneça intacto.”.*

A estabilidade de SEPs tem sido a maior preocupação na operação dos sistemas (PADIYAR, 2008). Ela pode ser amplamente definida como uma propriedade inerente ao sistema que o permite operar em um estado de equilíbrio sob condições normais de operação e retornar a um estado de equilíbrio aceitável após a ocorrência de um distúrbio (KUNDUR,

1994). A estabilidade de um sistema determina, portanto, se o sistema pode se estabelecer em um novo estado estável depois da extinção de transitórios (PADIYAR, 2008).

O problema da instabilidade em sistemas de potência pode se manifestar de diferentes formas, dependendo de seu modo de configuração e operação, mas, tradicionalmente, este problema se resume em manter a operação síncrona de seus geradores, já que os sistemas de potência dependem das máquinas síncronas para a geração de energia elétrica. Neste sentido, uma condição necessária para a operação satisfatória do sistema é que todas as máquinas síncronas permaneçam em sincronismo, e isso é influenciado pela dinâmica dos ângulos do rotor do gerador e pelas relações ângulo-potência (KUNDUR, 1994).

Há outras formas de encontrar o problema de instabilidade em sistemas de potência que não estejam relacionadas com o sincronismo dos geradores síncronos. Por exemplo, para cargas como motores de indução, inseridas em um sistema composto por um gerador que alimenta a carga por meio de uma linha de transmissão, a manutenção do sincronismo não é o problema na ocorrência de um colapso de tensão, mas sim a estabilidade e o controle da tensão no barramento da carga (KUNDUR, 1994). Neste trabalho, o estudo de estabilidade será realizado no âmbito da estabilidade de tensão, que é uma análise estática do problema de estabilidade nos barramentos de carga.

Na avaliação da estabilidade, a preocupação é o comportamento do sistema de potência quando sujeito a um distúrbio transitório, o qual pode ser pequeno ou grande. Pequenos distúrbios na forma de mudanças de carga ocorrem continuamente e o sistema se autoajusta para estas condições de mudança. O sistema deve ser capaz de operar satisfatoriamente sob estas condições e alimentar com sucesso o máximo montante de carga. O sistema deve ser capaz também de absorver altas quantidades de grandes distúrbios, como curtos-circuitos em linhas de transmissão, perda de um grande gerador ou de uma grande carga, ou perda de cargas que são elos entre subsistemas, e estes distúrbios exigem ações remediadoras a fim de eliminar estes tipos de faltas. A duração da falta tem uma influência crítica na estabilidade do sistema (KUNDUR, 1994; PAIYAR, 2008).

### **2.2.1 Classificação do tipo de estabilidade**

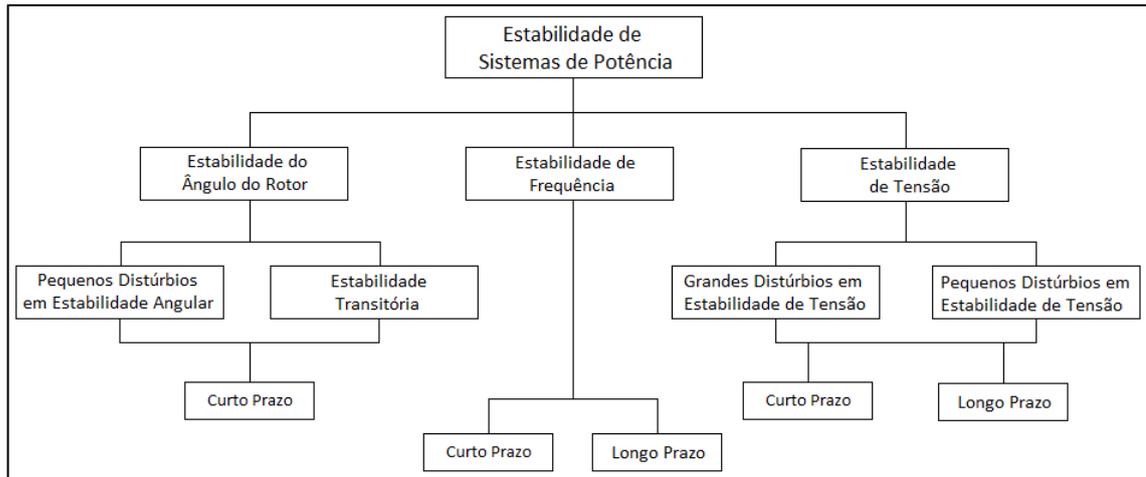
Um típico e moderno sistema de potência é um processo multivariável de alta ordem, cuja resposta dinâmica é influenciada por uma ampla gama de dispositivos com diferentes características e taxas de resposta. A estabilidade, por sua vez, é uma condição de equilíbrio entre forças opostas. Dependendo da topologia da rede, das condições de operação do sistema e da forma de distúrbio, diferentes conjuntos de forças opostas podem experimentar desequilíbrio sustentado, levando a diferentes formas de instabilidade (KUNDUR *et al.*, 2004).

Embora a estabilidade de sistemas de potência seja um problema único, as distintas formas de instabilidade que um sistema pode ser submetido não o permite ser tratado como tal. Devido à alta complexidade e dimensão dos problemas de estabilidade, algumas simplificações são necessárias para analisar tipos específicos de problemas, usando um grau apropriado de detalhes da representação do sistema e uma técnica analítica apropriada (KUNDUR e MORISON, 1997).

As análises de estabilidade, incluindo a identificação dos fatores que contribuem para a instabilidade e a elaboração de métodos para melhorar a operação estável, são amplamente facilitadas pela classificação da estabilidade em uma categoria apropriada, a qual, é essencial para análises práticas e resolução de problemas de estabilidade em sistemas de potência (KUNDUR *et al.*, 2004; MACHOWSKI *et al.*, 1997).

A Figura 2.1 fornece uma imagem geral do problema de estabilidade em sistemas de potência, identificando suas categorias e subcategorias. Esta classificação é baseada nas seguintes considerações (KUNDUR *et al.*, 2004):

- A natureza física do modo resultante de instabilidade, conforme indicado pela variável do sistema principal em que a instabilidade pode ser observada;
- O tamanho do distúrbio considerado, que influencia o método de cálculo e a previsão de estabilidade;
- Os dispositivos, processos e o intervalo de tempo que devem ser levados em consideração para avaliar a estabilidade.



**Figura 2. 1: Classificação de estabilidade de sistemas de potência**

Fonte: Adaptado de (KUNDUR et al., 2004).

## 2.2.2 Formas do fenômeno de estabilidade

### 2.2.2.1 Estabilidade do ângulo do rotor

O termo estabilidade dinâmica também aparece na literatura como uma classe da estabilidade do ângulo do rotor (KUNDUR et al., 2004). No entanto, diferentes autores utilizaram o termo para tratar de diferentes fenômenos. Por exemplo, enquanto na literatura norte-americana o termo é utilizado para denotar a estabilidade de pequenos distúrbios na presença de controles automáticos, em especial, os controles de excitação de geradores, na literatura europeia tem sido utilizado para indicar estabilidade transitória. Portanto, é recomendado não se utilizar o termo estabilidade dinâmica para se referenciar à estabilidade do ângulo do rotor (KUNDUR et al., 2004).

A estabilidade do ângulo do rotor se refere à capacidade de máquinas síncronas, presentes em um sistema de potência interconectado, permanecerem em sincronismo após terem sido submetidas a um distúrbio (KUNDUR et al., 2004).

Por conveniência na análise e para obter informações úteis sobre a natureza dos problemas de estabilidade, é útil caracterizar a estabilidade do ângulo do rotor em termos das duas categorias seguintes:

- Estabilidade do ângulo do rotor em pequenos distúrbios (ou pequenos sinais): está interessado na habilidade do sistema de potência em manter o sincronismo sobre pequenos distúrbios. Os distúrbios são considerados suficientemente pequenos ao ponto que a linearização das equações do sistema é permitida para análises. Nos

sistemas de potência atuais, o problema de estabilidade do ângulo do rotor é geralmente associado ao amortecimento insuficiente de oscilações e pode ser de natureza local ou global. Problemas locais envolvem uma pequena parte do sistema, associados às oscilações de uma única usina. Já problemas globais são causados por interações entre áreas de grandes grupos de geradores e têm efeitos generalizados.

- Estabilidade do ângulo do rotor em grandes distúrbios, ou estabilidade transitória: está preocupada com a capacidade do sistema de potência em manter o sincronismo quando submetido a severos distúrbios, como curtos-circuitos em linhas de transmissão. A resposta resultante do sistema envolve grandes excursões do ângulo do rotor e é influenciado pela relação ângulo-potência não linear.

De acordo com a Figura 2.1 a estabilidade do ângulo do rotor para pequenos distúrbios e a estabilidade transitória são categorizadas como um fenômeno de curto prazo.

#### 2.2.2.2 Estabilidade de tensão

A estabilidade de tensão se refere à capacidade do sistema de potência em manter tensões estáveis em todos os barramentos do sistema depois de ser submetido a um distúrbio de uma determinada condição de operação inicial (KUNDUR et al., 2004). Depende da capacidade de manter/restaurar o equilíbrio entre demanda e fornecimento à carga de um sistema de potência. A instabilidade que pode resultar ocorre na forma de uma progressiva queda ou aumento de tensão de alguns barramentos. Um possível efeito da instabilidade de tensão é a perda da carga em uma área, ou disparo de sistemas de proteção de linhas de transmissão e outros elementos conduzindo para interrupções em cascata. Perda de sincronismo de alguns geradores pode resultar dessas interrupções ou de condições de operação que violem seus limites de corrente de campo (MACHOWSKI et al., 1997).

O termo colapso de tensão é também frequentemente utilizado. Ele é o processo pelo qual a sequência de eventos acompanhando a instabilidade de tensão leva a um apagão ou a tensões anormalmente baixas em uma parte significativa do sistema de potência (KUNDUR et al., 2004). A operação estável em baixo nível de tensão pode continuar após a mudança de tap do transformador atingir seu limite, com disparo intencional e/ou não intencional de alguma carga. A carga restante tende a ser sensível à tensão e a demanda conectada em tensão normal não é conhecida.

A força motriz para a instabilidade de tensão normalmente é a carga. Em resposta ao distúrbio, a potência consumida pela carga tende a ser restaurada pela ação do ajuste do

escorregamento do motor, reguladores de tensão, transformadores com mudança de *tap* e termostatos. As cargas restauradas aumentam o estresse na rede de alta tensão, aumentando o consumo de potência reativa e causando uma maior redução de tensão. Uma situação de deterioração que causa instabilidade de tensão ocorre quando a dinâmica da carga tenta restaurar o consumo de potência para além da capacidade da rede de transmissão e da geração conectada. (MACHOWSKI et al., 1997).

O principal fator que contribui para a instabilidade de tensão é a queda de tensão que ocorre quando o fluxo de potência ativa e reativa atravessa as reatâncias indutivas da rede de transmissão; isto limita a capacidade da rede de transmissão para transferir potência e sustentar a tensão. A transferência de potência e o suporte de tensão são ainda mais limitados quando algum dos geradores atinge seu limite de tempo de sobrecarga para a corrente de campo ou de armadura. A estabilidade de tensão é ameaçada quando um distúrbio aumenta a demanda de potência reativa além da capacidade sustentável dos recursos disponíveis de potência reativa (MACHOWSKI et al., 1997).

Ainda que a maioria das instabilidades de tensão ocorra pela queda progressiva da tensão no barramento, o risco de instabilidade de sobretensão também existe. Ela é causada por um comportamento capacitivo da rede (linhas de transmissão operando abaixo da impedância de carga) assim como por limitadores de subexcitação impedindo geradores e/ou compensadores síncronos de absorver o excesso de potência reativa. Neste caso, a instabilidade de tensão é associada à instabilidade combinada dos sistemas de geração e transmissão para operar abaixo de um nível de carga. Na tentativa destes sistemas de restaurar esta potência de carga, transformadores com mudança de *tap* causam instabilidade de tensão de longo prazo (CORTEZ, 2001).

Os problemas de instabilidade de tensão podem ocorrer também nos terminais de elos HVDC (High-voltage direct current) devido às longas distâncias, ou em aplicações consecutivas (KUNDUR et al., 2004). Estes tipos de problemas estão geralmente associados a elos HVDC conectados a sistemas CA (corrente alternada) fracos e podem ocorrer nas estações do retificador ou do inversor, associadas às características desfavoráveis de potência reativa da “carga” dos conversores. As estratégias de controle de elos HVDC têm uma influência muito significativa em tais problemas, uma vez que as potências ativa e reativa na junção CA/CC (corrente alternada/corrente contínua) são determinadas pelos controles.

Se o carregamento resultante na transmissão CA forçá-la para além de suas capacidades, a instabilidade de tensão ocorrerá. Tal fenômeno é relativamente rápido, com o

período de interesse sendo na ordem de um segundo ou menos. A instabilidade de tensão pode ser associada também aos controles do conversor de transformadores com mudança de *tap*, sendo neste caso um fenômeno consideravelmente mais lento. Os recentes desenvolvimentos na tecnologia HVDC (conversores de fonte de tensão e conversores comutadores de capacitores) têm aumentado significativamente os limites de operação estável de elos HVDC em sistemas fracos comparados com os limites de conversores comutadores de linha (KUNDUR et al., 2004).

Uma forma de problema de estabilidade de tensão que resulta em sobretensões é a auto excitação de máquinas síncronas, que pode surgir se a carga capacitiva de uma máquina síncrona for muito grande. Exemplos de cargas capacitivas em excesso que podem iniciar a auto excitação são linhas de transmissão com terminal de carga em aberto e capacitores em derivação e bancos de filtros de estações HVDC. As sobretensões que resultam, quando a carga do gerador muda para capacitiva, são caracterizadas por um aumento instantâneo no momento de mudança, seguido por um aumento mais gradual. Este último aumento depende da relação entre o componente capacitivo da carga e as reatâncias da máquina, juntamente com o sistema de excitação da máquina síncrona. A capacidade de corrente negativa de campo do excitador é uma característica que tem uma influência positiva nos limites para autoexcitação (CORTEZ, 2001).

Como no caso de estabilidade do ângulo do rotor, é útil classificar a estabilidade de tensão dentro das seguintes subcategorias (CORTEZ, 2001):

- Estabilidade de tensão em grandes distúrbios: refere-se à capacidade do sistema de manter tensões estáveis após ocorrerem grandes distúrbios, tais como faltas no sistema, perda de geração ou contingências no circuito. Essa capacidade é determinada pelo sistema, pelas características da carga e pela interação entre controles e proteções discretos e contínuos. A determinação da estabilidade de tensão em grandes distúrbios requer o exame da resposta não linear do sistema de potência sobre um período suficiente para capturar o desempenho e as interações entre dispositivos, como motores, transformadores com mudança de *tap* em carga e limitadores de corrente de campo de geradores. O período de estudo de interesse pode estender de poucos segundos a dezenas de minutos.
- Estabilidade de tensão em pequenos distúrbios: refere-se à capacidade do sistema de manter tensões estáveis após ocorrerem pequenos distúrbios, como mudanças progressivas de carga no sistema. Esta forma de estabilidade é influenciada pelas características das cargas e pelos controles contínuos e discretos em determinado instante de tempo. Este conceito é útil para determinar, em qualquer instante, como as tensões do sistema responderão às pequenas mudanças no sistema. Com suposições apropriadas, as equações do sistema podem ser linearizadas para

análises, permitindo assim a computação de valiosas informações de sensibilidade, que são úteis na identificação de fatores que influenciam a estabilidade. Esta linearização, no entanto, não pode ser responsável por efeitos não-lineares, tais como controles de mudança de *tap* (zona morta, passos discretos do *tape* e atrasos de tempo). Portanto, a combinação de análises lineares e não-lineares é utilizada de forma complementar.

Como citado acima, o período de tempo de interesse do problema de estabilidade de tensão pode variar de poucos segundos a dezenas de minutos. Portanto, a estabilidade de tensão pode ser um fenômeno de curto ou de longo prazo, como identificado na Figura 2.1.

A estabilidade de tensão de curto prazo envolve dinâmicas de componentes de carga de ação rápida, como motores de indução, cargas controladas eletronicamente e conversores de HVDC. O período de estudo de interesse é na ordem de vários segundos e as análises exigem soluções de equações diferenciais apropriadas do sistema, o que é similar à análise da estabilidade do ângulo do rotor. A modelagem dinâmica de cargas é geralmente essencial e, em contraste à estabilidade do ângulo do rotor, curtos-circuitos próximos a cargas são importantes. É recomendado que o termo “estabilidade de tensão transitória” não seja usado (KUNDUR et al., 2004).

A estabilidade de tensão de longo prazo envolve equipamentos de ação lenta, como transformadores com mudança de *tap*, cargas controladas termostaticamente e limitadores de corrente do gerador. O período de estudo de interesse pode estender muitos minutos e simulações de longo prazo são exigidas para análises da performance dinâmica do sistema. A estabilidade é geralmente determinada pela interrupção do equipamento, em vez da severidade do distúrbio inicial. A instabilidade é devido à perda de equilíbrio a longo prazo quando, por exemplo, cargas tentam restaurar suas potências além da capacidade da rede de transmissão e da geração conectada. Além disso, a instabilidade pode ocorrer devido à um ponto operativo em estado estável pós-distúrbio, sendo instável para pequenos distúrbios, ou à falta de atração em direção ao equilíbrio estável pós-distúrbio quando, por exemplo, uma ação corretiva é aplicada muito tarde. (MACHOWSKI et al., 1997)

O distúrbio em estabilidade de longo prazo poderia ser também um acúmulo de carga sustentada, como o aumento de carga em horários de pico. Em muitos casos, análises estáticas podem ser usadas para estimar margens de estabilidade, identificando fatores que influenciam a estabilidade, exibir além de uma ampla gama de condições do sistema e um grande número de cenários, onde o tempo das ações de controle é importante. Isto deveria ser complementado por simulações no domínio do tempo quase estável (KUNDUR et al., 2004).

É importante reconhecer que a diferença entre a estabilidade do ângulo do rotor e a estabilidade de tensão não se baseia no acoplamento fraco entre as variações potência ativa/ângulo e potência reativa/magnitude de tensão. De fato, o acoplamento é forte para condições de estresse e ambas estabilidades são afetadas pela potência ativa pré-distúrbio, assim como pelo fluxo de potência reativa. Em vez disso, a diferença é baseada no conjunto específico de forças opostas que desequilíbrios sustentados experimentam e na principal variável do sistema em que a consequente instabilidade é aparente (CORTEZ, 2001).

### 2.2.2.3 Estabilidade de frequência

A estabilidade de frequência refere-se à capacidade de um sistema de potência em manter a frequência estável após uma grave perturbação do sistema, resultando em um significativo desequilíbrio entre geração e carga (KUNDUR et al., 2004).

Geralmente, problemas de estabilidade de frequência são associados à respostas insuficientes de equipamentos, má coordenação de controle e proteção de equipamentos, ou reserva de geração insuficiente (MACHOWSKI et al., 1997).

Durante as excursões de frequência, os tempos característicos dos processos e dispositivos que são ativados variam de frações de segundos, correspondendo à resposta de dispositivos como proteção e controle de geradores, a vários minutos, referentes à resposta de dispositivos como sistemas de fornecimento de energia de motor primário e reguladores de tensão de carga. Portanto, como identificado na Figura 2.1, a estabilidade de frequência pode ser um fenômeno de curto ou longo prazo (KUNDUR et al., 2004).

Em qualquer situação dada, qualquer forma de instabilidade pode não ocorrer na sua forma pura. Isto é particularmente verdadeiro em sistemas altamente estressados e para eventos em cascata. Como os sistemas falham, uma forma de instabilidade pode, em última instância, levar a outra forma. No entanto, a distinção entre diferentes formas é importante para a compreensão das causas subjacentes do problema, a fim de desenvolver procedimentos adequados e procedimentos operacionais. (MACHOWSKI et al., 1997).

Enquanto a classificação da estabilidade do sistema de potência é um meio eficaz e conveniente para lidar com as complexidades do problema, a estabilidade geral do sistema deve sempre ser mantida em mente. Soluções para problemas de estabilidade de uma categoria não devem estar nos custos de outra. É essencial olhar para todos os aspectos do

fenômeno da estabilidade e em cada aspecto, ter mais que um ponto de vista. Isso requer o desenvolvimento e o uso racional de diferentes tipos de ferramentas analíticas. Neste aspecto, algum grau de sobreposição no fenômeno sendo analisado é de fato desejável.

### **2.2.3 Revisão histórica das questões de estabilidade**

A estabilidade de sistemas de potência é um assunto complexo que tem desafiado engenheiros de sistemas de potência há muitos anos. Como os SEPs evoluíram ao longo do último século, diferentes formas de instabilidade emergiram como sendo importantes durante diferentes períodos. Assim sendo, uma revisão histórica do assunto é útil para um melhor entendimento dos problemas de estabilidade atuais.

A estabilidade de sistemas de potência foi reconhecida como um importante problema em 1920. Resultados do primeiro teste em laboratório em sistemas em miniatura foram relatados em 1924 e o primeiro teste em campo de estabilidade em um sistema de potência prático foi conduzido em 1925 (KUNDUR, 1994).

Problemas iniciais de estabilidade foram associados à estações de geração hidrelétrica remotas que alimentavam centros de carga metropolitanas por meio de longas linhas de transmissão. Em alguns casos, a instabilidade ocorreu durante a operação em estado estacionário, mais frequentemente seguindo curtos-circuitos e outros distúrbios no sistema. O problema de estabilidade foi amplamente influenciado pela força do sistema de transmissão, com a instabilidade sendo o resultado do torque sincronizante insuficiente. Os tempos de eliminação de falhas eram lentos, sendo na ordem de 0.5 a 2.0 segundos, ou até maiores (KUNDUR, 1994).

Os métodos e os modelos utilizados nas análises de estabilidade eram ditados pelo desenvolvimento atual da arte da computação e da teoria da estabilidade de sistemas dinâmicos. Como métodos de cálculos, eram utilizadas régua de cálculos e calculadoras mecânicas, o que, conseqüentemente, levavam os modelos e métodos de análises a serem bastante simples. Além disso, técnicas gráficas eram desenvolvidas, tais como o critério da área igual e diagramas de círculo, as quais foram adequadas para a análise de sistemas simples que podiam ser tratados efetivamente como sistemas de duas máquinas. Estado estacionário e estabilidade transitória eram tratados separadamente.

Para serem economicamente atrativos, sistemas de potência envolvidos e interconectados entre sistemas independentes foram encontrados. Com isso, a complexidade dos problemas de estabilidade aumentou e os sistemas já não podiam ser tratados como sistemas de duas máquinas. Um passo significativo em direção à melhoria do cálculo da estabilidade foi o desenvolvimento, em 1930, do analisador de rede, ou quadro de cálculos CA (KUNDUR, 1994). Este desenvolvimento permitiu análises de fluxos de potência em sistemas multimáquinas, mas a equação do balanço, ou equação *swing*, ainda tinha que ser resolvida à mão usando iterações numéricas passo a passo.

O trabalho teórico realizado na década de 1920 e no começo da década de 1930 construíram as bases para o entendimento básico do fenômeno de estabilidade em sistemas de potência da indústria. O principal desenvolvimento e conhecimento da estabilidade de sistemas de potência neste período aconteceu como resultado do estudo de linhas de transmissão longas, em vez de uma extensão da teoria da máquina síncrona, ou seja, a ênfase era na rede. Esta foi uma necessidade prática, já que as ferramentas computacionais disponíveis durante este período eram adequadas para a solução de equações algébricas, mas não equações diferenciais.

Melhorias na estabilidade de sistemas surgiram por meio da eliminação rápida de faltas e da ação contínua de reguladores de tensão sem zona morta. Os benefícios de um sistema com um alto grau de resposta para a estabilidade em estado estacionário foram, de fato, reconhecidos no começo da década de 1920 (KUNDUR, 1994).

Com o aumento da realização dos potenciais benefícios dos sistemas de excitação de resposta rápida e do aumento dos limites de transferência de potência em estado estacionário, o uso destes benefícios se tornou mais comum. Contudo, a utilização de excitadores de alta resposta resultou na diminuição do amortecimento das oscilações de potência em alguns casos. Assim, a instabilidade oscilatória tornou-se um motivo de preocupação, enquanto que a instabilidade monotônica de estado estacionário era virtualmente eliminada: a ênfase dos estudos de estabilidade migrou de problemas relacionados à rede de transmissão para problemas na geração, especificamente em máquinas síncronas e seus sistemas de excitação e regulação de velocidade.

Essas tendências exigiram melhores ferramentas de análise. Máquinas síncronas e representação de sistemas de excitação necessitavam ser mais detalhados e simulações tinham de ser realizadas em períodos de tempos mais longos.

Com o desenvolvimento de computadores eletrônicos analógicos e de computadores digitais na década de 1950, juntamente com a utilização de programas de computadores, foi possível realizar análises que exigiam modelos detalhados de máquinas síncronas e de sistemas de excitação e de regulação de velocidade. Foi percebido, então, que estes programas poderiam melhorar os métodos dos analisadores de redes já utilizados, tanto no tamanho da rede simulada, quanto na modelagem das características dinâmicas dos equipamentos. Assim, eles proporcionaram meios ideais para o estudo dos problemas de estabilidade associados ao crescimento das interconexões entre sistemas de potência, que antes eram tratados separadamente.

Na década de 1960, a maioria dos sistemas de potência dos Estados Unidos e do Canadá foram unidos como parte de um dos dois grandes sistemas interconectados: um no Leste e outro no Oeste. Em 1967, laços HVDC de baixa capacidade foram estabelecidos também entre os sistemas Leste e Oeste. Atualmente, os sistemas de potência nos Estados Unidos e Canadá formam virtualmente um grande sistema, assim como houve tendências semelhantes no crescimento das interconexões de sistemas em outros países.

Enquanto que interconexões resultam em economias de operação e aumentam a confiança através de assistência mútua, elas também contribuem para aumentar a complexidade dos problemas de estabilidade e aumentam as consequências da instabilidade. O apagão de 9 de novembro de 1965 que atingiu o Canadá e os Estados Unidos, provocou uma eliminação de faltas em cascata e chamou a atenção do público e das agências de regulação para o problema de estabilidade e para a importância da confiabilidade do sistema de potência (KUNDUR, 1994; CSANYI, 2010).

Muito do esforço e interesse da indústria relacionada à estabilidade do sistema, desde a década de 1960, se concentrou na estabilidade transitória, em que sistemas de potência foram projetados e operados para os critérios relativos a este tipo de estabilidade. Programas poderosos que permitiram a representação de sistemas muito grandes e modelos de equipamentos detalhados foram desenvolvidos devido aos avanços em métodos numéricos e na tecnologia de computadores digitais. Avanços na modelagem e testes de equipamentos, como máquinas síncronas, sistemas de excitação e carga, além do uso da eliminação de faltas em alta velocidade, excitadores de alta resposta inicial e equipamentos auxiliares para estabilidade, como capacitores, resultaram em significativa melhoria na performance da estabilidade transitória de sistemas de potência.

No entanto, acompanhando os avanços acima, os sistemas de potência apresentaram instabilidade oscilatória. Ainda que os excitadores de resposta superior melhorem a estabilidade transitória eles afetam adversamente a estabilidade oscilatória de pequenos sinais devido à introdução de amortecimento negativo. Os efeitos dos excitadores rápidos são compostos pela diminuição da força de sistemas de transmissão relativa ao tamanho da estação de geração. Tais problemas devem ser resolvidos através do uso de estabilizadores de sistemas de potência.

Outra fonte de problema de instabilidade oscilatória foi, como uma consequência do crescimento em interconexões entre sistemas de potência, a formação de grandes grupos de máquinas conectadas por elos fracos. Com a transferência pesada de energia, tais sistemas exibem modos de oscilação entre áreas de baixa frequência. Em muitas situações, a estabilidade destes modos tornou-se uma fonte de preocupação.

Atualmente, os sistemas de potência estão sendo operados sobre condições de estresse crescente devido à tendência de aproveitar ao máximo as instalações existentes. O aumento da competição, o acesso aberto à transmissão e as restrições ambientais e de construção estão moldando a operação de sistemas elétricos de potência para um novo modelo, o qual apresenta maiores desafios à segurança da operação do sistema. Isso se torna bastante claro ao notar o crescente número de apagões em sistemas elétricos que ocorreram nos últimos anos, como, por exemplo: o apagão no Brasil em 11 de março de 1999; o apagão que atingiu Canadá e Estados Unidos em 14 de agosto de 2003; o apagão em 23 de setembro de 2003, no Sudão do Sul e na Dinamarca Oriental; e o apagão na Itália em 28 de setembro de 2003 (CSANYI, 2010).

Uma vez associada principalmente aos sistemas fracos, os problemas de estabilidade de tensão são agora uma fonte de preocupação em redes altamente desenvolvidas e maduras, como resultado de cargas mais pesadas e transferências de energia em longas distâncias. Consequentemente, a estabilidade de tensão é cada vez mais abordada no planejamento do sistema e nos estudos operacionais (CSANYI, 2010).

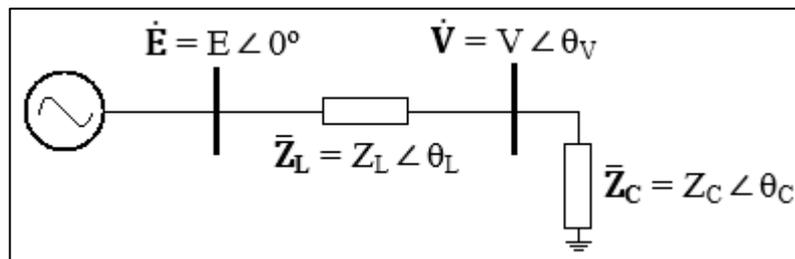
### **2.3 CURVA PV E MARGEM DE ESTABILIDADE DE TENSÃO**

As definições apresentadas neste capítulo até agora embasam vários critérios de estabilidade de sistemas de potência. Se tratando especificamente da estabilidade de tensão, que é o foco dos estudos deste trabalho, para que o sistema opere com tensões estáveis em seus barramentos, é necessário que se evite situações críticas, ou seja, as quais o sistema opere longe dos limites de estabilidade, evitando assim que ocorra a instabilidade de tensão.

Apesar da instabilidade de tensão ser dinâmica, estudos realizados com modelagem estática têm sido utilizados para sua análise. Para determinar o ponto crítico da estabilidade de tensão do sistema, considera-se o ponto de Máxima Transferência de Potência (MTP) para cargas do tipo potência constante. Uma vez determinado este ponto, é importante que o sistema opere o mais longe possível do mesmo. Curvas do tipo PV (potência ativa *versus* tensão) são muito utilizadas em estudos associados ao ponto de MTP, as quais facilitam a definição da Margem de Estabilidade de Tensão (MET), ambas tratadas nos itens a seguir.

### 2.3.1 Teorema da Máxima Transferência de Potência

Os estudos sobre o teorema da MTP trazem importantes conceitos que permitem compreender o fenômeno da instabilidade de tensão em sua forma simples. Sob o ponto de vista da análise estática, o teorema da MTP define um limite da rede em relação à potência entregue à carga, que tem sido considerado como o ponto crítico da estabilidade de tensão para cargas do tipo potência constante. Seu entendimento pode ser feito por meio de estudos básicos sobre o sistema de duas barras apresentado pela Figura 2.2, conforme registrado em (KUNDUR, 1994).



**Figura 2. 2: Sistema de duas barras.**

**Fonte: Adaptado de (KUNDUR, 1994).**

O sistema da Figura 2.2 é composto por uma fonte de tensão ideal  $\dot{E} = E \angle 0^\circ$  conectada ao barramento de geração, uma carga com impedância  $\bar{Z}_C = Z_C \angle \theta_C$  conectada ao

barramento de carga, com tensão  $\dot{V} = V\angle\theta_V$ , e uma linha de transmissão entre os dois barramentos com impedância  $\bar{Z}_L = Z_L\angle\theta_L$ .

A expressão da corrente  $\dot{I}$  que circula pelo sistema é dada por

$$\dot{i} = \frac{\dot{E}}{\bar{Z}_L + \bar{Z}_C} \quad (1)$$

A magnitude da corrente  $\dot{I}$  é

$$I = |\dot{i}| = \frac{\dot{E}}{|\bar{Z}_L + \bar{Z}_C|} \quad (2)$$

Como  $|\bar{Z}_L + \bar{Z}_C| = \sqrt{Z_L^2 + Z_C^2 + 2Z_L Z_C \cos(\theta_L - \theta_C)}$ , tem-se que:

$$I = \frac{\dot{E}}{\sqrt{Z_L^2 + Z_C^2 + 2Z_L Z_C \cos(\theta_L - \theta_C)}} \quad (3)$$

A corrente de curto-circuito do sistema é calculada por:

$$I_{CC} = \frac{\dot{E}}{Z_L} \quad (4)$$

Substituindo a equação (3) na equação (4), tem-se:

$$I = \frac{I_{CC}}{\sqrt{\left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)^2 + 2\frac{Z_C}{Z_L} \cos(\theta_L - \theta_C)}} \quad (5)$$

Assim, a potência fornecida à carga pode ser determinada por:

$$P_C = Z_C I^2 \cos \theta_C$$

$$P_C = \frac{I_{CC}^2 \cos \theta_C}{\frac{1}{Z_C} + \frac{Z_C}{Z_L^2} + \frac{2}{Z_L} \cos(\theta_L - \theta_C)} \quad (6)$$

Para determinar  $Z_C$  de modo que a potência entregue à carga seja máxima, é necessário derivar a equação (6) em relação a  $Z_C$  e, em seguida, igualar a expressão resultante à zero:

$$\frac{dP_C}{dZ_C} = -I_{CC}^2 \cos \theta_C \frac{\frac{Z_C^2}{Z_L^2} - 1}{Z_C + \frac{Z_C^3}{Z_L^2} + 2 \frac{Z_C^2}{Z_L} \cos(\theta_L - \theta_C)} \quad (7)$$

$$-I_{CC}^2 \cos \theta_C \frac{\frac{Z_C^2}{Z_L^2} - 1}{Z_C + \frac{Z_C^3}{Z_L^2} + 2 \frac{Z_C^2}{Z_L} \cos(\theta_L - \theta_C)} = 0$$

$$\frac{Z_C^2}{Z_L^2} - 1 = 0$$

$$Z_C = Z_L \quad (8)$$

Da equação (8), observa-se que a máxima potência entregue à carga, o ponto de MTP, ocorre quando a impedância da carga é igual à impedância da linha de transmissão. Para determinar a expressão da potência no ponto de MTP, usa-se a equação (6), substituindo  $I_{CC}$  pela equação (4) e fazendo  $Z_C = Z_L$ :

$$P_{\text{máx}} = \frac{E^2 \cos \theta_C}{2Z_L [1 + \cos(\theta_L - \theta_C)]} \quad (9)$$

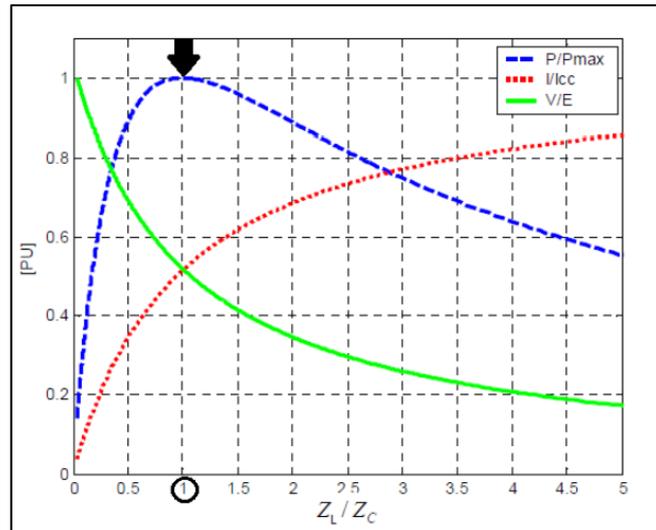
Outras relações importantes podem ser obtidas das seguintes expressões:

$$\frac{P_C}{P_{\text{máx}}} = \frac{2 \frac{Z_C}{Z_L} \cos(\theta_L - \theta_C)}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)^2 + 2 \frac{Z_C}{Z_L} \cos(\theta_L - \theta_C)}} \quad (10)$$

$$\frac{V}{E} = \frac{\frac{Z_C}{Z_L}}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)^2 + 2 \frac{Z_C}{Z_L} \cos(\theta_L - \theta_C)}} \quad (11)$$

$$\frac{I}{I_{CC}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)^2 + 2 \frac{Z_C}{Z_L} \cos(\theta_L - \theta_C)}} \quad (12)$$

A Figura 2. 3 ilustra o comportamento das grandezas definidas pelas equações (10), (11) e (12) em função do aumento da carga (diminuição de  $Z_C$ ) do sistema representado pela Figura 2.2, mantendo constante seu fator de potência.



**Figura 2. 3: Variação de grandezas elétricas como função de  $Z_L/Z_C$ .**

**Fonte: Figura extraída de (SILVA, 2010).**

Algumas observações importantes podem ser obtidas a partir da análise das curvas da Figura 2. 3, conforme disposto em (KUNDUR, 1994). Primeiramente, percebe-se que o valor máximo de potência ativa entregue à carga ocorre quando a razão  $Z_L/Z_C$  é igual a 1, ou seja, quando o módulo da impedância da carga é igual ao módulo da impedância da linha de transmissão ( $Z_L = Z_C$ ), o que confirma a equação (8).

Além disso, observa-se que, para cargas pequenas ( $Z_C \gg Z_L$ ), a corrente que circula no sistema é muito pequena e o módulo da tensão no barramento de carga é praticamente igual ao módulo da tensão no barramento de geração. Conforme a carga aumenta gradativamente, sua impedância diminui e a corrente aumenta, provocando a diminuição da tensão no barramento de carga. Apesar disso, a potência entregue à carga aumenta, visto que o crescimento da corrente se sobrepõe ao decaimento da tensão. Isso acontece até que  $Z_C = Z_L$ , em que, para valores maiores de  $Z_C$ , o decaimento da tensão se torna dominante sobre o aumento da corrente e a potência diminui gradativamente.

### 2.3.2 Curva do tipo PV

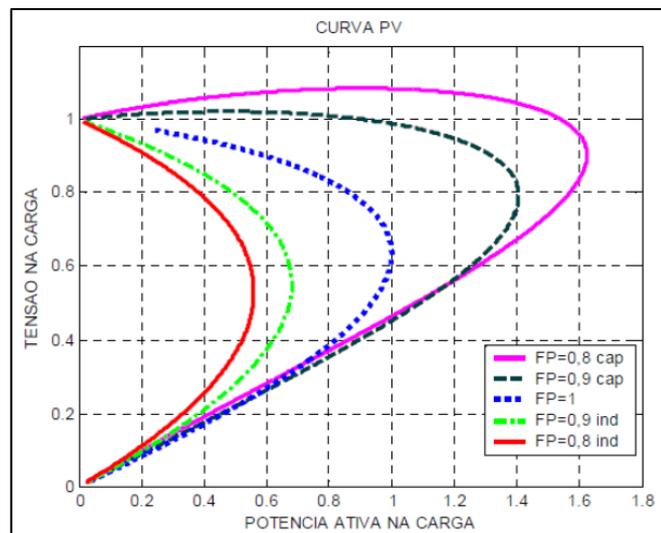
Em fenômenos de instabilidade de tensão em formas mais lentas, a análise é realizada frequentemente como um problema de estabilidade estática, em que simulações de fluxo de potência são métodos de estudos primários. Outras técnicas de análise baseadas em fluxos de potência são as curvas do tipo PV e QV (potência reativa *versus* tensão), as quais

determinam limites de carregamento para a operação do sistema em estado estável (TAYLOR, 1994).

A curva PV é uma importante ferramenta para a análise de estabilidade de tensão em estudos de sistemas radiais ou multiterminais, a qual relaciona a tensão em um determinado barramento com seu respectivo crescimento de carregamento. O uso dessa curva é um dos mais adotados em análises estáticas.

A obtenção da curva em determinado barramento do SEP é feita pelo aumento contínuo da carga neste barramento, mantendo seu fator de potência constante, e a tensão e a potência são monitoradas. Para cada aumento de carga, a partir do caso base, um problema de fluxo de potência é resolvido e os pontos de equilíbrio obtidos definem o traçado da curva. Assim, a partir do levantamento da curva PV, é possível realizar uma avaliação rápida e simples das condições críticas do sistema elétrico, permitindo a análise diversos cenários.

A Figura 2.4 mostra vários traçados de curvas do tipo PV, cada uma para um fator de potência diferente.



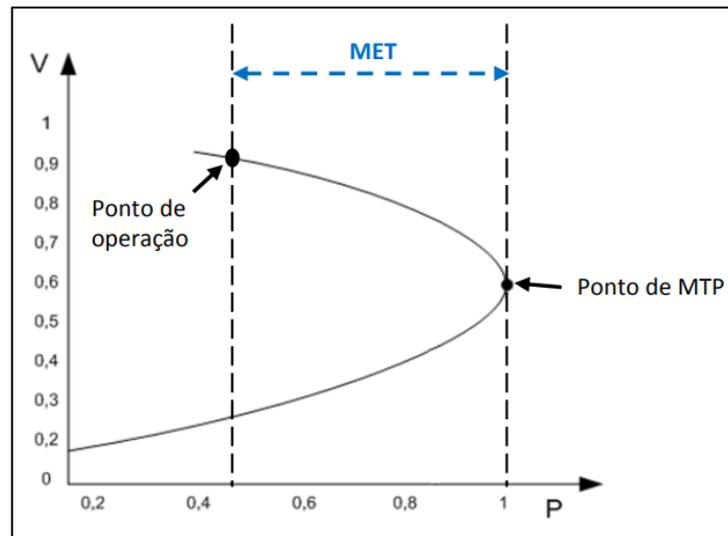
**Figura 2. 4: Curva PV para diferentes fatores de potência.**

**Fonte: Figura extraída de(SILVA, 2010).**

Da análise da Figura 2. 4 percebe-se que o fator de potência da carga tem forte influência sobre a curva PV. A partir do fator de potência unitário, à medida que a carga indutiva diminui seu fator de potência, menor é o valor máximo de potência ativa entregue à carga. Em contrapartida, à medida que a carga capacitiva diminui seu fator de potência, maior é o valor máximo de potência ativa entregue à carga. Outro ponto a ser comentado da figura é que, para cargas capacitivas, a tensão no barramento analisado aumenta inicialmente antes de

atingir o valor de MTP, o que pode se tornar um problema, visto que o valor crítico de estabilidade de tensão pode ser atingido para tensões próximas dos valores normais de operação.

A Figura 2.5 mostra uma curva PV genérica, na qual são destacados dois pontos: o ponto de MTP, que é o ponto considerado crítico para a estabilidade de tensão, e um ponto de operação atual do sistema.



**Figura 2. 5: Margem de Estabilidade de Tensão (MET).**

**Fonte: Figura extraída de (VILELA, 2014).**

A “distância” que o ponto de operação atual se encontra do ponto de MTP se refere à Margem de Estabilidade de Tensão do sistema. À medida que a MET diminui, o risco de instabilidade de tensão do sistema aumenta, visto que o ponto crítico de estabilidade, o ponto de MTP, se encontra mais próximo do ponto operativo atual.

A MET possui grande importância no planejamento e operação do SEP, conforme cita (VILELA, 2014). Na atividade de planejamento, a MET permite identificar com antecedência problemas que possam afetar a estabilidade de sistemas e, assim, adotar ações que possam minimizar seus impactos na operação futura do SEP. Já a atividade de operação, permite avaliar em tempo real se a operação do SEP se encontra longe do ponto crítico, o que favorece a adoção de ações de controle de teor preventivo.

A MET pode ser avaliada de dois modos: analisando-a para todo o sistema e para apenas algumas áreas selecionadas. Para o primeiro caso, a MET é obtida para todo o sistema, aumentando-se o carregamento de todos os barramentos de carga e ajustando-se a geração do sistema de modo a atender a sua nova demanda. No segundo caso, diferentes MET são obtidas

para cada área estudada do sistema, sendo que aumenta-se o carregamento de seus barramentos, mantendo-se a geração externa constante, que é suprido apenas pelos geradores pertencentes à área de estudo.

## 2.4 CAPACIDADE DE HOSPEDAGEM DE CAPACITORES SHUNT

Manter os sistemas elétricos operando dentro de seus limites é uma tarefa complexa, fato que justifica o grande interesse do setor elétrico no desenvolvimento de Estratégias de Controle (FERREIRA, 2013). Nesta perspectiva, existem algumas ações que podem ser empregadas:

- inserção de linha de transmissão paralela a uma existente;
- inclusão de compensação série capacitiva;
- corte de carga;
- inclusão de transformadores com troca de *tap*;
- inclusão de compensação *shunt* capacitiva.

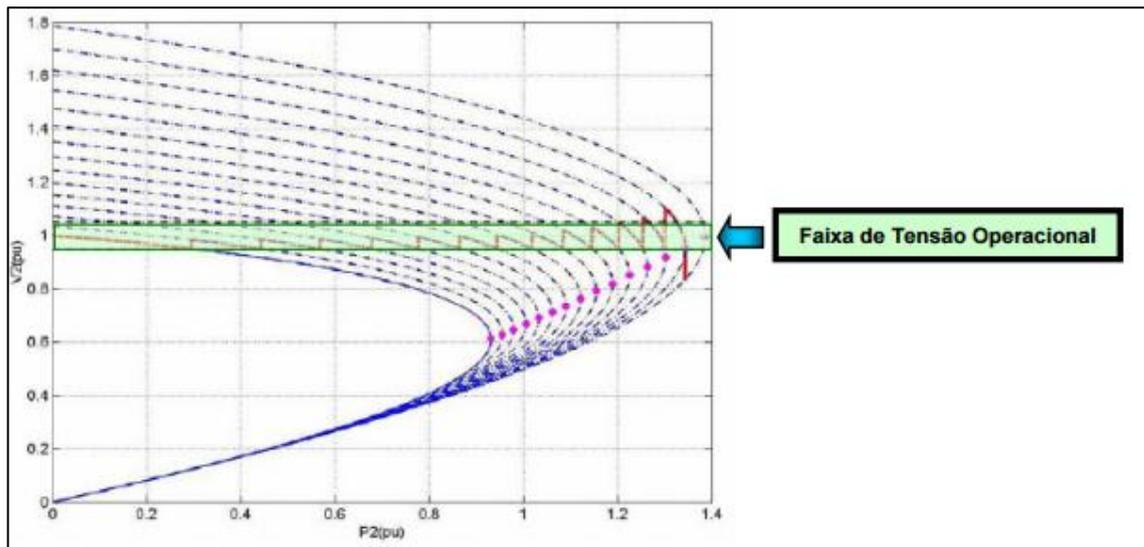
A compensação shunt capacitiva é muito empregada, pois apresenta um custo de aquisição inferior às demais alternativas, facilidade de especificação, baixo tempo de montagem, facilidade de manutenção e de reposição de unidades danificadas (CHAVES, 2007).

Um ponto importante que deve ser analisado é realizar esta compensação de forma adequada, pois um sistema de potência mal compensado em termos de bancos de capacitores shunt pode apresentar um baixo limite de carregamento e conseqüentemente levar o sistema a um ponto de operação instável. O limite máximo desta compensação pode ser definido como a capacidade de hospedagem de capacitores shunt (CARDOSO, 1999).

O empecilho desta estratégia de controle refere-se quanto à alocação dos capacitores, ou seja, em quais barras do sistema eles devem ser adicionados, a qual deve ser feita de forma otimizada. O valor e a alocação “ótima” dos componentes estão relacionados aos diversos objetivos e restrições impostas ao sistema elétrico (CHAVES, 2007). Seguindo esta vertente, o intuito deste Trabalho de Conclusão de Curso é obter o maior e melhor aproveitamento dos recursos do SEP, atendendo às condições de contorno impostas à rede e definir a melhor alocação dos capacitores shunt nos sistemas pelo uso dos algoritmos genéticos.

### 2.4.1 Influência da compensação reativa em estabilidade de tensão

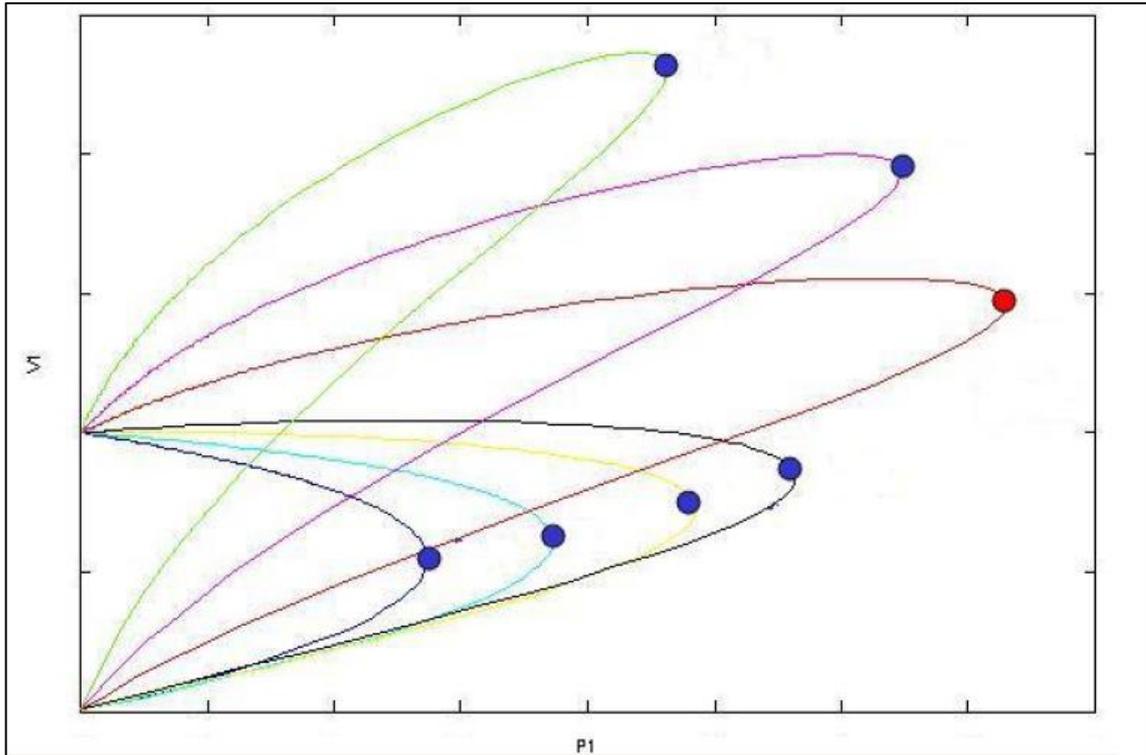
Para que a compensação reativa seja utilizada apropriadamente, é necessário compreender sua influência na estabilidade de tensão. A análise do problema causado pela sobrecompensação pode ser feita por meio da Figura 2.6, a qual exibe curvas PV de uma barra cuja carga é compensada através de capacitores *shunt* variável (JUNIOR, 2008).



**Figura 2. 6:** Curvas PVs - chaveamento de capacitores.  
**Fonte:** Figura extraída de (CHAVES, 2007)

A tentativa de se alimentar uma carga além do ponto de máximo carregamento acarreta o processo dinâmico da carga e conseqüentemente, do sistema elétrico, fato que leva a queda de tensão e desencadeia a perda de estabilidade do sistema. Portanto, para manter o sistema operando dentro dos limites permitidos, são inseridos os capacitores *shunt*. Com a introdução dos bancos, verifica-se um ganho no perfil de tensão da barra de carga e constata-se que o valor de máximo carregamento se eleva. A tensão das barras também se eleva, pois ela é proporcional à potência reativa inserida (CHAVES, 2007).

No entanto, como apresentado em (FERREIRA, 2013), existe um limite de capacidade de potência reativa que pode ser inserido, pois a partir de certo valor o ponto de máximo carregamento começa a diminuir, conforme indicado na Figura 2.7. Ou seja, mesmo havendo capacidade de suporte de potência reativa existe uma máxima potência ativa que pode chegar às barras de carga. Portanto, existe um limite de capacitância *shunt* que pode ser inserido com a finalidade de aumentar a margem de carregamento, este limite que pode ser dito como a capacidade de hospedagem de capacitor *shunt*.



**Figura 2. 7: Existência de uma potência máxima mesmo com capacidade infinita de suporte de potência reativa.**

Fonte: Figura extraída de (FERREIRA, 2013)

Sendo assim, um sistema de transmissão deve ser compensado de forma adequada, pois, caso contrário, pode ser utilizado abaixo de sua real magnitude, ou operar em um ponto próximo à instabilidade de tensão.

## 2.5 ALGORITMO GENÉTICO

### 2.5.1 Computação evolutiva

Para pesquisadores de computação evolutiva, os mecanismos de evolução parecem adequados para muitos dos problemas computacionais, os quais exigem a busca por uma grande quantidade de possibilidades de soluções. Esses problemas de busca geralmente podem se beneficiar de um uso efetivo do paralelismo, em que muitas possibilidades diferentes são exploradas simultaneamente de forma eficiente. É necessário, ainda, utilizar uma estratégia inteligente para escolher o próximo conjunto de sequências a serem avaliadas.

A evolução biológica é uma fonte atraente de inspiração para resolver tais problemas de busca. A evolução é, em efeito, um método de busca entre um enorme número de

possibilidades de "soluções". Na biologia, o enorme conjunto de possibilidades é o conjunto de possíveis sequências genéticas, e as "soluções" desejadas são altamente adequadas e capazes de sobreviver e reproduzir em seus ambientes. A evolução biológica também pode ser vista como um método para projetar soluções inovadoras para problemas complexos, o que a leva a inspirar métodos de pesquisa computacional.

A aptidão biológica de um organismo depende de muitos fatores por exemplo: quão bem ele pode enfrentar as características físicas de seu ambiente e quão bem ele pode competir ou cooperar com os outros organismos em torno dele. Os critérios de aptidão mudam continuamente à medida que as criaturas evoluem, então a evolução procura um conjunto de possibilidades em constante mudança. A busca de soluções diante das condições de mudança é o necessário para programas de computador adaptáveis. Além disso, a evolução é um método de busca massivamente paralelo: ao invés de trabalhar em uma espécie por vez, testes de evolução e mudanças em milhões de espécies ocorrem paralelamente (COLEY, 1991).

Finalmente, visto de um nível elevado, as "regras" da evolução são notavelmente simples: as espécies evoluem por meio de variação aleatória (via mutação, recombinação e outros operadores), seguido de seleção natural, em que os mais aptos tendem a sobreviver e reproduzir, propagando assim seu material genético para as gerações futuras. No entanto, essas regras simples são consideradas responsáveis, em grande parte, pela extraordinária variedade e complexidade que vemos na biosfera (MITCHEL, 1999).

Dentre os sistemas que utilizam como base teórica a evolução natural, estão os algoritmos genéticos, que são algoritmos de otimização numérica inspirados tanto na seleção quanto na genética natural. Foram inventados por John Holland, na década de 1960, e desenvolvidos junto com seus alunos e colegas da Universidade de Michigan (HOLLAND, 1975).

O objetivo de Holland diferia das estratégias evolutivas e da programação evolutiva que outros pesquisadores utilizavam, pois o intuito dele não era projetar algoritmos para resolver problemas específicos, mas sim estudar formalmente o fenômeno da adaptação, tal como ocorre na natureza, para desenvolver maneiras pelas quais os mecanismos de adaptação natural possam ser importados para sistemas computacionais. Holland fornece um quadro teórico para a adaptação dos AGs em seu livro "*Adaptation in Natural and Artificial Systems*", no qual trata o algoritmo genético como uma abstração da evolução biológica.

Em geral, o método dos AGs pode ser aplicado a uma ampla gama de problemas. Ao contrário de algumas abordagens, suas promessas raramente foram superadas e elas estão sendo usadas para ajudar a resolver problemas práticos diariamente. Os algoritmos normalmente são de simples entendimento e de fácil implementação.

### 2.5.2 Terminologia biológica

Nesse ponto, é útil introduzir formalmente uma parte da terminologia biológica que será utilizada ao longo do documento. No contexto de algoritmos genéticos, esses termos biológicos são utilizados como analogia à biologia real, embora as entidades a que se referem sejam muito mais simples do que as biológicas reais.

Todos os organismos vivos são constituídos de células, e cada célula contém o mesmo conjunto de um ou mais cromossomos (sequências de DNA - ácido desoxirribonucleico) que servem de "modelo" para o organismo. Um cromossomo pode ser dividido conceitualmente em genes, no qual são ditos como minúsculas estruturas, em que estão presentes todas as informações genéticas do ser humano. Em termos grosseiros, pode-se pensar em um gene que codifica uma característica, como a cor dos olhos. As diferentes "configurações" possíveis para uma característica (por exemplo, azul, marrom, verde, etc..) são chamadas de alelos, e cada gene está localizado em uma posição particular no cromossomo, que é chamada de Locus (MITCHELL, 1999).

Muitos organismos têm múltiplos cromossomos em cada célula. A coleção completa de material genético (todos os cromossomos juntos) é chamada de genoma do organismo. Dois indivíduos que têm genomas idênticos possuem o mesmo genótipo. O genótipo dá origem, no desenvolvimento fetal e posterior, ao fenótipo do organismo (características físicas e mentais, como a cor dos olhos, a altura, o tamanho do cérebro e a inteligência). (MITCHELL, 1999).

Na reprodução das espécies, ocorre uma recombinação (ou *crossover*), na qual os genes de indivíduos pais são combinados para formar um indivíduo filho. Os descendentes estão sujeitos à mutação, em que os nucleotídeos (fragmentos elementares de DNA) são alterados de pai para prole. A aptidão de um organismo é tipicamente definida como a probabilidade de o organismo em se manter vivo ou de realizar a reprodução (MITCHELL, 1999).

Em algoritmos genéticos, o termo cromossomo normalmente se refere à uma solução candidata, muitas vezes codificado como um *bit string*. Os "genes" são *bits* isolados que codificam a solução candidata. Um alelo em um *bit string* é 0 ou 1, no entanto para maiores alfabetos, mais alelos são possíveis em cada locus. O *crossover* geralmente consiste em trocar material genético entre dois pais. A mutação consiste em inverter o *bit* em um locus escolhido aleatoriamente (ou, para alfabetos maiores, substituindo um símbolo em um novo escolhido aleatoriamente) (LINDEN, 2008).

O genótipo de um indivíduo em um AG usando uma sequência de *bit* é simplesmente a configuração do cromossomo desse indivíduo. Muitas vezes, não há noção de "fenótipo" no contexto de AG. Um resumo entre as analogias dos conceitos biológicos e os algoritmos genéticos é apresentado na Tabela 2.1.

**Tabela 2. 1: Analogia entre a genética e o algoritmo genético.**

ANALOGIA ENTRE BIOLOGIA E ALGORITMO GENÉTICO	
BIOLOGIA	ALGORITMO GENÉTICO
Cromossomo ou Genótipo	Estrutura da solução candidata ( <i>string</i> ), indivíduo ou um vetor
Gene	Característica do problema
Locus	Uma posição particular da sequência da estrutura da solução, vetor
Alelo	O valor que o genes receberá (0 ou 1 para binário)

### 2.5.3 Elementos do algoritmo genético

Não existe uma definição genética aceita por todos na comunidade de computação evolutiva que diferencia AGs de outros métodos de computação evolutiva. No entanto, pode-se dizer que a maioria dos métodos chamados "AGs" têm pelo menos os seguintes elementos em comum: populações de cromossomos, seleção, *crossover* para produzir novos descendentes e mutação de novos descendentes (COLEY, 1991).

Os cromossomos em uma população dos AG, geralmente assumem a forma de uma sequência de *bits*. Todos os locus no cromossomo possuem dois alelos possíveis: 0 e 1. Cada

cromossomo pode ser considerado como um ponto no espaço de busca de soluções candidatas. O AG processa as populações de cromossomos, substituindo sucessivamente uma dessas populações por outra. O AG geralmente requer uma função de aptidão ou avaliação que atribua uma pontuação (aptidão física) a cada cromossomo na população atual. A aptidão de um cromossomo depende de quão bem esse cromossomo resolve o problema em questão (GOLDBERG, 1989).

Um algoritmo típico pode consistir nos itens abaixo, e ser resumido pelo fluxograma ilustrado na Figura 2.8:

1. Um número, ou população, de suposições da solução para o problema;
2. Uma maneira de calcular quão boa ou ruim são as soluções individuais dentro da população são;
3. Um método para misturar fragmentos das melhores soluções para formar soluções ainda melhores; e
4. Um operador de mutação para evitar a perda permanente de diversidade dentro das soluções.

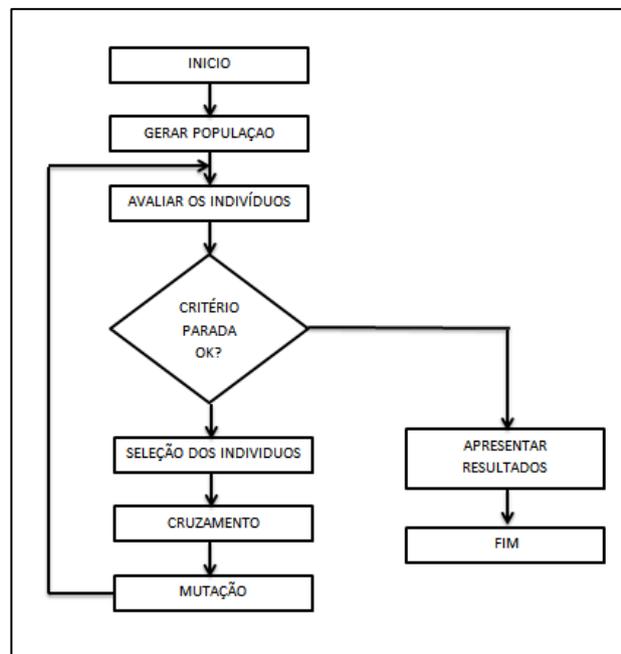


Figura 2. 8: Algoritmo genético básico.

#### 2.5.4 Representação e geração da população

O ponto de partida de um AG aplicado na resolução de problemas é a representação genética das possíveis soluções do espaço de busca de um problema, que possam ser analisados por computadores. Uma das principais formas é representar um indivíduo ou cromossomo como uma sequência binária. Esta representação é bastante utilizada devido a sua facilidade de manipulação, entretanto a escolha da representação do cromossomo depende do tipo de problema e do que, essencialmente, se deseja manipular geneticamente. Outros tipos podem ser encontrados em (HOLLAND, 1975).

O primeiro passo de um AG consiste em gerar uma população inicial composta por soluções aleatórias do problema a ser otimizado. Na maioria dos trabalhos feitos na área, a geração da população inicial é feita da forma mais simples possível, fazendo-se uma escolha aleatória independente para cada indivíduo da população inicial.

### **2.5.5 Função avaliação de aptidão**

A função de avaliação de aptidão, também referida como função de desempenho ou *fitness* é a maneira utilizada pelos AGs para determinar a qualidade de um indivíduo como solução do problema em questão (LOPES et al., 2013).

Esta função calcula o quão bom os parâmetros representados no cromossomo resolvem o problema. Isto é, a partir dos valores armazenados no cromossomo ela retorna um valor numérico, cujo significado é uma métrica da qualidade da solução obtida usando aqueles parâmetros. Como os AGs são técnicas de otimização, estejam elas buscando um máximo ou mínimo, a função de avaliação deve ser tal que se o cromossomo 1 representa uma solução melhor do que o cromossomo 2, então a avaliação de 1 deve ser melhor do que a de 2 (COLEY, 1991).

Portanto a escolha da função de avaliação deve ser realizada de forma minuciosa, além disso deve embutir todo o conhecimento que se possui sobre o problema a ser resolvido. Pois, a métrica resultante desta função será usada para a escolha dos indivíduos pelo módulo de seleção dos pais.

### **2.5.6 Operador seleção**

A seleção dos indivíduos que irão definir a próxima geração se baseia em um processo probabilístico, onde cada indivíduo tem uma probabilidade de ser escolhido de acordo com o valor de seu desempenho obtido pela função avaliação. Os principais métodos encontrados na literatura são: método da roleta, no qual a probabilidade de seleção é proporcional ao desempenho de um indivíduo; método do torneio, no qual sorteiam-se dois ou mais indivíduos, selecionando dentre eles o de maior desempenho; e os métodos *deterministic sampling*, *stochastic remainder sampling* e *stochastic universal sampling* que introduzem uma característica mais aleatória no processo (LINDEN, 08).

O método da roleta, o qual é utilizado na metodologia adotada neste trabalho, é descrito a seguir.

#### 2.5.6.1 Seleção por roleta

Neste método a probabilidade de seleção é proporcional ao desempenho dos indivíduos, ou seja, cada indivíduo tem seu valor de desempenho representado proporcionalmente em relação ao valor total das aptidões na população. Deste modo os indivíduos de melhor desempenho terão uma porção maior da roleta (PEREIRA, 2017).

A analogia com uma roleta surge porque, se pode imaginar toda a população formando uma roda, onde cada indivíduo representa uma parcela proporcional à sua aptidão física. A roleta é então girada e uma "bola" figurativa é “lançada”. A probabilidade de a bola parar em determinado lugar é proporcional ao tamanho ou a porcentagem que cada parcela ocupa na roda (LINDEN, 2008).

Um exemplo de aplicação do método da roleta está ilustrado na Figura 2.9, na qual estão representadas as probabilidades de seleção de 5 indivíduos com base no desempenho dos mesmos. Observando a Figura 2.9 pode-se dizer que o indivíduo três tenderá a ser selecionados mais vezes que os demais, por possuir uma porção maior da roleta.

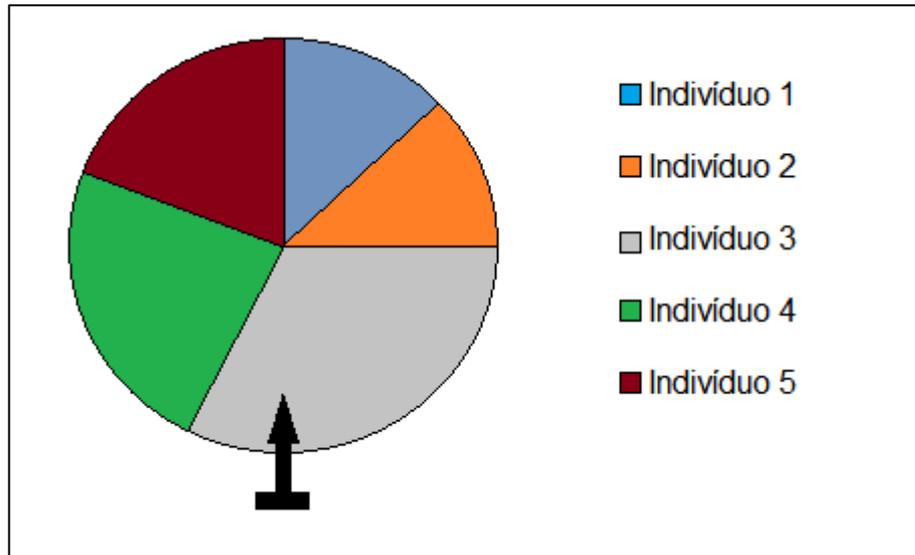


Figura 2. 9: Simulação de seleção por roleta.

### 2.5.7 Operador cruzamento

Este operador também chamado de *crossover*, simula, em alto nível de abstração, o processo natural de reprodução entre indivíduos. O intuito é extrair, de diferentes indivíduos selecionados, os genes e recombiná-los para formar novos indivíduos com outras características.

Depois de selecionados dois pais pelo método de seleção um ponto de corte é selecionado, e então é definido em qual locus os cromossomos dos pais serão divididos. A partir das partes dos cromossomos divididos realiza uma recombinação entre os dois pais, criando então novos indivíduos, que misturam as características dos indivíduos pais (VEGGI, 2014).

A Figura 2.10 representa o cruzamento em um ponto, determinado de forma aleatória, a partir do qual as informações do código genético dos pais serão trocadas. Logo, os filhos serão gerados de acordo com as informações anteriores a este ponto de um dos pais, e completados com as informações posteriores a este ponto do outro pai.

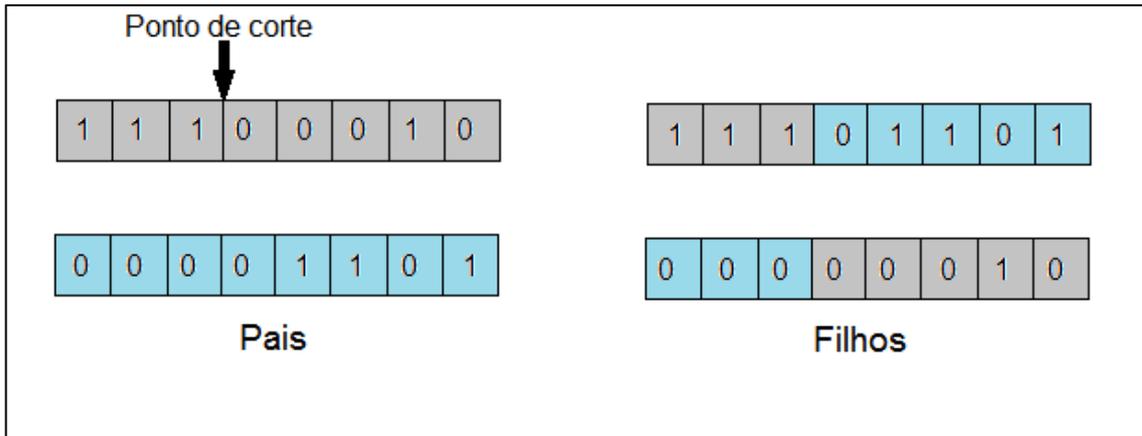


Figura 2. 10: Cruzamento em um ponto.

### 2.5.8 Operador de mutação

Este operador simula o fenômeno natural da mutação genética de indivíduos, no qual modifica aleatoriamente alguma característica do indivíduo sobre o qual é aplicada, por meio da troca de algum alelo. Esta troca é importante, pois acaba por criar novos valores de características que não existiam, ou apareciam em pequena quantidade, na população em análise. O operador de mutação é necessário para a introdução e manutenção da diversidade genética da população. Desta forma, a mutação assegura que a probabilidade de se chegar a qualquer ponto do espaço de busca não seja zero (VEGGI, 2014).

O operador de mutação é aplicado aos indivíduos através de uma taxa de mutação, esta taxa determina se os genes dos indivíduos sofrerão mutação ou não. Na metodologia adotada neste trabalho, o operador de mutação é aplicado em todos os indivíduos criados pelo operador de cruzamento. Existem, entretanto, várias maneiras de incorporar mutações em indivíduos de uma população, as quais dependem do tipo de codificação das variáveis dos indivíduos (LOPES et al., 2013).

### 2.5.9 Módulo de população

O módulo de população é responsável pelo controle do tamanho da população. A população pode manter seu tamanho constante ou ir alterando conforme novas gerações são incluídas.

O módulo de população constante traduz uma população real inserida em um ambiente de recursos limitados (água, comida, etc...), onde não é permitido um crescimento sem controle da população, fazendo com que os próprios organismos tendem a limitar o tamanho da população, seja tendo menos filhos, devorando-os ou de qualquer maneira que a natureza considerar adequada (LINDEN, 2008).

Nesta monografia o tamanho da população se manteve constante, pois considera-se que o AG opera em um ambiente de recursos limitados e os computadores tem uma quantidade limitada de memória e ciclos de processador.

#### **2.5.10 Convergência do algoritmo**

O algoritmo genético finaliza a sua programação e determina uma solução para o problema, quando os critérios de parada, definidos pelo programador, forem satisfeitos. Na maioria dos casos não se pode afirmar com certeza se a solução do problema trata-se de um ótimo global ou local (GODOI, 2009).

Assim, existem vários critérios de parada que podem ser implementados, como os listadas abaixo:

- Número máximo de gerações;
- Tempo de execução do algoritmo;
- A configuração encontrada não melhora durante um número específico de gerações;
- Uma função ou variável que determina quão boa possa ser uma solução.

#### **2.5.11 Aplicações dos algoritmos genéticos**

Os AGs se mostraram capazes de resolver muitos problemas complexos, onde outros métodos experimentam dificuldades. Como exemplos, tem-se os problemas de otimização combinatória em larga escala e estimativas de parâmetros de valor real, em espaços de pesquisa complexos, criados com ótimos locais. É essa capacidade de abordar espaços de pesquisa com vários ótimos locais uma das principais razões para um número crescente de cientistas e engenheiros usarem esses algoritmos.

## CAPITULO 3 – METODOLOGIA

### 3.1 INTRODUÇÃO

Basicamente a metodologia proposta neste trabalho determina a localização e a capacidade de capacitores a serem instalados nos barramentos do sistema elétrico de potência. Os sistemas simulados na plataforma MATLAB R2014a foram os de 14, 30 e 57 do sistema IEEE.

### 3.2 REPRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

Uma das primeiras considerações a ser tomada é a representação do problema. Isto é, como se traduzirá o problema para uma forma com a qual o algoritmo genético possa trabalhar. Neste trabalho, o problema consiste na decisão da inserção ou não de capacitores *shunt* nos barramentos do sistema de transmissão.

Esta decisão é similar ao funcionamento de uma chave lógica, ou seja: chave=0, capacitor não inserido; chave=1, capacitor inserido. Logo, é possível observar que a modelagem para a representação do chaveamento dos bancos é dada por uma função degrau unitário, uma vez que esta pode assumir apenas dois valores distintos ( 0 ou 1). Portanto, os alelos do algoritmo genético proposto podem assumir apenas estes dois valores.

Para completar a representação do AG é necessário determinar como o problema pode ser simplificado em um cromossomo. Portanto, sabendo que a inserção de capacitores *shunt* ocorre apenas em barramentos de cargas, ou em barras PQ, os loci de cada cromossomo podem ser representados por estas barras.

Considerar que trabalhar com todas as barras de cargas em sistemas com muitos barramentos pode inviabilizar o uso do algoritmo genético, pois os cromossomos podem assumir vários loci, ou seja, assumir um tamanho considerável, o que exigirá um alto processamento e memória computacional. Portanto, para tornar o AG o mais eficiente possível foi determinada uma área crítica, que abrange um número menor de barramentos.

Para traçar a área crítica dos sistemas foi necessário determinar a barra crítica dos sistemas, ou seja, a barra que apresenta maior variação de tensão quando um parâmetro é

alterado no sistema. Ao identificar a barra crítica é possível indicar suas barras vizinhas, e consequentemente, determinar áreas de vulnerabilidade de tensão do sistema. Portanto, a área crítica de um sistema é composta pelo barramento crítico e os seus vizinhos e caracteriza-se por ser uma área que pode levar o sistema ao colapso de tensão.

Existem alguns métodos para a identificação da barra crítica. O mais utilizado é o vetor tangente. As referências (SOUZA e BRITO, 1996; SOUZA, 1996) apresentam o uso deste método, onde a barra associada à maior entrada nesse vetor é identificada como a barra crítica do sistema. Em (PAIVA, 2007) são definidas por este método as barras críticas dos sistemas testes utilizados neste trabalho.

Determinada a representação do problema de forma genética é necessário identificar como os indivíduos serão avaliados, ou seja, determinar uma métrica para qualificar os indivíduos como soluções boas ou ruins.

### 3.3 FUNÇÃO DE AVALIAÇÃO

Esta função faz uma comparação entre os indivíduos de uma população. Ou seja, o valor da função é utilizado como medida da qualidade de cada indivíduo, para que tenha mais ou menos chances de ser selecionado para reprodução.

Como o intuito deste Trabalho de Conclusão de Curso é avaliar a capacidade de hospedagem de capacitores *shunt*, ou seja, determinar a melhor alocação de capacitores de modo a garantir o maior carregamento possível, e, sabendo-se que o chaveamento de capacitores é utilizado para a compensação de potência reativa, a qual contribui para a minimização das perdas de potência e melhoria do perfil de tensão dentro de limites aceitáveis, os parâmetros que devem ser analisados para que os indivíduos sejam avaliados são as variações de tensões e potência nos barramentos. O método aplicado nesta monografia para determinar estas variáveis foi a margem de carga da curva PV, sendo ela a responsável por quantificar o desempenho das possíveis soluções. Portanto traça-se uma curva PV e determina a margem de carga para cada possível solução do problema.

Foi realizada uma análise dos sistemas elétricos de potência sem a alocação de capacitores *shunt*, ou seja, traçou-se a curva PV dos sistemas. Este procedimento foi realizado para verificar o estado atual dos sistemas, para que as variáveis obtidas pudessem ser comparadas com as variáveis dos sistemas quando submetidas à alocação de capacitores.

Permitindo assim verificar quanto a margem de carga do sistema aumentaria. Na subseção seguinte é apresentado como estas curvas são traçadas.

### **3.3.1 Curva PV**

O método empregado para obter curvas PV's se dá por sucessivas soluções de fluxo de potência de forma genérica, ou seja, válida para qualquer sistema elétrico. Conforme se incrementa o carregamento do sistema elétrico avaliado em uma direção pré-estabelecida, obtém-se a tensão em cada um dos barramentos do sistema.

A rotina de programação para criar as curvas PV's foi baseada em um programa para solução de fluxo de potência por meio do método de Newton-Raphson por coordenadas polares, desenvolvido na plataforma MATLAB. O algoritmo realiza sucessivas soluções de fluxo de potência para cada novo ponto operativo do sistema, determinado pela modificação do carregamento do sistema avaliado.

A modificação do carregamento do sistema elétrico foi realizada por meio de um fator denominado fator de carga. Este inicia-se com valor unitário e sofre um incremento de 0.01 (p.u.) a cada nova iteração para solução de um fluxo de potência, determinando assim um novo ponto operativo do sistema.

O programa realiza as soluções até que o fluxo de potência divirja para o ponto operativo atual e para cada solução convergida, obtém-se os pontos originários do carregamento e da tensão em cada barramento do sistema. A margem de carga do sistema analisado então é especificada como sendo o último valor do fator de carga que levou à convergência do fluxo de potência.

## **3.4 POPULAÇÃO INICIAL**

Para determinar o tamanho da população não existe uma função, deve-se atentar, no entanto, que populações muito pequenas podem provocar a perda da diversidade necessária para convergir a uma boa solução e populações com muitos indivíduos poderá comprometer a eficiência do algoritmo. Alguns testes foram realizados, com a finalidade de determinar um valor que pudesse melhor representar o número de indivíduos da população. Estes testes

foram feitos com diferentes valores e observando-se a partir de qual valor não ocorriam mudanças no desempenho das soluções.

A metodologia irá trabalhar com um número fixo de indivíduos de uma população, portanto a cada iteração do algoritmo serão descartados os indivíduos com desempenho inferior.

Outro quesito na determinação da população inicial é quanto ao alelo de cada locus dos cromossomos ou indivíduos. Como estes podem assumir apenas 0 ou 1, foi criada uma função randômica aplicada em cada parte do cromossomo para determinar seu valor.

Gerada a população inicial, são aplicados nos indivíduos os operadores genéticos, próxima subseção.

### **3.5 OPERADORES GENÉTICOS**

O método empregado de seleção foi a roleta simples, onde cada indivíduo possui uma porcentagem, dada por sua margem de carga em relação à soma da margem de carga dos indivíduos da população. Visando se aproximar ainda mais da evolução natural, este operador realiza a escolha de dois indivíduos diferentes, ou seja, não permite que um mesmo indivíduo seja selecionado para a reprodução.

Com os indivíduos pais selecionados, o processo de *crossover* é realizado. Para este operador foi gerado um número aleatório entre um e o número de locus que os pais possuem. O número resultante é definido como ponto de corte, e determina o ponto onde os pais trocaram seus genes.

Após o *crossover* realiza-se a mutação, analisando se os indivíduos sofrerão ou não mutação. Para determinar isto, gera-se um número aleatório entre 0 e 1, definido como taxa de mutação. Se este número for inferior a 0,2, o indivíduo sofrerá mutação. Porém, outro valor aleatório entre 1 e o número de locus é encontrado para definir qual parte do cromossomo sofrerá mutação, ou seja, terá seu alelo trocado.

### **3.6 CONVERGÊNCIA DO ALGORITMO**

O critério de parada usado no método proposto foi um número preestabelecido de gerações para o algoritmo genético.

Para determinar qual o melhor valor para o número de gerações foram realizados testes, observando que depois de determinadas gerações não ocorria mudanças significativas na informação contida nos genótipos.

### **3.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Este capítulo teve como objetivo apresentar os critérios usados na formulação do algoritmo genético para avaliar a capacidade de hospedagem de capacitores shunt.

A metodologia apresenta uma codificação do problema, para que o mesmo fosse analisado por computadores. A representação do problema foi construída sobre uma área crítica, pois é a região do sistema com maior vulnerabilidade de tensão.

O capítulo seguinte mostra a análise dos testes e os resultados da metodologia proposta foi aplicada nos sistemas de 14, 30 e 57 barras do IEEE. Os dados dos sistemas estão em anexo. Os valores pertinentes aos sistemas, como potencia e tensão, foram trabalhados em pu.

## CAPITULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem por objetivo mostrar o desempenho da metodologia exposta no capítulo anterior. Para as simulações utilizou-se o *software* MATLAB R2014a. As simulações realizadas contemplam os sistemas testes do IEEE com 14, 30 e 57 barras

### 4.2 DETERMINAÇÕES BÁSICAS PARA APLICAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO

#### 4.2.1 Área crítica

(PAIVA, 2007) indica as barras críticas dos sistemas do IEEE, que são as 14, 30 e 31 respectivamente para os sistemas de 14, 30 e 57 barras.

Sendo conhecida a barra crítica de cada sistema uma área foi definida, composta por seus barramentos vizinhos. Os barramentos que formam a área crítica de cada sistema utilizado estão apresentados na Tabela 4. 1 4.1. São estes barramentos que formam o cromossomo das possíveis soluções para o algoritmo genético, por se tratar de uma área que pode levar o sistema ao colapso de tensão.

**Tabela 4. 1: Área Crítica dos sistemas de 14, 30 e 57 barras**

<b>Áreas críticas</b>		
<b>(continua)</b>		
<b>Sistema de 14 barras</b>	<b>Sistema de 30 barras</b>	<b>Sistema de 57 barras</b>
4	6	24
7	24	25
9	25	26
10	26	30
13	27	31

<b>Áreas críticas</b>		
<b>(conclusão)</b>		
<b>Sistema de 14 barras</b>	<b>Sistema de 30 barras</b>	<b>Sistema de 57 barras</b>
14	28	32
-	29	33
-	30	34
-	-	35
-	-	36

É possível observar que quanto maior o sistema maiores serão os indivíduos soluções e conseqüentemente maior será a população, uma vez que sistemas maiores possuem mais barramentos.

Os testes realizados para determinar o número de indivíduos da população de cada sistema, permitiu trabalhar com uma variável, no qual indica que o valor que determina o tamanho da população pode ser dada pelo mesmo número de barramentos que compreendem a área crítica de cada sistema. Então o número de indivíduos que formaram a população dos sistemas 14, 30 e 57 barras são respectivamente 6, 8 e 10.

#### **4.2.2 Curva PV sem capacitores shunt**

Os resultados obtidos das simulações da obtenção da curva PV, para os sistemas testes sem a alocação de capacitores shunt estão dispostos na Figura 4. 1, Figura 4. 2 e Figura 4.3. Nessas figuras foram traçadas as curvas PV para cada barra do sistema.

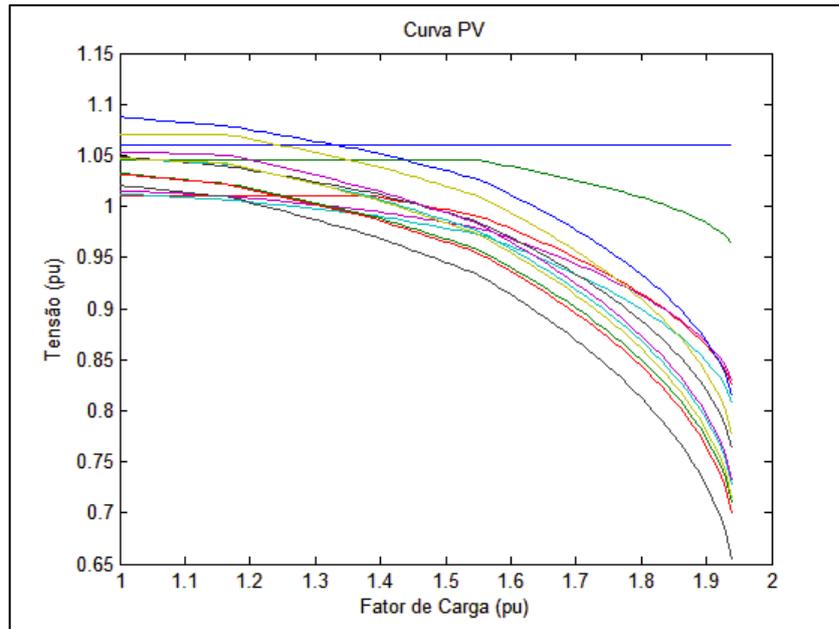


Figura 4. 1: Curva PV do sistema de 14 barras, sem capacitores *shunt*.

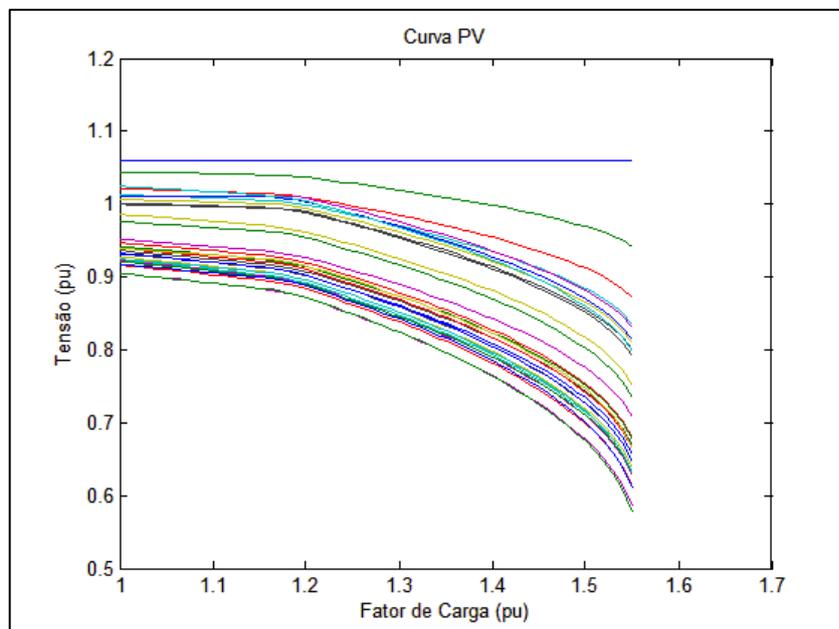
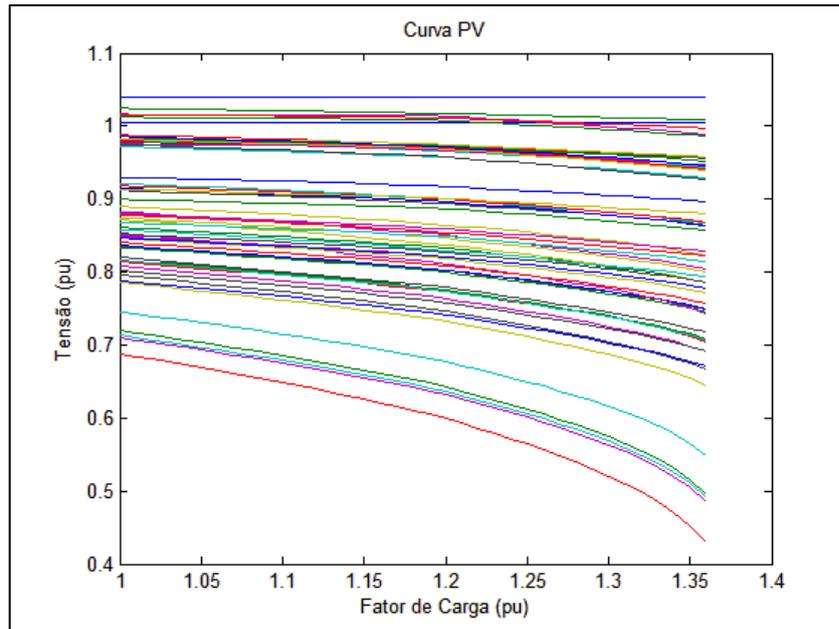


Figura 4. 2: Curva PV do sistema de 30 barras, sem capacitores *shunt*.



**Figura 4. 3: Curva PV do sistema de 57 barras, sem capacitor *shunt*.**

Estas curvas foram traçadas para que a margem de carga do sistema sem adição de capacitores pudesse ser utilizada como um parâmetro para comparar quão boa é uma solução. A Tabela 4.2 mostra os valores da margem de carga dos sistemas testados e analisados, sem a adição de qualquer elemento *shunt*.

**Tabela 4. 2: Margem de carga dos sistemas sem adição de capacitores *shunt*.**

Margem de carga dos sistemas sem capacitores <i>shunt</i>		
Sistema de 14 barras	Sistema de 30 barras	Sistema de 57 barras
1,94 (p.u)	1,55 (p.u)	1,36 (p.u.)

### 4.3 RESULTADOS SISTEMA 14 BARRAS IEEE

Para o sistema de 14 barras, cuja área crítica é definida pelas barras 4, 7, 9, 10, 13, e 14 o algoritmo determinou um valor de 0,8 (pu) para os capacitores a serem instalados, e definiu que este valor fosse inserido em todas as barras que formam a área crítica.

A curva PV para o sistema de 14 barras com a utilização do algoritmo genético para a alocação dos capacitores *shunt* está apresentada na Figura 4. 4. Por meio desta curva, obteve-se a margem de carga de 3.03 (pu), um aumento de 55% em relação a margem de carga do sistema sem alocação de capacitores.

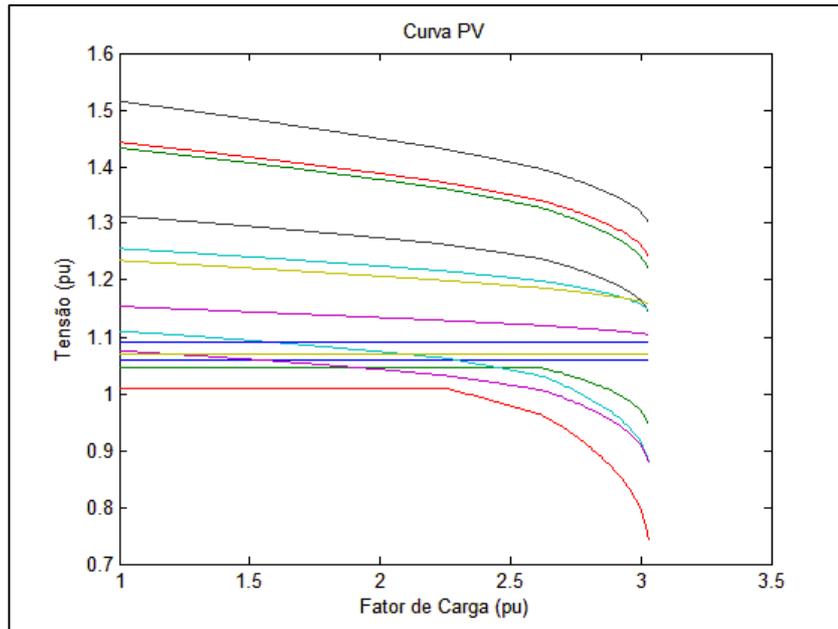


Figura 4. 4: Curva PV do sistema de 14 barras com capacitores *shunt*.

A Tabela 4.3 apresenta o valor das tensões nos barramentos desse sistema no ponto de máximo carregamento com e sem a compensação do sistema. Ao realizar uma comparação entre os valores da terceira coluna com a segunda coluna da tabela é possível verificar que alguns barramentos sofreram um aumento na tensão com a inserção da compensação reativa. Este aumento já era esperado pelo fato da potência reativa ser proporcional ao quadrado do módulo da tensão. No entanto alguns barramentos sofrem um decréscimo da tensão, visto que o sistema é composto de muitas variáveis que podem interferir no perfil das tensões nos barramentos do sistema. Quanto mais próximo de 1 (pu) a tensão nos barramentos estiverem, mais próximo da tensão de referência eles estarão, e conseqüentemente, mais estável estará o sistema.

Tabela 4. 3: Tensão nos barramentos do sistema de 14 barras no ponto de máximo carregamento.

Perfil das tensões no ponto de máximo carregamento nos barramentos do sistema de 14 barras com e sem a inserção dos capacitores <i>shunt</i>		
Barras	Tensões (p.u) com capacitor	Tensões (p.u) sem capacitor
1	1,0600	1,0600
2	0,9461	0,9635
3	0,7410	0,8243

(continua)

Perfil das tensões no ponto de máximo carregamento nos barramentos do sistema de 14 barras com a inserção dos capacitores <i>shunt</i>		
(conclusão)		
Barras	Tensões (p.u) com capacitor	Tensões (p.u) sem capacitor
4	0,8802	0,8076
5	0,8782	0,8294
6	1,0700	0,7765
7	1,1437	0,7626
8	1,0900	0,8145
9	1,2190	0,7089
10	1,2415	0,6992
11	1,1466	0,7274
12	1,1033	0,7307
13	1,1575	0,7141
14	1,3016	0,6541

Para este sistema o algoritmo desenvolvido levou aproximadamente sete minutos para ser processado.

#### 4.4 RESULTADOS SISTEMA 30 BARRAS IEEE

Para o sistema de 30 barras cuja área crítica é definida pelas barras 6, 24, 25, 26, 27, 28, 29 e 30 o algoritmo determinou um valor de 0,5 (pu) para os capacitores a serem instalados, e definiu que este valor fosse inserido apenas nas barras 27, 28 e 29.

A curva PV para o sistema de 30 barras com a utilização do algoritmo genético para a alocação dos capacitores *shunt* está apresentada na Figura 4.5. Por meio desta curva obteve-se a margem de carga de 1,74 (pu) um aumento de 12% em relação a margem de carga do sistema sem alocação de capacitores.

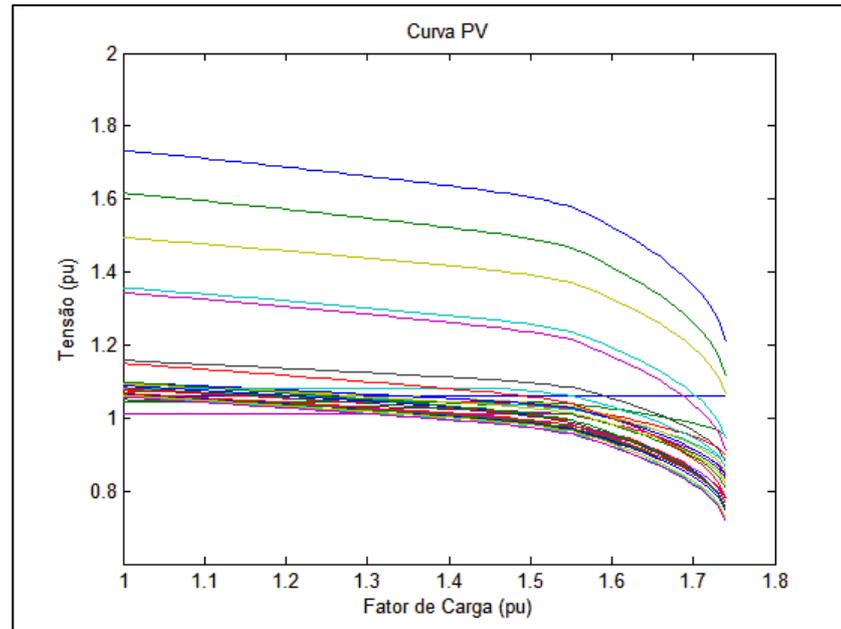


Figura 4. 5: Curva PV do sistema de 30 barras com adição de capacitores *shunt*.

Assim como feito no sistema de 14 barras foram observadas as tensões nos barramentos no ponto de máximo carregamento, Tabela 4.4. E ao realizar uma comparação no perfil das tensões com e sem a inserção de compensação reativa foi possível verificar um aumento na tensão. Assim como citado no sistema de 14 barras este aumento já era esperado.

Tabela 4. 4: Tensão nos barramentos do sistema de 30 barras no ponto de máximo carregamento.

Perfil das tensões no ponto de máximo carregamento nos barramentos do sistema de 14 barras com a inserção dos capacitores <i>shunt</i>		
(continua)		
Barras	Tensões (pu) com capacitor	Tensões (pu) sem capacitor
1	1,0600	1,0600
2	0,9512	0,9417
3	0,8958	0,8710
4	0,8672	0,8349
5	0,8472	0,8300

Perfil das tensões no ponto de máximo carregamento nos barramentos do sistema de 14 barras com a inserção dos capacitores shunt

(continuação)

Barras	Tensões (pu) com capacitor	Tensões (pu) sem capacitor
6	0,8519	0,8098
8	0,8311	0,8006
9	0,8376	0,7346
10	0,8060	0,6781
11	0,7672	0,7972
12	0,8638	0,7070
13	0,7765	0,7517
14	0,8176	0,6691
15	0,7476	0,6570
16	0,7446	0,6773
17	0,7550	0,6650
18	0,7506	0,6330
19	0,7218	0,6270
20	0,7162	0,6376
21	0,7269	0,6459
22	0,7495	0,6469
23	0,7546	0,6290
24	0,7504	0,6130
25	0,7783	0,6312
26	0,9438	0,5840

Perfil das tensões no ponto de máximo carregamento nos barramentos do sistema de 14 barras com a inserção dos capacitores shunt

(continuação)

Barras	Tensões (pu) com capacitor	Tensões (pu) sem capacitor
27	0,9100	0,6658
28	1,0635	0,7916
29	0,8821	0,6098
30	1,2064	0,5775

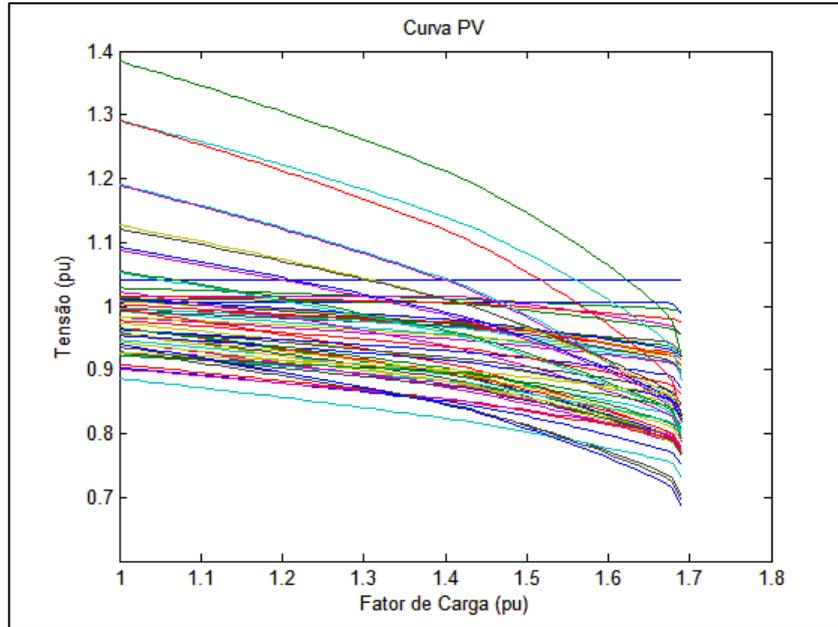
Para este sistema, o algoritmo desenvolvido levou aproximadamente doze minutos para ser processado.

#### 4.5 RESULTADOS SISTEMA 57 BARRAS IEEE

Para o sistema de 57 barras, cuja área crítica é definida pelas barras 24, 25, 26, 30, 31, 32, 33, 34, 35 e 36, o algoritmo determinou um valor de 0,5 (pu) para os capacitores a serem instalados, e definiu que este valor fosse inserido em apenas nas barras 30, 35 e 36.

A curva PV para o sistema de 57 barras com a utilização do algoritmo genético para a alocação dos capacitores *shunt* está apresentada na Figura 4.6. Por meio desta curva obteve-se a margem de carga de 1,69 (pu) um aumento de aproximadamente 25% em relação a margem de carga do sistema sem alocação de capacitores.

A variação do perfil de tensão desse sistema no ponto de máximo carregamento, com e sem a compensação reativa teve um acréscimo, como pode ser observado através das suas curvas PVs. Porém, para evitar que as conclusões ficassem massivas, pois são similares as apresentadas para os sistemas de 14 e 30 barras, não foi construída uma tabela para representar o perfil das tensões deste sistema.



**Figura 4. 6:** Curva PV do sistema de 57 barras com adição de capacitores.

Para este sistema, o algoritmo desenvolvido levou aproximadamente dezoito minutos para ser processado.

#### 4.6 DISCUSSÕES GERAIS

Em todos os sistemas em estudo é possível perceber um aumento significativo da margem de carga e, além disso, um aumento das tensões nas barras do sistema, quando se compara o sistema sem e com a alocação de capacitores.

Dizer que a adição de capacitores shunt em todas as barras poderia proporcionar ao sistema o maior carregamento possível é um erro. Isso pode ser evidenciado nesta metodologia. Pois, apesar do sistema de 14 barras apresentar maior margem de carga com a inserção da capacitância em todos os seus barramentos críticos, os sistemas de 30 e 57 barras tiveram a sua capacidade de hospedagem de capacitor shunt sem que uma capacitância fossem inseridas em todas as barras críticas. Provavelmente, se a capacitância fosse instalada em todos os barramentos dos sistemas de 30 e 57, ocorreria um excesso de potência reativa, que levaria o sistema ao colapso de tensão.

A curva PV apresentou uma ótima função de desempenho, pois ela indica todos os itens que deveriam ser analisados, como a tensão e o limite de potência ativa com a inserção

de potência reativa. Caso a alocação dos capacitores torne o sistema sobrecompensado e operando de forma instável, a curva PV não converge. Ou seja, o sistema diverge indicando a inviabilidade da alocação de capacitores.

Pela curva PV também é possível analisar as tensões nos barramentos do sistema, como esperado há um aumento, pois a tensão é proporcional a potência reativa. No entanto se este aumento atingir elevadas proporções o sistema também opera dentro da região instável.

A metodologia apresentou-se eficiente, visto que ela fornece a máxima capacidade de hospedagem dos sistemas evitando um excesso de potência reativa e elevado aumento de tensão, mantendo assim o sistema operando dentro do limite de estabilidade.

Nos três casos, foi possível perceber que a compensação reativa por meio de banco de capacitores *shunt* é uma medida simples que deixa o sistema um pouco mais seguro e robusto em relação ao problema de colapso de tensão.

## CAPITULO 5 – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi possível calcular com o auxílio do algoritmo genético a capacidade de hospedagem de capacitores *shunt* que podem ser instalados em sistemas elétricos de potência. Em todas as simulações a margem de carregamento, fornecida pela curva PV, foi ampliada.

Tais resultados fornecem uma solução econômica caso se deseje efetuar ampliações da rede elétrica, pois a inserção de bancos de capacitores é mais barata quando comparada com outros equipamentos.

Como trabalhos futuros, propõe-se a utilização da proposta apresentada neste trabalho em conjunto com outras publicadas na Literatura que visam o aumento da margem de carregamento. Ainda como proposta, utilizar a metodologia em outros sistemas teste e em sistemas reais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOLLEN, Math H. J. *Integration of distributed generation in the power system*. Canada. *IEEE press series on power engineering*, 1960.
- CARDOSO, R. M. **Ferramentas Computacionais Aplicadas ao Controle de Tensão em Sistemas elétricos de potência**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 1999.
- CHAVES, F. S. **Avaliação técnica do desempenho da compensação reativa shunt capacitiva aplicada à expansão de sistemas elétricos**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2007.
- COLEY, D. A. *An a Introductions to Genetic Algorithms for Scintists and Engineers*. Singapura. *World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd*, 1991.
- CONDEGA, S. Y. C. **Metodologia para determinação da margem de estabilidade de tensão sob a perspectiva da expansão e da operação de sistemas de potência**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2013.
- CORTEZ, A. N. **Critérios e procedimentos para avaliação de estabilidade de tensão em sistemas elétricos de potência**. 2001, 212p. Dissertação ( Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2001.
- CSANNYI, E. *Historical review of power system stability problems*. *Electrical Engineering Portal*. 2010. Disponível em: <<http://electrical-engineering-portal.com/historical-review-of-power-system-stability-problems>>. Acesso em: 08 outubro 2017.
- FERREIRA, C. A. **Novo modelo de transformador com tap variável em regime permanente**. 2013. Tese (Doutorado). Pontifca Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC RIO), Rio de janeiro, 2013.
- GODDOI, A. **Alocação de banco de capacitores em redes primárias e secundárias de energia elétrica**. 2009. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, 2009.
- GOLDBERG, D. E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Boston. Addison-Wesley Longman Publishing Co., 1989.
- GUIMARÃES, P. et al. *QV and PV curves as a planning tool of analysis*. *24 th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, 2011.
- HOLLAND, J.H. *Adaptation in natural and artificial systems*. *Univ. of Michigan Press, AnnArbor*, 1975.
- JUNIOR, L. M. **Procedimento para avaliação do impacto da compensação reativa shunt capacitiva na estabilidade de tensão**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2008.
- KUNDUR, P. et al. *Definition and classification of power system stability – IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions*. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 19, n. 3, p. 1387 – 1401, ago. 2004.
- KUNDUR, P., MORISON, G. K., *A Review of Definitions and Classification of Stability Problems in Today’s Power Systems*. *IEEE PES Meeting, New York*, 1997.

- KUNDUR, P. *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill, 1994.
- LINDEN, RICARDO. **Algoritmos genéticos** / Ricardo Liden. – 2. Ed. – Rio de Janeiro : Brasport, 2008.
- LOPES, B. Isaías. L., SOUZA, A. C. Z., *On multiple tap blocking to avoid voltage collapse*. *Electric System Research* 225-231, 2003.
- LOPES, H. S.; RODRIGUES, L. C.; STEINER, M. T. A. **Meta heurística em pesquisa operacional**. Editora: Omnipax. Curitiba – PR, 2013.
- MACHOWSKI, J. BIALEK, J. W., BUMBY, J. R. *Power system dynamics: stability and control*. 2nd ed. 1997.
- MALANGE, F. C. V. **Proposta de parametrização para o fluxo de carga continuado visando redução de perdas na transmissão e o aumento da margem estática de estabilidade de tensão**. 2008, 139f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Ilha Solteira, 2008.
- MITCHELL, M. *An Introduction to genetic algorithms*. Copyright © Massachusetts Institute of Technology, 1999.
- MOURA, S., MARUJO D., SOUZA, A.C.Z., LOPES, B.I.L. *Blocking reactive power generation as a voltage control measure*. 22<sup>nd</sup> International Conference on Electricity Distribution (CIRED), 10-13 de junho de 2013.
- PADIYAR, K. R. *Power system dynamics: stability and control*. 2<sup>a</sup> ed. Hyderabad, India: BS Publications, 2008.
- PAIVA, I. de F. B. de . **Comportamento da curva QV nas barras da região crítica de um sistema elétrico**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Itajubá, 2007.
- PEREIRA, M. A. S. **Otimização dos níveis de reserva girante em sistemas de geração com elevada penetração de energias renováveis**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de São João Del rei (UFSJ), São João Del Rei – MG, 2017.
- SILVA, R. G. **Aplicação dos Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada na Avaliação da Estabilidade de Tensão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2010.
- SOUZA, A. C. Z., BRITO, N. H. M. N. **Ações de controle para prevenção de colapso de tensão: efeitos e restrições**. Anais do XI Congresso Brasileiro de Automática. São Paulo, 1996.
- SOUZA A. C. Z, **Determinação da Barra Crítica e do Ponto de Colapso pelo Vetor Tangente**. XI CBA (Congresso Brasileiro de Automática), São Paulo, Setembro de 1996, vol. 3, pags 1393-1398.
- TAYLOR, C. W. *Power system voltage stability*. New York: McGraw-Hill Inc, 1994. 273 p
- VEGGI ATALA. **Programação de horários usando algoritmo genético especializado**. 2014, 133f. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de engenharia de ilha solteira. Ilha Solteira, 2014.
- VILELA, A. O. R. **Margem de estabilidade de tensão no planejamento dos sistemas elétricos: análise do impacto do despacho da geração**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

## ANEXO A

### SISTEMA DE 14 BARRAS      TESTE

#### DADOS DE BARRA – MATRIZ A

1.0000	1.0600	0	2.3240	0	0	0	999.0000	-99.0000	0	
3.0000	1.0450	-5.0000	1.6600	0.2170	0.1270	0	0.5000	-99.0000	0	
3.0000	1.0100	-13.0000	0	0.9420	0.1900	0	0.4000	-99.0000	0	
2.0000	1.0190	-10.0000	0	0.4780	-0.0390	0	999.0000	-99.0000	0	
2.0000	1.0200	-9.0000	0	0.0760	0.0160	0	999.0000	-99.0000	0	
3.0000	1.0700	-14.0000	0	0.1120	0.0750	0	0.2400	-99.0000	0	
2.0000	1.0620	-13.0000	0	0	0	0	0	999.0000	-99.0000	0
3.0000	1.0900	-13.0000	0	0	0	0	0	0.2400	-99.0000	0
2.0000	1.0563	-15.0000	0	0.2950	0.1660	0	999.0000	-99.0000	0	
2.0000	1.0503	-15.0000	0	0.0900	0.0580	0	999.0000	-99.0000	0	
2.0000	1.0571	-15.0000	0	0.0350	0.0180	0	999.0000	-99.0000	0	
2.0000	1.0552	-15.0000	0	0.0610	0.0160	0	999.0000	-99.0000	0	
2.0000	1.0504	-15.0000	0	0.1350	0.0580	0	999.0000	-99.0000	0	
2.0000	1.0358	-16.0000	0	0.1490	0.0500	0	999.0000	-99.0000	0	

#### DADOS DE LINHA – MATRIZ C

1.0000	2.0000	0.0193	0.0591	0.0066	0	0
1.0000	5.0000	0.0540	0.2230	0.0061	0	0
2.0000	3.0000	0.0469	0.1979	0.0055	0	0
2.0000	4.0000	0.0581	0.1763	0.0047	0	0
2.0000	5.0000	0.0569	0.1738	0.0043	0	0
3.0000	4.0000	0.0670	0.1710	0.0043	0	0
4.0000	5.0000	0.0133	0.0421	0.0016	0	0
7.0000	4.0000	0	0.2091	0	1.0000	0.9780
9.0000	4.0000	0	0.5561	0	1.0000	0.9690
6.0000	5.0000	0	0.2520	0	1.0000	0.9320
6.0000	11.0000	0.0949	0.1989	0	0	0
6.0000	12.0000	0.1229	0.2558	0	0	0
6.0000	13.0000	0.0661	0.1302	0	0	0
7.0000	8.0000	0	0.1761	0	0	0
7.0000	9.0000	0	0.1100	0	0	0
9.0000	10.0000	0.0318	0.0845	0	0	0
9.0000	14.0000	0.1271	0.2703	0	0	0
10.0000	11.0000	0.0820	0.1920	0	0	0
12.0000	13.0000	0.2209	0.1998	0	0	0
13.0000	14.0000	0.1709	0.3480	0	0	0

#### Matriz A

- 1ª coluna: Tipo de barras 1=>SWING ; 2=>PQ ; 3=>PV
- 2ª coluna: Tensão na barra
- 3ª coluna: Ângulo da tensão na barra
- 4ª coluna: Potência Ativa gerada na barra, base de 100MVA
- 5ª coluna: Potência Ativa consumida na barra, base de 100MVA
- 6ª coluna: Potência Reativa consumida na barra, base de 100MVA
- 7ª coluna: Potência Reativa gerada na barra, base de 100MVA
- 8ª coluna: Potência Reativa máxima gerada, base de 100MVA
- 9ª coluna: Potência Reativa mínima gerada, base de 100MVA
- 10ª coluna: Susceptância shunt instalada, base de 100MVA

#### Matriz C

- 1ª coluna: barra de origem
- 2ª coluna: barra de término

- 3ª coluna: resistência em pu
- 4ª coluna: reatância em pu
- 5ª coluna: susceptância shunt total da linha em pu
- 6ª coluna: tem tap? se sim, valor igual a 1.
- 7ª coluna: se tiver tap, é o valor do tap

## ANEXO B

### SISTEMA DE 30 BARRAS      TESTE

#### DADOS DE BARRA – MATRIZ A

1.0000	1.0600	0	2.6020	0	0	0	0	0	0	0
3.0000	1.0430	-5.5084	0.4000	0.2170	0.1270	0	0.5000	-0.4000	0	0
2.0000	1.0183	-7.9792	0	0.0240	0.0120	0	0	0	0	0
2.0000	1.0089	-9.6338	0	0.0760	0.0160	0	0	0	0	0
3.0000	1.0100	-14.4186	0	0.9420	0.1900	0	0.4000	-0.4000	0	0
2.0000	1.0074	-11.3461	0	0	0	0	0	0	0	0
2.0000	1.0007	-13.1363	0	0.2280	0.1090	0	0	0	0	0
3.0000	1.0100	-12.1468	0	0.3000	0.3000	0	0.4000	-0.1000	0	0
2.0000	1.0378	-14.3514	0	0	0	0	0	0	0	0
2.0000	1.0197	-15.9564	0	0.0580	0.0200	0	0	0	0	0
3.0000	1.0820	-14.3514	0	0	0	0	0.2400	-0.0600	0	0
2.0000	1.0490	-15.4903	0	0.1120	0.0750	0	0	0	0	0
3.0000	1.0710	-15.4903	0	0	0	0	0.2400	-0.0600	0	0
2.0000	1.0315	-16.3769	0	0.0620	0.0160	0	0	0	0	0
2.0000	1.0246	-16.3946	0	0.0820	0.0250	0	0	0	0	0
2.0000	1.0293	-15.9574	0	0.0350	0.0180	0	0	0	0	0
2.0000	1.0171	-16.1689	0	0.0900	0.0580	0	0	0	0	0
2.0000	1.0105	-16.9591	0	0.0320	0.0090	0	0	0	0	0
2.0000	1.0053	-17.0978	0	0.0950	0.0340	0	0	0	0	0
2.0000	1.0081	-16.8706	0	0.0220	0.0070	0	0	0	0	0
2.0000	1.0071	-16.4078	0	0.1750	0.1120	0	0	0	0	0
2.0000	1.0077	-16.3884	0	0	0	0	0	0	0	0
2.0000	1.0089	-16.6856	0	0.0320	0.0160	0	0	0	0	0
2.0000	0.9965	-16.7186	0	0.0870	0.0670	0	0	0	0	0
2.0000	1.0000	-16.4318	0	0	0	0	0	0	0	0
2.0000	0.9820	-16.8665	0	0.0350	0.0230	0	0	0	0	0
2.0000	1.0109	-15.9790	0	0	0	0	0	0	0	0
2.0000	1.0035	-11.9764	0	0	0	0	0	0	0	0
2.0000	0.9908	-17.2399	0	0.0240	0.0090	0	0	0	0	0
2.0000	0.9791	-18.1457	0	0.1060	0.0190	0	0	0	0	0

#### DADOS DE LINHA – MATRIZ C

1.0000	2.0000	0.0192	0.0575	0.0264	0	1.0000
1.0000	3.0000	0.0452	0.1852	0.0204	0	1.0000
2.0000	4.0000	0.0570	0.1737	0.0184	0	1.0000
3.0000	4.0000	0.0132	0.0379	0.0042	0	1.0000
2.0000	5.0000	0.0472	0.1983	0.0209	0	1.0000
2.0000	6.0000	0.0581	0.1763	0.0187	0	1.0000
4.0000	6.0000	0.0119	0.0414	0.0045	0	1.0000
5.0000	7.0000	0.0460	0.1160	0.0102	0	1.0000
6.0000	7.0000	0.0267	0.0820	0.0085	0	1.0000
6.0000	8.0000	0.0120	0.0420	0.0045	0	1.0000
6.0000	9.0000	0	0.2080	0	1.0000	0.9780
6.0000	10.0000	0	0.5560	0	1.0000	0.9690
9.0000	11.0000	0	0.2080	0	1.0000	1.0000
9.0000	10.0000	0	0.1100	0	1.0000	1.0000
4.0000	12.0000	0	0.2560	0	1.0000	0.9320
12.0000	13.0000	0	0.1400	0	1.0000	1.0000
12.0000	14.0000	0.1231	0.2559	0	0	1.0000
12.0000	15.0000	0.0662	0.1304	0	0	1.0000
12.0000	16.0000	0.0945	0.1987	0	0	1.0000
14.0000	15.0000	0.2210	0.1997	0	0	1.0000
16.0000	17.0000	0.0824	0.1923	0	0	1.0000
15.0000	18.0000	0.1073	0.2185	0	0	1.0000

18.0000	19.0000	0.0639	0.1292	0	0	1.0000
19.0000	20.0000	0.0340	0.0680	0	0	1.0000
10.0000	20.0000	0.0936	0.2090	0	0	1.0000
10.0000	17.0000	0.0324	0.0845	0	0	1.0000
10.0000	21.0000	0.0348	0.0749	0	0	1.0000
10.0000	22.0000	0.0727	0.1499	0	0	1.0000
21.0000	22.0000	0.0116	0.0236	0	0	1.0000
15.0000	23.0000	0.1000	0.2020	0	0	1.0000
22.0000	24.0000	0.1150	0.1790	0	0	1.0000
23.0000	24.0000	0.1320	0.2700	0	0	1.0000
24.0000	25.0000	0.1885	0.3292	0	0	1.0000
25.0000	26.0000	0.2544	0.3800	0	0	1.0000
25.0000	27.0000	0.1093	0.2087	0	0	1.0000
28.0000	27.0000	0	0.3960	01.0000	0.9680	
27.0000	29.0000	0.2198	0.4153	0	0	1.0000
27.0000	30.0000	0.3202	0.6027	0	0	1.0000
29.0000	30.0000	0.2399	0.4533	0	0	1.0000
8.0000	28.0000	0.0636	0.2000	0.0214	0	1.0000
6.0000	28.0000	0.0169	0.0599	0.0065	0	1.0000

## ANEXO C

## SISTEMA DE 57 BARRAS      TESTE

## DADOS DE BARRA- MATRIZ A

1.0000	1.0400	0	1.2890	0.5500	0.1700	0	0	0	0
3.0000	1.0100	-1.1890	0	0.0300	0.8800	0	0.5000	-0.1700	0
3.0000	0.9850	-5.9917	0.4000	0.4100	0.2100	0	0.6000	-0.1000	0
2.0000	0.9783	-7.2914	0	0	0	0	0	0	0
2.0000	0.9757	-8.5415	0	0.1300	0.0400	0	0	0	0
3.0000	0.9800	-8.6873	0	0.7500	0.0200	0	0.2500	-0.0800	0
2.0000	0.9819	-7.5852	0	0	0	0	0	0	0
3.0000	1.0050	-4.4957	4.5000	1.5000	0.2200	0	2.0000	-1.4000	0
3.0000	0.9800	-9.6146	0	1.2100	0.2600	0	0.0900	-0.0300	0
2.0000	0.9858	-11.4858	0	0.0500	0.0200	0	0	0	0
2.0000	0.9733	-10.2138	0	0	0	0	0	0	0
3.0000	1.0150	-10.4988	3.1000	3.7700	0.2400	0	1.5500	-1.5000	0
2.0000	0.9780	-9.8190	0	0.1800	0.0230	0	0	0	0
2.0000	0.9688	-9.3595	0	0.1050	0.0530	0	0	0	0
2.0000	0.9872	-7.1945	0	0.2200	0.0500	0	0	0	0
2.0000	1.0134	-8.8787	0	0.4300	0.0300	0	0	0	0
2.0000	1.0174	-5.4062	0	0.4200	0.0800	0	0	0	0
2.0000	0.9751	-11.7483	0	0.2720	0.0980	0	0	0	0
2.0000	0.9516	-13.3607	0	0.0330	0.0060	0	0	0	0
2.0000	0.9499	-13.6119	0	0.0230	0.0100	0	0	0	0
2.0000	1.0007	-12.8850	0	0	0	0	0	0	0
2.0000	1.0031	-12.8355	0	0	0	0	0	0	0
2.0000	1.0013	-12.8847	0	0.0630	0.0210	0	0	0	0
2.0000	0.9844	-12.9553	0	0	0	0	0	0	0
2.0000	0.9381	-18.0058	0	0.0630	0.0320	0	0	0	0
2.0000	0.9456	-12.6454	0	0	0	0	0	0	0
2.0000	0.9729	-11.3843	0	0.0930	0.0050	0	0	0	0
2.0000	0.9897	-10.4228	0	0.0460	0.0230	0	0	0	0
2.0000	1.0043	-9.7599	0	0.1700	0.0260	0	0	0	0
2.0000	0.9204	-18.6629	0	0.0360	0.0180	0	0	0	0
2.0000	0.9002	-19.5294	0	0.0580	0.0290	0	0	0	0
2.0000	0.9263	-18.8282	0	0.0160	0.0080	0	0	0	0
2.0000	0.9239	-18.8699	0	0.0380	0.0190	0	0	0	0
2.0000	0.9494	-14.0854	0	0	0	0	0	0	0
2.0000	0.9578	-13.8653	0	0.0600	0.0300	0	0	0	0
2.0000	0.9685	-13.6143	0	0	0	0	0	0	0
2.0000	0.9781	-13.4337	0	0	0	0	0	0	0
2.0000	1.0074	-12.7282	0	0.1400	0.0700	0	0	0	0
2.0000	0.9761	-13.4811	0	0	0	0	0	0	0
2.0000	0.9656	-13.6434	0	0	0	0	0	0	0
2.0000	0.9939	-14.1210	0	0.0630	0.0300	0	0	0	0
2.0000	0.9633	-15.5583	0	0.0710	0.0440	0	0	0	0
2.0000	1.0084	-11.3802	0	0.0200	0.0100	0	0	0	0
2.0000	1.0124	-11.8587	0	0.1200	0.0180	0	0	0	0
2.0000	1.0336	-9.2923	0	0	0	0	0	0	0
2.0000	1.0572	-11.1436	0	0	0	0	0	0	0
2.0000	1.0295	-12.5404	0	0.2970	0.1160	0	0	0	0
2.0000	1.0232	-12.6289	0	0	0	0	0	0	0
2.0000	1.0331	-12.9757	0	0.1800	0.0850	0	0	0	0
2.0000	1.0210	-13.4580	0	0.2100	0.1050	0	0	0	0
2.0000	1.0514	-12.5814	0	0.1800	0.0530	0	0	0	0
2.0000	0.9677	-11.2157	0	0.0490	0.0220	0	0	0	0
2.0000	0.9546	-11.8252	0	0.2000	0.1000	0	0	0	0

2.0000	0.9866	-11.5391	0	0.0410	0.0140	0	0	0	0
2.0000	1.0276	-10.8505	0	0.0680	0.0340	0	0	0	0
2.0000	0.9643	-16.0649	0	0.0760	0.0220	0	0	0	0
2.0000	0.9602	-16.5765	0	0.0670	0.0200	0	0	0	0

## DADOS DE LINHA – MATRIZ C

1.0000	2.0000	0.0083	0.0280	0.0645	0	0		
2.0000	3.0000	0.0298	0.0850	0.0409	0	0		
3.0000	4.0000	0.0112	0.0366	0.0190	0	0		
4.0000	5.0000	0.0625	0.1320	0.0129	0	0		
4.0000	6.0000	0.0430	0.1480	0.0174	0	0		
6.0000	7.0000	0.0200	0.1020	0.0138	0	0		
6.0000	8.0000	0.0339	0.1730	0.0235	0	0		
8.0000	9.0000	0.0099	0.0505	0.0274	0	0		
9.0000	10.0000	0.0369	0.1679	0.0220	0	0		
9.0000	11.0000	0.0258	0.0848	0.0109	0	0		
9.0000	12.0000	0.0648	0.2950	0.0386	0	0		
9.0000	13.0000	0.0481	0.1580	0.0203	0	0		
13.0000	14.0000	0.0132	0.0434	0.0055	0	0		
13.0000	15.0000	0.0269	0.0869	0.0115	0	0		
1.0000	15.0000	0.0178	0.0910	0.0494	0	0		
1.0000	16.0000	0.0454	0.2060	0.0273	0	0		
1.0000	17.0000	0.0238	0.1080	0.0143	0	0		
3.0000	15.0000	0.0162	0.0530	0.0272	0	0		
4.0000	18.0000	0	0.5550	0	1.0000	0.9700		
4.0000	18.0000	0	0.4300	0	1.0000	0.9780		
5.0000	6.0000	0.0302	0.0641	0.0062	0	0		
7.0000	8.0000	0.0139	0.0712	0.0097	0	0		
10.0000	12.0000	0.0277	0.1262	0.0164	0	0		
11.0000	13.0000	0.0223	0.0732	0.0094	0	0		
12.0000	13.0000	0.0178	0.0580	0.0302	0	0		
12.0000	16.0000	0.0180	0.0813	0.0108	0	0		
12.0000	17.0000	0.0397	0.1790	0.0238	0	0		
14.0000	15.0000	0.0171	0.0547	0.0074	0	0		
18.0000	19.0000	0.4610	0.6850	0	0	0		
19.0000	20.0000	0.2830	0.4340	0	0	0		
21.0000	20.0000	0	0.7767	0	1.0000	1.0430		
21.0000	22.0000	0.0736	0.1170	0	0	0		
22.0000	23.0000	0.0099	0.0152	0	0	0		
23.0000	24.0000	0.1660	0.2560	0.0042	0	0		
24.0000	25.0000	0	1.1820	0	1.0000	1.0000		
24.0000	25.0000	0	1.2300	0	1.0000	1.0000		
24.0000	26.0000	0	0.0473	0	1.0000	1.0430		
26.0000	27.0000	0.1650	0.2540	0	0	0		
27.0000	28.0000	0.0618	0.0954	0	0	0		
28.0000	29.0000	0.0418	0.0587	0	0	0		
7.0000	29.0000	0	0.0648	0	1.0000	0.9670		
25.0000	30.0000	0.1350	0.2020	0	0	0		
30.0000	31.0000	0.3260	0.4970	0	0	0		
31.0000	32.0000	0.5070	0.7550	0	0	0		
32.0000	33.0000	0.0392	0.0360	0	0	0		
34.0000	32.0000	0	0.9530	0	1.0000	0.9750		
34.0000	35.0000	0.0520	0.0780	0.0016	0	0		
35.0000	36.0000	0.0430	0.0537	0.0008	0	0		
36.0000	37.0000	0.0290	0.0366	0	0	0		
37.0000	38.0000	0.0651	0.1009	0.0010	0	0		
37.0000	39.0000	0.0239	0.0379	0	0	0		
36.0000	40.0000	0.0300	0.0466	0	0	0		
22.0000	38.0000	0.0192	0.0295	0	0	0		
11.0000	41.0000	0	0.7490	0	1.0000	0.9550		
41.0000	42.0000	0.2070	0.3520	0	0	0		

41.0000	43.0000	0	0.4120	0	1.0000	1.0000
38.0000	44.0000	0.0289	0.0585	0.0010	0	1.0000
15.0000	45.0000	0	0.1042	0	1.0000	0.9550
14.0000	46.0000	0	0.0735	0	1.0000	0.9000
46.0000	47.0000	0.0230	0.0680	0.0016	0	0
47.0000	48.0000	0.0182	0.0233	0	0	0
48.0000	49.0000	0.0834	0.1290	0.0024	0	0
49.0000	50.0000	0.0801	0.1280	0	0	0
50.0000	51.0000	0.1386	0.2200	0	0	0
10.0000	51.0000	0	0.0712	0	1.0000	0.9300
13.0000	49.0000	0	0.1910	0	1.0000	0.8950
29.0000	52.0000	0.1442	0.1870	0	0	0
52.0000	53.0000	0.0762	0.0984	0	0	0
53.0000	54.0000	0.1878	0.2320	0	0	0
54.0000	55.0000	0.1732	0.2265	0	0	0
11.0000	43.0000	0	0.1530	0	1.0000	0.9580
44.0000	45.0000	0.0624	0.1242	0.0020	0	0
40.0000	56.0000	0	1.1950	0	1.0000	0.9580
56.0000	41.0000	0.5530	0.5490	0	0	0
56.0000	42.0000	0.2125	0.3540	0	0	0
39.0000	57.0000	0	1.3550	0	1.0000	0.9800
57.0000	56.0000	0.1740	0.2600	0	0	0
38.0000	49.0000	0.1150	0.1770	0.0030	0	0
38.0000	48.0000	0.0312	0.0482	0	0	0
9.0000	55.0000	0	0.1205	0	1.0000	0.9400