

Planejamento de longo prazo da operação de hidrelétricas com agendamento de manutenções preventivas

Pedro Mendonça Maia

Abstract—A geração hidráulica é uma fonte barata e limpa de produção de energia. Entretanto é necessário que se tenha uma disponibilidade determinada de água para que obtenha um processo eficiente. Desta forma é de grande valia que seja feito um planejamento anual para que seja aproveitado de melhor maneira possível os recursos hídricos disponíveis com o menor custo possível.

I. INTRODUÇÃO

A geração de energia elétrica é um ativo de suma importância e extremamente estratégico para as nações. É fundamental que cada país consiga utilizar da melhor maneira possível seus recursos para a produção de energia. É nesse contexto que como se pode ver na figura 1, o Brasil tem as hidrelétricas como seu principal ativo da Matriz Energética, o que é de se esperar já que o país possui uma vasta rede fluvial.

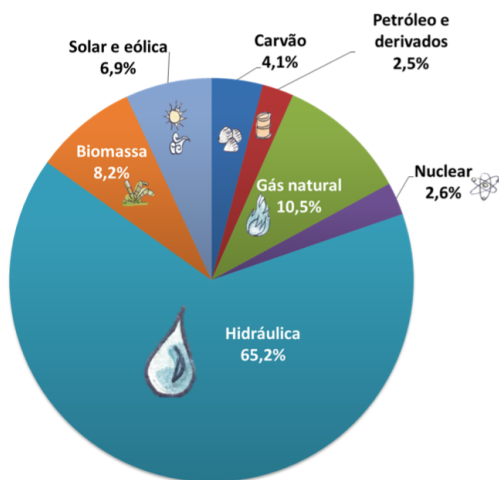


Fig. 1: Representação da Matriz Energética Brasileira

Além da grande disponibilidade hídrica, a geração hidráulica no Brasil também é vantajosa por ser uma fonte de energia limpa e renovável e ter baixo custo. Entretanto, para que se tenha uma produção de energia eficiente, é necessário se ter uma disponibilidade mínima de água. Quando os recursos hídricos não estão em níveis suficientes, as hidrelétricas não conseguem operar eficientemente e se torna necessário usar outras fontes de energia para suprir a demanda. Geralmente essas outras fontes são mais caras, o que aumenta o custo da energia.

A disponibilidade de água possui uma variabilidade sazonal, como mostra a figura 2. Desta forma, realizar um planejamento que considere a sazonalidade da água durante o ano

é crítico para maximizar não apenas o aproveitamento dessa matriz energética, como o lucro das distribuidoras.

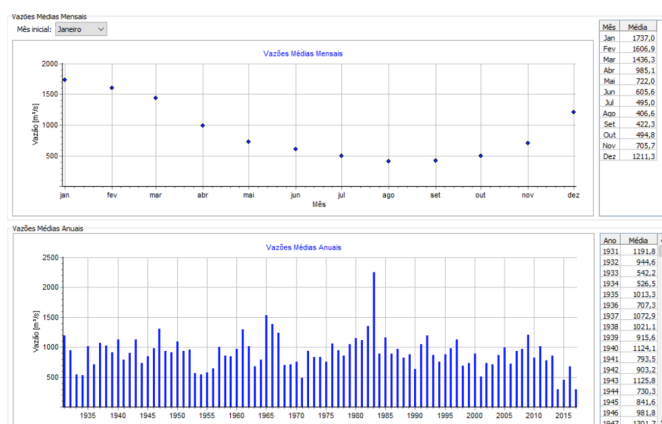


Fig. 2: Histórico de Afluência Furnas

Para evitar a falha de equipamentos por desgaste, manutenções preventivas são realizadas nos geradores das usinas. Visando aumentar a eficiência do planejamento da operação, manutenções preventivas podem ser incluídas no modelo para tentar alocá-las nos períodos que menos afetarão a geração hidrelétrica.

II. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O sistema hídrico brasileiro é bastante complexo e extenso, sendo composto por diferentes formações, tendo as bacias hidrográficas como a mais importante para a geração de energia hidrelétrica. Uma bacia hidrográfica é definida como um conjunto de terras drenadas por um rio principal, seus afluentes e subafluentes, ou seja, é a porção do espaço em que as águas das chuvas, das montanhas, subterrâneas ou de outros rios escoam em direção a um determinado curso de água, abastecendo-o.

Para um melhor aproveitamento na produção de energia, no Brasil existe mais de uma usina dentro da mesma bacia hidrográfica, formando o que é chamado de cascata de hidrelétricas. Dentro da mesma cascata, toda a água que é liberada por uma usina, chega até a outra seguinte depois de determinado tempo. Existem usinas com reservatórios de armazenamento de água de diferentes tamanhos, existindo inclusive pequenas usinas cujo volume do reservatório não varia, chamadas fio-d'água.

As usinas com reservatório grande geralmente ficam localizadas no topo da cascata e são as principais, pois de certa forma controlam a produção de todas as usinas fio-d'água

abaixo dela. Um planejamento da operação deve considerar esses dois tipos de usina combinados visando otimizar a produção e respeitando diversos limites operacionais, ambientais, etc. Na figura 3 é possível ver uma representação de uma cascata de usinas combinando usinas com reservatório (triângulo) e fio-d'água (círculo).

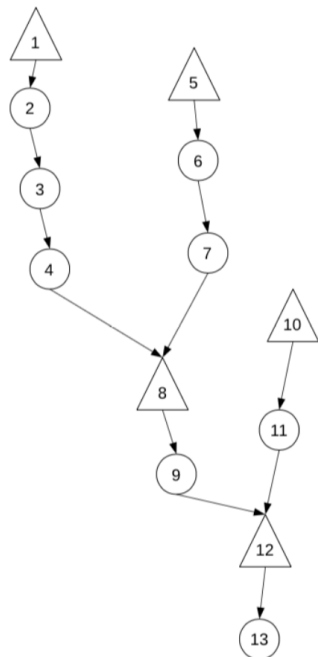


Fig. 3: Cascata com usinas com reservatório (triângulo) e a fio-d'água (círculo)

Na figura 3 o volume de água despachado pela usina 1, por exemplo, chegará depois de certo tempo na usina 2 e, por ser fio-d'água, deverá ser despachado imediatamente para a usina 3. Como a usina 3 também é fio-d'água, ela também precisa despachar para a usina 4 o volume que vem da usina 2 imediatamente. Esse efeito é propagado até que o volume despachado pela usina 1 alcance a próxima usina com reservatório de armazenamento, no caso a usina 8. Esse exemplo ilustra como as usinas com reservatório controlam grande parte do comportamento da cascata e como o planejamento integrado de toda a cascata é importante para aproveitar ao máximo o potencial da geração hidráulica.

O tempo médio que a água demora percorrendo o caminho entre usinas é de algumas horas. Em um planejamento anual discretizado em meses esse tempo fica desprezível e portanto é desconsiderado no modelo.

A figura 4 mostra a Bacia Hidrográfica do Rio Grande, um conjunto que possui 12 usinas e que gera aproximadamente 67% da energia de todo o estado de Minas Gerais.

A. Elementos de uma hidrelétrica

Para melhor entendimento da modelagem realizada neste trabalho é necessário entender os principais fundamentos do funcionamento da usina hidrelétrica. Todos os principais elementos da usina podem ser vistos na figura 5.

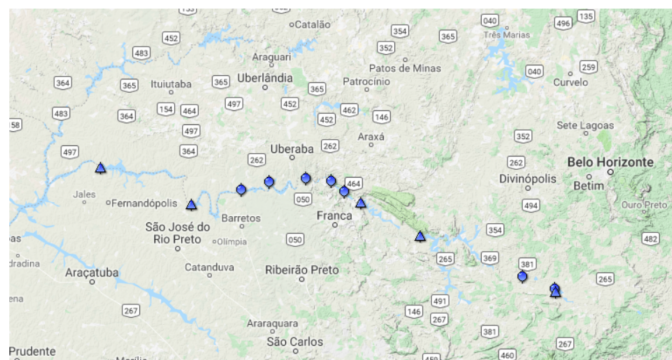


Fig. 4: Cascata do Rio Grande.

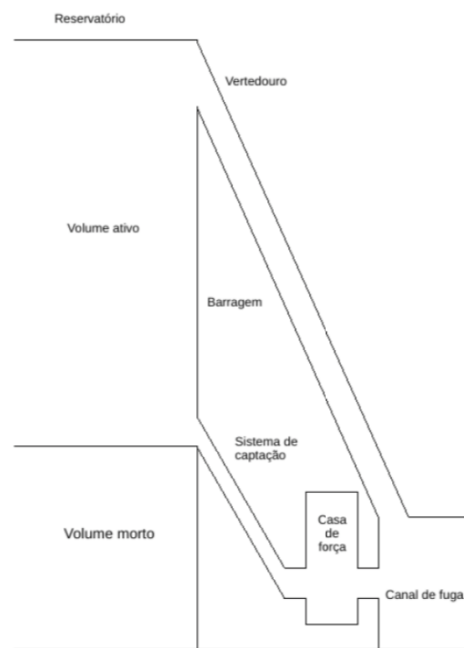


Fig. 5: Elementos de uma usina hidrelétrica.

Todo volume de água que chega até a usina é armazenado no reservatório e pode ser liberado no canal de fuga após passar pelo sistema de captação ou pelo vertedouro.

A água que passa pelo sistema de captação segue até a casa de força e é utilizada para geração de energia. Ela é composta diversas máquinas elétricas responsáveis pela conversão da energia cinética da água em energia elétrica. Essas máquinas estão divididas em conjuntos com diferentes características e limites. Enquanto uma manutenção é realizada em alguma máquina do conjunto, todo o conjunto fica indisponível para operação.

Já a água que é vertida vai direto para o canal de fuga e não é aproveitada, portanto essa operação deve ser evitada sempre que possível. Geralmente o vertimento só é executado quando o limite de engolimento da casa de força é atingido, mas o volume que a usina deve despachar ainda não foi atingido.

A diferença das usinas com reservatório de armazenamento para as fio-d'água é que nas últimas o volume do

reservatório não pode variar significativamente, então sempre que um elevado volume de água chega na usina ele deve ser imediatamente despachado. Por esse motivo vertimentos são mais comuns nesse tipo de usina.

III. MODELAGEM

O planejamento da operação de hidrelétricas considerando o agendamento de manutenções pode ser modelado como um problema de programação linear inteiro misto (MILP - Mixed Integer Linear Programming), descrito a seguir:

A. Conjuntos

- U : Conjunto de usinas do modelo.
- T : Conjunto de períodos do modelo.
- M_u : Conjunto de usinas a montante da usina $u \in U$.
- W_u : Conjunto de unidades geradoras da usina $u \in U$.

B. Variáveis

- $g_{u,t}$: Energia gerada pela usina $u \in U$ no período $t \in T$.
- f_t : Energia gerada por fontes alternativas no período $t \in T$.
- $v_{u,t}$: Volume do reservatório da usina $u \in U$ no período $t \in T$.
- $q_{u,t}$: Volume turbinado pela usina $u \in U$ no período $t \in T$.
- $s_{u,t}$: Volume vertido pela usina $u \in U$ no período $t \in T$.
- $x_{r,t}$: Variável binária indica se a manutenção $r \in R_w$ $\forall w \in W_u$ $\forall u \in U$ é iniciada no período $t \in T$.

C. Parâmetros de entrada

- E_t : Demanda de energia no período $t \in T$.
- c_u : Custo de produção de energia da usina $u \in U$.
- c_a : Custo médio de produção de energia por fontes alternativas.
- $a_{u,t}$: Afluência natural estimada da usina $u \in U$ no período $t \in T$.
- ρ_u : Produtividade média da usina $u \in U$.
- $V_{0,u}$: Volume inicial do reservatório da usina $u \in U$.
- $V_{F,u}$: Volume final do reservatório da usina $u \in U$.
- \underline{V}_u : Volume mínimo da usina $u \in U$.
- \overline{V}_u : Volume máximo da usina $u \in U$.
- \underline{Q}_u : Engolimento mínimo mensal da usina $u \in U$.
- \overline{Q}_u : Engolimento máximo mensal da usina $u \in U$.
- \overline{S}_u : Vertimento máximo mensal da usina $u \in U$.
- \underline{D}_u : Defluência mínima mensal da usina $u \in U$.
- \overline{D}_u : Defluência máxima mensal da usina $u \in U$.
- R_w : Manutenções previstas para o conjunto gerador $w \in W_u$ $\forall u \in U$.
- d_r : Duração prevista para a manutenção preventiva $r \in R_w$ $\forall w \in W_u$ $\forall u \in U$.
- J_r : Janela de tempo da manutenção preventiva $r \in R_w$ $\forall w \in W_u$ $\forall u \in U$.
- qt_w : Engolimento máximo do conjunto gerador $w \in W_u$ $\forall u \in U$.

D. Modelo

$$\min \sum_{t \in T} c_a f_t + \sum_{u \in U} \sum_{t \in T} c_u g_{u,t} \quad (1)$$

$$\sum_{u \in U} g_{u,t} + f_t = E_t \quad \forall t \in T \quad (2)$$

$$g_{u,t} = \rho_u q_{u,t} \quad \forall u \in U \quad \forall t \in T \quad (3)$$

$$v_{u,1} = V_{0,u} + a_{u,1} + \sum_{j \in M_u} (q_{j,1} + s_{j,1}) - q_{u,1} - s_{u,1} \quad \forall u \in U \quad (4)$$

$$v_{u,t} - v_{u,t-1} = a_{u,t} + \sum_{j \in M_u} (q_{j,t} + s_{j,t}) - q_{u,t} - s_{u,t} \quad \forall u \in U \quad \forall t \in T | t \geq 2 \quad (5)$$

$$q_{u,t} \geq \underline{Q}_u \quad \forall u \in U \quad \forall t \in T \quad (6)$$

$$q_{u,t} \leq \overline{Q}_u - \sum_{w \in W_u} \sum_{r \in R_w} \frac{d_r}{30} \frac{qt_w}{\overline{Q}_u} x_{r,t} \quad \forall u \in U \quad \forall t \in T \quad (7)$$

$$v_{u,t} \geq \underline{V}_u \quad \forall u \in U \quad \forall t \in T \quad (8)$$

$$v_{u,t} \leq \overline{V}_u \quad \forall u \in U \quad \forall t \in T \quad (9)$$

$$v_{u,T} \geq V_{F,u} \quad \forall u \in U \quad (10)$$

$$s_{u,t} \leq \overline{S}_u \quad \forall u \in U \quad \forall t \in T \quad (11)$$

$$q_{u,t} + s_{u,t} \geq \underline{D}_u \quad \forall u \in U \quad \forall t \in T \quad (12)$$

$$q_{u,t} + s_{u,t} \leq \overline{D}_u \quad \forall u \in U \quad \forall t \in T \quad (13)$$

$$\sum_{t \in J_r} x_{r,t} = 1 \quad \forall r \in R_w \quad (14)$$

$$f_t \geq 0 \quad \forall t \in T \quad (15)$$

A função objetivo (1) se refere ao custo total da geração de energia, considerando as usinas hidrelétricas e as fontes alternativas, sendo que o custo das fontes alternativas é bem maior. Nesse caso, quanto maior a energia gerada pelas hidrelétricas, menor a geração complementar e consequentemente menor o custo.

A restrição 2 garante o atendimento demanda por energia de cada período. Essa demanda deve ser atendida, seja a partir da geração hidrelétrica, seja por fontes complementares. Como já dito, a função objetivo f1 reduzir o custo total, portanto fontes complementares (mais caras), só são utilizadas quando a geração hidrelétrica não vale a pena.

A restrição 3 calcula a energia gerada por cada usina a cada período, e é dada pelo produto entre volume turbinado e a produtividade.

As restrições 4 e 5 garantem que o balanço hídrico seja respeitado, isto é, que o volume que fica armazenado em uma usina seja o mesmo que o volume armazenado no período anterior somado com a diferença entre o chega e que é despachado. O volume que chega em uma usina é dado pelo somatório entre a afluência natural e o que foi despachado pelas usinas a montante. O volume despachado é dado pelo somatório dos volumes turbinado e vertido. No caso das usinas fio-d'água o volume armazenado é zero, portanto o que chega deve ser igual ao despachado.

As restrições 6 e 7 garantem que os limites de engolimento das usinas sejam respeitados. O limitante inferior existe porque as turbinas só conseguem produzir energia eficientemente a partir de determinado volume. Já o superior é dado pela capacidade máxima de operação da casa de força. Caso uma manutenção esteja ocorrendo naquela usina, o limite de engolimento do conjunto gerador onde a manutenção ocorre deve ser descontado do limite de engolimento total.

As restrições 8 e 9 garantem que os limites mínimo e máximo do reservatório sejam respeitados. Esses limites são estabelecidos de acordo com as dimensões do reservatório. Já a restrição 10 garante que cada reservatório esteja em um nível mínimo ao final do horizonte de planejamento. Garantir isso é importante para assegurar uma operação adequada após o horizonte de planejamento.

A restrição 11 garante que os limites de vertimento máximo das usinas sejam respeitados. Esses limites são estabelecidos a partir das dimensões do vertedouro.

As restrições 12 e 13 garantem que os limites mínimo e máximo de defluência sejam respeitados. Existem diversos fatores que são considerados para calcular esses limites. Como a defluência estabelece o fluxo de água que passará pelo rio a jusante da usina, existem diversos fatores ambientais, sociais e econômicos que requerem um fluxo mínimo ou proíbem um fluxo de água muito elevado.

A restrição 14 garante que todas as manutenções planejadas sejam realizadas uma única vez dentro da janela prevista.

A restrição 15 impede que a geração por fontes alternativas seja negativa.

IV. METODOLOGIA

Este trabalho considera o planejamento de um ano de operação da cascata do Rio Grande, que contém 12 usinas.

Como o comportamento de cada cascata de hidrelétricas é independente das demais, optou-se por considerar apenas essa cascata na otimização. Trabalhar com cada cascata isoladamente ainda traz outras vantagens, como acelerar a execução do modelo, facilitar o entendimento do problema e das análises dos resultados.

O horizonte de planejamento foi definido em um ano, discretizado em 12 períodos de um mês considerando que a sazonalidade da água é anual.

Como dito anteriormente, o modelo proposto é de um problema MILP, portanto foi utilizado o solver do Gurobi®.

Toda a modelagem foi implementada no Matlab®.

Os dados referentes às usinas foram obtidos do software livre HydroData [3]. Como não foi possível obter os dados dos custos de operação, calendários de manutenção nem a demanda por energia, foram utilizadas informações fictícias.

O custo da geração das hidrelétricas foi considerado fixo e o custo por fontes alternativas dez vezes maior. A demanda utilizada tinha um valor fixo mensal próximo à capacidade de operação das usinas para forçar a utilização da geração complementar em alguns períodos.

O cenário executado considerou que o volume inicial dos reservatórios estavam todos em 50% da capacidade máxima e obrigou que estivessem com pelo menos 75% da capacidade ao final do horizonte.

Foram criadas manutenções 7 usinas aleatórias, sendo uma manutenção por usina, em um conjunto gerador aleatório, com janela de tempo e duração também aleatórios. A tabela I mostra as manutenções criadas.

Usina	Duração	Mês inicial	Mês final	Limitação(%)
Itutinga	15 dias	2	4	28.28
Furnas	25 dias	4	7	75.75
Peixoto	20 dias	7	10	42.84
Estreito	7 dias	4	8	50
Igarapava	45 dias	1	3	60
Marimbondo	10 dias	2	4	50
Água Vermelha	15 dias	4	8	50

TABLE I: Calendário de manutenções

V. RESULTADOS

Após a execução do modelo, os resultados da tabela II foram obtidos.

Período	Volume	Engolimento	Vertimento	Geracao	Complemento
1	3.9145	3.3669	0	1.2505	0.2495
2	4.1091	3.6239	0	1.4379	0.0621
3	4.2123	3.7174	0	1.5000	0
4	4.4323	1.5329	0	0.6056	0.8944
5	4.2078	2.9063	0	1.1135	0.3865
6	3.8164	3.5490	0	1.4258	0.0742
7	4.0054	2.5195	0	1.0136	0.4864
8	4.1422	0.9666	0	0.3793	1.1207
9	4.0819	2.9156	0	1.0980	0.4020
10	3.5970	3.2793	0	1.3757	0.1243
11	3.8406	2.3094	0	0.8387	0.6613
12	4.3414	1.4420	0	0.5563	0.9437

TABLE II: Somatório dos resultados ($\times 10^{10}$)

Os valores da tabela II também são apresentados na figura 6. Ao analisar os resultados, é possível perceber que nos período iniciais, onde a afluência é elevada, a a geração hidrelétrica apresentou os maiores valores e os níveis de reservatório subiram. A medida que o meio do ano se aproximava e a afluência natural diminuía, o modelo começou a reduzir o nível dos reservatórios e dos engolimentos, o que aumentou a geração complementar. Nos períodos finais a afluência volta a crescer e os níveis de reservatório voltam a crescer para atingir o patamar necessário. Exatamente por isso, mesmo com o aumento da afluência, não foi possível gerar muita energia hidrelétrica.

Um dos resultados importantes é que não houve nenhum vertimento ao longo do planejamento. Como o sistema opera sem folga, foi importante que não haja desperdícios, e os resultados mostraram que o modelo conseguiu evitá-los ao não verter.

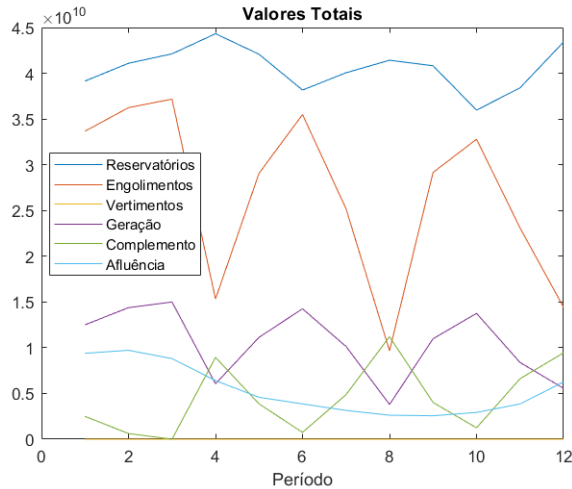


Fig. 6: Somatório dos valores das usinas a cada período

A tabela III mostra como ficou o agendamento das manutenções. É possível perceber que a maioria das manutenções ficaram concentradas nos períodos 2 e 4. No segundo período havia muita afluência natural e o sistema operava tranquilamente, portanto a alocação de manutenções não teve impacto significativo nos resultados. Já nos períodos 4 e 8 ocorreram os menores níveis de engolimento, coincidindo com períodos onde manutenções foram executadas.

Usina	Período da manutenção
Itutinga	2
Furnas	6
Peixoto	8
Estreito	4
Igarapava	2
Marimondo	4
Água Vermelha	4

TABLE III: Planejamento das manutenções

A usina de Furnas possui o maior reservatório do Rio Grande. Ao observar a figura 7, vê-se que o nível de armazenamento de água nos reservatórios segue aproximadamente o comportamento dessa usina.

VI. CONCLUSÃO

O trabalho desenvolvido exercitou os conceitos lecionados na disciplina sobre otimização em problemas de rede, ao aplicá-los em um problema prático. O problema se mostrou desafiador na modelagem e os resultados mostraram como não é trivial realizar um planejamento de uma cadeia de elementos tão complexa.

Foi possível perceber como a otimização consegue considerar diversos fatores simultaneamente e com isso apresentar resultados coerentes e às vezes pouco intuitivos. A ausência

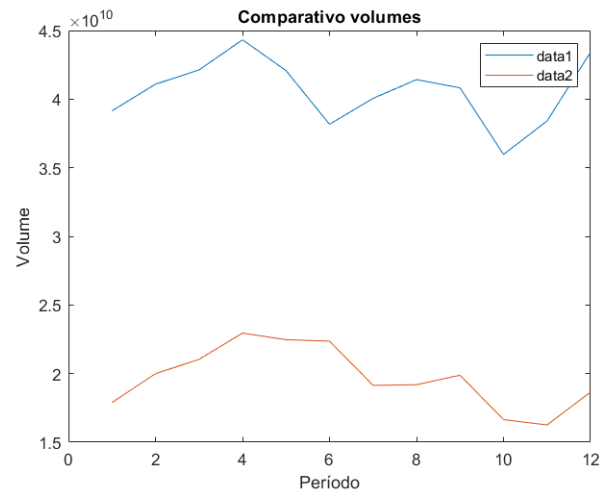


Fig. 7: Evolução do reservatório e Furnas e total

de vertimentos mostrou como o modelo foi capaz de realizar o planejamento com a maior eficiência possível.

REFERENCES

- [1] Guedes, Lucas S. M.; LISBOA, A. C.; VIEIRA, D. A. G.; MONTE-RANI, G.; BRAGA, H. N.; CARVALHO, A. C.; SANTOS, R. N.; MENDES, J. R. . Otimização Multiobjetivo de Usinas Hidrelétricas em Cascata. In: Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2013, Brasília. XXII SNPTEE, 2013. p. 1-5.
- [2] Guedes, Lucas S. M.; LISBOA, A. C.; VIEIRA, D. A. G.; Maia, P. M.; Silva, G. F.; Motteran, G.; Braga, H. N. . Otimização da operação de usinas hidrelétricas para diminuição de penalidades por MRGF, aumento da geração e da reserva de energia. In: VIII CITENEL, 2015.
- [3] Software HydroData XP, disponível em <https://hydrobyte.com.br/site/pt-br/hydrodata-xp>.