

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ELETRICIDADE

**FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO COM  
RESTRIÇÕES DA CURVA DE  
CAPABILIDADE DO GERADOR  
SÍNCRONO**

**DIONICIO ZÓCIMO ÑAUPARI HUATUCO**

São Luís - MA, Brasil  
FEVEREIRO 2006

# **FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO COM RESTRIÇÕES DA CURVA DE CAPABILIDADE DO GERADOR SÍNCRONO**

Dissertação de Mestrado submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação  
em Engenharia de Eletricidade da UFMA como parte dos requisitos para  
obtenção ao título de Mestre em Engenharia Elétrica  
na área de Sistemas de Energia.

Por

**DIONICIO ZÓCIMO ÑAUPARI HUATUCO**

**FEVEREIRO, 2006**

# **FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO COM RESTRICÇÕES DA CURVA DE CAPABILIDADE DO GERADOR SÍNCRONO**

DIONICIO ZÓCIMO ÑAUPARI HUATUCO

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 17/02/ 2006

Prof. Dr. Vicente Leonardo Paucar Casas  
UFMA  
(Orientador)

Prof. Dr. Ubiratan Holanda Bezerra  
UFPA  
(Membro da Banca Examinadora)

Prof. Dr. Osvaldo Ronald Saavedra Méndez  
UFMA  
(Membro da Banca Examinadora)

# **FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO COM RESTRICÇÕES DA CURVA DE CAPABILIDADE DO GERADOR SÍNCRONO**

MESTRADO

**Área de Concentração:** SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

DIONICIO ZÓCIMO ÑAUPARI HUATUCO

Orientador: Prof. Dr. Vicente Leonardo Paucar Casas

Curso de Pós-Graduação  
em Engenharia de Eletricidade da  
Universidade Federal do Maranhão

*Dedico este trabalho a*

*toda minha família.*

*Em especial a*

*minha mãe Melecia.*

# AGRADECIMENTOS

A Deus, que permitiu alcançar meus objetivos.

Ao Prof. Dr. Vicente Leonardo Paucar Casas pela orientação, apoio, incentivo e amizade, cruciais para o desenvolvimento deste trabalho.

À minha mãe Melecia Huatuco Huaman e meu irmão Leonardo Ñaupari Huatuco, fontes de inspiração e exemplos de constante superação, pelo carinho e preocupação mostrados ao longo destes anos.

Aos meus filhos Jonathan, Karen e Zoraya pelo contínuo carinho expressado no decorrer destes anos.

A meus colegas Marcos Julio Rider Flores e Manfred Bedriñana Aronés pela amizade e fundamental apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Ao grupo de professores do curso: PhD. Maria da Guia da Silva, Dr. Osvaldo Ronald Saavedra Méndez e Dr. José Eduardo Onoda Pessanha, pela orientação e apoio.

A Magaly Echegaray Diaz pelo carinho e compreensão durante a realização do curso de Pós-Graduação.

Aos meus colegas peruanos do laboratório: Juan Carlos, Juan Mauricio, Carlos, Miriam, Sergio, Yuri, Alex e Romel, e aos meus colegas brasileiros Clissianne, Irlandino, Osvaldo e Ricardo; a todos do GSP (Grupo de Sistemas de Potência) e do curso de Pós-Graduação, que com sua amizade fizeram da minha permanência em São Luís uma lembrança inesquecível.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e ELETRONORTE pelo financiamento de projetos de pesquisa que permitiram melhorar a infra-estrutura computacional utilizada no presente trabalho.

# RESUMO

Neste trabalho, apresentam-se as equações dos limites de operação da máquina síncrona que constituem a chamada curva de capacidade. A partir dessas equações matemáticas, deduzidas de cada um dos limites, é obtido computacionalmente o gráfico da curva de operação que define a região de operação da máquina síncrona para que seus enrolamentos não se deterioresem nem que a máquina perca estabilidade em regime permanente. Essas equações estão sendo incluídas nas restrições de um fluxo de potência ótimo (FPO). Na literatura técnica, não há relatórios sobre as equações mencionadas nem sobre a sua utilização em programas de FPO que considerem os limites reais de operação da máquina síncrona. Considera-se que a capacidade de geração das potências ativa e reativa de um gerador síncrono está limitada pela curva de capacidade completa considerando todos os seus limites e o objetivo principal deste trabalho de pesquisa tem sido a implementação desses limites num FPO. O fluxo de potência ótimo considerado tem sido modelado como um problema de programação não-linear com uma função objetivo para minimizar o custo total de geração da potência ativa, sujeita a um conjunto de restrições técnicas e econômicas. A solução do FPO proposta foi obtida com as funções de otimização do MATLAB®. A metodologia proposta foi aplicada com sucesso aos sistemas teste WSCC3 de 3 geradores e New England de 10 geradores, comprovando que os custos de operação são maiores comparados com os resultados de programas FPO convencionais que utilizam limites aproximados da curva de capacidade.

# ABSTRACT

This work presents the equations of operation limits of the synchronous machine that constitute the so called capability curve. From these mathematical equations, deduced from each one of these limits, the graphic of the operation curve is computationally generated, defining the operation region of the synchronous machine so that their windings do not itself deteriorate nor the machine loses stability in steady state. These equations are being included or implemented in the constraints of an optimal power flow (OPF). Actually these mentioned equations, neither have not been published on technical bibliography nor have these equations been used in OPF programs that consider the real operation limits of the synchronous machine. It is considered that the generation capacity of the active and reactive powers of a synchronous generator is limited by the complete capability curve, considering all its limits, and the principal target of this research work is the implementation of these limits in an OPF. The considered optimal power flow have been modeled as a nonlinear programming problem with an objective function that minimizes the total cost of generation of the active power, subject to a set of technical and economic constraints. The solution of the proposed OPF was obtained with the MATLAB® optimization functions. The proposed methodology has been successfully applied on the WSCC3 of 3 generator systems as well as on the New England 10 generators system, verifying that the operation costs are higher compared with the results of conventional OPF's programs that use capability curve approximated limits.

# SUMÁRIO

Lista de Tabelas	xii
Lista de Figuras	xiv
Abreviaturas e Símbolos	xvii
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1. Generalidades .....	1
1.2. Formulação do problema .....	2
1.3. Objetivos.....	3
1.4. Justificativa .....	4
1.5. Metodologia.....	5
1.6. Estrutura do trabalho .....	5
<b>2. CURVA DE CAPABILIDADE DO GERADOR SÍNCRONO</b>	<b>7</b>
2.1. Introdução .....	7
2.2. A curva de capacidade do gerador síncrono .....	8
2.3. Limites da curva de capacidade do gerador síncrono.....	9
2.3.1. Potência ativa e reativa.....	10
2.3.2. Limite térmico do enrolamento do campo.....	12
2.3.3. Limite da potência mecânica da máquina primária .....	14
2.3.4. Limite térmico do enrolamento de armadura.....	14

2.3.5.	Limite de estabilidade permanente teórico e prático .....	14
2.3.6.	Limite mínimo da corrente de excitação.....	17
2.4.	Curva de capacidade completa do gerador síncrono.....	17
3.	INCLUSÃO DA CURVA DE CAPABILIDADE COMPLETA NO FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO .....	21
3.1.	Introdução .....	21
3.2.	Fluxo de potência ótimo .....	22
3.2.1.	Desenvolvimentos de fluxo de potência ótimo .....	22
3.2.2.	Formulação do modelo de FPO .....	25
3.2.3.	Métodos de solução do FPO .....	27
3.2.4.	Desafios do FPO .....	29
3.3.	Equações da curva de capacidade no FPO .....	31
3.3.1.	Função objetivo.....	31
3.3.2.	Restrições da curva de capacidade completa.....	31
4.	APLICAÇÃO A SISTEMAS TESTE E RESULTADOS.....	<u>33</u>
4.1.	Introdução.....	<u>36</u>
4.2.	Sistema WSCC3 de 3 geradores.....	<u>36</u>
4.3.	Sistema New England de 10 geradores.....	55
5.	CONCLUSÕES .....	59
5.1.	Conclusões.....	59
5.2.	Contribuições .....	60
5.3.	Trabalhos Futuros .....	61

Apêndices	62
A. Dados dos sistemas teste.....	63
A.1 Nomenclatura.....	63
A.2 Sistema WSCC3 de 3 geradores 9 barras .....	64
A.3 Sistema New England 10 geradores 39 barras.....	65
Referências bibliográficas	68

# LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Resultados do fluxo de potência ótimo com a curva de capacidade completa para o sistema teste WSCC3 de 3 geradores – 9 barras.....	38
Tabela 4.2: Resultados do fluxo de potência ótimo para os três casos de curva de capacidade para o sistema teste WSCC3 de 3 geradores – 9 barras (caso base).....	42
Tabela 4.3: Resultados do fluxo de potência ótimo para os três casos de curva de capacidade para o sistema teste WSCC3 de 3 geradores – 9 barras (caso sobrecarregamento em 50% da potência ativa).....	43
Tabela 4.4: Resultados do fluxo de potência ótimo para os três casos de curva de capacidade para o sistema teste WSCC3 de 3 geradores – 9 barras (caso com potência reativa negativa).....	47
Tabela 4.5: Resultados do fluxo de potência ótimo para os três casos de curva de capacidade para o sistema teste WSCC3 de 3 geradores – 9 barras (caso sobrecarregamento em 150% da potência reativa).....	51
Tabela 4.6: Resultados obtidos (função objetivo) do fluxo de potência ótimo para os quatro casos de carregamento para o sistema teste WSCC3.....	55

Tabela 4.7: Resultados do fluxo de potência ótimo com a curva de capacidade completa para o sistema teste New England de 10 geradores – 39 barras.....	56
Tabela 4.8: Resultados do fluxo de potência ótimo para os três casos de curva de capacidade aplicados ao sistema teste New England de 10 geradores – 39 barras.....	57

# LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Diagrama fasorial em regime permanente da máquina síncrona de pólos salientes .....	11
Figura 2.2: Limaçon de Pascal para diferentes tensões no terminal do gerador em p.u.....	13
Figura 2.3: Limites da curva de capacidade do gerador síncrono em regime permanente .....	19
Figura 2.4: Curva de Capacidade completa do gerador síncrono em regime permanente.....	20
Figura 4.1: Limites de geração do gerador síncrono para condição de operação 1 ...	34
Figura 4.2: Curva de capacidade aproximada do gerador síncrono para condição de operação 2.....	35
Figura 4.3: Curva de capacidade completa do gerador síncrono para condição de operação 3.. ..	35
Figura 4.4: Diagrama unifilar e dados para fluxo de carga do sistema de teste WSCC3 de 3 geradores – 9 barras. [ANDE77], [BEDR03].....	<u>36</u>

Figura 4.5: Resultados do fluxo de potência ótimo do sistema WSCC3 de 3 geradores – 9 barras.....	37
Figura 4.6: Ponto de operação do gerador 1. Caso base .....	39
Figura 4.7: Ponto de operação do gerador 2. Caso base .....	40
Figura 4.8: Ponto de operação do gerador 3. Caso base .....	41
Figura 4.9: Perfil de tensões para os três casos propostos e para o sistema teste WSCC3 de 3 geradores – 9 barras (caso sobrecarregado em 50% da potência ativa).....	43
Figura 4.10: Ponto de operação do gerador 1. Caso sobrecarregamento da potência ativa .....	44
Figura 4.11: Ponto de operação do gerador 2. Caso sobrecarregamento da potência ativa .....	45
Figura 4.12: Ponto de operação do gerador 3. Caso sobrecarregamento da potência ativa .....	46
Figura 4.13: Ponto de operação do gerador 1 . Caso com potência reativa negativa.....	48

Figura 4.14: Ponto de operação do gerador 2 . Caso com potência reativa negativa.....	49
Figura 4.15: Ponto de operação do gerador 3 . Caso com potência reativa negativa.....	50
Figura 4.16: Ponto de operação do gerador 1. Caso sobrecarregamento da potência reativa.....	52
Figura 4.17: Ponto de operação do gerador 2. Caso sobrecarregamento da potência reativa.....	53
Figura 4.18: Ponto de operação do gerador 3. Caso sobrecarregamento da potência reativa.....	54
Figura 4.19: Perfil de tensões para os três casos de curvas de capacidade aplicados ao sistema teste New England de 10 geradores – 39 barras.....	58

# ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
DC	<i>Direct current</i>
FP	Fluxo de potência
FPO	Fluxo de potência ótimo
GRG	Gradiente reduzido generalizado
LAP	Lagrangeano Aumentado Projetado
MAE	Mercado Atacadista de Energia
MPI	Métodos de pontos interiores
MATLAB	Matrix laboratory
ng	Número total de geradores
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PIM	Programação linear inteira mista
PL	Programação linear
PNL	Programação não linear
PQ	Programação quadrática
PQS	Programação quadrática seqüencial
PSERC	Power Systems Engineering Research Center
SEE	Sistemas de energia elétrica
SEP	Sistema elétrico de potência
WSCC3	Sistema teste <i>Western System Coordinating Council</i> de 3 geradores
$d$	Eixo direto
$\delta$	Ângulo de potência
$E_a$	Tensão induzida interna do gerador
fp	Fator de potência
$X_d$	Reatância síncrona em eixo direto
$X'_d$	Reatância transitória em eixo direto
$X_q$	Reatância síncrona em eixo de quadratura
$I_a$	Corrente de armadura do gerador

$I_{ad}$	Componente retangular no eixo direto da corrente de armadura do gerador
$I_{aq}$	Componente retangular no eixo de quadratura da corrente de armadura do gerador
$I_{aMAX}$	Corrente de armadura máxima do gerador
$P_{mecMAX}$	Potência mecânica máxima
$q$	Eixo em quadratura
$S_{gNOM}$	Potência aparente nominal
$V$	Magnitude da tensão terminal do gerador

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Generalidades

A história da pesquisa do fluxo de potência ótimo (FPO) pode-se caracterizar como a aplicação de grandes progressos dos métodos de otimização dos anos 60's. O FPO constitui um problema de otimização não-linear estático que estima os ajustes ótimos das variáveis elétricas em um sistema de potência com os dados de carga e parâmetros do sistema.

O progresso dos métodos numéricos manifesta-se com as soluções de problemas maiores e mais complexos em um marco de tempo mais rápido. Historicamente a solução do despacho econômico pelo método dos custos incrementais iguais foi um precursor do FPO. Com a aplicação do FPO, a utilização do despacho econômico "clássico" tornou-se menor, no qual só eram consideradas as gerações de potência ativa e as restrições de igualdade do balanço de energia elétrica. Posteriormente foram consideradas restrições de desigualdade e de segurança nos algoritmos.

Nas referências [CARP93] e [SALG90] apresenta-se uma classificação dos algoritmos para resolver o FPO baseado na estrutura da solução juntamente com uma comparação numérica dos resultados.

Embora existam avanços notáveis, o fluxo de potência ótimo ainda é considerado um problema matemático difícil. Segundo alguns pesquisadores, em relação ao FPO em tempo real, ainda não estão disponíveis metodologias eficientes, pois na maior parte com os algoritmos atuais não é possível obter soluções confiáveis e rápidas. Mesmo assim, atualmente, o problema do FPO está sendo aplicado aos sistemas elétricos de potência que operam em ambiente desregulamentado.

Também, tem-se que desenvolver a curva de capacidade da máquina síncrona usando as equações deduzidas previamente para seus limites de operação sem que os

enrolamentos fiquem deteriorados nem a máquina perca estabilidade em regime permanente. Este modelo da curva de capacidade de máquinas síncronas é válido para geradores de pólos salientes e aqueles de pólos lisos, podendo também operar como motor.

Apresenta-se neste trabalho uma representação matemática exata dos limites da curva de capacidade, onde se consideram os limites nas correntes do rotor e da armadura, limite da potência mecânica da máquina primária, o limite de estabilidade permanente teórico e prático, e o limite de sub-excitação. Com isto, vai-se incluir uma representação detalhada do modelo da máquina síncrona em estado permanente em uma formulação de FPO.

Conseqüentemente, os geradores poderão trabalhar com margens mais amplas, perto de seus limites, oferecendo maiores faixas para as potências ativa e reativa geradas sem a perda da estabilidade. Assim, a curva de capacidade dos geradores deve ser incluída no FPO com a função objetivo para minimizar os custos dessas potências geradas.

## **1.2. Formulação do problema**

Devido às formulações convencionais do fluxo de potência ótimo (FPO) basearem-se somente na modelagem conhecida de fluxo de potência, onde os geradores são modelados como barras PV e conseqüentemente conduzir a resultados distantes da realidade; e também por razões de segurança os fabricantes indicarem limites pessimistas da capacidade da máquina síncrona, foi necessária uma representação mais realista da máquina, pois este elemento é de grande importância para a análise do sistema de potência, especialmente em condições de sobrecarregamento.

Para isso, as curvas de capacidade são obtidas utilizando-se os valores reais dos parâmetros da máquina síncrona, tais como reatância em eixo direto ( $X_d$ ), reatância em eixo de quadratura ( $X_q$ ), reatância transitória em eixo direto ( $X'_d$ ), potência nominal (MVA), tensão nominal (kV) e fator de potência da máquina (fp). Além disso, esses limites da curva de capacidade foram deduzidos levando em conta expressões da potência ativa e reativa, algumas identidades trigonométricas e, mais importante ainda, a metodologia da construção geométrica proposta pelos fabricantes e pesquisadores

[ZAWO01] [GOVE65]. Também, para obter o gráfico da curva completa de operação, utilizou-se como ferramenta um programa computacional desenvolvido na linguagem de programação do MATLAB, para que, conseqüentemente nesta curva de capacidade, possam-se examinar suas regiões e seus limites.

Finalmente, fazer a inclusão destes limites de operação da máquina nas restrições do fluxo de potência ótimo para sua conseguinte aplicação a dois sistemas teste: sistema WSCC3 de 3 geradores e o sistema New England de 10 geradores. No primeiro sistema, o teste fez-se com carga base, sobrecarregando em potência ativa e com potência reativa negativa. Já no segundo sistema teste, utilizou-se somente o carregamento base.

Os resultados são comparados com resultados de outros FPO convencionais que usam somente alguns limites da curva de capacidade.

### **1.3. Objetivos**

O objetivo geral é propor um método prático para resolver o problema do fluxo de potência ótimo (FPO) num sistema elétrico de potência (SEP), levando em conta as variáveis de controle, tais como a potência ativa e reativa, controle de tensão nas barras, com a finalidade de minimizar custos de geração da potência ativa e as perdas nas linhas de transmissão.

Um dos objetivos específicos mais relevantes deste trabalho é a inclusão no FPO das novas restrições de potência ativa e reativa, isto é, os limites máximo e mínimo dos geradores não serão aqueles aproximados, geralmente utilizados na literatura; serão mais exatos e de acordo com as restrições completas da curva de capacidade da máquina síncrona. A proposta é usar melhores restrições que resultam da curva de capacidade, com todos seus limites de operação que poderão ser aplicados a sistemas testes que tenham geradores hidráulicos e térmicos.

A solução do fluxo de potência ótimo permite conhecer o estado de operação, em regime permanente, do sistema de potência e também considerar situações futuras do SEP. Para obter essa solução, são utilizados diversos métodos clássicos tais como o

método de Newton, gradiente, programação linear, etc. Atualmente, o FPO é uma ferramenta importante para a operação adequada do sistema de potência.

No FPO, para atender uma determinada demanda total de um SEP, as potências ativas e reativas geradas devem ser pré-especificadas para cada gerador, sendo o custo associado com essa geração um indicador da quantidade de potência ativa que deve ser gerada (despacho econômico clássico); já o custo pelo fornecimento de potência reativa tem pouca atenção, embora, atualmente, exista uma maior pesquisa no desenvolvimento de novas metodologias, a fim de se determinar uma remuneração apropriada da potência reativa dos geradores [GIL00].

Outro objetivo específico do presente desenvolvimento é a comparação dos resultados de três casos diferentes para os limites das variáveis da curva de capacidade: potências ativa e reativa geradas. Sendo o primeiro com limites máximo e mínimo (FPO clássico); o segundo uma região com três limites e o terceiro, a curva de capacidade completa proposta com seus cinco limites.

#### **1.4. Justificativa**

Até agora nos problemas do FPO não se consideram os limites reais de operação dos geradores, porém, com a inclusão de todos esses limites propostos neste trabalho, a otimização do FPO pode ser melhorada, ainda mais quando nesse FPO a função objetivo é igual ao custo total de geração da potência ativa.

A curva e as equações desenvolvidas no presente trabalho também podem contribuir nos sistemas elétricos de supervisão e de controle para o desenvolvimento de um grande número de ferramentas de apoio à operação, a partir do tratamento adequado das mesmas.

O uso das curvas de capacidade que resultam das equações reais para os limites de estabilidade da máquina síncrona serão aos poucos incorporadas para a operação do sistema elétrico, e nas análises mais imediatas que são feitas nos estudos da fase de planejamento da operação para horizontes de tempo mais longos [MACH04].

Além disso, a visualização do ponto de operação em conjunto com a curva de capacidade passa a ser de grande utilidade toda vez que permite a prevenção de

possíveis violações nos limites de absorção de potência reativa nas unidades geradoras e possíveis insucessos.

O FPO, como muitos outros programas não-lineares, é às vezes propenso a um mau condicionamento e a uma convergência difícil, por isso recomenda-se que a pesquisa futura nos aspectos de programação de FPO deva ser focada nessas dificuldades básicas. E a solução encontra-se em nossa habilidade de resolver vários problemas de engenharia que evitam a utilização de muitos artifícios matemáticos.

### **1.5. Metodologia**

Em relação à metodologia de trabalho, a pesquisa foi desenvolvida no laboratório de sistemas de potência do Departamento de Engenharia de Eletricidade da UFMA, baseada em técnicas de análise e síntese.

Fez-se uma pesquisa bibliográfica dos diferentes enfoques e dos métodos de resolução do FPO publicados nos últimos 40 anos com a finalidade de escolher o método ou técnica já desenvolvida mais conveniente para o estudo a ser feito.

Também se procurou a bibliografia para conhecer melhor a operação do gerador síncrono nas proximidades dos limites de estabilidade e os métodos para traçar as curvas de capacidade, usando as equações matemáticas que foram desenvolvidas com os parâmetros reais de uma máquina em operação [NAGY70], [NILS94].

Finalmente, foram incluídas essas equações dos limites da curva de capacidade da máquina síncrona nas restrições do FPO e também foi incluída na função objetivo o custo total da potência ativa gerada.

### **1.6. Estrutura do trabalho**

O desenvolvimento do trabalho começa no Capítulo 2, com a dedução, representação e apresentação dos limites da curva de capacidade, considerado o mais importante desta dissertação, e utilizando como ferramenta de programação o MATLAB.

No capítulo 3, são apresentados os conceitos associados às metodologias do FPO, métodos de solução existentes e desafios dele, para logo incluir os limites da curva de operação da máquina síncrona no FPO.

No capítulo 4, com a intenção de validar esta nova metodologia, utilizou-se dois sistemas testes: WSCC3 de 3 geradores e New England de 10 geradores. São apresentados os resultados e logo comparados com os resultados de outros FPO convencionais que usam só alguns dos limites de operação dos geradores.

No capítulo 5, apresentam-se as conclusões e contribuições do presente trabalho, assim como possíveis trabalhos futuros.

# 2. CURVA DE CAPABILIDADE DO GERADOR SÍNCRONO

## 2.1. Introdução

A curva de capacidade da máquina síncrona de pólos salientes é uma região onde ela deve operar sem que seus enrolamentos fiquem deteriorados. Antigamente, a curva de capacidade chamava-se diagrama de operação P-Q ou carta de capacidade e tinha somente uma construção geométrica, existindo informação bibliográfica desses métodos nas referências [GOVE65], [WALK52], [IEEE90]; porém essa forma da construção é complexa e muito laboriosa.

Neste capítulo será desenvolvido um conjunto de equações algébricas para os principais limites da curva de capacidade da máquina síncrona para o qual se usam as expressões da potência ativa e reativa, conhecidas nas disciplinas de engenharia elétrica. Também os parâmetros da máquina síncrona hidráulica ou térmica, sejam de pólos salientes ou rotor cilíndrico, e algumas identidades trigonométricas. Dá-se uma especial importância à dedução e ao estudo dos limites de estabilidade teórico e prático em estado estável da máquina com a finalidade de verificar os limites permissíveis de geração das potências ativa e reativa. Estas equações ainda não foram desenvolvidas e não foram apresentadas na literatura. Desse modo, a contribuição deste trabalho foi desenvolver essas equações matemáticas dos limites reais que constituem a curva de capacidade da máquina síncrona, sendo incorporadas ao FPO.

Conseqüentemente, agora se pode fazer a construção da curva de capacidade da máquina síncrona com todos seus limites usando suas verdadeiras equações deduzidas previamente, para sua conseguinte visualização, obtendo-se seu gráfico automaticamente no computador em forma fácil, eficiente e direto. As deduções são

também válidas para a operação da máquina síncrona como motor em regime permanente.

Neste trabalho, não são considerados outros limites porque na maioria dos casos ficam fora da região de operação, sendo, ainda assim, providos e recomendados pelos fabricantes. Alguns deles são: limites de tensão máxima e mínima nos terminais do gerador, limite de relé de corrente sub-excitado, limites de tensão máxima e mínima dos serviços auxiliares e limites de Volts/Hz no regulador de tensão [ADIB94]. Tem-se também o limite de aquecimento final do núcleo provocado pelas correntes parasitas, que são induzidas pelo sistema nas partes de aço da armadura [MECR91], [ZAWO01].

## **2.2. A curva de capacidade do gerador síncrono**

Pode-se definir a curva de capacidade como um conjunto de limites físicos, os quais definem a região de operação do gerador síncrono. Os limites operacionais representam principalmente os limites físicos impostos pelo fabricante para manter o funcionamento adequado da máquina síncrona [HEFF52]., embora existam outros limites que foram adicionados como consequência de novos controladores e para procurar condições específicas de operação.

No planejamento e operação dos sistemas elétricos de potência, distintos componentes são modelados em diferentes maneiras visando realizar diversos tipos de análise, como por exemplo: análise estática, análise dinâmica de estabilidade transitória, análise dinâmica de estabilidade permanente, análise eletromagnética, entre outros. Em particular para análise dinâmica eletromecânica, os modelos dos geradores síncronos são determinados basicamente pelas equações diferenciais do comportamento dinâmico da máquina e seus controladores, e as condições iniciais impostas pelas equações algébricas que representam a interação dos geradores com a rede elétrica de transmissão e cargas. Neste caso, é necessário ressaltar que o comportamento dinâmico deve ser mantido entre limites operacionais o qual corresponde a adicionar restrições em diversas variáveis das equações do sistema. Como consequência disso, a modelagem para análise estática propõe uma relaxação do monitoramento dos limites operacionais no comportamento dinâmico, focalizando o problema para o comportamento de estado

estável ou quase estacionário; assim, o grau de complexidade do problema é diminuído facilitando o seu uso nos problemas da operação e planejamento.

Usando a teoria de dois eixos aplicada numa máquina síncrona de pólos salientes foi possível deduzir as equações que representam os limites da curva de operação da máquina síncrona no modo gerador, enfatizando que é possível completar o diagrama de operação no modo motor de forma fácil, pois esta curva é simétrica com relação ao eixo horizontal.

Agora para a dedução e a diagramação dos limites propostos, usam-se somente os parâmetros básicos de projeto de máquinas síncronas, tais como: reatância no eixo direto ( $X_d$ ), reatância no eixo de quadratura ( $X_q$ ), reatância transitória no eixo direto ( $X'_d$ ), tensão nos terminais do gerador ( $V$ ), potência aparente nominal ( $S_{gNOM}$ ), potência mecânica máxima dada pela máquina primária ( $P_{mecMAX}$ ) e fator de potência da máquina síncrona (fp).

### **2.3. Limites da curva de capacidade do gerador síncrono**

Nesta seção serão apresentadas as principais características da curva de capacidade bem como a formação das equações algébricas e trigonométricas dos limites operacionais que constituem a curva de capacidade.

A análise do presente trabalho está restrita ao modo de operação da máquina síncrona no regime permanente com condições definidas pelas seguintes suposições:

a) Toda variação no carregamento tem um intervalo de tempo muito pequeno, então qualquer perturbação é pequena e desprezível.

b) Em todos os casos a máquina síncrona está operando em paralelo com um sistema elétrico de grande porte, isto é, conectada numa barra infinita com tensão constante e sem afeito pelas mudanças de carregamento na máquina em operação.

c) Pode-se ignorar a saturação magnética, justificando-se porque um dos problemas mais importantes da máquina síncrona, tal como a estabilidade, usualmente está relacionada com uma baixa excitação (sem saturação).

d) Os limites associados à tensão nos terminais do gerador estão sendo levados em conta quando é realizado o controle de tensão em barras.

e) Os limitadores de mínima excitação não são considerados devido sua análise depender exclusivamente do tipo de regulador de tensão que possui a máquina síncrona e ao ajuste de parâmetros. Isto pode ser importante quando o gerador é exigido a trabalhar freqüentemente na região de sub-excitação.

Então, a curva de capacidade é associada com o conjunto de limites físicos dos distintos dispositivos do gerador síncrono e eles definem a região de operação para uma análise estática. Nas próximas seções, são apresentados os principais limites da curva de capacidade do gerador síncrono que se consideraram neste trabalho.

### 2.3.1. Potência ativa e reativa

O diagrama vetorial convencional do gerador síncrono de pólos salientes alimentando uma carga com fator de potência em atraso é mostrado na Figura 2.1, em que  $d$  e  $q$  são os eixos, direto e em quadratura, respectivamente,  $E_a$  é o vetor da tensão induzida interna do gerador,  $V$  é o vetor da tensão terminal do gerador,  $\delta$  é o ângulo entre a tensão terminal e o eixo em quadratura  $q$  (ângulo de potência),  $X_d$  e  $X_q$  são as reatâncias síncrona do eixo direto e em quadratura, o valor da resistência da armadura é desprezível;  $I_a$  representa a corrente de armadura,  $I_{ad}$  e  $I_{aq}$  são as componentes retangulares no eixo direto e no eixo em quadratura da corrente de armadura do gerador [ANDE93].

Neste diagrama fasorial, desprezando a resistência do enrolamento de armadura, tem-se a equação (2.1) correspondente:

$$E_a \angle \delta = V + jX_q I_{aq} \angle \delta + jX_d I_{ad} \angle \delta \quad (2.1)$$

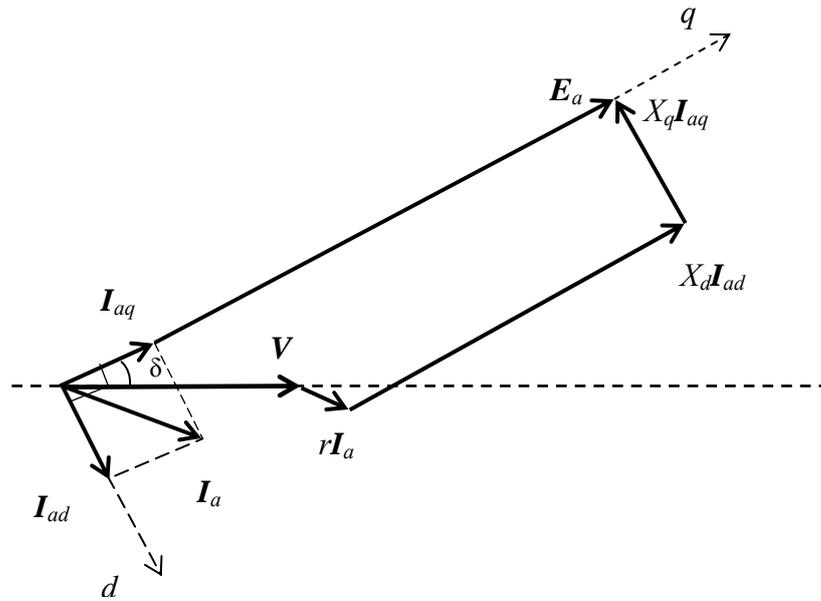


Figura 2.1: Diagrama fasorial em regime permanente da máquina síncrona de pólos salientes

Lembrando que  $S_G = P_G + jQ_G = V.I_a^*$  pode-se calcular as potências ativa e reativa do gerador síncrono através das equações (2.2).

$$P = \frac{VE_a}{X_d} \text{sen} \delta + \frac{V^2}{2} \left( \frac{X_d - X_q}{X_d \cdot X_q} \right) \text{sen} 2\delta \quad (2.2a)$$

$$Q = \frac{VE_a}{X_d} \cos \delta + \frac{V^2}{2} \left( \frac{X_d - X_q}{X_d \cdot X_q} \right) \cos 2\delta - \frac{V^2}{2} \left( \frac{X_d + X_q}{X_d \cdot X_q} \right) \quad (2.2b)$$

Para simplificar, definem-se as variáveis:

$$m = \frac{VE_a}{X_d} \quad (2.3)$$

$$s = \frac{V^2}{2} \left( \frac{X_d - X_q}{X_d \cdot X_q} \right) \quad (2.4)$$

$$n = \frac{V^2}{2} \left( \frac{X_d + X_q}{X_d \cdot X_q} \right) \quad (2.5)$$

Substituindo as equações (2.3), (2.4) e (2.5) nas equações (2.2) obtêm-se as expressões simplificadas para as potências de geração (2.6).

$$P = m.\text{sen}\delta + s.\text{sen}2\delta \quad (2.6a)$$

$$Q = m.\text{cos}\delta + s.\text{cos}2\delta - n \quad (2.6b)$$

### 2.3.2. Limite térmico do enrolamento do campo

O limite térmico é determinado pela corrente máxima que pode suportar os enrolamentos do rotor sem que fiquem deteriorados. Este limite é definido como o lugar geométrico da tensão induzida máxima (a corrente de campo máxima é proporcional à tensão induzida). Para encontrar a equação correspondente, primeiro elevam-se ao quadrado as equações (2.6) para logo substituir na expressão da potência aparente (2.7).

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (2.7)$$

Além disso, devem-se usar as equivalências trigonométricas de ângulo duplo e ângulo triplo para obter-se:

$$S^2 = m^2 + (s + n)^2 + 2mn.\text{cos}\delta - 2n.(Q + s + n) \quad (2.8)$$

Agora, para simplificar, faz-se um deslocamento no eixo horizontal:

$$\hat{Q} = Q + s + n \quad (2.9)$$

Substituindo (2.7) e (2.9) em (2.8), temos.

$$P^2 + \hat{Q}^2 = m^2 + 2.s.\hat{Q} + 2.m.s.\text{cos}\delta \quad (2.10)$$

Definindo

$$R^2 = P^2 + \hat{Q}^2 \quad (2.11)$$

Em que também se cumpre:

$$P = R.\text{sen}\delta \quad (2.12)$$

$$\hat{Q} = R \cdot \cos \delta \quad (2.13)$$

Substituindo (2.11) e (2.13) em (2.10) temos:

$$R^2 = m^2 + 2 \cdot s \cdot (R \cdot \cos \delta) + 2 \cdot m \cdot s \cdot \cos \delta \quad (2.14)$$

Resolvendo a equação (2.14) obtêm-se:

$$R = m + 2 \cdot s \cdot \cos \delta \quad (2.15)$$

A equação (2.15) traçada na forma polar no plano  $P$ - $Q$  é o lugar geométrico da potência aparente para um valor constante da corrente de campo, sendo o limite máximo a curva obtida com a máxima corrente de campo que o enrolamento de campo pode suportar.

A curva obtida com a equação (2.15) denomina-se Limaçon de Pascal e representa o limite térmico do enrolamento de campo mostrado na Figura 2.2.

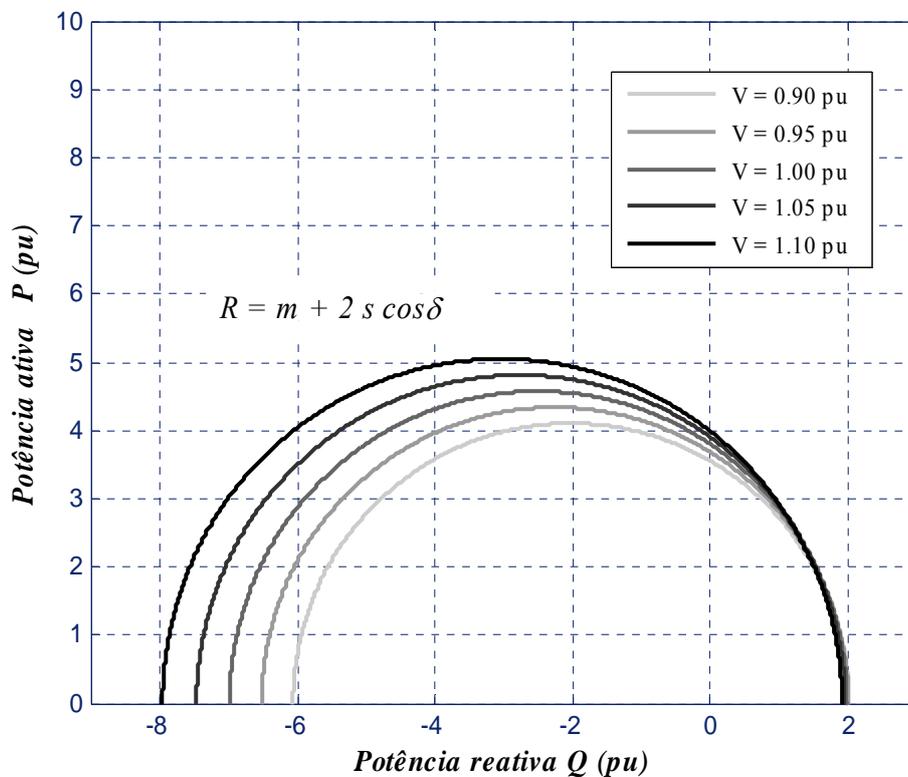


Figura 2.2: Limaçon de Pascal para diferentes tensões no terminal do gerador em p.u.

### 2.3.3. Limite da potência mecânica da máquina primária

Para o gerador a máxima capacidade da máquina primária fica representada no plano  $P$ - $Q$  com uma reta paralela ao eixo  $Q$  e passando pelo ponto  $P_{mecMAX}$  (potência limite da máquina primária). Normalmente, a potência mecânica máxima é colocada em função da  $S_{gNOM}$ , e pode ser usado um fator do limite mecânico de acordo com a expressão:

$$P_{mecMAX} = k.S_{gNOM} \quad (2.16)$$

Onde  $k$  é um fator para encontrar a potência mecânica máxima.

### 2.3.4. Limite térmico do enrolamento de armadura

Este limite térmico é determinado pela corrente máxima que pode suportar o enrolamento de armadura. Na literatura, este limite é considerado como o lugar geométrico para a corrente de armadura máxima constante, o qual corresponde à equação de uma circunferência com centro na origem de coordenadas no plano  $Q$ - $P$ .

$$\left(V.I_{aMAX}^*\right)^2 = P^2 + Q^2 \quad (2.17)$$

### 2.3.5. Limite de estabilidade permanente teórico e prático

Os limites anteriores (limite de corrente de armadura, limite de corrente de campo e limite de potência mecânica) definem a operação do gerador na região de sobre-excitação (geração de reativos), que é a região que na maioria das vezes opera. Algumas vezes é exigida a operação na região de sub-excitação (consumo de reativos). Como consequência, devem ser definidos os seguintes limites: o limite de estabilidade permanente teórico e o limite de estabilidade permanente prático.

Anteriormente, a condição teórica de estabilidade de regime estável definia que o deslocamento angular não ultrapassasse o máximo ângulo imposto para a máxima potência ativa. Esta condição foi formulada a partir das equações de potência-ângulo dos geradores. Assim sendo, usam-se as equações anteriores para obter a potência ativa máxima em tais condições.

Utilizando-se as equivalências trigonométricas de ângulo duplo em função de  $\cos \delta$  na equação (2.6b), tem-se como resultado uma equação quadrática que, após ser resolvida, obtém-se a equação (2.18):

$$\cos \delta = -\frac{m}{4s} \pm \sqrt{\frac{m^2}{16s^2} + \left(\frac{q+s}{2s}\right)} \quad (2.18)$$

Utilizando a equação (2.18) e as equações (2.6) obtém-se a equação (2.19).

$$P^2 = \frac{m^2}{2} + s^2 - (Q+n)^2 \pm \sqrt{\frac{m^2}{4} + 2m^2s(Q+n) + 2m^2s^2} \quad (2.19)$$

Procurando simplificar faz-se a seguinte alteração de variável:

$$q = Q + n \quad (2.20)$$

A equação (2.20) é substituída na equação (2.19) e logo com o objetivo de encontrar uma expressão para a potência ativa máxima em função da potência reativa  $Q$ , obtém-se a primeira derivada da equação (2.19) sobre  $q$  e iguala-se a zero.

$$\frac{dP^2}{dq} = 0 \quad (2.21)$$

Obtendo-se:

$$-2q \pm \frac{1}{2} \left( \frac{m^2}{4} + 2m^2sq + 2m^2s^2 \right)^{\frac{1}{2}} 2m^2s = 0 \quad (2.22)$$

Da equação (2.22) isolamos o termo  $(2m^2sq)$  para substituir na equação (2.19) e logo se obtém:

$$P_{\max}^2 = \frac{m^2}{2} + s^2 - q^2 \pm \frac{m^2s}{4q} \quad (2.23)$$

Por outro lado, arrumando convenientemente as equações (2.6), tem-se:

$$m^2 = \frac{8 \cdot s \cdot q^2}{s - q} \quad (2.24)$$

Finalmente, substitui-se a equação (2.24) em (2.23) para encontrar a expressão da potência ativa máxima em função de  $Q$ , que é dada por (2.25):

$$P_{\max}^2 = \frac{(s + n + Q)^3}{s - n - Q} \quad (2.25)$$

Sendo os limites de  $Q$ :

$$-n - s \leq Q \leq -n + s$$

O equivalente da equação (2.25) em função dos parâmetros da máquina é dado por (2.26):

$$P_{\max}^2 = - \frac{\left( \frac{V^2}{X_q} + Q \right)^3}{\frac{V^2}{X_d} + Q} \quad (2.26)$$

Onde a variação de  $Q$  é:

$$-\frac{V^2}{X_q} \leq Q \leq -\frac{V^2}{X_d}$$

A expressão matemática (2.25) ou (2.26), quando é traçada no sistema de coordenadas  $P$ - $Q$ , representa o limite de estabilidade permanente teórico da máquina síncrona de pólos salientes, onde  $Q$  é o valor que faz que  $P$  seja máximo. A curva resultante é assintótica com relação ao limite superior de  $Q$ .

Na prática não é aceito o limite teórico e para encontrar o limite prático é necessário deixar uma margem de estabilidade disponível em todos os casos igual a 10% ou 20% da potência ativa nominal [WEED89]. Em consequência, o limite de estabilidade prático define-se como:

$$P_{\text{limite prático}} = P_{\text{limite teórico}} - K(P_{\text{nominal}}) \quad (2.27)$$

Em que  $K$  tem um valor de 0.1 até 0.2

Para o caso particular da máquina síncrona de rotor cilíndrico, esse limite de estabilidade permanente é uma paralela ao eixo vertical e que passa pela intersecção com o eixo horizontal no ponto  $Q = -V^2/X_d$ .

### 2.3.6. Limite mínimo da corrente de excitação

Historicamente, este limite foi estudado por Nagy [NAGY70] e basicamente é obtido pelo lugar geométrico da corrente mínima de excitação evitando a operação inversa da fonte DC da excitação (corrente negativa). Teoricamente o lugar geométrico no plano P-Q corresponde à corrente de excitação zero que pode ser construído diretamente quando o Limaçon de Pascal possuir uma excitação zero ( $E_a = 0$ ). Pode-se demonstrar que este lugar geométrico é igual à circunferência com raio  $s$  e traçado entre as ordenadas  $-V^2/X_q$  e  $-V^2/X_d$  de acordo com a equação (2.28).

$$P^2 + (Q + n)^2 = s^2 \quad (2.28)$$

O raio  $s$  é zero para uma máquina de rotor cilíndrico, onde as reatâncias nos eixo direto e eixo em quadratura são iguais.

Os geradores normalmente não têm provisão para fornecer corrente negativa de campo. Então, nestas condições, o sistema não pode reduzir a tensão até zero e conseqüentemente a corrente de campo do gerador, a valores iguais ou menores que zero; é usual limitar a corrente de campo até um valor mínimo de 5% do requerido à carga nominal [NAGY70].

## 2.4. Curva de capacidade completa do gerador síncrono

Na seção 2.3, foram apresentados os principais limites operacionais que formam a típica curva de capacidade do gerador síncrono. Com o objetivo de propor uma curva de capacidade mais útil na análise estática, foram escolhidos os seguintes limites:

- 1) Limite de corrente de campo
- 2) Limite máximo de potência mecânica

- 3) Limites de corrente de armadura
- 4) Limite de estabilidade permanente teórico e prático (estabilidade de estado estável).
- 5) Limite mínimo da corrente de excitação.

Todas as equações desses limites são levadas a um mesmo sistema de coordenadas, que resulta na curva de capacidade do gerador síncrono em regime permanente mostrada na Figura 2.3. Utilizaram-se os dados da referência [ANDE93], tais como:  $S_g = 247.5$  MVA,  $V = 16.5$  kV,  $X'_d = 0.0608$  (p.u.),  $X_d = 0.146$  (p.u.),  $X_q = 0.0969$  (p.u.),  $f_p = 0.85$  e  $P_{mecMAX} = 0.9$ .

Na Figura 2.4, mostra-se a curva de capacidade completa do gerador síncrono de pólos salientes em regime permanente, com seus 5 limites e o limite teórico de estabilidade. Também, mostram-se as coordenadas de cada uma das interseções destes limites e a região de operação.

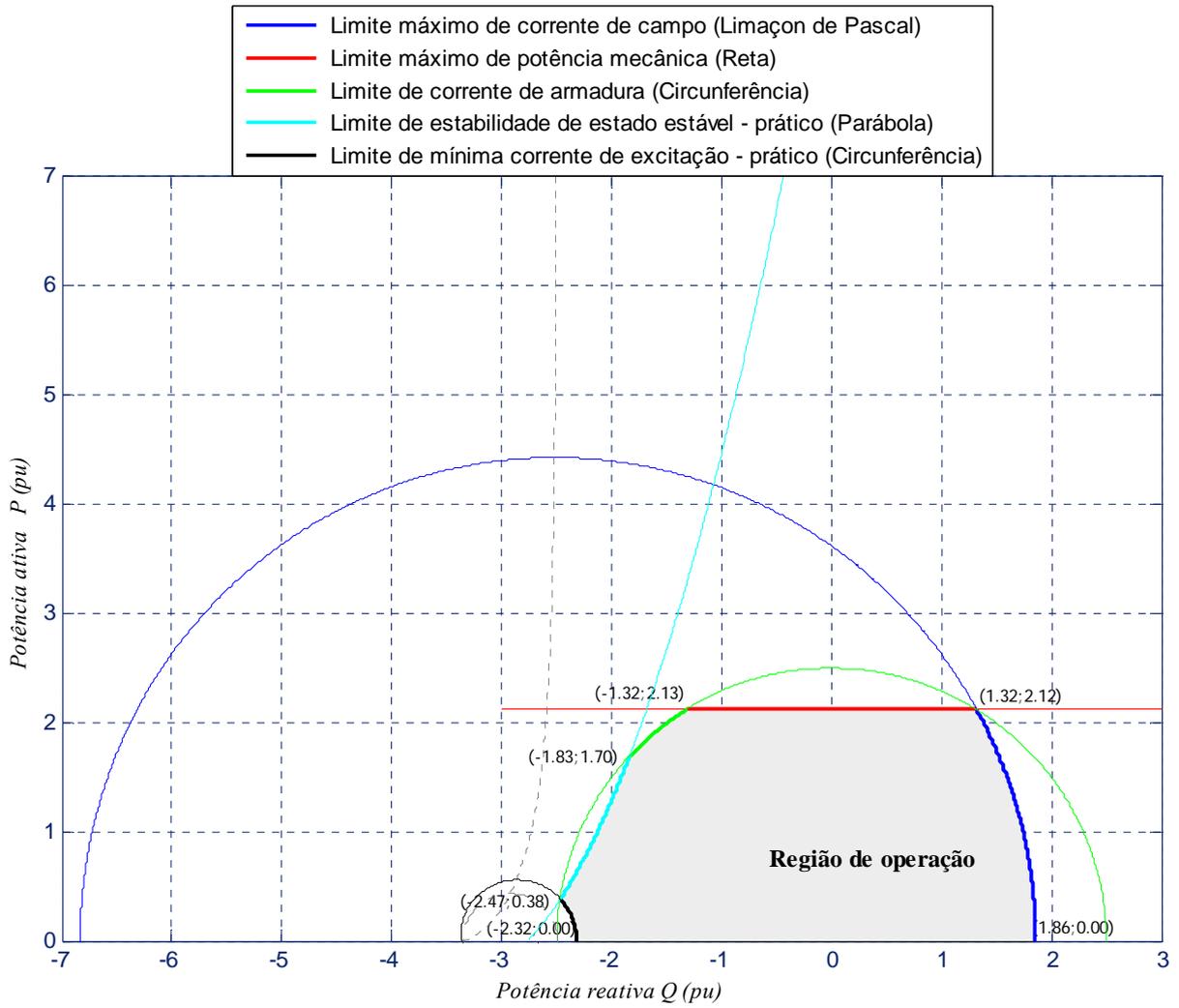


Figura 2.3: Limites da curva de capacidade do gerador síncrono em regime permanente

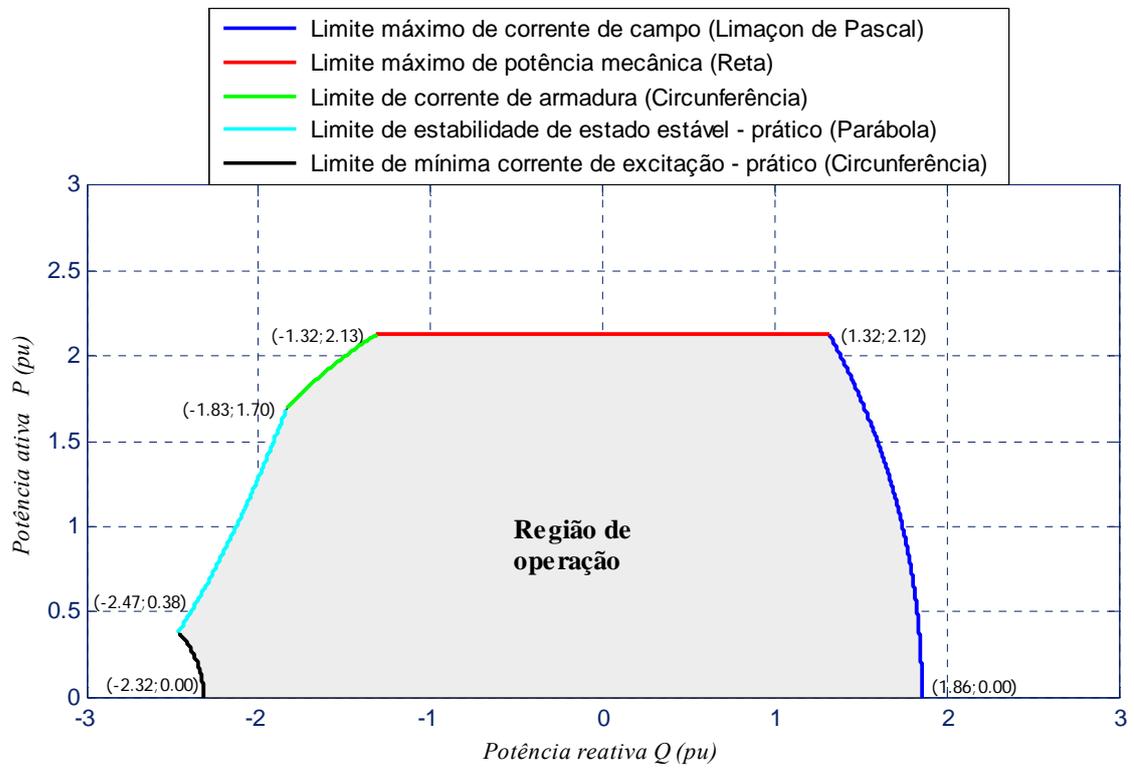


Figura 2.4: Curva de Capabilidade completa do gerador síncrono em regime permanente

# 3. INCLUSÃO DA CURVA DE CAPABILIDADE COMPLETA NO FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO

## 3.1. Introdução

A solução das equações do problema do fluxo de potência permite conhecer o estado atual do sistema e modelar situações futuras de forma relativamente simples. Entretanto, esta abordagem apresenta as seguintes limitações: a) necessidade da pré-especificação do valor de certas variáveis de controle, b) dificuldade na modelagem de restrições de desigualdade, c) dificuldade para modelar ações de controles simultâneos, e d) impossibilidade da associação de custo à operação dos sistemas elétricos de potência (SEP). Para contemplar estas limitações do problema de fluxo de potência, utiliza-se uma ferramenta denominada fluxo de potência ótimo (FPO) [CARP62], [DOMM68], [RAMO05].

No capítulo 2, foram deduzidas equações correspondentes a vários limites de operação que compõem a curva de capacidade da máquina síncrona. Essa curva de capacidade representa com maior detalhamento a região de operação da máquina síncrona. A inclusão desses limites de operação no modelo do fluxo de potência ótimo, especificamente incluídas dentro do conjunto das restrições de desigualdade, deve permitir uma avaliação mais precisa dos valores de operação das potências ativa e reativa de geração da máquina síncrona.

Assim mesmo é possível visualizar o comportamento da máquina síncrona dentro da curva de capacidade para diferentes valores da corrente de campo e da corrente de armadura. Esta visualização da operação da máquina dentro da curva de capacidade vai permitir uma interpretação prática e fácil do funcionamento e do

requerimento da máquina para sua operação ótima, evitando aquecimento dos enrolamentos ou perda de sincronismo com a conseguinte deterioração dos enrolamentos ou perda de estabilidade dentro de um sistema elétrico de potência.

Também se pode utilizar a curva de capacidade para fazer uma melhor análise computacional do ponto de operação da máquina síncrona conectada na rede de energia elétrica para diferentes situações de carregamento, desde carregamento indutivo puro até carregamento capacitivo, variando o fator de potência; onde esse ponto de operação vai tocando cada um dos limites da curva de capacidade, ou seja, pode-se analisar visualmente a operação da máquina, confinada dentro da região factível de operação.

### **3.2. Fluxo de potência ótimo**

O problema do fluxo de potência ótimo (FPO) pode ser modelado como um problema de otimização não-linear, não convexo, que calcula um conjunto de variáveis ótimas de estado e controle da rede, a partir dos dados de carga e dos parâmetros do sistema. O problema de FPO consiste em otimizar (minimizar ou maximizar) uma função objetivo enquanto deve ser satisfeito um conjunto de restrições físicas e operacionais impostas pelas limitações dos equipamentos e exigências de segurança.

O fluxo de potência ótimo é uma ferramenta utilizada em estudos dos sistemas elétricos de potência. Seus resultados e suas análises devem-se aplicar no planejamento da expansão, na operação dos sistemas, na otimização dos sistemas elétricos, na análise de estabilidade, nos resultados de contingências, no controle e análise de sistemas em tempo real. Constantemente são desenvolvidos e discutidos diversos algoritmos, utilizando as mais diversas metodologias.

#### **3.2.1. Desenvolvimentos de fluxo de potência ótimo**

A primeira formulação matemática de um FPO foi apresentada em 1962 por Carpentier, em que o problema foi resolvido pela aplicação das condições de Karush-Kuhn-Tucker (KKT) [WRIG97] e a utilização de um método do tipo relaxação. Esta formulação inicial era extremamente complexa, pouco eficiente e apresentava sérios problemas de convergência [BAPT04].

Nesta mesma década, em 1968, foi apresentado por Dommel e Tinney um método de gradiente reduzido, no qual as variáveis do problema são divididas em variáveis independentes, que são as variáveis de controle ( $u$ ) (gerações, tensões em barras de carga e ângulos de tensões) [DOMM68]. As restrições funcionais e as restrições de canalização sobre as variáveis de estado são incluídas na função objetivo através de sinalizações quadráticas externas. Este método do gradiente apresentou problemas de oscilação em torno da solução ótima, além de uma sensibilidade excessiva do processo de convergência em relação ao tamanho do gradiente. Contudo, este método continua apresentando interesse do ponto de vista didático por sua formulação ser simples e o desenvolvimento intuitivo. Na década de 70, vários aperfeiçoamentos foram propostos para as formulações originais, mas nenhum avanço significativo foi alcançado quando se analisa os quesitos de robustez e velocidade computacional.

As maiores contribuições dos anos 70 consistiram em um aperfeiçoamento do método de Dommel e Tinney de 1968 através da utilização do método de gradiente reduzido generalizado (GRG) [GILL81] ao invés do gradiente reduzido. A essência deste método está na transformação das desigualdades funcionais em restrições de igualdade, pela introdução de variáveis de folga  $e$ , quando uma variável dependente é violada, é automaticamente transformada em variável independente, e, ao mesmo tempo uma das variáveis independentes é transformada em variável dependente. As desvantagens deste método são: falta de critério para a troca entre variáveis dependentes e independentes e a necessidade de iniciar o processo iterativo com uma solução viável.

Métodos de otimização baseados em modelos lineares de SEP também foram publicados nos anos 70, destacando-se os trabalhos de pesquisa de Stott e Hobson [STOT77] e Stott e Marinho [STOT78], ambos utilizando técnicas de programação linear (PL) [WRIG97].

Os métodos publicados nas décadas de 60 e 70 utilizavam modelos de primeira ordem. Uma contribuição desta época são os métodos baseados em programação linear seqüencial, utilizados até os dias atuais. Mas estas metodologias apresentavam várias deficiências, estabelecendo a necessidade do desenvolvimento de métodos de segunda ordem que fossem capazes de resolver o problema de FPO de forma rápida e eficiente.

A década de 80 trouxe avanços consideráveis para a solução do problema de FPO. Em [BURC82] foi apresentado um dos primeiros métodos de segunda ordem que obteve sucesso. Nesse trabalho foi utilizado o método do Lagrangeano aumentado projetado (LAP), em que a função objetivo é o Lagrangeano aumentado e as restrições são linearizadas. A principal desvantagem deste método é que a matriz Hessiana se torna extremamente densa.

Um aperfeiçoamento deste método foi proposto em [BURC84], onde se utilizou programação quadrática seqüencial (PQS) (com aproximação quadrática da função objetivo e linearização das restrições). Nesta metodologia, o problema original era transformado em uma seqüência de problemas quadráticos.

Nas referências [SUN84], [SUN87] e [TINN87] são propostos métodos de programação quadrática resolvidos pelo método de Newton–Raphson com um cálculo exato da matriz Hessiana.

Em [PERE91] foi apresentada uma metodologia de PQS, na qual foram utilizadas técnicas de desacoplamento dos subproblemas de potência ativa e de potência reativa, além de técnicas eficientes para o tratamento de matrizes esparsas com o objetivo de reduzir o custo computacional.

Wu, Granville e La Torre nas referências [WU94], [GRAN94] e [LATO95] o FPO foi modelado utilizando o método dos pontos interiores (MPI) [KARM84], alcançando bons resultados na otimização de sistemas elétricos de potência (SEP).

Castronuovo em [CAST01] propôs uma metodologia para a vetorização de problemas de FPO. Esta metodologia apresentou bom desempenho em computadores com arquiteturas que utilizam processamento paralelo.

Um trabalho sobre o tratamento de variáveis discretas utilizando MPI foi publicado por Liu [LIU02] em que o método utilizado garante que o resultado final das variáveis sejam valores discretos mas não garante o ótimo global.

Em [SANT03] foi proposto um método heurístico para resolver problemas não conexos, este método utiliza execuções sucessivas do MPI. Também é apresentado um tratamento para variáveis discretas.

### 3.2.2. Formulação do modelo de FPO

A formulação do FPO a ser apresentada corresponde ao modelo de um problema de otimização sujeito às restrições das equações de fluxo de potência e à minimização/maximização de um índice de desempenho, considerando as limitações de operação do sistema. Dependendo do índice de desempenho, podem-se definir diferentes problemas de otimização para um mesmo sistema.

#### *As variáveis do FPO*

As variáveis do FPO são: a tensão complexa em cada barra, transformadores em fase e defasadores, capacitores, reatores; também podem ser as potências ativas e reativas de geração, limite máximo de transmissão em uma linha, transações contratadas entre barras, etc. Podem-se adicionar outras variáveis dependendo do objetivo do estudo e do método de otimização utilizado.

#### *Função objetivo*

Existe uma grande variedade de funções objetivo que são possíveis de utilizar na operação da rede elétrica, com relação ao objetivo do estudo. No FPO, algumas das mais utilizadas são:

- Mínimo custo de geração de potência ativa;
- Mínimo custo de geração de potência reativa;
- Minimização das perdas de potência ativa;
- Mínimo desvio de uma distribuição de potência ativa pré-especificada;
- Mínimo desvio de um perfil de tensões pré-especificado;
- Mínimo corte de carga;
- Mínima ação de controle;
- A combinação das anteriores, em um único problema multi-objetivo.

### *As restrições de igualdade*

Esta restrição é determinada pelas equações da rede de transmissão iguais às do problema de fluxo de potência. Adicionalmente podem ser incluídas no problema de otimização restrições que modelam características particulares da operação do sistema como uma combinação de variáveis do sistema.

### *As restrições de desigualdade*

São os limites impostos a uma variável ou conjunto de variáveis do sistema. Em relação a sua função, podem ser classificados em três grandes grupos :

- Restrições físicas: impostos pelos limites de capacidade dos componentes do sistema. Têm-se limites máximo e mínimo de geração de potência ativa e reativa das unidades geradoras. Limites nos valores dos taps dos transformadores, limites de transmissão de potência aparente em linhas de transmissão, limites da capacidade de geração de potência reativa dos componentes shunts, etc

- Restrições operacionais: a operação do sistema impõe limites que devem ser considerados na modelagem, limites máximo e mínimo da magnitude da tensão nas barras, abertura angular máxima entre barras, etc.

- Restrições de segurança: as restrições de segurança representam outro grupo de restrições relacionadas a um conjunto de contingências determinadas pela análise de segurança em tempo real. O resultado da análise de segurança é uma operação ótima do sistema.

A formulação do FPO pode ser reescrita como um problema de programação não linear padrão, dada pela expressão (3.1):

$$\begin{aligned} & \text{Min } f(x) \\ \text{s.a. } & \quad g(x) = 0 \\ & \quad h^l \leq h(x) \leq h^u \\ & \quad x^l \leq \hat{I}x \leq x^u \end{aligned} \tag{3.1}$$

Em que:

$x \in \mathfrak{R}^{nx}$  são as variáveis de decisão,

$f(x) : \mathfrak{R}^{nx} \rightarrow \mathfrak{R}$  é a função objetivo,

$g(x) : \mathfrak{R}^{nx} \rightarrow \mathfrak{R}^{ndg}$  são as restrições de igualdade,

$h(x) : \mathfrak{R}^{nx} \rightarrow \mathfrak{R}^{ndh}$  são as restrições de desigualdade,

$h^u$  e  $h^l$  são os limite superior e inferior de  $h(x)$ , respectivamente e

$I_x : \mathfrak{R}^{nx} \rightarrow \mathfrak{R}^{ndx}$  é um sub vetor de  $x$  que tem limites  $x^u$  e  $x^l$  limite superior e inferior, respectivamente.

### 3.2.3. Métodos de solução do FPO

O fluxo de potência ótimo é um termo genérico que descreve um conjunto de problemas nos quais se tenta otimizar a função objetivo especificada e também devem ser satisfeitas as restrições definidas pelos detalhes operacionais e físicos da rede elétrica. Então, as formulações convencionais do FPO apontam para reduzir ao mínimo os gastos de operação satisfazendo as restrições representadas pelos balanços de potência ativa e reativa nas barras em termos de tensões e de ângulos da fase.

Uma variedade de técnicas de otimização foi usada para a solução de problemas de FPO. As técnicas podem ser classificadas como: [MOMO99]

1. Programação não linear (PNL),
2. Programação quadrática (PQ),
3. Método de Newton - solução baseada em condições de otimização,
4. Programação linear (PL),
5. Versões híbridas da programação linear e da programação inteira,
6. Métodos de pontos interiores (MPI).

A seguir vamos detalhar brevemente cada um deles:

### 1. Programação não-linear (PNL)

A programação não-linear (PNL) ocupa-se dos problemas que implica funções objetivo não-lineares e das funções de restrições. As restrições podem consistir em formulações de igualdade e/ou desigualdade, sendo que as formulações de desigualdade podem ser especificadas com base em um valor máximo ou mínimo.

### 2. Programação quadrática (PQ)

A programação quadrática é uma forma especial de programação não linear, onde a função objetiva é quadrática com restrições lineares. Vários métodos de PQ nesta categoria foram utilizados para solucionar problemas como o do fluxo de potência ótimo (perdas, despacho econômico). Os métodos de Newton são baseados em sensibilidade e foram usados para solucionar problemas de FPO em tempo real

### 3. Método de Newton - soluções baseadas em condições de otimização

Neste método de aproximação, as condições necessárias de otimização são designadas comumente pelas condições de Karush-Kuhn-Tucker. Em geral, são equações não lineares que requerem métodos iterativos de solução. O método de Newton é favorável por suas características de convergência quadrática.

### 4. Programação linear (PL)

Esse método é conveniente para os problemas de programação linear com restrições e função objetivo formulados em forma linear com variáveis não negativas. O método simplex [WOOD94] é conhecido pelo bom desempenho na solução de problemas desse tipo.

Aproximadamente 25% dos artigos científicos publicados resolvem os problemas de FPO usando técnicas baseadas em PL [HUNE91]. A técnica mais comumente usada é a revisão do método simplex. As funções objetivo (tensões, perdas, despacho econômico e potência reativa) são linearizadas para permitir uma solução com PL.

### 5. Programação linear inteira mista (PIM)

A programação linear inteira mista (PIM) é um tipo particular de programação linear onde as equações de restrições são constituídas de variáveis inteiras. A programação inteira mista, a programação de número inteiro e também a programação não-linear têm extrema exigência de recurso computacional e o número de variáveis discretas é um importante indicador da dificuldade do problema da PIM para ser solucionado.

Este método utiliza uma mistura das técnicas de programação linear e programação com número inteiro para solucionar problemas típicos de sistemas de potência. A técnica matemática de otimização assume os objetivos lineares e as restrições são umas combinações lineares e não linear com variáveis inteiras ou discretas [ALSA90].

#### 6. Método de pontos interiores (MPI)

O método de pontos interiores foi descoberto recentemente por Karmarkar [KARM84], surpreendendo todos os pesquisadores, pois este esquema soluciona a programação linear mais rapidamente e é melhor que o algoritmo simplex convencional. As aplicações do método de pontos interiores aos problemas de PNL e PQ apresentam resultados com melhores qualidades e promissores.

Dos métodos conhecidos para resolver um problema de FPO, o que se adapta às restrições de desigualdade é o método de programação linear (ademais do método de pontos interiores) já que o problema a ser resolvido é semelhante ao que pode ser linearizado sem perda de precisão. Os métodos de Newton e o gradiente oferecem muitas dificuldades para trabalhar com restrições de desigualdade.

#### **3.2.4. Desafios do FPO**

A típica estrutura vertical do sistema de energia elétrica está mudando para uma estrutura horizontal em que a geração, transmissão e distribuição da energia elétrica são consideradas como setores separados. Entre as novas propostas, considera-se que a geração é competitiva, enquanto a transmissão tende a ser um monopólio regulado. No caso do sistema brasileiro, novas instituições como a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico), CCEE (Câmara de

Compensação de Energia Elétrica), anteriormente MAE (Mercado Atacadista de Energia), entre outras, constituem parte das evidências do processo de mudanças no seu setor elétrico iniciado em 1995. Nesse contexto, em que a eletricidade é considerada um bem que pode ser comercializado em um mercado, é que surgem os mercados elétricos competitivos [ILIÇ98].

De acordo com os princípios econômicos do mercado de livre acesso, o objetivo global dos sistemas de energia elétrica é satisfazer a demanda do serviço elétrico ao menor custo possível, considerando adequados níveis de confiabilidade, qualidade e segurança do serviço.

É evidente que neste novo ambiente os mercados elétricos são competitivos. Considera-se necessário, então, analisar as metodologias de cálculo dos pagamentos e encargos pelo serviço de eletricidade para assegurar a viabilidade técnica e econômica dos SEE. E também os custos de geração da potência ativa e reativa têm que ser regulados pelo próprio mercado elétrico.

Os recentes desenvolvimentos incluem no FPO cálculo de preços marginais nos novos mercados elétricos. Nesse contexto, a eletricidade é considerada um bem que pode ser comercializado. Uma formulação apropriada do problema e uma efetiva metodologia de solução são necessárias para a real aplicação do FPO em sistemas de potência. Atualmente, o FPO é implementado na maioria dos novos centros de controle. Apesar disso, ainda é utilizado efetivamente em poucos sistemas [RAMA68]. Alguns desafios que o FPO tem que superar para ser uma ferramenta confiável para a operação em tempo real são os seguintes:

- Resposta rápida
- Robustez da solução
- Número de controles afetados na solução
- Modelagem de variáveis discretas
- Inclusão das transações econômicas bilaterais.
- Inclusão de variáveis ambientais e mecânicas.

### 3.3. Equações da curva de capacidade no FPO

As equações da curva de capacidade representam os limites de operação da máquina síncrona em estado estável e devem ser incluídos nas restrições de desigualdade no FPO.

Alguns pesquisadores já formularam o problema de FPO incluindo modelo detalhado dos geradores [FONT04]. Porém, as equações reais desenvolvidas no capítulo 2 deste trabalho ainda não foram utilizadas. Portanto, deve-se fazer a inclusão delas no problema de FPO.

#### 3.3.1. Função objetivo

No presente trabalho a função objetivo dada pela equação (3.2) é o custo total de geração de potência ativa pelos geradores do sistema em R\$/h.

$$\text{Min} \sum_{i=1}^{ng} C_i(P_{Gi}) \quad i = 1, \dots, ng \quad (3.2)$$

Em que  $C_i(P_{Gi}) = a + bP_{Gi} + cP_{Gi}^2$ , onde  $a$ ,  $b$  e  $c$  são coeficientes determinados pelas respectivas concessionárias geradoras

#### 3.3.2. Restrições da curva de capacidade completa

As restrições de igualdade são as equações de fluxo de potência (3.3):

$$\sum_{j=1}^{nb} V_i V_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) - P_{Gi} + P_{Di} = 0 \quad ; \quad i = 1, \dots, nb \quad (3.3a)$$

$$\sum_{j=1}^{nb} V_i V_j Y_{ij} \sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) - Q_{Gi} + Q_{Di} = 0 \quad ; \quad i = 1, \dots, nb \quad (3.3b)$$

As restrições convencionais de desigualdade das variáveis de controle eram utilizadas como limites fixos para a potência ativa ( $P_{min}$  e  $P_{máx}$ ) e para a potência reativa ( $Q_{min}$  e  $Q_{máx}$ ). Nesta nova formulação, os limites das potências são aquelas apresentadas no Capítulo 2 e, para sua inclusão nas restrições do FPO, devem-se escrever da seguinte forma:

$$\sqrt{P^2 + (Q + s + n)^2} - m - 2.s \cdot \frac{(Q + s + n)}{\sqrt{P^2 + (Q + s + n)^2}} \leq 0 \quad (3.4a)$$

$$P - k(S_{gNOM}) \leq 0 \quad (3.4b)$$

$$P^2 + Q^2 - (VI_{aMAX})^2 \leq 0 \quad (3.4c)$$

$$(s + n + Q)^3 - (s - n - Q) \cdot P_{\max}^2 \leq 0 \quad (3.4d)$$

$$P^2 + (Q + n)^2 - s^2 \leq 0 \quad (3.4e)$$

As equações (3.4), correspondem aos limites da corrente de campo, limite de potência mecânica, limite da corrente de armadura, limite de estabilidade permanente e limite mínimo da corrente de excitação respectivamente e foram reescritas a partir das equações (2.15), (2.16), (2.17), (2.25) e (2.28).

As variáveis de controle do FPO nesta formulação são: a magnitude da tensão em cada barra com limites mínimo e máximo vista nas equações (3.5) e as potências ativas e reativas de geração cujos limites são definidos pela curva de capacidade.

$$V^{\min} \leq V \leq V^{\max} ; i = 1, \dots, nb \quad (3.5a)$$

$$P_G^{\min} \leq P_G \leq P_G^{\max} ; i = 1, \dots, ng \quad (3.5b)$$

$$Q_G^{\min} \leq Q_G \leq Q_G^{\max} ; i = 1, \dots, ng \quad (3.5c)$$

# 4. APLICAÇÃO A SISTEMAS

## TESTE E RESULTADOS

### 4.1. Introdução

Nesta metodologia usada para validar as equações da curva de capacidade foi implementado um modelo de fluxo de potência ótimo (FPO), onde se incluiu as equações da curva de capacidade nas restrições de desigualdade e o programa computacional foi codificado em MATLAB, versão 7.0.

Os sistemas de potência utilizados nos testes foram: sistema WSCC3 (Western System Coordinating Council) de 9 barras e 3 geradores; e o sistema New England de 39 barras e 10 geradores. No primeiro sistema teste, considerou-se caso base de carregamento e caso de sobrecarregamento e no segundo sistema teste se considerou somente os dados do caso base.

Foram consideradas três versões da curva de operação do gerador síncrono, escolhidas da literatura de acordo com as seguintes características:

#### *Curva de operação 1*

Usando limites de valor constante das potências ativa e reativa (FPO clássico) como se mostra na Figura 4.1. Neste caso, foi usado o pacote de arquivos do programa computacional MATPOWER [ZIMM05] desenvolvido para solucionar problemas de fluxo de potência e fluxo de potência ótimo, de propriedade de *Power Systems Engineering Research Center* (PSERC).

#### *Curva de operação 2*

Esta curva corresponde a uma curva de operação aproximada, de três limites, mostrada na Figura 4.2. Neste caso, usam-se as equações propostas na referência [LOF95] e os algoritmos correspondentes foram desenvolvidos em [RIDE02].

### Curva de operação 3

Esta curva é obtida usando a curva de capacidade completa da máquina síncrona (de cinco limites) mostrada na Figura 4.3. A obtenção dessa curva foi desenvolvida no presente trabalho de pesquisa e o programa computacional correspondente foi codificado na plataforma MATLAB 7.0 da companhia *The Math Works*, Inc. O formato de dados dos arquivos de entrada é uma variação do formato de dados da referência [ZIMM05].

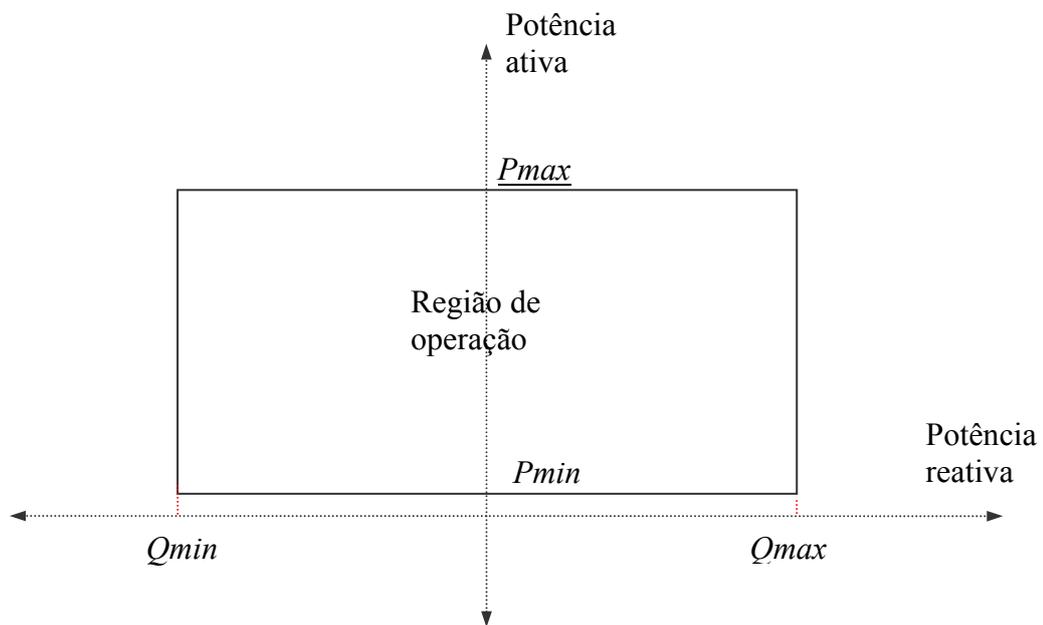


Figura 4.1: Limites de geração do gerador síncrono para condição de operação 1

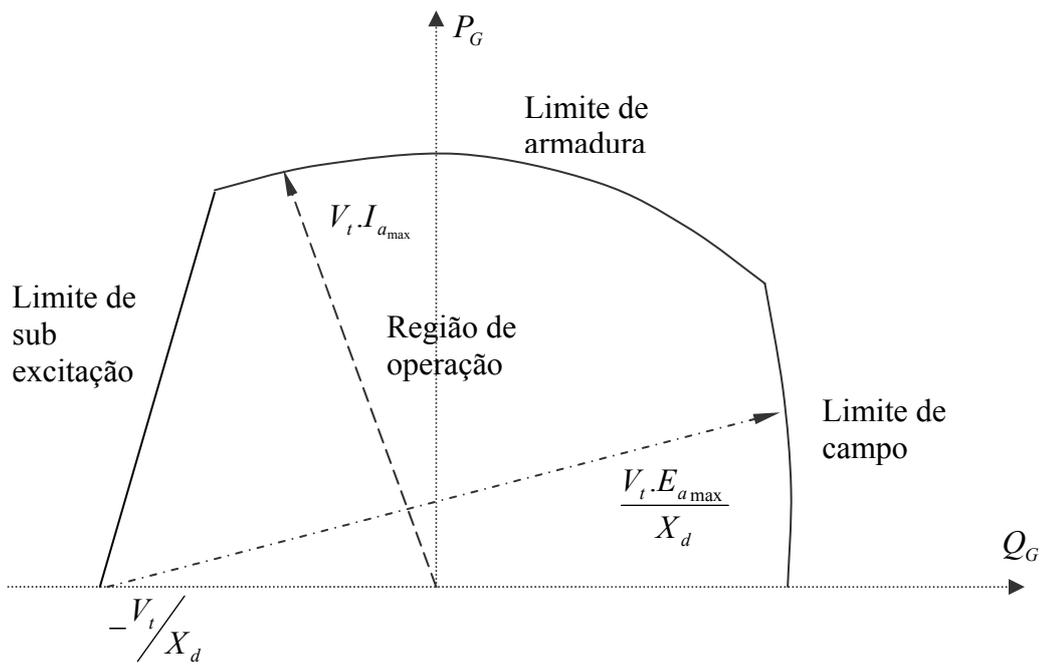


Figura 4.2: Curva de capacidade aproximada do gerador síncrono para condição de operação 2

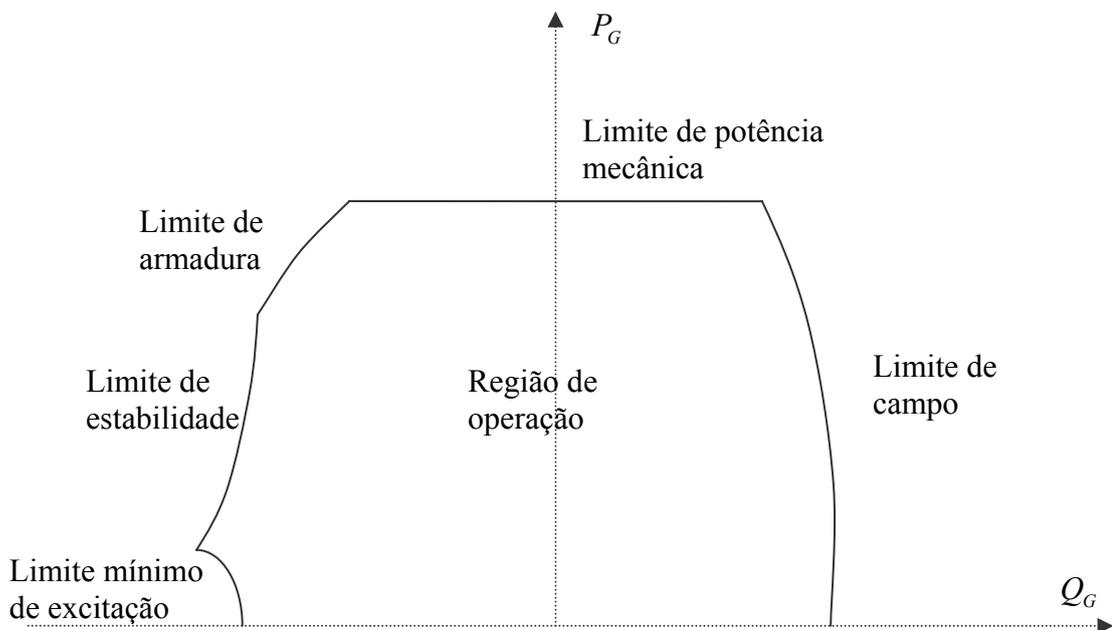


Figura 4.3: Curva de capacidade completa do gerador síncrono para condição de operação 3

## 4.2. Sistema WSCC3 de 3 geradores

O sistema WSCC3 usado por Anderson e Fouad [ANDE77] é composto de 3 geradores, 9 barras, 11 ramos e 3 cargas que totalizam 315MW de potência ativa e 115MVAR de potência reativa, como é mostrado na Figura 4.4. Os dados do sistema, que serviram como base para as simulações, podem ser encontrados no Apêndice A.

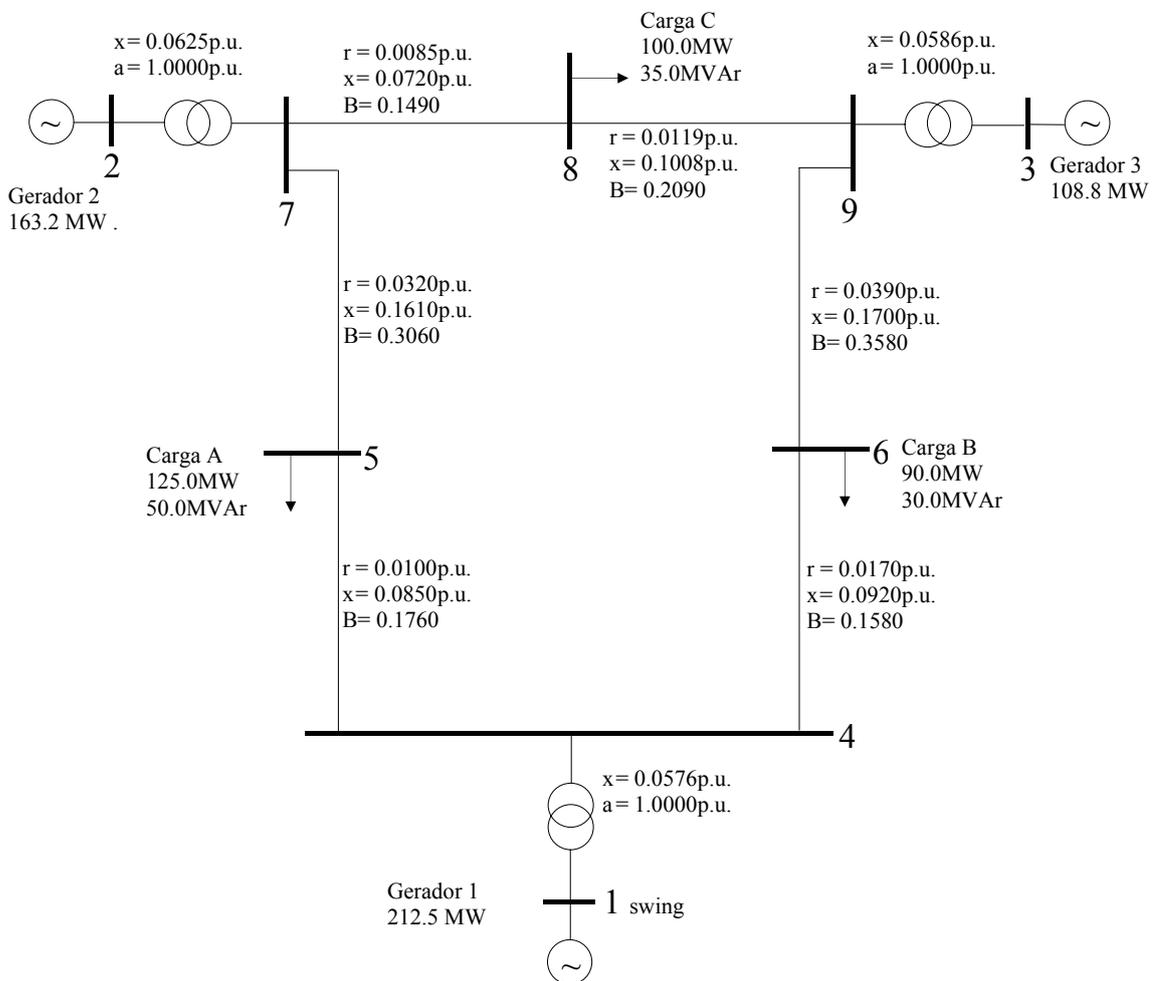


Figura 4.4: Diagrama unifilar e dados para fluxo de carga do sistema de teste WSCC3 de 3 geradores – 9 barras. [ANDE77], [BEDR03]

Caso 1 (carregamento base)

Os resultados do fluxo de potência ótimo, considerando a curva de capacidade completa do gerador síncrono, são apresentados na Figura 4.5, onde são mostradas as gerações de potência ativa (MW), as potências reativas geradas (MVar), os fluxos de potência ativa nos ramos (MW), os fluxos de potência reativa nos ramos (MVar) e as magnitudes de tensões nas barras (p.u).

A função objetivo é o custo total da potência ativa gerada e tem um valor de 5296.68 R\$/h , conforme Tabela 4.1.

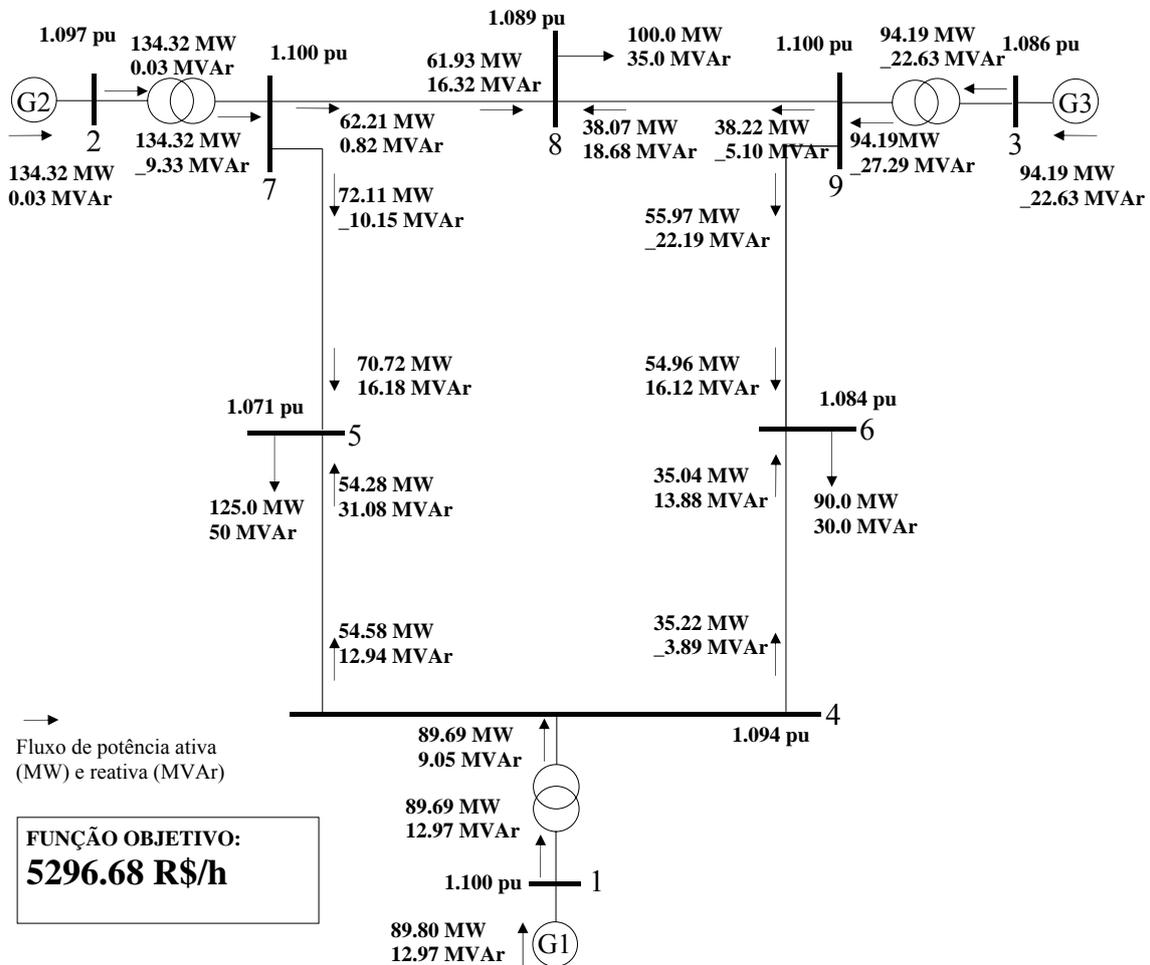


Figura 4.5: Resultados do fluxo de potência ótimo do sistema WSCC3 de 3 geradores – 9 barras.

Tabela 4.1: Resultados do fluxo de potência ótimo com a curva de capacidade completa para o sistema teste WSCC3 de 3 geradores – 9 barras.

Barra	Nome		Tipo	Modulo V (p.u.)	Ângulo V (graus)	Geração (MW)	Geração (MVA <sub>r</sub> )
1	Barra	1	VTh	1.1000	0.000	89.80	12.97
2	Barra	2	PV	1.0974	4.893	134.32	0.03
3	Barra	3	PV	1.0866	3.248	94.19	-22.63
4	Barra	4	PQ	1.0942	-2.463	-	-
5	Barra	5	PQ	1.0718	-4.618	-	-
6	Barra	6	PQ	1.0844	-3.982	-	-
7	Barra	7	PQ	1.1000	0.905	-	-
8	Barra	8	PQ	1.0895	-1.197	-	-
9	Barra	9	PQ	1.1000	0.601	-	-

Mostram-se também os pontos de operação dos 3 geradores com a curva de capacidade completa proposta neste trabalho para o caso base, nas figuras 4.6, 4.7 e 4.8. Tem-se a curva de capacidade do gerador 1, 2 e 3, respectivamente, com o ponto inicial de iteração de cor azul e o ponto de convergência final de cor vermelha. Obteve-se 18 iterações para um carregamento do caso base; também se tem os valores da potência reativa e ativa em p.u. (Coordenadas do ponto final). Observa-se que todo o cenário de convergência é próximo do centro da região de operação factível. O gerador 1 é de tipo hidráulico e os outros dois são térmicos.

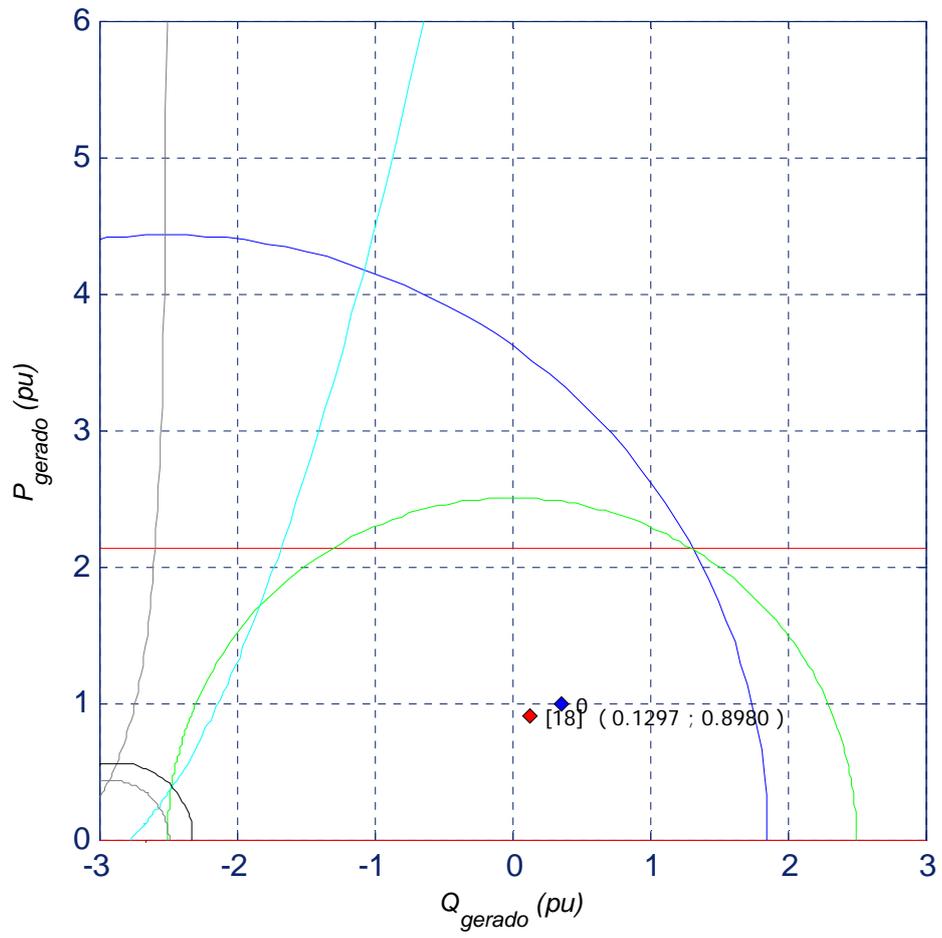


Figura 4.6: Ponto de operação do gerador 1. Caso base

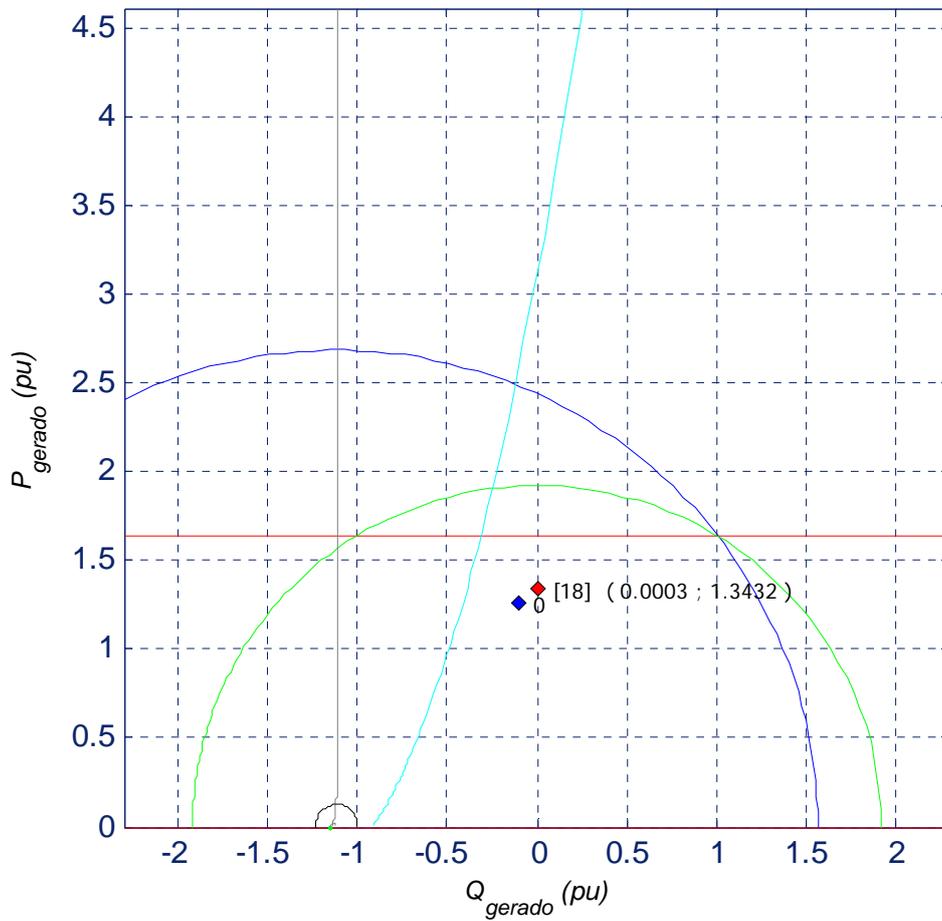


Figura 4.7: Ponto de operação do gerador 2. Caso base

Na Figura 4.7, o limite de estabilidade teórica é quase uma reta e o limite de corrente mínima de excitação é muito pequena devido aos geradores 2 e 3, que são do tipo térmico, onde as reatâncias nos eixos direto e quadratura têm valores aproximados.

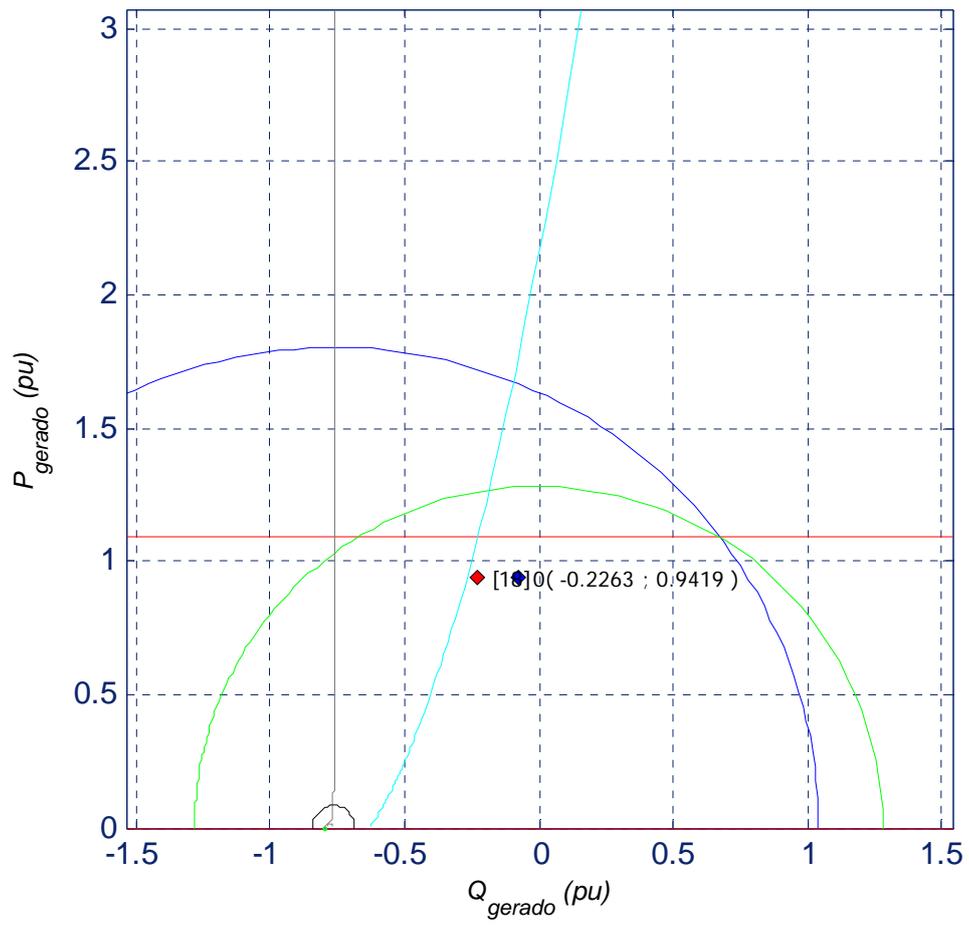


Figura 4.8: Ponto de operação do gerador 3. Caso base.

Agora, considera-se cada uma das três curvas de operação definidas anteriormente para a solução do FPO, ou seja, primeiro considerando limites fixos (curva 1), segundo com três limites na curva de capacidade (curva 2) e terceiro com a curva de capacidade completa (curva 3). Os resultados são mostrados na Tabela 4.2. É apresentada uma comparação dos resultados obtidos para as variáveis de controle: tensões nas barras (p.u.), potências ativas (MW) e reativas geradas (MVar) para cada uma das três curvas de operação com respectivos valores da funções objetivo (R\$/h).

Tabela 4.2: Resultados do fluxo de potência ótimo para os três casos de curva de capacidade para o sistema teste WSCC3 de 3 geradores – 9 barras (caso base)

B A R R A	CURVA 1			CURVA 2			CURVA 3		
	f.o.=5296.69 R\$/h			f.o.=5296.68 R\$/h			f.o.=5296.68 R\$/h		
	V (p.u.)	P <sub>G</sub> (MW)	Q <sub>G</sub> (MVar)	V (p.u.)	P <sub>G</sub> (MW)	Q <sub>G</sub> (MVar)	V (p.u.)	P <sub>G</sub> (MW)	Q <sub>G</sub> (MVar)
1	1.100	89.800	12.970	1.100	89.80	12.97	1.100	89.80	12.97
2	1.097	134.32	0.030	1.097	134.32	0.03	1.097	134.32	0.03
3	1.087	94.190	-22.630	1.086	94.19	-22.63	1.086	94.19	-22.63
4	1.094	-	-	1.094	-	-	1.094	-	-
5	1.072	-	-	1.071	-	-	1.071	-	-
6	1.084	-	-	1.084	-	-	1.084	-	-
7	1.100	-	-	1.100	-	-	1.100	-	-
8	1.089	-	-	1.089	-	-	1.089	-	-
9	1.100	-	-	1.100	-	-	1.100	-	-

Observa-se que na utilização das três curvas de capacidade para a comparação os resultados são quase iguais, isso porque o ponto de operação fica próximo do centro da região factível e não chega a tocar nenhum limite da curva de operação.

#### Caso 2 (sobrecarregamento da potência ativa)

Então, para conseguir tocar alguns dos limites da curva de operação, vai-se aumentar o carregamento da potência ativa em 50% em cada barra de carga, mantendo a potência reativa em mesmo valor. Os resultados são apresentados na tabela 4.3

Tabela 4.3: Resultados do fluxo de potência ótimo para os três casos de curva de capacidade para o sistema teste WSCC3 de 3 geradores – 9 barras (caso sobrecarregamento em 50% da potência ativa)

B	CURVA 1			CURVA 2			CURVA 3		
A	f.o.=10164.94 R\$/h			f.o.=10168.68 R\$/h			f.o.=10802.02 R\$/h		
R									
R	V (p.u.)	P <sub>G</sub> (MW)	Q <sub>G</sub> (MVA <sub>r</sub> )	V (p.u.)	P <sub>G</sub> (MW)	Q <sub>G</sub> (MVA <sub>r</sub> )	V (p.u.)	P <sub>G</sub> (MW)	Q <sub>G</sub> (MVA <sub>r</sub> )
A									
1	1.100	159.13	29.10	1.100	159.43	31.92	1.100	206.01	30.91
2	1.100	192.00	15.23	1.087	191.82	8.26	1.100	163.20	11.27
3	1.092	128.00	-10.20	1.095	127.92	-4.40	1.092	108.80	-11.14
4	1.088	-	-	1.086	-	-	1.089	-	-
5	1.058	-	-	1.054	-	-	1.061	-	-
6	1.073	-	-	1.072	-	-	1.075	-	-
7	1.097	-	-	1.088	-	-	1.097	-	-
8	1.084	-	-	1.079	-	-	1.084	-	-
9	1.100	-	-	1.100	-	-	1.100	-	-

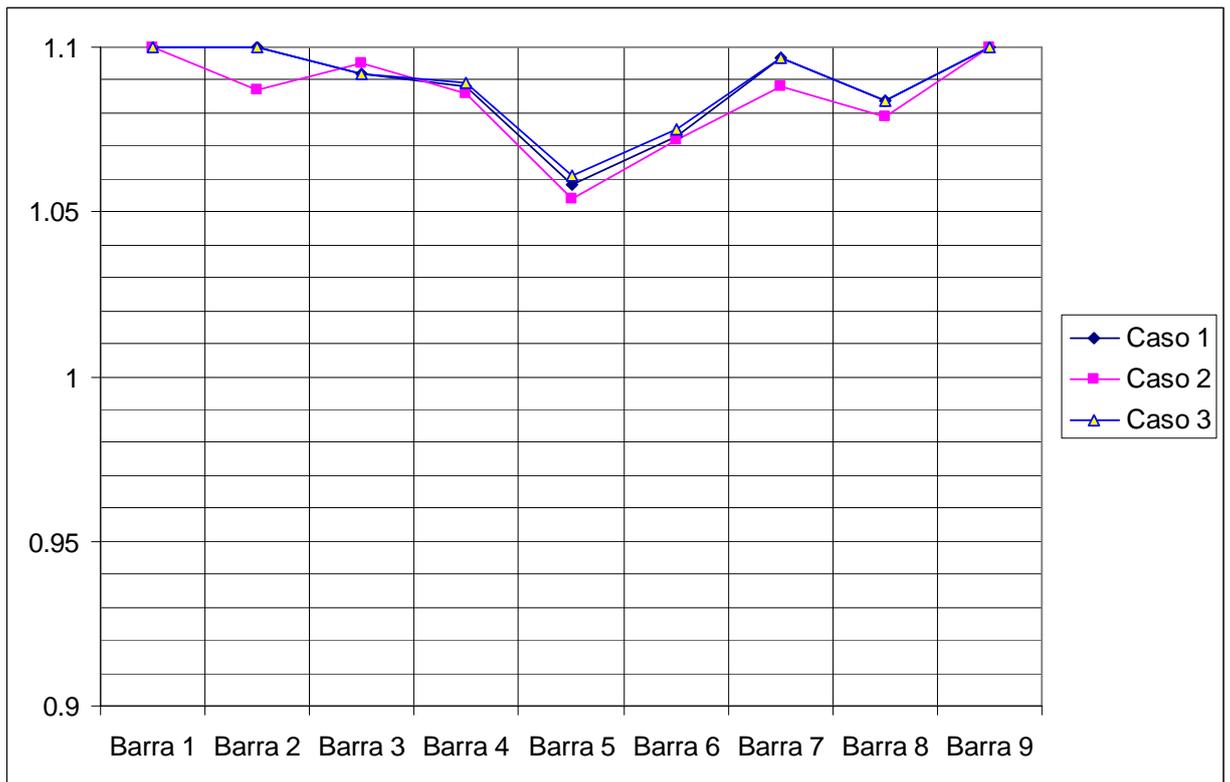


Figura 4.9: Perfil de tensões para os três casos propostos e para o sistema teste WSCC3 de 3 geradores – 9 barras (caso sobrecarregamento em 50% da potência ativa)

Para este caso de sobrecarregamento, mostra-se um gráfico de perfil de tensões obtidas com cada uma das curvas de capacidade na Figura 4.9. Têm-se também os pontos de operação para cada um dos geradores nas figuras 4.10, 4.11 e 4.12 para os geradores 1, 2 e 3, respectivamente, com a curva de capacidade proposta neste trabalho, com um carregamento da potência ativa aumentada em 50% e potência reativa igual ao caso base. Convergência final com 13 iterações; mostram-se os valores das potências reativa e ativa em p.u. (Coordenadas do ponto final de cor vermelha). Na Figura 4.10 observa-se que no gerador 1 não chega a tocar o limite mecânico, mas fica próximo dele. Esta é uma curva de capacidade típico de um gerador hidráulico.

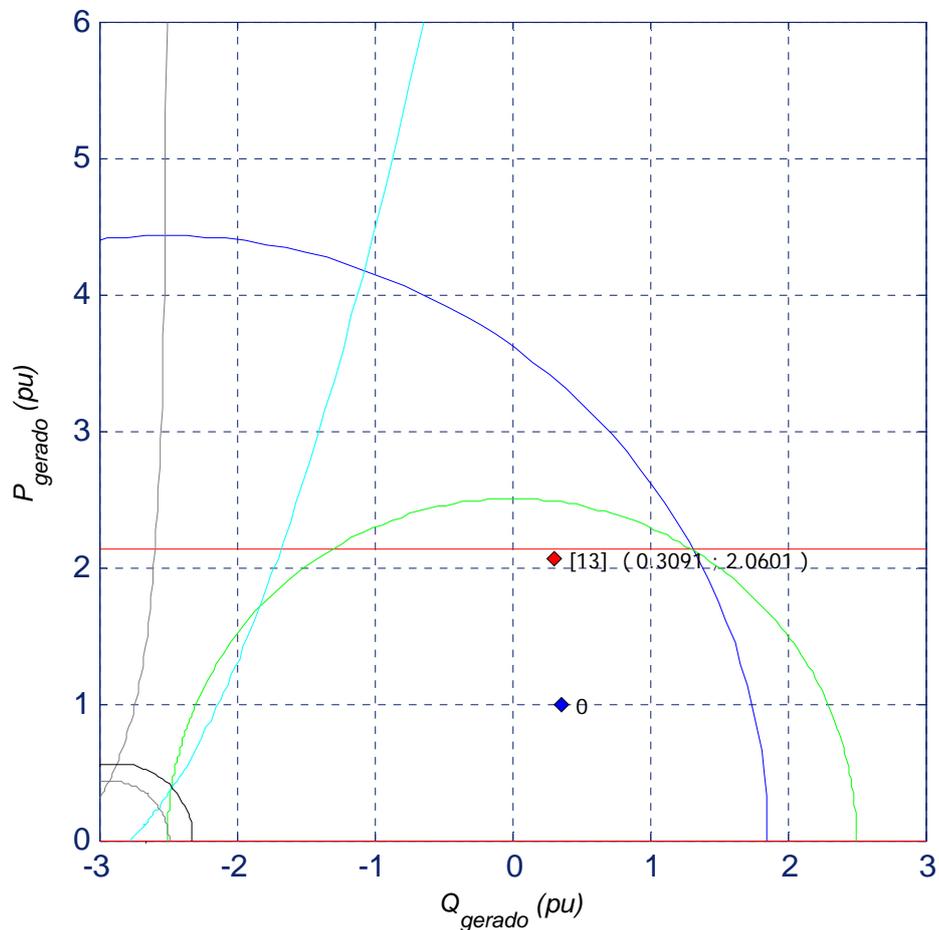


Figura 4.10: Ponto de operação do gerador 1. Caso sobrecarregamento da potência ativa

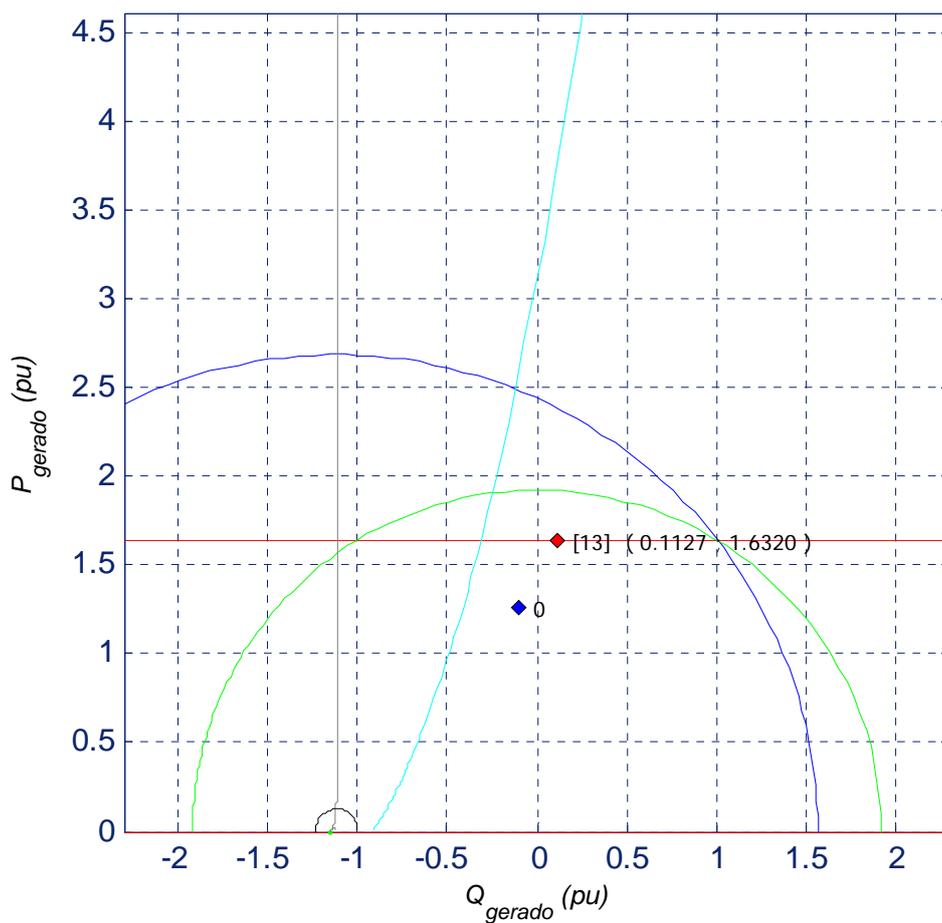


Figura 4.11: Ponto de operação do gerador 2. Caso sobrecarregamento da potência ativa

Nas figuras 4.11 e 4.12, tem-se a curva de capacidade dos geradores 2 e 3, respectivamente, com carregamento da potência ativa aumentada em 50% e potência reativa igual ao caso base. Observa-se que os dois geradores são de tipo térmico e no ponto de convergência chega-se a tocar o limite mecânico.

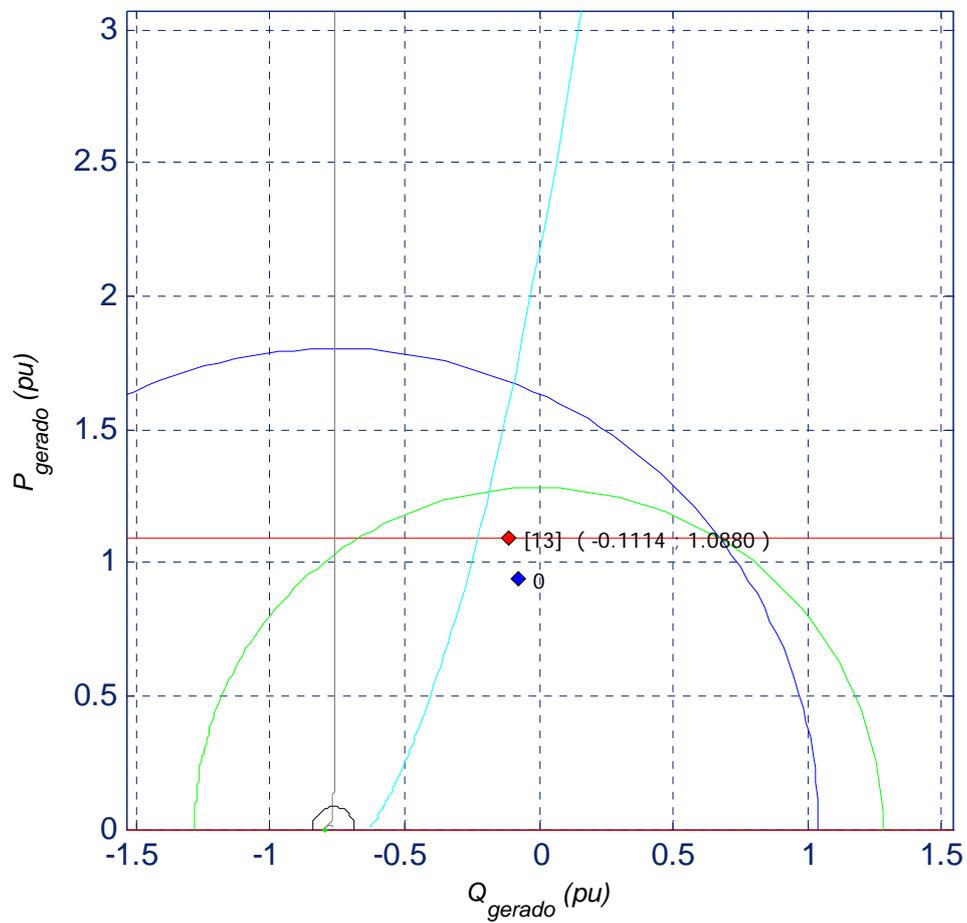


Figura 4.12: Ponto de operação do gerador 3. Caso sobrecarregamento da potência ativa

Caso3 (carregamento com potência reativa negativa)

Agora, vai-se tentar tocar alguns dos outros limites. Para isso, em cada barra de carga, a potência ativa da carga se iguala ao caso base e o sinal das potências reativas muda de positivo para negativo. Encontram-se os resultados para as três curvas de capacidade, mostrados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Resultados do fluxo de potência ótimo para os três casos de curva de capacidade para o sistema teste WSCC3 de 3 geradores – 9 barras (caso com potência reativa negativa)

B	CURVA 1			CURVA 2			CURVA 3		
A	f.o.= 5315.28 R\$/h			f.o.=5315.28 R\$/h			f.o.=5350.95 R\$/h		
R									
R	V (p.u.)	P <sub>G</sub> (MW)	Q <sub>G</sub> (MVA <sub>r</sub> )	V (p.u.)	P <sub>G</sub> (MW)	Q <sub>G</sub> (MVA <sub>r</sub> )	V (p.u.)	P <sub>G</sub> (MW)	Q <sub>G</sub> (MVA <sub>r</sub> )
A									
1	1.009	89.99	-94.66	1.008	89.99	-94.66	0.900	98.63	-135.73
2	1.045	134.67	-61.94	1.045	134.67	-61.94	1.054	132.03	-39.66
3	1.043	94.42	-65.93	1.043	94.42	-65.93	1.071	89.14	-28.21
4	1.064	-	-	1.063	-	-	0.988	-	-
5	1.098	-	-	1.098	-	-	1.047	-	-
6	1.091	-	-	1.091	-	-	1.044	-	-
7	1.085	-	-	1.085	-	-	1.080	-	-
8	1.100	-	-	1.100	-	-	1.100	-	-
9	1.082	-	-	1.081	-	-	1.088	-	-

Observa-se que para as curvas de capacidade 1 e 2 têm-se gerações de potências ativas e reativas e funções objetivo iguais, devido aos dois casos do ponto final de operação que fica longe dos limites da curva de capacidade. No caso da curva de capacidade 3 nos geradores térmicos 2 e 3, o ponto de operação final chega a tocar o limite de estabilidade prático, conforme as figuras 4.14 e 4.15.

Assim como nos casos anteriores, nas figuras 4.13, 4.14 e 4.15 têm-se a curva de capacidade completa dos geradores 1, 2 e 3, respectivamente. Para este caso de carregamento com a potência reativa negativa, mostra-se o ponto de operação inicial de cor azul e o ponto de operação final de cor vermelha; também é mostrado o número de iterações para a convergência igual a 11, e as coordenadas do ponto final que são os valores das potências reativa e ativa respectivamente.

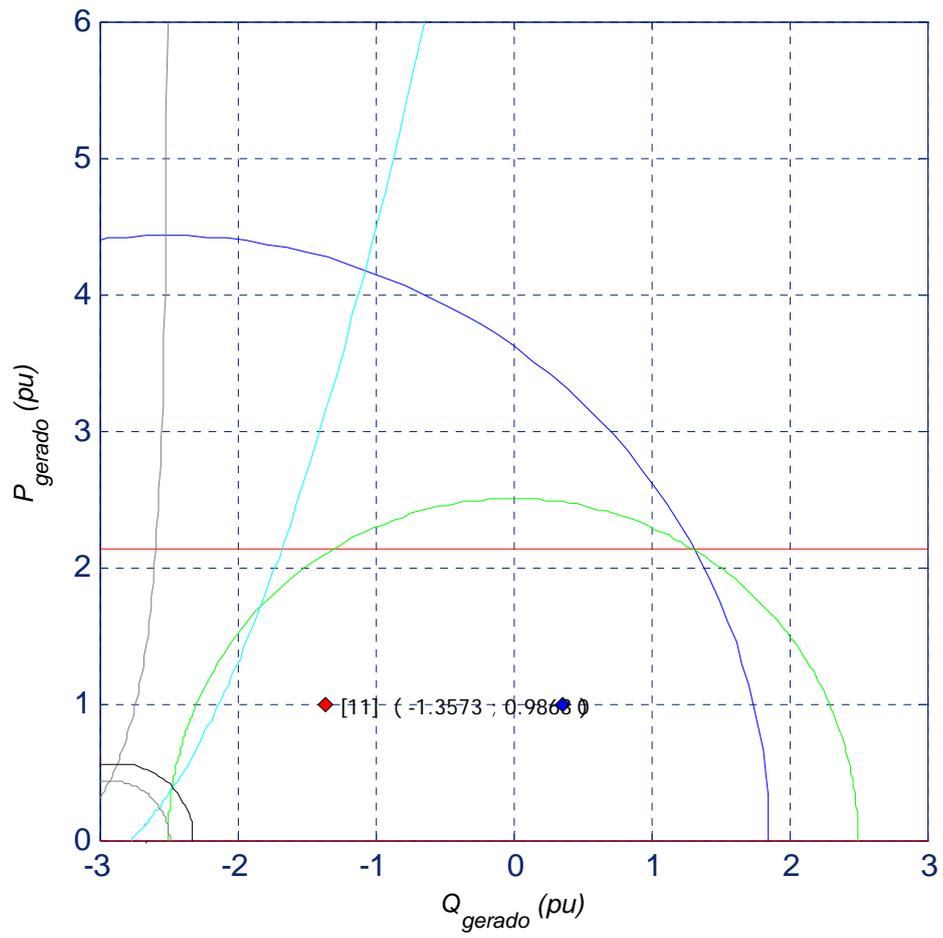


Figura 4.13: Ponto de operação do gerador 1 . Caso com potência reativa negativa

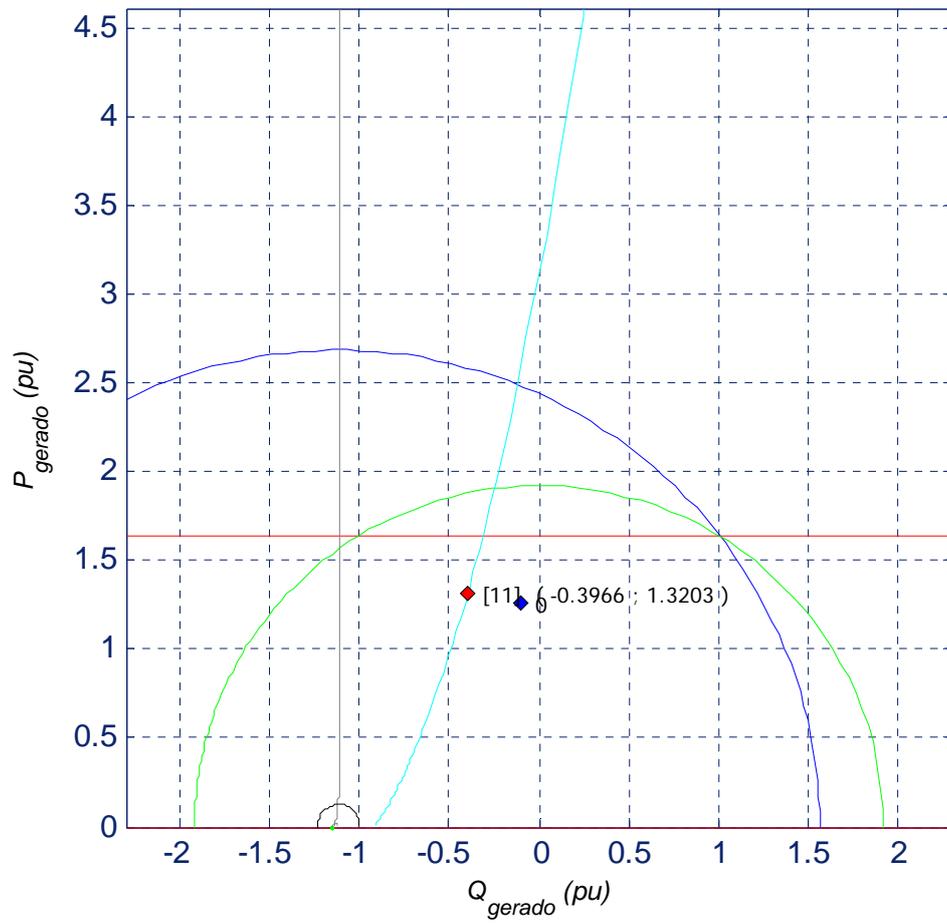


Figura 4.14: Ponto de operação do gerador 2 . Caso com potência reativa negativa

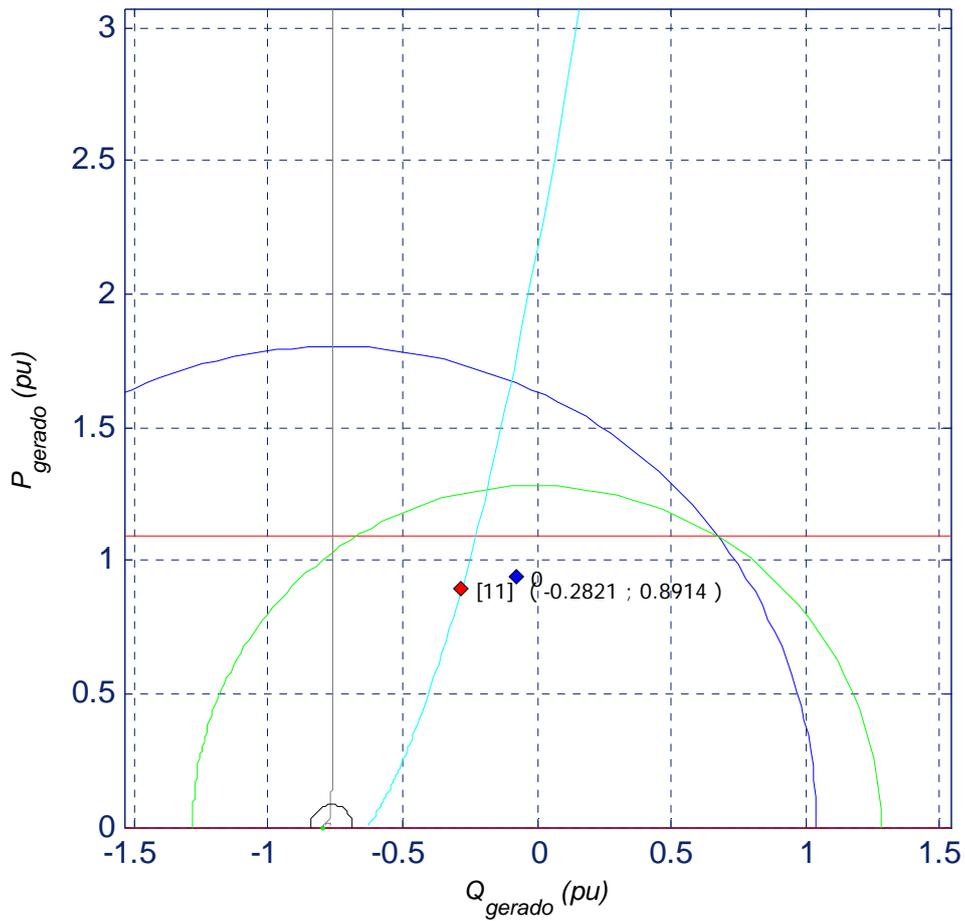


Figura 4.15: Ponto de operação do gerador 3 . Caso com potência reativa negativa

Caso 4 (sobrecarregamento da potência reativa)

Neste caso, vai-se tentar que os geradores cheguem ao limite da corrente de campo, ou seja, tocar o Limaçon de Pascal, para o qual aumentamos o carregamento da potência reativa em cada barra de carga até 2.5 vezes do caso base e a potência ativa deixou-se igual ao caso base. Os resultados são mostrados na tabela 4.5

Tabela 4.5: Resultados do fluxo de potência ótimo para os três casos de curva de capacidade para o sistema teste WSCC3 de 3 geradores – 9 barras (caso sobrecarregamento em 150% da potência reativa)

B	CURVA 1			CURVA 2			CURVA 3		
A	f.o.= 5412.54 R\$/h			f.o.=5412.89 R\$/h			f.o.=5412.89 R\$/h		
R									
R	V (p.u.)	P <sub>G</sub> (MW)	Q <sub>G</sub> (MVA <sub>r</sub> )	V (p.u.)	P <sub>G</sub> (MW)	Q <sub>G</sub> (MVA <sub>r</sub> )	V (p.u.)	P <sub>G</sub> (MW)	Q <sub>G</sub> (MVA <sub>r</sub> )
A									
1	1.100	91.79	161.59	1.100	91.910	164.160	1.100	91.910	164.150
2	1.100	135.82	113.23	1.100	135.930	116.120	1.100	135.920	116.110
3	1.100	95.42	80.76	1.093	95.200	76.770	1.093	95.200	76.780
4	1.017	-	-	1.015	-	-	1.015	-	-
5	0.915	-	-	0.914	-	-	0.914	-	-
6	0.968	-	-	0.965	-	-	0.965	-	-
7	1.039	-	-	1.037	-	-	1.037	-	-
8	0.997	-	-	0.994	-	-	0.994	-	-
9	1.058	-	-	1.053	-	-	1.053	-	-

Para este sobrecarregamento da potência reativa em 150%, nas três curvas de capacidade as funções objetivo são aproximadas e as potências de geração ativa e reativa também quase iguais, devido ao ponto final de convergência que fica próximo do limite da corrente de campo. E somente no gerador 3 chega a tocar esse limite como se pode observar nas figuras 4.16, 4.17 e 4.18 correspondente à curva com 5 limites proposta neste trabalho

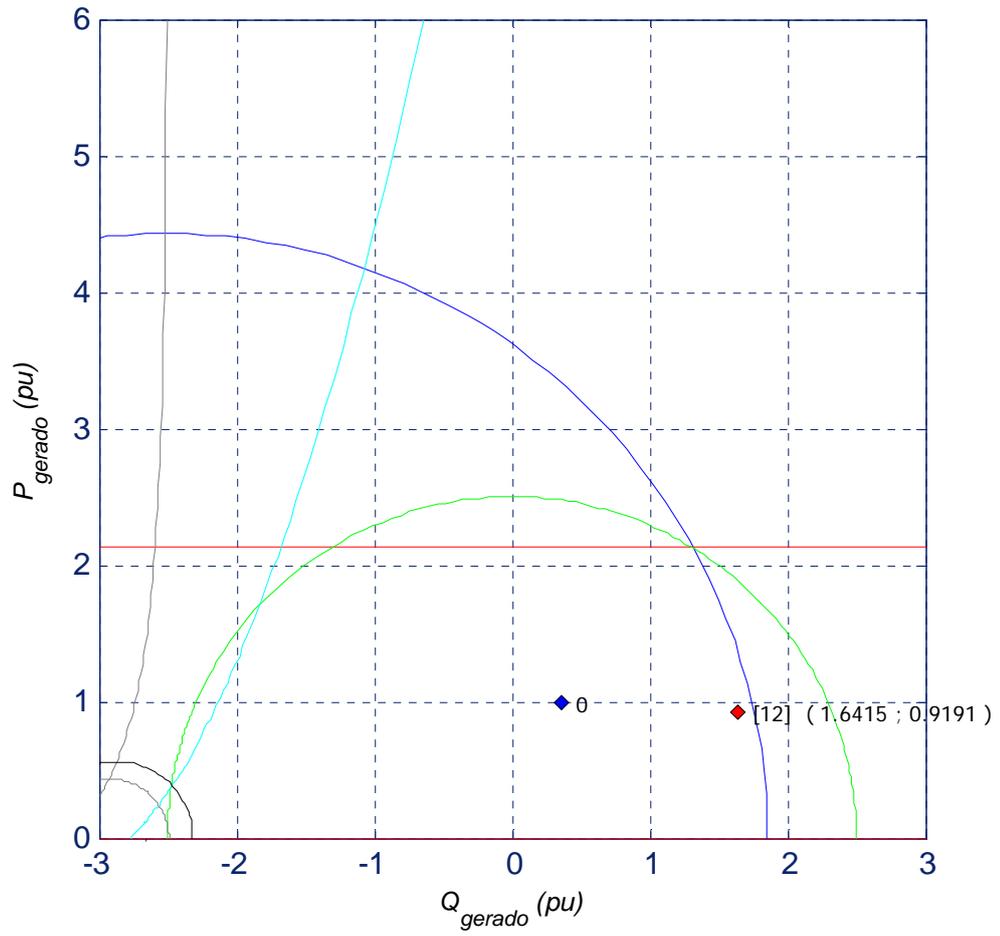


Figura 4.16: Ponto de operação do gerador 1. Caso sobrecarregamento da potência reativa

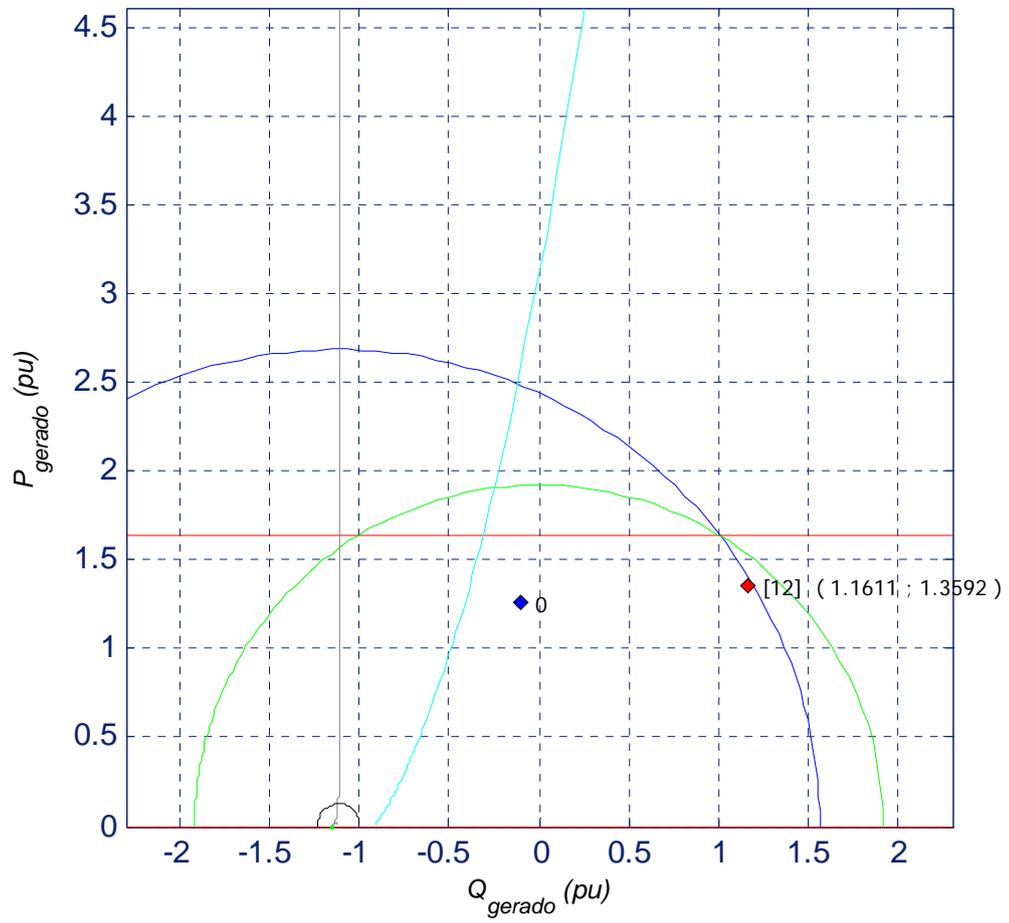


Figura 4.17: Ponto de operação do gerador 2. Caso sobrecarregamento da potência reativa

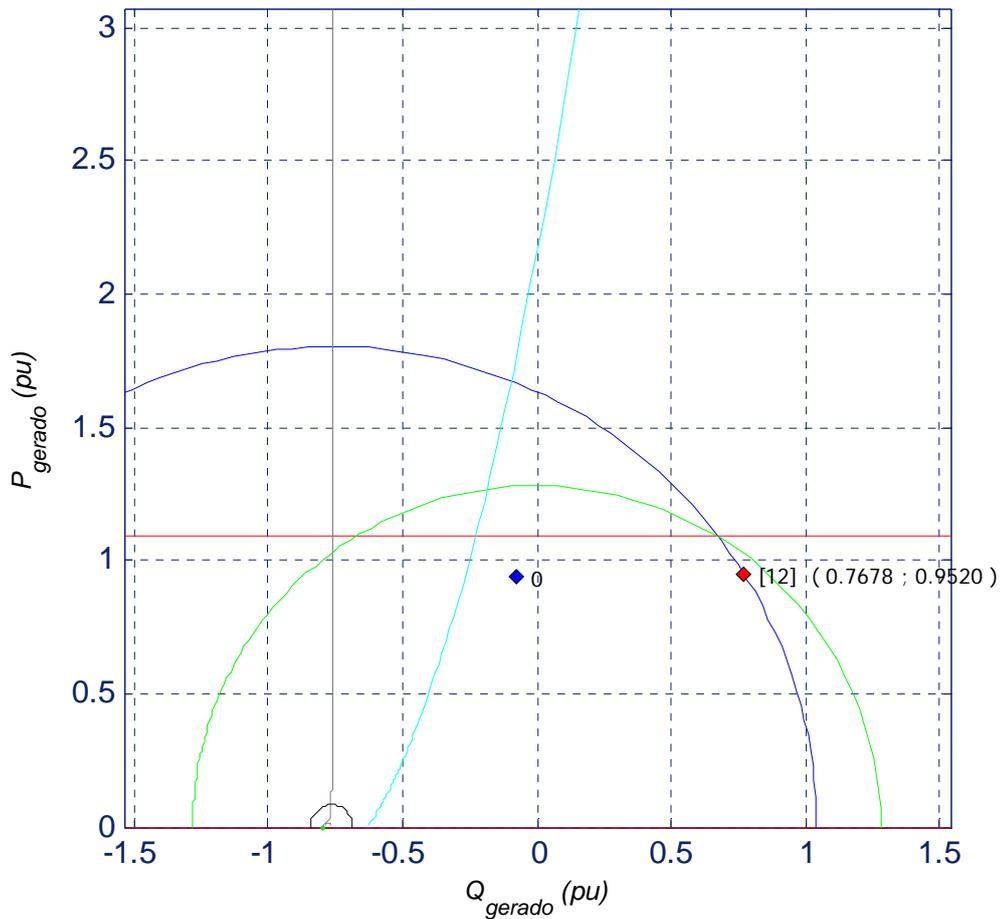


Figura 4.18: Ponto de operação do gerador 3. Caso sobrecarregamento da potência reativa

Na tabela 4.6, mostra-se os resultados dos quatro casos de carregamento para cada uma das três curvas de operação dos geradores utilizadas no sistema teste WSCC3. Nos resultados obtidos, temos alguns valores da função objetivo iguais para um mesmo carregamento, isso porque nesses casos o ponto de operação dos geradores não chega a tocar nenhum dos limites da curva de capacidade. Quando se tem sobrecarregamento, chega-se a tocar algum limite da curva de capacidade e, nesse caso o custo de geração é maior porque se tem mais restrições (caso de carregamento 2 e 3).

Tabela 4.6: Resultados obtidos (função objetivo) do fluxo de potência ótimo para os quatro casos de carregamento para o sistema teste WSCC3.

<b>SISTEMA TESTE WSCC3</b> (função objetivo em R\$/h)			
Carregamento	Curva 1	Curva 2	Curva 3
Caso 1	5296.69	5296.68	5296.68
Caso 2	10164.94	10168.68	10802.02
Caso 3	5315.28	5315.28	5350.95
Caso 4	5412.54	5412.89	5412.89

#### 4.3. Sistema New England de 10 geradores

Esse sistema é composto de 10 geradores, 39 barras, 46 ramos e 19 cargas que totalizam 6097.10 MW de potência ativa e 1593.30 MVar de potência reativa [PAI81]. Mais detalhes sobre os dados das barras e ramos, custos de produção e limites de geração de potência ativa são mostrados no Apêndice A..

Para o fluxo de potência ótimo (FPO) com a curva de capacidade completa mostrada no capítulo 2 e aplicado neste sistema teste, encontrou-se os resultados apresentados na Tabela 4.7. São mostrados os módulos das tensões (p.u.) e ângulos (graus) para todas as barras, as gerações de potências ativas (MW) e as gerações de potências reativas (MVar) nas barras de geração. O custo total da geração de potência ativa (função objetivo) é de 36017.05 R\$/h.

Tabela 4.7: Resultados do fluxo de potência ótimo com a curva de capacidade completa para o sistema teste New England de 10 geradores – 39 barras.

Barra	Nome	Tipo	Modulo V (p.u.)	Ângulo V (graus)	Geração (MW)	Geração (MVar)
1	Barra 1	PQ	1.055	-0.703	-	-
2	Barra 2	PQ	1.047	1.712	-	-
3	Barra 3	PQ	1.044	-2.258	-	-
4	Barra 4	PQ	1.040	-4.658	-	-
5	Barra 5	PQ	1.054	-4.259	-	-
6	Barra 6	PQ	1.059	-3.747	-	-
7	Barra 7	PQ	1.046	-5.756	-	-
8	Barra 8	PQ	1.043	-6.117	-	-
9	Barra 9	PQ	1.056	-3.690	-	-
10	Barra 10	PQ	1.060	-0.793	-	-
11	Barra 11	PQ	1.058	-1.791	-	-
12	Barra 12	PQ	1.036	-1.641	-	-
13	Barra 13	PQ	1.055	-1.376	-	-
14	Barra 14	PQ	1.047	-2.705	-	-
15	Barra 15	PQ	1.037	-2.267	-	-
16	Barra 16	PQ	1.047	-0.346	-	-
17	Barra 17	PQ	1.047	-1.085	-	-
18	Barra 18	PQ	1.045	-1.991	-	-
19	Barra 19	PQ	1.060	5.408	-	-
20	Barra 20	PQ	1.060	5.021	-	-
21	Barra 21	PQ	1.045	1.912	-	-
22	Barra 22	PQ	1.060	6.404	-	-
23	Barra 23	PQ	1.053	6.305	-	-
24	Barra 24	PQ	1.051	-0.286	-	-
25	Barra 25	PQ	1.060	2.873	-	-
26	Barra 26	PQ	1.060	2.021	-	-
27	Barra 27	PQ	1.049	-0.577	-	-
28	Barra 28	PQ	1.057	6.676	-	-
29	Barra 29	PQ	1.056	9.749	-	-
30	Barra 30	PV	0.942	4.546	297.500	-47.460
31	Barra 31	VTh	1.060	0.000	631.470	465.210
32	Barra 32	PV	1.010	5.702	627.160	180.230
33	Barra 33	PV	1.060	9.648	613.540	116.550
34	Barra 34	PV	1.060	10.376	516.800	115.100
35	Barra 35	PV	1.060	10.705	619.030	210.570
36	Barra 36	PV	1.060	14.231	561.000	56.070
37	Barra 37	PV	1.060	9.849	544.000	41.990
38	Barra 38	PV	1.060	17.204	790.500	-2.350
39	Barra 39	PV	1.044	-2.064	935.000	57.910

Neste sistema de teste também se tem os 3 casos da curva de capacidade com seus limites das potências ativas e reativas geradas, os quais se utilizam nas restrições do FPO. Os resultados de acordo com a Tabela 4.8. para as variáveis de controle: tensões nas barras (p.u.), potências ativas geradas (MW) e potências reativas geradas (MVar) para cada um das 3 curvas de capacidade com suas respectivas funções

objetivo (R\$/h). Também é apresentado na Figura 3.19 um perfil das tensões para os três casos propostos.

Tabela 4.8: Resultados do fluxo de potência ótimo para os três casos de curva de capacidade aplicados ao sistema teste New England de 10 geradores – 39 barras

B A R R A	CURVA 1 f.o.=35540.83 R\$/hr			CURVA 2 f.o.= 35437.10 R\$/hr			CURVA 3 f.o.=36017.05 R\$/hr		
	V (p.u.)	P <sub>G</sub> (MW)	Q <sub>G</sub> (MVA <sub>r</sub> )	V (p.u.)	P <sub>G</sub> (MW)	Q <sub>G</sub> (MVA <sub>r</sub> )	V (p.u.)	P <sub>G</sub> (MW)	Q <sub>G</sub> (MVA <sub>r</sub> )
1	1.054	-	-	1.060	-	-	1.055	-	-
2	1.045	-	-	1.041	-	-	1.047	-	-
3	1.039	-	-	1.003	-	-	1.044	-	-
4	1.035	-	-	0.970	-	-	1.040	-	-
5	1.048	-	-	0.975	-	-	1.054	-	-
6	1.053	-	-	0.977	-	-	1.059	-	-
7	1.040	-	-	0.969	-	-	1.046	-	-
8	1.038	-	-	0.970	-	-	1.043	-	-
9	1.054	-	-	1.033	-	-	1.056	-	-
10	1.060	-	-	0.981	-	-	1.060	-	-
11	1.056	-	-	0.978	-	-	1.058	-	-
12	1.043	-	-	1.001	-	-	1.036	-	-
13	1.054	-	-	0.977	-	-	1.055	-	-
14	1.043	-	-	0.973	-	-	1.047	-	-
15	1.028	-	-	0.961	-	-	1.037	-	-
16	1.036	-	-	0.972	-	-	1.047	-	-
17	1.039	-	-	0.990	-	-	1.047	-	-
18	1.038	-	-	0.993	-	-	1.045	-	-
19	1.060	-	-	0.976	-	-	1.060	-	-
20	1.000	-	-	1.060	-	-	1.060	-	-
21	1.037	-	-	0.972	-	-	1.045	-	-
22	1.056	-	-	0.990	-	-	1.060	-	-
23	1.047	-	-	0.988	-	-	1.053	-	-
24	1.032	-	-	0.969	-	-	1.051	-	-
25	1.060	-	-	1.060	-	-	1.060	-	-
26	1.057	-	-	1.040	-	-	1.060	-	-
27	1.043	-	-	1.011	-	-	1.049	-	-
28	1.059	-	-	1.055	-	-	1.057	-	-
29	1.060	-	-	1.060	-	-	1.056	-	-
30	1.013	350.000	-25.470	1.060	457.940	98.530	0.942	297.500	-47.460
31	1.060	574.100	364.790	1.060	457.940	155.910	1.060	631.470	465.210
32	1.033	570.430	252.940	1.060	578.460	158.940	1.010	627.160	180.230
33	1.011	557.080	135.640	1.060	548.170	164.250	1.060	613.540	116.550
34	1.021	556.450	167.810	1.060	543.950	19.120	1.060	516.800	115.100
35	1.060	562.230	244.530	1.060	547.660	163.330	1.060	619.030	210.570
36	1.060	559.150	78.980	1.060	525.560	157.350	1.060	561.000	56.070
37	1.043	549.420	56.610	1.060	548.010	74.220	1.060	544.000	41.990
38	1.040	899.150	54.460	1.060	880.890	103.230	1.060	790.500	-2.350
39	1.044	963.060	69.440	1.055	1054.20	222.920	1.044	935.000	57.910

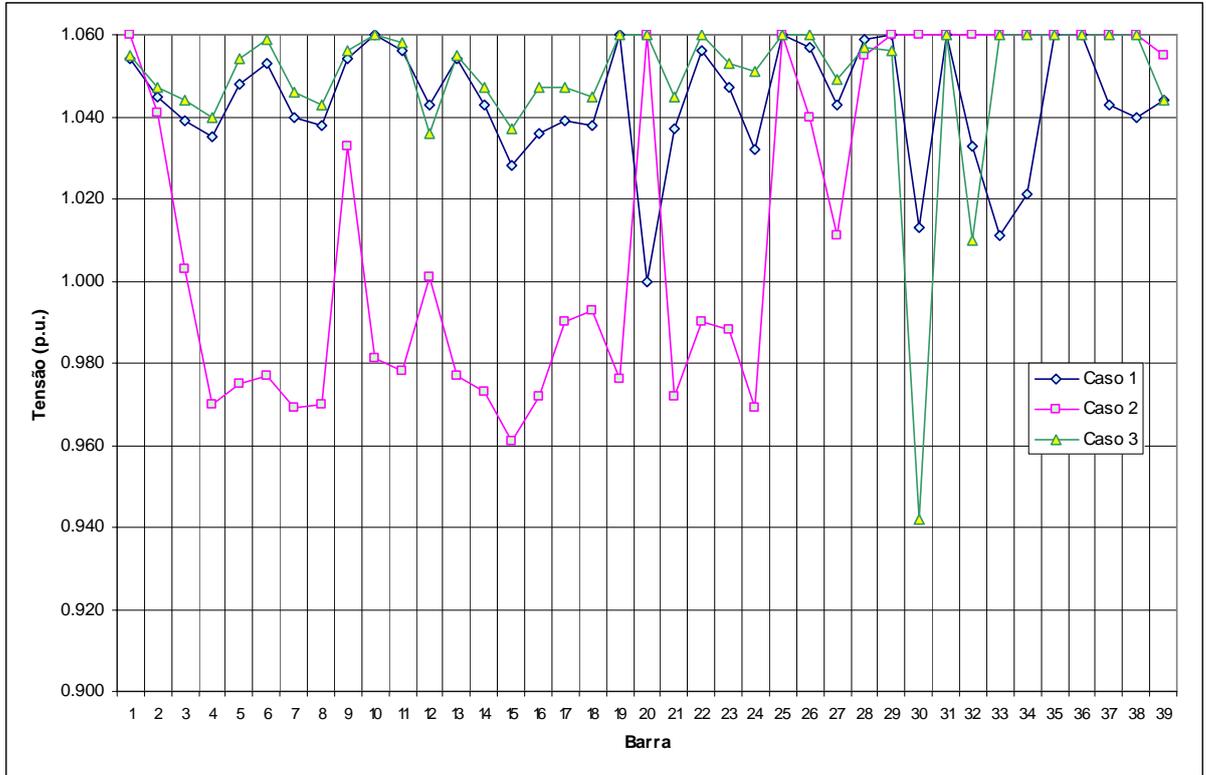


Figura 4.19: Perfil de tensões para os três casos de curvas de capacidade aplicados ao sistema teste New England de 10 geradores – 39 barras.

# 5. CONCLUSÕES

## 5.1. Conclusões

As conclusões do presente trabalho são as seguintes:

A operação da máquina síncrona como gerador de energia elétrica depende de sua potência ativa, potência reativa e da tensão terminal, formando uma região usualmente chamada curva de capacidade do gerador. Isto limita sua região de operação factível em estado estável (regime permanente). Foram modelados os limites da corrente de armadura e de campo dependente da tensão e os limites teórico e prático de estabilidade permanente para uma máquina de pólos salientes e pode-se particularizar facilmente para uma máquina de rotor cilíndrico.

Neste trabalho, apresentou-se um FPO para sistemas elétricos de potência (SEP) utilizando como ferramenta de otimização os pacotes do MATLAB 7.0, que usa o *fmincon* para otimizar a função objetivo. Logo os resultados foram comparados com os obtidos nas outras ferramentas do FPO com diferentes limites da curva de capacidade do gerador, comparando-se os três casos de soluções e observando-se que para mais restrições o custo de operação é maior.

A grande vantagem da metodologia proposta do FPO com restrições da curva de capacidade completa é possibilitar uma modelagem mais completa do sistema, como por exemplo, inclusão de limites máximos e mínimos para a potência reativa, muito importante para o controle de tensão nas linhas e barras; e ainda, permitir a verificação do ponto de operação das máquinas síncronas operando na região factível delimitada pelos limites propostos neste trabalho.

A utilização da ferramenta de otimização do MATLAB permitiu um melhor desempenho computacional, visto que essa ferramenta escolhe o melhor método de

solução para resolver o FPO e faz a formação da matriz Jacobiana e Hessiana, quando necessário e, também, sempre trabalha com matrizes esparsas.

Outras vantagens deste método em relação aos FPO clássicos é que as máquinas síncronas não chegam à perda de estabilidade porque se têm os limites de estabilidade e corrente mínima de excitação como restrições, para a geração de potência ativa e reativa.

Também, incluindo-se as tensões nas barras como variáveis de controle, não se necessita de *Taps* controladores. Os limites dessas tensões em todas as barras são definidos no modelo do FPO.

O fluxo de potência ótimo desenvolvido pode ser utilizado para análise de sistemas diversos equilibrados ou desequilibrados sem importar a configuração do sistema elétrico.

## **5.2. Contribuições**

As principais contribuições do presente trabalho são os seguintes:

- As equações desenvolvidas dos limites de operação da máquina síncrona e as que foram traçadas neste trabalho conduzem a uma determinação mais precisa dos limites de operação em regime permanente e permitem a possibilidade de uma ação corretiva na operação do SEP.
- Os resultados mostrados indicam que a representação detalhada da curva de capacidade da máquina síncrona no fluxo de potência ótimo (FPO) permite uma melhor análise do sistema elétrico com resultados computacionais mais exatos.
- A inclusão dos limites da curva de capacidade para a solução de um fluxo de potência ótimo em sistemas elétricos pode servir como base para o desenvolvimento de outros FPO aplicados a sistemas de grande porte.

- A comparação do FPO considerando a curva de capacidade completa com os outros FPO clássicos que tem restrições de geração de potências ativa e reativa aproximadas e que foram usadas anteriormente foi muito esclarecedora.
- A inclusão da curva de capacidade no fluxo de potência ótimo permite avaliar o custo ótimo de geração das potências ativas e reativas pelas máquinas síncronas dentro do mercado competitivo.

### **5.3. Trabalhos Futuros**

Diversos trabalhos futuros podem ser definidos a partir desta aplicação da curva de capacidade no FPO. Algumas sugestões de trabalhos são descritas a seguir:

- Implementar o FPO com a curva de capacidade completa para sua aplicação a sistemas teste de grande porte e sistemas reais.
- Implementar o FPO com a curva de capacidade completa, porém em coordenadas polares e fazer uma comparação com o FPO em coordenadas retangulares.
- Nas diferentes aplicações do FPO com outras funções objetivo que se têm na literatura, pode-se incluir a curva de capacidade com todos seus limites.
- Modelar e implementar o FPO com os novos equipamentos FACTS que estão sendo incorporados aos sistemas elétricos de distribuição.
- Modelar funções objetivo especiais e multi-objetivo para sistemas elétricos de distribuição dependendo da necessidade do usuário.
- Incluir na curva de capacidade outros limites como o de aquecimento do núcleo da armadura em condições de operação na região de sub-excitação [MECR91].

# APÊNDICES

# A. Dados dos sistemas teste

## A.1 Nomenclatura

### Dados das barras

B	Número da barra
NAME	Nome da barra
T	Tipo da barra
VM	Módulo da tensão (p.u.)
VA	Ângulo da tensão (graus)
PD	Potência ativa de carga (MW)
QD	Potência reativa de carga (MVAR)
PG	Geração de potência ativa (MW)
QG	Geração de potência reativa (MVAR)
GS	Condutância shunt (MW para $V = 1.0$ p.u.)
BS	Susceptância shunt (MVAR para $V = 1.0$ p.u.)
KV	Tensão base (kV)

### Dados dos ramos

NF	Número da barra de saída
NT	Número da barra de chegada
T	Tipo do ramo
R	Resistência (p.u.)
X	Reatância (p.u.)
B	Susceptância total da linha (p.u.)
RATE	Máxima capacidade de transferência da potência aparente (MVA)
RATIO	Tap do transformador
SHIFT	Ângulo de defasagem do transformador em fase

### Dados dos geradores modelo clássico

BARRA	Número da barra
N	Número de máquinas
$X'_d$	Reatância transitória no eixo d (p.u.)
$X_d$	Reatância no eixo d (p.u.)
$X_q$	Reatância no eixo q (p.u.)
MVA	Potência nominal do gerador (MVA)

## A.2 Sistema WSCC3 de 3 geradores 9 barras

### Dados dos modelos estáticos

#### *Dados das barras*

<b>B</b>	<b>NOME</b>	<b>T</b>	<b>VM</b>	<b>VA</b>	<b>PD</b>	<b>QD</b>	<b>PG</b>	<b>QG</b>	<b>GS</b>	<b>BS</b>	<b>KV</b>	
1	Barra	1	3	1.100	0.00	0.0	0.0	89.80	12.97	0.0	0.0	16.5
2	Barra	2	2	1.097	4.89	0.0	0.0	134.3	0.03	0.0	0.0	18.0
3	Barra	3	2	1.086	3.24	0.0	0.0	94.19	-22.6	0.0	0.0	13.8
4	Barra	4	0	1.094	-2.46	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	230.0
5	Barra	5	0	1.071	-4.61	125.0	50.0	0.0	0.0	0.0	0.0	230.0
6	Barra	6	0	1.084	-3.98	90.0	30.0	0.0	0.0	0.0	0.0	230.0
7	Barra	7	0	1.100	0.90	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	230.0
8	Barra	8	0	1.089	-1.19	100.0	35.0	0.0	0.0	0.0	0.0	230.0
9	Barra	9	0	1.100	0.60	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	230.0

#### *Dados dos ramos*

<b>NF</b>	<b>NT</b>	<b>T</b>	<b>R</b>	<b>X</b>	<b>B</b>	<b>RATE</b>	<b>TAP</b>	<b>SHIFT</b>
2	7	1	0.0000	0.0625	0.0000	200.0	1.0000	0.00
7	8	0	0.0085	0.0720	0.1490	100.0	0.0000	0.00
8	9	0	0.0119	0.1008	0.2090	30.0	0.0000	0.00
9	3	1	0.0000	0.0586	0.0000	90.0	1.0000	0.00
7	5	0	0.0320	0.1610	0.3060	100.0	0.0000	0.00
9	6	0	0.0390	0.1700	0.3580	50.0	0.0000	0.00
5	4	0	0.0100	0.0850	0.1760	100.0	0.0000	0.00
6	4	0	0.0170	0.0920	0.1580	100.0	0.0000	0.00
4	1	1	0.0000	0.0576	0.0000	300.0	1.0000	0.00

### Dados dos modelos dinâmicos

#### *Dados dos geradores modelo clássico*

<b>#</b>	<b>BARRA</b>	<b>N</b>	<b>MVA</b>	$X_d$	$X'_d$	$X_q$
1	1	1	247.5	0.1460	0.0608	0.0969
2	2	1	192.0	0.8958	0.1198	0.8645
3	3	1	128.0	1.3125	0.1813	1.2578

### A.3 Sistema New England 10 geradores 39 barras

#### Dados dos modelos estáticos

#### *Dados das barras*

<b>B</b>	<b>NOME</b>	<b>T</b>	<b>VM</b>	<b>VA</b>	<b>PD</b>	<b>QD</b>	<b>PG</b>	<b>QG</b>	<b>GS</b>	<b>BS</b>	<b>KV</b>
1	Barra	1	0	1.055	-0.703	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	230
2	Barra	2	0	1.047	1.712	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	230
3	Barra	3	0	1.044	-2.258	322	2.4	0.0	0.0	0.0	230
4	Barra	4	0	1.040	-4.658	500	184	0.0	0.0	0.0	230
5	Barra	5	0	1.054	-4.259	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	230
6	Barra	6	0	1.059	-3.747	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	230
7	Barra	7	0	1.046	-5.756	233.8	84	0.0	0.0	0.0	230
8	Barra	8	0	1.043	-6.117	522	176	0.0	0.0	0.0	230
9	Barra	9	0	1.056	-3.690	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	230
10	Barra	10	0	1.060	-0.793	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	230
11	Barra	11	0	1.058	-1.791	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	230
12	Barra	12	0	1.036	-1.641	7.5	88	0.0	0.0	0.0	230
13	Barra	13	0	1.055	-1.376	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	230
14	Barra	14	0	1.047	-2.705	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	230
15	Barra	15	0	1.037	-2.267	320	153	0.0	0.0	0.0	230
16	Barra	16	0	1.047	-0.346	329	32.3	0.0	0.0	0.0	230
17	Barra	17	0	1.047	-1.085	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	230
18	Barra	18	0	1.045	-1.991	158	30	0.0	0.0	0.0	230
19	Barra	19	0	1.060	5.408	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	230
20	Barra	20	0	1.060	5.021	628	103	0.0	0.0	0.0	230
21	Barra	21	0	1.045	1.912	274	115	0.0	0.0	0.0	230
22	Barra	22	0	1.060	6.404	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	230
23	Barra	23	0	1.053	6.305	247.5	84.6	0.0	0.0	0.0	230
24	Barra	24	0	1.051	-0.286	308.6	92.2	0.0	0.0	0.0	230
25	Barra	25	0	1.060	2.873	224	47.2	0.0	0.0	0.0	230
26	Barra	26	0	1.060	2.021	139	17	0.0	0.0	0.0	230
27	Barra	27	0	1.049	-0.577	281	75.5	0.0	0.0	0.0	230
28	Barra	28	0	1.057	6.676	206	27.6	0.0	0.0	0.0	230
29	Barra	29	0	1.056	9.749	283.5	26.9	0.0	0.0	0.0	230
30	Barra	30	2	0.942	4.546	0.0	0.0	297.5	-47.46	0.0	13.8
31	Barra	31	3	1.060	0.000	9.2	4.6	631.4	465.2	0.0	13.8
32	Barra	32	2	1.010	5.702	0.0	0.0	627.1	180.2	0.0	13.8
33	Barra	33	2	1.060	9.648	0.0	0.0	613.5	116.5	0.0	13.8
34	Barra	34	2	1.060	10.37	0.0	0.0	516.8	115.1	0.0	13.8
35	Barra	35	2	1.060	10.70	0.0	0.0	619.0	210.5	0.0	13.8
36	Barra	36	2	1.060	14.23	0.0	0.0	561.0	56.07	0.0	13.8
37	Barra	37	2	1.060	9.849	0.0	0.0	544.0	41.99	0.0	13.8
38	Barra	38	2	1.060	17.20	0.0	0.0	790.5	-2.350	0.0	13.8
39	Barra	39	2	1.044	-2.064	1104	250	935.0	57.91	0.0	13.8

*Dados dos ramos*

<b>NF</b>	<b>NT</b>	<b>T</b>	<b>R</b>	<b>X</b>	<b>B</b>	<b>RATE</b>	<b>TAP</b>	<b>SHIFT</b>
1	2	0	0.0035	0.0411	0.6987	13000	0	0.00
1	39	0	0.0010	0.0250	0.7500	13000	0	0.00
2	3	0	0.0013	0.0151	0.2572	13000	0	0.00
2	25	0	0.0070	0.0086	0.1460	13000	0	0.00
3	4	0	0.0013	0.0213	0.2214	13000	0	0.00
3	18	0	0.0011	0.0133	0.2138	13000	0	0.00
4	5	0	0.0008	0.0128	0.1342	13000	0	0.00
4	14	0	0.0008	0.0129	0.1382	13000	0	0.00
5	6	0	0.0002	0.0026	0.0434	13000	0	0.00
5	8	0	0.0008	0.0112	0.1476	13000	0	0.00
6	7	0	0.0006	0.0092	0.1130	13000	0	0.00
6	11	0	0.0007	0.0082	0.1389	13000	0	0.00
7	8	0	0.0004	0.0046	0.0780	13000	0	0.00
8	9	0	0.0023	0.0363	0.3804	13000	0	0.00
9	39	0	0.0010	0.0250	1.2000	13000	0	0.00
10	11	0	0.0004	0.0043	0.0729	13000	0	0.00
10	13	0	0.0004	0.0043	0.0729	13000	0	0.00
13	14	0	0.0009	0.0101	0.1723	13000	0	0.00
14	15	0	0.0018	0.0217	0.3660	13000	0	0.00
15	16	0	0.0009	0.0094	0.1710	13000	0	0.00
16	17	0	0.0007	0.0089	0.1342	13000	0	0.00
16	19	0	0.0016	0.0195	0.3040	13000	0	0.00
16	21	0	0.0008	0.0135	0.2548	13000	0	0.00
16	24	0	0.0003	0.0059	0.0680	13000	0	0.00
17	18	0	0.0007	0.0082	0.1319	13000	0	0.00
17	27	0	0.0013	0.0173	0.3216	13000	0	0.00
21	22	0	0.0008	0.0140	0.2565	13000	0	0.00
22	23	0	0.0006	0.0096	0.1846	13000	0	0.00
23	24	0	0.0022	0.0350	0.3610	13000	0	0.00
25	26	0	0.0032	0.0323	0.5130	13000	0	0.00
26	27	0	0.0014	0.0147	0.2396	13000	0	0.00
26	28	0	0.0043	0.0474	0.7802	13000	0	0.00
26	29	0	0.0057	0.0625	1.0290	13000	0	0.00
28	29	0	0.0014	0.0151	0.2490	13000	0	0.00
12	11	1	0.0016	0.0435	0.0000	6500	1	0.00
12	13	1	0.0016	0.0435	0.0000	6500	1	0.00
6	31	1	0.0000	0.0250	0.0000	6500	1	0.00
10	32	1	0.0000	0.0200	0.0000	6500	1	0.00
19	33	1	0.0007	0.0142	0.0000	6500	1	0.00
20	34	1	0.0009	0.0180	0.0000	6500	1	0.00
22	35	1	0.0000	0.0143	0.0000	6500	1	0.00
23	36	1	0.0005	0.0272	0.0000	6500	1	0.00
25	37	1	0.0006	0.0232	0.0000	6500	1	0.00
2	30	1	0.0000	0.0181	0.0000	6500	1	0.00
29	38	1	0.0008	0.0156	0.0000	6500	1	0.00
19	20	1	0.0007	0.0138	0.0000	6500	1	0.00

### Dados dos geradores modelo clássico

#	BARRA	N	MVA	$X_d$	$X'_d$	$X_q$
1	30	1	250	0.020	0.006	0.019
2	31	1	1000	0.295	0.0697	0.282
3	32	1	650	0.2495	0.0531	0.237
4	33	1	632	0.262	0.0436	0.258
5	34	1	508	0.670	0.132	0.620
6	35	1	650	0.254	0.050	0.241
7	36	1	560	0.295	0.049	0.292
8	37	1	540	0.290	0.057	0.280
9	38	1	830	0.2106	0.057	0.205
10	39	1	1000	0.100	0.031	0.069

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [ADIB94] M. M. Adibi and D. P. Milanicz, “Reactive Capability Limitation of Synchronous Machines”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.9, Issue 1, pp.29-40, Feb. 1994.
- [ALME00] K. Almeida and R. Salgado, “Optimal Power Flow solutions under variable Load Conditions”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 15, No 4, pp. 1204-1211, Nov. 2000.
- [ALSA90] O. Alsac, J. Bright, M. Prais and B. Stott, “Further Developments in LP-Based Optimal Power Flow”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.5, no. 3, pp. 697-711, Aug. 1990.
- [ANDE77] P.M. Anderson and A.A. Fouad, *Power System Control and Stability*, Iowa State University Press, USA, 1977.
- [BAPT04] E.C. Baptista, E. A. Belati and G. R. da Costa, “Um método Primal-Dual aplicado na resolução do problema de Fluxo de Potência Ótimo”, *Pesquisa Operacional*, Vol.14, no.2, pp. 215-226, Ago. 2004.
- [BEDR03] M.F. Bedriñana, “Aspectos Computacionais e de Mercado da Avaliação da Segurança Dinâmica de Sistemas Elétricos de Potência”, Tese de Mestrado, UFMA, Jul. 2003.
- [BURC82] R.C. Burchett, H.H Happ and K. Wirgau, “Large Scale Optimal Power Flow”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol.101, no. 11, pp. 3722-3732, Oct. 1982.
- [BURC84] R.C. Burchett, H.H Happ and D.R Vierath, “Quadratically Convergent Optimal Power Flow”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol.103, no. 11, pp. 3267-3275, Nov. 1984.
- [CARP93] T.J. Carpenter, I.J. Lustig, J.M. Mulvey and D.F. Shanno, “Higher-order predictor-corrector interior point methods with applications to

- quadratic objectives”, *SIAM Journal on Optimization*, vol.3, no.4, pp.696-725, 1993.
- [CARP62] J. Carpentier, “Contribution to the Economic Dispatch Problem”, (in French) *Bulletin Society Française Electriciens*, vol.3, pp. 432-447, Aug. 1962.
- [CAST01] E. D. Castronuovo, J. M. Campagnolo and R. Salgado, “On the Application of High Performance Computation Techniques to Nonlinear Interior Point Methods”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 16, no. 3, pp. 325-331, Aug. 2001.
- [DOMM68] H.W. Dommel and W.F. Tinney, “Optimal Power Flow Solutions”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-87, no. 10, pp. 1866-1876, Oct. 1968.
- [FONT04] E. Fontana e R. Guedes, “Curvas de Capabilidade em tempo-real como ferramenta de apoio á operação do sistema elétrico”, IX SEPOPE, Rio de Janeiro – Brasil, Maio 2004.
- [GIL00] J. B. Gil, T. G. San Roman and J. A. Rios, “Reactive power pricing: a conceptual framework for remuneration and charging procedures”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 15, pp. 483-489, May 2000.
- [GILL81] P. E. Gill, W. Murray and M. H. Wright, *Practical Optimizations*, Academic Press, London. 1981.
- [GOVE65] R.H. Gove, “Geometric construction of the stability limits of synchronous machines”, *IEEE*, Vol. 112, No. 5, pp. 977-985, May. 1965.
- [GRAN94] S. Granville, “Optimal reactive Dispatch Through Interior Point Methods”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 9, No. 1, pp. 136-146, Feb. 1994.

- [HEFF52] W. G. Heffron and R. A. Phillips, “Effects of a Modern Amplidyne Voltage Regulator on Underexcited Operation of Large Turbine Generators”, *AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-71, pp.692-697, Aug. 1952.
- [HUNE91] M. Huneault and F.D. Galiana, “A Survey of the Optimal Flow Literature”, *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 6, no. 2, pp. 762–770, May 1991.
- [ILIÇ98] D. Marija Ilić, F. D. Galiana and L. H. Fink, “Power System Restructuring Engineering and Economics” Kluwer International series in engineering & Computer science, 448, 1998.
- [KARM84] N. Karmarkar, “A new polynomial-time algorithm for linear programming”, *Combinatorica*, vol. 4, pp. 373-395, 1984
- [KUND94] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill Text, 1994.
- [LATO95] M. L. Latorre, “Aplicação do Método de Pontos Interiores Primal-Dual Para a Resolução do Problema de Fluxo de Potência Ótimo”, Tese de M.SC., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1995.
- [LIU02] M. Liu, S. K. Tso and Y. Cheng, “An Extended Nonlinear Primal-Dual Interior-Point Algorithm for Reactive-Power Optimization of large-Scale Power System With Discrete Control Variables”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.: 17, no. 4, pp. 982–991, Nov. 2002.
- [LOF95] P.A. Lóf, G. Andersson and D.J. Hill, “Voltage Dependent Reactive Power Limits for Voltage Stability Studies”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.: 10, no. 1, pp. 220–228, Feb. 1995.

- [MACH04] Z.S. Machado, G.N. Taranto and D.M. Falcão, “An optimal power flow formulation including detailed modeling of generators”, Power Systems Conference and Exposition, IEEE, pp.1525 – 1530, Oct. 2004.
- [MANZ02] A. Manzoni, G. N. Taranto and D. M. Falcão, “A Comparison of Power Flow, Full and Fast Dynamic Simulations”, Proceedings of the 14th PSCC, Sevilla, Session 38, Paper 2, June 2002.
- [MECR91] B. C. Mecrow, A. G. Jack and K. W. Cowan, “Stator core end heating in air and hydrogen indirectly cooled turbogenerators”, Fifth International Conference on Electrical Machines and Drives, No.341, pp. 290-294, Sep. 1991.
- [MEHR92] S. Mehrotra, “On the implementation of a primal-dual interior point method”, *SIAM Journal on Optimization*, vol. 2, pp. 575-601, 1992.
- [MOMO99] J. A. Momoh, M. E. El-Hawary and R. Adapa, “A Review of Selected Optimal Power Flow Literature to 1993. Part I”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.14, no.1, pp.96-104, Feb. 1999.
- [MOMO99] J. A. Momoh, M. E. El-Hawary and R. Adapa, “A Review of Selected Optimal Power Flow Literature to 1993. Part II”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.14, no.1, pp.105-111, Feb. 1999.
- [MONT83] A. Monticelli, *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*, Edgard Blucher, São Paulo, 1983.
- [NAGY70] I. Nagy, “Analysis of Minimum Excitation Limits of Synchronous Machines”, *IEEE Transactions on Power System*, Vol PAS-86, No.12, pp.1001-1008, Jul/Aug 1970.
- [NILS94] N.E. Nilsson and J. Mercúrio, “Synchronous generator capability curve testing and evaluation”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 9, no. 2, pp. 414 – 424 Jan. 1994.
- [PAI81] M.A. Pai, *Energy Function Analysis for Power System Stability*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1981

- [PERE91] L. A. Pereira, “Implementação de um programa de fluxo de potência ótimo Utilizando Programação Quadrática Seqüencial”, Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1991.
- [QUIN00] V.H. Quintana, G.L. Torres and J. Medina-Palomo, “Interior-point methods and their applications to power systems: A classification of publications and software codes”, *IEEE Transactions Power Systems*, vol. 15, no. 1, pp. 170-176, Feb. 2000.
- [RAMA68] R. Ramanathan, “Optimal Power Flow Applications and Training Requirements”, In: *Optimal Power Flow: Solution Techiques, Requirements and Challenges, IEEE Tutorial Course*, New York, pp. 52-60, 1968.
- [RAMO05] L.Ramos de Araujo, “Uma contribuição ao fluxo de potência ótimo aplicado a sistemas de potência trifásicos usando o método de pontos interiores”, Tese de doutorado UFRJ, Rio de Janeiro-Brasil, 2005.
- [RIDE02] M. J. Rider, “Metodologia de análise para um mercado competitivo da potência reativa”, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Maranhão, Brasil, 2002.
- [RID04a] M.J. Rider, C.A. Castro, V.L. Paucar and A.V. Garcia, “Higher Order Interior–Point Method for Minimising Load–Shedding in a Competitive Electric Power Market”, *IEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution*, vol. 151, no. 4, pp. 433–440, Jul. 2004.
- [RID04b] M.J. Rider, C.A. Castro, M.F. Bedriñana and A.V. Garcia, “Towards a fast and robust interior point method for power system applications”, *IEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution*, 151, no. 5, pp. 575–581, Set. 2004.
- [ROMA05] C. Roman and W. Rosehart, “Complementarity Model for Generator Buses in OPF-Based Maximum Loading Problems”, *IEEE Transactions on power systems*, Vol. 20, No. 1, feb. 2005

- [ROSE03] W. D. Rosehart, C. A. Cañizares and V. H. Quintana, “Effect of Detailed Power System Models in Traditional and Voltage-Stability-Constrained Optimal Power Flow Problems”, *IEEE Transactions on Power Systems* Vol. 18, No. 1, Feb. 2003
- [ROSE05] W. D. Rosehart, C. Roman and A. Schellenberg, “Optimal power flow with complementarity constraints”, *IEEE Transactions on Power Systems* Vol. 20, No. 2, May. 2005
- [SANT03] J. R. Santos, A. Lora, T. Exposito and J. L. Ramos, “Finding Improved Local Minima of power System Optimization Problems by Interior-Point Methods”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, no. 1, pp. 238-244, Feb. 2003.
- [SALG90] R. Salgado, A. Brameller and P. Aitchison, “Optimal Power Flow Solutions using the Gradient Projection method I: Theoretical basis”, *IEE Proceedings C*, vol.137, issue 6, pp. 424-428, Nov. 1990.
- [SALG90] R. Salgado, A. Brameller and P. Aitchison, “Optimal Power Flow Solutions using the Gradient Projection method Parte II: Modelling of the Power System equations”, *IEE Proceedings C*, vol.137, issue 6, pp. 429-435, Nov. 1990.
- [SMOL93] H. A. Smolleck and H. Chen, “A Software demonstrator for steady-state Synchronous-machine behavior”, Twenty-third Annual Conference ‘Engineering Education: Renewing America’s Technology’, Proceeding, pp. 760-765, Nov. 1993.
- [STOT86] B. Stott, O. Alsac and J. L. Marinho, “The Optimal Power Flow Problem”, *Electric Power problems: The Mathematical Challenge*, pp. 327 – 351, SIAM, 1986.
- [STOT77] B. Stott and H. Hobson, “Power System Security Control Calculations Using Linear Programming – Part I and II”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Jul 1977.
- [STOT78] B. Stott and J.L. Marinho, “Linear Programming for Power System Network Security Applications”, *IEEE Transactions on Power*

*Apparatus and Systems*, vol. PAS-98, no. 3, pp. 837-848, May/Jun 1978.

- [SUN84] D.I. Sun, B. Ashly, B. Brewer, A. Hughes and W.F. Tinney, “Optimal Power Flow by Newton Approach”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-103, no. 10, pp. 2864-2880, Oct. 1984.
- [SUN87] D.I. Sun, B. Hughes, W.F. Tinney, J. Bright and J. Lamont, “Optimal Power Flow by Newton Method”, *IEEE Tutorial – Reactive Power: Basics, Problems and Solutions*, Feb. 1987.
- [TINN87] W. F. Tinney and D. I. Sun, “Optimal Power Flow: Research and Code”, EPRI Research Project No. 1724-1, Final Report, Feb. 1987.
- [TORR98] G.L Torres and V.H. Quintana, “An interior-point method for non-linear optimal power flow using voltage rectangular coordinates”, *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 13, no. 4, pp. 1211-1218, Nov. 1998.
- [VILLA01] S. M. Villamizar and K. C. Almeida, “Optimal power flow solutions under variable load conditions: Reactive power cost modeling”, *Power Industry Computer Applications, PICA 2001. Innovative Computing for Power - Electric Energy Meets the Market*, pp.300-305, may 2001
- [WEED89] B. M. Weedy, J. Wiley and Chichester, *Electric Power System*, pp 98-103, 1989
- [WAIG04] J. Waight, “Recent Developments in Optimal Power Flow”, *IEEE Power Engineering Society General Meeting vol.1*, pp 1008, Jun.2004
- [WALK52] J.H. Walker, “Operating characteristics of salient-pole machines” *Proc. IEE Vol. 100, parte II*, pp. 13 – 25, Aug. 1952.
- [WOOD96] A. Wood and B. Wollenberg, “Power generation, operation, and control”, John Wiley & Sons, 2nd. ed., 1996.

- [WRIG97] S. Wright, “Primal-Dual Interior Point Methods”, Argonne, Illinois, Editora Siam, 1997.
- [WU94] Y. C. Wu, A. S. Debs and R. E. Marsten, “A Direct Nonlinear Predictor-Corrector Primal-Dual Interior Point Algorithm for Optimal Power Flow”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.9, no.2, pp.876-883, May 1994.
- [YUAN02] Y. Yuan, J. Kubokawa and H. Sasaki, “Optimal Power Flow solution with multi-contingency transient stability constraints”, International Conference on Power System Technology, 2002., Vol. 4, pp. 2009-2013, Oct. 2002.
- [ZAWO01] R. J. Zawoysky and W. M. Genovese, *Generator Rotor Thermal Sensitivity - Theory and Experience*, General Electric, Power Systems, Schenectady – New York, 2001.
- [ZIMM05] R.D. Zimmerman and D. Gan, MATPOWER – A MATLAB™ Power System Simulation Package, user’s manual (version 3.0), Power Systems Engineering Research Center (PSERC), School of Electrical Engineering, Cornell University, Ithaca, NY, 2005. <http://www.pserc.cornell.edu/matpower/>