

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

FRANCIELE CICCONE

**ESTUDO SOBRE A OPERAÇÃO DESCENTRALIZADA
DE SISTEMAS COM PREDOMÍNIO DE GERAÇÃO
HIDRELÉTRICA**

Florianópolis

2013

FRANCIELE CICCONE

**ESTUDO SOBRE A OPERAÇÃO DESCENTRALIZADA
DE SISTEMAS COM PREDOMÍNIO DE GERAÇÃO
HIDRELÉTRICA**

Dissertação submetida ao Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Elé-
trica para a obtenção do Grau de Mes-
tre em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Profa. Katia Campos de
Almeida, Ph.D.

Universidade Federal de Santa Cata-
rina

Florianópolis

2013

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Cicconet, Franciele

Estudo Sobre a Operação Descentralizada de Sistemas com Predomínio de Geração Hidrelétrica / Franciele Cicconet ; orientadora, Katia Campos de Almeida - Florianópolis, SC, 2013.

157 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Inclui referências

1. Engenharia Elétrica. 2. Problemas de equilíbrio com restrições de equilíbrio. 3. Despacho de usinas hidrelétricas sob condições de competição na geração. 4. Teoria de jogos. 5. Otimização em dois níveis. I. Campos de Almeida, Katia . II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

FRANCIELE CICCONE

**ESTUDO SOBRE A OPERAÇÃO DESCENTRALIZADA
DE SISTEMAS COM PREDOMÍNIO DE GERAÇÃO
HIDRELÉTRICA**

Esta Dissertação foi julgada aprovada para a obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Elétrica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Florianópolis, 8 de Maio 2013.

Prof. Patrick Kuo Peng, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Profa. Katia Campos de Almeida, Ph.D.
Universidade Federal de Santa Catarina
Orientadora

Prof. Pablo Eduardo Cuervo Franco, Dr.
Universidade de Brasília

Prof. Antônio José Alves Simões Costa, Ph.D.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Hans Helmut Zürn, Ph.D.
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

A concretização deste trabalho não teria sido possível sem o apoio, confiança e atenciosa orientação da professora Katia Campos de Almeida. Meu especial agradecimento por compartilhar seu vasto conhecimento e modelo de disponibilidade e profissionalismo, nesta nobre tarefa do ensino e pesquisa.

Meu agradecimento também a todos os colegas de mestrado e em especial ao grupo do LABSPOT: Aline, Kauana e Erika pelo convívio, amizade, estudos e momentos de descontração vividos a cada dia.

Aos meus pais, Iva e Mário, pelos esforços e sacrifícios realizados em prol da educação dos filhos. Ao meu irmão Marcelo, que mesmo distante sempre esteve presente com palavras de apoio e amizade. Minha eterna gratidão a vocês por proporcionarem o equilíbrio necessário para vencer mais essa etapa da minha vida.

À CAPES pelo suporte financeiro deste trabalho.

Finalmente agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento desse projeto.

“Faça o melhor que possa, de onde estiver”.
(Richard Bellman)

RESUMO

ESTUDO SOBRE A OPERAÇÃO DESCENTRALIZADA DE SISTEMAS COM PREDOMÍNIO DE GERAÇÃO HIDRELÉTRICA

Franciele Cicconet

Florianópolis
2013

Devido aos diversos fatores envolvidos no planejamento da operação de sistemas hidrelétricos, tais como a interligação espacial e temporal entre as usinas e a natureza estocástica das vazões afluentes, no Brasil a geração de energia é coordenada na forma de operação centralizada, de modo a definir um despacho que otimize a utilização do parque gerador instalado. Contudo, esse modelo apresenta alguns desafios quando aplicado a um ambiente de competição na geração. Com o intuito de aumentar a eficiência econômica do setor elétrico sem excluir o papel do operador central, este trabalho visa analisar uma forma alternativa de despacho de geração de um sistema com predomínio de geração hidrelétrica que permita mais autonomia às empresas geradoras. Propõe-se um modelo matemático que representa um despacho descentralizado, no qual ficaria ao operador do sistema a função de coordenar as ofertas feitas pelos agentes geradores, garantindo o suprimento de energia em todo o período tendo em vista os limites físicos e operacionais do sistema. O despacho descentralizado é modelado como um problema de equilíbrio com restrições de equilíbrio (*equilibrium problem with equilibrium constraints* - EPEC). As soluções de equilíbrio obtidas são comparadas com as soluções ótimas do modelo de despacho clássico (centralizado). A estocasticidade do problema é tratada por uma formulação em dois estágios e, para garantir a qualidade da solução obtida, mantendo-se o problema com uma dimensão de cenários aceitável, utiliza-se a técnica da *Janela Deslizante*. É demonstrada a viabilidade prática do modelo proposto aplicando-se o mesmo a equivalentes do sistema elétrico brasileiro.

Palavras-chave: Problemas de equilíbrio com restrições de equilíbrio, despacho de usinas hidrelétricas sob condições de competição na geração, teoria de jogos, programação estocástica, otimização em dois níveis.

ABSTRACT

STUDIES ABOUT DECENTRALIZED OPERATION OF PREDOMINANTLY HYDRO SYSTEM

Franciele Cicconet

Florianópolis

2013

Due to the numerous factors involved in the operational planning of hydroelectric systems, such as the spatial and temporal interconnection power plants and the stochastic nature of water inflows, in Brazil, generation dispatch is carried out in a centralized manner by the system operator. However, this model presents some challenges when power producers compete to supply load. Aiming at increasing the economic efficiency of the electricity sector, without excluding the role of the system operator, the goal of this work is to analyze a decentralized form of generation dispatch, which gives autonomy to power producers to define the offered power to supply load and allows the system operator to coordinate these offers in order to guarantee that physical and operational constraints be satisfied. The decentralized dispatch is modeled as an equilibrium problem with equilibrium constraints (EPEC). Uncertainties of water inflows are considered by using a two-stage stochastic formulation for the dispatch problem and, to ensure the quality of the obtained solutions, the rolling window technique is adopted. To attest the viability of the proposed model, its solutions are compared to the solutions of a centralized dispatch procedure for two equivalents of the Brazilian system.

Keywords: equilibrium problems with equilibrium constraints, dispatch of hydroelectric plants under power markets, game theory, stochastic programming, bilevel optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Árvore de Cenários para programação estocástica multiestágios.....	45
Figura 2.2	Arvore de Cenários para programação estocástica em dois estágios.....	47
Figura 2.3	Representação dos Cenários de Vazões.....	47
Figura 2.4	Árvore de Cenários de Vazões para Janela Deslizante .	48
Figura 2.5	Esquema de Representação dos Aproveitamentos de uma Usina Hidrelétrica.....	50
Figura 2.6	Balanco de potência na rede.....	52
Figura 3.1	Despacho descentralizado formulado como um EPEC.	72
Figura 3.2	Estrutura de um jogo lider-seguidores.....	73
Figura 3.3	Estrutura de um jogo multi-lider-seguidor-comum....	74
Figura 3.4	Sistema Teste.....	81
Figura 5.1	Sistema CESP 4H.....	107
Figura 5.2	Curva de Demanda - Sistema CESP 4H.....	107
Figura 5.3	Volumes nos reservatórios no despacho centralizado CESP, sem limites de transmissão e vazões afluentes entre 1946 e 1965.....	109
Figura 5.4	Volumes nos reservatórios no despacho descentralizado CESP com capacidade ilimitada de transmissão, $v^{sp} = v_0$ e vazões afluentes entre 1946 e 1965.....	111
Figura 5.5	Volumes nos reservatórios no despacho descentralizado CESP limites de transmissão, $v^{sp} = v_0$ e vazões afluentes entre 1946 e 1965.....	112
Figura 5.6	Volumes nos reservatórios no despacho descentralizado CESP e capacidade ilimitada de transmissão, $v^{sp} = 0,85v_0$ e vazões afluentes entre 1946 e 1965.....	114
Figura 5.7	Volumes nos reservatórios no despacho descentralizado, com limites de transmissão, $v^{sp} = 0,85v_0$ e vazões afluentes entre 1946 a 1965.....	116
Figura 5.8	Sistema SUL 7H.....	124
Figura 5.9	Curva de Demanda - Sistema SUL7H.....	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Dados das Usinas	81
Tabela 3.2	Demanda do Sistema.....	81
Tabela 5.1	Despacho centralizado CESP sem limites de transmissão e vazões entre 1946-1965.....	108
Tabela 5.2	Despacho centralizado CESP com limites de transmissão e vazões afluentes entre 1946 e 1965.....	109
Tabela 5.3	Despacho descentralizado CESP sem limite de transmissão, $v^{sp} = v_0$ e vazões afluentes entre 1946 e 1965..	110
Tabela 5.4	Despacho descentralizado CESP com limites de transmissão, $v^{sp} = v_0$ e vazões afluentes entre 1946 e 1965..	112
Tabela 5.5	Despacho descentralizado CESP sem limites de transmissão, $v^{sp} = 0,85v_0$ e vazões afluentes entre 1946 a 1965.....	113
Tabela 5.6	Despacho descentralizado CESP com limites de transmissão, $v^{sp} = 0,85v_0\%$ e vazões afluentes entre 1946 a 1965.....	115
Tabela 5.7	Despacho Centralizado CESP sem limites de transmissão e vazões afluentes entre 1980 a 1999.	116
Tabela 5.8	Despacho Centralizado CESP com limites de transmissão e vazões afluentes entre 1980 a 1999.	117
Tabela 5.9	Despacho Descentralizado CESP sem limites de transmissão, $v^{sp} = v_0$ e vazões afluentes entre 1980 a 1999.	117
Tabela 5.10	Despacho Descentralizado CESP com limites nas linhas, $v^{sp} = v_0$ e e vazões afluentes entre 1980 a 1999.....	118
Tabela 5.11	Despacho Descentralizado CESP sem limites de transmissão, $v^{sp} = 0,85v_0$ e vazões afluentes entre 1980 a 1999.....	118
Tabela 5.12	Despacho Descentralizado CESP com limites de transmissão, $v^{sp} = 0,85v_0$ e vazões afluentes entre 1980 a 1999.....	119
Tabela 5.13	CESP - Média de geração térmica para vazões afluentes entre 1946 a 1965.....	121
Tabela 5.14	CESP - Volumes reservatórios e desvios padrões médios para vazões afluentes entre 1946 a 1965.....	121
Tabela 5.15	CESP - Média de geração térmica para vazões afluentes	

entre 1980 a 1999.....	122
Tabela 5.16 CESP - Volumes reservatórios e desvios padrões médios para vazões afluentes entre 1980 a 1999.....	123
Tabela 5.17 Despacho Centralizado SUL sem limites de transmissão e vazões afluentes entre 1946 a 1965.	125
Tabela 5.18 Despacho Centralizado SUL com limites de transmissão e vazões afluentes entre 1946 a 1965.	125
Tabela 5.19 Despacho Descentralizado SUL sem limites de transmissão, $v^{sp} = v_0$ e vazões afluentes entre 1946 a 1965.	126
Tabela 5.20 Despacho Descentralizado SUL com limites de transmissão, $v^{sp} = v_0$ e vazões afluentes entre 1946 a 1965.	127
Tabela 5.21 Despacho Descentralizado SUL sem limites de transmissão, $v^{sp} = 0,85v_0$ e vazões afluentes entre 1946 a 1965.....	128
Tabela 5.22 Despacho Descentralizado SUL com limites de transmissão, $v^{sp} = 0,85v_0$ e vazões afluentes entre 1946 a 1965.....	128
Tabela 5.23 SUL - Média de geração térmica para vazões afluentes entre 1946 a 1965.....	129
Tabela 5.24 SUL - Volumes reservatórios e desvios padrões médios para vazões afluentes entre 1946 a 1965.....	130
Tabela 5.25 SUL - Média de geração térmica para vazões afluentes entre 1980 a 1999.....	131
Tabela 5.26 SUL - Volumes reservatórios e desvios padrões médios para vazões afluentes entre 1980 a 1999.....	131
Tabela 5.27 Despacho centralizado CESP com limite de transmissão na linha 3 – 10	133
Tabela 5.28 Despacho descentralizado CESP por equilíbrio de Nash.	134
Tabela 5.29 Despacho descentralizado CESP com consistência de preços.....	134
Tabela 5.30 CESP (2) - Média de geração térmica para vazões afluentes entre 1980 a 1999.....	136
Tabela 5.31 CESP (2) - Volumes reservatórios e desvios padrões médios para vazões afluentes entre 1980 a 1999.	136
Tabela 5.32 SUL (2) - Média de geração térmica para vazões afluentes entre 1980 a 1999.....	137
Tabela 5.33 SUL (2) - Volumes reservatórios e desvios padrões médios para vazões afluentes entre 1980 a 1999.	137

Tabela A.1	Dados das usinas (CESP)	147
Tabela A.2	Demanda (CESP) por barra (MW)	147
Tabela A.3	Dados do sistema CESP	148
Tabela B.1	Dados das usinas (SUL)	151
Tabela B.2	Demanda (SUL) por barra (MW)	151
Tabela B.3	Dados do Sistema SUL	152

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACL	Ambiente de Contratação Livre.
ACR	Ambiente de Contratação Regulada.
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica.
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica.
EPEC	Problema de Equilíbrio com Restrições de Equilíbrio (<i>Equilibrium Problem with Equilibrium Constraints</i>).
MAE	Mercado Atacadista de Energia Elétrica.
MPEC	Problema Matemático com Restrições de Equilíbrio (<i>Mathematical Problem with Equilibrium Constraints</i>).
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico.
PMO	Programa Mensal de Operação.
SIN	Sistema Interligado Nacional.

LISTA DE SÍMBOLOS

$\tilde{\mathbf{A}}$	Matriz de incidência ramos-barras.
\mathbf{A}_v	Matriz de zeros e uns de dimensão $(H.T \times H.T)$ utilizada para o balanço hídrico do sistema.
\mathbf{A}_s	Matriz de zeros e uns de dimensão $(H.T \times H.T)$ utilizada para o balanço hídrico do sistema.
\mathbf{B}	Matriz do tipo admitância nodal.
$\tilde{\mathbf{B}}$	Matriz de dimensão $(N_b.T \times N.T)$ para balanço de potência no sistema.
d_i	Constante de produtividade da usina i .
\mathbf{d}	Vetor formado por d_1, \dots, d_H .
$D(\omega)$	Função dual do problema de nível inferior $P(\omega)$.
\mathbf{e}	Vetor formado por uns.
f	Função objetivo do despacho centralizado.
\mathbf{f}_l^{\min}	Limite mínimo de fluxo de potência na linha de transmissão l .
\mathbf{f}_l^{\max}	Limite máximo de fluxo de potência na linha de transmissão l .
\mathbf{G}	Matriz de incidência barras-geradores.
$\tilde{\mathbf{G}}$	Matriz de dimensão $(N_b.T \times H.T)$ para balanço de potência no sistema.
H	Número total de usinas no sistema.
i, j	Índice que representa cada usina ou produtor.
$i_{km,t}(\omega)$	corrente na linha $k - m$, no cenário ω .
k	Índice que representa cada barra do sistema.
l	Índice que representa cada linha do sistema.
L	Número total de linhas de transmissão do sistema.
$\mathcal{L}(\cdot)$	Lagrangeano do problema de nível inferior $P(\omega)$.
\mathbf{M}	Matriz que agrega as capacidades dos ramos e incidência ramos-barras.
N_ω	Número total de cenários no sistema.
N_b	Número total de barras do sistema.
$\hat{\mathbf{O}}_j$	Vetor de ofertas de todos os j produtores.
$\mathbf{Of}(\omega)$	Vetor de ofertas para cada cenário ω .

$pd_{k,t}$	Carga de potência ativa na barra k .
$ph_{i,t}(\omega)$	Potência gerada pela usina i , período de tempo t e cenário ω .
ph_i^{\min}	Limite mínimo de potência gerada pela usina i .
ph_i^{\max}	Limite máximo de potência gerada pela usina i .
$\mathbf{ph}(\omega)$	Vetor de potência gerada em cada cenário ω .
\mathbf{ph}^{\min}	Vetor de limites mínimos de potência gerada.
\mathbf{ph}^{\max}	Vetor de limites máximos de potência gerada.
$p_k(\cdot)$	Injeção de potência ativa na barra k .
$P_{km}(\cdot)$	fluxos de potência ativa na linha $k - m$.
$P(\omega)$	Problema de otimização do nível inferior definido para cada cenário ω .
$qd_{k,t}$	Carga de potência reativa na barra k .
$q_{i,t}(\omega)$	Vazão turbinada para cada usina i , período de tempo t e cenário ω .
q_i^{\min}	Limite mínimo de potência gerada pela usina i .
q_i^{\max}	Limite máximo de potência gerada pela usina i .
$q_k(\cdot)$	Injeção de potência reativa na barra k .
$Q_{km}(\cdot)$	fluxos de potência reativa na linha $k - m$.
\mathbf{q}^{\min}	Vetor de limites mínimos de vazão turbinada.
\mathbf{q}^{\max}	Vetor de limites máximos de vazão turbinada.
$\mathbf{q}(\omega)$	Vetor de vazão turbinada para cada cenário ω .
$r_{i,t}(\omega)$	Vazão afluyente no reservatório da usina i , período de tempo t e cenário ω .
r_{km}	resistência na linha (k,m) .
$\mathbf{r}(\omega)$	Vetor de vazão afluyente para cada cenário ω mais volumes iniciais dos reservatórios
S	Região viável da função dual $D(\omega)$.
T	Número total de períodos no sistema.
$u_{i,t}(\omega)$	Vazão vertida para cada usina i , período de tempo t e cenário ω .
$\mathbf{u}(\omega)$	Vetor de vazão vertida para cada cenário ω .
$v_{i,t}(\omega)$	Volume armazenado no reservatório da usina i , período de tempo t e cenário ω .
v_i^{\min}	Limite mínimo de potência gerada pela usina i .

v_i^{\max}	Limite máximo de potência gerada pela usina i .
\mathbf{v}^{\min}	Vetor de limites mínimos de volume nos reservatórios.
\mathbf{v}^{\max}	Vetor de limites máximos de volume nos reservatórios do sistema.
$\mathbf{v}(\omega)$	Vetor de volumes nos reservatórios para cada cenário ω .
$\mathbf{V}_t(\omega)$	Vetor de magnitude de tensão de barra no período t e cenário ω .
x_{km}	reatância na linha (k,m) .
$y_{k,t}(\omega)$	Complementação térmica em cada barra k , no período de tempo t e cenário ω .
y_{km}	admitância na linha (k,m) .
$\alpha(\omega)$	Multiplicador de Lagrange associado com as restrições de balanço hídrico das usinas para cada cenário ω .
$\beta(\omega)$	Multiplicador de Lagrange associado com as funções de produção das usinas para cada cenário ω .
Γ	Matriz primitiva das capacidades dos ramos.
$\gamma^{\min}(\omega)$	Multiplicador de Lagrange associado aos limites mínimos de geração hidrelétrica para cada cenário ω .
$\gamma^{\max}(\omega)$	Multiplicador de Lagrange associado aos limites máximos de geração hidrelétrica para cada cenário ω .
η_i	Rendimento médio do conjunto turbina-gerador da usina i .
$\text{diag}(\eta)$	Matriz diagonal formada pelos coeficientes lineares η_i de cada usina i .
$\theta(\cdot)$	Vetor dos ângulos das tensões nodais $\theta_{k,t}(\omega)$.
$\theta_t(\omega)$	Vetor de ângulos de tensão de barra no período t e cenário ω .
$\theta_{km,t}(\omega)$	Ângulo entre as barras k e m , no período t no cenário ω .
$\kappa^{\min}(\omega)$	Multiplicador de Lagrange associado a $\mathbf{u}(\omega)$.
$\lambda(\omega)$	Multiplicador de Lagrange associado com as restrições de balanço de potência nas barras para cada cenário ω .
$\pi^{\min}(\omega)$	Multiplicador de Lagrange associado aos limites mínimos de fluxo nas linhas para cada cenário ω .
$\pi^{\max}(\omega)$	Multiplicador de Lagrange associado aos limites máximos de fluxo nas linhas para cada cenário ω .
$\rho^{\min}(\omega)$	Multiplicador de Lagrange associado aos limites mínimos

dos reservatórios para cada cenário ω .

$\rho^{\max}(\omega)$ Multiplicador de Lagrange associado aos limites máximos dos reservatórios para cada cenário ω .

$\sigma^{\min}(\omega)$ Multiplicador de Lagrange associado aos limites mínimos de vazão turbinada para cada cenário ω .

$\sigma^{\max}(\omega)$ Multiplicador de Lagrange associado aos limites máximos de vazão turbinada para cada cenário ω .

$\tau(\omega)$ Vetor de variáveis de otimização para cada problema de nível inferior $P(\omega)$.

$\psi(\omega)$ Vetor composto por $\beta(\omega)$, $\alpha(\omega)$, $\lambda(\omega)$, $\pi^{\min}(\omega)$, $\pi^{\max}(\omega)$, $\gamma^{\min}(\omega)$, $\gamma^{\max}(\omega)$, $\rho^{\min}(\omega)$, $\rho^{\max}(\omega)$, $\sigma^{\min}(\omega)$ e $\sigma^{\max}(\omega)$.

$\zeta^{\min}(\omega)$ Multiplicador de Lagrange associado a $\mathbf{y}(\omega)$.

' Superescrito - Indica transposto

max Superescrito - Indica máximo

min Superescrito - Indica mínimo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	31
1.1 Contextualização do Problema	31
1.2 Planejamento da Operação de Sistemas com Predomínio de Geração Hidrelétrica	32
1.3 Mercado de Energia Elétrica no Brasil	34
1.4 Teoria dos Jogos em Modelos de Mercado	36
1.5 Revisão Bibliográfica	39
1.6 Objetivos da Dissertação	40
1.7 Organização da Dissertação	41
2 PLANEJAMENTO DE MÉDIO PRAZO	43
2.1 Introdução	43
2.2 Programação Estocástica	43
2.2.1 Despacho de Usinas Hidrelétricas Modelado como um Pro- blema de Programação Estocástica de Dois Estágios	45
2.2.1.1 O Conceito da Janela Deslizante	47
2.3 Representação das Usinas Hidrelétricas	49
2.3.1 Balanço hídrico	50
2.3.2 Função de produção	51
2.3.3 Limites de Operação das Usinas	51
2.4 Representação da Rede Elétrica	52
2.4.1 Fluxo de Potência Linearizado	53
2.4.2 Restrições de Balanço de Potência	56
2.4.3 Limites de Fluxos de Potência nos Ramos	57
2.4.4 Objetivos do Despacho Centralizado	58
2.4.5 Despacho Centralizado	58
2.4.6 Arranjos Matriciais	61
2.5 Conclusões	64
3 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE DESPACHO DESCEN- TRALIZADO	67
3.1 Introdução	67
3.2 Despacho Descentralizado	67
3.2.1 Formulação do Problema de um Único Produtor	68

3.2.2	Problema de Despacho Descentralizado Formulado Como um EPEC	71
3.3	Despacho Descentralizado e Jogos Não-Cooperativos	72
3.3.1	Jogo Líder-Seguidores	73
3.3.2	Jogo Multi-Líder-Seguidor-Comum	74
3.4	Soluções de Equilíbrio com Consistência de Preços	75
3.5	Exemplo Ilustrativo	80
3.6	Conclusões	89
4	ESTRATÉGIA DE SOLUÇÃO	91
4.1	Introdução	91
4.2	Interpretação do Modelo Otimização em Dois Níveis	91
4.3	Métodos de Solução do Problema de Otimização com Dois Níveis	92
4.4	Solução do Despacho Descentralizado com Consistência de Preços	93
4.4.1	Solução Analítica do Problema de Nível Inferior	94
4.4.2	Problema de um Único Nível	97
4.5	Solução do Problema de Despacho Descentralizado Geral	99
4.6	Conclusões	102
5	RESULTADOS	105
5.1	Introdução	105
5.2	O Sistema de Modelagem Algébrica (GAMS)	105
5.3	Descrição dos estudos	106
5.4	CESP: D. Centralizado versus D. Descentralizado com Consistência de Preços	106
5.4.1	Caso 1: CESP com Cenários de Vazões Críticas (1946-1965)	108
5.4.2	Caso 2: CESP Com Cenários de Vazões Não Críticas (1980 - 1999)	115
5.4.3	Análise de resultados: Sistema CESP	119
5.5	SUL: D. Centralizado versus D. Descentralizado com Consistência de Preços	122
5.5.1	Caso 1: SUL com Cenários de Vazões Críticas (1946-1965) .	123
5.5.2	Caso 2: SUL com Cenários de Vazões Não Críticas (1980-1999)	130
5.5.3	Análise de Resultados: Sistema SUL	132
5.6	Despacho Descentralizado: Equilíbrio de Nash	133

5.7	Existência de Múltiplas Soluções	135
5.8	Desempenho Computacional dos Métodos	138
5.9	Conclusões	138
6	CONCLUSÕES	141
6.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	142
APÊNDICE A – DADOS DO SISTEMA CESP4H 15		
	BARRAS	147
APÊNDICE B – DADOS DO SISTEMA SUL7H 32 BARRAS		151
REFERÊNCIAS		153

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do Problema

Nas últimas décadas tem se verificado uma transformação estrutural e reguladora dos setores de energia elétrica em todo o mundo. Foi-se introduzindo o conceito de mercado, incorporando mecanismos de competição entre os agentes como forma de aumentar a eficiência econômica do setor. Neste ambiente de competição na geração, surge a necessidade de estabelecer soluções que garantam uma operação confiável do sistema aliada a um tratamento justo entre todos os agentes envolvidos.

A transição de monopólio estatal para mercado competitivo de energia elétrica ainda enfrenta desafios [1]. Em um seminário promovido pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) em 2008, concluiu-se que no Brasil o preço final da energia é fortemente influenciado pela diferença que ocorre entre o despacho comercial e o despacho físico de potência do sistema, pois resulta em distorções nos valores estimados e realizados pelos agentes de geração [2].

Uma possível solução para este impasse seria a consolidação de um regime competitivo na geração, dando mais autonomia para esses agentes definirem os montantes ofertados de energia para o mercado. Neste caso, ficaria a cargo do operador do sistema a função de coordenar as ofertas dos agentes geradores e encontrar um despacho factível, assegurando a continuidade no suprimento de energia em todo o período. Tal arranjo corresponde a um despacho descentralizado das usinas hidrelétricas.

O despacho descentralizado de usinas hidrelétricas é atualmente adotado tanto em países com predomínio de geração hidrelétrica, como é o caso da Noruega [3], e também em países com percentual reduzido deste tipo de geração, como Portugal e Espanha [4]. No Brasil, mesmo após a reestruturação do setor elétrico e a criação do mercado, o despacho tem sido feito de forma centralizada, principalmente devido à grande interligação entre as usinas hidrelétricas [5]. No entanto, o problema do despacho centralizado não está ainda totalmente resolvido para um ambiente de competição na geração [6]. O presente trabalho visa analisar um modelo alternativo para o despacho de geração de um sistema com predomínio de geração hidrelétrica que permita mais liberdade às empresas geradores, sem excluir o papel de um operador central.

Este capítulo está organizado da seguinte forma. Primeiramente é feita uma breve descrição do planejamento de operação de sistemas com geração hidrelétrica. Posteriormente é feito um resumo do processo de reestruturação do setor elétrico brasileiro, indicando também alguns problemas encontrados por agentes geradores que participam do mercado.

1.2 Planejamento da Operação de Sistemas com Predomínio de Geração Hidrelétrica

No Brasil, as usinas hidrelétricas constituem 70% da matriz energética atualmente em operação e isso representa aproximadamente 34% de todo o potencial hidrelétrico já explorado [7], [8]. Portanto, as usinas hidrelétrica irão desempenhar um papel importante no atendimento à crescente demanda de energia nas próximas décadas.

Em sistemas com predomínio de geração térmica, a operação não é usualmente afetada por problemas de estocasticidade das fontes de energia e não existem interconexões espaciais e temporais entre as usinas. Os fatores que afetam o despacho de geração neste tipo de sistema são basicamente: os preços dos combustíveis, os custos e o tempo necessário para entrarem em operação e ainda os limites operacionais das usinas. Todos esses fatores não têm impacto a longo prazo no sistema, fazendo com que o planejamento da operação seja geralmente de curto prazo [5].

O planejamento da operação de sistemas com predomínio de geração hidrelétrica apresenta maiores desafios. Isso se deve a fatores como: a interdependência entre as variáveis envolvidas, as interligações hidráulicas entre as inúmeras usinas, a estocasticidade dos fenômenos naturais e os múltiplos usos da água. Deve-se salientar também que qualquer que seja a decisão tomada na operação, ela pode afetar a disponibilidade dos recursos hídricos a longo prazo.

Portanto, resolver este problema com um único modelo matemático não seria possível. Assim, a tomada de decisão envolve a análise de uma cadeia complexa de modelos em várias etapas de operação e coordenados entre si, que compreendem um planejamento de longo, médio e curto prazos [5].

No planejamento de longo prazo são estabelecidas as estratégias de operação para cada estágio sob incertezas de afluições futuras de água nos reservatórios, onde são definidos os montantes de energia elétrica gerados para minimizar o custo de operação do sistema num hori-

zonte de cinco anos com discretização mensal. É elaborado anualmente, em função da realização dos leilões de energia, e ainda pode ser revisto a qualquer momento na ocorrência de fatos relevantes, como mudanças significativas na carga não atendida, na oferta de geração, disponibilidade de combustíveis, limites de intercâmbio entre subsistemas, obras de transmissão, dentre outros [9].

No planejamento de médio prazo são definidas as metas de geração de cada usina de forma que sejam atendidas as metas de especificadas pelo planejamento de longo prazo bem como os requisitos de demanda e restrições de operação para um horizonte de um ano, discretizado em semanas para o primeiro mês e em meses para os demais. Considerando a função de custo futuro são definidos os despachos de cada usina, os valores da água e a evolução nos níveis dos reservatórios [5].

Devido à proximidade com a operação em tempo real, o planejamento de curto prazo compatibiliza a operação do sistema ao longo de uma semana com discretização diária, o que exige um detalhamento maior da rede elétrica, os limites operacionais do sistema elétrico e hidráulico. O problema exige também uma boa previsão de afluência e demanda [5].

O Brasil possui um dos maiores sistemas elétricos do mundo em extensão e conta com uma predominância de usinas hidrelétricas localizadas longe dos centros de carga e ainda em regiões com diferentes regimes hidrológicos. Com base nisso, muitos esforços são feitos para garantir uma operação eficiente de todo o sistema, principalmente no que se refere à operação dos reservatórios, tratamento das incertezas das afluências e competição entre os agentes envolvidos.

A aleatoriedade das vazões afluentes é um dos fatores a serem considerados no planejamento da operação de usinas hidrelétricas. Formulações estocásticas [10] ou determinísticas [11] são utilizadas para auxiliar a tomada de decisão, que vai depender do horizonte de estudo e dos objetivos definidos para o sistema.

Além dos estudos para tratar das incertezas das afluências, outra questão importante está ligada à operação ótima dos reservatórios das usinas. Soares demonstrou que a melhor alternativa para maximizar a eficiência energética em um conjunto de usinas em cascata é deixar a regulação para as usinas a montante, enquanto que as usinas a jusante operaram como fio d'água [12].

A introdução do mercado de energia elétrica em países com geração hidrelétrica levou a necessidade de adaptações dos mecanismos de despacho das usinas. Um dos primeiros trabalhos a analisar es-

estratégias de despacho foi escrito por Pritchard, Philpott e Neame [13]. Nesse artigo, os autores abordam o problema que as usinas hidrelétricas enfrentam em determinar uma estratégia ótima de operação em um mercado *Pool*. Conejo e Arroyo também analisaram o problema enfrentado por um produtor de energia que deseja operar uma usina hidrelétrica de forma a maximizar o lucro da empresa [14]. De forma genérica observou-se que ferramentas matemáticas, atualmente usadas na análise de mercados competitivos, passaram a ser empregadas na análise de mercados de energia elétrica. Um exemplo disso é o uso da Teoria dos Jogos que será usada neste trabalho. A seguir é feita uma breve descrição do mercado de energia elétrica no Brasil.

1.3 Mercado de Energia Elétrica no Brasil

Vamos analisar brevemente como foi o processo de criação da indústria de energia elétrica no Brasil desde as reformas iniciadas em meados dos anos de 90, inspiradas na experiência internacional.

Até o início dos anos noventa o sistema elétrico brasileiro era um monopólio estatal, com o poder de geração, transmissão e distribuição de energia. Contudo, o Estado não tinha mais capacidade de sustentar os investimentos necessários para acompanhar o crescimento do setor, devido à má gestão das empresas e a um inadequado regime regulatório [15]. Era necessário, portanto, efetuar uma série de implementações institucionais para reverter o problema.

Seguindo as experiências internacionais, foi elaborado em 1996 um projeto de reestruturação do setor elétrico. A primeira medida foi estabelecer a necessidade de separar cada etapa da cadeia produtiva, criando empresas para operar cada atividade. Assim, com o pretexto de inserir um mercado competitivo nos setores de geração e comercialização, iniciava-se um processo de privatização das estatais, mantendo sob regulação a transmissão e a distribuição [16].

A separação do controle do mercado e da operação do sistema, exigiu a criação de um órgão regulador com autonomia em relação ao governo, um operador do sistema independente e um órgão responsável pela compra e venda de energia. Surgiam assim, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e o Mercado Atacadista de Energia Elétrica (MAE), respectivamente.

Nos anos subsequentes às mudanças, seguiram as tentativas de melhorar os serviços, reduzir as tarifas e incentivar os investimentos

privados. Contudo, os esforços do governo não foram suficientes para evitar um racionamento de energia elétrica em 2001. Com falhas no planejamento e execução das reformas, o setor exigia maiores investimentos na expansão do sistema. Era preciso, então, reformular o atual modelo que ainda estava em processo de implementação.

Foi assim definido um novo modelo de mercado, que tinha como objetivos principais: continuar os incentivos à competição, garantir o suprimento da energia e promover a modicidade tarifária, mantendo a desverticalização já imposta. Surgia assim, a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), que substituiu os trabalhos realizados pelo MAE [17].

O comércio de energia passou a ser realizado em dois ambientes: (i) o Ambiente de Contratação Regulada (ACR), destinado aos consumidores cativos, onde a compra e venda de energia são realizadas por meio de leilões e formalizadas por meio de contratos bilaterais regulados entre os agentes de geração ou comercialização e os distribuidores e (ii) Ambiente de Contratação Livre (ACL), que permite aos consumidores livres o direito de definirem seus fornecedores, onde a negociação ocorre livremente entre os agentes geradores, comercializadores e consumidores livres.

O mecanismo de leilões foi introduzido para incentivar a competição no segmento de geração e comercialização. Realizados anualmente para usinas em operação e em construção, toda a energia comercializada é destinada ao ACR.

Para gerir a rede e o conjunto de usinas pertencentes ao Sistema Interligado Nacional (SIN), todo o despacho é realizado por ordem de mérito pelo ONS na forma de operação centralizada, ou seja, das tecnologias de geração mais baratas até as mais caras [5]. Neste modelo, as usinas não têm o poder de alterar ou intervir na determinação dos montantes de energia que vão gerar, podem apenas declarar a disponibilidade de geração ao operador. Em um seminário organizado pela CCEE concluiu-se que este fator pode levar a expressivas diferenças entre os preços estimados e realizados pelos agentes, aumentando o preço da energia para os consumidores finais [2].

Uma nova tentativa do governo para reduzir o preço das tarifas de energia (que agregavam ainda alguns encargos setoriais) e incentivar ainda mais a competição na geração ocorreu em 2012, quando foi aprovada uma medida provisória que estabelece novas normas nas concessões de geração, transmissão e distribuição de energia. Essas medidas causaram mudanças no modelo do Setor Elétrico, pois definiram um novo tratamento para a energia considerada “velha”, que tinha con-

tratos vencendo em 2012 oriundos de leilões realizados em 2004. Boa parte dessa energia comercializada é gerada por usinas cujas concessões vencem a partir de 2015. Assim, por meio da redução de encargos setoriais e redistribuição da renda por meio das concessões, observou-se uma redução significativa nas tarifas médias repassadas às indústrias e aos consumidores residenciais, a partir de 2013 [18]. Por se tratar de uma medida recente, seus efeitos devem ser analisados por um período mais longo.

O elevado preço da energia exige a necessidade de novos estudos sobre a operação, principalmente quanto à competição entre os produtores de energia. Este trabalho analisa este ponto usando Teoria de Jogos, a qual é brevemente descrito a seguir.

1.4 Teoria dos Jogos em Modelos de Mercado

Dado que o mercado de energia elétrica é caracterizado como um modelo de competição imperfeita, é importante que as ferramentas matemáticas desenvolvidas para analisar essa situação sejam empregadas no estudo da operação dos sistemas sob condições de mercado.

A Teoria dos Jogos tem uma fundamentação matemática sólida e foi criada para auxiliar no entendimento de situações que envolvem a interação entre jogadores (tomadores de decisão), considerando que a busca de seus objetivos seja realizada racionalmente, levando em conta as capacidades, expectativas e os conhecimentos de cada jogador [19]. Nesse jogo, cada participante faz o movimento que mais lhe beneficie até que se chegue a uma conclusão do processo.

A tomada de decisão de um indivíduo ou indústria geralmente é resultado de decisões e ações de outros indivíduos ou indústrias com os quais interagem. Como as decisões pertencem ao “indivíduo” e os resultados são quantificados de forma coletiva, esse processo decisório pode ser representado como um jogo estratégico.

O mesmo tipo de interação pode ser observado no ambiente de competição na geração de energia elétrica. Portanto, a teoria dos jogos é um importante instrumento de análise de possíveis resultados da competição entre os agentes no mercado de energia elétrica. Para isso, são utilizados conceitos da teoria dos jogos, dos quais destacam-se o jogo de Stackelberg, Cournot e Bertrand.

Primeiramente é estabelecido que o bem produzido pelas empresas é homogêneo. Ou seja, para o consumidor é irrelevante a origem do bem que ele está adquirindo, o que permite que exista uma única curva

de demanda e ainda simplifique o problema para concentrar-se nas variáveis de análise sob diferentes regimes de concorrência: quantidades a serem produzidas, preços e lucros.

O modelo de Stackelberg supõe a existência de duas empresas com restrições compartilhadas que assumem posições diferentes no mercado. Por meio de um jogo dinâmico, a empresa líder toma sua decisão antes da outra, e posteriormente a empresa seguidora, que não tem poder de mercado suficiente para ser líder, irá tomar sua decisão baseada na decisão da empresa líder. Este jogo é também conhecido como modelo de liderança de quantidade, pois uma empresa conhece a forma como a outra empresa age e escolhe primeiro a quantidade a ser produzida.

Para encontrar o equilíbrio nesse modelo de jogo, a empresa líder deve ter consciência de que suas ações são observadas pela empresa seguidora. O líder, que sabe de sua influência no mercado, maximiza o benefício individual ajustando sua quantidade sabendo da resposta da seguidora [20]. O modelo de Stackelberg pode ser formulado como um problema de otimização em dois níveis, onde o nível superior representa o líder e o nível inferior o seguidor. Uma solução desse problema é uma *solução de equilíbrio*.

Quando todas as firmas possuem a mesma participação no mercado, o problema pode ser modelado de forma a encontrar um equilíbrio de Nash, que usa o conceito mais difundido na teoria dos jogos. Ele define que em todo jogo finito, ou seja, com um número finito de jogadores, existe um conjunto de estratégias que não serão alteradas por falta de incentivo aos jogadores. O jogo é feito de forma sequencial, onde a tomada de decisão de um jogador leva em consideração a decisão dos demais jogadores [21].

O modelo de Cournot é um caso particular do Equilíbrio de Nash, pois parte do pressuposto de que os participantes do jogo têm o mesmo poder de mercado e irão competir por quantidade produzida decidindo independentemente e simultaneamente. Assim, cada firma escolhe uma quantidade de produto que maximiza seu lucro dada a quantidade das demais firmas, sendo que essa escolha é feita de forma simultânea. A análise é fundamentada na hipótese de que as empresas irão agir racionalmente buscando maximizar seus lucros. O equilíbrio ocorre no ponto em que as empresas estão fazendo o melhor que podem, levando em conta a reação dos concorrentes na determinação de sua produção e preço, até o ponto em que não têm mais incentivo para mudar suas decisões (Equilíbrio de Nash) [22].

Num oligopólio cada modelo de jogo fornece um resultado dife-

rente, o que significa que a solução depende das estratégias adotadas pelos agentes. Anderson e Engers analisam isso verificando o equilíbrio de Stackelberg versus Cournot, e em que situações um é melhor que o outro [23].

No setor elétrico, o modelo de Cournot pode ser muito apropriado em estudos de longo prazo, onde as empresas competem por quantidade de energia produzida ou armazenada nos reservatórios (no caso de hidrelétricas). Assim, no modelo de Cournot os agentes escolhem um nível de oferta tal que maximize seus lucros com base na produção das empresas concorrentes, e o preço da energia é obtido pela interação da curva de demanda com a oferta agregada. Contudo, como o modelo de Cournot assume que os agentes não respondem ao preço e sim à quantidade, os resultados do jogo mostram-se muito sensíveis à elasticidade e à forma da curva de demanda [24].

Já para o planejamento de curto prazo, o modelo de Bertrand é o mais aplicado, pois pode ser considerado que os agentes fixam suas quantidades e competem pelo preço. A solução encontrada é também um equilíbrio de Nash.

De forma geral, é razoável supor que o resultado final de um jogo será seu equilíbrio de Nash. Contudo, existem jogos que apresentam múltiplos equilíbrios de Nash, o que vai contra a noção de ‘ponto de equilíbrio’, já que não há um critério aceito para definir qual desses pontos será considerado como resultado final. Neste sentido, o conceito de jogos e *soluções de equilíbrio* tem sido amplamente utilizado, principalmente em situações que envolvem a tomada de decisão de forma hierárquica (multinível), com competição em algum dos níveis, como é o caso do setor elétrico.

Dentro de um ambiente competitivo, as estratégias de cada produtor em conjunto com as condições que devem ser respeitadas pelo sistema formam um problema de otimização em dois níveis. O conjunto desses problemas representa um jogo multi-líder-seguidor-comum, caracterizado por múltiplos equilíbrios de Nash [25].

Este trabalho estuda um modelo de despacho descentralizado de usinas hidrelétricas no médio prazo. O problema de despacho é caracterizado pela teoria de jogos, sendo sua solução, um ponto de equilíbrio de Nash. A teoria de jogos foi usada por diferentes autores que estudaram sistemas hidrotérmicos onde existe competição na geração. A seguir é feito um breve resumo de alguns desses trabalhos.

1.5 Revisão Bibliográfica

O setor elétrico é caracterizado pela contraposição de interesses entre os produtores e o estado na busca de estratégias que tirem melhor proveito de suas ações, tanto de obter lucros como de preservar os interesses sociais (dados por medidas regulatórias). Encontrar estratégias ótimas de operação de um sistema hidrotérmico foi o objetivo de alguns trabalhos já realizados, os quais são apresentados na sequência.

Scott e Read simularam um modelo de planejamento de médio prazo de sistemas hidrotérmicos para analisar os efeitos que os contratos e as estruturas das empresas têm sobre a eficiência do mercado de energia, principalmente quanto às distorções da operação por ordem de mérito, com foco no sistema da Nova Zelândia [26]. Assim, por meio de uma programação dinâmica dual e teoria dos jogos, mais precisamente o modelo de Cournot, os autores concluíram que, apesar dos clientes ainda estarem relutantes em comprometer-se a longo prazo, os contratos de energia podem ser um forma de se protegerem em momentos de escassez, sem distorcer indevidamente a operação por ordem de mérito.

Já Kelman, Barroso e Pereira investigaram o poder de mercado no planejamento de sistemas hidrotérmicos por meio de programação dinâmica estocástica e modelos de equilíbrio de Cournot. Eles analisam como o poder de mercado interfere na competição e concluem que contratos bilaterais podem ser um instrumento para reduzir tal poder [27].

Da mesma forma, a competição num sistema hidrotérmico por meio de um modelo de Cournot foi analisada por Bushnell [28]. O autor demonstra que pode haver uma bifurcação no mercado de energia elétrica, sendo que em algumas horas pode ser competitivo e em outras nem tanto, e isso pode ocorrer por intervenção regulatória local, incentivos a diferentes empresas e principalmente devido às restrições de transmissão.

O modelo de Cournot também foi utilizado por Barquín, Centeno e Reneses para resolver o problema de despacho hidrotérmico de médio prazo em um mercado oligopolista [29]. Desconsiderando os efeitos da rede e assumindo funções lineares para resolver o problema de despacho, os autores introduziram um modelo que generaliza o conceito de equilíbrio de Cournot sob concorrência perfeita, incluindo uma variação dos preços de compra com quantidades para uma demanda inelástica.

Encontrar políticas ótimas de geração ao médio prazo também foi estudado por Tesser, Pagès e Nabona. Os autores utilizam modelos de equilíbrio para determinar o despacho de uma empresa em específico,

que é resolvido por meio de um algoritmo de relaxamento Nikaido-Isoda, o que permite a resolução de uma programação estocástica de múltiplos estágios. O equilíbrio é encontrado levando em consideração o comportamento das estratégias de cada gerador pertencente ao mercado para cálculo da função de preço [30].

Molina et al. também analisaram o poder de mercado exercido por agentes dentro de um sistema hidrotérmico com restrições de transmissão [31]. Utilizando as teorias de jogos de Nash-Cournot e a metodologia Nikaido-Isoda para encontrar o equilíbrio do mercado, os autores demonstraram como a produção de uma usina é alterada se considerado os limites de transmissão, e sua consequência direta nos preços da energia.

Almeida e Conejo desenvolveram um modelo de despacho descentralizado de médio prazo de um sistema com predomínio de geração hidrelétrica, o qual é expresso como um problema de equilíbrio com restrições de equilíbrio (EPEC) [32]. Os autores comprovaram que o problema de despacho descentralizado possui múltiplas soluções de equilíbrio e que essas diferem significativamente das soluções ótimas encontradas no despacho centralizado. Esse estudo servirá de base para o desenvolvimento do trabalho aqui proposto.

1.6 Objetivos da Dissertação

Embora o Brasil apresente uma certa segurança quanto à disponibilidade dos recursos hídricos, existem ainda muitos desafios relacionados à produção e comercialização da energia.

Os desafios de operar o sistema com predomínio de geração hidrelétrica sob um mercado competitivo, sem comprometer a segurança no suprimento de energia, são tarefas complexas e exigem constantes inovações.

O objetivo deste trabalho é dar continuidade à análise de um modelo matemático para resolver o problema de despacho na forma descentralizada, que envolve alguns conceitos recentemente utilizados na análise de sistemas elétricos: os problemas de otimização em dois níveis com soluções de equilíbrio, que permitem aos geradores a definição das ofertas ao mercado de energia. Assim, considerando sistemas com predomínio de geração hidrelétrica e um ambiente de competição na geração, busca-se encontrar o melhor despacho que atenda os requisitos do sistema bem como os interesses dos produtores.

Serão apresentadas as vantagens e desvantagens dos modelos

de despacho centralizado e descentralizado por meio de simulações e análises de sistemas reais brasileiros. As aleatoriedades das vazões afluentes serão tratadas por um modelo de programação estocástica de dois estágios e a rede de transmissão será representada pelo modelo linearizado.

1.7 Organização da Dissertação

A dissertação está organizada em cinco capítulos organizados da seguinte forma.

No Capítulo 2 inicialmente é feita uma descrição detalhada do problema de planejamento da operação de um sistema hidrelétrico, tomando como base sua natureza estocástica e seu método de solução. Em seguida, são apresentadas as características operativas de uma usina hidrelétrica, com ênfase na modelagem do problema de despacho centralizado.

O Capítulo 3 traz a formulação do problema de otimização em dois níveis, correspondendo ao modelo matemático de despacho descentralizado. Em seguida, no Capítulo 4, são apresentados o método de resolução do problema em dois níveis e as metodologias utilizadas para encontrar soluções de equilíbrio para o problema.

O Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos dos modelos de despacho centralizado e descentralizado desenvolvidos nos capítulos anteriores. Primeiramente são feitas simulações para o despacho centralizado, que posteriormente são comparadas aos resultados do despacho descentralizado por consistência de preços.

O Capítulo 6 é dedicado às conclusões gerais, às contribuições dissertação e propostas para trabalhos futuros.

2 PLANEJAMENTO DE MÉDIO PRAZO

2.1 Introdução

Planejar a operação de um sistema elétrico significa encontrar uma estratégia que minimize os custos envolvidos na geração de cada usina no período de planejamento [33]. Entende-se por custos os gastos na compra de combustíveis para as usinas térmicas, o custo pela utilização da água nos reservatórios para usinas hidrelétricas, os intercâmbios de energia entre as regiões e o custo de penalização pelo não atendimento da demanda.

Neste capítulo será apresentado um modelo de planejamento da operação de sistemas predominantemente hidrelétricos num horizonte de um ano com discretização mensal, considerando um despacho centralizado. A aleatoriedade das vazões afluentes nos reservatórios será tratada por um modelo estocástico em dois estágios e a demanda considerada conhecida com precisão aceitável.

As usinas térmicas não serão explicitamente representadas neste modelo, que tem como foco as interações entre as usinas hidrelétricas, nas quais a geração é representada como uma função linear da vazão turbinada.

Assim, para um conjunto de H usinas num horizonte de T períodos e para um conjunto de N_ω cenários de vazão afluente, o despacho obtém a potência gerada pela usina i no período t para cada cenário ω de vazão.

2.2 Programação Estocástica

A programação estocástica é aplicada em situações onde as incertezas associadas a um parâmetro de entrada de um problema de programação matemática são consideradas indispensáveis para a tomada de decisão, que é feita antes da observação dos dados, ao longo de um período estipulado.

O problema de planejamento de sistemas hidrotérmicos é essencialmente probabilístico, dada a impossibilidade de prever com exatidão as afluições naturais, a demanda a ser atendida, restrições ambientais, preços de combustíveis, produção e custos. Todos esses fatores têm impacto direto nas condições de suprimento de energia no mercado, e uma das formas de tratar essas incertezas é por meio da programação

estocástica.

Cada ponto em que uma decisão pode ser tomada, ou ainda, uma variável do modelo assume um valor, é chamado de *estágio*. As características do sistema em cada estágio são definidas pelo vetor de *estado* e pelas variáveis aleatórias, que são usualmente representadas por um conjunto finito de realizações ou cenários. Em sistemas hidrelétricos os estados são caracterizados pelos níveis dos reservatórios, vazões turbinadas e vertidas das usinas.

As vazões afluentes são variáveis aleatórias e incluem a tendência hidrológica e o nível do reservatório, onde a tendência hidrológica é obtida com base nas vazões afluentes ocorridas no passado, que podem fornecer um indicador sobre as futuras vazões.

Um processo estocástico, ξ , constitui um conjunto de variáveis aleatórias sequencialmente arranjadas no tempo. Ele pode ser representado pelo vetor $\xi(\omega)$, $\omega = 1, \dots, N_\omega$ para cada cenário ω em um conjunto de N_ω cenários. O conjunto de realizações possíveis ξ_Ω para o processo estocástico ξ será $\xi_\Omega = \{\xi(1), \dots, \xi(N_\omega)\}$ [34].

Cada realização $\xi(\omega)$ está associada com uma probabilidade $\pi(\omega)$ definida por:

$$\pi(\omega) = P(\omega | \xi = \xi(\omega)) \quad (2.1)$$

Sendo Ω o conjunto de cenários, temos:

$$\sum_{\omega \in \Omega} \pi(\omega) = 1 \quad (2.2)$$

É importante que, na programação estocástica, exista um número suficiente de cenários para que possa abranger o maior número possível de realizações. Contudo, um grande número de cenários tornaria o problema computacionalmente inviável. Portanto, o número de cenários inicialmente gerados deve ser reduzido sem que estes percam informações relevantes do processo estocástico, como veremos a seguir.

Neste trabalho os cenários de vazões afluentes dos reservatórios são obtidos das séries históricas de vazões para todas as usinas pertencentes ao Sistema Interligado Nacional (SIN), com dados mensais registrados desde 1931 [35].

2.2.1 Despacho de Usinas Hidrelétricas Modelado como um Problema de Programação Estocástica de Dois Estágios

O problema de despacho de usinas hidrelétricas obtém o valor ótimo, de acordo com um critério pré-definido, de um conjunto de variáveis que representam a operação de cada usina, tais como: vazão turbinada, q , potência gerada pela usina, ph , vertimento da usina, u , e volume de água armazenada no reservatório, v . Neste trabalho, o problema é resolvido para um horizonte de médio prazo com discretização mensal, e valores ótimos para essas variáveis devem ser obtidos para cada mês considerado. Tais valores ótimos dependem do valor assumido pela variável aleatória, ξ , que, por representar a vazão afluente, passa a ser expressa no modelo de planejamento por r .

No primeiro mês do planejamento, as vazões afluentes podem ser supostas conhecidas com precisão aceitável e as variáveis são calculadas apenas para tais vazões. No mês 2, conhecidas as realizações de r , $r(\omega)$, e as condições iniciais dos reservatórios (que dependem dos valores calculados para as variáveis no mês 1) podemos calcular os valores de $q(\omega)$, $ph(\omega)$, $u(\omega)$ e $v(\omega)$ para cada cenário de vazões e os valores médios dessas variáveis, que dependem de $r(\omega)$.

O cálculo dos valores ótimos das variáveis para o mês 3 dependem dos valores obtidos para o mês 2 e também das realizações do processo estocástico no mês 3. Para cada cenário do mês 2, pode-se ter um conjunto de cenários do mês 3 e valores distintos para as variáveis $q(\omega)$, $ph(\omega)$, $u(\omega)$ e $v(\omega)$ em cada um desses cenários.

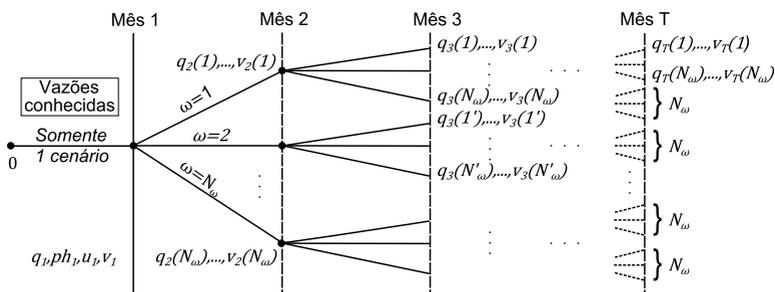


Figura 2.1 – Árvore de Cenários para programação estocástica multi-estágios

O mecanismo se repete nos meses seguintes, constituindo um

problema de programação estocástica de múltiplos estágios, no qual as decisões de cada estágio são tomadas após a realização do processo estocástico. A Figura 2.1 indica a árvore de cenários do problema.

Na Figura 2.1 pode-se observar que é muito grande o número de variáveis a serem calculadas. Ou ainda, há um aumento expressivo da dimensão do problema à medida que o número de meses de estudo aumenta. Para evitar o que se tornou conhecido como ‘maldição da dimensionalidade’, neste trabalho o despacho de médio prazo é modelado como um problema de programação estocástica de dois estágios. Neste modelo, como o nome sugere, a decisão é tomada em dois estágios considerando o evento aleatório.

No primeiro estágio a decisão deve ser tomada antes do conhecimento dos valores assumidos pelas variáveis aleatórias, pois depende somente da informação disponível no momento da decisão. A decisão tomada neste estágio será a mesma para todos os possíveis cenários ω que possam ocorrer no segundo estágio do problema, o que significa que os valores das variáveis do problema correspondente a este estágio serão únicos para todos os cenários. No problema de despacho de médio prazo de usinas hidrelétricas, as variáveis de primeiro estágio são aquelas associadas ao mês 1 do período de planejamento [36].

No segundo estágio, a decisão depende da realização do processo estocástico, ou ainda, a decisão é tomada individualmente para cada cenário ω considerado. Isso significa que os valores das variáveis do segundo estágio dependem do cenário. No problema estudado, as variáveis de segundo estágio são aquelas associadas aos meses $2, \dots, T$.

Considerando o modelo de dois estágios, a árvore de cenários do problema pode ser representada como mostra a Figura 2.2.

Pode-se observar pelas figuras 2.1 e 2.2, que, comparando com o modelo de múltiplos estágios, o número de variáveis do problema de dois estágios é muito menor. O número de cenários analisados no segundo modelo é também menor do que o analisado no primeiro modelo e mantém-se constante para todos os meses do horizonte de planejamento. A redução do número de cenários, no entanto, pode comprometer a qualidade da solução obtida, pois o número de cenários passa a ser não representativo das possíveis realizações do processo estocástico. Para melhorar a qualidade da solução obtida, mantendo-se o problema com uma dimensão aceitável, utiliza-se a técnica da *Janela Deslizante*.

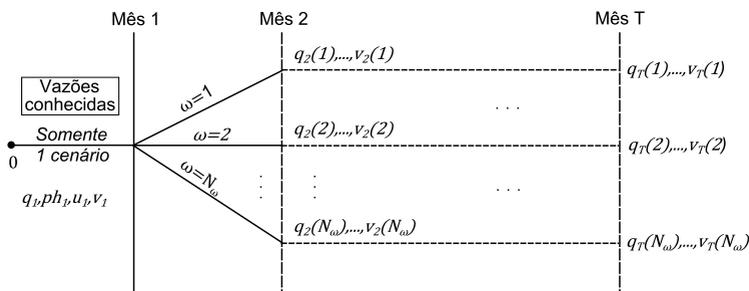


Figura 2.2 – Árvore de Cenários para programação estocástica em dois estágios

2.2.1.1 O Conceito da Janela Deslizante

A técnica da janela deslizante parte do princípio de que as informações sobre as vazões afluentes podem ser representadas graficamente como mostra a Figura 2.3.

Mês 1	Mês 2	Mês 3	...	Mês T-1	Mês T	Mês T+1	Mês T+2
$r_1(1)$	$r_2(1)$	$r_3(1)$	...	$r_{T-1}(1)$	$r_T(1)$	$r_{T+1}(1)$	$r_{T+2}(1)$
$r_1(2)$	$r_2(2)$	$r_3(2)$	...	$r_{T-1}(2)$	$r_T(2)$	$r_{T+1}(2)$	$r_{T+2}(2)$
$r_1(3)$	$r_2(3)$	$r_3(3)$	...	$r_{T-1}(3)$	$r_T(3)$	$r_{T+1}(3)$	$r_{T+2}(3)$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
$r_1(N_\omega)$	$r_1(N_\omega)$	$r_3(N_\omega)$	...	$r_{T-1}(N_\omega)$	$r_T(N_\omega)$	$r_{T+1}(N_\omega)$	$r_{T+2}(N_\omega)$

Janela 1 Janela 2 Janela 3

Figura 2.3 – Representação dos Cenários de Vazões

Na Figura 2.3, $r_t(\omega)$ é a vazão afluente observada no mês t e cenário ω e o número de cenários em cada mês é mantido constante.

Deve-se ter em mente que todos os cenários são diferentes.

A técnica da janela deslizante faz uma mímica do que ocorre no planejamento da operação das usinas. No início do mês 1, resolve-se o problema de dois estágios partindo-se do mês 1, considerando T períodos de planejamento e a Janela 1 com informações de vazões, representada na Figura 2.3. Encontrada a solução, as condições dos reservatórios ao final do mês 1 são guardadas para serem empregadas como condições iniciais do planejamento a ser feito a seguir. Usando então a janela de vazões afluentes 2, o problema de despacho é resolvido a partir do mês 2 considerando novamente T períodos de tempo. Ao final, as condições dos reservatórios são armazenadas para serem usadas como condições iniciais para resolver o problema a partir do mês 3. O processo se repete até que seja resolvido o problema a partir do mês T , usando a janela de vazões T .

Ao término do processo, é calculada uma média do conjunto de resultados obtidos pelas T janelas deslizantes, correspondente a cada período t analisado. Fornecendo assim o resultado final do problema de planejamento da operação de sistemas hidrelétricos.

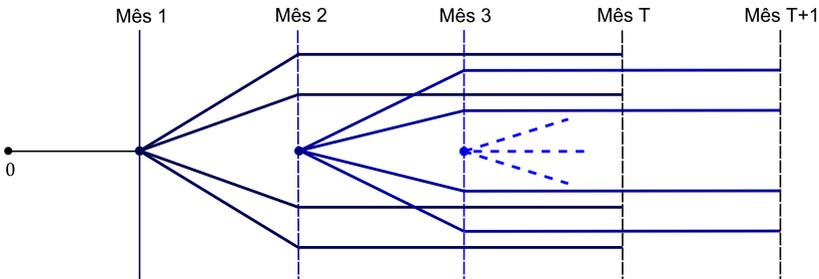


Figura 2.4 – Árvore de Cenários de Vazões para Janela Deslizante

Pode-se observar que para se obter o despacho para um ano, o problema estocástico é resolvido 12 vezes e o número total de cenários considerado é igual a $12N_{\omega}$. Desta forma, são obtidos resultados mais precisos com um problema de dimensão reduzida, comparado ao problema de múltiplos estágios.

Quando se emprega a técnica da janela deslizante, a Figura 2.2 corresponde à árvore de cenários do problema resolvido para uma janela de informação. Considerando todas as janelas, a árvore de cenários pode ser representada como indica a Figura 2.4. Nesta Figura, uma nova árvore de cenários é definida para cada janela, sendo que cada

nova árvore tem início num ponto de operação diferente, específico para cada janela.

2.3 Representação das Usinas Hidrelétricas

A modelagem de uma usina hidrelétrica exige um conhecimento detalhado de sua operação, de forma a obter as relações matemáticas que representem adequadamente as necessidades de cada etapa do planejamento.

As usinas são classificadas de acordo com o tipo de reservatório que possuem, podendo ser: de acumulação, a fio d'água e com armazenamento por bombeamento.

Usinas de acumulação utilizam uma represa para acumular a água em um grande reservatório, a qual é usada em épocas de estiagem ou para dispor de uma vazão firme maior que a vazão mínima natural. Nesse tipo de usina, o fluxo de água nas turbinas varia conforme o necessário para atender a demanda e não pela vazão natural do rio. São utilizadas também para controle de enchentes como forma de prevenir mudanças bruscas no fluxo do rio a jusante da represa [33].

As usinas a fio d'água praticamente não possuem reservatório de armazenamento, e se possuem, é muito pequeno. Esse tipo de usina depende do fluxo de água natural do rio para produção de energia, o que pode ser um problema em períodos de seca. Normalmente são construídas em rios com vazão afluente elevada, minimizando assim os impactos ambientais da implantação de um reservatório [5].

Assim como as usinas de acumulação, as usinas com armazenamento por bombeamento possuem reservatórios, contudo, nesse tipo de usina existem dois reservatórios. Um com elevação maior, localizado a montante e outro com menor elevação situado a jusante. Assim, a usina utiliza o reservatório elevado durante um período de demanda máxima e armazena a água no reservatório abaixo, que é bombeada de volta quando a demanda de energia diminui. Este procedimento proporciona uma potência suplementar para atender o sistema, porém, além do custo de construção desse tipo de usina ser alto, existe o problema de acomodar dois reservatórios. Por este motivo, essas usinas são usualmente empregadas em sistemas com predomínio de geração térmica ou com grande participação eólica, onde há um custo diferenciado entre períodos de baixa e alta demanda [33].

2.3.1 Balanço hídrico

Para determinar o modelo matemático que rege a operação de um sistema de usinas hidrelétricas será usado como base o esquema da Figura 2.5, que apresenta o conjunto de aproveitamentos de duas usinas hidrelétricas.

O princípio básico que deve ser respeitado na operação de sistemas hidrelétricos é o da conservação de água nos reservatórios. O volume de água em um reservatório num determinado período de tempo t depende das interconexões espaciais e temporais da usina, das afluições naturais do rio, e do somatório das vazões turbinadas e vertidas:

$$v_{i,t}(\omega) = v_{i,t-1}(\omega) + r_{i,t}(\omega) - q_{i,t}(\omega) - u_{i,t}(\omega) + \sum_{m \in \Omega_i} [q_{m,t}(\omega) + u_{m,t}(\omega)] \quad (2.3)$$

onde, para cada cenário ω :

- $v_{i,t}(\omega)$ volume de água no reservatório i no final do período t ;
- $r_{i,t}(\omega)$ vazão natural do reservatório i no período t ;
- $q_{i,t}(\omega)$ montante de água turbinada;
- $u_{i,t}(\omega)$ montante de água vertida;
- Ω_i conjunto de usinas a montante de i .

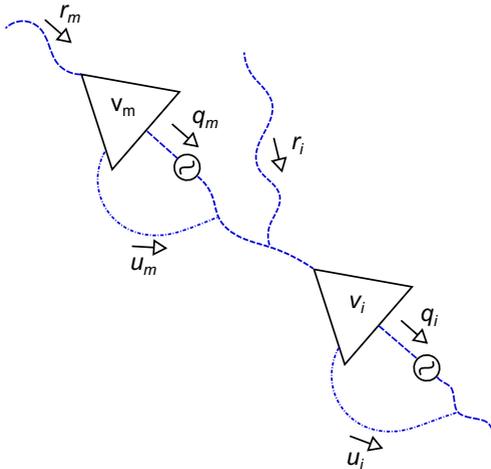


Figura 2.5 – Esquema de Representação dos Aproveitamentos de uma Usina Hidrelétrica

A Equação (2.3) representa o balanço hídrico da usina, no qual não será considerado o tempo de percurso da água de uma usina a outra, perdas por evaporação e/ou infiltração no reservatório nem usos da água para outros fins que não sejam a produção de energia elétrica.

2.3.2 Função de produção

De forma simplificada, o processo de geração de energia elétrica ocorre por meio do conjunto turbina gerador, que transforma a energia potencial da água armazenada no reservatório em energia elétrica. Esse potencial depende da altura da queda líquida, que é definida pela diferença entre o nível montante e o nível jusante, num dado instante de tempo [5].

A altura da queda líquida é uma função não linear do volume de água do reservatório, da vazão turbinada e do vertimento. Portanto, a produção fornecida pela usina é uma função não-linear dessas grandezas. Este trabalho representa a potência gerada em uma usina hidrelétrica, de forma aproximada, como uma função linear da vazão turbinada, ou seja:

$$ph_{i,t}(\omega) = \eta_i q_{i,t}(\omega) - d_i \quad (2.4)$$

onde:

- $ph_{i,t}(\omega)$ é a potência gerada pela usina i no período t ;
- η_i é o coeficiente linear da função de produção i ;
- d_i é o termo constante de produtividade da usina i ;

O uso de uma função linear, embora facilite muito a resolução do problema de despacho descentralizado, leva a soluções aproximadas, conforme mostrado em [37].

2.3.3 Limites de Operação das Usinas

Os limites de geração, volume e vazão turbinada e vertida dependem das características de cada usina e são representados por:

$$\begin{aligned} ph_i^{\min} &\leq ph_{i,t}(\omega) \leq ph_i^{\max} \\ v_i^{\min} &\leq v_{i,t}(\omega) \leq v_i^{\max} \\ q_i^{\min} &\leq q_{i,t}(\omega) \leq q_i^{\max} \\ u_{i,t}(\omega) &\geq 0 \end{aligned} \quad (2.5)$$

As restrições de balanço hídrico (2.3), produção (2.4) e limites operacionais das usinas (2.5) devem ser respeitados para $i = 1, \dots, H$, $t = 1, \dots, T$ e $\omega = 1, \dots, N_\omega$. Além disso, o despacho deve respeitar as restrições de transmissão, que são discutidas a seguir.

2.4 Representação da Rede Elétrica

O cálculo do fluxo de potência de um sistema de energia consiste em determinar o estado da rede, da distribuição dos fluxos e de outras grandezas de interesse. A operação do sistema pode ser representada por um conjunto de equações e inequações algébricas, obtidas tendo como base a primeira e a segunda Lei de Kirchhoff, que define a conservação de potência ativa e reativa em cada nó da rede [38].

Ao efetuar o despacho, as restrições de balanço de potência da rede devem ser respeitadas para todas as barras $k = 1, \dots, N_b$, em todos os períodos $t = 1, \dots, T$ e em todos os cenários $\omega = 1, \dots, N_\omega$. A Figura 2.6 ilustra o balanço de potência na barra k .

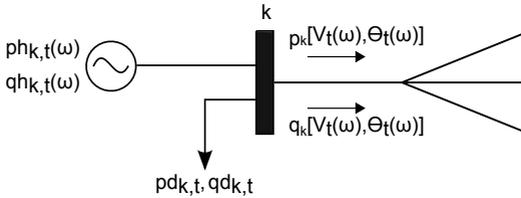


Figura 2.6 – Balanço de potência na rede

onde $\mathbf{V}_t(\omega)$ e $\theta_t(\omega)$ são, respectivamente, os vetores de magnitude e ângulo das tensões de barra no período t e cenário ω . $p_k(\cdot)$ e $q_k(\cdot)$ são a injeção de potência ativa e reativa, $ph_{k,t}(\omega)$ e $qh_{k,t}(\omega)$ são as gerações de potência ativa e reativa e $pd_{k,t}$ e $qd_{k,t}$ são as cargas de potência ativa e reativa, que são as mesmas em todos os cenários.

Da Figura 2.6 temos que:

$$\begin{aligned} ph_{k,t}(\omega) - pd_{k,t} - p_{k,t}[\mathbf{V}_t(\omega), \theta_t(\omega)] &= 0 \\ qh_{k,t}(\omega) - qd_{k,t} - q_{k,t}[\mathbf{V}_t(\omega), \theta_t(\omega)] &= 0 \end{aligned} \quad (2.6)$$

Sendo as injeções de potência ativa e reativa expressas por:

$$\begin{aligned}
p_{k,t}[\mathbf{V}_t(\omega), \theta_t(\omega)] &= \sum_{k=1}^{N_b} p_{km}[\mathbf{V}_t(\omega), \theta_t(\omega)] \\
q_{k,t}[\mathbf{V}_t(\omega), \theta_t(\omega)] &= \sum_{k=1}^{N_b} q_{km}[\mathbf{V}_t(\omega), \theta_t(\omega)]
\end{aligned} \tag{2.7}$$

onde $p_{km}(\cdot)$ e $q_{km}(\cdot)$ são os fluxos de potência ativa e reativa na linha $k - m$, respectivamente.

2.4.1 Fluxo de Potência Linearizado

O modelo linearizado ou "DC", explora a relação existente entre os fluxos de potência ativa e as aberturas angulares, o mesmo princípio encontrado entre os fluxos de corrente e as quedas de tensão em um circuito de corrente contínua, dado pela Lei de Ohm [38].

Com baixo custo computacional e precisão aceitável, este modelo é indicado para redes de alta relação $\frac{x}{r}$, ou seja, sistemas com elevados níveis de tensão.

Considerando uma linha de transmissão situada entre as barras k e m , no qual são desprezados os elementos shunt, a corrente $i_{km,t}(\omega)$, pode ser dada por:

$$\bar{i}_{km,t}(\omega) = \bar{y}_{km}(\bar{V}_{k,t}(\omega) - \bar{V}_{m,t}(\omega)) \tag{2.8}$$

onde, $\bar{V}_{k,t}(\omega)$ e $\bar{V}_{m,t}(\omega)$ são tensões complexas e \bar{y}_{km} é a admitância da linha:

$$\bar{y}_{km} = g_{km} + jb_{km} \tag{2.9}$$

Podemos obter a potência complexa por:

$$\bar{s}_{km,t}^*(\omega) = p_{km,t}(\omega) - jq_{km,t}(\omega) = \bar{V}_{km,t}^*(\omega)\bar{i}_{km,t}(\omega) \tag{2.10}$$

Separando as partes reais e imaginárias da equação (2.10) pode-se obter os fluxos de potência $p_{km,t}(\omega)$ para cada cenário ω e período t .

$$\begin{aligned}
p_{km,t}(\omega) &= V_{k,t}^2(\omega)g_{km} - V_{k,t}(\omega)V_{m,t}(\omega)g_{km}\cos\theta_{km,t}(\omega) \\
&\quad - V_{k,t}(\omega)V_{m,t}(\omega)b_{km}\sin\theta_{km,t}(\omega)
\end{aligned} \tag{2.11}$$

e o fluxo no extremo oposto da linha é:

$$p_{mk,t}(\omega) = V_{m,t}^2(\omega)g_{km} - V_{k,t}(\omega)V_{m,t}(\omega)g_{km}\cos\theta_{km,t}(\omega) + V_{k,t}(\omega)V_{m,t}(\omega)b_{km}\sen\theta_{km,t}(\omega) \quad (2.12)$$

As perdas de transmissão na linha são calculadas por:

$$p_{km,t}(\omega) + p_{mk,t}(\omega) = g_{km}[V_{k,t}^2(\omega)V_{m,t}^2(\omega) - 2V_{k,t}(\omega)V_{m,t}(\omega)\cos\theta_{km,t}(\omega)] \quad (2.13)$$

Se as perdas forem desprezadas, as equações (2.11) e (2.15) tornam-se:

$$p_{km,t}(\omega) = -p_{mk,t}(\omega) = V_{k,t}(\omega)V_{m,t}(\omega)b_{km}\sen\theta_{km,t}(\omega) \quad (2.14)$$

Para linearização das equações da rede elétrica considerando apenas o acoplamento potência ativa-ângulo de barra, as seguintes hipóteses podem ser aplicadas a Equação 2.14:

$$\begin{aligned} V_{k,t}(\omega) &\approx V_{m,t}(\omega) \approx 1.0\text{pu} \\ \sen(\theta_{k,t}(\omega) - \theta_{m,t}(\omega)) &\approx (\theta_{k,t}(\omega) - \theta_{m,t}(\omega)) \\ b_{km} &\approx -\frac{1}{x_{km}} \end{aligned} \quad (2.15)$$

Com estas considerações, o fluxo de potência ativa, $p_{km,t}(\omega)$, é dado por:

$$p_{km,t}(\omega) = \frac{1}{x_{km}}(\theta_{k,t}(\omega) - \theta_{m,t}(\omega)) \quad (2.16)$$

Aplicando a lei das correntes de Kirchhoff, a injeção de potência barra k é igual à soma dos fluxos que saem desta barra em cada período e cenário, isto é:

$$p_{k,t}(\omega) = \sum_{m=1}^{N_b} \frac{1}{x_{km}}\theta_{km,t}(\omega) \quad (2.17)$$

ou seja,

$$p_{k,t}(\omega) = \sum_{m=1}^{N_b} \frac{1}{x_{km}}\theta_{k,t}(\omega) - \sum_{m=1}^{N_b} \frac{1}{x_{km}}\theta_{m,t}(\omega) \quad (2.18)$$

O conjunto de equações referentes às potências nodais pode ser colocado na forma matricial, conforme:

$$\mathbf{p}_t(\omega) = B \theta_t(\omega) \quad (2.19)$$

sendo:

- $\mathbf{p}_t(\omega)$ o vetor de injeções líquidas de potência k no período t e cenário ω ;
- $\theta_t(\omega)$ o vetor dos ângulos das tensões nodais, $\theta_{k,t}(\omega)$, para o período t e cenário ω
- \mathbf{B} a matriz de admitância de fluxo de potência linearizado, expressa por:

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} \sum_{m=1}^{N_b} x_{1m}^{-1} & -x_{12}^{-1} & -x_{13}^{-1} & \dots & -x_{1N}^{-1} \\ -x_{21}^{-1} & \sum_{m=1}^{N_b} x_{2m}^{-1} & -x_{23}^{-1} & \dots & -x_{2N}^{-1} \\ -x_{31}^{-1} & -x_{32}^{-1} & \sum_{m=1}^{N_b} x_{3m}^{-1} & \dots & -x_{3N}^{-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -x_{N1}^{-1} & -x_{N2}^{-1} & -x_{N3}^{-1} & \dots & \sum_{m=1}^{N_b} x_{Nm}^{-1} \end{pmatrix} \quad (2.20)$$

Facilmente se verifica que a soma das linhas ou colunas da matriz \mathbf{B} é zero. O que significa que as N_b equações implícitas no sistema (2.19) são linearmente dependentes. Para resolver este problema, define-se uma barra cujo ângulo será considerado como referência angular. Isso implica em eliminar da matriz \mathbf{B} a coluna referente à barra de referência, essa barra terá seu ângulo de fase conhecido ($\theta_{ref,t}(\omega) = 0$).

Desta forma, será definido $\widehat{\mathbf{B}}$ como uma matriz de dimensão $N_b \times N$ obtida pela eliminação da coluna correspondente à barra de referência, onde $N = N_b - 1$; e $\widehat{\theta}$ como o vetor $N \times 1$. A Equação (2.18) pode então ser escrita como:

$$\sum_{n=1}^N [\widehat{\mathbf{B}}_{k,n} \widehat{\theta}_{n,t}(\omega)] = p_{k,t}(\omega) \quad (2.21)$$

para $n = 1, \dots, N$, com $N = (N_b - 1)$.

2.4.2 Restrições de Balanço de Potência

O balanço de potência ativa no sistema pode ser representado como função das potências ativas geradas e das potências ativas das cargas nas barras. Para tanto, supõe-se, neste trabalho, que cada usina hidrelétrica é representada por uma unidade geradora equivalente conectada a uma barra do sistema.

Seja \mathbf{G} a matriz de incidência barras-geradores de dimensão $(N_b \times H)$, onde H representa o número de geradores do sistema de potência e elementos dados por [39]:

$$\mathbf{G}_{k,i} = \begin{cases} 1, & \text{se o gerador } i \text{ esta conectado à barra } k; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (2.22)$$

Além disso, seja $pd_{k,t}$ a carga de potência ativa na barra k e no período t do sistema. A potência ativa injetada na barra k pode ser escrita como:

$$p_{k,t}(\omega) = \sum_{i=1}^H [\mathbf{G}_{k,i} ph_{i,t}(\omega)] - pd_{k,t} \quad (2.23)$$

Assim, a equação de balanço de potência pode ser reescrita substituindo a Equação (2.23) na (2.21), o que resulta em [39]:

$$\sum_{n=1}^N [-\widehat{\mathbf{B}}_{k,n} \widehat{\theta}_{n,t}(\omega)] + \sum_{i=1}^H [\mathbf{G}_{k,i} ph_{i,t}(\omega)] = pd_{k,t} \quad (2.24)$$

Como as usinas térmicas não são representadas explicitamente nas equações de fluxo de potência, define-se $y_{k,t}(\omega) \geq 0$ como o montante de complementação térmica necessária em cada barra k do sistema. Assim, a Equação (2.24) fica:

$$\sum_{n=1}^N [-\widehat{\mathbf{B}}_{k,n} \widehat{\theta}_{n,t}(\omega)] + \sum_{i=1}^H [\mathbf{G}_{k,i} ph_{i,t}(\omega)] + y_{k,t}(\omega) = pd_{k,t} \quad (2.25)$$

2.4.3 Limites de Fluxos de Potência nos Ramos

Os limites de fluxos de potência nos ramos são determinados pelas limitações térmicas dos condutores e também pelas restrições de tensão e de estabilidade.

Como o fluxo de potência pode ocorrer em ambos os sentidos sobre um ramo $k - m$, define-se que $f_l^{\min} = -f_l^{\max}$, onde f_l^{\min} e f_l^{\max} são, respectivamente, os vetores com os limites mínimos e máximos da linha de transmissão $l = (k, m)$.

Para uma melhor representação no modelo linearizado, é utilizada a matriz de incidência ramos-barras $\tilde{\mathbf{A}}$ com dimensão $(L \times N_b)$.

$$\tilde{\mathbf{A}}_{l,k} = \begin{cases} 1, & \text{se a origem do elemento } l \text{ é a barra } k; \\ -1, & \text{se a chegada do elemento } l \text{ é a barra } k; \\ 0, & \text{se o elemento } l \text{ não incidir na barra } k. \end{cases} \quad (2.26)$$

É necessário retirar da matriz $\tilde{\mathbf{A}}_{l,k}$ a coluna correspondente à barra de referência. Assim, definimos a matriz de incidência ramos-barras reduzida, $\mathbf{A}_{l,n}$, com $n = 1, \dots, N$.

Será definida também a matriz primitiva das susceptâncias dos ramos $\mathbf{\Gamma}$, dada por:

$$\mathbf{\Gamma} = \text{diag}\{x_1^{-1}, \dots, x_L^{-1}\} \quad (2.27)$$

Assim, o fluxo de potência ativa nos ramos $l = (k, m)$ pode ser representado como:

$$p_{k,m}(\omega) = \mathbf{\Gamma}_{l,l} \mathbf{A}_{l,n} \hat{\theta}_{n,t}(\omega) \quad (2.28)$$

Definimos então, a matriz $\mathbf{M} = \mathbf{\Gamma} \mathbf{A}$ e representamos os limites de fluxo de potência nas linhas na forma de restrições de desigualdades:

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^N [-\mathbf{M}_{l,n} \hat{\theta}_{n,t}(\omega)] &\geq -f_l^{\max} \\ \sum_{n=1}^N [\mathbf{M}_{l,n} \hat{\theta}_{n,t}(\omega)] &\geq f_l^{\min} \end{aligned} \quad (2.29)$$

Tendo sido representadas todas as restrições a serem consideradas no despacho de médio prazo das usinas hidrelétricas, a seguir é formulado esse problema supondo que o sistema seja operado de forma centralizada.

2.4.4 Objetivos do Despacho Centralizado

No despacho centralizado, o operador do sistema determina quanto cada usina irá fornecer em todo o período do horizonte de planejamento. Em um sistema com predominância de geração hidrelétrica, um critério possível poderia ser de aproveitar ao máximo esse recurso, reduzindo assim a utilização de usinas térmicas, e conseqüentemente o custo da energia gerada. Portanto, com base na equação (2.25), a função objetivo do operador do sistema pode ser expressa por:

$$f = \sum_{\omega=1}^{N_{\omega}} \pi(\omega) \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^{N_b} y_{k,t}(\omega) \quad (2.30)$$

A função f representa o valor esperado da complementação térmica em cada período do planejamento, sendo dependente da probabilidade de ocorrência de cada cenário de vazões, $\pi(\omega)$.

Deve-se observar que podem ser usados outros critérios para o despacho centralizado. Porém, no presente trabalho, somente foi analisado o critério (2.30).

2.4.5 Despacho Centralizado

Como estamos supondo que as decisões ótimas estão sendo tomadas por um processo estocástico de dois estágios, o problema deve ser resolvido de forma sequencial, considerando T janelas de cenários.

As vazões afluentes $r_{i,1}(\omega)$ serão supostas conhecidas e únicas. Para os demais períodos t e cenários ω , $r_{i,t}(\omega)$ é considerada variável aleatória.

As variáveis do primeiro estágio são: $ph_{i,1}$, $v_{i,1}$, $q_{i,1}$, $u_{i,1}$, $\theta_{i,1}$ e $y_{b,1}$. As demais variáveis, que dependem do processo estocástico e portanto fazem parte do segundo estágio, são: $ph_{i,t}(\omega)$, $v_{i,t}(\omega)$, $q_{i,t}(\omega)$, $u_{i,t}(\omega)$, $\theta_{k,t}(\omega)$ e $y_{k,t}(\omega)$, para $i = 1, \dots, H$, $k = 1, \dots, N_b$, $t = 2, \dots, T$, $\omega = 1, \dots, N_{\omega}$

Logo, as seguintes restrições são agregadas ao problema de despacho hidrelétrico, válidos para $t = 1$:

$$\left\{ \begin{array}{l} ph_{i,1}(1) = ph_{i,1}(2) = \dots = ph_{i,1}(N_\omega) \\ v_{i,1}(1) = v_{i,1}(2) = \dots = v_{i,1}(N_\omega) \\ q_{i,1}(1) = q_{i,1}(2) = \dots = q_{i,1}(N_\omega) \\ u_{i,1}(1) = u_{i,1}(2) = \dots = u_{i,1}(N_\omega) \\ \hat{\theta}_{k,1}(1) = \hat{\theta}_{k,1}(2) = \dots = \hat{\theta}_{k,1}(N_\omega) \\ y_{k,1}(1) = y_{k,1}(2) = \dots = \dots = y_{k,1}(N_\omega) \end{array} \right. \quad (2.31)$$

Considerando a função objetivo (2.30) e as restrições (2.3), (2.4), (2.5), (2.25) e (2.31) podemos representar o problema de despacho centralizado da seguinte forma:

$$\min f = \sum_{\omega=1}^{N\omega} \pi(\omega) \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^{N_b} y_{b,t}(\omega)$$

s.a:

$$\begin{cases} ph_{i,1}(1) = ph_{i,1}(2) = \dots = ph_{i,1}(N_\omega) \\ v_{i,1}(1) = v_{i,1}(2) = \dots = v_{i,1}(N_\omega) \\ q_{i,1}(1) = q_{i,1}(2) = \dots = q_{i,1}(N_\omega) \\ u_{i,1}(1) = u_{i,1}(2) = \dots = u_{i,1}(N_\omega) \\ \hat{\theta}_{b,1}(1) = \hat{\theta}_{b,1}(2) = \dots = \hat{\theta}_{b,1}(N_\omega) \\ y_{k,1}(1) = y_{k,1}(2) = \dots = y_{k,1}(N_\omega) \end{cases}$$

$$\sum_{n=1}^N [-\hat{\mathbf{B}}_{k,n} \hat{\theta}_{n,t}(\omega)] + \sum_{i=1}^H [\mathbf{G}_{k,i} ph_{j,t}(\omega)] + y_{k,t}(\omega) = pd_{k,t}$$

$$\sum_{n=1}^N [-\mathbf{M}_{l,n} \hat{\theta}_{n,t}(\omega)] \geq -f_l^{\max} \tag{2.32}$$

$$\sum_{n=1}^N [\mathbf{M}_{l,n} \hat{\theta}_{n,t}(\omega)] \leq f_l^{\min}$$

$$ph_{i,t}(\omega) = \eta_i q_{i,t}(\omega) - d_i$$

$$v_{i,t}(\omega) = v_{i,t-1}(\omega) + r_{i,t}(\omega) - q_{i,t}(\omega) - u_{i,t}(\omega)$$

$$+ \sum_{m \in \Omega_i} [q_{m,t}(\omega) + u_{m,t}(\omega)]$$

$$ph_i^{\min} \leq ph_{i,t}(\omega) \leq ph_i^{\max}$$

$$v_i^{\min} \leq v_{i,t}(\omega) \leq v_i^{\max}$$

$$q_i^{\min} \leq q_{i,t}(\omega) \leq q_i^{\max}$$

$$u_{i,t}(\omega) \geq 0$$

$$y_{k,t}(\omega) \geq 0$$

$$i = 1, \dots, H; \quad t = 1, \dots, T; \quad \omega = 1, \dots, N_\omega;$$

$$k = 1, \dots, N_b; \quad l = 1, \dots, L$$

A resolução de (2.32) fornece portanto, os montantes de potência que cada usina deve produzir em cada período do horizonte de planejamento, respeitando os limites operacionais das usinas e suas interconexões espaciais, bem como o balanço de potência do sistema de transmissão e seus limites.

2.4.6 Arranjos Matriciais

Usaremos uma notação matricial para representar o problema 2.32. Em primeiro lugar, definem-se as matrizes \mathbf{A}_v , que representa os volumes nos reservatórios em cada período de tempo, e \mathbf{A}_s , que representa as vazões turbinadas ou vertidas de cada usina em cada período de tempo, ambas as matrizes com dimensão $(H \cdot T \times H \cdot T)$, formadas por zeros e uns, e os vetores:

$$\mathbf{v}(\omega) = \begin{bmatrix} v_{1,1}(\omega) \\ \vdots \\ v_{H,1}(\omega) \\ \vdots \\ v_{1,T}(\omega) \\ \vdots \\ v_{H,T}(\omega) \end{bmatrix}, \mathbf{q}(\omega) = \begin{bmatrix} q_{1,1}(\omega) \\ \vdots \\ q_{H,1}(\omega) \\ \vdots \\ q_{1,T}(\omega) \\ \vdots \\ q_{H,T}(\omega) \end{bmatrix}, \mathbf{u}(\omega) = \begin{bmatrix} u_{1,1}(\omega) \\ \vdots \\ u_{H,1}(\omega) \\ \vdots \\ u_{1,T}(\omega) \\ \vdots \\ u_{H,T}(\omega) \end{bmatrix}, \quad (2.33)$$

que correspondem aos volumes nos reservatórios, vazão turbinada e vertimento, respectivamente. Define-se o vetor:

$$\hat{\mathbf{r}}(\omega) = [r_{1,1}(\omega) + v_{1,0}, \dots, r_{H,1}(\omega) + v_{H,0}, r_{1,2}(\omega), \dots, r_{H,2}(\omega), \dots, r_{1,T}(\omega), \dots, r_{H,T}(\omega)]' \quad (2.34)$$

onde $v_{i,0}$ para $i = 1, \dots, H$ representam os volumes iniciais dos reservatórios. Assim, para o cenário ω a Equação (2.3), definida para todas as usinas, pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\mathbf{A}_v(\omega)\mathbf{v}(\omega) + \mathbf{A}_s\mathbf{q}(\omega) + \mathbf{A}_s\mathbf{u}(\omega) = \hat{\mathbf{r}}(\omega) \quad (2.35)$$

Define-se também a matriz diagonal $\mathbf{diag}(\eta)$ formada por η_1, \dots, η_H , o vetor \mathbf{d} formado por d_1, \dots, d_H e o vetor

$$\mathbf{ph}(\omega) = \begin{bmatrix} ph_{1,1}(\omega) \\ \vdots \\ ph_{H,1}(\omega) \\ \vdots \\ ph_{1,T}(\omega) \\ \vdots \\ ph_{H,T}(\omega) \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

A função de produção (2.4), para o cenário ω e considerando toda as usinas e períodos pode ser escrita:

$$\mathbf{ph}(\omega) - \mathbf{diag}(\eta)\mathbf{q}(\omega) = -\mathbf{d} \quad (2.37)$$

Por fim, definindo vetores com os limites mínimos e máximos das potências geradas, volumes, vazões turbinadas e vertidas, podemos representar os limites 2.5 para todas as usinas e períodos e para o cenário ω :

$$\begin{aligned} \mathbf{ph}^{\min} &\leq \mathbf{ph}(\omega) \leq \mathbf{ph}^{\max} \\ \mathbf{v}^{\min} &\leq \mathbf{v}(\omega) \leq \mathbf{v}^{\max} \\ \mathbf{q}^{\min} &\leq \mathbf{q}(\omega) \leq \mathbf{q}^{\max} \\ \mathbf{u}(\omega) &\leq 0 \end{aligned} \quad (2.38)$$

Como as equações (2.25) e (2.29) do modelo de rede “DC” descritas no capítulo anterior são definidas por barras ou por linhas, para poder agregá-las às equações matriciais de balanço hídrico (2.35), produção (2.37) e limites operacionais (2.38) devem-se fazer algumas adaptações.

Assim, define-se a matriz $\tilde{\mathbf{G}}$ bloco diagonal de dimensão $(N_b \cdot T \times H \cdot T)$ formada por matrizes \mathbf{G} e zeros, a matriz $\tilde{\mathbf{B}}$ bloco diagonal de dimensão $(N_b \cdot T \times N \cdot T)$ formada por matrizes $\hat{\mathbf{B}}$ e zeros, bem como os vetores correspondentes à complementação térmica, ângulos e cargas nas barras, respectivamente:

$$\mathbf{y}(\omega) = \begin{bmatrix} y_{1,1}(\omega) \\ \vdots \\ y_{N_b,1}(\omega) \\ \vdots \\ y_{1,T}(\omega) \\ \vdots \\ y_{N_b,T}(\omega) \end{bmatrix}, \tilde{\boldsymbol{\theta}}(\omega) = \begin{bmatrix} \theta_{1,1}(\omega) \\ \vdots \\ \theta_{N,1}(\omega) \\ \vdots \\ \theta_{1,T}(\omega) \\ \vdots \\ \theta_{N,T}(\omega) \end{bmatrix}, \mathbf{pd} = \begin{bmatrix} pd_{1,1}(\omega) \\ \vdots \\ pd_{N_b,1}(\omega) \\ \vdots \\ pd_{1,T}(\omega) \\ \vdots \\ pd_{N_b,T}(\omega) \end{bmatrix}, \quad (2.39)$$

Usando esses vetores e matrizes, a equação (2.25) pode ser escrita para toda a rede e todos os períodos da seguinte forma:

$$\tilde{\mathbf{G}}\mathbf{ph}(\omega) - \tilde{\mathbf{B}}\boldsymbol{\theta}(\omega) + \mathbf{y}(\omega) = \mathbf{pd} \quad (2.40)$$

Da mesma forma, define-se a matriz $\hat{\mathbf{M}}$, bloco diagonal de dimensão $(L \cdot T \times N \cdot T)$ formada por matrizes \mathbf{M} e zeros e ainda os vetores \mathbf{f}^{\min} e \mathbf{f}^{\max} de limites mínimos e máximos nas linhas de transmissão,

respectivamente. Usando $\widehat{\mathbf{M}}$, \mathbf{f}^{\min} e \mathbf{f}^{\max} , os limites de transmissão podem ser expressos:

$$\begin{aligned} -\widehat{\mathbf{M}}\tilde{\theta}(\omega) &\geq -\mathbf{f}^{\max} \\ \widehat{\mathbf{M}}\tilde{\theta}(\omega) &\geq \mathbf{f}^{\min} \end{aligned} \quad (2.41)$$

A função objetivo (2.30) pode ser escrita como:

$$f = \sum_{\omega=1}^{N_{\omega}} \pi(\omega) [\mathbf{e}' \mathbf{y}(\omega)] \quad (2.42)$$

onde $\mathbf{e} = [1, 1, \dots, 1]'$.

Assim, usando uma notação matricial para representar o problema de otimização de nível inferior, temos que:

$$\begin{aligned}
\min_{\tau(\omega)} f &= \sum_{\omega=1}^{N_\omega} \pi(\omega) [e' y(\omega)] \\
\text{s.a:} & \\
& \left. \begin{aligned}
ph_{i,1}(1) &= ph_{i,1}(2) = \dots = ph_{i,1}(N_\omega) \\
v_{i,1}(1) &= v_{i,1}(2) = \dots = v_{i,1}(N_\omega) \\
q_{i,1}(1) &= q_{i,1}(2) = \dots = q_{i,1}(N_\omega) \\
u_{i,1}(1) &= u_{i,1}(2) = \dots = u_{i,1}(N_\omega)
\end{aligned} \right\} i = 1, \dots, H. \\
& \left. \begin{aligned}
\hat{\theta}_{k,1}(1) &= \hat{\theta}_{k,1}(2) = \dots = \hat{\theta}_{k,1}(N_\omega) \\
y_{k,1}(1) &= y_{k,1}(2) = \dots = y_{k,1}(N_\omega)
\end{aligned} \right\} k = 1, \dots, N_b. \\
& \left. \begin{aligned}
\mathbf{ph}(\omega) - \mathbf{diag}(\eta)\mathbf{q}(\omega) &= -\mathbf{d} \\
\mathbf{A}_v\mathbf{v}(\omega) + \mathbf{A}_s\mathbf{q}(\omega) + \mathbf{A}_u\mathbf{u}(\omega) &= \tilde{\mathbf{r}}(\omega) \\
-\tilde{\mathbf{B}}\tilde{\theta}(\omega) + \tilde{\mathbf{G}}\mathbf{ph}(\omega) + \mathbf{y}(\omega) &= \mathbf{pd} \\
-\tilde{\mathbf{M}}\tilde{\theta}(\omega) &\geq -\mathbf{f}^{\max} \\
\tilde{\mathbf{M}}\tilde{\theta}(\omega) &\geq \mathbf{f}^{\min} \\
\mathbf{ph}(\omega) &\geq \mathbf{ph}^{\min} \\
-\mathbf{ph}(\omega) &\geq -\mathbf{ph}^{\max} \\
\mathbf{v}(\omega) &\geq \mathbf{v}^{\min} \\
-\mathbf{v}(\omega) &\geq -\mathbf{v}^{\max} \\
\mathbf{q}(\omega) &\geq \mathbf{q}^{\min} \\
-\mathbf{q}(\omega) &\geq -\mathbf{q}^{\max} \\
\mathbf{u}(\omega) &\geq 0 \\
\mathbf{y}(\omega) &\geq 0
\end{aligned} \right\} \omega = 1, \dots, N_\omega. \tag{2.43}
\end{aligned}$$

O despacho de usinas obtido pela resolução do problema (2.43) será usado como base para analisar os resultados obtidos pelo despacho descentralizado.

2.5 Conclusões

Neste capítulo foi apresentado um modelo de planejamento de médio prazo para sistemas hidrelétricos, com as funções de produção de cada usina, balanço hídrico dos reservatórios, balanço de potência nas barras e limites operacionais e físicos do sistema como um todo.

Foi formulado o problema de despacho centralizado como um

problema estocástico em dois estágios resolvido usando o conceito de *janela deslizante*. Neste modelo de despacho, o objetivo do operador é reduzir a complementação térmica necessária para atender a carga, o que corresponde a reduzir os custos de operação do sistema.

No capítulo seguinte será introduzido o modelo de despacho descentralizado, que agrega as funções do despacho centralizado juntamente com as funções objetivo dos produtores, formando um problema de otimização em dois níveis.

3 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE DESPACHO DESCENTRALIZADO

3.1 Introdução

No capítulo anterior foi formulado o problema de despacho centralizado realizado pelo operador do sistema, que tem como objetivo principal reduzir a complementação térmica necessária para atender a demanda num certo período de tempo, utilizando ao máximo os recursos hídricos disponíveis.

Contudo, esse modelo de despacho apresenta algumas desvantagens quando aplicado a um mercado competitivo na geração, pois não permite que os produtores definam suas ofertas, ficando sujeitos ao que é definido pelo operador do sistema. Este fator pode levar a diferenças nos despachos comercial e físico realizados.

Com o intuito de reduzir essas diferenças, que tem impacto sobre o preço de energia repassado aos consumidores finais, é apresentado neste capítulo um modelo de despacho descentralizado, que permite aos produtores maior autonomia para definir suas ofertas ao mercado. Neste caso, delega-se ao operador do sistema a responsabilidade de coordenar essas ofertas de modo a obter um despacho factível. A descrição do modelo é apresentada a seguir.

3.2 Despacho Descentralizado

Quando o despacho é descentralizado, cada produtor é responsável por definir o montante de geração que irá ofertar para suprir a demanda do sistema. Ao contrário do que ocorre no despacho centralizado, a função do operador do sistema é de coordenação das ofertas realizadas pelos geradores, de forma a encontrar um despacho que respeite as restrições operacionais do sistema e garantir a segurança do mesmo.

Cada produtor j tem como objetivo maximizar seus lucros individuais durante o horizonte de planejamento. Para isso, supõe-se que cada produtor estipula uma meta energética, que será expressa em termos do volume do reservatório no último período de análise. Além disso, o produtor deve considerar que, em todos os cenários, o operador do sistema irá coordenar a produção de modo a minimizar a carga não atendida pelas usinas hidrelétricas, reduzindo a participação de usu-

nas térmicas no despacho. Supõe-se que as ofertas dos produtores são definidas em termos de quantidade de geração disponível.

3.2.1 Formulação do Problema de um Único Produtor

As estratégias de cada produtor para maximizar seu lucro dependem de fatores hidrológicos e estruturais. Ou seja, as decisões tomadas em cada período de tempo devem considerar as possíveis vazões naturais e vindas de usinas a montante, a capacidade de armazenamento e ainda os lucros estimados para todo o período. Devido às incertezas envolvendo as vazões afluentes dos rios, o uso excessivo dos recursos hídricos pode comprometer o atendimento da demanda futura e consequentemente os lucros de cada produtor. Dessa forma, supõe-se que as ofertas de cada produtor j sejam ajustadas de modo a minimizar a soma dos desvios quadráticos dos volumes de seus reservatórios, no final do período de estudo, em relação aos valores especificados, v_j^{esp} .

Para isso, definimos $Of_{j,t}(\omega)$ como a oferta feita pelo produtor j num determinado período de tempo t e cenário ω , onde as ofertas definidas no primeiro período, $Of_{j,1}(\omega)$, não dependem do conjunto de cenários de vazões afluentes e, portanto, são únicas para todos os cenários. Para os demais períodos de tempo, as ofertas $Of_{j,t}(\omega)$, $t = 2, \dots, T$ e $\omega = 1, \dots, N_\omega$ vão depender da aleatoriedade das afluências. Cada produtor deverá ainda considerar as estimativas de ofertas feitas pelos outros produtores, para cada período de tempo e cenário de afluência. Além disso, deverá levar em consideração as ações do operador do sistema para se ter um despacho factível. Assim, cada produtor j define suas ofertas resolvendo seu problema de otimização em dois níveis (3.2).

No problema (3.2) as variáveis de nível superior são $Of_{j,t}(\omega)$ e as variáveis de nível inferior são representadas pelo vetor $\tau(\omega)$, sendo:

$$\tau(\omega) = \left[\mathbf{p}h_{i,t}(\omega), \mathbf{v}_{i,t}(\omega), \mathbf{q}_{i,t}(\omega), \mathbf{u}_{i,t}(\omega), \hat{\theta}_{n,t}(\omega), \mathbf{y}_{k,t}(\omega) \right] \forall i, k, t \text{ e } \omega \quad (3.1)$$

Portanto, para o produtor j tem-se um problema quadrático no nível superior e N_ω problemas lineares no nível inferior. Deve-se observar que cada produtor só pode alterar suas próprias ofertas, que são definidas no problema de nível superior e passam a ser constantes no problema de nível inferior do problema de otimização em dois níveis.

$$\min_{Of_{j,t}(\omega)} z_j = \sum_{\omega=1}^{N_\omega} \pi(\omega) \frac{1}{2} (v_{j,T}(\omega) - v_j^{sp})^2$$

s.a:

$$\left. \begin{aligned} ph_j^{\min} &\leq Of_{j,t}(\omega) \leq ph_j^{\max} && \left. \begin{aligned} & \} t = 1, \dots, T, \omega = 1, \dots, N_\omega. \\ Of_{j,1}(1) &= Of_{j,1}(2) = \dots = Of_{j,1}(N_\omega) \\ ph_{i,1}(1) &= ph_{i,1}(2) = \dots = ph_{i,1}(N_\omega) \\ v_{i,1}(1) &= v_{i,1}(2) = \dots = v_{i,1}(N_\omega) \\ q_{i,1}(1) &= q_{i,1}(2) = \dots = q_{i,1}(N_\omega) \\ u_{i,1}(1) &= u_{i,1}(2) = \dots = u_{i,1}(N_\omega) \end{aligned} \right\} i = 1, \dots, H. \\ \widehat{\theta}_{k,1}(1) &= \widehat{\theta}_{k,1}(2) = \dots = \widehat{\theta}_{k,1}(N_\omega) \\ y_{k,1}(1) &= y_{k,1}(2) = \dots = y_{k,1}(N_\omega) \end{aligned} \right\} k = 1, \dots, N_b.$$

$\tau(\omega)$ resolve:

$$P(\omega) \left\{ \begin{aligned} & \min f = \pi(\omega) \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^{N_b} y_{b,t}(\omega) \\ & \text{s.a:} \\ & \sum_{n=1}^N [-\widehat{\mathbf{B}}_{k,n} \widehat{\theta}_{n,t}(\omega)] + \sum_{i=1}^H [\mathbf{G}_{k,i} ph_{i,t}(\omega)] + y_{k,t}(\omega) = pd_{k,t} \quad (3.2) \\ & \sum_{n=1}^N [-\mathbf{M}_{l,n} \widehat{\theta}_{n,t}(\omega)] \geq -f_l^{\max} \\ & \sum_{n=1}^N [\mathbf{M}_{l,n} \widehat{\theta}_{n,t}(\omega)] \leq f_l^{\min} \\ & ph_{i,t}(\omega) = \eta_i q_{i,t}(\omega) - d_i \\ & v_{i,t}(\omega) = v_{i,t-1}(\omega) + r_{i,t}(\omega) - q_{i,t}(\omega) - u_{i,t}(\omega) \\ & \quad + \sum_{m \in \Omega_i} [q_{m,t}(\omega) + u_{m,t}(\omega)] \\ & ph_i^{\min} \leq ph_{i,t}(\omega) \leq Of_{i,t}(\omega) \\ & v_i^{\min} \leq v_{i,t}(\omega) \leq v_i^{\max} \\ & q_i^{\min} \leq q_{i,t}(\omega) \leq q_i^{\max} \\ & u_{i,t}(\omega) \geq 0 \\ & y_{k,t}(\omega) \geq 0 \\ & \text{para:} \\ & \quad i = 1, \dots, H, t = 1, \dots, T, k = 1, \dots, N_b, \\ & \quad n = 1, \dots, N, l = 1, \dots, L, \omega = 1, \dots, N_\omega \end{aligned} \right.$$

Para representar o problema acima na forma matricial, definimos o vetor das ofertas $\mathbf{Of}(\omega)$:

$$\mathbf{Of}(\omega) = [Of_{1,1}(\omega), \dots, Of_{H,1}(\omega), \dots, Of_{1,T}(\omega), \dots, Of_{H,T}(\omega)]' \quad (3.3)$$

Usando (3.3) e a formulação matricial empregada no despacho centralizado (2.43), o problema resolvido pelo produtor j fica da seguinte forma:

$$\min_{Of_{j,t}(\omega)} z_j = \sum_{\omega=1}^{N_\omega} \pi(\omega) \frac{1}{2} (v_{j,T}(\omega) - v_j^{sp})^2$$

s.a:

$$\left. \begin{aligned} ph_j^{\min} &\leq Of_{j,t}(\omega) \leq ph_j^{\max} && \} t = 1, \dots, T, \omega = 1, \dots, N_\omega. \\ Of_{j,1}(1) &= Of_{j,1}(2) = \dots = Of_{j,1}(N_\omega) \\ ph_{i,1}(1) &= ph_{i,1}(2) = \dots = ph_{i,1}(N_\omega) \\ v_{i,1}(1) &= v_{i,1}(2) = \dots = v_{i,1}(N_\omega) \\ q_{i,1}(1) &= q_{i,1}(2) = \dots = q_{i,1}(N_\omega) \\ u_{i,1}(1) &= u_{i,1}(2) = \dots = u_{i,1}(N_\omega) && \} i = 1, \dots, H. \\ \widehat{\theta}_{k,1}(1) &= \widehat{\theta}_{k,1}(2) = \dots = \widehat{\theta}_{k,1}(N_\omega) \\ y_{k,1}(1) &= y_{k,1}(2) = \dots = y_{k,1}(N_\omega) && \} k = 1, \dots, N_b. \end{aligned} \right\}$$

$\tau(\omega)$ resolve, para $\omega = 1, \dots, N_\omega$,

$$P(\omega) \left\{ \begin{array}{l} \min_{\tau(\omega)} f = \pi(\omega) [\mathbf{e}' \mathbf{y}(\omega)] \\ \tau(\omega) \\ \text{s.a:} \\ \mathbf{ph}(\omega) - \mathbf{diag}(\eta) \mathbf{q}(\omega) = -\mathbf{d} \\ \mathbf{A}_v \mathbf{v}(\omega) + \mathbf{A}_s \mathbf{q}(\omega) + \mathbf{A}_u \mathbf{u}(\omega) = \widetilde{\mathbf{r}}(\omega) \\ -\widetilde{\mathbf{B}} \widetilde{\boldsymbol{\theta}}(\omega) + \widetilde{\mathbf{G}} \mathbf{ph}(\omega) + \mathbf{y}(\omega) = \mathbf{pd} \\ -\widetilde{\mathbf{M}} \widetilde{\boldsymbol{\theta}}(\omega) \geq -\mathbf{f}^{\max} \\ \widetilde{\mathbf{M}} \widetilde{\boldsymbol{\theta}}(\omega) \geq \mathbf{f}^{\min} \\ \mathbf{ph}(\omega) \geq \mathbf{ph}^{\min} \\ -\mathbf{ph}(\omega) \geq -\mathbf{Of}(\omega) \\ \mathbf{v}(\omega) \geq \mathbf{v}^{\min} \\ -\mathbf{v}(\omega) \geq -\mathbf{v}^{\max} \\ \mathbf{q}(\omega) \geq \mathbf{q}^{\min} \\ -\mathbf{q}(\omega) \geq -\mathbf{q}^{\max} \\ \mathbf{u}(\omega) \geq 0 \\ \mathbf{y}(\omega) \geq 0 \end{array} \right. \quad (3.4)$$

No problema (3.4) existem N_ω problemas lineares no nível inferior, ou seja, um problema para cada cenário ω considerado.

Basicamente, o problema em dois níveis é um modelo de otimização cujas restrições requerem que algumas de suas variáveis (variáveis de nível inferior) resolvam um sub-problema de otimização que depende parametricamente de variáveis de nível superior (neste caso, as ofertas).

Pode-se observar que no problema (3.4) o produtor j atua como líder definindo sua capacidade de geração. Por outro lado, o operador do sistema atua como seguidor e ajusta as variáveis que controla (potência fornecida por todos os geradores e demais variáveis das usinas e da rede) de forma que todas as restrições operativas, inclusive os limites de geração definidas pelas ofertas do produtor j , sejam satisfeitas.

A solução do problema pode ser obtida em três etapas [40]:

1. Resolvem-se analiticamente os problemas de nível inferior. Para isso, derivam-se as condições de otimalidade de cada produtor;
2. Substituem-se as condições de otimalidade de cada problema de nível inferior no problema do produtor j ;
3. Resolve-se o problema do produtor j .

O problema definido na etapa 2 possui, além de restrições do problema de nível superior, todas as restrições definidas pelas condições de otimalidade do problema de nível inferior. Devido a essa característica, ele pode ser denominado um Problema Matemático com Restrições de Equilíbrio (*Mathematical Problem with Equilibrium Constraints - MPEC*) [41]. A interação produtor-operador do sistema pode ser entendida como um jogo de Stackelberg, onde o produtor atua como líder e o operador do sistema atua como seguidor .

3.2.2 Problema de Despacho Descentralizado Formulado Como um EPEC

Todos os produtores possuem um problema similar a (3.4) e o despacho descentralizado é encontrado quando o conjunto de ofertas é satisfatório para todos os produtores, ou seja, quando um equilíbrio é encontrado. Assim, o conjunto de soluções de todos os H produtores, pode ser modelado como um problema de equilíbrio com restrições de equilíbrio (*Equilibrium Problem with Equilibrium Constraints-EPEC*).

A solução do EPEC pode ser obtida em três etapas (Figura 3.1):

1. O produtor 1 faz sua oferta para atender a demanda no próximo ano tendo em vista seu próprio objetivo (manter o volume de

seu reservatório o mais próximo possível do valor especificado) e valores estimados da oferta dos demais produtores.

2. O produtor 2, tomando as ofertas atualizadas do produtor 1 e as ofertas conhecidas dos demais produtores, atualiza suas ofertas. O processo se repete para os produtores $3, \dots, H$.
3. Verificam-se as alterações ocorridas nas ofertas de cada produtor. Se essas forem significativas, retorna-se à etapa 1 para novas atualizações das ofertas. Se as alterações forem desprezíveis, encontra-se a solução de equilíbrio.

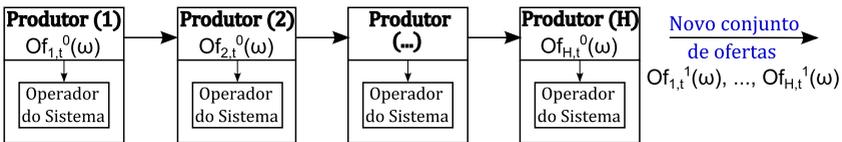


Figura 3.1 – Despacho descentralizado formulado como um EPEC.

Vale ressaltar que a ordem com que os produtores participam do jogo pode ser alterada, o que usualmente resulta em uma nova solução para o problema.

No despacho descentralizado, portanto, os produtores, de forma competitiva, buscam uma solução de equilíbrio. É importante dizer que o jogo apresenta vários pontos de equilíbrio que podem ser obtidos mudando-se a ordem com que os produtores (líderes) fazem suas ofertas.

3.3 Despacho Descentralizado e Jogos Não-Cooperativos

Sempre que há conflitos de interesses entre duas ou mais entidades, a teoria dos jogos torna-se uma importante ferramenta matemática de estudo de estratégias, na tentativa de obter algum benefício por parte dos agentes envolvidos.

Diversas são as formas de abordar um jogo. Nesta seção são apresentados dois jogos não-cooperativos, que ocorrem quando não há possibilidade de negociação entre as partes envolvidas.

3.3.1 Jogo Líder-Seguidores

O jogo líder-seguidores (Stackelberg) é um tipo de jogo não cooperativo, ou seja, não existe a possibilidade de negociação entre os jogadores. Esse jogo é caracterizado por uma entidade que tem maior poder sobre as demais e age como líder. O líder escolhe sua estratégia ótima de acordo com sua função objetivo e com o conhecimento de como os seguidores vão agir a partir de sua decisão. Como visto anteriormente, a iteração produtor-operador do sistema é um exemplo deste tipo de jogo, no qual existe apenas um seguidor.

Os seguidores, que não precisam necessariamente possuir a mesma função objetivo e restrições, buscam de forma competitiva o equilíbrio por meio de um jogo de Nash, parametrizado pela decisão feita pelo líder. A Figura 3.2 caracteriza a estrutura desse jogo para um mercado de energia, onde um grande produtor (líder) possui maior poder na tomada de decisão frente aos demais produtores e o operador do sistema.

O conceito de equilíbrio no jogo de Stackelberg difere do conceito de equilíbrio em um jogo com jogadores simétricos (com o mesmo poder de decisão). Na forma de um jogo sequencial, o equilíbrio de Stackelberg é representado por uma ação ótima do líder restringida pelas respostas de equilíbrio dos seguidores (Nash). Contudo, o líder tem total conhecimento de como os seguidores vão reagir à sua decisão, o que lhe dá poder de determinar o correspondente equilíbrio dos seguidores no jogo.

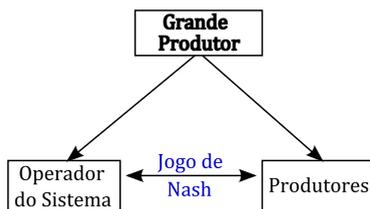


Figura 3.2 – Estrutura de um jogo líder-seguidores

3.3.2 Jogo Multi-Líder-Seguidor-Comum

Um jogo multi-líder-seguidor-comum ocorre quando existe, no mercado, dois ou mais líderes que de forma competitiva tomam suas decisões antes do seguidor, que é comum a todos os líderes e reage às suas decisões. Neste tipo de jogo, o objetivo é encontrar uma solução de equilíbrio para todos os participantes do jogo, tal que nenhum tenha incentivo em alterar suas decisões. O despacho descentralizado de usinas hidrelétricas pode ser entendido como um jogo multi-líder-seguidor-comum.

A solução desse tipo de jogo é um equilíbrio de Nash. O jogo de Nash é representado como um problema composto por vários jogadores (produtores), dominantes em relação a uma mesma entidade (operador do sistema), que resolvem individualmente e de forma não cooperativa um MPEC. Cada produtor tenta maximizar seu lucro (em função do volume de água armazenado em seus reservatórios) com base na estratégia dos demais produtores. O equilíbrio de Nash será encontrado quando nenhum produtor altera sua oferta, seguido pela resposta do operador do sistema.

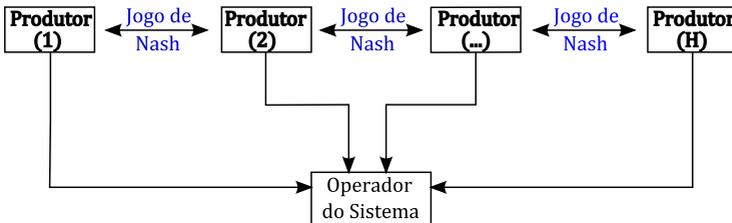


Figura 3.3 – Estrutura de um jogo multi-líder-seguidor-comum

Na Figura 3.3 é mostrada a estrutura de um jogo multi-líder-seguidor-comum, onde H grandes produtores atuam como líderes jogando um jogo de Nash, enquanto que o operador do sistema age como seguidor comum a todos os líderes. Similarmente ao caso líder-seguidores, para cada ação dos líderes a reação do seguidor é conhecida.

Pode-se observar que para encontrar um ponto de equilíbrio de Nash, deve-se resolver H problemas de otimização de 2 níveis, obtendo para esses problemas soluções que tenham uma característica comum: o mesmo conjunto de ofertas para cada produtor. No entanto, em um único ponto de equilíbrio pode-se ter:

- Valores ótimos das variáveis do problema de segundo nível que sejam distintos para cada líder.
- Multiplicadores de Lagrange associado às restrições do problema de segundo nível que sejam distintos para cada líder.

Tal comportamento é consequência do fato de estarmos resolvendo um grupo de problemas bi-níveis que possuem funções objetivo distintas.

Devido ao comportamento dos multiplicadores de Lagrange do problema, diz-se que a solução do Jogo de Nash (o ponto de equilíbrio) usualmente não apresenta preços consistentes, ou ainda, não respeita o critério de consistência de preços.

3.4 Soluções de Equilíbrio com Consistência de Preços

Para derivar as condições que os problemas dos líderes devem satisfazer para que apresentem consistência de preços, o problema de cada líder é escrito de forma compacta. Seja H o número de líderes, \mathbf{Of}_j , $j = 1, \dots, H$, as variáveis de decisão do líder j e $\mathbf{Of} = (\mathbf{Of}_1, \dots, \mathbf{Of}_H)$ o conjunto de todas as variáveis dos problemas de primeiro nível. Denote as restrições do problema de nível superior como $\mathbf{g}_j(\mathbf{Of}, \tau) \leq \mathbf{0}$, onde τ é o vetor de variáveis de todos os problemas de segundo nível. Além disso, denote a função objetivo do líder como $f_j(\mathbf{Of}, \tau)$.

A solução ótima do problema de nível inferior deve respeitar um conjunto de restrições que podem ser expressas como $\mathbf{h}(\mathbf{Of}, \tau) \leq \mathbf{0}$.

Considere agora que, tal como mostrado na Figura 3.1, os líderes façam ofertas de geração para suprir a demanda e que o líder j esteja a ponto de definir sua oferta, sendo que conhece as ofertas dos demais líderes ($\hat{\mathbf{Of}}_i^*$, $i \neq j$). O problema do líder j pode ser escrito, de forma compacta, como

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{Of}_j, \tau} \quad & f_j(\hat{\mathbf{Of}}_j, \tau) \\ \text{s.a:} \quad & \mathbf{g}_j(\hat{\mathbf{Of}}_j, \tau) \leq \mathbf{0} \\ & \mathbf{h}(\hat{\mathbf{Of}}_j, \tau) \leq \mathbf{0} \end{aligned} \tag{3.5}$$

onde $\hat{\mathbf{Of}}_j = (\tilde{\mathbf{Of}}_1^*, \dots, \mathbf{Of}_{j-1}^*, \mathbf{Of}_j, \mathbf{Of}_{j+1}^*, \dots, \mathbf{Of}_H^*)$.

A solução do jogo multi-líder-seguidor-comum resolve um conjunto de problemas com restrições de equilíbrio (MPECs):

$$(\mathbf{Of}_j^*, \tau^*) \in \left\{ \begin{array}{l} \min_{\mathbf{Of}_j, \tau} \quad f_j(\hat{\mathbf{Of}}_j, \tau) \\ \text{sujeito a} \\ \mathbf{g}_j(\hat{\mathbf{Of}}_j, \tau) \leq \mathbf{0} \\ \mathbf{h}(\mathbf{Of}_j^*, \tau) \leq \mathbf{0} \end{array} \right\} \quad \forall j = 1, \dots, H \quad (3.6)$$

O jogo multi-lider-seguidor-comum (3.6) é dito *completamente separável* [25] se:

1. O conjunto de restrições do problema de nível superior, \mathbf{g}_j , é constituído por um subconjunto de restrições que dependam apenas de \mathbf{Of}_j e outro subconjunto que é comum para todos os líderes, ou seja,

$$\mathbf{g}_j(\mathbf{Of}, \tau) = \left[\begin{array}{l} \bar{\mathbf{g}}_j(\mathbf{Of}_j) \\ \tilde{\mathbf{g}}(\mathbf{Of}, \tau) \end{array} \right] \quad (3.7)$$

2. A função objetivo é composta por um termo que dependa apenas de \mathbf{Of}_j e um termo comum para todos os líderes, ou seja

$$f_j(\mathbf{Of}, \tau) = \bar{f}_j(\mathbf{Of}_j) + \tilde{f}(\mathbf{Of}, \tau), \quad \forall j = 1, \dots, H \quad (3.8)$$

Considere que um jogo multi-lider-seguidor-comum seja completamente separável. Neste caso, Leyffer e Munson [25] demonstram que encontrar uma solução para esse jogo (ou ainda para o EPEC) é equivalente a resolver *um único* problema:

$$\begin{array}{ll} \min_{\mathbf{Of}, \tau} & \sum_{i=1}^H \bar{f}_i(\mathbf{Of}_i) + \tilde{f}(\mathbf{Of}, \tau) \\ \text{sujeito a} & \\ & \bar{\mathbf{g}}_j(\mathbf{Of}_j) \leq \mathbf{0}, \quad j = 1, \dots, H \\ & \tilde{\mathbf{g}}(\mathbf{Of}, \tau) \leq \mathbf{0} \\ & \mathbf{h}(\mathbf{Of}, \tau) \leq \mathbf{0} \end{array} \quad (3.9)$$

no qual, além do vetor τ , todos os componentes do vetor \mathbf{Of} são variáveis de otimização.

Analisando o problema (3.4) observa-se que:

- As restrições do problema de nível superior estão divididas em dois grupos: o primeiro é expresso em termos das ofertas do produtor j apenas e o segundo grupo é expresso em termos de variáveis do segundo nível;

- A função objetivo do produtor é expressa apenas em termos de variáveis do segundo nível, sendo que somente um subconjunto dessas variáveis está presente na função objetivo (para o produtor j , a função objetivo depende apenas de $v_{j,T}(\omega)$).

Portanto, (3.4) satisfaz a primeira, mas não a segunda, condição de problema separável, e as soluções de equilíbrio para o problema de despacho descentralizado em geral não obedecem o critério de consistência de preços.

A formulação do problema de despacho descentralizado deve ser modificada para que soluções de equilíbrio com consistência de preços sejam obtidas. A análise anterior mostra que, especificamente, a função objetivo de cada produtor deve ser modificada de forma que seja expressa em termos dos volumes finais de *todos* os reservatórios do sistema. Uma forma direta de modificar a função objetivo de cada produtor j é transformá-la em

$$z_j = \sum_{i=1}^H \sum_{\omega=1}^{N_\omega} \pi(\omega) \frac{1}{2} (v_{i,T}(\omega) - v_i^{esp})^2 \quad (3.10)$$

ou seja, o produtor, ao definir suas ofertas, passa a considerar também as metas de volume dos demais produtores.

Com a modificação na função objetivo os problemas dos produtores passam a ser separáveis e a solução do EPEC é obtida resolvendo-se um único problema de otimização, conforme (3.11).

$$\min_{Of_{i,t}(\omega)} \frac{1}{2} \sum_{\omega=1}^{N_\omega} \pi(\omega) \sum_{i=1}^H [v_{i,T}(\omega) - v_i^{sp}]^2$$

s.a:

$$\left. \begin{aligned} & ph_i^{\min} \leq Of_{i,t}(\omega) \leq ph_i^{\max} \quad \} \quad i = 1, \dots, H; \quad t = 1, \dots, T; \quad \omega = 1, \dots, N_\omega. \\ & Of_{i,1}(1) = Of_{i,1}(2) = \dots = Of_{i,1}(N_\omega) \\ & ph_{i,1}(1) = ph_{i,1}(2) = \dots = ph_{i,1}(N_\omega) \\ & v_{i,1}(1) = v_{i,1}(2) = \dots = v_{i,1}(N_\omega) \\ & q_{i,1}(1) = q_{i,1}(2) = \dots = q_{i,1}(N_\omega) \\ & u_{i,1}(1) = u_{i,1}(2) = \dots = u_{i,1}(N_\omega) \end{aligned} \right\} \quad i = 1, \dots, H.$$

$$\left. \begin{aligned} & \hat{\theta}_{k,1}(1) = \hat{\theta}_{k,1}(2) = \dots = \hat{\theta}_{k,1}(N_\omega) \\ & y_{k,1}(1) = y_{k,1}(2) = \dots = y_{k,1}(N_\omega) \end{aligned} \right\} \quad k = 1, \dots, N_b.$$

$\tau(\omega)$ resolve, para $i = 1, \dots, H; t = 1, \dots, T; k, 1, \dots, N_b;$
 $l = 1, \dots, L; \omega = 1, \dots, N_\omega :$

$$P(\omega) \left\{ \begin{aligned} & \min f = \pi(\omega) \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^{N_b} y_{b,t}(\omega) \\ & \text{s.a:} \\ & ph_{i,t}(\omega) = \eta_i q_{i,t}(\omega) - d_i \\ & v_{i,t}(\omega) = v_{i,t-1}(\omega) + r_{i,t}(\omega) - q_{i,t}(\omega) - u_{i,t}(\omega) \\ & \sum_{m \in \Omega_i} [q_{m,t}(\omega) + u_{m,t}(\omega)] \\ & \sum_{n=1}^N (-\hat{\mathbf{B}}_{k,n} \hat{\theta}_{n,t}(\omega)) + \sum_{i=1}^H (\mathbf{G}_{k,i} ph_{i,t}(\omega)) + y_{k,t}(\omega) = pd_{k,t} \\ & \sum_{n=1}^N (\mathbf{M}_{l,n} \hat{\theta}_{n,t}(\omega)) \leq f_l^{\max} \\ & \sum_{n=1}^N (-\mathbf{M}_{l,n} \hat{\theta}_{n,t}(\omega)) \leq -f_l^{\min} \\ & ph_i^{\min} \leq ph_{i,t}(\omega) \leq Of_{i,t}(\omega) \\ & v_i^{\min} \leq v_{i,t}(\omega) \leq v_i^{\max} \\ & q_i^{\min} \leq q_{i,t}(\omega) \leq q_i^{\max} \\ & u_{i,t}(\omega) \geq 0 \\ & y_{k,t}(\omega) \geq 0 \end{aligned} \right. \quad (3.11)$$

O problema (3.11) retrata uma situação na qual uma entidade, que não discrimina os produtores, age como líder definindo as ofertas de todos os produtores de forma a minimizar a soma dos desvios quadráticos dos volumes finais dos reservatórios em relação aos valores

especificados.

Reagindo às ações dessa entidade, o operador do sistema modifica as ofertas de forma a obter um despacho factível. Em tal situação os produtores não competem entre si, pois todos aceitam que uma solução de compromisso seja implementada.

Observe que $Of_{i,t}(\omega)$, $\forall i,t,\omega$ são variáveis de decisão do problema de nível superior e são parâmetros dentro do problema de nível inferior. As variáveis de decisão do nível inferior são também variáveis no nível superior.

Na Equação (3.12) é apresentado a formulação matricial do problema de despacho descentralizado com consistência de preços.

$$\min_{Of_{i,t}(\omega)} z_i = \sum_{\omega=1}^{N_\omega} \pi(\omega) \frac{1}{2} (v_{i,T}(\omega) - v_i^{sp})^2$$

s.a:

$$\left. \begin{array}{l} ph_i^{\min} \leq Of_{i,t}(\omega) \leq ph_i^{\max} \quad \} \quad i = 1, \dots, H; \quad t = 1, \dots, T; \quad \omega = 1, \dots, N_\omega. \\ Of_{i,1}(1) = Of_{i,1}(2) = \dots = Of_{i,1}(N_\omega) \\ ph_{i,1}(1) = ph_{i,1}(2) = \dots = ph_{i,1}(N_\omega) \\ v_{i,1}(1) = v_{i,1}(2) = \dots = v_{i,1}(N_\omega) \\ q_{i,1}(1) = q_{i,1}(2) = \dots = q_{i,1}(N_\omega) \\ u_{i,1}(1) = u_{i,1}(2) = \dots = u_{i,1}(N_\omega) \\ \widehat{\theta}_{k,1}(1) = \widehat{\theta}_{k,1}(2) = \dots = \widehat{\theta}_{k,1}(N_\omega) \\ y_{k,1}(1) = y_{k,1}(2) = \dots = y_{k,1}(N_\omega) \end{array} \right\} \begin{array}{l} i = 1, \dots, H. \\ k = 1, \dots, N_b. \end{array}$$

$\tau(\omega)$ resolve, para $\omega = 1, \dots, N_\omega$:

$$P(\omega) \left\{ \begin{array}{l} \min f = \pi(\omega) [e' \mathbf{y}(\omega)] \\ \tau(\omega) \\ \text{s.a:} \\ \mathbf{ph}(\omega) - \mathbf{diag}(\eta)\mathbf{q}(\omega) = -\mathbf{d} \\ \mathbf{A}_v \mathbf{v}(\omega) + \mathbf{A}_s \mathbf{q}(\omega) + \mathbf{A}_u \mathbf{u}(\omega) = \tilde{\mathbf{r}}(\omega) \\ -\tilde{\mathbf{B}}\tilde{\theta}(\omega) + \tilde{\mathbf{G}}\mathbf{ph}(\omega) + \mathbf{y}(\omega) = \mathbf{pd} \\ -\widehat{\mathbf{M}}\tilde{\theta}(\omega) \geq -\mathbf{f}^{\max} \\ \widehat{\mathbf{M}}\tilde{\theta}(\omega) \geq \mathbf{f}^{\min} \\ \mathbf{ph}(\omega) \geq \mathbf{ph}^{\min} \\ -\mathbf{ph}(\omega) \geq -\mathbf{Of}(\omega) \\ \mathbf{v}(\omega) \geq \mathbf{v}^{\min} \\ -\mathbf{v}(\omega) \geq -\mathbf{v}^{\max} \\ \mathbf{q}(\omega) \geq \mathbf{q}^{\min} \\ -\mathbf{q}(\omega) \geq -\mathbf{q}^{\max} \\ \mathbf{u}(\omega) \geq 0 \\ \mathbf{y}(\omega) \geq 0 \end{array} \right. \quad (3.12)$$

Vale ressaltar que, a busca pelas soluções de equilíbrio tanto por Nash quanto por consistência de preço é realizada pelo método de janela deslizante apresentado na seção 2.2.1.1.

3.5 Exemplo Ilustrativo

Com esse exemplo pretendemos apenas demonstrar como são formulados os modelos de despacho centralizado e descentralizado por

consistência de preços. Para isso, considere o sistema mostrado na Figura 3.4, o qual é formado pelas usinas de Água Vermelha (i_1) e Capivara (i_2) ligadas às barras 1 e 2 respectivamente.

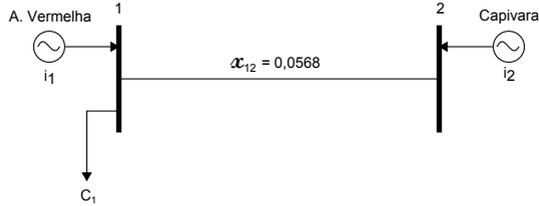


Figura 3.4 – Sistema Teste

Os dados das usinas são apresentados na Tabela 3.1. Para simplificar o exemplo, utilizamos apenas dois cenários de vazões afluentes e dois períodos de tempo. Os cenários de vazões são equiprováveis.

Tabela 3.1 – Dados das Usinas

Usina	ph^{\max} (p.u.)	v^{\min} (hm^3)	v^{\max} (hm^3)	v_0 (hm^3)	q^{\max} (hm^3/h)	q^{\min} (hm^3/h)	η	d
A. Verm.	13,80	5856	11025	10000	10.519	1.578	1.5427	2.4277
Capiv.	6,40	4816	10540	9000	6.278	1.575	1.3608	2.1425

Assim, considerando dois períodos de tempo ($T = 2$), a demanda do sistema é apresentada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Demanda do Sistema

Mês	1	2
Carga (p.u.)	19	17

As matrizes $\mathbf{diag}(\eta)$, \mathbf{Av} e \mathbf{As} são definidas para cada ω , então:

$$\mathbf{diag}(\eta) = \begin{bmatrix} 1,5427 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1,3608 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1,5427 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1,3608 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$\mathbf{Av} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$\mathbf{A}_s = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

A matriz de admitância nodal \mathbf{B} é então montada conforme (3.16):

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 17,6056 & -17,6056 \\ -17,6056 & 17,6056 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

onde, definindo a barra 1 como referência, temos:

$$\hat{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} -17,6056 \\ 17,6056 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Assim, definimos a matriz $\tilde{\mathbf{B}}$ para cada ω , conforme (3.18):

$$\tilde{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} -17,6056 & 0 \\ 17,6056 & 0 \\ 0 & -17,6056 \\ 0 & 17,6056 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

A matriz de incidência barras-geradores \mathbf{G} é expressa por (3.19):

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

A matriz $\tilde{\mathbf{G}}$ será então formada por matrizes \mathbf{G} e zeros, conforme (3.20):

$$\tilde{\mathbf{G}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Já a matriz de incidência ramos-barras $\tilde{\mathbf{A}}$ é montada conforme (3.21):

$$\tilde{\mathbf{A}} = [1 \quad -1] \quad (3.21)$$

onde, retirando a coluna correspondente a barra de referência, temos (3.22):

$$\mathbf{A} = [-1] \quad (3.22)$$

A matriz de capacidade dos ramos é dada por (3.23):

$$\mathbf{\Gamma} = [17,6056] \quad (3.23)$$

Que será utilizada para montar a matriz \mathbf{M} , conforme (3.24) :

$$\mathbf{M} = [-17,6056] \quad (3.24)$$

A matriz $\widehat{\mathbf{M}}$ é então formada por matrizes \mathbf{M} e zeros, de acordo com o número de cenários, como demonstrado em (3.25):

$$\widehat{\mathbf{M}} = \begin{bmatrix} -17,6056 & 0 \\ 0 & -17,6056 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Os vetores de potência gerada, vazão turbinada e vazão vertida para cada usina, cada período e cada cenário, são representados por:

$$\mathbf{ph}(\mathbf{1}) = \begin{bmatrix} ph_{1,1}(1) \\ ph_{2,1}(1) \\ ph_{1,2}(1) \\ ph_{2,2}(1) \end{bmatrix}, \mathbf{q}(\mathbf{1}) = \begin{bmatrix} q_{1,1}(1) \\ q_{2,1}(1) \\ q_{1,2}(1) \\ q_{2,2}(1) \end{bmatrix}, \mathbf{u}(\mathbf{1}) = \begin{bmatrix} u_{1,1}(1) \\ u_{2,1}(1) \\ u_{1,2}(1) \\ u_{2,2}(1) \end{bmatrix}, \quad (3.26)$$

$$\mathbf{ph}(\mathbf{2}) = \begin{bmatrix} ph_{1,1}(2) \\ ph_{2,1}(2) \\ ph_{1,2}(2) \\ ph_{2,2}(2) \end{bmatrix}, \mathbf{q}(\mathbf{2}) = \begin{bmatrix} q_{1,1}(2) \\ q_{2,1}(2) \\ q_{1,2}(2) \\ q_{2,2}(2) \end{bmatrix}, \mathbf{u}(\mathbf{2}) = \begin{bmatrix} u_{1,1}(2) \\ u_{2,1}(2) \\ u_{1,2}(2) \\ u_{2,2}(2) \end{bmatrix}, \quad (3.27)$$

Os limites de potências geradas e vazões turbinadas mostradas na Tabela 3.1 são agrupadas nos vetores \mathbf{ph}^{\max} , \mathbf{ph}^{\min} , \mathbf{q}^{\max} e \mathbf{q}^{\min} .

Da mesma forma, os vetores de volume nos reservatórios, cenários de vazões afluentes mais volumes iniciais, das constantes de produtividade de cada usina, \mathbf{d} , são representados para cada cenário.

$$\mathbf{v}(\mathbf{1}) = \begin{bmatrix} v_{1,1}(1) \\ v_{2,1}(1) \\ v_{1,2}(1) \\ v_{2,2}(1) \end{bmatrix}, \widehat{\mathbf{r}}(\mathbf{1}) = \begin{bmatrix} r_{1,1}(1) + 10000 \\ r_{2,1}(1) + 9000 \\ r_{1,2}(1) \\ r_{2,2}(1) \end{bmatrix}, \mathbf{d} = \begin{bmatrix} 2,4277 \\ 2,1425 \\ 2,4277 \\ 2,1425 \end{bmatrix}, \quad (3.28)$$

$$\mathbf{v}(\mathbf{2}) = \begin{bmatrix} v_{1,1}(2) \\ v_{2,1}(2) \\ v_{1,2}(2) \\ v_{2,2}(2) \end{bmatrix}, \hat{\mathbf{r}}(\mathbf{2}) = \begin{bmatrix} r_{1,1}(2) + 10000 \\ r_{2,1}(2) + 9000 \\ r_{1,2}(2) \\ r_{2,2}(2) \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Os limites de volume dos reservatórios mostrados na Tabela 3.1 são agrupadas nos vetores \mathbf{v}^{\max} e \mathbf{v}^{\min} .

Os vetores de complementação térmica, demanda nas barras, ângulos de tensão nas barras e o vetor de fluxo de potência máximo e mínimo, f^{\max} e f^{\min} , são definidos para cada cenário ω . Somente lembrando que $f^{\min} = -f^{\max}$.

$$\mathbf{y}(\mathbf{1}) = \begin{bmatrix} y_{1,1}(1) \\ y_{2,1}(1) \\ y_{1,2}(1) \\ y_{2,2}(1) \end{bmatrix}, \mathbf{pd} = \begin{bmatrix} 19 \\ 19 \\ 17 \\ 17 \end{bmatrix}, \tilde{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{1}) = \begin{bmatrix} \tilde{\theta}_{2,1}(1) \\ \tilde{\theta}_{2,2}(1) \end{bmatrix}, \mathbf{f}^{\max} = \begin{bmatrix} 18 \\ 18 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

$$\mathbf{y}(\mathbf{2}) = \begin{bmatrix} y_{1,1}(2) \\ y_{2,1}(2) \\ y_{1,2}(2) \\ y_{2,2}(2) \end{bmatrix}, \tilde{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{2}) = \begin{bmatrix} \tilde{\theta}_{2,1}(2) \\ \tilde{\theta}_{2,2}(2) \end{bmatrix}, \mathbf{f}^{\min} = \begin{bmatrix} -18 \\ -18 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Após montadas todas as matrizes e vetores presentes na forma matricial (3.12), é feita a formulação do problema para $T = 2$ períodos, $H = 2$ usinas e $N_{\omega} = 2$ cenários.

As restrições do problema estão agrupadas em dois conjuntos. O primeiro conjunto (3.32) garante que os valores ótimos das variáveis referentes ao primeiro período não dependam do cenário de vazões, de acordo com a programação estocástica de dois estágios.

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} ph_{1,1}(1) \\ ph_{2,1}(1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} ph_{1,1}(2) \\ ph_{2,1}(2) \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} v_{1,1}(1) \\ v_{2,1}(1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} v_{1,1}(2) \\ v_{2,1}(2) \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} q_{1,1}(1) \\ q_{2,1}(1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} q_{1,1}(2) \\ q_{2,1}(2) \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} u_{1,1}(1) \\ u_{2,1}(1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} u_{1,1}(2) \\ u_{2,1}(2) \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} \tilde{\theta}_{1,1}(1) \\ \tilde{\theta}_{2,1}(1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \tilde{\theta}_{1,1}(2) \\ \tilde{\theta}_{2,1}(2) \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} y_{1,1}(1) \\ y_{2,1}(1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} y_{1,1}(2) \\ y_{2,1}(2) \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{3.32}$$

O segundo conjunto garante que para cada cenário as restrições físicas e operacionais do sistema sejam satisfeitas. Dessa forma, considerando todas as restrições, o problema final de despacho centralizado é apresentado em (3.33).

$$\min_{\tau(\omega)} f = 0,5[y_{1,1}(1) + y_{2,1}(1) + y_{1,2}(1) + y_{2,2}(1)] \\ 0,5[y_{1,1}(2) + y_{2,1}(2) + y_{1,2}(2) + y_{2,2}(2)]$$

s.a.:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Equação: (3.32)} \\ \mathbf{ph}(1) - \text{diag}(\eta)\mathbf{q}(1) = -\mathbf{d} \\ \mathbf{A}_v\mathbf{v}(1) + \mathbf{A}_s\mathbf{q}(1) + \mathbf{A}_s\mathbf{u}(1) = \tilde{\mathbf{r}}(1) \\ -\tilde{\mathbf{B}}\tilde{\theta}(1) + \tilde{\mathbf{G}}\mathbf{ph}(1) + \mathbf{y}(1) = \mathbf{pd} \\ -\widehat{\mathbf{M}}\tilde{\theta}(1) \geq -\mathbf{f}^{\max} \\ \widehat{\mathbf{M}}\tilde{\theta}(1) \geq \mathbf{f}^{\min} \\ \mathbf{ph}(1) \geq \mathbf{ph}^{\min} \\ -\mathbf{ph}(1) \geq -\mathbf{ph}^{\max} \\ \mathbf{v}(1) \geq \mathbf{v}^{\min} \\ -\mathbf{v}(1) \geq -\mathbf{v}^{\max} \\ \mathbf{q}(1) \geq \mathbf{q}^{\min} \\ -\mathbf{q}(1) \geq -\mathbf{q}^{\max} \\ \mathbf{u}(1) \geq 0 \\ \mathbf{y}(1) \geq 0 \\ \\ \mathbf{ph}(2) - \text{diag}(\eta)\mathbf{q}(2) = -\mathbf{d} \\ \mathbf{A}_v\mathbf{v}(2) + \mathbf{A}_s\mathbf{q}(2) + \mathbf{A}_s\mathbf{u}(2) = \tilde{\mathbf{r}}(2) \\ -\tilde{\mathbf{B}}\tilde{\theta}(2) + \tilde{\mathbf{G}}\mathbf{ph}(2) + \mathbf{y}(2) = \mathbf{pd} \\ -\widehat{\mathbf{M}}\tilde{\theta}(2) \geq -\mathbf{f}^{\max} \\ \widehat{\mathbf{M}}\tilde{\theta}(2) \geq \mathbf{f}^{\min} \\ \mathbf{ph}(2) \geq \mathbf{ph}^{\min} \\ -\mathbf{ph}(2) \geq -\mathbf{ph}^{\max} \\ \mathbf{v}(2) \geq \mathbf{v}^{\min} \\ -\mathbf{v}(2) \geq -\mathbf{v}^{\max} \\ \mathbf{q}(2) \geq \mathbf{q}^{\min} \\ -\mathbf{q}(2) \geq -\mathbf{q}^{\max} \\ \mathbf{u}(2) \geq 0 \\ \mathbf{y}(2) \geq 0 \end{array} \right. \quad (3.33)$$

No despacho centralizado mostrado em (3.33), o operador do sistema busca minimizar o montante de complementação térmica durante o período de planejamento, sendo que esta é a modelagem do problema para a primeira janela de um conjunto de 2 janelas deslizantes.

Para efetuar a simulação com a segunda (e última) janela, os valores de v_0 são atualizados de acordo com os valores médios obtidos no primeiro período da primeira janela. São alterados também os valores das vazões afluentes, $r_{j,t}(\omega)$, correspondendo a outro conjunto de cenários considerados, segundo o conceito da janela deslizante.

A formulação para modelo de despacho descentralizado (3.12) com consistência de preços, para os $H = 2$ produtores, $T = 2$ períodos de tempo e $N_\omega = 2$ cenários é apresentada em (3.34), onde é considerado que as metas de volume das usinas consistem em manter o nível dos reservatórios ao final do período de planejamento próximos aos valores iniciais, ou seja, $v^{sp} = v_0$.

$$\min_{\tau(\omega)} z = \frac{1}{2} \cdot 0,5[(v_{1,2}(1) - 10000)^2 + (v_{2,2}(1) - 9000)^2] \\ + \frac{1}{2} \cdot 0,5[(v_{1,2}(2) - 10000)^2 + (v_{2,2}(2) - 9000)^2]$$

s.a:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} Of_{1,1}(1) \\ Of_{2,1}(1) \\ Of_{1,2}(1) \\ Of_{2,2}(1) \\ Of_{1,1}(2) \\ Of_{2,1}(2) \\ Of_{1,2}(2) \\ Of_{2,2}(2) \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} 13,80 \\ 6,40 \\ 13,80 \\ 6,40 \\ 13,80 \\ 6,40 \\ 13,80 \\ 6,40 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} Of_{1,1}(1) \\ Of_{2,1}(1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Of_{1,1}(2) \\ Of_{2,1}(2) \end{bmatrix}$$

Equação (3.32)

 $\tau(\omega)$ resolve,

$$P(1) \left\{ \begin{array}{l} \min_{\tau(1)} f = 0,5[y_{1,1}(1) + y_{2,1}(1) + y_{1,2}(1)y_{2,2}(1)] \\ \text{s.a:} \\ \mathbf{ph}(1) - \mathbf{diag}(\eta)\mathbf{q}(1) = -\mathbf{d} \\ \mathbf{A}_v\mathbf{v}(1) + \mathbf{A}_s\mathbf{q}(1) + \mathbf{A}_u\mathbf{u}(1) = \tilde{\mathbf{r}}(1) \\ -\tilde{\mathbf{B}}\tilde{\theta}(1) + \tilde{\mathbf{G}}\mathbf{ph}(1) + \mathbf{y}(1) = \mathbf{pd} \\ -\widehat{\mathbf{M}}\tilde{\theta}(1) \geq -\mathbf{f}^{\max} \\ \widehat{\mathbf{M}}\tilde{\theta}(1) \geq \mathbf{f}^{\min} \\ \mathbf{ph}(1) \geq \mathbf{ph}^{\min} \\ -\mathbf{ph}(1) \geq -\mathbf{Of}(1) \\ \mathbf{v}(1) \geq \mathbf{v}^{\min} \\ -\mathbf{v}(1) \geq -\mathbf{v}^{\max} \\ \mathbf{q}(1) \geq \mathbf{q}^{\min} \\ -\mathbf{q}(1) \geq -\mathbf{q}^{\max} \\ \mathbf{u}(1) \geq 0 \\ \mathbf{y}(1) \geq 0 \end{array} \right. \quad (3.34)$$

$$P(2) \left\{ \begin{array}{l} \min_{\tau(2)} f = 0,5[y_{1,1}(2) + y_{2,1}(2) + y_{1,2}(2) + y_{2,2}(2)] \\ \text{s.a:} \\ \mathbf{ph}(2) - \mathbf{diag}(\eta)\mathbf{q}(2) = -\mathbf{d} \\ \mathbf{A}_v\mathbf{v}(2) + \mathbf{A}_s\mathbf{q}(2) + \mathbf{A}_u\mathbf{u}(2) = \tilde{\mathbf{r}}(2) \\ -\tilde{\mathbf{B}}\tilde{\theta}(2) + \tilde{\mathbf{G}}\mathbf{ph}(2) + \mathbf{y}(2) = \mathbf{pd} \\ -\widehat{\mathbf{M}}\tilde{\theta}(2) \geq -\mathbf{f}^{\max} \\ \widehat{\mathbf{M}}\tilde{\theta}(2) \geq \mathbf{f}^{\min} \\ \mathbf{ph}(2) \geq \mathbf{ph}^{\min} \\ -\mathbf{ph}(2) \geq -\mathbf{Of}(2) \\ \mathbf{v}(2) \geq \mathbf{v}^{\min} \\ -\mathbf{v}(2) \geq -\mathbf{v}^{\max} \\ \mathbf{q}(2) \geq \mathbf{q}^{\min} \\ -\mathbf{q}(2) \geq -\mathbf{q}^{\max} \\ \mathbf{u}(2) \geq 0 \\ \mathbf{y}(2) \geq 0 \end{array} \right.$$

O mesmo conceito de janela deslizante é aplicado na resolução do problema de despacho descentralizado (3.34), sendo que esta é a modelagem do problema para a primeira janela de um conjunto de 2 janelas deslizantes.

Para a simulação com a segunda (e última) janela, os valores de v_0 são atualizados de acordo com os valores médios obtidos no primeiro período da primeira janela. São alterados também os valores das vazões afluentes, $r_{i,t}(\omega)$, correspondendo a outro conjunto de cenários considerados.

Tanto no despacho centralizado como no despacho descentralizado, a solução final corresponde à média das T janelas deslizantes.

3.6 Conclusões

Foi abordada neste capítulo a formulação matemática do problema de despacho descentralizado. Mostrou-se que esse problema pode ser visto como um jogo multi-líder-seguidor-comum e que suas soluções são pontos de equilíbrio de Nash.

Verificamos ainda que na solução do problema de otimização de cada produtor (MPEC) podem ser obtidos multiplicadores de Lagrange associados ao nível inferior distintos dos encontrados na solução dos problemas dos outros produtores, o que resulta em muitas soluções de equilíbrio. Uma alternativa para fazer com que tais multiplicadores de Lagrange sejam iguais é forçar que as funções objetivo dos produtores sejam iguais.

Ao final do capítulo, um pequeno exemplo foi apresentado para uma melhor compreensão de como é feita a modelagem dos despachos centralizado e descentralizado por consistência de preço.

O método de solução utilizado para resolver o problema de despacho descentralizado será apresentado no próximo capítulo.

4 ESTRATÉGIA DE SOLUÇÃO

4.1 Introdução

Conforme vimos no capítulo anterior, o problema de despacho descentralizado é modelado através de um problemas de otimização com dois níveis, onde no nível superior estão representados os objetivos dos produtores e no nível inferior o objetivo do operador do sistema.

Neste capítulo abordaremos as propriedades dos problemas de otimização em dois níveis e o método de solução utilizado para resolver o problema de despacho descentralizado.

4.2 Interpretação do Modelo Otimização em Dois Níveis

Na indústria de energia elétrica, assim como em muitas outras áreas, os interesses dos diversos agentes envolvidos devem ser considerados na tomada de decisão e na operação ótima do sistema como um todo. Este fator exige que novas ferramentas de otimização sejam utilizadas para lidar com problemas que apresentem mais de uma função objetivo, onde os problemas de otimização clássicos não são adequados.

No capítulo anterior abordamos o problema de despacho descentralizado formulado como um problema de dois níveis com duas funções objetivo, uma atendendo aos interesses dos produtores e outra os interesses do operador do sistema, onde a decisão é tomada de forma hierárquica e sob condições de conflito entre os agentes geradores envolvidos. Vimos que o problema de cada agente gerador é representado como um Problema Matemático com Restrições de Equilíbrio (MPECs), onde as variáveis de decisão devem satisfazer alguma condição de equilíbrio. Já a solução de equilíbrio do despacho descentralizado é encontrada pela resolução simultânea dos problemas de dois níveis referentes a cada produtor (MPECs), formando assim um Problema de Equilíbrio com Restrições de Equilíbrio (EPEC). Contudo, ao considerar consistência de preços, o EPEC se reduz a um único problema de dois níveis, formulado como um MPEC.

Dessa forma, tanto a resolução do problema de cada produtor, como a resolução do despacho descentralizado com consistência de preços, envolvem a resolução de um problema de dois níveis (MPEC), que será abordada na sequência.

4.3 Métodos de Solução do Problema de Otimização com Dois Níveis

O estímulo ao desenvolvimento e utilização de problemas de otimização em dois níveis ocorreu devido à vantagem destes programas na modelagem matemática de processos de decisão hierárquica e projetos de engenharia. Por se tratar de problemas de difícil solução, os primeiros estudos concentravam-se nos casos mais simples, tais como os modelos lineares. Posteriormente foram estudados modelos mais complexos, que envolviam variáveis discretas, problemas não-lineares e problemas com restrições de equilíbrio [40]. Desde então, significativos trabalhos têm sido desenvolvidos para compreender os conceitos fundamentais associados aos problemas multinível e suas aplicações.

Conforme vimos anteriormente, o problema de despacho descentralizado com consistência de preços (MPEC) é formado por um problema de otimização não linear no nível superior, restrito por N_ω problemas lineares no nível inferior, os quais correspondem aos objetivos dos produtores e do operador do sistema, respectivamente.

Os algoritmos atualmente empregados para resolver os problemas não lineares de dois níveis que apresentam respostas satisfatórias dividem-se em três categorias [42]:

1. Os que substituem as condições de otimalidade do problema de nível inferior como restrições do problema de nível superior, resultando em um problema de otimização não-convexo com um único nível.
2. Os que usam dupla-penalidade para aproximar os dois níveis por uma sequência de problemas de otimização irrestritos das funções objetivos aumentadas e penalizadas.
3. Os que usam métodos de descida para o problema de nível superior com informações sobre o gradiente do nível inferior.

O interesse neste trabalho fica restrito ao primeiro método, o qual será utilizado na solução do despacho descentralizado proposto. A linearidade dos problemas de nível inferior $P(\omega)$ permite que os mesmos possam ser resolvidos analiticamente.

Todo o problema de programação matemática, definido como *problema primal*, está associado a outro problema, chamado de *problema dual*. Sob certas suposições esses problemas possuem, na solução ótima, o mesmo valor de função objetivo (condição de dualidade forte)

[43]. Como $P(\omega)$ é linear, sua solução deve respeitar: suas restrições, as restrições do seu problema dual e a condição de dualidade forte.

Resolver analiticamente $P(\omega)$ é equivalente a indicar as condições que sua solução ótima deve respeitar, que foram indicadas anteriormente. Esta formulação é equivalente às condições de otimalidade de Karush-Kuhn-Tucker (KKT), mas tem a vantagem de não apresentar restrições de complementariedade, que são de difícil solução. Assim, o modelo de otimização original em dois níveis que está na forma:

$$\begin{aligned} & \min (\text{função objetivo do nível superior: } F(x,y)) \\ & \text{sujeito a que:} \\ & x \text{ e } y \text{ respeitem as restrições do problema de nível superior e:} \\ & y = \arg \left\{ \begin{array}{l} \min_y (\text{função objetivo do problema de nível inferior: } f(y)) \\ \text{sujeito a que:} \\ x \text{ e } y \text{ respeitem restrições do problema de nível inferior,} \end{array} \right. \end{aligned}$$

passa a ser formulado como um problema de apenas um nível, conforme:

$$\begin{aligned} & \min_x (\text{função objetivo do nível superior: } F(x,y)) \\ & \text{sujeito a que:} \\ & x \text{ e } y \text{ respeitem as restrições do problema de nível superior e:} \\ & y \text{ respeite } \left\{ \begin{array}{l} \text{a condição de dualidade forte} \\ \text{as restrições do problema de nível inferior (primal)} \\ \text{as restrições do dual do nível inferior} \end{array} \right. \end{aligned}$$

A seguir a metodologia é detalhada para o problema em estudo.

4.4 Solução do Despacho Descentralizado com Consistência de Preços

O despacho descentralizado com consistência de preços é formulado como o problema de otimização em dois níveis (3.12). Sendo o problema de nível inferior linear, o mesmo pode ser resolvido analiticamente, fazendo com que o problema de otimização de dois níveis possa ser representado como um problema de otimização de apenas um nível, conforme veremos na sequência.

4.4.1 Solução Analítica do Problema de Nível Inferior

Para tornar o problema de dois níveis em um problema de otimização de um único nível, devemos derivar as condições de otimalidade para todos os problemas de nível inferior. Inicialmente, para cada cenário ω definiremos os multiplicadores de Lagrange para cada restrição problema $P(\omega)$, conforme (4.1).

$$\begin{aligned}
\min f &= \pi(\omega) \mathbf{e}' \mathbf{y}(\omega) \\
\text{sujeito a:} \\
\mathbf{ph}(\omega) - \mathbf{diag}(\eta) \mathbf{q}(\omega) &= -\mathbf{d} && : \boldsymbol{\beta}(\omega) \\
\mathbf{A}_v \mathbf{v}(\omega) + \mathbf{A}_s \mathbf{q}(\omega) + \mathbf{A}_s \mathbf{u}(\omega) &= \tilde{\mathbf{r}}(\omega) && : \boldsymbol{\alpha}(\omega) \\
-\tilde{\mathbf{B}}\tilde{\boldsymbol{\theta}}(\omega) + \tilde{\mathbf{G}}\mathbf{ph}(\omega) + \mathbf{y}(\omega) &= \mathbf{pd} && : \boldsymbol{\lambda}(\omega) \\
\widehat{\mathbf{M}}\tilde{\boldsymbol{\theta}}(\omega) &\geq \mathbf{f}^{\min} && : \boldsymbol{\pi}^{\min}(\omega) \\
-\widehat{\mathbf{M}}\tilde{\boldsymbol{\theta}}(\omega) &\geq -\mathbf{f}^{\max} && : \boldsymbol{\pi}^{\max}(\omega) \\
\mathbf{ph}(\omega) &\geq \mathbf{ph}^{\min} && : \boldsymbol{\gamma}^{\min}(\omega) \\
-\mathbf{ph}(\omega) &\geq -\mathbf{Of}(\omega) && : \boldsymbol{\gamma}^{\max}(\omega) \\
\mathbf{v}(\omega) &\geq \mathbf{v}^{\min} && : \boldsymbol{\rho}^{\min}(\omega) \\
-\mathbf{v}(\omega) &\geq -\mathbf{v}^{\max} && : \boldsymbol{\rho}^{\max}(\omega) \\
\mathbf{q}(\omega) &\geq \mathbf{q}^{\min} && : \boldsymbol{\sigma}^{\min}(\omega) \\
-\mathbf{q}(\omega) &\geq -\mathbf{q}^{\max} && : \boldsymbol{\sigma}^{\max}(\omega) \\
\mathbf{u}(\omega) &\geq 0 && : \boldsymbol{\kappa}^{\min}(\omega) \\
\mathbf{y}(\omega) &\geq 0 && : \boldsymbol{\zeta}^{\min}(\omega)
\end{aligned} \tag{4.1}$$

O problema dual de $P(\omega)$ é definido como sendo:

$$\begin{aligned}
\max_{\boldsymbol{\psi}(\omega)} D(\omega) \\
\text{s. a: } \boldsymbol{\psi}(\omega) \in S
\end{aligned} \tag{4.2}$$

sendo $D(\omega)$ a função dual, S uma região viável e

$$\boldsymbol{\psi}(\omega) = [\boldsymbol{\alpha}(\omega), \boldsymbol{\beta}(\omega), \boldsymbol{\lambda}(\omega), \boldsymbol{\pi}^{\max}(\omega), \boldsymbol{\pi}^{\min}(\omega), \boldsymbol{\gamma}^{\max}(\omega), \boldsymbol{\gamma}^{\min}(\omega), \boldsymbol{\rho}^{\max}(\omega), \boldsymbol{\rho}^{\min}(\omega), \boldsymbol{\sigma}^{\max}(\omega), \boldsymbol{\sigma}^{\min}(\omega)]'$$

A função dual é definida como:

$$D(\omega) = \min_{\boldsymbol{\tau}(\omega)} \mathcal{L}(\boldsymbol{\tau}(\omega), \boldsymbol{\psi}(\omega)) \tag{4.3}$$

sendo $\boldsymbol{\tau}(\boldsymbol{\omega})$ o vetor de variáveis primais de $P(\boldsymbol{\omega})$ e $\mathcal{L}(\boldsymbol{\tau}(\boldsymbol{\omega}), \boldsymbol{\psi}(\boldsymbol{\omega}))$ o Lagrangeano de $P(\boldsymbol{\omega})$.

O Lagrangeano do problema de nível inferior (4.1) é montado conforme Equação (4.4).

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}(\boldsymbol{\tau}(\boldsymbol{\omega}), \boldsymbol{\psi}(\boldsymbol{\omega})) &= \boldsymbol{\pi}(\boldsymbol{\omega})\mathbf{e}'\mathbf{y}(\boldsymbol{\omega}) - \boldsymbol{\beta}(\boldsymbol{\omega})'[\mathbf{ph}(\boldsymbol{\omega}) - \mathbf{diag}(\boldsymbol{\eta}) \cdot \mathbf{q}(\boldsymbol{\omega}) + \mathbf{d}] \\
 &- \boldsymbol{\alpha}(\boldsymbol{\omega})' \{ \mathbf{A}_v \cdot \mathbf{v}(\boldsymbol{\omega}) + \mathbf{A}_s[\mathbf{q}(\boldsymbol{\omega}) + \mathbf{u}(\boldsymbol{\omega})] - \tilde{\mathbf{r}}(\boldsymbol{\omega}) \} - \boldsymbol{\lambda}(\boldsymbol{\omega})' [-\tilde{\mathbf{B}}\tilde{\boldsymbol{\theta}}(\boldsymbol{\omega}) \\
 &+ \tilde{\mathbf{G}}\mathbf{ph}(\boldsymbol{\omega}) + \mathbf{y}(\boldsymbol{\omega}) - \mathbf{pd}] - \boldsymbol{\pi}^{\min'}(\boldsymbol{\omega})[\widehat{\mathbf{M}}\tilde{\boldsymbol{\theta}}(\boldsymbol{\omega}) - \mathbf{f}^{\min}] \\
 &- \boldsymbol{\pi}^{\max'}(\boldsymbol{\omega})[-\widehat{\mathbf{M}}\tilde{\boldsymbol{\theta}}(\boldsymbol{\omega}) + \mathbf{f}^{\max}] - \boldsymbol{\gamma}^{\min'}(\boldsymbol{\omega})[\mathbf{ph}(\boldsymbol{\omega}) - \mathbf{ph}^{\min}] \\
 &- \boldsymbol{\gamma}^{\max'}(\boldsymbol{\omega})[-\mathbf{ph}(\boldsymbol{\omega}) + \mathbf{Of}(\boldsymbol{\omega})] - \boldsymbol{\rho}^{\min'}(\boldsymbol{\omega})[\mathbf{v}(\boldsymbol{\omega}) - \mathbf{v}^{\min}] \\
 &- \boldsymbol{\rho}^{\max'}(\boldsymbol{\omega})[-\mathbf{v}(\boldsymbol{\omega}) + \mathbf{v}^{\max}] - \boldsymbol{\sigma}^{\min'}(\boldsymbol{\omega})[\mathbf{q}(\boldsymbol{\omega}) - \mathbf{q}^{\min}] \\
 &- \boldsymbol{\sigma}^{\max'}(\boldsymbol{\omega})[-\mathbf{q}(\boldsymbol{\omega}) + \mathbf{q}^{\max}] - \boldsymbol{\kappa}^{\min'}(\boldsymbol{\omega})\mathbf{u}(\boldsymbol{\omega}) - \boldsymbol{\zeta}^{\min'}(\boldsymbol{\omega})\mathbf{y}(\boldsymbol{\omega})
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

Ou ainda,

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}(\boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\psi}) &= [-\boldsymbol{\alpha}'\mathbf{A}_v + \boldsymbol{\rho}^{\max'} - \boldsymbol{\rho}^{\min'}]\mathbf{v} + [-\boldsymbol{\alpha}'\mathbf{A}_s + \boldsymbol{\beta}'\mathbf{diag}(\boldsymbol{\eta}) + \boldsymbol{\sigma}^{\max'} \\
 &- \boldsymbol{\sigma}^{\min'}]\mathbf{q} + [-\boldsymbol{\alpha}'\mathbf{A}_s - \boldsymbol{\kappa}^{\min'}]\mathbf{u} + [\boldsymbol{\beta}' - \boldsymbol{\lambda}'\tilde{\mathbf{G}} + \boldsymbol{\gamma}^{\max'} - \boldsymbol{\gamma}^{\min'}]\mathbf{ph} + [-\boldsymbol{\pi}\mathbf{e}' \\
 &- \boldsymbol{\lambda}' - \boldsymbol{\zeta}^{\min'}]\mathbf{y} + [\boldsymbol{\pi}^{\max'}\widehat{\mathbf{M}} - \boldsymbol{\pi}^{\min'}\widehat{\mathbf{M}} + \boldsymbol{\lambda}\tilde{\mathbf{B}}]\tilde{\boldsymbol{\theta}} + \boldsymbol{\alpha}'\tilde{\mathbf{r}} - \boldsymbol{\beta}'\mathbf{d} + \boldsymbol{\lambda}'\mathbf{pd} \\
 &+ \boldsymbol{\pi}^{\min'}\mathbf{f}^{\min} - \boldsymbol{\pi}^{\max'}\mathbf{f}^{\max} + \boldsymbol{\gamma}^{\min'}\mathbf{ph}^{\min} - \boldsymbol{\gamma}^{\max'}\mathbf{Of}(\boldsymbol{\omega}) + \boldsymbol{\rho}^{\min'}(\boldsymbol{\omega})\mathbf{v}^{\min} \\
 &- \boldsymbol{\rho}^{\max'}(\boldsymbol{\omega})\mathbf{v}^{\max} + \boldsymbol{\sigma}^{\min'}\mathbf{q}^{\min} - \boldsymbol{\sigma}^{\max'}\mathbf{q}^{\max}
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

Note que, no ponto de mínimo do Lagrangeano em $\boldsymbol{\psi}(\boldsymbol{\omega})$, os seis primeiros termos de (4.5) se anulam. Portanto, a função dual é:

$$\begin{aligned}
 D &= \boldsymbol{\alpha}'\tilde{\mathbf{r}} - \boldsymbol{\beta}'\mathbf{d} + \boldsymbol{\lambda}'\mathbf{pd} + \boldsymbol{\pi}^{\min'}\mathbf{f}^{\min} - \boldsymbol{\pi}^{\max'}\mathbf{f}^{\max} + \boldsymbol{\gamma}^{\min'}\mathbf{ph}^{\min} \\
 &- \boldsymbol{\gamma}^{\max'}\mathbf{Of}(\boldsymbol{\omega}) + \boldsymbol{\rho}^{\min'}(\boldsymbol{\omega})\mathbf{v}^{\min} - \boldsymbol{\rho}^{\max'}(\boldsymbol{\omega})\mathbf{v}^{\max} + \boldsymbol{\sigma}^{\min'}\mathbf{q}^{\min} - \boldsymbol{\sigma}^{\max'}\mathbf{q}^{\max}
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

Note ainda que, no ponto de mínimo de $\mathcal{L}(\boldsymbol{\tau}(\boldsymbol{\omega}), \boldsymbol{\psi}(\boldsymbol{\omega}))$ as seguintes condições devem ser satisfeitas:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mathbf{v}(\boldsymbol{\omega})} = -\mathbf{A}'_v\boldsymbol{\alpha}(\boldsymbol{\omega}) + \boldsymbol{\rho}^{\max'}(\boldsymbol{\omega}) - \boldsymbol{\rho}^{\min'}(\boldsymbol{\omega}) = 0 \tag{4.7}$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mathbf{q}(\boldsymbol{\omega})} = -\mathbf{A}'_s\boldsymbol{\alpha}(\boldsymbol{\omega}) + \mathbf{diag}(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{\beta}^{\max'}(\boldsymbol{\omega}) + \boldsymbol{\sigma}^{\max'}(\boldsymbol{\omega}) - \boldsymbol{\sigma}^{\min'}(\boldsymbol{\omega}) = 0 \tag{4.8}$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mathbf{u}(\omega)} = -\mathbf{A}'_s \boldsymbol{\alpha}(\omega) - \boldsymbol{\kappa}^{\min}(\omega) = 0 \quad (4.9)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mathbf{ph}(\omega)} = -\boldsymbol{\beta}'(\omega) - \tilde{\mathbf{G}}' \boldsymbol{\lambda}(\omega) + \boldsymbol{\gamma}^{\max}(\omega) - \boldsymbol{\gamma}^{\min}(\omega) = 0 \quad (4.10)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mathbf{y}(\omega)} = \boldsymbol{\pi}(\omega) \mathbf{e} - \boldsymbol{\lambda}(\omega) - \boldsymbol{\zeta}^{\min}(\omega) = 0 \quad (4.11)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \boldsymbol{\theta}(\omega)} = \tilde{\mathbf{B}}' \boldsymbol{\lambda}(\omega) + \widehat{\mathbf{M}}' \boldsymbol{\pi}^{\max}(\omega) - \widehat{\mathbf{M}}' \boldsymbol{\pi}^{\min}(\omega) = 0 \quad (4.12)$$

sendo $\boldsymbol{\pi}^{\min}(\omega)$, $\boldsymbol{\pi}^{\max}(\omega)$, \dots , $\boldsymbol{\zeta}^{\min}(\omega) \geq 0$

Como $\boldsymbol{\kappa}^{\min}(\omega) \geq 0$, a Equação (4.9) pode ser reescrita como:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mathbf{u}(\omega)} = -\mathbf{A}'_s \boldsymbol{\alpha}(\omega) \geq 0 \quad (4.13)$$

Da mesma forma, como $\boldsymbol{\zeta}^{\min}(\omega) \geq 0$, a Equação (4.11) pode ser expressa como:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mathbf{y}(\omega)} = \boldsymbol{\pi}(\omega) \mathbf{e} - \boldsymbol{\lambda}(\omega) \geq 0 \quad (4.14)$$

Observe que as condições (4.7),(4.8), (4.10), (4.12), (4.13) e (4.14) devem ser satisfeitas para que $D(\omega)$ seja expressa por (4.6). Portanto, o problema dual de (4.1) pode ser expresso para cada cenário ω , por:

$$\max_{\psi(\omega)} \quad [\bar{\mathbf{r}}', -\mathbf{d}, \mathbf{pd} - \mathbf{f}^{\max}, \mathbf{f}^{\min}, -\mathbf{O}\mathbf{f}(\omega), \mathbf{ph}^{\min}, -\mathbf{v}^{\max}, \mathbf{v}^{\min}, -\mathbf{q}^{\max}, \mathbf{q}^{\min}]' \boldsymbol{\psi}(\omega)$$

s.a:

$$-\boldsymbol{\beta}'(\omega) - \tilde{\mathbf{G}}' \boldsymbol{\lambda}(\omega) + \boldsymbol{\gamma}^{\max}(\omega) - \boldsymbol{\gamma}^{\min}(\omega) = 0$$

$$-\boldsymbol{\lambda}(\omega) \geq -\boldsymbol{\pi}(\omega) \mathbf{e}$$

$$\tilde{\mathbf{B}}' \boldsymbol{\lambda}(\omega) + \widehat{\mathbf{M}}' \boldsymbol{\pi}^{\max}(\omega) - \widehat{\mathbf{M}}' \boldsymbol{\pi}^{\min}(\omega) = 0$$

$$-\mathbf{A}'_v \boldsymbol{\alpha}(\omega) + \boldsymbol{\rho}^{\max}(\omega) - \boldsymbol{\rho}^{\min}(\omega) = 0$$

$$-\mathbf{A}'_s \boldsymbol{\alpha}(\omega) + \mathbf{diag}(\eta) \boldsymbol{\beta}^{\max}(\omega) + \boldsymbol{\sigma}^{\max}(\omega) - \boldsymbol{\sigma}^{\min}(\omega) = 0$$

$$-\mathbf{A}'_s \boldsymbol{\alpha}(\omega) \geq 0$$

$$\boldsymbol{\pi}^{\max}(\omega), \boldsymbol{\pi}^{\min}(\omega), \boldsymbol{\gamma}^{\max}(\omega), \boldsymbol{\gamma}^{\min}(\omega), \boldsymbol{\rho}^{\max}(\omega), \boldsymbol{\rho}^{\min}(\omega) \geq 0$$

$$\boldsymbol{\sigma}^{\max}(\omega), \boldsymbol{\sigma}^{\min}(\omega) \geq 0$$

(4.15)

A condição de dualidade forte determina que, no ponto ótimo,

os valores das funções objetivo do primal e do dual devem ser iguais. Assim, para cada cenário ω :

$$\begin{aligned}
 & \boldsymbol{\pi}(\omega) \mathbf{e}' \mathbf{y}(\omega) - [\tilde{\mathbf{r}}' \boldsymbol{\alpha}(\omega) - \mathbf{d}' \boldsymbol{\beta}(\omega) + \mathbf{p} \mathbf{b}' \boldsymbol{\lambda}(\omega) - \mathbf{f}^{\max'} \boldsymbol{\pi}^{\max}(\omega) \\
 & + \mathbf{f}^{\min'} \boldsymbol{\pi}^{\min}(\omega) - \mathbf{O} \mathbf{f}'(\omega) \boldsymbol{\gamma}^{\max}(\omega) + \mathbf{p} \mathbf{h}^{\min'} \boldsymbol{\gamma}^{\min}(\omega) - \mathbf{v}^{\max'} \boldsymbol{\rho}^{\max}(\omega) \\
 & + \mathbf{v}^{\min'} \boldsymbol{\rho}^{\min}(\omega) - \mathbf{q}^{\max'} \boldsymbol{\sigma}^{\max}(\omega) + \mathbf{q}^{\min'} \boldsymbol{\sigma}^{\min}(\omega)] = 0
 \end{aligned} \tag{4.16}$$

4.4.2 Problema de um Único Nível

Agregando as condições de otimalidade do problema linear do nível inferior no problema de otimização de dois níveis, para $\omega = 1, \dots, N_\omega$, o problema de despacho descentralizado com consistência de preço é reformulado conforme (4.17):

$$\min_{Of_{i,t}(\omega), \tau(\omega)} z_i = \frac{1}{2} \sum_{\omega=1}^{N_\omega} \pi(\omega) \sum_{i=1}^H (v_{i,T}(\omega) - v_i^{sp})^2$$

s.a:

$$\left. \begin{array}{l} Of_{i,1}(1) = Of_{i,1}(2) = \dots = Of_{i,1}(N_\omega) \\ ph_{i,1}(1) = ph_{i,1}(2) = \dots = ph_{i,1}(N_\omega) \\ v_{i,1}(1) = v_{i,1}(2) = \dots = v_{i,1}(N_\omega) \\ q_{i,1}(1) = q_{i,1}(2) = \dots = q_{i,1}(N_\omega) \\ u_{i,1}(1) = u_{i,1}(2) = \dots = u_{i,1}(N_\omega) \\ \hat{\theta}_{k,1}(1) = \hat{\theta}_{k,1}(2) = \dots = \hat{\theta}_{k,1}(N_\omega) \\ y_{k,1}(1) = y_{k,1}(2) = \dots = y_{k,1}(N_\omega) \end{array} \right\} \begin{array}{l} i = 1, \dots, H. \\ k = 1, \dots, N_b. \end{array}$$

$$\mathbf{ph}^{\min} \leq \mathbf{Of}(\omega) \leq \mathbf{ph}^{\max}$$

$$\begin{aligned} & \mathbf{e}' \mathbf{y}(\omega) - [\mathbf{r}' \boldsymbol{\alpha}(\omega) - \mathbf{d}' \boldsymbol{\beta}(\omega) + \mathbf{pb}' \boldsymbol{\lambda}(\omega) - \mathbf{f}^{\max'} \boldsymbol{\pi}^{\max}(\omega) \\ & + \mathbf{f}^{\min'} \boldsymbol{\pi}^{\min}(\omega) - \mathbf{Of}'(\omega) \boldsymbol{\gamma}^{\max}(\omega) + \mathbf{ph}^{\min'} \boldsymbol{\gamma}^{\min}(\omega) \\ & - \mathbf{v}^{\max'} \boldsymbol{\rho}^{\max}(\omega) + \mathbf{v}^{\min'} \boldsymbol{\rho}^{\min}(\omega) \\ & - \mathbf{q}^{\max'} \boldsymbol{\sigma}^{\max}(\omega) + \mathbf{q}^{\min'} \boldsymbol{\sigma}^{\min}(\omega)] = 0 \end{aligned}$$

$$\mathbf{ph}(\omega) - \mathbf{diag}(\eta) \mathbf{q}(\omega) = -\mathbf{d}$$

$$\mathbf{A}_v \mathbf{v}(\omega) + \mathbf{A}_s \mathbf{q}(\omega) + \mathbf{A}_u \mathbf{u}(\omega) = \tilde{\mathbf{r}}(\omega)$$

$$-\tilde{\mathbf{B}} \tilde{\boldsymbol{\theta}}(\omega) + \tilde{\mathbf{G}} \mathbf{ph}(\omega) + \mathbf{y}(\omega) = \mathbf{pd}$$

$$-\widehat{\mathbf{M}} \tilde{\boldsymbol{\theta}}(\omega) \geq -\mathbf{f}^{\max}$$

$$\widehat{\mathbf{M}} \tilde{\boldsymbol{\theta}}(\omega) \geq \mathbf{f}^{\min}$$

$$\mathbf{ph}(\omega) \geq \mathbf{ph}^{\min}$$

$$-\mathbf{ph}(\omega) \geq -\mathbf{Of}(\omega)$$

$$\mathbf{v}(\omega) \geq \mathbf{v}^{\min}$$

$$-\mathbf{v}(\omega) \geq -\mathbf{v}^{\max}$$

$$\mathbf{q}(\omega) \geq \mathbf{q}^{\min}$$

$$-\mathbf{q}(\omega) \geq -\mathbf{q}^{\max}$$

$$\mathbf{u}(\omega) \geq 0$$

$$\mathbf{y}(\omega) \geq 0$$

$$-\boldsymbol{\beta}'(\omega) - \tilde{\mathbf{G}}' \boldsymbol{\lambda}(\omega) + \boldsymbol{\gamma}^{\max}(\omega) - \boldsymbol{\gamma}^{\min}(\omega) = 0$$

$$-\boldsymbol{\lambda}(\omega) \geq -\mathbf{e}$$

$$\tilde{\mathbf{B}}' \boldsymbol{\lambda}(\omega) + \widehat{\mathbf{M}}' \boldsymbol{\pi}^{\max}(\omega) - \widehat{\mathbf{M}}' \boldsymbol{\pi}^{\min}(\omega) = 0$$

$$-\mathbf{A}_v' \boldsymbol{\alpha}(\omega) + \boldsymbol{\rho}^{\max}(\omega) - \boldsymbol{\rho}^{\min}(\omega) = 0$$

$$-\mathbf{A}_s' \boldsymbol{\alpha}(\omega) + \mathbf{diag}(\eta) \boldsymbol{\beta}^{\max}(\omega) + \boldsymbol{\sigma}^{\max}(\omega) - \boldsymbol{\sigma}^{\min}(\omega) = 0$$

$$-\mathbf{A}_s' \boldsymbol{\alpha}(\omega) \geq 0$$

$$\boldsymbol{\pi}^{\max}(\omega), \boldsymbol{\pi}^{\min}(\omega), \boldsymbol{\gamma}^{\max}(\omega), \boldsymbol{\gamma}^{\min}(\omega), \boldsymbol{\rho}^{\max}(\omega), \boldsymbol{\rho}^{\min}(\omega) \geq 0$$

$$\boldsymbol{\sigma}^{\max}(\omega), \boldsymbol{\sigma}^{\min}(\omega) \geq 0$$

$\omega = 1, \dots, N_\omega$

(4.17)

Portanto, o problema de despacho descentralizado, formulado como um EPEC, se reduziu a um MPEC (ao considerar uma única função objetivo comum a todos os produtores) e este último foi transformado no problema de otimização de um nível (4.17) ao resolver analiticamente o problema do operador do sistema.

É possível verificar que o despacho descentralizado se reduziu a um problema de otimização de um nível, não-linear e não-convexo devido ao produto $\mathbf{Of}(\omega)' \gamma^{\max}(\omega)$ da condição de dualidade forte (4.16). Consequentemente ele apresenta múltiplas soluções, que podem ser obtidas usando-se diferentes inicializações para as variáveis de decisão.

A resolução do problema pode ser feita com o auxílio de algoritmos de otimização não linear, como o pacote computacional MINOS, adaptado ao ambiente GAMS e utilizado neste trabalho. Deve-se notar que, neste caso, o problema de despacho descentralizado é resolvido simultaneamente para todos os líderes.

É importante salientar que a solução final do despacho descentralizado considera ainda o conceito da janela deslizante, onde um problema (4.17) é resolvido para um horizonte de T meses considerando T janelas de informação de vazões afluentes.

4.5 Solução do Problema de Despacho Descentralizado Geral

Para obter a solução do despacho descentralizado deve-se encontrar um conjunto de ofertas de geração que resolva simultaneamente todos os problemas dos produtores. Para cada produtor j , o problema de otimização de dois níveis (3.4) pode ser transformado em um problema de um nível, semelhante a (4.17).

Substituindo as condições de otimalidade do problema do operador do sistema, no problema (3.4), o problema do produtor j é escrito:

$$\begin{aligned}
\min_{Of_{j,t}(\omega), \tau(\omega)} z_j &= \frac{1}{2} \sum_{\omega=1}^{N_\omega} \pi(\omega) (v_{j,T}(\omega) - v_j^{sp})^2 \\
\text{s.a:} \\
ph_j^{\min} \leq Of_{j,t}(\omega) &\leq ph_j^{\max} \quad \left. \vphantom{ph_j^{\min}} \right\} t = 1, \dots, T, \omega = 1, \dots, N_\omega. \\
ph_{i,1}(1) = ph_{i,1}(2) &= \dots = ph_{i,1}(N_\omega) \\
v_{i,1}(1) = v_{i,1}(2) &= \dots = v_{i,1}(N_\omega) \\
q_{i,1}(1) = q_{i,1}(2) &= \dots = q_{i,1}(N_\omega) \\
u_{i,1}(1) = u_{i,1}(2) &= \dots = u_{i,1}(N_\omega) \quad \left. \vphantom{u_{i,1}(1)} \right\} i = 1, \dots, H. \\
\hat{\theta}_{k,1}(1) = \hat{\theta}_{k,1}(2) &= \dots = \hat{\theta}_{k,1}(N_\omega) \\
y_{k,1}(1) = y_{k,1}(2) &= \dots = y_{k,1}(N_\omega) \quad \left. \vphantom{y_{k,1}(1)} \right\} k = 1, \dots, N_b. \\
Of_{j,1}(1) = Of_{j,1}(2) &= \dots = Of_{j,1}(N_\omega) \\
\mathbf{e}' \mathbf{y}(\omega) - \tilde{\mathbf{r}}' \boldsymbol{\alpha}(\omega) - \mathbf{d}' \boldsymbol{\beta}(\omega) + \mathbf{p} \mathbf{b}' \boldsymbol{\lambda}(\omega) - \mathbf{f}^{\max'} \boldsymbol{\pi}^{\max}(\omega) \\
+ \mathbf{f}^{\min'} \boldsymbol{\pi}^{\min}(\omega) - \mathbf{O} \mathbf{f}'(\omega) \boldsymbol{\gamma}^{\max}(\omega) + \mathbf{p} \mathbf{h}^{\min'} \boldsymbol{\gamma}^{\min}(\omega) \\
- \mathbf{v}^{\max'} \boldsymbol{\rho}^{\max}(\omega) + \mathbf{v}^{\min'} \boldsymbol{\rho}^{\min}(\omega) \\
- \mathbf{q}^{\max'} \boldsymbol{\sigma}^{\max}(\omega) + \mathbf{q}^{\min'} \boldsymbol{\sigma}^{\min}(\omega) = 0 \\
\mathbf{p} \mathbf{h}(\omega) - \mathbf{diag}(\eta) \mathbf{q}(\omega) &= -\mathbf{d} \\
\mathbf{A}_v \mathbf{v}(\omega) + \mathbf{A}_s \mathbf{q}(\omega) + \mathbf{A}_s \mathbf{u}(\omega) &= \tilde{\mathbf{r}}(\omega) \\
-\tilde{\mathbf{B}} \hat{\boldsymbol{\theta}}(\omega) + \tilde{\mathbf{G}} \mathbf{p} \mathbf{h}(\omega) + \mathbf{y}(\omega) &= \mathbf{p} \mathbf{d} \\
-\tilde{\mathbf{M}} \hat{\boldsymbol{\theta}}(\omega) &\geq -\mathbf{f}^{\max} \\
\tilde{\mathbf{M}} \hat{\boldsymbol{\theta}}(\omega) &\geq \mathbf{f}^{\min} \\
\mathbf{p} \mathbf{h}(\omega) &\geq \mathbf{p} \mathbf{h}^{\min} \\
-\mathbf{p} \mathbf{h}(\omega) &\geq -\mathbf{O} \mathbf{f}(\omega) \\
\mathbf{v}(\omega) &\geq \mathbf{v}^{\min} \\
-\mathbf{v}(\omega) &\geq -\mathbf{v}^{\max} \\
\mathbf{q}(\omega) &\geq \mathbf{q}^{\min} \\
-\mathbf{q}(\omega) &\geq -\mathbf{q}^{\max} \\
\mathbf{u}(\omega) &\geq 0 \\
\mathbf{y}(\omega) &\geq 0 \\
-\boldsymbol{\beta}'(\omega) - \tilde{\mathbf{G}}' \boldsymbol{\lambda}(\omega) + \boldsymbol{\gamma}^{\max}(\omega) - \boldsymbol{\gamma}^{\min}(\omega) &= 0 \\
-\boldsymbol{\lambda}(\omega) &\geq -\mathbf{e} \\
\tilde{\mathbf{B}}' \boldsymbol{\lambda}(\omega) + \tilde{\mathbf{M}}' \boldsymbol{\pi}^{\max}(\omega) - \tilde{\mathbf{M}}' \boldsymbol{\pi}^{\min}(\omega) &= 0 \\
-\mathbf{A}_v' \boldsymbol{\alpha}(\omega) + \boldsymbol{\rho}^{\max}(\omega) - \boldsymbol{\rho}^{\min}(\omega) &= 0 \\
-\mathbf{A}_s' \boldsymbol{\alpha}(\omega) + \mathbf{diag}(\eta) \boldsymbol{\beta}^{\max}(\omega) + \boldsymbol{\sigma}^{\max}(\omega) - \boldsymbol{\sigma}^{\min}(\omega) &= 0 \\
-\mathbf{A}_s \boldsymbol{\alpha}(\omega) &\geq 0 \\
\boldsymbol{\pi}^{\max}(\omega), \boldsymbol{\pi}^{\min}(\omega), \boldsymbol{\gamma}^{\max}(\omega), \boldsymbol{\gamma}^{\min}(\omega), \boldsymbol{\rho}^{\max}(\omega), \boldsymbol{\rho}^{\min}(\omega) &\geq 0 \\
\boldsymbol{\sigma}^{\max}(\omega), \boldsymbol{\sigma}^{\min}(\omega) &\geq 0
\end{aligned}
\quad \left. \vphantom{\mathbf{e}' \mathbf{y}(\omega)} \right\} \omega = 1, \dots, N_\omega$$

(4.18)

Deve-se observar as diferenças entre (4.17) e (4.18). Em (4.18), além de $\tau(\omega)$ somente $Of_{j,t}(\omega) \forall t$, e ω são variáveis de otimização e

a função objetivo representa o desvio quadrático do volume final do reservatório do produtor j apenas.

Uma das formas de resolver o conjunto de H problemas (4.18) é adotando um estratégia de diagonalização [44], que se baseia na solução sequencial dos H problemas dos produtores.

O método de diagonalização corresponde a uma sequência de iterações onde cada produtor resolve seu próprio problema de forma cíclica com os demais produtores. Sendo suas ofertas atualizadas em cada iteração, mantendo fixas as dos demais produtores. O processo é descrito pelos seguintes passos [45]:

- (i) Defina um ponto inicial $\mathbf{Of}^{(0)} = (\mathbf{Of}_{1,1}^{(0)}(\omega), \dots, \mathbf{Of}_{H,T}^{(0)}(\omega))$, uma tolerância $\varepsilon \geq 0$, inicie o contador de iterações $it = 0$, com it^{\max} sendo o número máximo de iterações.
- (ii) Na atual iteração $\mathbf{of}^{(it)}$, para $j = 1, \dots, H$: O produtor j resolve (4.18) enquanto mantém fixo $\mathbf{Of}_i = \mathbf{of}_i^{(it)}$ para $i < j$ e $\mathbf{Of}_i = \mathbf{of}_i^{(it-1)}$ para $i > j$.
- (iii) *Testes de convergência:*

- *SE* $\|\mathbf{Of}^{(it)} - \mathbf{Of}^{(it-1)}\| < \varepsilon$, *FIM*: A solução foi encontrada.
- *CASO CONTRÁRIO*
 - *SE* $it < it^{\max}$, faça $it = it + 1$ e retorne ao *passo ii*.
 - *SE* $it = it^{\max}$, *FIM*: Não foi encontrado um ponto de equilíbrio.

Dessa forma, o processo iterativo para encontrar o equilíbrio começa com o primeiro produtor ($j = 1$) maximizando seu benefício individual em (4.18) e atualizando sua oferta $Of_{1,t}^{(1)}(\omega)$, $\forall t, \omega$, com base no comportamento de seus competidores, cujas ofertas são mantidas constantes. Conhecendo a oferta feita pelo produtor 1, o próximo produtor, $j = 2$, resolve seu próprio problema (4.18), e atualiza sua oferta $Of_{2,t}^{(1)}(\omega)$, $\forall t, \omega$. Isso ocorre até o produtor H definir sua oferta $Of_{H,t}^{(1)}(\omega)$, considerando as ofertas já feitas pelos demais produtores (*passo (ii)*).

Ao fim do *passo (ii)*, testa-se a convergência do processo (*passo (iii)*): se os critérios de convergência não são satisfeitos e o número máximo de iterações não foi atingido, novos conjuntos de ofertas serão feitos. Inicia-se novamente pelo produtor $j = 1$ que definirá sua nova oferta $Of_{1,t}^{(2)}(\omega)$ com base nas ofertas feitas pelos $(H - 1)$ produtores

na rodada anterior, e assim sucessivamente até o produtor H definir sua nova oferta $Of_{H,t}^{(2)}(\omega)$. O jogo continua até que os H produtores parem de alterar suas ofertas, ou seja:

$$\left. \begin{array}{l} Of_{1,t}^{(s)}(\omega) \approx Of_{1,t}^{(s-1)}(\omega) \\ Of_{2,t}^{(s)}(\omega) \approx Of_{2,t}^{(s-1)}(\omega) \\ \vdots \\ Of_{H,t}^{(s)}(\omega) \approx Of_{H,t}^{(s-1)}(\omega) \end{array} \right\} \forall t e \omega \quad (4.19)$$

Caso (4.19) não seja satisfeito e o número máximo de iterações tenha sido atingido o processo termina indicando que não foi encontrado um ponto de equilíbrio para o problema.

No *passo (ii)* um algoritmo de otimização não linear é necessário para resolver o problema de otimização de um nível (4.18), onde o pacote computacional MINOS/GAMS também foi utilizado para tal.

Podemos notar que cada produtor possui um problema (4.18) com suas respectivas condições de otimalidade. Como cada produtor possui um objetivo, é possível verificar que existe um conjunto de multiplicadores de Lagrange $\psi(\omega)$, $\forall \omega$ distinto para cada produtor. Isso faz com que o problema apresente um número maior de soluções, se comparado ao problema de despacho com consistência de preços.

O conceito de janela deslizante também é aplicado para se obter a solução do problema, onde para cada janela existe um resultado que corresponde ao Equilíbrio de Nash. Ao final, é realizada uma média dos valores ótimos encontrados em cada uma das janelas deslizantes.

4.6 Conclusões

Foi demonstrado neste capítulo que um problema de otimização em dois níveis pode ser resolvido transformando-o em apenas um único nível. A linearidade do nível inferior permite que as condições de otimalidade do problema sejam expressas pelas restrições dos problemas primal e dual e pelas condições de dualidade forte, que entram como restrições do nível superior.

Vimos também que, considerando consistência de preços, o problema de despacho descentralizado pode ser resolvido simultaneamente para todos os líderes. Isso só é possível quando os produtores concordam em adotar uma função objetivo que é comum a todos, a qual corresponde a minimizar a soma dos desvios quadráticos dos volumes finais de todos os reservatórios em relação aos volumes especificados pelos produtores.

Quando não se impõe consistência de preços, o método de diagonalização deve ser empregado na solução do despacho descentralizado. Contudo, o problema apresenta muito mais soluções que o despacho descentralizado com consistência de preços, o que indica novos possíveis acordos que podem ser alcançados pelos produtores quando os mesmos competem entre si.

Deve-se notar que nem sempre existem pontos de equilíbrio que resolvam o problema de despacho descentralizado devido às interconexões entre as usinas e à rede elétrica. As estratégias de ofertas dos produtores podem ser determinantes na existência de um ponto de equilíbrio.

No próximo capítulo serão apresentados os resultados decorrentes da simulação do problema de despacho descentralizado e suas soluções de equilíbrio, bem como a comparação com os resultados do despacho centralizado, analisando as diferenças entre os modelos.

5 RESULTADOS

5.1 Introdução

Neste capítulo é feita a análise dos resultados obtidos com dois equivalentes do sistema brasileiro: um do sistema CESP com 4 usinas hidrelétricas e 15 barras e outro do sistema SUL com 7 usinas hidrelétricas e 32 barras.

Toda a implementação do modelo de otimização foi desenvolvida em GAMS (*General Algebraic Modeling System*), que permite a utilização de um *solver* (MINOS) para obter as soluções desejadas. Esse *solver* foi utilizado em conjunto com o MATLAB, que faz toda a interface com o usuário na entrada de dados e coleta de resultados obtidos.

São analisados resultados obtidos dos modelos de despacho centralizado e descentralizado com consistência de preços. Ao final do capítulo é feita uma análise comparativa entre as soluções de equilíbrio de Nash e soluções de equilíbrio com consistência de preços.

5.2 O Sistema de Modelagem Algébrica (GAMS)

Linguagens de modelagem estão se tornando cada vez mais importantes para solução de problemas de otimização complexos. Estas linguagens podem gerir eficientemente um grande volume de dados e permitem que o usuário concentre-se na modelagem do problema e não no método de solução.

Uma das linguagens mais flexíveis e cada vez mais popular é o GAMS (*General Algebraic modeling System*), um sistema de modelagem e solução de problemas de programação matemática desenvolvido por Meeraus e Brooke [46]. Atualmente encontra muitas aplicações nas mais diversas áreas de estudo, inclusive sistemas de energia.

Nesta dissertação utilizou-se a versão "GAMS 23.7.3 X32/MS Windows", juntamente com o *solver* MINOS.

O MINOS é um *solver* para otimização não-linear. Desenvolvido pelo *Systems Optimization Laboratory* da Universidade de Stanford, utiliza a técnica do gradiente reduzido para resolver problemas com restrições lineares. Já os problemas com restrições não-lineares são resolvidos com um método que resolve iterativamente subproblemas com restrições linearizadas. Tal esquema iterativo implica que apenas a solução final é viável para os modelos não-lineares [47].

Toda a entrada de dados e tratamento dos resultados foi feita por meio do Matlab, que em conjunto com o GAMS permitiu a separação do algoritmo de otimização da interface com o usuário final.

5.3 Descrição dos estudos

Para os casos analisados, as soluções de despachos centralizado e descentralizado correspondem aos valores médios obtidos por meio do conceito de janela deslizante. Para cada janela de informação, uma média é feita para todos os cenários e ao final do processo, uma outra média é feita com as soluções de cada janela.

Para todos os casos de despacho centralizado e descentralizado por consistência de preços, foi considerado um conjunto de $N_{\omega} = 10$ cenários para cada janela deslizante. As primeiras análises foram feitas para um conjunto de cenários com vazões afluentes críticas, que correspondem aos valores registrados entre os anos de 1946 e 1965. Para as análises posteriores foi considerado outro conjunto de cenários não críticos, com valores registrados entre 1980 e 1999.

Os seguintes aspectos relacionados à operação são analisados:

- Complementação térmica, ou equivalentemente, a função objetivo do problema de segundo nível,
- Desvio padrão médio dos volumes dos reservatórios em relação aos valores especificados, que estão relacionados com a função objetivo do problema do primeiro nível,
- Diferenças entre os valores ofertados e efetivamente fornecidos pelos geradores no despacho descentralizado,
- Diferenças entre as potências fornecidas no despacho centralizado e descentralizado e volume total de água armazenada no final do período de planejamento.

5.4 CESP: D. Centralizado versus D. Descentralizado com Consistência de Preços

Apresentaremos os dados obtidos para o sistema CESP 4H, composto por quatro usinas, das quais 2 estão em cascata no rio Paraná, uma instalada no rio Paranapanema e uma no Rio Grande. O sistema ainda possui 15 barras e 21 linhas, conforme demonstrado na Figura

5.1. Os dados das usinas, as cargas originais nas barras e os parâmetros das linhas são apresentados no Apêndice A, nas tabelas A.1, A.2 e A.3 respectivamente.

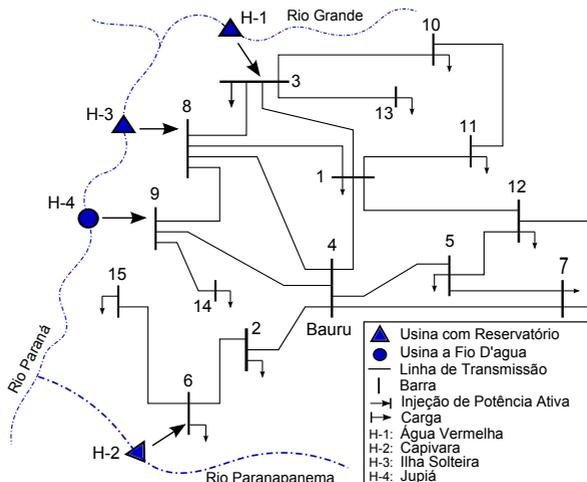


Figura 5.1 – Sistema CESP 4H

O perfil de demanda total mostrada na Figura 5.2 apresenta o mesmo comportamento do registrado pelo ONS nos 12 meses do ano de 2012 na região Sudeste. Neste trabalho, a carga máxima, registrada no mês de fevereiro equivale a aproximadamente 90% da capacidade total de geração das usinas.

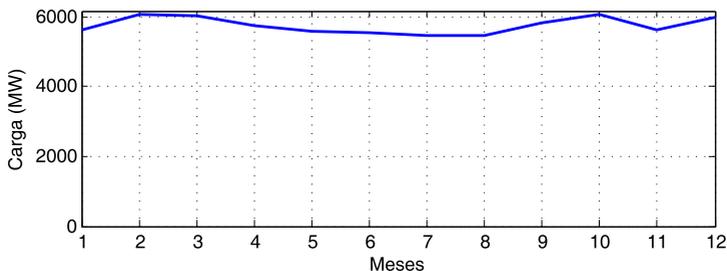


Figura 5.2 – Curva de Demanda - Sistema CESP 4H

5.4.1 Caso 1: CESP com Cenários de Vazões Críticas (1946-1965)

Para cada janela deslizante foram considerados $T = 12$ períodos de tempo e utilizado um conjunto de 10 cenários, correspondentes às vazões afluentes registradas entre os anos de 1946 e 1965.

Primeiramente analisamos os resultados do despacho centralizado, considerando que a rede possua capacidade de transmissão ilimitada. Os valores médios para as potências geradas, obtidos pelo método da janela deslizante são apresentados na Tabela 5.1. A mesma tabela indica o valor esperado de complementação térmica em cada mês.

Tabela 5.1 – Despacho centralizado CESP sem limites de transmissão e vazões entre 1946-1965.

Gerações (MW)													
Usina/Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Média
A.Verm.	890	803	857	762	758	709	714	713	744	779	813	897	787
Capiv.	437	292	254	240	176	284	182	228	221	251	191	238	250
I.Solt.	2073	2574	2254	2129	2047	2005	2007	1990	2184	2152	2100	2341	2155
Jupiá	1410	1396	1405	1387	1373	1376	1386	1369	1377	1397	1392	1402	1389
Comp. Term.	827	994	1253	1142	1240	1187	1192	1171	1282	1477	1145	1129	1178

Ao final do período de planejamento, o volume armazenado nas quatro usinas é de 21.354 hm^3 . Verifica-se que o operador do sistema opta por utilizar ao máximo as usinas hidrelétricas, deixando as mesmas com o volume final na capacidade mínima de armazenamento, reduzindo o montante de complementação térmica necessário ao sistema.

A Figura 5.3 mostra os volumes médios de cada reservatório ao final de cada período de planejamento, sendo que no mês 0 estão indicados os volumes iniciais dos reservatórios. Com esta Figura é possível verificar a variação entre os volumes iniciais (no mês 0) e finais (no mês 12) durante o período de planejamento. É possível ainda observar como o sistema utilizou ao máximo todos os recursos hídricos das usinas no despacho centralizado, reduzindo ao nível mínimo o armazenamento dos reservatórios.

Para verificar os efeitos que os limites de transmissão têm no despacho centralizado será considerado que as linhas (1 – 8), (1 – 11) e (3 – 10) possuem suas capacidades de transmissão limitadas em $900MW$, $500MW$ e $300MW$, respectivamente.

Utilizando a técnica da janela deslizante, os resultados do despacho centralizado com capacidade de transmissão limitada são mostrados

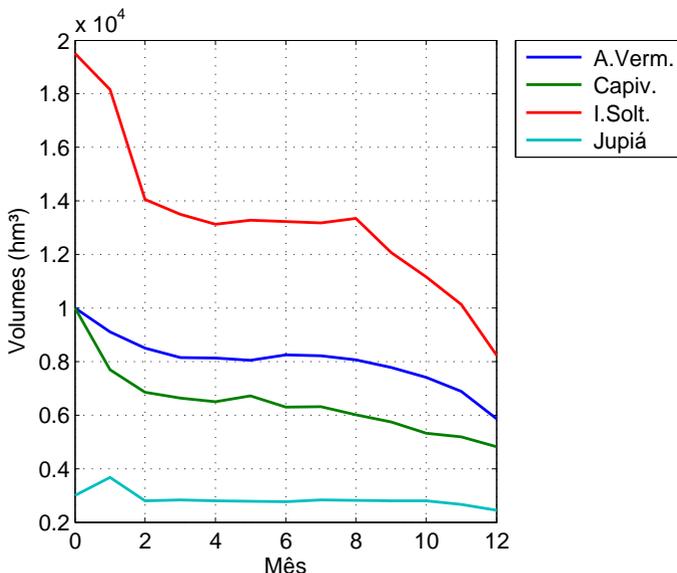


Figura 5.3 – Volumes nos reservatórios no despacho centralizado CESP, sem limites de transmissão e vazões afluentes entre 1946 e 1965.

na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Despacho centralizado CESP com limites de transmissão e vazões afluentes entre 1946 e 1965.

Usina/Mês	Gerações (MW)												Média
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
A.Verm.	904	704	824	779	748	749	783	701	742	786	864	945	794
Capiv.	445	344	302	300	218	284	249	270	265	249	242	285	288
I.Solt.	1626	1786	1689	1624	1666	1634	1586	1592	1729	1782	1662	1782	1680
Jupia	1410	1403	1389	1372	1386	1369	1373	1376	1383	1396	1388	1404	1387
Comp. Term.	1252	1823	1817	1685	1576	1525	1490	1531	1689	1843	1485	1591	1609

Verifica-se que, quando há limitações na transmissão, houve um aumento de aproximadamente 36,56% na complementação térmica média do sistema nos 12 meses. Os novos limites resultaram numa menor participação de usinas hidrelétricas e um conseqüente aumento no volume final armazenado nos reservatórios, onde o registrado foi de 21.635hm³.

Os valores esperados para as ofertas e potências efetivamente produzidas pelos geradores no despacho descentralizado com consistên-

cia de preços, considerando uma capacidade de transmissão ilimitada, são mostradas na Tabela 5.3. Neste caso a meta de cada produtor é terminar o período de planejamento com o volume de seu reservatório o mais próximo possível do valor inicial dado na Tabela A.1.

Tabela 5.3 – Despacho descentralizado CESP sem limite de transmissão, $v^{SP} = v_0$ e vazões afluentes entre 1946 e 1965.

Ofertas (MW)													
Usina/Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Média
A.Verm.	1072	1153	1169	1154	1124	1113	1120	1119	1144	1155	1115	907	1112
Capiv.	529	513	520	517	523	519	520	519	511	513	540	496	518
I.Solt.	2812	2806	2780	2796	2754	2761	2779	2739	2844	2882	2755	2303	2751
Jupiá	1195	1278	1120	1113	1127	1122	1114	1114	1141	1229	1354	1402	1192
Gerações (MW)													
A.Verm.	797	1021	880	766	705	676	753	699	661	721	680	882	770
Capiv.	392	189	203	185	160	207	190	204	193	260	399	483	255
I.Solt.	2324	2598	2130	2240	1885	2069	2079	2062	2274	2485	2119	1816	2173
Jupiá	1195	1274	1119	1109	1120	1116	1107	1109	1140	1229	1331	1402	1188
C. Term.	927	978	1691	1460	1723	1493	1352	1395	1541	1360	1113	1424	1372

Como podemos observar para o sistema sem limites de transmissão, o montante de complementação térmica média aumentou no despacho descentralizado se comparado ao centralizado, como era esperado, já que as estratégias dos produtores alteram os resultados do despacho. A complementação térmica média no despacho descentralizado é 16,47% maior que no despacho centralizado. Analisando a Tabela 5.3, observa-se que Jupiá foi a usina que teve suas ofertas melhor aproveitadas, se comparada às demais usinas.

Como consequência das estratégias dos produtores em armazenar água, o volume final registrado nas quatro usinas no despacho descentralizado é de $30.234hm^3$. Podemos observar pela Figura 5.4 que nenhuma usina com capacidade de armazenamento alcançou sua meta de volume final. Tais usinas, terminaram o planejamento com maiores volumes de água se comparado ao despacho centralizado com capacidade de transmissão ilimitada. Tomando como referência os volumes especificados, o desvio padrão médio dos volumes finais para o despacho descentralizado foi de $6.958hm^3$ enquanto que para o despacho centralizado o calculado foi de $9.255hm^3$.

Na Figura 5.4 estão ainda representados os valores especificados pelos produtores como meta, v_i^{SP} , onde estão representados para cada usina na mesma cor que os respectivos gráficos dos volumes das mesmas. Vale lembrar que as metas de Água Vermelha e Capivara são

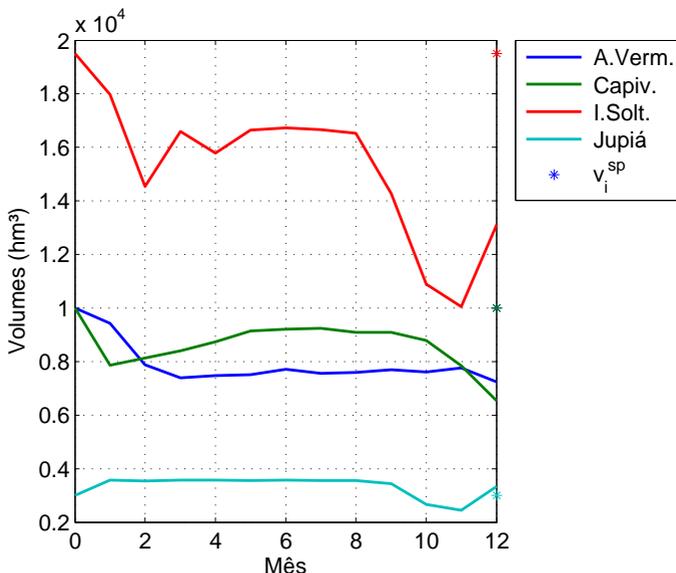


Figura 5.4 – Volumes nos reservatórios no despacho descentralizado CESP com capacidade ilimitada de transmissão, $v^{sp} = v_0$ e vazões afluentes entre 1946 e 1965.

as mesmas, logo os respectivos valores estão no mesmo ponto no gráfico. Com isso, é possível verificar o quanto os volumes de água de cada usina se aproximaram dos valores estimados pelas mesmas, no despacho descentralizado com consistência de preços.

Se considerarmos a mesma meta de volumes finais do caso anterior ($v^{sp} = v_0$), mas supormos que as linhas (1 – 8), (1 – 11) e (3 – 10) possuam capacidades de transmissão limitadas nos mesmos valores anteriormente utilizados, o novo resultado do despacho descentralizado pode ser analisado na Tabela 5.4.

No despacho descentralizado, a presença de congestionamento de três linhas de transmissão resultou no aumento de aproximadamente 26,39% na complementação térmica média do sistema nos 12 meses, conforme podemos observar comparando a Tabela 5.4 com a Tabela 5.3. Observa-se que, a presença de linhas com capacidade limitada de transmissão foi favorável às usinas Capivara e Jupia, já que suas produções médias nos 12 meses aumentaram. Contudo, Jupia continuou sendo a usina que teve as ofertas melhor aproveitadas.

Tabela 5.4 – Despacho descentralizado CESP com limites de transmissão, $v^{sp} = v_0$ e vazões afluentes entre 1946 e 1965.

Ofertas (MW)													
Usina/Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Média
A.Verm.	1063	904	855	792	772	840	800	783	802	850	921	921	859
Capiv.	551	320	331	329	334	325	357	305	341	340	360	436	361
I.Solt.	1895	2075	1932	1845	1773	1746	1870	1933	2048	2213	2078	2022	1952
Jupiá	1300	1195	1251	1279	1312	1344	1291	1245	1198	1182	1280	1314	1266
Gerações (MW)													
A.Verm.	904	762	777	752	724	782	722	695	665	654	767	838	753
Capiv.	460	203	233	219	201	218	261	203	236	258	293	354	262
I.Solt.	1642	1902	1767	1712	1677	1613	1638	1676	1801	2025	1727	1760	1745
Jupiá	1300	1195	1251	1279	1312	1339	1291	1244	1189	1179	1280	1314	1264
C. Term.	1331	1998	1995	1797	1680	1610	1569	1651	1918	1938	1575	1741	1734

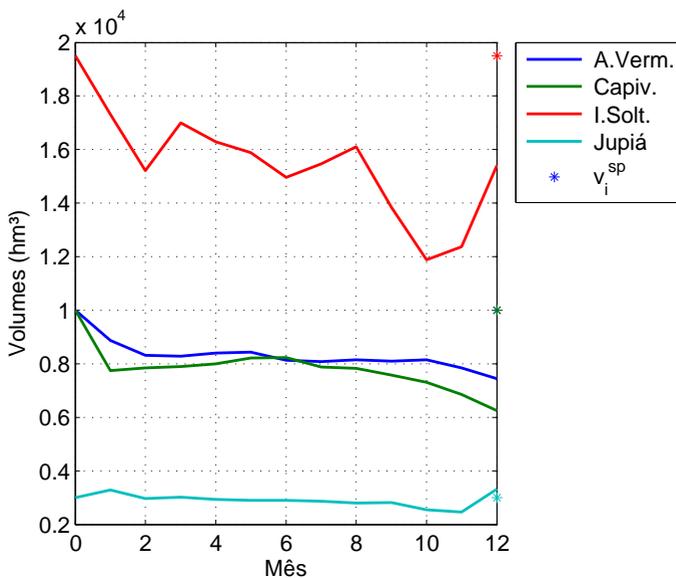


Figura 5.5 – Volumes nos reservatórios no despacho descentralizado CESP limites de transmissão, $v^{sp} = v_0$ e vazões afluentes entre 1946 e 1965.

O aumento na complementação térmica resultou numa menor participação das usinas hidrelétricas no mercado, resultando num consequente aumento de água armazenada nas quatro usinas ao final dos

12 meses, onde o registrado foi de 32.422 hm^3 . Contudo, as metas ainda estão muito altas para um conjunto de cenários de aflúncias tão baixas como as registradas no período. Assim, as usinas com capacidade de armazenamento terminaram o período de planejamento com um montante de água ligeiramente inferior às metas, apesar de superiores aos valores verificados no caso sem limites de transmissão, conforme Figura 5.5. Estando as usinas mais próximas de atingir suas metas, menor é o desvio padrão dos volumes, o qual foi de 5.670 hm^3 .

Observa-se pelos resultados do despacho descentralizado com consistência de preços que pela atuação do Operador do Sistema, as usinas geraram abaixo dos valores ofertados. Isso é consequência do operador que encontra uma solução factível que respeite as restrições operacionais e físicas do sistema.

Se reduzirmos as metas das usinas, para que estas representem 85% dos valores iniciais de cada reservatório, e ainda considerando que as linhas de transmissão possuem capacidade de transmissão ilimitada, os valores do despacho descentralizado com consistência de preços é mostrado na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Despacho descentralizado CESP sem limites de transmissão, $v^{SP} = 0,85v_0$ e vazões afluentes entre 1946 a 1965.

Ofertas (MW)													
Usina/Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Média
A.Verm.	1260	1269	1270	1274	1272	1265	1202	1184	1172	1152	1199	1228	1229
Capiv.	575	588	577	533	558	594	550	553	529	543	533	557	558
I.Solt.	3075	3139	3139	3075	2990	2969	2921	2897	2944	2832	2871	2955	2984
Jupiaá	1359	1350	1330	1335	1275	1272	1249	1263	1300	1300	1339	1390	1313
Gerações (MW)													
A.Verm.	878	678	1061	763	706	693	622	680	683	732	806	848	763
Capiv.	431	291	249	201	212	234	184	220	208	270	224	428	263
I.Solt.	2107	2328	2257	2246	1890	2083	2131	2065	2311	2208	2012	2193	2153
Jupiaá	1357	1350	1330	1335	1275	1272	1249	1263	1300	1300	1294	1390	1310
C. Term.	863	1413	1127	1215	1511	1279	1295	1242	1306	1545	1305	1148	1271

Verificou-se que a complementação térmica média dos 12 meses reduziu com a redução das metas, bem como o volume final dos reservatórios das quatro usinas, o qual foi de 25.964 hm^3 , resultando numa maior participação das hidrelétricas no mercado. Os níveis dos reservatórios durante o período de planejamento podem ser melhor observados na Figura 5.6. Neste caso, nenhuma usina atingiu suas metas de volume final. No entanto, ficaram mais próximas de atingir suas metas que no caso com $v^{SP} = v_0$. Neste caso, o desvio padrão médio dos

volumes em relação ao volumes especificados foi de 5.388 hm^3 , menor que o calculado para o despacho centralizado, que foi de 6.715 hm^3 .

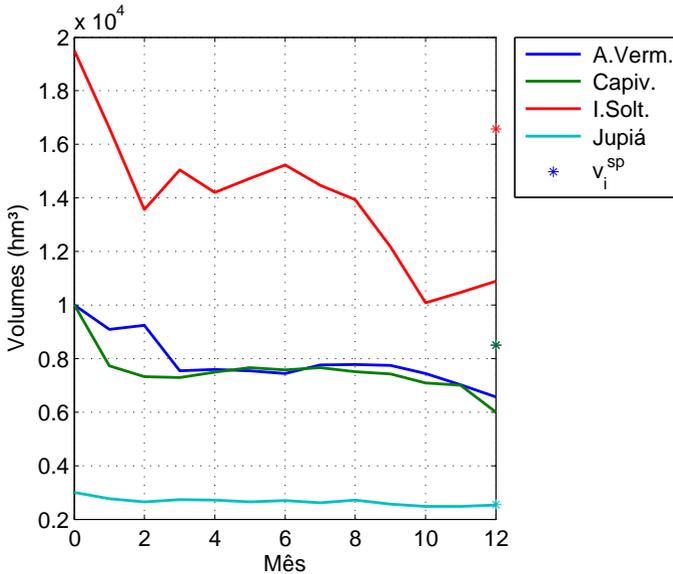


Figura 5.6 – Volumes nos reservatórios no despacho descentralizado CESP e capacidade ilimitada de transmissão, $v^{sp} = 0,85v_0$ e vazões afluentes entre 1946 e 1965.

Se considerarmos que as mesmas linhas de transmissão (4 – 8), (1 – 11) e (3 – 10) sejam limitadas nos mesmos valores anteriormente utilizados, e que a meta de volume final de cada usina seja reduzida de forma que os volumes finais representem 85% dos valores iniciais, os novos valores de potência despachada de forma descentralizada são apresentados na Tabela 5.6.

A presença de congestionamento em três linhas do sistema contribuiu para um aumento de aproximadamente 28,75% da complementação térmica em relação ao caso sem limites de transmissão, o que resultou num maior volume de água armazenada no final do período de planejamento, o qual foi de 28.440 hm^3 . Esse aumento da complementação térmica foi resultado da redução da geração de Ilha Solteira, que foi de aproximadamente 20,67%. Contudo as demais usinas foram favorecidas com um pequeno aumento em suas gerações médias.

Na Figura 5.7 é possível verificar o comportamento dos volumes

Tabela 5.6 – Despacho descentralizado CESP com limites de transmissão, $v^{sp} = 0,85v_0\%$ e vazões afluentes entre 1946 a 1965.

Ofertas (MW)													
Usina/Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Média
A.Verm.	1119	890	972	929	864	893	837	842	745	733	989	1027	903
Capiv.	491	383	338	351	344	316	300	335	359	344	302	448	359
I.Solt.	2024	2135	2079	1999	1931	1993	1924	1954	2019	2087	2077	2100	2027
Jupiaá	1405	1333	1355	1367	1376	1370	1368	1377	1346	1332	1318	1365	1359
Gerações (MW)													
A.Verm.	896	703	885	781	761	781	783	747	691	619	861	929	787
Capiv.	445	279	265	247	253	227	237	214	263	260	229	374	274
I.Solt.	1603	1798	1759	1749	1651	1592	1583	1638	1725	1903	1759	1735	1708
Jupiaá	1405	1333	1332	1367	1372	1364	1367	1365	1329	1326	1314	1365	1353
C. Term.	1288	1949	1782	1616	1555	1597	1511	1507	1800	1947	1479	1604	1636

dos reservatórios durante todo o período de planejamento. Neste caso, as usinas com capacidade de armazenamento não atingiram suas metas de volume. No entanto, essas usinas ficaram mais próximas de atingir suas metas que no caso com $v^{sp} = v_0$, sendo que o desvio padrão médio dos volumes foi de 4.209 hm^3 .

Da mesma forma, observa-se pelos resultados do despacho descentralizado com consistência de preços que pela atuação do Operador do Sistema, as usinas geraram abaixo dos valores ofertados.

A seguir é realizada a mesma análise para o sistema CESP 4H considerando um conjunto de cenários menos críticos que os anteriormente utilizados, como forma de verificar a influência das vazões afluentes dos reservatórios para os despachos centralizado e descentralizado com consistência de preços.

5.4.2 Caso 2: CESP Com Cenários de Vazões Não Críticas (1980 - 1999)

Analisaremos agora o sistema CESP considerando um conjunto de cenários menos críticos que os utilizados anteriormente. A potências geradas no despacho centralizado são mostradas na Tabela 5.7.

Se considerarmos limites de transmissão nas mesmas linhas com os mesmos valores do caso anterior (5.4.1), o despacho centralizado obtido é mostrado na Tabela 5.8. Podemos perceber que as linhas com capacidade de transmissão limitada estão prejudicando a produção de Ilha Solteira, que possui maior capacidade de produção no sistema,

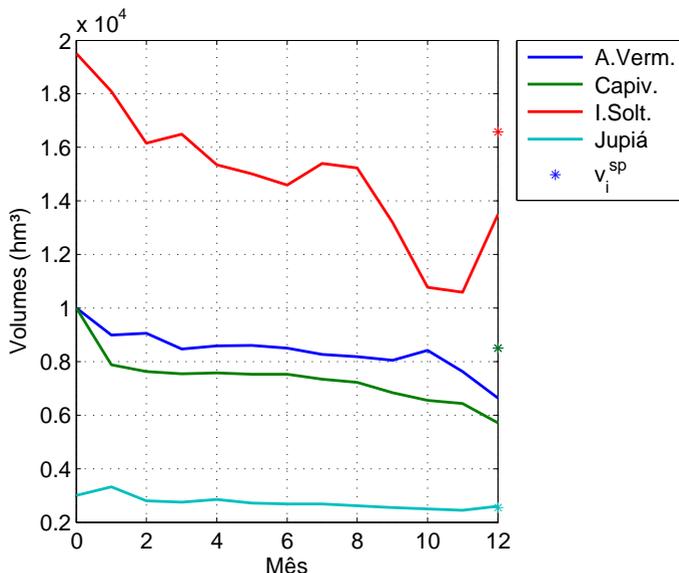


Figura 5.7 – Volumes nos reservatórios no despacho descentralizado, com limites de transmissão, $v^{sp} = 0,85v_0$ e vazões afluentes entre 1946 a 1965.

Tabela 5.7 – Despacho Centralizado CESP sem limites de transmissão e vazões afluentes entre 1980 a 1999.

Usina/Mês	Gerações (MW)												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Média
A. Verm.	877	842	921	895	873	802	886	919	920	914	902	1114	905
Capiv.	406	360	333	363	325	339	318	350	369	402	312	288	347
I. Solt.	2128	2338	2416	2332	2266	2326	2274	2201	2459	2465	2425	2651	2356
Jupia	1384	1405	1408	1409	1410	1410	1410	1410	1410	1410	1410	1410	1407
Comp. Term.	841	1116	945	761	719	685	593	591	651	868	593	544	742

onde verificou-se uma redução de aproximadamente 28,61%. Por outro lado, as demais usinas foram favorecidas pois houve um pequeno aumento em suas gerações.

Para o despacho descentralizado com consistência de preços consideramos que a meta estipulada para o final do período de planejamento seja de manter o nível do reservatório o mais próximo possível dos valores iniciais, dados na Tabela A.1. Inicialmente são mostrados

Tabela 5.8 – Despacho Centralizado CESP com limites de transmissão e vazões afluentes entre 1980 a 1999.

Gerações (MW)													
Usina/Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Média
A.Verm.	904	877	908	944	885	902	942	909	976	995	1024	1061	944
Capiv.	478	473	413	460	418	435	432	419	446	458	441	450	444
I.Solt.	1623	1693	1773	1676	1672	1689	1638	1662	1698	1745	1626	1690	1682
Jupiá	1410	1409	1410	1410	1410	1410	1410	1410	1410	1410	1410	1410	1410
Comp. Term.	1221	1609	1520	1271	1208	1126	1059	1071	1278	1447	1141	1396	1279

os resultados do despacho descentralizado sem limites de transmissão ativos (Tabela 5.9) e posteriormente considerando que as mesmas três linhas estejam com capacidade de transmissão limitada (Tabela 5.10).

Tabela 5.9 – Despacho Descentralizado CESP sem limites de transmissão, $v^{sp} = v_0$ e vazões afluentes entre 1980 a 1999.

Ofertas (MW)													
Usina/Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Média
A.Verm.	1046	1177	1163	1146	1122	1122	1108	1098	1149	1183	1134	889	1112
Capiv.	503	496	503	532	539	542	524	520	515	514	519	429	511
I.Solt.	2527	2860	2821	2854	2822	2878	2889	2909	2984	2972	2892	2391	2817
Jupiá	1211	1223	1177	1167	1183	1190	1187	1152	1189	1268	1307	1394	1221
Gerações (MW)													
A.Verm.	774	1014	877	843	839	818	830	855	855	972	831	868	865
Capiv.	439	318	360	352	357	375	323	306	344	400	400	395	364
I.Solt.	2080	2661	2383	2412	2294	2443	2501	2548	2719	2715	2413	2023	2433
Jupiá	1211	1219	1176	1161	1172	1178	1174	1138	1181	1262	1233	1394	1208
Comp. Term.	1133	848	1226	992	932	747	652	624	709	706	765	1326	888

Analisando as tabelas 5.9 e 5.10 novamente comprovamos que Ilha Solteira foi prejudicada com os limites de transmissão, pois sofreu uma redução de 25,11% na sua produção média dos 12 meses. Observa-se também uma pequena redução no fornecimento de Água Vermelha. No entanto, Jupiá e Capivara foram favorecidas pelas limitações na transmissão, pois tiveram pequenos aumentos de geração.

Observa-se que a inclusão de limites de transmissão fez com que as usinas Água Vermelha, Capivara e Ilha Solteira reduziram suas ofertas. Jupiá, por outro lado, elevou um pouco sua oferta quando a transmissão é limitada. Observa-se que Jupiá foi a usina que teve suas ofertas melhor aproveitadas.

Pela atuação do operador do sistema, observa-se pelos resultados

Tabela 5.10 – Despacho Descentralizado CESP com limites nas linhas, $v^{sp} = v_0$ e vazões afluentes entre 1980 a 1999.

Ofertas (MW)													
Usina/Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Média
A.Verm.	1021	960	865	1016	1014	1063	1001	1018	994	938	991	957	986
Capiv.	449	413	452	473	510	474	490	453	444	459	423	370	451
I.Solt.	2317	2184	2227	2093	2009	1972	2096	2037	2103	2234	2090	2335	2141
Jupiá	1274	1226	1246	1308	1325	1353	1328	1266	1286	1193	1300	1309	1285
Gerações (MW)													
A.Verm.	868	823	744	855	868	925	874	915	859	803	856	921	859
Capiv.	425	321	371	398	430	421	418	367	381	418	389	337	389
I.Solt.	1762	1933	1940	1749	1780	1654	1744	1765	1883	2051	1714	1888	1822
Jupiá	1274	1226	1246	1308	1325	1353	1328	1266	1286	1193	1300	1309	1285
Comp. Term.	1307	1757	1721	1451	1191	1208	1116	1158	1399	1591	1383	1552	1403

do despacho descentralizado com consistência de preços que as usinas geraram abaixo dos valores ofertados. Isso ocorre para todos os casos de despacho descentralizado, já que o operador do sistema atua encontrando um despacho factível para o sistema com base nas ofertas definidas pelos produtores.

Se reduzirmos as metas para que os volumes sejam, ao final do período de planejamento correspondentes a 85% dos volumes iniciais, os resultados do despacho descentralizado com consistência de preços para o sistema sem e com limites de transmissão são mostrados nas tabelas 5.11 e 5.12, respectivamente.

Tabela 5.11 – Despacho Descentralizado CESP sem limites de transmissão, $v^{sp} = 0,85v_0$ e vazões afluentes entre 1980 a 1999.

Ofertas (MW)													
Usina/Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Média
A.Verm.	1283	1332	1337	1335	1316	1310	1312	1318	1314	1335	1251	1332	1315
Capiv.	623	626	609	606	607	614	614	609	622	621	600	532	607
I.Solt.	3143	3182	3167	3158	3154	3163	3148	3174	3208	3201	3187	3159	3170
Jupiá	1342	1349	1372	1359	1344	1341	1334	1313	1301	1330	1328	1409	1344
Gerações (MW)													
A.Verm.	871	756	1028	762	769	709	756	813	794	894	955	969	840
Capiv.	448	425	426	389	371	357	328	323	386	416	397	312	382
I.Solt.	2097	2267	2415	2540	2219	2426	2552	2426	2743	2613	2420	2448	2430
Jupiá	1340	1349	1372	1359	1344	1341	1334	1313	1301	1330	1184	1409	1331
Comp. Term.	880	1262	781	711	891	728	511	596	583	802	686	869	775

Mais uma vez observa-se que a presença de limites de transmis-

Tabela 5.12 – Despacho Descentralizado CESP com limites de transmissão, $v^{sp} = 0,85v_0$ e vazões afluentes entre 1980 a 1999.

Ofertas (MW)													
Usina/Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Média
A.Verm.	1161	1046	1110	1161	1166	1191	1225	1191	1239	1182	1149	1172	1166
Capiv.	575	591	575	555	539	546	578	581	564	551	490	403	546
I.Solt.	2375	2267	2160	2242	2289	2535	2397	2337	2278	2234	2221	2453	2316
Jupia	1399	1382	1395	1397	1388	1398	1390	1386	1368	1375	1338	1267	1373
Gerações (MW)													
A.Verm.	899	790	950	914	903	926	903	932	894	910	983	1087	924
Capiv.	478	459	457	421	413	437	424	425	437	426	367	350	425
I.Solt.	1629	1623	1751	1737	1725	1691	1659	1655	1739	1856	1729	1658	1704
Jupia	1399	1382	1395	1397	1388	1398	1390	1386	1368	1375	1338	1267	1373
Comp. Term.	1231	1806	1469	1289	1165	1109	1104	1072	1370	1488	1225	1645	1331

são leva à redução das ofertas das usinas com capacidade de armazenamento. Das usinas pertencentes ao sistema, Ilha Solteira foi novamente a mais prejudicada com a presença de linhas com capacidade de transmissão limitadas. Independentemente de haver limites de transmissão, Jupia continuou sendo a usina com melhor aproveitamento das ofertas.

Neste novo conjunto de cenários de vazões, as usinas ficaram mais próximas de atingir suas metas. O desvio padrão médio calculado para o despacho descentralizado sem limites de transmissão foi de 4.106 hm^3 , para $v^{sp} = v_0$ e 3.367 hm^3 para $v^{sp} = 0,85v_0$.

Para o despacho descentralizado com as mesmas 3 linhas com capacidade de transmissão limitadas, Ilha Solteira foi a usina que teve sua produção mais afetada, o que resultou numa menor participação no mercado. Analisando os valores de desvio padrão médio dos volumes para $v^{sp} = v_0$ o desvio padrão médio foi de 3.828 hm^3 e para $v^{sp} = 0,85v_0$ foi de 2.611 hm^3 . Esses valores são menores do que os obtidos nos casos sem limites de transmissão,

5.4.3 Análise de resultados: Sistema CESP

Numa primeira análise consideramos um conjunto de cenários críticos, que compreendem um período de baixas vazões afluentes. A Tabela 5.13 indica os valores de complementações térmicas médias obtidas nos casos analisados. Observa-se que, quando não há limites de transmissão e para $v^{sp} = 0,85v_0$, no despacho descentralizado, a complementação térmica no primeiro mês é 4,63% superior àquela de despa-

cho descentralizado. Considerando os 12 meses, a complementação térmica no despacho descentralizado é 7,9% superior à do despacho centralizado.

A presença de linhas com capacidade de transmissão limitadas contribuiu para o aumento significativo da complementação térmica, conforme pode ser visto de forma resumida na Tabela 5.13. Neste caso, no despacho descentralizado e para $v^{sp} = 0,85v_0$, a complementação térmica no primeiro mês é 2,9% superior à do despacho centralizado e, para os 12 meses, a complementação térmica no despacho descentralizado é de 1,6% superior à do despacho centralizado. Analisando os resultados da Tabela 5.13 vemos que: (i) as diferenças entre as complementações térmicas são menores para o primeiro mês de planejamento e (ii) as complementações térmicas nos despachos descentralizado e centralizado ficaram mais próximas quando há limites de transmissão.

No despacho centralizado o operador do sistema tem como objetivo utilizar ao máximo os recursos hídricos disponíveis, o que faz com que as usinas terminem o planejamento com seus reservatórios nas capacidades mínimas de armazenamento. Já no despacho descentralizado, os produtores agem definindo metas de volumes finais como forma de estimar seus lucros, fazendo com que as usinas terminem o planejamento com volumes de água superiores ao despacho centralizado, conforme Tabela 5.14. Quando não há limite de transmissão, no despacho descentralizado com $v^{sp} = 0,85v_0$, o volume final de água nos reservatórios é 20,3% superior ao obtido no despacho centralizado. Na presença de limites de transmissão o volume de água armazenada no despacho descentralizado com $v^{sp} = 0,85v_0$ é 31,4% superior ao valor obtido no despacho centralizado.

Na Tabela 5.14, para o despacho centralizado, são mostrados os desvios padrões médios em relação a $v^{sp} = v_0$ e em relação a $v^{sp} = 0,85v_0$.

Ao considerarmos outro conjunto de cenários de vazões afluentes menos críticas que as anteriores, foi possível verificar que houve uma menor complementação térmica tanto no despacho centralizado, como nos dois casos de despacho descentralizado com consistência de preços, conforme Tabela 5.15. E ainda foi maior o volume de água armazenada nos reservatórios ao final do período de planejamento, resultante de uma melhor condição hidrológica do sistema, conforme Tabela 5.16.

Na Tabela 5.15 observa-se que, quando não há limites de transmissão, no despacho descentralizado com $v^{sp} = 0,85v_0$ a complementação térmica no primeiro mês é de 4,6% superior à do despacho centralizado; nos 12 meses essa complementação é 4,4% superior à do despa-

Tabela 5.13 – CESP - Média de geração térmica para vazões afluentes entre 1946 a 1965.

Sem Limites de Transmissão					
D. Central.		D Descentral. $v^{sp} = v_0$		D. Descentral. $v^{sp} = 0,85v_0$	
Med. 1º M. (MW)	Med. 12 Ms. (MW)	Med. 1º M. (MW)	Med. 12 Ms. (MW)	Med. 1º M. (MW)	Med. 12 Ms. (MW)
827	1178	927	1372	863	1271
Com Limites de Transmissão					
D. Central.		D Descentral. $v^{sp} = v_0$		D. Descentral. $v^{sp} = 0,85v_0\%$	
Med. 1º M. (MW)	Med. 12 Ms. (MW)	Med. 1º M. (MW)	Med. 12 Ms. (MW)	Med. 1º M. (MW)	Med. 12 Ms. (MW)
1252	1609	1331	1734	1288	1636

Tabela 5.14 – CESP - Volumes reservatórios e desvios padrões médios para vazões afluentes entre 1946 a 1965.

Sem Limites de Transmissão						
D. Central.		D Descentral. $v^{sp} = v_0$		D. Descentral. $v^{sp} = 0,85v_0$		
Desv. P. (hm^3)	Vol. Tot. (hm^3)	Desv.P. (hm^3)	Vol. Tot. (hm^3)	Desv. P. (hm^3)	Vol. Tot. (hm^3)	
9.255	6.621	21.357	6.958	30.234	5.388	25.708
Com Limites de Transmissão						
D. Central.		D Descentral. $v^{sp} = v_0$		D. Descentral. $v^{sp} = 0,85v_0$		
Desv. P. (hm^3)	Vol. Tot. (hm^3)	Desv.P. (hm^3)	Vol. Tot. (hm^3)	Desv. P. (hm^3)	Vol. Tot. (hm^3)	
9.142	6.621	21.635	5.670	32.422	4.209	28.440

cho centralizado. Na presença de limites de transmissão esses valores são, respectivamente, 0,8% e 4,1%.

Resultado de uma maior vazão de água disponível para produção, o sistema pode reduzir ainda mais a necessidade de geração de usinas termoeletricas e ainda os produtores puderam se aproximar mais de suas metas de volume final estipuladas, conforme pode ser visto comparando-se os desvios padrões indicados nas tabelas 5.14 e 5.16.

Tabela 5.15 – CESP - Média de geração térmica para vazões afluentes entre 1980 a 1999.

Sem Limites de Transmissão					
D. Central.		D Descentral. $v^{sp} = v_0$		D. Descentral. $v^{sp} = 0,85v_0$	
Med. 1º M. (MW)	Med. 12 Ms. (MW)	Med. 1º M. (MW)	Med. 12 Ms. (MW)	Med. 1º M. (MW)	Med. 12 Ms. (MW)
841	742	1133	888	880	775
Com Limites de Transmissão					
D. Central.		D Descentral. $v^{sp} = v_0$		D. Descentral. $v^{sp} = 0,85v_0$	
Med. 1º M. (MW)	Med. 12 Ms. (MW)	Med. 1º M. (MW)	Med. 12 Ms. (MW)	Med. 1º M. (MW)	Med. 12 Ms. (MW)
1221	1279	1307	1403	1231	1331

Analisando os volumes finais de água nos reservatórios nos dois tipos de despacho observa-se, na Tabela 5.16, que, quando não existem limites de transmissão, o volume final de água armazenada no despacho descentralizado com $v^{sp} = 0,85v_0$ é 39,8% superior ao volume obtido no despacho centralizado. Na presença de limites de transmissão o volume de água armazenado no despacho descentralizado passa a ser 46,8% superior ao do despacho centralizado.

Em todos os casos de despacho descentralizado com consistência de preços, foi possível verificar que as gerações ficaram abaixo das ofertas definidas pelos produtores. Isso é consequência do operador do sistema que busca um despacho factível que atenda as restrições operativas do sistema, com valores finais de despacho limitados pelas ofertas dos produtores, característica do modelo em dois níveis (MPEC).

5.5 SUL: D. Centralizado versus D. Descentralizado com Consistência de Preços

Agora faremos análise do sistema SUL, formado por 7 usinas (Salto Osório, Passo Fundo, Salto Santiago, Foz do Areia, Itá, Salto

Tabela 5.16 – CESP - Volumes reservatórios e desvios padrões médios para vazões afluentes entre 1980 a 1999.

Sem Limites de Transmissão					
D. Central.		D Descentral. $v^{sp} = v_0$		D. Descentral. $v^{sp} = 0,85v_0$	
Dev. P. (hm^3)	Vol. Tot. (hm^3)	Dev.P. (hm^3)	Vol. Tot. (hm^3)	Dev. P. (hm^3)	Vol. Tot. (hm^3)
9.255	6.715	4.106	35.441	3.367	29.851
Com Limites de Transmissão					
D. Central.		D Descentral. $v^{sp} = v_0$		D. Descentral. $v^{sp} = 0,85v_0$	
Dev. P. (hm^3)	Vol. Tot. (hm^3)	Dev.P. (hm^3)	Vol. Tot. (hm^3)	Dev. P. (hm^3)	Vol. Tot. (hm^3)
9.099	6.587	3.828	36.676	2.610	31.914

Caxias e Segredo), 32 barras e 57 linhas de transmissão, conforme Figura 5.8.

O perfil de demanda, na Figura 5.9, possui a mesma característica do registrado pelo ONS no ano de 2012 na região Sul, sendo que para este caso, a carga máxima registrada no mês de Dezembro, representa aproximadamente 90% da capacidade total de geração das usinas.

Para o sistema SUL, da mesma forma que foi feito para o sistema CESP, os resultados do despacho centralizado e descentralizado são obtidos, em primeiro lugar, considerando um conjunto de cenários de vazões críticas e, posteriormente, considerando um conjunto de vazões afluentes não críticas. Para todos os casos, os comportamentos do sistema sem e com limites de transmissão vão ser considerados. Todos os resultados são obtidos utilizando o conceito de janela deslizante.

5.5.1 Caso 1: SUL com Cenários de Vazões Críticas (1946-1965)

Considerando que o sistema não possui nenhuma linha com capacidades de transmissão limitada e as vazões utilizadas representem os valores registrados a partir do ano de 1946, os resultados médios do despacho centralizado podem ser observados na Tabela 5.17.

Ao término do período de planejamento, os volumes dos reservatórios ficaram próximos aos limites mínimos dos reservatórios, sendo

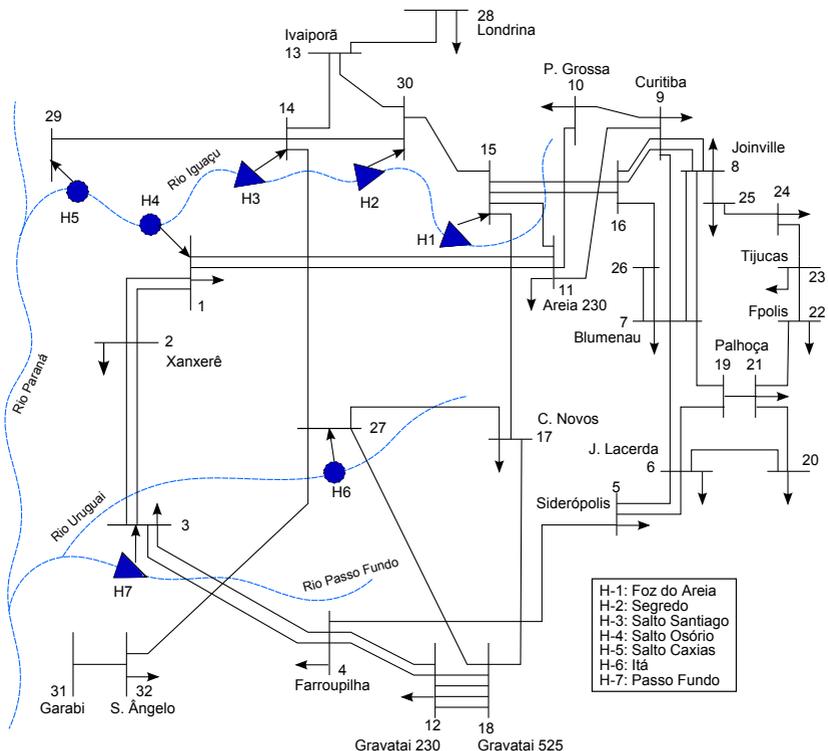


Figura 5.8 – Sistema SUL 7H

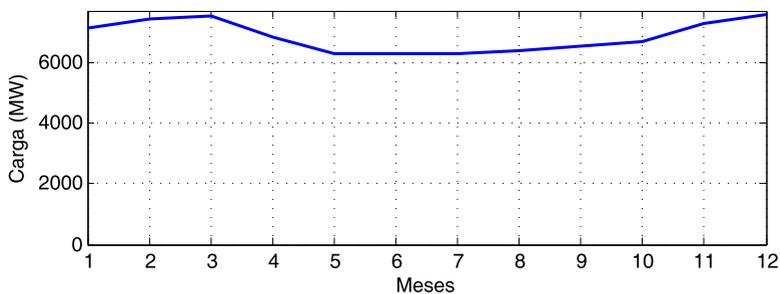


Figura 5.9 – Curva de Demanda - Sistema SUL7H

o volume total de água armazenada igual a 16.953 hm^3 .

Agora, considerando que as duas linhas do sistema (16 – 9) e a linha (17 – 18) possuem capacidades de transmissão limitada em

Tabela 5.17 – Despacho Centralizado SUL sem limites de transmissão e vazões afluentes entre 1946 a 1965.

Plant	Despacho Central.	
	Med. Ger. 1º M. (MW)	Med. Ger. 12 Ms. (MW)
Salto Osório	1078	1066
Passo Fundo	119	134
Salto Santiago	1337	1367
Foz do Areia	1062	815
Itá	1113	775
Salto Caxias	1086	1117
Segredo	1238	1077

750MW, 750MW e 1300MW, respectivamente, os resultados de despacho centralizado podem ser observados na Tabela 5.18.

Tabela 5.18 – Despacho Centralizado SUL com limites de transmissão e vazões afluentes entre 1946 a 1965.

Plant	Despacho Central.	
	Med. Ger. 1º M. (MW)	Med. Ger. 12 Ms. (MW)
Salto Osório	1078	1070
Passo Fundo	82	148
Salto Santiago	1409	1375
Foz do Areia	1062	812
Itá	335	399
Salto Caxias	1171	1213
Segredo	1212	1073

Comparando as tabelas 5.17 e 5.18 pode-se notar que houve uma redução de geração hidrelétrica total, tanto no primeiro período como nos 12 meses, quando há limites de transmissão. Conseqüentemente maior foi o volume armazenado nos reservatórios ao final do período, se comparado ao caso sem limites de transmissão. Neste caso, o volume armazenado foi de 17.042 hm^3 .

Podemos verificar que Itá foi a mais prejudicada com a presença de limites nas linhas, pois sua produção média nos 12 meses reduziu aproximadamente 48,52%; Foz do Areia e Segredo também foram prejudicadas, contudo não de forma tão expressiva quanto Itá. As demais

usinas foram favorecidas e tiveram um pequeno aumento em suas produções médias.

Agora analisaremos dois casos de despacho descentralizado com consistência de preços, um sem limites de transmissão e outro considerando que as mesmas três linhas do caso centralizado possuam os mesmos limites. Em ambos os casos foi considerado que a meta de todas as usinas é de manter o nível dos reservatórios, ao final do período de planejamento, o mais próximo possível dos valores iniciais, ou seja, $v^{sp} = v_0$. Os resultados para os dois casos são mostrados nas tabelas 5.19 e 5.20, respectivamente.

Tabela 5.19 – Despacho Descentralizado SUL sem limites de transmissão, $v^{sp} = v_0$ e vazões afluentes entre 1946 a 1965.

Usina	Despacho Descentralizado			
	Med. Ofertas (MW)		Med. Ger. (MW)	
	1º M.	12 Ms.	1º M.	12 Ms.
Salto Osório	894	742	894	741
Passo Fundo	103	133	103	115
Salto Santiago	1265	1277	1265	1275
Foz do Areia	1116	955	999	750
Itá	1041	868	949	710
Salto Caxias	1238	1084	1238	1083
Segredo	1244	1053	1244	1020

Podemos verificar pela Tabela 5.19 que as usinas que tiveram suas ofertas melhor aproveitadas foram Salto Osório, Salto Santiago e Salto Caxias.

Na presença de linhas de transmissão com capacidade limitada, Foz do Areia, Itá, Salto Caxias e Segredo foram afetadas, sendo que Itá teve sua produção reduzida em aproximadamente 31,55%. Já Salto Osório, Passo Fundo e Salto Santiago foram favorecidas com um pequeno aumento em suas gerações e ainda foram as que tiveram suas ofertas melhor aproveitadas.

Ao final do período de planejamento, o volume armazenado nas 7 usinas foi de 20.898 hm^3 para o caso sem limites de transmissão e 22.065 hm^3 para o caso com limites de transmissão e, neste último, as usinas Passo Fundo e Salto Santiago atingiram suas metas, enquanto que Foz do Areia e Segredo ficaram bem abaixo de suas metas. Para o caso sem limites de transmissão, nenhuma usina com capacidade de armazenamento atingiu sua meta de volume final.

Tabela 5.20 – Despacho Descentralizado SUL com limites de transmissão, $v^{sp} = v_0$ e vazões afluentes entre 1946 a 1965.

Usina	Despacho Descentralizado			
	Med. Ofertas (MW)		Med. Ger. (MW)	
	1º M.	12 Ms.	1º M.	12 Ms.
Salto Osório	1034	821	1034	821
Passo Fundo	54	134	54	133
Salto Santiago	1230	1300	1239	1300
Foz do Areia	1062	729	1062	725
Itá	396	492	396	486
Salto Caxias	1231	939	1201	934
Segredo	1210	1009	1210	1007

O desvio padrão médio dos volumes nos reservatórios calculado no despacho centralizado considerando $v^{sp} = v_0$ como meta, foi de 2.644 hm^3 para o caso sem limites de transmissão e 2.614 hm^3 para o caso com limites de transmissão. No caso do despacho descentralizado, para as mesmas características do sistema, os valores dos desvios médios calculados foram de 1.248 hm^3 e $772,39 \text{ hm}^3$. Isso demonstra que no despacho descentralizado, o montante de energia produzida visa também o atendimento das metas dos produtores.

Os estudos anteriores foram repetidos considerando que as Salto Osório, Passo Fundo, Salto Santiago, Foz do Areia, Itá e Salto Caxias têm como meta terminar o período de planejamento com volumes de água armazenada igual a 85% dos volumes iniciais, e que Segredo opte por utilizar ao máximo seus recursos hídricos, ou seja ($v^{sp} = v^{\min}$). Dois casos de despacho descentralizado com consistência de preço são analisados: um sem limites de transmissão e outro considerando que as mesmas três linhas do caso centralizado possuam os mesmos limites usados anteriormente. Os resultados para os dois casos são mostrados nas tabelas 5.21 e 5.22, respectivamente.

Comparando as tabelas 5.21 e 5.22 com 5.19 e 5.20, podemos observar que a geração hidrelétrica aumentou com a redução das metas de volumes.

O volume final de água armazenada reduziu em relação aos casos onde $v^{sp} = v_0$, para o caso sem limites de transmissão ele foi de 19.959 hm^3 e, com transmissão limitada, foi de 20.435 hm^3 . Tal redução se deve a decisão das usinas de ter uma maior participação no mercado. Verifica-se também que as usinas ficaram mais próximas de atingir suas

Tabela 5.21 – Despacho Descentralizado SUL sem limites de transmissão, $v^{sp} = 0,85v_0$ e vazões afluentes entre 1946 a 1965.

Usina	Despacho Descentralizado			
	Med. Ofertas (MW)		Med. Ger. (MW)	
	1º M.	12 Ms.	1º M.	12 Ms.
Salto Osório	1035	863	1035	861
Passo Fundo	129	143	105	117
Salto Santiago	1327	1321	1327	1319
Foz do Areia	1147	1013	903	749
Itá	1189	924	1035	714
Salto Caxias	1240	1088	1240	1084
Segredo	1227	1072	1227	1029

Tabela 5.22 – Despacho Descentralizado SUL com limites de transmissão, $v^{sp} = 0,85v_0$ e vazões afluentes entre 1946 a 1965.

Usina	Despacho Descentralizado			
	Med. Ofertas (MW)		Med. Ger. (MW)	
	1º M.	12 Ms.	1º M.	12 Ms.
Salto Osório	1051	908	1051	908
Passo Fundo	72	137	72	136
Salto Santiago	1213	1324	1213	1323
Foz do Areia	1013	771	939	741
Itá	941	596	736	549
Salto Caxias	1024	994	1024	993
Segredo	1185	1032	1185	1025

metas, pois o desvio padrão médio calculado foi de $620,35hm^3$ para o caso sem limites de transmissão e $480hm^3$ para o caso com limites na transmissão.

Verificamos que no despacho descentralizado a imposição de limites de transmissão afetou fortemente a produção de Itá, que reduziu 23,11% a produção total. Foz do Areia, Salto Caxias e Segredo foram afetadas de forma menos expressiva. Já Salto Osório, Passo Fundo e Salto Santiago foram beneficiadas, pois houve pequenos aumentos em suas gerações médias, bem como com um melhor aproveitamento de suas ofertas.

Para uma melhor comparação dos valores, nas tabelas 5.23 e 5.24 são mostrados de forma resumida os valores finais de complementação térmica média no primeiro e no último período, desvio padrão médio e volumes de água ao final do período de planejamento. Para o despacho centralizado, são mostrados os desvios padrões médios em relação a $v^{sp} = v_0$ e em relação a $v^{sp} = 0,85v_0$.

Tabela 5.23 – SUL - Média de geração térmica para vazões afluentes entre 1946 a 1965.

Sem Limites de Transmissão					
D. Central.		D Descentral. $v^{sp} = v_0$		D. Descentral. $v^{sp} = 0,85v_0$	
Med. 1º M. (MW)	Med. 12 Ms. (MW)	Med. 1º M. (MW)	Med. 12 Ms. (MW)	Med. 1º M. (MW)	Med. 12 Ms. (MW)
112	496	433	1152	254	974
Com Limites de Transmissão					
D. Central.		D Descentral. $v^{sp} = v_0$		D. Descentral. $v^{sp} = 0,85v_0$	
Med. 1º M. (MW)	Med. 12 Ms. (MW)	Med. 1º M. (MW)	Med. 12 Ms. (MW)	Med. 1º M. (MW)	Med. 12 Ms. (MW)
777	759	929	1441	905	1173

Analisando a Tabela 5.23, observa-se que, quando não há limites de transmissão e $v^{sp} = 0,85v_0$, a complementação térmica no primeiro mês praticamente dobra de valor, se comparado ao despacho centralizado. Considerando os 12 meses, a complementação térmica foi de 96,37% superior ao despacho centralizado.

Considerando o sistema com limites de transmissão e $v^{sp} = 0,85v_0$, a complementação térmica no despacho descentralizado fica mais próxima do despacho centralizado, onde para o primeiro mês ocorreu um aumento de 16,5% na complementação térmica, enquanto que nos doze meses o aumento foi de 54,5%.

Analisando a Tabela 5.24, podemos verificar que o volume total

Tabela 5.24 – SUL - Volumes reservatórios e desvios padrões médios para vazões afluentes entre 1946 a 1965.

Sem Limites de Transmissão					
D. Central.		D Descentral. $v^{sp} = v_0$		D. Descentral. $v^{sp} = 0,85v_0$	
Dev. P. (hm^3)	Vol. Tot. (hm^3)	Dev.P. (hm^3)	Vol. Tot. (hm^3)	Dev. P. (hm^3)	Vol. Tot. (hm^3)
2.644	1.909	16.953	1.248	20.898	620,35
19.959					
Com Limites de Transmissão					
D. Central.		D Descentral. $v^{sp} = v_0$		D. Descentral. $v^{sp} = 0,85v_0$	
Dev. P. (hm^3)	Vol. Tot. (hm^3)	Dev.P. (hm^3)	Vol. Tot. (hm^3)	Dev. P. (hm^3)	Vol. Tot. (hm^3)
2.614	1.591	17.042	772,39	22.065	480,92
20.435					

de água nos reservatórios, sem limites de transmissão e $v^{sp} = 0,85v_0$ fica superior em 17,7%, se comparado ao despacho centralizado. Enquanto que para o sistema com limites de transmissão é registrado um aumento de 19,9%.

5.5.2 Caso 2: SUL com Cenários de Vazões Não Críticas (1980-1999)

Para os novos cenários, os resultados do despacho centralizado e descentralizado para o sistema sem e com limites de transmissão são mostrados nas tabelas 5.25 e 5.26.

No despacho centralizado, como era esperado, o operador do sistema utiliza ao máximo os recursos hídricos disponíveis, como forma de reduzir o custo de operação do sistema. Assim, as usinas com reservatórios terminaram o período de planejamento com os mesmos próximos às capacidades mínimas de armazenamento, sendo o volume total de água armazenada igual a $17.130 \text{ } hm^3$ para o caso sem limites de transmissão e $17.208 \text{ } hm^3$ para o caso com limites de transmissão. Se comparado ao caso anterior com vazões mais críticas, houve uma redução na complementação térmica e ainda assim o de água armazenada é superior. Isso é resultado do aumento da água disponível para a geração de energia.

Na Tabela 5.25, observa-se que, quando não há limites de trans-

Tabela 5.25 – SUL - Média de geração térmica para vazões afluentes entre 1980 a 1999.

Sem Limites de Transmissão					
D. Central.		D Descentral. $v^{SP} = v_0$		D. Descentral. $v^{SP} = 0,85v_0$	
Med. 1º M. (MW)	Med. 12 Ms. (MW)	Med. 1º M. (MW)	Med. 12 Ms. (MW)	Med. 1º M. (MW)	Med. 12 Ms. (MW)
55	283	86	926	133	721
Com Limites de Transmissão					
D. Central.		D Descentral. $v^{SP} = v_0$		D. Descentral. $v^{SP} = 0,85v_0$	
Med. 1º M. (MW)	Med. 12 Ms. (MW)	Med. 1º M. (MW)	Med. 12 Ms. (MW)	Med. 1º M. (MW)	Med. 12 Ms. (MW)
736	660	1161	1193	828	1042

Tabela 5.26 – SUL - Volumes reservatórios e desvios padrões médios para vazões afluentes entre 1980 a 1999.

Sem Limites de Transmissão					
D. Central.		D Descentral. $v^{SP} = v_0$		D. Descentral. $v^{SP} = 0,85v_0$	
Desv. P. (hm^3)	Vol. Tot. (hm^3)	Desv.P. (hm^3)	Vol. Tot. (hm^3)	Desv. P. (hm^3)	Vol. Tot. (hm^3)
2.614	1.905	17.130	421,97	22.031	479,79
20.292					
Com Limites de Transmissão					
D. Central.		D Descentral. $v^{SP} = v_0$		D. Descentral. $v^{SP} = 0,85v_0$	
Desv. P. (hm^3)	Vol. Tot. (hm^3)	Desv.P. (hm^3)	Vol. Tot. (hm^3)	Desv. P. (hm^3)	Vol. Tot. (hm^3)
2.593	1.889	17.208	259,94	22.254	364,39
20.602					

missão e para $v^{sp} = 0,85v_0$, a complementação térmica no primeiro mês e nos 12 meses praticamente dobra de valor, se comparado ao despacho centralizado.

Contudo, considerando o sistema com limites de transmissão e $v^{sp} = 0,85v_0$, esse aumento na complementação térmica não é tão expressivo, onde para o primeiro mês ocorreu um aumento de 12% na complementação térmica, enquanto que nos doze meses o aumento foi de 57,9%, se comparado ao despacho centralizado.

Analisando a Tabela 5.26, podemos verificar que o volume total de água nos reservatórios, sem limites de transmissão e $v^{sp} = 0,85v_0$ ficou superior em 18,46%, se comparado ao despacho centralizado, enquanto que para o sistema com limites de transmissão foi registrado um aumento de 19,72%.

A presença de limites de transmissão no sistema contribuiu assim para um aumento significativo de complementação térmica tanto no despacho centralizado como nos casos de despacho descentralizado, conforme demonstrado na Tabela 5.25. Isso ocorre devido ao fato de as linhas consideradas com capacidade de transmissão limitadas serem as que ligam grandes centros de carga.

5.5.3 Análise de Resultados: Sistema SUL

Analisando os resultados encontrados para o sistema SUL também podemos verificar como as estratégias dos produtores no despacho descentralizado influenciam o perfil de geração do sistema. Neste caso, as complementações térmicas foram bem maiores que as observadas no despacho centralizado.

Comparando as tabelas 5.23 - 5.24 com 5.25 - 5.26 observa-se que, os interesses dos produtores em armazenar água nos reservatórios resultou numa menor participação das usinas no mercado e consequentemente, maior foi geração térmica necessária.

Além das estratégias dos produtores, a presença de limites de transmissão também contribuiu para o aumento da complementação térmica média do sistema. Contudo, quanto menores forem as metas de volumes finais dos produtores, mais as soluções do despacho descentralizado se aproximam das do despacho centralizado, comprovando assim, a influência que os interesses dos produtores (líderes) possuem no resultado final do despacho feito pelo operador do sistema (seguidor). No despacho descentralizado observa-se que, dentre todas as usinas, Salto Osório, Passo Fundo e Salto Santiago foram as que tiveram suas

ofertas melhor aproveitadas.

Influenciadas pelas estratégias dos produtores, as gerações médias ficaram abaixo ou iguais aos valores ofertados pelos produtores, pois o modelo de otimização bi-nível exige que o primeiro critério para encontrar os pontos de equilíbrio deve estar em conformidade com os objetivos dos produtores e o segundo em conformidade com o objetivo dos operador do sistema.

5.6 Despacho Descentralizado: Equilíbrio de Nash

Utilizando os mesmos dados do sistema CESP mostrados na Tabela A.1. Primeiramente serão mostrados os resultados do despacho centralizado e posteriormente os do despacho descentralizado por equilíbrio de Nash, o qual será comparado ao despacho descentralizado com consistência de preços. Todos os resultados são obtidos com o conceito de janela deslizante, considerado $T = 12$ períodos de tempo e $N_{\omega} = 3$ cenários de vazões afluentes, que representam situações de baixa, média e alta afluência. Foram usadas vazões registradas entre 1956 e 1960.

As metas dos produtores nos despachos descentralizados por Nash e com consistência de preços foi de terminar o período de planejamento com seus reservatórios o mais próximo possível dos valores iniciais, $v^{sp} = v_0$, dados na Tabela A.1.

Considerando que a linha 3 – 10 esteja com capacidade de transmissão limitada em 450 MW, os resultados de despacho centralizado, descentralizado por equilíbrio de Nash e descentralizado com consistência de preços são mostrados nas tabelas 5.27, 5.28 e 5.29, respectivamente.

Tabela 5.27 – Despacho centralizado CESP com limite de transmissão na linha 3 – 10 .

Usina/Mês	Gerações (MW)												Média
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
A.Verm.	854	712	729	825	677	629	666	615	657	743	789	791	724
Capiv.	277	241	264	135	180	73	333	221	246	266	253	341	236
I.Solt.	2269	2533	2165	2188	2127	2004	1927	2140	1871	2024	2220	2350	2152
Jupiá	1410	1398	1359	1396	1394	1410	1410	1410	1410	1410	1394	1410	1401
Comp. Term.	827	1176	1505	1214	1215	1446	1145	1085	1624	1613	986	1114	1246

Tanto no despacho descentralizado por Nash quanto com consistência de preços Jupiá foi a única usina que atingiu sua meta de

Tabela 5.28 – Despacho descentralizado CESP por equilíbrio de Nash.

Ofertas (MW)													
Usina/Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Média
A.Verm.	1068	1235	1265	1168	1193	1158	1120	1188	1194	1081	1159	1020	1154
Capiv.	405	366	357	262	239	265	281	280	290	285	226	136	283
I.Solt.	2788	2761	2776	2719	2707	2861	2665	2497	2634	2312	2344	2040	2592
Jupiá	1281	1269	1284	1197	1096	1247	1228	1159	1156	1216	1258	1274	1222
Gerações (MW)													
A.Verm.	770	770	1129	704	709	647	644	651	612	675	822	675	734
Capiv.	358	260	225	131	119	127	171	188	206	198	168	136	191
I.Solt.	2277	2428	2111	2095	1929	1953	1696	1819	1994	1715	2145	1788	1996
Jupiá	1280	1269	1262	1197	1094	1238	1227	1159	1156	1216	1258	1274	1219
Comp. Term.	952	1333	1296	1633	1741	1596	1743	1653	1840	2251	1248	2134	1618

Tabela 5.29 – Despacho descentralizado CESP com consistência de preços.

Ofertas (MW)													
Usina/Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Média
A.Verm.	941	1062	1126	1083	1005	1003	993	931	983	1072	1009	834	1004
Capiv.	523	454	461	446	456	462	450	443	462	452	462	396	456
I.Solt.	2444	2642	2617	2577	2492	2433	2397	2332	2587	2668	2507	1795	2457
Jupiá	1191	1078	1098	1163	1256	1262	1326	1270	1246	1142	1324	1328	1224
Gerações (MW)													
A.Verm.	762	748	1048	807	663	636	625	561	635	869	703	701	730
Capiv.	409	276	196	113	113	159	231	221	286	340	326	303	248
I.Solt.	2288	2469	2225	2204	2056	1715	1919	1986	2241	2442	2025	1605	2098
Jupiá	1180	1078	1098	1163	1256	1262	1326	1270	1246	1142	1318	1328	1222
Comp. Term.	998	1490	1456	1473	1504	1790	1380	1433	1401	1261	1270	2070	1460

volume final, o que pode ser considerado uma consequência de sua estreita faixa de variação de volume. Contudo, no despacho por equilíbrio de Nash as usinas ficaram mais próximas de alcançar suas metas, com um volume total armazenado de $35.518hm^3$, enquanto que no despacho com consistência de preços foi de $31.549hm^3$. O maior montante de água armazenada nas usinas ao final do período de planejamento, no despacho por equilíbrio de Nash, resultou numa complementação térmica média 10,82% maior que no despacho com consistência de preços.

Esse aumento da complementação térmica média obtida por equilíbrio de Nash foi resultado da redução no montante de energia gerada por Capivara, Ilha Solteira e Jupia. Já Água Vermelha teve um pequeno aumento na sua geração média final, se comparado ao despacho com consistência de preços.

Vale ressaltar que, tanto no despacho descentralizado por equilíbrio de Nash, como com consistência de preços, os produtores geraram abaixo dos valores ofertados, isto se deve à atuação do operador do sistema que busca uma solução que atenda aos requisitos físicos e operacionais do sistema como um todo. Neste caso, podemos observar que, os produtores tiveram suas ofertas melhor aproveitadas no despacho por equilíbrio de Nash, o que pode ser considerado uma consequência da competição entre os produtores.

Considerando o despacho descentralizado com consistência de preços, ao comparar os valores de geração média das usinas com as gerações médias no despacho centralizado, Água Vermelha e Capivara foram as usinas beneficiadas com o despacho descentralizado, já que tiveram uma maior participação no mercado. No despacho por equilíbrio de Nash, a única usina que teve sua produção favorecida, se comparado aos valores obtidos por despacho centralizado, foi Água Vermelha.

A solução de equilíbrio de Nash foi encontrada com uma média de 7 iterações por janela deslizante. Ao introduzir a competição entre os produtores por meio de um jogo não-cooperativo, a complementação térmica média do sistema foi maior, resultado do conflito de interesses dos produtores em alcançar suas metas de volume final.

5.7 Existência de Múltiplas Soluções

O problema de despacho descentralizado apresenta diversas soluções, que dependem dos valores de inicialização das variáveis. Alterando esses valores, diferentes soluções ótimas são encontradas. Foi

observado que o problema sem consistência de preços é o que apresenta maior número de pontos de equilíbrio. O despacho com consistência de preços possui menor número de soluções. No entanto, em ambos os casos, o número de soluções se reduz quando o sistema possuir capacidade limitada de transmissão.

Mostramos agora uma segunda possível solução para o despacho descentralizado com consistência de preço, uma para o sistema CESP e outra para o sistema SUL. Para ambas as soluções e sistemas, foram considerados: (i) limites de transmissão, nos mesmos valores anteriormente utilizados para cada sistema, (ii) $v^{sp} = v_0$ e (iii) os mesmos $N_\omega = 10$ cenários utilizados, sendo as vazões afluentes registradas entre os anos de 1980 a 1999.

Nas tabelas 5.30 e 5.31 são mostrados os valores de complementação térmica, desvios padrões médios e volumes finais de água para uma segunda solução possível para o sistema CESP. Os valores de despacho centralizado e descentralizado (1) são os encontrados e analisados anteriormente.

Tabela 5.30 – CESP (2) - Média de geração térmica para vazões afluentes entre 1980 a 1999.

Com Limites de Transmissão					
D. Central.		D Descentral. (1) $v^{sp} = v_0$		D. Descentral.(2) $v^{sp} = v_0$	
Med. 1º M. (MW)	Med. 12 Ms. (MW)	Med. 1º M. (MW)	Med. 12 Ms. (MW)	Med. 1º M. (MW)	Med. 12 Ms. (MW)
1221	1279	1307	1403	1258	1422

Tabela 5.31 – CESP (2) - Volumes reservatórios e desvios padrões médios para vazões afluentes entre 1980 a 1999.

Com Limites de Transmissão					
D. Central.		D Descentral. (1) $v^{sp} = v_0$		D. Descentral.(2) $v^{sp} = v_0$	
Desv. P. (hm ³)	Vol. Tot. (hm ³)	Dev.P. (hm ³)	Vol. Tot. (hm ³)	Dev. P. (hm ³)	Vol. Tot. (hm ³)
9.099	21.740	3.828	36.676	3.377	37.655

Podemos perceber que na solução 1 do despacho descentralizado, a complementação térmica média nos 12 meses foi 9,7% superior ao despacho centralizado, o que resultou num aumento de 68,7% no volume de água armazenada pelas usinas ao final do período de planejamento.

Em uma segunda possível solução de despacho descentralizado foi observado um incremento de 11,2% na complementação térmica nos doze meses, se comparado ao despacho centralizado. Essa redução na participação das hidrelétricas no mercado resultou num aumento de 73,2% do volume de água armazenado pelas usinas, ao final do período de planejamento.

Para o sistema SUL, uma segunda solução para o despacho descentralizado é mostrada nas tabelas 5.32 e 5.33, apresentando valores de complementação térmica, desvios padrões médios e volumes finais nos reservatórios. As soluções de despacho centralizado e descentralizado (1) também correspondem aos valores anteriormente mostrados e discutidos.

Tabela 5.32 – SUL (2) - Média de geração térmica para vazões afluentes entre 1980 a 1999.

Com Limites de Transmissão					
D. Central.		D Descentral. (1) $v^{sp} = v_0$		D. Descentral.(2) $v^{sp} = v_0$	
Med. 1º M. (MW)	Med. 12 Ms. (MW)	Med. 1º M. (MW)	Med. 12 Ms. (MW)	Med. 1º M. (MW)	Med. 12 Ms. (MW)
736	660	1161	1193	781	1177

Tabela 5.33 – SUL (2) - Volumes reservatórios e desvios padrões médios para vazões afluentes entre 1980 a 1999.

Com Limites de Transmissão					
D. Central.		D Descentral. (1) $v^{sp} = v_0$		D. Descentral.(2) $v^{sp} = v_0$	
Desv. P. (hm ³)	Vol. Tot. (hm ³)	Dev.P. (hm ³)	Vol. Tot. (hm ³)	Dev. P. (hm ³)	Vol. Tot. (hm ³)
2.593	17.208	259,94	22.254	323,9	20.802

Tanto a primeira como a segunda solução no despacho descentralizado, resultaram em um aumento da complementação térmica média do sistema durante o período de planejamento, onde a segunda solução resultou num aumento de 78,3% na complementação térmica média do sistema, se comparado ao despacho centralizado. Como consequência, houve um incremento de 20,9% no volume final de água armazenada nas usinas na nova solução encontrada para o despacho descentralizado.

Podemos observar, pelas tabelas 5.30, 5.31, 5.32, 5.33, que as propriedades de cada uma das soluções obtidas apenas apontam para

possíveis acordos que podem ser alcançados entre os produtores, onde a escolha da melhor solução deverá ser feita sob algum critério adicional, pré estabelecido pelo mercado.

Não será demonstrado neste trabalho, contudo, o despacho por equilíbrio de Nash também apresenta inúmeras soluções de equilíbrio, que alteram-se de acordo com os valores de inicialização das variáveis e ainda pela ordem com que os produtores participam do mercado, o que resulta num maior número de soluções possíveis se comparado ao modelo com consistência de preços.

5.8 Desempenho Computacional dos Métodos

Todas as simulações realizadas neste trabalho foram feitas em com um processador Core 2 Quad, rodando a 2.32GHz e 2GB de RAM. Foram ainda utilizadas as versões MatLab 7.11.0584 R2010b e GAMS 23.7.3 VS8 x86/MS.

O tempo computacional exigido em cada simulação depende de fatores como: (i) modelo de despacho, (ii) limites nas linhas e (iii) número de cenários. Na definição do despacho centralizado o tempo exigido para solução foi menor que nos casos de despacho descentralizado, sendo que o equilíbrio de Nash foi o que demandou mais tempo se comparado ao modelo por consistência de preços, para o mesmo número de cenários e dados do sistema.

5.9 Conclusões

Como foi demonstrado no capítulo anterior, e comprovado neste, em um sistema com predomínio de geração hidrelétrica, o despacho descentralizado com consistência de preços é obtido resolvendo um MPEC. Já no despacho descentralizado sem consistência de preços a solução é um ponto de equilíbrio de Nash. Nas soluções obtidas para o despacho descentralizado são atendidas as restrições de produção impostas pelos geradores (ao definirem suas ofertas) e ainda as restrições do sistema (impostas pelo operador central).

Foi possível ainda verificar como as estratégias dos produtores ao definir suas ofertas, têm influência sobre o despacho final do sistema no despacho descentralizado, tanto por consistência de preços como por equilíbrio de Nash. Nos casos analisados, quanto menos conservadores forem os produtores ao definir suas metas de volume final

de água armazenada em seus reservatórios, mais próxima do despacho centralizado fica a solução final.

Vimos também que alterando os valores de inicialização, diferentes soluções ótimas são encontradas, tanto no despacho descentralizado com consistência de preços como por equilíbrio de Nash, sendo que por Nash as soluções de equilíbrio diferem também pela ordem com que os produtores participam do mercado. As diferentes soluções de equilíbrio em ambos os casos apenas apontam para possíveis acordos que podem ser alcançados entre os produtores.

6 CONCLUSÕES

A elaboração deste trabalho surgiu em um contexto de reformas bem sucedidas no setor elétrico pelo mundo e de algumas deficiências ainda observadas no modelo brasileiro. Dentre alguns dos problemas observados no Brasil, destacam-se as distorções entre o despacho físico e comercial realizado pelo operador do sistema, com efeito direto nos preços da energia estimados pelos agentes e repassados aos consumidores finais.

Como forma de introduzir um modelo de mercado onde as empresas geradoras possam assumir mais riscos e responsabilidades por suas decisões, este trabalho mostra como é possível incentivar essas empresas a serem capazes de definir suas ofertas, por meio de estratégias baseadas nos montantes de água armazenada em seus reservatórios ao final do período de planejamento. Desta forma, o despacho de geração no sistema passa a não ser definido somente pelos interesses do operador do sistema (minimizar geração térmica), mas também pelos interesses das empresas geradoras. Deve ser encontrado um ponto de equilíbrio na operação considerando esses objetivos, que são por vezes antagonísticos.

Assim, tendo como foco os sistemas com predomínio de geração hidrelétrica, foi analisado um novo modelo de planejamento da operação, o qual oferece uma maior autonomia aos geradores em definir suas ofertas ao mercado, sem excluir o papel do operador nacional do sistema, que passa a ser responsável pela coordenação destas ofertas. Buscando assim, uma maior eficiência do mercado de energia elétrica.

Como abordamos um horizonte de médio prazo com discretização mensal, a estocasticidade do problema foi tratada por meio da programação estocástica em dois estágios, que reduz o número de cenários considerados como forma de evitar a “maldição da dimensionalidade”. Assim, para não comprometer a qualidade da solução obtida, foi utilizado o método da janela deslizante, que por meio de sucessivas simulações, faz uma mímica do que é realizado no planejamento da operação de usinas ao longo de um ano.

Em um sistema com predomínio de geração hidrelétrica, o despacho descentralizado pode ser obtido resolvendo um problema de equilíbrio com restrições de equilíbrio (EPEC), onde as soluções são pontos de equilíbrio de Nash.

Quando consideramos consistência de preços, o EPEC torna-se um problema matemático com restrições de equilíbrio (MPEC), que

corresponde a um único problema em dois níveis, que leva em consideração as ofertas realizadas pelos produtores bem como as restrições operativas do sistema.

Resolvendo-se analiticamente o problema de nível inferior, correspondente ao problema do operador do sistema, o MPEC se reduz ainda a um problema não linear de um único nível. As soluções obtidas no despacho descentralizado são mais vantajosas aos produtores, se comparadas às obtidas no despacho centralizado. Contudo, do ponto de vista do operador do sistema, as soluções do despacho centralizado são melhores.

No entanto, as soluções do despacho descentralizado tendem a se aproximar das do despacho centralizado quando da presença de linhas de transmissão no sistema e quanto mais favoráveis forem os cenários de vazões afluentes, já que as soluções do despacho descentralizado são influenciadas pelas estratégias dos produtores ao definirem suas metas, em termos de água armazenada em seus reservatórios.

Por fim, foi possível verificar como as soluções de equilíbrio do despacho descentralizado diferem das soluções do problema de despacho centralizado. Isso é resultado da integração dos interesses dos produtores aos interesses do operador do sistema em um único problema, como forma de incentivar a competição na geração e tornar o mercado mais eficiente economicamente. Como o despacho descentralizado é fortemente afetado pelas estratégias de ofertas dos produtores, para que a sociedade se beneficie de tal procedimento, é necessário que sejam incluídas medidas reguladoras ao mercado.

6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

O modelo de planejamento de médio prazo da operação de um sistema com predomínio de geração hidrelétrica analisado neste trabalho possibilitou a inclusão dos objetivos dos produtores no problema de planejamento do sistema elétrico.

Como sugestões de trabalhos futuros destaca-se:

- Realizar testes adicionais com o modelo de despacho descentralizado com consistência de preços para verificar em quais situações sua solução se aproxima da solução do despacho centralizado;
- Analisar mais detalhadamente os resultados do despacho descentralizado sem consistência de preços,
- Incluir, no modelo, a representação das usinas térmicas.

- Analisar possíveis medidas regulamentares para limitar o montante de energia térmica a ser fornecida em cada fase do período de planejamento;
- Efetuar uma análise do custo de oportunidade de ter menos água disponível em períodos futuros, dependendo das estratégias dos produtores;
- Estudar a interpretação econômica dos multiplicadores de Lagrange do problema;
- Buscar formas para resolver o problema de despacho descentralizado sem consistência de preços que não exijam a resolução sequencial do problema definido para cada produtor;
- Analisar casos em que a complementação térmica ocorra apenas em pontos específicos da rede.

**APÊNDICE A – DADOS DO SISTEMA CESP4H 15
BARRAS**

Tabela A.1 – Dados das usinas (CESP)

Usina	η	d	q^{\min} (hm^3/h)	q^{\max} (hm^3/h)	v^{\min} (hm^3)	v^{\max} (hm^3)	V_0 (hm^3)	ph^{\min} (MW)	ph^{\max} (MW)
A. Verm.	1.5427	2.4277	1.578	10.519	5856	11025	10000	0	1380
Capiv.	1.3608	2.1425	1.575	6.278	4816	10540	10000	0	640
I. solt.	1.1867	5.3650	4.505	31.824	8232	21060	19500	0	3240
Jupiá.	0.5935	2.1427	3.600	27.367	2450	3680	3000	0	1411

Tabela A.2 – Demanda (CESP) por barra (MW)

Barra	Período											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	349,98	376,29	373,96	357,64	347,32	345,32	340,33	339,66	360,64	375,96	350,32	372,96
2	21,02	22,60	22,46	21,48	20,86	20,74	20,44	20,40	21,66	22,58	21,04	22,40
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1118,26	1202,32	1194,87	1142,74	1109,75	1103,37	1087,41	1085,28	1152,31	1201,26	1119,33	1191,68
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	1723,64	1853,20	1841,72	1761,36	1710,52	1700,68	1676,08	1672,80	1776,12	1851,56	1725,28	1836,80
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	76,72	82,49	81,98	78,40	76,14	75,70	74,61	74,46	79,06	82,42	76,80	81,76
11	1104,60	1187,63	1180,27	1128,77	1096,19	1089,89	1074,12	1072,02	1138,23	1186,58	1105,65	1177,12
12	832,39	894,96	889,42	850,61	826,06	821,30	809,42	807,84	857,74	894,17	833,18	887,04
13	95,64	102,83	102,19	97,73	94,91	94,37	93,00	92,82	98,55	102,74	95,73	101,92
14	53,60	57,63	57,27	54,77	53,19	52,89	52,12	52,02	55,23	57,58	53,65	57,12
15	260,65	280,24	278,50	266,35	258,66	257,18	253,46	252,96	268,58	279,99	260,90	277,76

Tabela A.3 – Dados do sistema CESP

Barra		r	x	fI^{\max}
De	Para	(p.u.)	(p.u.)	(MW)
1	3	0.0042	0.0568	5000
1	4	0.0040	0.0639	5000
1	8	0.0018	0.0236	5000
1	11	0.0013	0.0172	4800
1	12	0.0018	0.0236	5650
2	4	0.0015	0.0188	2900
2	6	0.0014	0.0182	3800
3	8	0.0019	0.0243	7000
3	10	0.0009	0.0121	5800
3	13	0.0024	0.0304	5600
4	5	0.0018	0.0241	4680
4	7	0.0021	0.0258	4800
4	8	0.0020	0.0248	5700
4	9	0.0007	0.0096	4800
5	7	0.0023	0.0306	4800
5	12	0.0018	0.0233	4500
6	15	0.0014	0.0185	2800
7	12	0.0009	0.0124	3500
8	9	0.0256	0.0675	4800
9	14	0.0010	0.0833	4800
10	11	0.0320	0.1070	4800

APÊNDICE B – DADOS DO SISTEMA SUL7H 32 BARRAS

Tabela B.1 – Dados das usinas (SUL)

Usina	η	d	q^{\min}	q^{\max}	v^{\min}	v^{\max}	V_0	ph^{\min}	ph^{\max}
			(hm^3/h)	(hm^3/h)	(hm^3)	(hm^3)				($hm^3$)	($MW$)	($MW$)
S. Osório	1.7533	0.480689	0.274155	6.4224	1124	1124	1124	0	1078
P. Fundo	6.0863	0.018693	0.003071	0.3744	185	1589	245.6	0	226
S. Santiago	2.5367	0.192505	0.075886	5.6736	2662	6775	5420	0	1420
F. do Arica	3.4408	0.284377	0.082648	4.9536	1974	5779	4565.4	0	1676
Itã	2.5604	0.1556147	0.0607779	5.7240	5100	5100	5100	0	1450
S. Caxias	1.6811	0.308859	0.183728	7.5600	3160	3160	3160	0	1240
Segredo	2.8228	0.285572	0.101165	4.5648	2562	2950	2800	0	1260

Tabela B.2 – Demanda (SUL) por barra (MW)

Barra	Período											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	353.68	368.73	372.49	338.63	312.29	312.27	312.31	316.05	323.57	331.10	361.20	376.25
2	457.31	476.77	481.63	437.85	403.79	403.77	403.82	408.66	418.39	428.12	467.04	486.50
3	2.2800	237.70	240.12	218.29	201.32	201.30	201.33	203.74	208.59	213.44	232.85	242.55
4	439.22	457.91	462.58	420.52	387.82	387.79	387.84	392.49	401.83	411.18	448.56	467.25
5	254.98	265.83	268.54	244.13	225.14	225.12	225.15	227.85	233.27	238.70	260.40	271.25
6	208.92	217.81	220.03	200.02	184.47	184.45	184.48	186.69	191.13	195.58	213.36	222.25
7	389.87	406.46	410.60	73.28	344.24	344.22	344.27	348.39	356.69	364.98	398.16	414.75
8	421.12	439.04	43.52	403.20	371.84	371.81	371.87	376.32	385.28	394.24	430.08	448.00
9	822.50	857.50	866.25	787.50	726.25	726.20	726.30	735.00	752.50	770.00	840.00	875.00
10	177.66	185.22	187.11	170.10	156.87	156.86	156.88	158.76	162.54	166.32	181.44	189.00
11	241.81	252.11	254.68	231.52	213.52	213.50	213.53	216.09	221.23	226.38	246.96	257.25
12	1233.75	1286.25	1299.37	1181.25	1089.37	1089.30	1089.45	1102.50	1128.75	1155.00	1260.00	1312.50
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	462.24	481.92	486.83	442.57	408.15	408.12	408.18	413.07	422.91	432.74	472.08	491.75
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	41.70	43.48	43.92	39.93	36.82	36.82	36.82	37.26	38.15	39.04	42.59	44.36
21	54.09	56.39	56.96	51.79	47.76	47.75	47.76	48.33	49.48	50.64	55.24	57.54
22	51.72	53.92	54.47	49.52	45.67	45.66	45.67	46.22	47.32	48.42	52.82	55.02
23	33.23	34.64	35.00	31.81	29.34	29.34	29.34	29.69	30.40	31.11	33.94	35.35
24	39.63	41.31	41.74	37.94	34.99	34.99	34.99	35.41	36.26	37.10	40.47	42.16
25	153.33	159.86	161.49	146.81	135.39	135.38	135.40	137.02	140.28	143.54	156.59	163.12
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	427.70	445.90	450.45	409.50	377.65	377.62	377.68	382.20	391.30	400.40	436.80	455.00
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32	632.77	659.69	666.42	605.84	558.72	558.68	558.76	565.45	578.91	592.38	646.23	673.16

Tabela B.3 – Dados do Sistema SUL

Barra		r	x	fI^{\max}	Barra		r	x	fI^{\max}
De	Para	(p.u.)	(p.u.)	(MW)	De	Para	(p.u.)	(p.u.)	(MW)
11	1	0.0306	0.1165	1310	16	9	0	0.0125	2670
11	1	0.0306	0.1165	1310	15	17	0.0016	0.0205	2700
1	2	0.0316	0.1621	1310	17	18	0.0025	0.0309	2700
1	2	0.0316	0.1621	1310	18	12	0	0.0125	2670
2	3	0.0172	0.0854	1310	18	12	0	0.0125	1670
2	3	0.0172	0.0854	1310	18	12	0	0.0125	2670
3	4	0.0463	0.2378	1310	18	12	0	0.0125	2670
3	4	0.0463	0.2378	1310	6	19	0.0228	0.1183	2310
4	5	0.0386	0.1987	1310	7	19	0.0253	0.1313	2310
4	12	0.0158	0.0824	1310	6	20	0.0042	0.0590	2670
4	12	0.0158	0.0824	1310	19	21	0.0062	0.0621	2670
5	6	0.0096	0.1002	1310	20	21	0.0660	0.2683	2232
5	6	0.0096	0.1002	1310	22	21	0.0029	0.0118	2232
6	7	0.0325	0.1650	1310	22	23	0.0246	0.1048	2232
7	8	0.0154	0.0852	1310	24	23	0.0269	0.1181	2232
7	8	0.0154	0.0852	1310	24	25	0.0461	0.1872	2232
9	7	0.0065	0.0823	1310	25	8	0.0020	0.0316	1670
8	9	0.0162	0.0932	1310	7	26	0.0030	0.1152	1670
8	9	0.0162	0.0932	1310	7	26	0.0030	0.1152	1670
9	10	0.0204	0.1046	1310	16	26	0.0127	0.1603	3700
9	11	0.0468	0.2395	1310	14	27	0.0172	0.2170	3700
10	11	0.0353	0.1809	1310	18	27	0.0315	0.3977	3700
11	15	0	0.0125	2670	13	28	0.0011	0.1394	3700
15	13	0.0016	0.0201	2700	29	14	0.0008	0.0108	3700
13	14	0.0015	0.0194	2700	27	32	0.0020	0.0276	3700
14	30	0.0005	0.0070	2700	31	32	0.0012	0.0163	3700
15	16	0.0022	0.0273	2700	30	15	0.0005	0.0070	3700
15	16	0.0024	0.0298	2700	27	17	0.0009	0.0122	3700
16	9	0	0.0125	2670					

REFERÊNCIAS

- [1] PIRES, J. *Desafios da Reestruturação do Setor Elétrico Brasileiro*. Rio de Janeiro: BNDES, Area de Planejamento, Departamento Econômico-DEPEC, 2000.
- [2] VEIGA, M. *Análise da Formação de Preço no MCP Brasileiro*. 19-20 de Maio 2008. Workshop Internacional CCEE.
- [3] FOSSO, O. et al. Generation Scheduling in a Deregulated System. The Norwegian Case. *Power Systems, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 14, n. 1, p. 75–81, 1999.
- [4] MARTINS, A. *Mercado Ibérico de Electricidade-Simulação de um Modelo em Concorrência Perfeita*. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Economia da Universidade do Porto, 2011.
- [5] SILVA, E. L. da. *Formação de Preços em Mercados de Energia Elétrica*. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 2001.
- [6] LOSEKANN, L. *Reestruturação do Setor Elétrico Brasileiro: Coordenação e Concorrência*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003.
- [7] ANEEL. *Capacidade de Geração do Brasil*. Outubro 2012. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.asp>>.
- [8] ELETROBRAS. *Sistema de Informação do Potencial Hidrelétrico Brasileiro - SIPOT*. 2011. Disponível em: <<http://www.eletrobras.com/elb/data/Pages/lumis21d128d3ptbrie.htm>>.
- [9] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Planejamento da Operação Energética*. 2012. Disponível em: <http://www.ons.org.br/avaliacao_condicao/planejamento_op_energetica.aspx>.
- [10] PEREIRA, M.; PINTO, L. Stochastic Optimization of a Multireservoir Hydroelectric System: A Decomposition Approach. *Water Resources Research*, American Geophysical Union, v. 21, n. 6, p. 779–792, 1985.

- [11] CARNEIRO, A.; BOND, P. A Large Scale Application of an Optimal Deterministic Hydrothermal Scheduling Algorithm. *IEEE Transactions on Power System*, v. 5, p. 204–211, 1990.
- [12] SOARES FILHO, S.; CARNEIRO, A. A. Optimal Operation of Reservoirs for Electric Generation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 6, p. 1101–1107, 1991.
- [13] PRITCHARD, G.; PHILPOTT, A.; NEAME, P. Hydroelectric Reservoir Optimization in a Pool Market. *Mathematical programming*, v. 103, n. 3, p. 445–461, 2005.
- [14] CONEJO, A. et al. Self-Scheduling of a Hydro Producer in a Pool-Based Electricity Market. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 17, n. 4, p. 1265–1272, 2002.
- [15] MENDONÇA, A.; DAHL, C. The Brazilian Electrical System Reform. *Energy Policy*, v. 27, n. 2, p. 73–83, 1999.
- [16] LOSEKANN, L. D. *Reestruturação do Setor Elétrico Brasileiro: Coordenação e Concorrência*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003.
- [17] CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. *Visão Geral das Operações na CCEE*. Disponível em: <http://www.ccee.org.br/StaticFile/Arquivo/biblioteca_virtual/Treinamento/Visao_Geral_Operacoes_CCEE_final.pdf>.
- [18] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. *Concessões de Gerações, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica: Perguntas e Respostas*. Setembro 2012. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/mme/>>.
- [19] OSBORNE, M.; RUBINSTEIN, A. *A Course in Game Theory*. New York: MIT press, 1994.
- [20] CORREIA, T. de B. *Modelo de Stackelberg na Competição de Empresas Privadas e Estatais pela Expansão da Oferta de Energia Elétrica*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, 2004.
- [21] STOFT, S. *Power System Economics, Designing Markets for Electricity*. 2002. Disponível em: <<http://stoft.com/metaPage/lib/Stoft-2002-PSE-Ch-1-3,4,5,6.pdf>>.

- [22] ABRANTES, M. L. P. *A Teoria dos Jogos e os Oligopólios*. 2004. Disponível em: <<http://www.ime.usp.br/~rvicente/TeoriaDosJogos.pdf>>.
- [23] ANDERSON, S.; ENGERS, M. Stackelberg Versus Cournot Oligopoly Equilibrium. *International Journal of Industrial Organization*, v. 10, n. 1, p. 127–135, 1992.
- [24] HOBBS, B.; HELMAN, U.; PANG, J. Equilibrium Market Power Modeling for Large Scale Power Systems. In: IEEE. *Power Engineering Society Summer Meeting, 2001*. [S.l.], 2001. v. 1, p. 558–563.
- [25] LEYFFER, S.; MUNSON, T. Solving Multi-Leader–Common-Follower Games. *Optimisation Methods & Software*, v. 25, n. 4, p. 601–623, 2010.
- [26] SCOTT, T.; READ, E. Modelling Hydro Reservoir Operation in a Deregulated Electricity Market. *International Transactions in Operational Research*, v. 3, n. 3-4, p. 243–253, 1996.
- [27] KELMAN, R.; BARROSO, L. A. N.; PEREIRA, M. V. F. Market Power Assessment and Mitigation in Hydrothermal Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 16, p. 354–359, 2001.
- [28] BUSHNELL, J. A Mixed Complementarity Model of Hydrothermal Electricity Competition in the Western United States. *Operations research*, v. 51, n. 1, p. 80–93, 2003.
- [29] BARQUÍN, J.; CENTENO, E.; RENESES, J. Medium-term Generation Programming in Competitive Environments: A New Optimisation Approach for Market Equilibrium Computing. In: *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*. [S.l.: s.n.], 2004. v. 151, n. 1, p. 119–126.
- [30] TESSER, M.; PAGÈS, A.; NABONA, N. An Oligopoly Model for Medium-Term Power Planning in a Liberalized Electricity Market. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 24, p. 67–77, 2009.
- [31] MOLINA, J. et al. Nash-Cournot Equilibria in Hydrothermal Electricity Markets. *Power Systems, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 26, n. 3, p. 1089–1101, 2011.

- [32] ALMEIDA, K. C. de; CONEJO, A. J. Medium-term Power Dispatch in Predominantly Hydro Systems: An Equilibrium Approach. *To be published in the IEEE Transactions on Power Systems*. DOI 10.1109/TPWRS.2012.2227838.
- [33] FINARDI, E. C. *Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos Utilizando Computação de Alto Desempenho*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 1999.
- [34] CONEJO, A.; CARRIÓN, M.; MORALES, J. *Decision Making Under Uncertainty in Electricity Markets*. [S.l.]: Springer, 2010.
- [35] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Séries Históricas de Vazões*. Disponível em: <http://www.ons.org.br/operacao/vazoes_naturais.aspx>.
- [36] BIRGE, J. R.; LOUVEAUX, F. *Introduction to Stochastic Programming*. Nova Iorque: Springer-Verlag, 1997.
- [37] SOARES, S.; CARNEIRO, A. A. Optimal operation of reservoirs for electric generation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 6, n. 3, p. 1101–1107, July 1991.
- [38] MONTICELLI, A. J. *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1983.
- [39] COSTA, A. J. A. S. *Formulação do FPO usando Modelo Linearizado para as Equações da Rede Elétrica*. Abril 2012. Notas de Aula.
- [40] BARD, J. F. *Practical Bilevel Optimization: Algorithms and Applications*. [S.l.]: Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [41] LUO, Z.; PANG, J.; RALPH, D. *Mathematical Programs with Equilibrium Constraints*. [S.l.]: Cambridge University Press, 1996.
- [42] FALK, J.; LIU, J. On Bilevel Programming, Part I: General Nonlinear Cases. *Mathematical Programming*, v. 70, n. 1, p. 47–72, 1995.
- [43] NOCEDAL, J.; WRIGHT, S. *Numerical Optimization*. [S.l.]: Springer verlag, 1999.

-
- [44] BERRY, C. A. et al. Understanding How Market Power can Arise in Network Competition: a Game Theoretic Approach. *Utilities Policy*, Elsevier, v. 8, n. 3, p. 139–158, 1999.
- [45] HU, X.; RALPH, D. Using EPECs to Model Bilevel Games in Restructured Electricity Markets with Locational Prices. *Operations research*, INFORMS, v. 55, n. 5, p. 809–827, 2007.
- [46] ROSENTHAL, R. E. *GAMS - A User's Guide*. 2012. Disponível em: <<http://www.gams.com/dd/docs/bigdocs/GAMSUsersGuide.pdf>>.
- [47] MURTAG, B. A. et al. *MINOS Tutorial*. 2012. Disponível em: <<http://www.gams.com/dd/docs/solvers/minos.pdf>>.