###### Lactec

**Programação Semi-horária da Operação de Sistemas Hidrelétricos com Representação Detalhada das Unidades Geradoras**

**Manual de Metodologia – Equipe de Otimização**

Projeto de Alocação de Unidades Geradoras no Curtíssimo Prazo para sistemas Hidrelétricos.

Lactec

Curitiba – Paraná – Brasil

Julho de 2021

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Equipe técnica Lactec:  Ana Paula Oening  Débora Cintia Marcilio  Clóvis Caesar Gonzaga  João Victor da Silva  Talia Correia Schulz  Tiago Lino Bello  **Equipe técnica UFPR:**  Lucas Garcia Pedroso  Luiz Carlos Matioli | | | **Emitido por:**  \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_  João Victor da Silva/ Talia Correia Schulz/Tiago Lino Bello  SE/Lactec  \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_  Lucas Garcia Pedroso/Luiz Carlos Matioli  DMAT/UFPR | | | | |
|  | | |  | | | | |
|  | | |  | | | | |
|  | | |  | | | | |
|  | | |  | | | | |
|  |  |  | |  | |  |  |
|  |  |  | |  | | | |
|  | | | | |  | | |
|  | | |

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Controle de Revisão:** | | 0 | | |
| **Nº da Revisão** | **Alteração** | | **Data** | **Revisor** |
| 0 | *Versão original* | | 21/07/2021 | João Victor da Silva |
| 1 |  | |  |  |
| 2 |  | |  |  |

LISTA DE FIGURAS

Nenhuma entrada de índice de ilustrações foi encontrada.

LISTA DE TABELAS

[Tabela 1 – Dados de Entrada do Modelo e Arquivos. 14](#_Toc80176568)

[Tabela 2 – *aflu\_h.csv* 15](#_Toc80176569)

[Tabela 3 – *deflu\_h.csv* 15](#_Toc80176570)

[Tabela 4 – *Tratado\_Afluencia.csv* 16](#_Toc80176571)

[Tabela 5 – *entrada.csv* 17](#_Toc80176572)

[Tabela 6 – *potencia\_instalada\_hidr.csv* 17](#_Toc80176573)

[Tabela 7 – *tempo\_viagem.csv* 18](#_Toc80176574)

[Tabela 8 – *demanda\_sub\_h.csv* 18](#_Toc80176575)

[Tabela 9 – *demanda\_\*\*\*.csv* 19](#_Toc80176576)

[Tabela 10 – *coefs\_2grau.csv* 20](#_Toc80176577)

[Tabela 11 – Pacotes, Versões e Descrições Para a Abordagem. 21](#_Toc80176578)

[Tabela 12 – Pacotes, Versões e Descrições do Python. 22](#_Toc80176579)

SUMÁRIO

[1. INTRODUÇÃO 6](#_Toc80176584)

[2. MODELO 7](#_Toc80176585)

[2.1 Descrição das equações no modelo original 9](#_Toc80176586)

[2.2 Alterações e adições no modelo 10](#_Toc80176587)

[3. DADOS E ARQUIVOS 14](#_Toc80176588)

[3.1 Demanda, Afluência e Tempo de Viagem (DESSEM) 15](#_Toc80176589)

[3.2 Dados de Afluência e Defluência Anterior (*aflu\_h.jl* e *deflu\_h.jl*) 15](#_Toc80176590)

[3.2.1 Descrevendo o Arquivo *Tratado\_Afluencia.csv* 16](#_Toc80176591)

[3.2.2 Origem dos Dados de Vazão Afluente 16](#_Toc80176592)

[3.3 Hidr e Dados Gerais das Usinas (*hidr.jl*) 16](#_Toc80176593)

[3.4 Demanda e Tempo de Viagem (*entrada.jl* e *Entrada\_dados.jl*) 17](#_Toc80176594)

[3.5 Curva Colina (*CC\_transf\_vaz\_afluencia.ipynb*) 19](#_Toc80176595)

[4. IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO 21](#_Toc80176596)

[5. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES 24](#_Toc80176597)

[6. Referências 25](#_Toc80176598)

# INTRODUÇÃO

Este Manual Descritivo é um produto das etapas da Equipe de Otimização, intituladas “Modelagem hidroelétrica de curtíssimo prazo”, desenvolvido pelos Institutos Lactec e Universidade Federal do Paraná - UFPR.

O Manual tem como objetivo reiterar o modelo matemático base para o curtíssimo prazo, bem como as formulações matriciais do modelo e, as restrições não lineares de atendimento à demanda. Somado a isso, utilizando dois sistemas de 2 e de 6 usinas e os dados dos decks do médio e curto prazo que foram adaptados para o curtíssimo prazo, o código é feito na linguagem de programação Julia considerando um horizonte de apenas um dia.

# MODELO

O modelo foi baseado no artigo [*Mixed-integer nonseparable piecewise linear models for the hydropower production function in the Unit Commitment problem*](https://sci-hub.se/10.1016/j.epsr.2020.106234), [1]. Fazendo algumas alterações e adições para conseguir se encaixar no problema desejado, que é com várias hidrelétricas e em cascata.

A seguir vamos apresentar o modelo original para caso seja necessário retornar alguns passos para evitar complicações.

|  |  |
| --- | --- |
|  | () |
|  |  |
|  | () |
|  | () |
|  | () |
|  | () |
|  | () |
|  | () |
|  | () |
|  | () |
|  | () |
|  | () |
|  | () |
|  | () |
|  | () |
|  | () |

Onde:

* : número de períodos (semi-horário ou horário);
* : número de turbinas na usina;
* : indica a turbina;
* : indica o período (semi-horário ou horário);
* : vazão turbinada da usina no intervalo de tempo ;
* : vazão vertida da usina no intervalo de tempo ;
* : volume do reservatório no intervalo de tempo ;
* : geração na turbina no intervalo de tempo ;
* : eficiência da turbina no intervalo de tempo (curva colina);
* : altura bruta no intervalo de tempo ;
* : vazão turbinada na turbina no intervalo de tempo ;
* : binário indicando estado ligado/desligado da turbina no intervalo de tempo ;
* binário indicando decisão de ligar a turbina no intervalo de tempo ;
* : binário indicando decisão de desligar a turbina no intervalo de tempo ;
* : fator de conversão de para ;
* : vazão afluente da usina no intervalo de tempo ;
* : volume de armazenamento mínimo e máximo do reservatório ;
* : geração mínima e máxima da turbina ;
* : turbinamento mínimo e máximo da turbina ;
* : limite máximo de vertimento da usina ;
* : demanda da usina no intervalo de tempo ;
* : número máximo de vezes que se pode ligar as turbinas;
* : tempo máximo se pode manter ligada a turbina (semi-horário ou horário);
* : tempo mínimo que se deve manter desligada a turbina (semi-horário ou horário);
* : coeficientes da curva colina ;
* : coeficientes do polinômio montante ;
* : coeficientes do polinômio jusante, ;
* : coeficiente da função de perda hidráulica da turbina .

## Descrição das equações no modelo original

A função objetivo (1), representa a minimização da vazão defluente, tentando assim reduzir a quantidade de água necessária para cumprir com as restrições. A restrição (2) é o balanço hídrico. A restrição (3) representa os limites no volume do reservatório e coloca um limite na vazão vertida. Agora para a restrição (4) é basicamente um atendimento a demanda por período.

Temos na restrição (5) a função de geração hidrelétrica, sendo um detalhe relevante que não é necessária exatamente essa função de perda hidráulica, podendo se utilizar de outras funções para obter a altura líquida.

A restrição (6) representa a aproximação quadrática da curva colina, por turbina. Essa restrição apresenta a curva colina em função da vazão turbinada e da altura líquida, contudo conseguimos utiliza-la no caso onde está em função da geração e da altura bruta. Para obter a geração da turbina sem ter seu rendimento calculado pela curva colina, basta utilizar o rendimento nominal presente na tabela Hidr e assim possuindo uma aproximação para geração e conseguindo um valor melhor de rendimento após a consulta na curva colina com essa geração aproximada.

Já a restrição (7) representa a obtenção da altura bruta. As restrições (8) e (10) representam a limitação da vazão turbinada e da geração por turbina, sendo que se a turbina estiver desligada () temos que a vazão turbinada e a geração vão ser 0. A restrição (9) nos diz que a vazão turbinada total da usina é a soma das vazões turbinadas individuais.

A restrição (11) é um pouco difícil de se entender mas ela representa a seguinte ideia: “a turbina só vai estar ligada () ou desligada () no próximo período () se eu decidir ligar () ou decidir desligar () ela no período atual ()”. Um detalhe percebido durante a fase de testes desse modelo original foi que a equação com a desigualdade pode causar problemas, por exemplo onde o modelo pode estar com as seguintes variáveis: . Podemos perceber que nessa situação a turbina estava ligada, mas foi desligada no período seguinte, contudo as variáveis que controlam essa decisão () não representaram essa ação tomada e o principal, a restrição (11) não é violada. Vamos apresentar uma correção dessa equação em 2.2.

A restrição (12) quer representar que o modelo não pode ligar a turbina muitas vezes, sendo esse valor limitante um chute tanto no artigo original quanto no nosso caso.

As restrições (13) e (14) ligam a variável de estado da turbina com as variáveis de decisão da mesma turbina, contudo como dito anteriormente na restrição (11), o modelo pode estar em uma situação onde ele liga ou desliga a turbina sem alterar o valor dessas variáveis de decisão, pois se ou se essas restrições ainda serão válidas e podemos cair no caso onde é impossível na prática mas respeita as restrições (11), (13) e (14). E por fim, mas não menos importante, a restrição (15) só limita o domínio das variáveis para binário.

## Alterações e adições no modelo

Neste capítulo vamos falar sobre as principais mudanças feitas no modelo para se adequar ao caso de múltiplas hidrelétricas em cascata. As mudanças são as seguintes: Adição de um índice para agregar mais hidrelétricas, Correção da equação (11), Alterações feitas na função para obtenção da altura líquida. Essas mudanças estão descritas nos próximos parágrafos.

A principal alteração feita é que o modelo foi inicialmente proposto apenas para uma única hidrelétrica, como queremos um modelo que resolva o problema para várias hidrelétricas foi necessária a adição do indicador para adicionar mais hidrelétricas às equações. Assim aumentamos muito a dimensão dos dados e a quantidade de contas necessárias para o modelo executar.

Com múltiplas hidrelétricas o modelo pode resolver problemas onde essas usinas estão em uma ou mais cascatas, sendo assim uma consequência disso é que a afluência das usinas pode ser a vazão defluente da usina a montante em função do tempo de viagem, caso essa usina a montante faça parte na entrada do modelo.

A alteração feita na restrição (11) foi que em vez de uma desigualdade, agora teremos uma igualdade no lugar, essa simples alteração resolve todos erros que poderiam ocorrer.

Como comentado anteriormente, a altura líquida pode ser obtida com outras funções que não sejam a quadrática. Outro detalhe sobre a variável de altura bruta é que para redução de contas durante o processo de otimização foi adicionado uma restrição que calcula a altura líquida em cada etapa do modelo em vez de calcular em cada restrição onde a altura bruta aparecia, isso causa um leve aumento no uso de memória, mas reduz o tempo total da otimização.

Uma observação importante é que com a variedade de hidrelétricas, temos uma limitação nas informações disponíveis, onde podemos ter diferenças nos dados como por exemplo na função de altura líquida ou na curva colina. Como o modelo foi construído para um caso em particular, para que o problema seja resolvido com essa variedade nas funções e variáveis, basta separar uma restrição na etapa de programação, conseguindo assim um modelo de otimização capaz de resolver o problema para várias hidrelétricas. Essa explicação vai ser mais detalhada no capítulo programação e linguagens utilizadas.

Com as alterações feitas e descritas vamos então apresentar o modelo utilizado no problema desejado, todas as equações a seguir são para e para . Para as restrições que aparecem o índice , temos que .

|  |  |
| --- | --- |
|  | (16) |
|  |  |
|  | (18) |
|  | (19) |
|  | (20) |
|  | (21) |
|  | (22) |
|  | (23) |
|  | (24) |
|  | (25) |
|  | (26) |
|  | (27) |
|  | (28) |
|  | (29) |
|  | (30) |
|  | (31) |
|  | (32) |

Onde:

* : número de períodos (semi-horário ou horário);
* : número de usinas;
* : número de turbinas na usina com índice ;
* : função que transforma altura bruta em altura líquida da usina com índice ;
* : indica a usina;
* : indica a turbina;
* : indica o período (semi-horário ou horário);
* : tempo de viagem da água da usina com índice ;
* : vazão turbinada da usina com índice no intervalo de tempo ;
* : vazão vertida da usina com índice no intervalo de tempo ;
* : volume do reservatório da usina com índice no intervalo de tempo ;
* : geração na turbina da usina com índice no intervalo de tempo ;
* : eficiência da turbina da usina com índice no intervalo de tempo (curva colina);
* : altura bruta da usina com índice no intervalo de tempo ;
* : altura líquida da usina com índice no intervalo de tempo ;
* : vazão turbinada na turbina da usina com índice no intervalo de tempo ;
* : binário indicando estado ligado/desligado da turbina da usina com índice no intervalo de tempo ;
* binário indicando decisão de ligar a turbina da usina com índice no intervalo de tempo ;
* : binário indicando decisão de desligar a turbina da usina com índice no intervalo de tempo ;
* : fator de conversão de para ;
* : vazão afluente da usina com índice no intervalo de tempo ;
* : afluência/defluência anterior ao período de programação da usina com índice no intervalo de tempo ;
* : volume de armazenamento mínimo e máximo do reservatório da usina com índice ;
* : geração mínima e máxima da turbina da usina com índice ;
* : turbinamento mínimo e máximo da turbina da usina com índice ;
* : limite máximo de vertimento da usina com índice ;
* : demanda da usina com índice no intervalo de tempo ;
* : número máximo de vezes que se pode ligar as turbinas da usina com índice ;
* : tempo máximo se pode manter ligada a turbina da usina com índice (semi-horário ou horário);
* : tempo mínimo que se deve manter desligada a turbina da usina com índice (semi-horário ou horário);
* : coeficientes da curva colina da usina com índice , ;
* : coeficientes do polinômio montante da usina com índice , ;
* : coeficientes do polinômio jusante da usina com índice , ;

Esse modelo, (16)-(32), é muito parecido com o apresentado anteriormente, (1)-(15). A alteração básica que foi adicionada é a nova dimensão que representa a quantidade de usinas que queremos trabalhar. Temos apenas uma equação e um dado novo, a equação (19) e o dado , que representa a altura líquida dependendo da usina que estamos trabalhando e a defluência anterior ao período de otimização respectivamente. Esse dado novo é como se fosse a vazão afluente , contudo são de fontes diferentes e será detalhado a obtenção desse dado no capítulo 3.

Podemos resolver também o problema onde temos vários conjuntos de hidrelétricas presentes em rios diferentes. Ou seja, não necessariamente temos que a usina é a montante da usina . As únicas alterações que teriam que ser feitas é na restrição de balanço hídrico (18), onde precisaria lidar com qual usina é montante da usina com índice , e quais usinas recebem uma vazão afluente não dependendo de outras usinas.

# DADOS E ARQUIVOS

Neste capítulo será apresentado os dados e arquivos utilizados, descrevendo e organizando para que se possa repetir o processo. Deixando claro que a maioria dos dados presentes foram retirados do DESSEM, ONS ou da tabela Hidr. Inicialmente será descrito os dados necessários junto com os arquivos de programação que transformam em um dado de entrada para o modelo.

Primeiramente vamos deixar claro aqui quais são dados necessários para que o modelo seja executado. Antes de tudo é preciso organizar quais usinas entram no processo de otimização e ter bem claro qual usina é montante dessas apresentadas. Lembrando que o programa pode resolver para todos os tipos de cascatas presentes no sistema brasileiro.

Tendo essas informações das usinas, são necessários os seguintes dados, presentes na Tabela 1,

Tabela 1 – Dados de Entrada do Modelo e Arquivos.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Nome** | **Símbolo no Modelo** | **Símbolo nos Arquivos** | **Descrição** |
| Vazão Afluênte |  |  | Dados de Afluência e Defluência Anterior (*aflu\_h.jl* e *deflu\_h.jl*) |
| Vazão Defluênte Anterior |  |  | Dados de Afluência e Defluência Anterior (*aflu\_h.jl* e *deflu\_h.jl*) |
| Polinômio Montante |  |  | Hidr e Dados Gerais das Usinas (hidr*.jl*) |
| Polinômio Jusante |  |  | Hidr e Dados Gerais das Usinas (hidr*.jl*) |
| Altura Líquida |  |  | Hidr e Dados Gerais das Usinas (hidr*.jl*) |
| Volume Inicial |  |  | Pode estar entre quatro opções: Valor conhecido\*, volume máximo do reservatório, 70% do volume máximo ou um chute dentro dos limites. |
| Limites de Volume |  | \ | Hidr e Dados Gerais das Usinas (hidr*.jl*) |
| Limite de Vertimento |  |  | Hidr e Dados Gerais das Usinas (hidr*.jl*) |
| Demanda |  |  | Demanda e Tempo de Viagem (*entrada.jl* e *Entrada\_dados.jl*) |
| Limites de Geração |  | \ | Hidr e Dados Gerais das Usinas (hidr*.jl*) |
| Limites de Vazão Turbinada |  |  | Hidr e Dados Gerais das Usinas (hidr*.jl*) |
| Curva Colina |  |  | Curva Colina (*CC\_transf\_vaz\_afluencia.ipynb*) |
| Tempo de Viagem |  |  | Demanda e Tempo de Viagem (*entrada.jl* e *Entrada\_dados.jl*) |

Obs: Valor conhecido\*: para algumas usinas é possível achar o volume do reservatório em algum período de tempo, como exemplo a Copel, possui essa e outras informações sobre as suas bacias no seu site, por exemplo da bacia do Iguaçu: [*https://www.copel.com/mhbweb/paginas/bacia-iguacu.jsf*](https://www.copel.com/mhbweb/paginas/bacia-iguacu.jsf).

## Demanda, Afluência e Tempo de Viagem (DESSEM)

Neste subcapítulo será descrito sobre os dados obtidos do DESSEM, eles são os dados de demanda por subsistema, afluências, defluências anteriores e dados sobre tempo de viagem da água.

Para obter os dados basta baixar um deck do DESSEM, descompactar dentro da pasta “Dados” e rodar os códigos *aflu\_h.jl*, *deflu\_h.jl*, *Entrada\_dados.jl* e após rodar esses três códigos basta rodar outro que é o *entrada.jl* para que assim se obtenha os dados desejados. Será descrito nos próximos subcapítulos cada um desses códigos.

## Dados de Afluência e Defluência Anterior (*aflu\_h.jl* e *deflu\_h.jl*)

Neste subcapítulo será descrito sobre os dados de afluência natural. Esses dados estão presentes nos arquivos *aflu\_h.csv* e no arquivo vindo da ONS, *Tratado\_Afluencia.csv*.

Além disso vamos descrever como obter as informações de defluência anterior, *deflu\_h.csv*, para conseguir executar o código de otimização antes que a vazão afluente chegue nas usinas a jusante da cascata.

O arquivo de programação *aflu\_h.jl* pega o *Tratado\_Afluencia.csv* e gera o arquivo *aflu\_h.csv*, que será utilizada pelo modelo como tabela de vazões afluentes. O arquivo de programação *deflu\_h.jl* pega o arquivo *deflant.dat* do deck do DESSEM e gera o arquivo *deflu\_h.csv*, que será utilizado pelo modelo como tabela de defluências anteriores.

A seguir temos as Tabela 2 e a Tabela 3 que mostra as informações presentes nos arquivos *aflu\_h.csv* e *deflu\_h.csv* respectivamente.

Tabela – *aflu\_h.csv*

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Campo** | **Colunas** | **Descrição** |
| 1 | 1 | Nome da Usina (String) |
| 2 | 2 | Código da ONS para a usina (Inteiro) |
| 3 | 3 | Identificação do método utilizado para obtenção: (String)  Media Movel – Representa dos dados fazendo uma média móvel diária dos dados vindos da ONS.  Media Movel Scaled – A mesma média móvel só que agora limitada inferiormente e superiormente pela média dos 5 menores e maiores valores de vazão dos dados vindos da ONS |
| 4 | 4 a 51 | Dados de vazão afluênte para testar o modelo (Float) |

Tabela – *deflu\_h.csv*

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Campo** | **Colunas** | **Descrição** |
| 1 | 1 | Código da ONS para a usina que está a montante (Inteiro) |
| 2 | 2 | Código da ONS para a usina que está a jusante (Inteiro) |
| 3 | 3 | Tipo de entidade a jusante (String)  H – Usina Hidrelétrica  S – Seção de rio |
| 4 | 4 e 5 | Dia e Hora inicial (Inteiro) |
| 5 | 6 | Indentificiação da meia hora inicial (Inteiro)  0 ou vazio – 1ª meia hora  1 – 2ª meia hora |
| 6 | 7 e 8 | Dia e Hora final (Inteiro) |
| 7 | 9 | Indentificiação da meia horafinal (Inteiro)  0 ou vazio – 1ª meia hora  1 – 2ª meia hora |
| 8 | 10 | Defluência da usina () (Float) |

### Descrevendo o Arquivo *Tratado\_Afluencia.csv*

O arquivo *Tratado\_Afluencia.csv* possui uma aproximação/chute para a vazão afluente horária que o modelo utilizará no processo de otimização. É utilizada o histórico de alguns anos de vazão afluente diária e feita uma média móvel para transformar em um vetor com 24 ou 48 períodos.

Tabela 4 – *Tratado\_Afluencia.csv*

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Campo** | **Colunas** | **Descrição** |
| 1 | 1 | Nome da Usina (String) |
| 2 | 2 | Código da ONS para a usina (Inteiro) |
| 3 | 3 ao final | Informações de afluência diárias vindas da ONS (Float) |

### Origem dos Dados de Vazão Afluente

Para obter o arquivo *Tratado\_Afluencia.csv* é necessário seguir os seguintes passos,

1. Acessar o site da ONS para obtenção dos dados hidrológicos diários, presentes em [2].
2. Filtrar as usinas que pretende obter os dados e o período que deseja considerar para futura aproximação.
3. Baixar esses arquivos no formato .xlsx e abrir com algum programa compatível.
4. Excluir as linhas e colunas que não deseja, algumas aparecem repetidas ou realmente são desnecessárias.
5. Adicionar manualmente a coluna “Código da Usina (ONS)” que contém os códigos da ONS de cada usina, é necessário para conseguir identificar posteriormente na etapa de programação.
6. Salva Como ou Exportar para o formato **'CSV UTF-8 (Delimitado por vírgulas)(\*.csv)'** com o nome “Tratado\_\*\*\*.csv”

Após esse processo o Julia conseguirá abrir o arquivo e fazer as contas e alterações necessárias.

## Hidr e Dados Gerais das Usinas (*hidr.jl*)

Neste subcapítulo será descrito sobre os dados gerais das usinas, são os seguintes: os polinômios montante e jusante, a função de altura líquida e os limites de volume, vertimento, geração e de vazão turbinada. Esses dados e outros estão presentes na tabela *Hidr.xlsx*, da qual é tratada pelo arquivo de programação *hidr.jl* e assim resultando na Tabela 5 que contém apenas as informações necessárias para o modelo.

Tabela 5 – *entrada.csv*

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Campo** | **Colunas** | **Descrição** |
| 1 | 1 | Código da ONS para a usina (Inteiro) |
| 2 | 2 | Subsistema (Inteiro) |
| 3 | 3 | Nome da usina (String) |
| 4 | 4 | Volume máximo de vertimento (Float) |
| 5 | 5 e 6 | Volume mínimo e máximo do reservatório (Float) |
| 6 | 7 | Número de unidades geradoras (Inteiro) |
| 7 | 8 | Tipo de perda para o cálculo da altura líquida (Inteiro)  1 – Porcentagem  2 – Constante |
| 8 | 9 | Valor que vai ser utilizado na conta para transformar de altura bruta para altura líquida (Float) |
| 9 | 10 e 11 | Vazão turbinada mínima e máxima da turbina instalada (Float) |
| 10 | 12 e 13 | Geração mínima\* e máxima da turbina instalada (Float) |
| 11 | 14 | Potência total instalada (Float) |
| 12 | 15 a 19 | Coeficiêntes do polinômio jusante (Float) |
| 13 | 20 a 24 | Coeficiêntes do polinômio montante (Float) |
| 14 | 25 e 26 | Altura mínima e máxima do reservartório (Float) |
| 15 | 27 | Rendimento nominal da turbina instalada (Float) |

Obs: Geração mínima\* presente foi inserida a mão, pois não está presente na tabela Hidr, os dados presentes são do caderno de curvas colinas [3] ou da Copel.

O arquivo *hidr.jl* também pega outra informação presente na *Hidr.xlsx*, essas informações estão na Tabela 6. Nela contém a informação de potência instalada por subsistema, essa informação é importante para gerar um chute na demanda das usinas. O processo que transforma essa potência instalada por subsistema em um vetor de demandas será descrito no subcapítulo 3.4.

Tabela 6 – *potencia\_instalada\_hidr.csv*

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Campo** | **Colunas** | **Descrição** |
| 1 | 1 | Código do subsistema |
| 2 | 2 | Nome do subsistema que está presente na Hidr.xlsx |
| 3 | 3 | Potência instalada no subsistema |

## Demanda e Tempo de Viagem (*entrada.jl* e *Entrada\_dados.jl*)

Neste subcapítulo será descrito sobre a geração da demanda para cada usina e da obtenção do tempo de viagem da água. Inicialmente sobre o arquivo de programação *Entrada\_dados.jl*, qual captura as essas duas informações do DESSEM mais especificamente do arquivo *entdados.dat*, transformando nos arquivos *tempo\_viagem.csv* e no arquivo *demanda\_sub\_h.csv*, que serão descritos na Tabela 7 e na Tabela 8 respectivamente.

Tabela 7 – *tempo\_viagem.csv*

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Campo** | **Colunas** | **Descrição** |
| 1 | 1 | Código da ONS para a usina a montante (Inteiro) |
| 2 | 2 | Número do elemento de Jusante (Inteiro) |
| 3 | 3 | Tipo de elemento de Jusante (String)  H – Usina Hidrelétrica  S – Seção de rio |
| 4 | 4 | Tempo de viagem da água desde a usina a montante até a entidade a jusante em horas (Inteito) |
| 5 | 5 | Tipo da curva de tempo de viagem  1 – tempo de viagem por translação  2 – tempo de viagem por propagação (Raro)  Caso do tipo ser 2 então será necessário o arquivo *CURVTVIAG.DAT*, o qual **não foi implementado** nos códigos presentes. |

Assim como o tempo de viagem da água veio do DESSEM, a demanda por subsistemas também é da mesma origem.

Tabela 8 – *demanda\_sub\_h.csv*

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Campo** | **Colunas** | **Descrição** |
| 1 | 1 | Código do subsistema (Inteiro) |
| 2 | 2 e 3 | Dia e Hora inicial (Inteiro) |
| 3 | 4 | Indentificiação da meia hora inicial (Inteiro)  0 ou vazio – 1ª meia hora  1 – 2ª meia hora |
| 4 | 5 e 6 | Dia e Hora final (Inteiro) |
| 5 | 7 | Indentificiação da meia hora final (Inteiro)  0 ou vazio – 1ª meia hora  1 – 2ª meia hora |
| 6 | 8 | Demanda (MW) (Float) |

O arquivo de programação *entrada.jl* pega o arquivo *demanda\_sub\_h.csv* descrito na Tabela 8 e além dele também utiliza os arquivos, *potencia\_instalada\_hidr.csv* que está descrito na Tabela 6, o arquivo *entrada.csv* está descrito na Tabela 5. Para finalmente gerar os arquivos *demanda\_demanda.csv* e *demanda\_hidr.csv* descritos na Tabela 9.

Os dois arquivos são gerados utilizando a mesma função (32). Onde a demanda é feita por período te tempo e por usina . A variável será descrita posteriormente.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (32) |

Se a usina e o período estiverem fixos, podemos ver que essa demanda gerada pela função depende unicamente do valor de . O arquivo *demanda\_hidr.csv* é gerado com o valor de sendo a potência instalada no subsistema dado pelo arquivo *potencia\_instalada\_hidr.csv* que está descrito na Tabela 6. Um fato é que o dado da potência instalada que está armazenado na tabela Hidr é maior do que qualquer valor de demanda no subsistema, sendo assim , então é fácil ver que para todo período de tempo e toda usina .

Já o arquivo *demanda\_demanda.csv* é gerado com o valor de sendo o máximo da demanda naquele subsistema, então temos que para algum período de tempo teremos, , então é fácil ver que . Sendo assim independente do arquivo de demanda, elas terão o mesmo comportamento, mudando apenas os limites superiores e inferiores.

A Tabela 9 descreve os arquivos *demanda\_hidr.csv* e *demanda\_demanda.csv*, as informações presentes nesses arquivos estão organizadas de forma transposta, para facilitar a utilização no programa. Ou seja, será descrito por linhas não por colunas.

Tabela 9 – *demanda\_\*\*\*.csv*

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Campo** | **Linhas** | **Descrição** |
| 1 | 1 | Código da ONS para a usina ou do subsistema (Inteiro) |
| 2 | 2 ao final | Demanda da usina ou do subsistema (MW médio) (Float) |

Como comentado anteriormente, neste arquivo está presente a demanda semi-horária de cada usina que será utilizada no processo de otimização e além disso está presente a soma das demandas de todas as usinas por subsistema. O código do subsistema está com o valor negativo, ou seja, é possível que apareçam os códigos 1, 2, 3, 4 ou 11 negativos para representar a coluna com as demandas dos subsistemas.

Caso queira trocar a restrição (21) para atendimento a demanda por subsistema semi-horário, em vez de ter um atendimento a demanda por usina semi-horário. Ficando da seguinte forma,

|  |  |
| --- | --- |
|  | (33) |

## Curva Colina (*CC\_transf\_vaz\_afluencia.ipynb*)

Neste subcapítulo vamos falar sobre os dados de rendimento, essa informação está presente na curva colina da turbina. As informações sobre as curvas colinas que temos acesso estão presentes no caderno de curvas colinas, [3]. O processo para gerar a aproximação quadrática dessas curvas colinas é individual e será descrito a seguir.

Incialmente obtemos o arquivo da curva colina e colocamos ele na pasta “Dados\Curva Colina”. O arquivo do Jupyter Notebook, *CC\_transf\_vaz\_afluencia.ipynb*, faz a aproximação dos dados da curva colina por um polinômio de segundo grau. O arquivo que armazena esses coeficientes está descrito na Tabela 10 a seguir,

Tabela 10 – *coefs\_2grau.csv*

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Campo** | **Colunas** | **Descrição** |
| 1 | 1 | Coeficiente linear do polinômio que aproxima a curva colina (Float) |
| 2 | 2 | Coeficiente angular referente a vazão turbinada ou a potência ativa (Float) |
| 3 | 3 | Coeficiente quadrático referente a vazão turbinada ou a potência ativa (Float) |
| 4 | 4 | Coeficiente quadrático misto da vazão afluênte ou da potência ativa com a altura bruta ou líquida (Float) |
| 5 | 5 | Coeficiente angular referente a altura bruta ou a altura líquida (Float) |
| 6 | 6 | Coeficiente quadrático referente a altura bruta ou a altura líquida (Float) |
| 7 | 7 | Código da ONS para a usina (Inteiro) |

Essa ambiguidade sobre qual informação utilizar para calcular o rendimento da turbina varia de turbina para turbina e está presente no caderno de curvas colinas. Nesta Tabela 10 não está presente se a curva colina é descrita em função da potência ativa ou da vazão turbinada, esse dado deve ser pego manualmente no caderno de curvas colinas e inserido no modelo de otimização de forma manual.

Além de fazer a aproximação para a curva colina, esse arquivo também aproximou o polinômio que é referente a vazão transferida, essa informação não está presente em outros lugares, foi encontrado alguns dados referentes a quantidade de vazão transferida com a alteração na altura do reservatório e assim feita a aproximação por uma raiz quadrática.

Como é algo extremamente particular e possui apenas um coeficiente, esse dado foi passado de forma manual para o código de otimização. A única função de vazão transferida presente no código anteriormente é da vazão transferida entre Jordão e Segredo, essa função é a seguinte,

|  |  |
| --- | --- |
|  | (34) |

Onde essa função (34) transforma a diferença de altura [m] em vazão transferida [m³/s], essa transferência ocorre de forma automática onde o que determina quanta água será transferida e qual sentido essa água terá é a diferença das alturas entre as usinas que determina se a água vai de Segredo para Jordão ou de Jordão para Segredo.

# IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO

Neste capítulo será apresentado os recursos utilizados para implementação, descrição, organização e resolução do que foi apresentado anteriormente. Além disso será apresentado o método de solução, que é correlacionado aos recursos apresentados.

Foi utilizado principalmente a linguagem de programação Julia (<https://julialang.org/>), a versão utilizada é a 1.5.3. Para escrita e execução dos códigos recorremos ao JuliaPro (<https://juliacomputing.com/products/juliapro/>) em uma versão compatível com a versão atual do Julia, 1.5.3. Em seguida vamos apresentar os pacotes utilizados para execução do código, as suas versões e para o que servem, segue as informações atualizadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Pacotes, Versões e Descrições Para a Abordagem.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Pacote** | **Versão** | **Descrição** |
| JuMP | 0.21.5 | JuMP é uma linguagem de modelagem específica de domínio para otimização matemática incorporada em Julia. Atualmente, ele oferece suporte a vários solucionadores de código aberto e comerciais para uma variedade de classes de problemas. Utilizamos ele para modelagem e implementação e também através dele utilizamosos solucionadores. |
| Juniper | 0.6.5 | O Juniper (Jump Nonlinear Integer Program Solver) é um solucionador que resolve problemas de natureza não linear com variáveis discretas (MINLP). Utilizamos ele como método de solução através do JuMP. |
| Ipopt | 0.6.5 | Ipopt é um solucionador de código aberto para otimização contínua não linear em grande escala. Ele pode ser usado em vários ambientes de modelagem. O Ipopt usa um método de ponto interior, junto com um procedimento de pesquisa linear de filtro. Utilizamos ele como método de solução através do JuMP. |
| CSV | 0.8.2 | Um leitor/gravador de arquivos rápido e flexível para Julia. Utilizamos para ler as informações das usinas dos arquivos no formato *.csv*. |
| Interpolations | 0.13.1 | Este pacote implementa uma variedade de esquemas de interpolação para a linguagem Julia. Utilizamos esse pacote para interpolar via Spline2D a curva colina e para interpolar linearmente o polinômio montante, etc. |
| DataFrames | 0.22.4 | Este pacote fornece um conjunto de ferramentas para trabalhar com dados tabulares em Julia. Utilizamos para trabalhar com os dados que vieram dos arquivos no formato *.csv*. |
| LinearAlgebra | Nativa | É um pacote nativo do Julia com suporte para matrizes multidimensionais, fornecendo implementações nativas de muitas operações de álgebra linear comuns e úteis que podem ser carregadas. Utilizamos esse pacote para realização de contas entre vetores e matrizes durante o código. |
| Plots | 1.10.1 | Plots é uma interface de visualização e um conjunto de ferramentas. Utilizamos esse pacote para visualização dos resultados. |
| Dates | Nativa | O pacote Dates fornece dois tipos de trabalho com datas: Date e DateTime. Utilizamos ele para execução do código para vários dias de uma semana ou até do mês todo de forma automatizada. |
| XLSX | 0.7.3 | Este pacote fornece um conjunto de ferramentas para trabalhar com dados vindos de tabelas. Utilizamos para trabalhar com os dados que vieram dos arquivos no formato *.xlsx*. |

O modelo foi escrito através do JuMP, ou seja, escrevemos cada uma das restrições do modelo matemático em um modelo computacional, que foi resolvido utilizando o Juniper em conjunto com o Ipopt como solucionadores.

Outra linguágem de programação presente no decorrer do projeto foi o Python na sua versão 3.9.1 (<https://www.python.org>), aparecendo unicamente na parte da obtenção da aproximação da curva colina, onde foram utilizadas as seguintes bibliotecas,

Tabela – Pacotes, Versões e Descrições do Python.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Pacote** | **Versão** | **Descrição** |
| statsmodels | 0.12.1 | Este pacote implementa uma variedade de modelos estatísticos para a linguagem Python. Utilizamos esse pacote para interpolar de forma quadrática a curva colina. |
| pandas | 1.2.1 | Este pacote fornece um conjunto de ferramentas para trabalhar com dados tabulares em Python. Utilizamos para trabalhar com os dados que vieram dos arquivos no formato *.csv*. |
| numpy | 1.19.5 | É um pacote com suporte para matrizes multidimensionais. Fornecendo muitas operações de álgebra linear comuns e úteis que podem ser carregadas. Utilizamos esse pacote para realização de contas entre vetores e matrizes durante o código. |
| matplotlib | 3.3.4 | matplotlib é uma interface de visualização e um conjunto de ferramentas. Utilizamos esse pacote para visualização dos resultados. |
| Jupyter Notebook | 6.1.4 | Jupyter Notebook foi utilizado para escrita e execução dos códigos. Sendo uma interface onde facilita muito a execução do código com várias etapas, podendo se verificar o passo a passo do processo. |

# CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES

O modelo apresentado nas seções anteriores apresentou ótimos resultados frente a quantidade de detalhes incluídos. Sendo principalmente versátil em relação as restrições, podendo se alterar as demandas dentro dos limites conhecidos e respeitando a característica das usinas estarem em cascata.

Este relatório reprisou o modelo de curtíssimo prazo. Foram apresentados a forma de obter e a origem dos dados utilizados no decorrer do projeto, além disso foi apresentado o modelo matemático e as principais alterações feitas na modelagem original para resolução de um problema mais complexo.

Membros que desenvolveram o modelo matemático e escreveram os códigos em Julia e em Python foram, João Victor da Silva ([josilva602@gmail.com](mailto:josilva602@gmail.com)) e Talia Correia Schulz ([taliacschulz@gmail.com](mailto:taliacschulz@gmail.com)). Pessoa responsável por escrever esse manual foi o João Victor da Silva ([josilva602@gmail.com](mailto:josilva602@gmail.com)).

# Referências

|  |  |
| --- | --- |
| [1] | B. H. Brito, E. C. Finardi e F. Y. K. Takigawa, “Mixed-integer nonseparable piecewise linear models for the hydropowerproduction function in the Unit Commitment problem,” *Electric Power Systems Research,* p. 13, 2020. |
| [2] | ONS, “Dados Hidrológicos,” ONS, [Online]. Available: http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/dados\_hidrologicos\_vazoes.aspx. [Acesso em Agosto 2021]. |
| [3] | C. A. V. Vallejos, S. C. C. Mainardes, L. F. P. Garcia, P. H. B. M. Almeida e M. R. Bessa, Caderno Curvas Colina Conjuntas, Lactec, 2012. |