

# A Engenharia de Produção na Contemporaneidade 3

Marcos William Kaspchak Machado  
(Organizador)



 **Atena**  
Editora

Ano 2018

Marcos William Kaspchak Machado  
(Organizador)

# A Engenharia de Produção na Contemporaneidade 3

Atena Editora  
2018

2018 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação e Edição de Arte: Geraldo Alves e Natália Sandrini

Revisão: Os autores

#### Conselho Editorial

- Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília  
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista  
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice  
Profª Drª Juliane Sant’Ana Bento – Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

#### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

Machado, Marcos William Kaspchak  
M149e A engenharia de produção na contemporaneidade 3 [recurso eletrônico] / Marcos William Kaspchak Machado. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2018. – (A Engenharia de Produção na Contemporaneidade; v. 3)

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader.

Modo de acesso: World Wide Web.

Inclui bibliografia

ISBN 978-85-7247-000-1

DOI 10.22533/at.ed.001180912

1. Engenharia econômica. 2. Engenharia de produção.  
3. Pesquisa operacional. I. Título.

CDD 658.5

**Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422**

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

2018

Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)

## APRESENTAÇÃO

A obra “*A Engenharia de Produção na Contemporaneidade*” aborda uma série de livros de publicação da Atena Editora. O volume III apresenta, em seus 25 capítulos, os novos conhecimentos para a engenharia de produção nas áreas de engenharia econômica e pesquisa operacional na tomada de decisão.

As áreas temáticas de engenharia econômica e pesquisa operacional na tomada de decisão, tratam de temas relevantes para otimização dos recursos organizacionais. A constante mutação neste cenário torna necessária a inovação na forma de pensar e fazer gestão, planejar e controlar as organizações, para que estas tornem-se agentes de desenvolvimento técnico-científico, econômico e social.

Tanto as ferramentas da engenharia econômica, como os estudos da pesquisa operacional, auxiliam no processo de tomada de decisão, tornando-as mais assertivas e economicamente eficientes.

Este volume dedicado à aplicação da engenharia econômica e pesquisa operacional na tomada de decisão traz artigos que tratam de temas emergentes sobre a gestão de custos e informações econômicas, análise de viabilidade, gestão financeira e de desempenho, pesquisa operacional e aplicação de métodos multicritério na tomada de decisão.

Aos autores dos capítulos, ficam registrados os agradecimentos do Organizador e da Atena Editora, pela dedicação e empenho sem limites que tornaram realidade esta obra, que retrata os recentes avanços científicos do tema.

Por fim, espero que esta obra venha a corroborar no desenvolvimento de novos conhecimentos e inovações, e auxilie os estudantes e pesquisadores na imersão em novas reflexões acerca dos tópicos relevantes na área de engenharia de produção.

Boa leitura!

Marcos William Kaspchak Machado

## SUMÁRIO

### APLICAÇÃO DA ENGENHARIA ECONÔMICA E PESQUISA OPERACIONAL NA TOMADA DE DECISÃO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
GESTÃO DE CUSTOS DA PRODUÇÃO	
Ivisson de Souza Tasso	
Isabella Tamine Parra Miranda	
João Luiz Kovaleski	
<b>DOI 10.22533/at.ed.0011809121</b>	
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>13</b>
A RELEVÂNCIA DA INFORMAÇÃO CONTÁBIL PARA A TOMADA DE DECISÃO NAS EMPRESAS DE FRANCISCO BELTRÃO.	
Andressa Bender	
Robson Faria Silva	
<b>DOI 10.22533/at.ed.0011809122</b>	
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>24</b>
REDUÇÃO DOS CUSTOS DE MANUTENÇÃO – ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA PARA IMPLANTAÇÃO/CERTIFICAÇÃO DE SPIE (SERVIÇO PRÓPRIO DE INSPEÇÃO DE EQUIPAMENTOS).	
Cleiciano Berlano Miranda de Oliveira	
Leonardo Gomes Machado	
<b>DOI 10.22533/at.ed.0011809123</b>	
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>36</b>
APLICAÇÃO DO CUSTO ANUAL UNIFORME EQUIVALENTE NA IDENTIFICAÇÃO DO MOMENTO ÓTIMO PARA A SUBSTITUIÇÃO DE UMA COLHEDORA DE CANA-DE-AÇÚCAR	
João Matheus Coimbra Stortte	
Márcio Jacometti	
<b>DOI 10.22533/at.ed.0011809124</b>	
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>50</b>
ANÁLISE DE VIABILIDADE PARA SUBSTITUIÇÃO DE EQUIPAMENTOS EM UMA PROPRIEDADE RURAL PRODUTORA DE CAFÉ NO INTERIOR DE MINAS GERAIS	
Gabriela Vilas Boas Pini	
Priscila Nayara Gonçalves	
Gabriela Azevedo Motta	
<b>DOI 10.22533/at.ed.0011809125</b>	
<b>CAPÍTULO 6</b> .....	<b>60</b>
AÇÕES ESTRATÉGICAS EM UMA IMPORTADORA DE ARTIGOS PARA ILUMINAÇÃO: UM ENFOQUE NA VARIAÇÃO CAMBIAL	
Guilherme Mendes Fernandes	
Eduardo Loewen	
Elisete Santos da Silva Zagheni	
Janaina Renata Garcia	
<b>DOI 10.22533/at.ed.0011809126</b>	
<b>CAPÍTULO 7</b> .....	<b>71</b>
CALIBRAÇÃO DO PARÂMETRO DE SUAVIZAÇÃO DO FILTRO L1 PARA UMA POSSÍVEL	

ESTRATÉGIA DE INVESTIMENTOS.

Maria Simone Alves da Silva  
Andrew de Jesus Freitas Silva  
Fernando Luiz Cyrino de Oliveira

**DOI 10.22533/at.ed.0011809127**

**CAPÍTULO 8 ..... 82**

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO FUTURO DO PREÇO DO CIMENTO PORTLAND CP IV

Bianca Reichert  
Adriano Mendonça Souza

**DOI 10.22533/at.ed.0011809128**

**CAPÍTULO 9 ..... 92**

PERFORMANCE ECONÔMICO-FINANCEIRA DO SETOR DE PAPEL E CELULOSE BRASILEIRO:  
TESTANDO A INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS MACROECONÔMICAS VIA METODOLOGIA DE TODA  
E YAMAMOTO E REDES NEURAIS ARTIFICIAIS.

Pedro de Moraes Rocha  
Vitória Gomes da Costa  
Yasmin Leão Sodré Soares  
Daiane Rodrigues dos Santos

**DOI 10.22533/at.ed.0011809129**

**CAPÍTULO 10 ..... 115**

ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE AS EXPECTATIVAS MACROECONÔMICAS BRASILEIRAS  
DIVULGADAS NO RELATÓRIO FOCUS E OS ÍNDICES SETORIAIS DA B3

Stéfan Thomassen Andrade  
Mirela Castro Santos Camargos  
Marcos Antônio de Camargos

**DOI 10.22533/at.ed.00118091210**

**CAPÍTULO 11 ..... 133**

MAPEAMENTO DE FERRAMENTAS ORIUNDAS DA CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO QUE BUSQUEM  
AUTOMATIZAR, APOIAR OU MODELAR PROBLEMAS DAS ORGANIZAÇÕES NO SEGMENTO  
FINANCEIRO

Wagner Igarashi  
Deisy Cristina Corrêa Igarashi

**DOI 10.22533/at.ed.00118091211**

**CAPÍTULO 12 ..... 149**

MAPEAMENTO DO PERFIL DE NOVOS INVESTIDORES DO MERCADO DE VALORES MOBILIÁRIOS  
BRASILEIRO

Estevão Cristian da Silva Leite

**DOI 10.22533/at.ed.00118091212**

**CAPÍTULO 13 ..... 165**

APLICAÇÃO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA NA MAXIMIZAÇÃO DO LUCRO DE UMA  
EMPRESA DO SETOR DE BELEZA E ESTÉTICA

Weverton Silveira de Almeida  
Marilane Elias da Silva  
Nícolás Victor Martins dos Santos  
Lana Muriela Ribeiro  
Stella Jacyszyn Bachega

**DOI 10.22533/at.ed.00118091213**



<b>CAPÍTULO 14</b> .....	<b>178</b>
UM ESTUDO COMPUTACIONAL DO PROBLEMA DE AGRUPAMENTO COM SOMA MÍNIMA DE DISTÂNCIAS	
Augusto Pizano Vieira Beltrão José André de Moura Brito	
<b>DOI 10.22533/at.ed.00118091214</b>	
<b>CAPÍTULO 15</b> .....	<b>190</b>
APLICAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO DINÂMICA NA ANÁLISE DO ESTOQUE DE UMA INDÚSTRIA MOVELEIRA	
Everton Ortiz Rocha Michell Eduardo Dallabrida	
<b>DOI 10.22533/at.ed.00118091215</b>	
<b>CAPÍTULO 16</b> .....	<b>199</b>
PROBLEMA DE PORTFÓLIO DE MÉDIO PRAZO PARA UM GERADOR HIDROELÉTRICO	
Tiago Forti da Silva Leonardo Nepomuceno	
<b>DOI 10.22533/at.ed.00118091216</b>	
<b>CAPÍTULO 17</b> .....	<b>212</b>
ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO ERRO DE PREVISÃO DA TEMPERATURA SOBRE O ERRO DE PREVISÃO A CURTO PRAZO DA CARGA ELÉTRICA	
Anna Cláudia Mancini da Silva Carneiro Henrique Steinherz Hippert	
<b>DOI 10.22533/at.ed.00118091217</b>	
<b>CAPÍTULO 18</b> .....	<b>222</b>
APLICAÇÃO DO MÉTODO HÍBRIDO ARIMA-RNA PARA A PREDIÇÃO DOS CUSTOS DE INTERNAÇÃO PELO SISTEMA ÚNICO DE SAÚDE NA CIDADE DE SÃO PAULO	
Nayara Moreira Rosa João Chang Junior Cláudia Aparecida de Mattos	
<b>DOI 10.22533/at.ed.00118091218</b>	
<b>CAPÍTULO 19</b> .....	<b>234</b>
APLICAÇÃO DA TEORIA DAS FILAS: MELHORIA DO ATENDIMENTO DO HOSPITAL UNIVERSITÁRIO MARIA APARECIDA PEDROSSIAN	
Fernando Rocha Passos Júnior Lilian Milena Ramos Carvalho	
<b>DOI 10.22533/at.ed.00118091219</b>	
<b>CAPÍTULO 20</b> .....	<b>245</b>
A UTILIZAÇÃO DO MÉTODO AHP NA PRIORIZAÇÃO DE ORDENS DE SERVIÇO: O ESTUDO DE CASO NA PREFEITURA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA	
Nathan Nogueira Freitas Marcos Vilarindo Paeslandim Rodrigues	
<b>DOI 10.22533/at.ed.00118091220</b>	
<b>CAPÍTULO 21</b> .....	<b>259</b>
ANALYTIC HIERARCHY PROCESS COMO FERRAMENTA DE APOIO A SERVITIZAÇÃO E POSICIONAMENTO ESTRATÉGICO DE RESTAURANTES	
Wellington Goncalves	

Rodrigo Randow de Freitas  
Fernando Nascimento Zatta  
Keydson Quaresma Gomes

**DOI 10.22533/at.ed.00118091221**

**CAPÍTULO 22 ..... 272**

UTILIZAÇÃO DO AMD NA ESCOLHA DE UM SISTEMA ERP VISANDO A EXPANSÃO DE UMA  
EMPRESA DO VAREJO PARA O ECOMMERCE

Ingrid Dantas Silva  
Marcos Santos  
Marcone Freitas Reis

**DOI 10.22533/at.ed.00118091222**

**CAPÍTULO 23 ..... 286**

REVISÃO BIBLIOMÉTRICA SOBRE A ANÁLISE DE DECISÃO MULTICRITÉRIO NA ÁREA DA SAÚDE

Deyse Gillyane Gomes Camilo  
Talita Dias Chagas Frazão  
Ricardo Pires de Souza  
Bruno Cesar Linhares  
Adeliane Marques Soares  
Amanda Gomes de Assis

**DOI 10.22533/at.ed.00118091223**

**CAPÍTULO 24 ..... 300**

ANÁLISE DO PROCESSO DE PREMIAÇÃO DAS ÁREAS INTEGRADAS DE SEGURANÇA NO RIO  
DE JANEIRO: UMA ABORDAGEM MULTICRITÉRIO

Marcio Pereira Basilio  
Valdecy Pereira

**DOI 10.22533/at.ed.00118091224**

**CAPÍTULO 25 ..... 321**

APLICAÇÃO DE MÉTODO MULTIPARAMÉTRICO COMO AUXÍLIO À AVALIAÇÃO DE NECESSIDADE  
DE SUBSTITUIÇÃO DE EQUIPAMENTOS MÉDICO-HOSPITALARES

Marcelo Antunes Marciano  
Eliezer Knob de Souza

**DOI 10.22533/at.ed.00118091225**

**SOBRE O ORGANIZADOR..... 329**



## PROBLEMA DE PORTFÓLIO DE MÉDIO PRAZO PARA UM GERADOR HIDROELÉTRICO

**Tiago Forti da Silva**

Universidade Estadual Paulista – UNESP Bauru –  
FEB

Bauru, São Paulo

**Leonardo Nepomuceno**

Universidade Estadual Paulista – UNESP Bauru –  
FEB

Bauru, São Paulo

**RESUMO:** O mercado *pool* de energia consiste em uma série de leilões diários onde a eletricidade é negociada de acordo com um preço horário, apresentando possibilidade de grandes lucros porém com um alto risco associado. Por outro lado, no mercado de futuros a venda de energia ocorre através de contratos de médio e longo prazo com preços conhecidos no momento da negociação, podendo ser usado como ferramenta de *hedging*. Dessa maneira, um agente gerador deve distribuir sua capacidade produtiva entre os dois mercados, de forma a buscar um equilíbrio entre o aumento dos lucros e a diminuição dos riscos associados, o que recebe o nome de problema de portfólio. No caso dos geradores hidrelétricos, a sua capacidade produtiva varia com o volume armazenado nos reservatórios, tornando necessária a coordenação entre a venda de energia e o gerenciamento hidráulico. Esse trabalho propõe um modelo de otimização

para resolver o problema de portfólio de um gerador hidroelétrico utilizando o valor de risco condicional CVaR como medida de risco. A ferramenta proposta é testada para um sistema realista com 13 usinas hidrelétricas considerando um horizonte de planejamento de 1 ano.

**PALAVRAS-CHAVE:** Problema de Portfólio; Mercados de Eletricidade; Programação Estocástica.

**ABSTRACT:** The pool electricity market consists of a series of daily auctions where electricity is traded according to an hourly price, presenting possibility of high profits but with a high associated risk. On the other hand, in the futures market the trading of energy occurs through medium- and long-term contracts with known prices at the time of negotiation, and can be used as a hedging tool. In this way, a generating agent should distribute its generation capacity between these two markets, aiming to a balance between increasing the profits and reducing the associated risks, which is called the portfolio problem. In the case of hydroelectric generators, their generation capacity varies with the volume stored in the reservoirs, making necessary the coordination between the sale of energy and the hydraulic management. This work proposes an optimization model to solve the portfolio problem of a hydroelectric generator

using conditional value at risk (CVaR) as a risk measure. The proposed tool is tested for a realistic system with 13 hydroelectric plants considering a planning horizon of 1 year.

**KEYWORDS:** Power Portfolio Optimization; Electricity Market; Stochastic Programming.

## 1 | NOMENCLATURA

### 1.1 Índices

$f$	Índice de contratos de futuros disponíveis $\{1, \dots, N_f\}$ ;
$g$	Índice de usinas $\{1, \dots, N_g\}$ ;
$j$	Índice de blocos das curvas de contratos de futuros $\{1, \dots, N_j\}$ ;
$t$	Índice de períodos $\{1, \dots, N_t\}$ ;
$\omega$	Índice de cenários de preço $\{1, \dots, N_\omega\}$ ;
$h$	Índice de cenários de vazão $\{1, \dots, N_h\}$ .

### 1.2 Constantes

$C_g$	Custo de geração da unidade $g$ (\$/MWh);
$D_t$	Duração do período $t$ (h);
$E_t^{old}$	Energia de contratos anteriores ao planejamento (MWh);
$F_1$	Fator de conversão igual a 0,0036;
$H_g$	Altura de queda média da usina $g$ (m);
$K_g$	Produtibilidade média considerada para a usina $g$ (MW/m <sup>3</sup> /s/m);
$\bar{P}_{fj}$	Limite do bloco $j$ do contrato $f$ (MW);
$P_g^{\max}$	Potência instalada da usina $g$ (MW);
$V_g^0$	Volume inicial da usina $g$ (Hm <sup>3</sup> );
$V_g^{\max}$	Volume máximo inicial da usina $g$ (Hm <sup>3</sup> );
$V_g^{\min}$	Volume mínimo da usina $g$ (Hm <sup>3</sup> );
$\lambda_{fj}^F$	Preço do bloco $j$ do contrato $f$ (\$/MWh);
$\alpha$	Fator de confiança do CvaR;
$\beta$	Fator de ponderação da aversão ao risco;
$\pi_{\omega h}$	Probabilidade de ocorrência dos cenários de preço $\omega$ e vazão $h$ .

### 1.3 Realizações de Cenários

$\lambda_{t\omega}$	Realização do preço <i>spot</i> do mercado <i>pool</i> no período $t$ para o cenário de preços $\omega$ (\$/MWh);
$\Psi_{gth}$	Realização da vazão afluente da usina $g$ no período $t$ para o cenário $h$ (Hm <sup>3</sup> /s).

## 1.4 Variáveis Reais

$e_{twh}^P$	Energia ofertada no <i>pool</i> no período $t$ para os cenários de preço $\omega$ e de vazão $h$ (MWh);
$e_{gtwh}^{tot}$	Geração da unidade $g$ no período $t$ para os cenários $\omega$ e $h$ (MWh);
$p_{fj}^F$	Potência contratada no bloco $j$ do contrato de futuros $f$ (MW);
$\zeta$	Variável auxiliar do cálculo do CvaR;
$\xi\omega h$	Variável auxiliar do cálculo do CvaR atrelada aos cenários $\omega$ e $h$ ;
$q_{gtwh}$	Turbinagem da usina $g$ no período $t$ para os cenários $\omega$ e $h$ (m <sup>3</sup> /s);
$s_{gtwh}$	Vertimento da usina $g$ no período $t$ para os cenários $\omega$ e $h$ (m <sup>3</sup> /s);
$v_{gtwh}$	Volume da usina $g$ no período $t$ para os cenários $\omega$ e $h$ (m <sup>3</sup> /s).

## 2 | INTRODUÇÃO

O mercado *pool* de energia consiste em uma série de leilões realizados diariamente, onde o agente gerador vende energia de acordo com um preço *spot* horário, apresentando oportunidades de lucros altos mas também uma elevada volatilidade dos preços (ARROYO; CONEJO, 2002). Por outro lado, o mercado de futuros negocia a venda de energia através de contratos de longo prazo com preços conhecidos, podendo ser utilizado como ferramenta de *hedging* (STRBAC, 2004). Dessa forma, surge o problema de decidir a quantidade de energia que deve ser ofertada no mercado de futuros e a quantia que deve ser reservada para a negociação no *pool*, visando obter um compromisso entre a maximização dos lucros e a minimização do risco associado (CONEJO et al., 2008).

Quando consideramos o caso de um agente gerador hidroelétrico esse problema se torna mais complexo, uma vez que sua capacidade produtiva varia com a disponibilidade de água (STEEGER; BARROSO; REBENNACK, 2014; WOLFGANG et al., 2009). Por esse motivo, o envolvimento nos mercados *pool* e de futuros deve ser feito de maneira coordenada com o gerenciamento dos níveis de seus reservatórios (SHRESTHA et al., 2005).

### 2.1 Objetivos

O objetivo desse trabalho é desenvolver um modelo de otimização do envolvimento no mercado de futuros para um gerador hidroelétrico, considerando as incertezas associadas ao preço do mercado *pool* e a vazão afluente, utilizando o valor de risco condicional (CVaR) como técnica de mensuração ao risco.

## 2.2 Organização do Trabalho

O trabalho está organizado da seguinte maneira: O modelo proposto é apresentado na Seção 3. Na Seção 4 é realizado um teste preliminar como exemplo, considerando um agente gerador com duas usinas hidrelétricas e um horizonte de uma semana, dividido em sete períodos de um dia. Na Seção 5 o sistema é testado para uma cascata hidráulica com treze usinas, considerando um horizonte de um ano dividido em 365 períodos. Finalmente, na Seção 6 discutem-se os resultados obtidos e são apresentadas as conclusões sobre o trabalho.

## 3 | MODELO

### 3.1 Função Objetivo

$$\text{Maximize}_{P_{ff}^F, e_{t\omega h}^P, e_{gt\omega h}^{tot}, \zeta, \xi} \sum_{\omega=1}^{N_\Omega} \sum_{h=1}^{N_H} \pi_{\omega h} \sum_{t=1}^{N_t} \left( \sum_{f \in F_t} \sum_{j=1}^{N_j} \lambda_{ff}^F p_{ff}^F D_t + \lambda_{t\omega} e_{t\omega h}^P - \sum_{g=1}^{N_g} C_g e_{gt\omega h}^{tot} \right) + \beta \left( \zeta - \frac{1}{1-\alpha} \sum_{\omega=1}^{N_\Omega} \sum_{h=1}^{N_H} \pi_{\omega h} \xi_{\omega h} \right)$$

O primeiro termo da função objetivo representa o lucro do agente gerador, dado pela soma da receita com os contratos de futuros e o valor esperado do lucro no mercado *pool*, descontando-se o custo pela geração de energia. O segundo termo da equação corresponde a mensuração do risco assumido dado pelo CVaR, através do fator de ponderação  $\beta$ . No caso de uma estratégia de atuação conservadora o agente gerador deve escolher altos valores de  $\beta$ , aumentando o peso do CVaR na função objetivo, enquanto um agente disposto a assumir um maior risco visando melhorar seus lucros pode escolher um valor pequeno de  $\beta$ .

### 3.2 Restrições tecno-econômicas

$$0 \leq p_{ff}^F \leq \bar{P}_{ff}, \forall f, j = i, \dots, N_j \quad (2)$$

$$0 \leq e_{gt\omega h}^{tot} \leq P_g^{max} D_t, \forall g, \forall t, \forall \omega, \forall h \quad (3)$$

$$\sum_{g=1}^{N_g} e_{gt\omega h}^{tot} = e_{t\omega h}^P + \sum_{f \in F_t} \sum_{j=1}^{N_j} p_{ff}^F D_t + E_t^{old}, \forall t, \forall \omega, \forall h \quad (4)$$

$$\zeta - \sum_{t=1}^{N_t} \left( \sum_{f \in F_t} \sum_{j=1}^{N_j} \lambda_{ff}^F p_{ff}^F D_t + \lambda_{t\omega} e_{t\omega h}^P - \sum_{g=1}^{N_g} C_g e_{gt\omega h}^{tot} \right) \leq \xi_{\omega h}, \forall \omega, \forall h \quad (5)$$

As restrições (02) a (04) foram propostas por (CONEJO; CARRIÓN; MORALES, 2010), onde as restrições (02) representam o limite dos blocos de contrato no mercado de futuros, enquanto as equações (03) estabelecem a capacidade máxima de geração de cada unidade. As restrições (04) estabelecem que a soma da geração de todas as unidades deve ser equivalente ao total de energia comercializada, considerando o mercado *pool*, o mercado de futuros e possíveis contratos antigos ainda em vigor,

representados pelo termo  $E_t^{old}$ .

As restrições (05) representam o cálculo do valor de risco condicional (CVaR) assumido pelo agente gerador, considerando as incertezas no preço *pool* e na vazão afluente. O CVaR é utilizado por ser facilmente modelado, além de ser uma medida de risco coerente, ou seja, que obedece as propriedades postuladas por (ARTZNER et al., 1999). O conceito do CVaR baseia-se na curva da função lucro, onde considerando-se um quantil  $1-\alpha$  para um dado  $\alpha \in (0,1)$  (o que equivale ao Valor de Risco VaR), o CVaR será dado pela área da curva inferior ao quantil  $1-\alpha$ , conforme mostrado na Figura 1. Isso é equivalente a dizer que o CVaR representa o lucro esperado para os  $1-\alpha$  piores cenários possíveis.

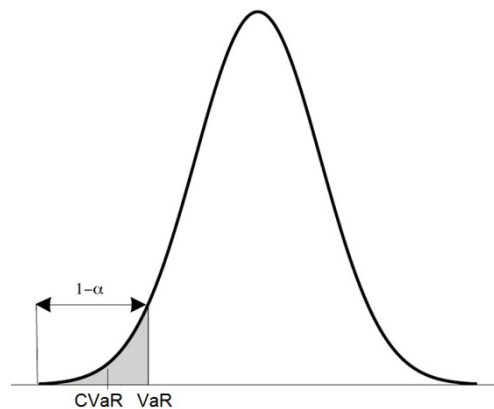


FIGURA 1: Definição do CVaR na função de lucro.

Adaptado de (CONEJO et al., 2008).

### 3.3 Restrições hidráulicas e de não-negatividade

$$e_{gt\omega h}^{tot} = K_g q_{gt\omega h} H_g D_t, \forall g, \forall t, \forall \omega, \forall h \quad (6)$$

$$v_{gt\omega h} = v_{gt-1\omega h} + (\Psi_{gth} - q_{gt\omega h} - s_{gt\omega h}) F_1 D_t, \forall g, \forall t, \forall \omega, \forall h \quad (7)$$

$$V_g^{min} \leq v_{gt\omega h} \leq V_g^{max}, \forall g, \forall t, \forall \omega, \forall h \quad (8)$$

$$v_{gt\omega h} = V_g^0, \forall g, \forall \omega, \forall h, t = N_T \quad (9)$$

$$q_{gt\omega h}, s_{gt\omega h}, e_{t\omega h}^P, \zeta, \xi_\omega \geq 0 \quad (10)$$

As restrições (06) representam uma linearização do rendimento de uma usina hidrelétrica, que é dado pelo produto entre a turbinagem total no período ( $q_{gt\omega h}$ ), a produtividade média ( $K_g$ ) e a altura de queda média verificada naquela usina ( $H_g$ ) (CICOGNA; FILHO, 1999). Finalmente, o termo  $D_t$  representa a duração do período considerado. As restrições (07) representam o balanço hidráulico, considerando que o volume no final do período ( $v_{gt\omega h}$ ) é dado pelo volume do período anterior ( $v_{gt-1\omega h}$ )

hsomado com a resultante entre a vazão afluyente ( $\Psi_{gth}$ ), a turbinagem ( $S_{gtwh}$ ) e o vertimento ( $S_{gtwh}$ ) da usina, multiplicada por um fator de conversão ( $F_1$ ) Novamente é necessário o termo  $D_t$  para levar em consideração as diferentes durações de período consideradas.

As restrições (08) representam os volumes operacionais mínimos e máximos dos reservatórios, enquanto as restrições (09) garantem que o volume final dos reservatórios seja igual ao apresentado no início do primeiro período. Finalmente, as restrições (10) garantem a não-negatividade das variáveis do problema. Note que, para o caso particular de  $e_{wh}^P$ , a não-negatividade pode ser eliminada do modelo para uma situação onde considere-se que o agente gerador possa comprar energia no mercado *pool*.

## 4 | EXEMPLO ILUSTRATIVO

O modelo proposto foi testado para uma companhia geradora com duas usinas hidrelétricas, considerando um horizonte de uma semana dividido em sete períodos de 24 horas. Para os cenários de vazão foram utilizados os dados reais para as usinas de Ituiutaba e Funil Grande para a primeira semana dos meses de fevereiro, maio, agosto e novembro de 2013, além dos seus valores de potência instalada, produtividade e altura de queda média (ONS, 2017). Os cenários de preço estão disponíveis na Tabela 1 (dados em \$/MWh). Para o mercado de futuros, utilizou-se uma curva de preços com quatro blocos de 10 MW de potência e valores de venda de \$ 37.00, \$ 35.00, \$ 33.00 e \$ 30.00, respectivamente.

Período	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
1	46.17	40.66	25.75	26.68
2	51.69	41.37	38.03	31.14
3	52.45	41.67	38.42	32.89
4	57.75	41.45	36.68	30.42
5	52.45	41.85	34.06	36.92
6	51.69	41.35	32.61	24.79
7	50.58	39.38	21.42	25.46

TABELA 1: Cenários de preço spot utilizados.

### 4.1 Risco Neutro

Como referência, foi resolvido o modelo proposto considerando o parâmetro  $b = 0$ , representando uma situação de risco neutro, ou seja, quando o risco associado não é considerado pelo agente gerador.

A solução obtida não apresentou venda de energia no mercado de futuros, deixando toda a capacidade disponível para ser negociada no mercado *pool*. Esse comportamento está de acordo com o esperado, uma vez que o preço *spot* médio



observado nos cenários utilizados é de \$ 38.45, enquanto o melhor preço disponível no mercado de futuros é de \$ 37.00. Pode-se observar na Figura 2 que a curva de energia reservada para ser negociada no mercado *pool* segue a curva de preços *spot*, maximizando o lucro obtido a partir da quantidade limitada de água disponível nos reservatórios.

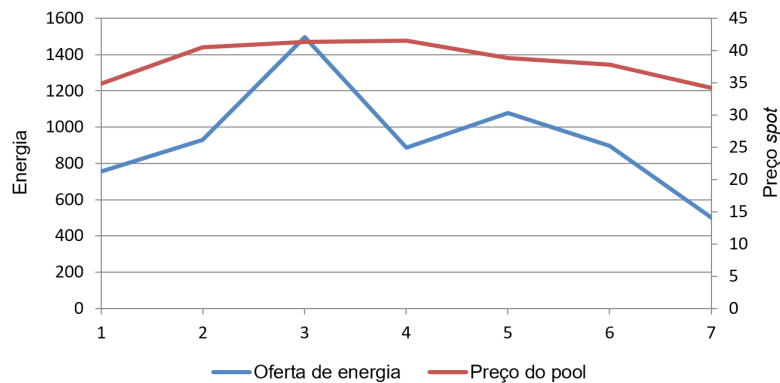


FIGURA 2: Energia reservada para o mercado pool.

O gerenciamento da água pode ser observado na Figura 3, que mostra a variação do volume ao longo do horizonte de planejamento considerado no problema. O volume turbinável é aquele que pode ser utilizado para a geração de energia, dado pela subtração do volume mínimo no volume total do reservatório. Nota-se que existe uma grande armazenagem de água durante o primeiro período, visando aumentar a capacidade produtiva durante os períodos 3 e 4. Esse comportamento é consistente com o preço do mercado *spot*, que atinge seu pico durante esses períodos, com valores médios de \$ 41.36 e \$ 41.58, respectivamente. Finalmente, pode-se observar que o último período é utilizado para armazenar água no reservatório, de modo a atingir a meta de volume final estabelecida e considerando que esse período apresenta o menor preço *spot* médio para todo o horizonte de planejamento.

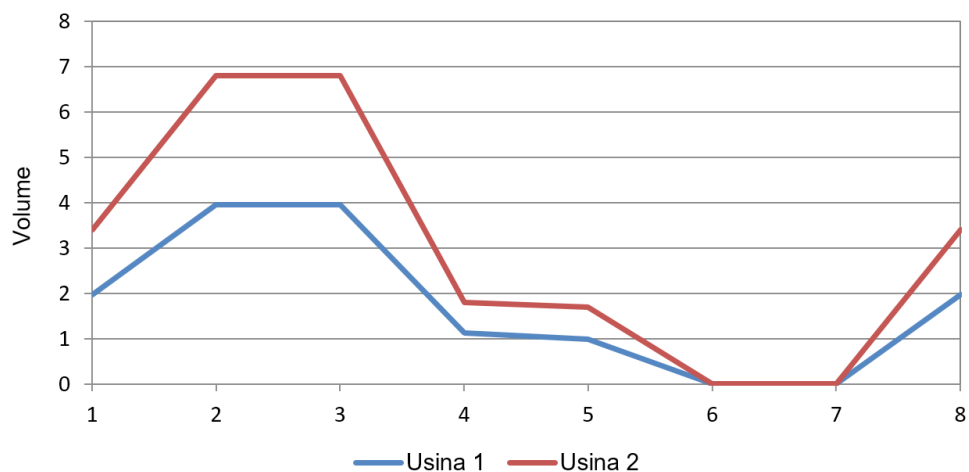


FIGURA 3: Variação do volume armazenado.

O armazenamento de água pode ser observado na Figura 4, onde os períodos em

que a turbinagem da usina 1 apresenta valores maiores coincidem com aqueles onde a vazão afluente é menor, sendo o contrário também verdadeiro. Esse comportamento está de acordo com o esperado, uma vez que a curva de turbinagem deve seguir o comportamento da curva de preços, que são maiores em períodos secos. Esse comportamento reforça o importante papel desempenhado pelos reservatórios na elaboração da estratégia de atuação das companhias geradoras, permitindo deslocar a água da época chuvosa para os períodos de seca.

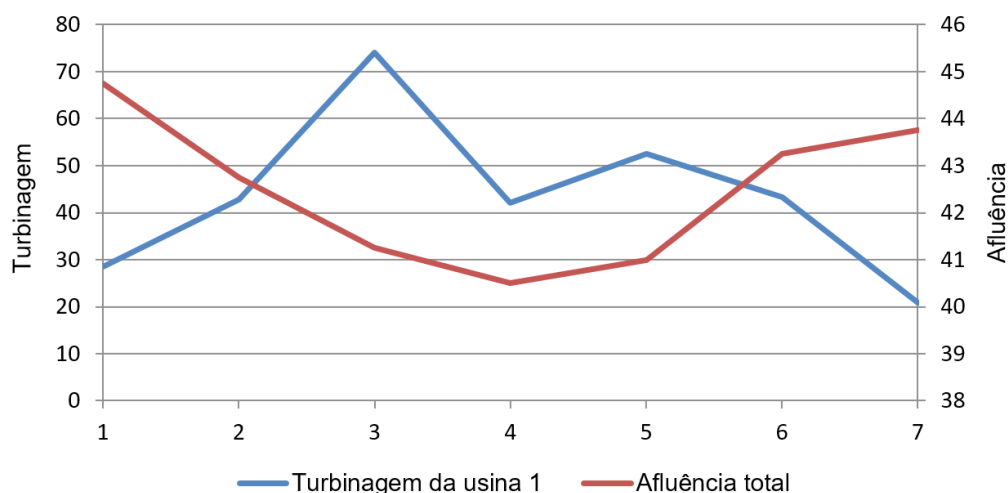


FIGURA 4: Turbinagem versus Vazão Afluente da Usina 1.

## 4.2 Aversão ao Risco

O gerador enfrenta duas fontes de incerteza durante a definição da sua estratégia de portfólio, que consistem no preço do mercado *pool* e na vazão afluente em suas usinas. Para se resguardar da possibilidade de cenários com baixos lucros, pode-se utilizar uma metodologia de mensuração de risco, como o Valor de Risco Condicional (CVaR). Para avaliar o impacto da utilização do CVaR na elaboração da estratégia de portfólio, os valores de beta foram modificados em incrementos de 0,1 unidade, para levantamento da fronteira eficiente do problema com os dados de entrada considerados. Os pontos obtidos podem ser vistos na Figura 5.

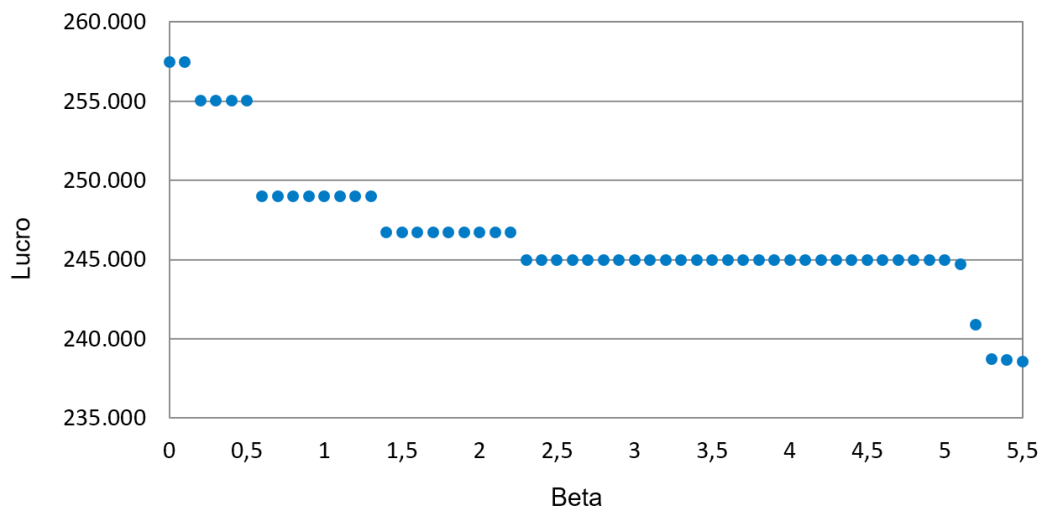


FIGURA 5: Fronteira eficiente para os dados considerados.

A Figura 6 apresenta a energia destinada ao mercado *pool* e ao mercado de futuros para dez valores diferentes de beta, aqueles onde ocorreram variações na fronteira eficiente.

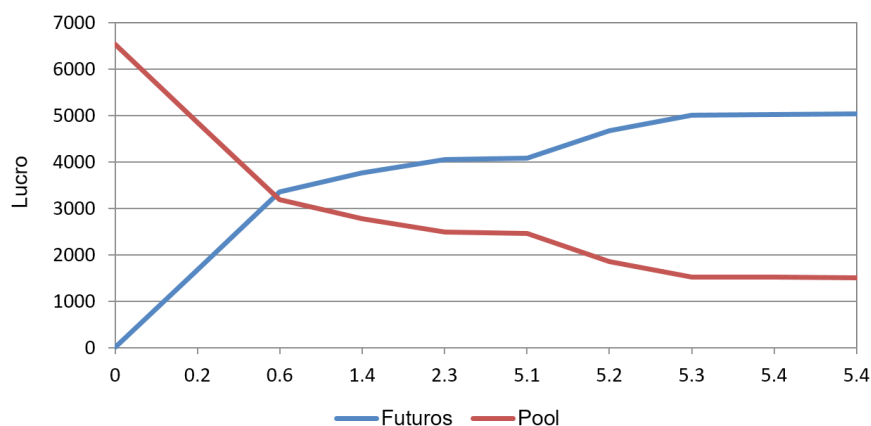


FIGURA 6: Energia destinada aos mercados de futuros e pool de acordo com o valor escolhido para o parâmetro beta.

Percebe-se a tendência de transferir energia do mercado *pool* para o mercado de futuros conforme o aumento de beta, uma vez que o mercado de futuros não apresenta incertezas no preço de venda da energia, eliminando assim uma das fontes de risco associadas ao problema.

No que se refere a incerteza associada às vazões afluentes, o mecanismo que o gerador pode utilizar para se resguardar é assumir um gerenciamento conservador do seu reservatório, armazenando maiores quantidades de água do que seria feito no caso de referência. Esse comportamento pode ser percebido mais claramente na usina 2, devido a sua maior capacidade de armazenamento, conforme mostrado na Figura 7, onde os valores de volume armazenado estão representados em porcentagem.

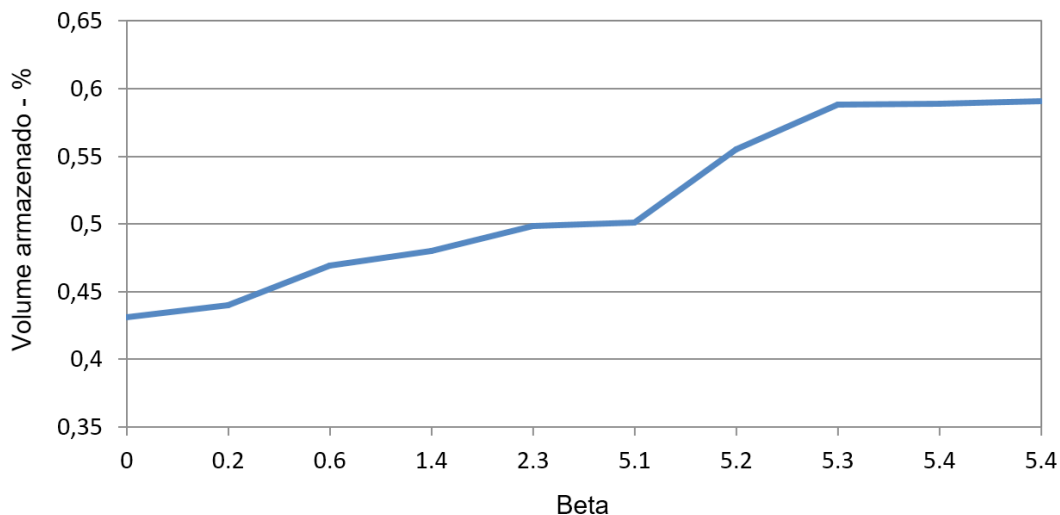


FIGURA 7: Volume armazenado (%) em relação ao fator beta.

## 5 | SEGUNDO TESTE

Para verificar seu funcionamento em sistemas realistas, o modelo proposto foi testado utilizando 13 das 15 usinas da Bacia do Grande, desconsiderando L. C. Barreto e Porto Colômbia (ONS, 2017). Foi analisado o planejamento para o intervalo de um ano dividido em 365 períodos de 1 dia, utilizando-se 100 cenários de vazão e preço para a modelagem das incertezas associadas. Para o mercado de futuros, utilizou-se uma curva de preços com quatro blocos de 500 MW de potência e valores de venda de 42.00, 40.00, 38.00 e 36.00 \$/MWh, respectivamente.

A solução obtida pelo modelo para o caso de risco neutro previu a venda de toda a energia disponível no mercado *pool*, conforme a Figura 8. Isso está de acordo com o esperado, uma vez que o preço *spot* médio dos cenários utilizados foi de \$ 43.99, maior que a melhor opção disponível no mercado de futuros. Para facilitar a análise foram traçadas as linhas de tendência do preço *spot* e da energia alocada no mercado *pool*, utilizando-se polinômios de grau 4.

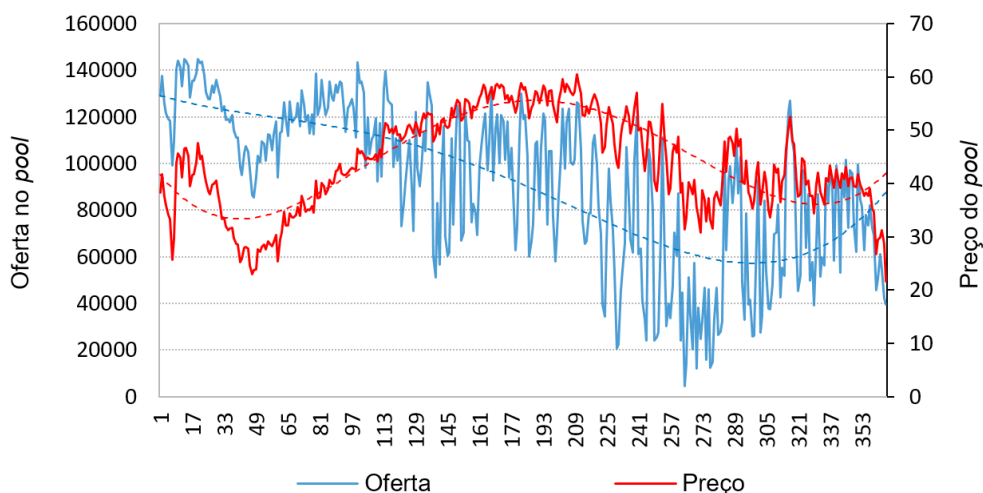


FIGURA 8: Energia ofertada no pool em relação ao preço spot.

Percebe-se o comportamento sazonal do preço *spot* (em vermelho), sendo maior no período da seca (porção central do gráfico) e menor no período chuvoso. A curva de oferta de energia (em azul) apresenta uma tendência semelhante ao preço *spot*, exceto pelo primeiro trimestre, onde é alocada uma quantidade maior de energia. Isso é explicado pela capacidade limitada de armazenamento de água.

O gerenciamento dos reservatórios pode ser analisado na Figura 9, que mostra a usina 13 como exemplo. Percebe-se um primeiro período, entre os dias 1 e 37, onde temos valores elevados para a afluência (em amarelo) e o preço *spot* (em vermelho), de forma que o volume do reservatório (em azul) mantém-se nos níveis iniciais.

Durante os dias 37 e 85 observa-se um alto volume afluente com baixo preço *spot*, gerando um aumento no volume armazenado. Entre os dias 85 e 169 tem-se um período de volume estável no reservatório, enquanto a afluência começa a diminuir e o preço *spot* a subir. Entre os dias 169 e 253 ocorre um período de seca, levando o agente gerador a consumir o volume armazenado anteriormente para aproveitar o período de preço *spot* alto.

Durante os dias 253 e 349 tem-se a continuidade do volume nos níveis mínimos, com exceção de uma pequena variação armazenagem durante os 265 e 289 para aproveitar o pico de preço entre os dias 289 e 301. Finalmente, a partir do dia 349 o volume começa a subir até atingir o nível final especificado, aproveitando a melhora da afluência a partir do dia 325.

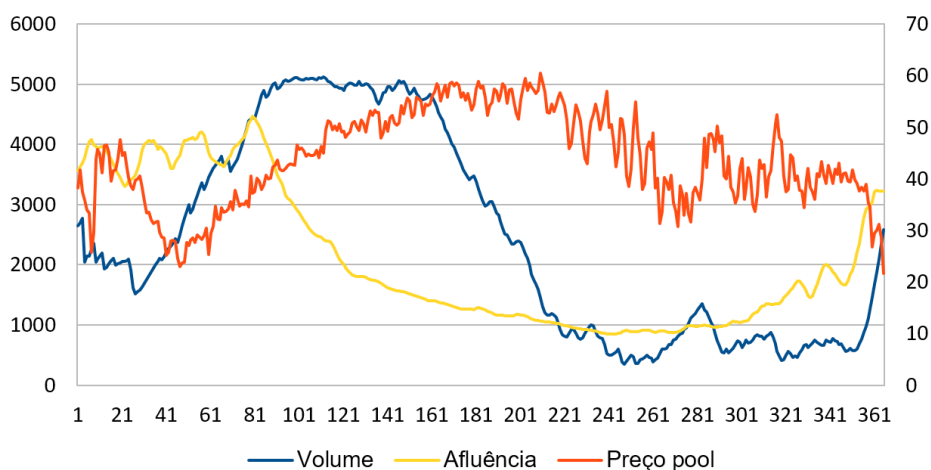


FIGURA 9: Volume do reservatório da usina 13 em relação ao preço e a afluência.

A fronteira eficiente do problema é apresentada na Figura 10 para o parâmetro beta variando no intervalo entre 0 e 20. Pode-se verificar a diminuição do lucro esperado com o aumento de beta, conforme é esperado para estratégias mais conservadoras.

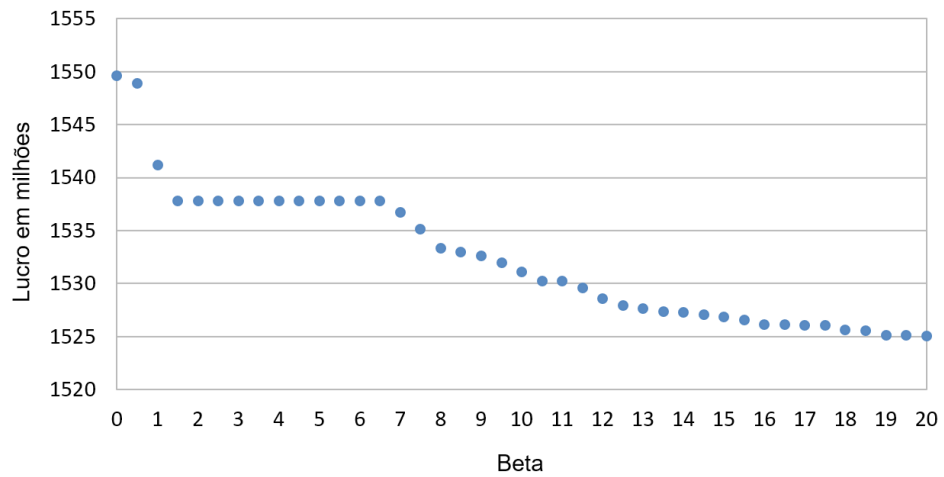


FIGURA 10: Fronteira eficiente do problema.

## 6 | CONCLUSÕES

Foi proposto um modelo de otimização estocástico para o problema de portfólio de um agente gerador envolvido com o mercado de futuros e o mercado *pool*, considerando as incertezas associadas ao preço *spot* e a vazão afluyente através do uso do valor de risco condicional (CVaR) como medida de risco. Foram realizados dois testes com o modelo proposto, o primeiro considerando 2 usinas no período de uma semana, enquanto no segundo teste foram utilizadas 13 usinas durante o horizonte de um ano. Foram analisadas as curvas de venda de energia no mercado *pool* e de o gerenciamento dos reservatórios, além de levantada a fronteira eficiente do problema, demonstrando a influência dos aspectos hidráulicos do problema.

## REFERÊNCIAS

ARROYO, J.; CONEJO, A. Multiperiod auction for a pool-based electricity market. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 17, n. 4, p. 1225-1231, nov. 2002.

ARTZNER, P. et al. Coherent Measures of Risk. **Mathematical Finance**, v. 9, n. 3, p. 203-228, jul. 1999.

CICOGNA, M. A.; FILHO, S. S. Dissertação de Mestrado, **Modelo de planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos a usinas individualizadas orientado por objetos**. UNICAMP. 1999.

CONEJO, A. J.; CARRIÓN, M.; MORALES, J. M. **Decision Making Under Uncertainty in Electricity Markets**. Boston, MA: Springer US, 2010.

CONEJO, A. J. et al. Optimal Involvement in Futures Markets of a Power Producer. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 23, n. 2, p. 703-711, maio 2008.

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/>>.



SHRESTHA, G. B. et al. Medium term power planning with bilateral contracts. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 20, n. 2, p. 627-633, maio 2005.

STEEGER, G.; BARROSO, L.; REBENNACK, S. Optimal Bidding Strategies for Hydro-Electric Producers: A Literature Survey. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 29, n. 4, p. 1758-1766, jul. 2014.

KIRSCHEN, Daniel S.; STRBAC, Goran. **Fundamentals of Power System Economics**: Wiley, 2004.

WOLFGANG, O. et al. Hydro reservoir handling in Norway before and after deregulation. **Energy**, v. 34, n. 10, p. 1642-1651, out. 2009.

## **SOBRE O ORGANIZADOR**

**MARCOS WILLIAM KASPCHAK MACHADO** Professor na Unopar de Ponta Grossa (Paraná). Graduado em Administração- Habilitação Comércio Exterior pela Universidade Estadual de Ponta Grossa. Especializado em Gestão industrial na linha de pesquisa em Produção e Manutenção. Doutorando e Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, com linha de pesquisa em Redes de Empresas e Engenharia Organizacional. Possui experiência na área de Administração de Projetos e análise de custos em empresas da região de Ponta Grossa (Paraná). Fundador e consultor da MWM Soluções 3D, especializado na elaboração de estudos de viabilidade de projetos e inovação.

Agência Brasileira do ISBN  
ISBN 978-85-7247-000-1

