

# Aplicação de métodos clássicos de busca local no problema de planejamento do despacho hidrelétrico

Bruno Nocera Zanette

Universidade Federal do Paraná

*bnzanette@inf.ufpr.br*

Agosto, 2017

# Sumário

## 1 Introdução e Apresentação do problema

- Informações sobre o SIN
- Geração de energia hidrelétrica
- Séries de vazões
- Problema e Objetivo

## 2 Revisão bibliográfica

- Algoritmos de busca clássicos
- Método de Monte Carlo

## 3 Solução

- Simulador
- Rede de transmissão

- Gerador de planos

- Função Fitness

- Buscador

- Otimizador

## 4 Resultados

- Resultados da simulação

- Resultados da otimização

- Análise do tempo de execução

## 5 Conclusão

- Contribuições

- Propostas

- Trabalhos futuros





## Planejamento do despacho hidrelétrico

- Computacionalmente o planejamento do despacho hidrelétrico consiste em atribuir valores para todas as ações operacionais mensais, o que resulta em 120 valores para cada usina. Mais de 12000 (doze mil) variáveis para um plano de 5 anos, considerando todas as usinas.
- O planejamento é feito com base em séries de vazões sintéticas

## Séries de vazões

- Foram usadas séries sintéticas geradas pelo modelo CARMA [Detzel et al., 2014]
- Os valores são dados como a vazão incremental natural do rio no ponto em que cada usina está instalada
- Para calcular a vazão total afluyente ( $VzT$ ) ao reservatório de cada usina ( $s$ ) e cada período ( $p$ ) após a execução das ações operacionais das usinas à montante ( $Mon$ ) é usada a equação 1

$$VzT[s, p] = Vz[s, p] + \left( \sum_{m=1}^{Mon} (Qvt[m, p] + Qc[m, p]) - \sum_{m=1}^{Mon} (Vz[m, p]) \right) \quad (1)$$







# Problema

- O cálculo da energia gerada por cada usina envolve funções não-lineares e há dependência temporal e espacial no cálculo das variáveis.
  - Exemplo: Cálculo do volume, que depende das vazões das usinas a montante e do volume prévio do reservatório.
- O plano precisa ser factível. As ações operacionais devem ser tais que as restrições operativas impostas pelo sistema sejam respeitadas durante todo o período avaliado
- **Essa questão é classificada como um problema de otimização não-linear com restrições de larga escala**

## Qualidade da solução

- Foi usado uma função *fitness* que calcula o quão perto de um objetivo pré-definido o resultado da simulação desse plano está
  - Uma vez que é praticamente impossível de afirmar que um plano é o melhor possível.
- Neste trabalho os objetivos são atender a demanda energética e manter os reservatórios de água cheios

## Objetivo

Gerar um plano de despacho hidrelétrico que atenda a demanda de energia elétrica e mantenha os reservatórios de água das usinas cheios

## Como

Planejando as ações operacionais que devem ser executadas mensalmente por cada usina hidrelétrica por um longo período

## Solução

Desenvolver um otimizador para o problema de despacho hidrelétrico, com base num simulador de despacho hidrelétrico e técnicas clássicas de busca local, mais especificamente: subida de encosta, algoritmo têmpera simulada e métodos de Monte Carlo.



## Subida de encosta e Têmpera simulada

### Subida de encosta

- Iteração que continuamente se move na direção do valor mais alto, e termina ao chegar num ponto onde nenhum de seus vizinhos possuem valores maiores que o valor corrente

### Têmpera simulada

- Alia aleatoriedade ao algoritmo subida de encosta
- Baseado no processo metalúrgico de temperar, ou enrijecer, um metal ou vidro que é obtido esquentando o material até uma alta temperatura e depois esfriando-o gradualmente, fazendo com que o mesmo atinja um estado cristalino de baixa energia [Russell e Norvig, 1995]

## Método de Monte Carlo

- Processos estocásticos, nos quais suas conclusões são obtidas a partir da observação de eventos aleatórios e podem ser usados para resolver tanto problemas determinísticos quanto probabilísticos [Hammersley, 2013].
- **São capazes de realizar buscas. As observações também podem ser vistas como uma espécie de busca aleatória.**
- Não deve ser utilizada exclusivamente como uma caixa-preta [Andrieu et al., 2003]. Ao incorporar um conhecimento prévio do domínio do problema ao design da solução é possível obter resultados mais significativos.
- A precisão dos resultados depende diretamente da quantidade de eventos aleatórios observados. Quanto mais eventos forem observados maior será a precisão.

## Componentes da solução

- Simulador do sistema hidrelétrico
- Rede de transmissão
- Gerador de planos (Seleção e Modificação)
- Função *Fitness*
- Buscador de planos
- Otimizador da função de busca

# Fluxograma

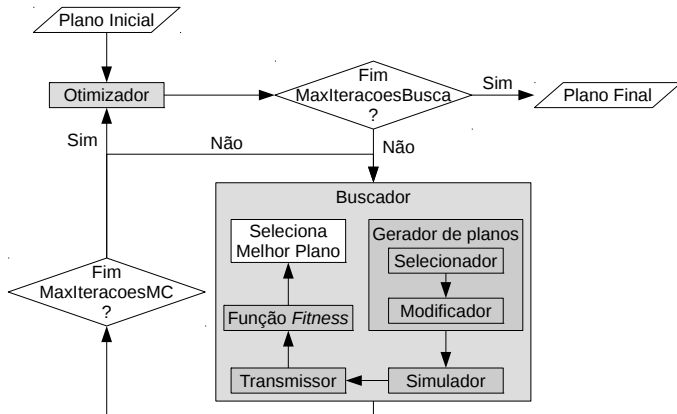


Figura: Fluxograma da solução proposta





# Simulador do sistema hidrelétrico

---

## Algoritmo 1 Algoritmo do simulador

---

**Require:** *usinasSimuladas*, *periodoInicial*, *periodoFinal*, *Vol*

```
1: for all s ← emOrdemTopologica(usinasSimuladas) do
2:   for all p ← periodoInicial to periodoFinal do
3:      $VzT[s, p] \leftarrow \text{calculaVazaoMontante}(s, p, \text{plano}) + Vz[s, p]$ 
4:      $Vol[s, p] = Vol[s, p - 1] + \text{emHectometroCubico}(VzT[s, p], p)$ 
5:     verificaVolume(s, p, Vol[s, p], plano)
6:      $E[s, p] \leftarrow \text{calculaEnergiaGerada}(s, \text{volumePrevio})$ 
7:     if not verificaRestricoes(s, p) then
8:       return erro
9:     end if
10:   end for
11: end for
12: return resultados
```

---

## Rede de Transmissão

- Utiliza uma abordagem de força bruta para transmitir toda a energia possível dos subsistemas com superávit de energia para aqueles com déficit
- Em cada iteração do algoritmo de transmissão é:
  - Verificado se o subsistema tem superávit de energia
  - Em caso positivo, é transferido o máximo de energia possível para os subsistemas que demandam e estão em condição de receber
- O algoritmo termina quando não houver nenhuma transmissão na última iteração
- Não foi implementado um cálculo de prioridade de transmissão

## Gerador de planos

### Seleção

- Tem como parâmetros um conjunto de usinas (*usinasBuscadas*) e a quantidade de usinas a serem modificadas (*qtdUsinasModificadas*)
- Retorna um subconjunto de *usinasBuscadas* contendo *qtdUsinasModificadas* usinas selecionadas aleatoriamente
- É importante destacar que *usinasBuscadas* pode ser diferente do conjunto total de usinas

## Gerador de planos

### Modificação

- Recebe como parâmetro um conjunto de usinas qualquer
- Modifica ações operacionais de cada uma delas somando ao valor original um percentual aleatório, negativo ou positivo, do valor limitado por uma taxa de variação máxima, *maxPercentage*
- Pode receber o parâmetro *idSubsistemaBuscado*, que determina o subsistema no qual a busca deve focar e uma variável de controle *usePeriodoCritico* que habilita ou não o uso do período crítico
  - Identifica os pontos mínimos da série de volume do subsistema
  - Escolhe um aleatoriamente
  - Modifica apenas as ações entre alguns períodos precedentes ao período selecionado até o próprio período crítico

## Função *Fitness*

### Função *Fitness*

$$fitReal(ss, p) = 1.0 - ((v(ss, p) - v_{min}(ss)) / (v_{max}(ss) - v_{min}(ss)))$$

$$fit(ss, p) = \begin{cases} w * fitReal(ss, p), & \text{se } fitReal(ss, p) \leq m \\ w * (fitReal(ss, p) + 1.0)^n, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$fitness = \sum_{p=1}^P \sum_{ss=1}^{SSb} fit(ss, p)$$

- $ss$  = Subsistema
- $SSb$  = Subsistemas buscados
- $p$  = Período
- $P$  = Todos os períodos
- $v_{min}$  = Valor mínimo da variável
- $v_{max}$  = Valor máximo da variável
- $w$  = Peso da variável
- $n$  = Penalidade da variável
- $m$  = Percentual mínimo da variável

## Exemplo

Plano	Variável	Fits reais						Somatório	Fitness real
		0.000	0.100	0.170	0.350	0.250	0.050		
A	Energia	0.000	0.100	0.170	0.350	0.250	0.050	0.920	2.070
	Volume	0.100	0.250	0.350	0.200	0.100	0.150	1.150	
B	Energia	0.050	0.070	0.100	0.200	0.120	0.050	0.590	2.670
	Volume	0.300	0.450	0.480	0.350	0.250	0.250	2.080	

Tabela: Séries de *fits* reais para dois planos fictícios.

Plano	Variável	Fits						Somatório	Fitness
		0.000	0.070	<b>0.958</b>	<b>1.276</b>	<b>1.094</b>	0.035		
A	Energia	0.000	0.070	<b>0.958</b>	<b>1.276</b>	<b>1.094</b>	0.035	3.433	3.778
	Volume	0.030	0.075	0.105	0.060	0.030	0.045	0.345	
B	Energia	0.035	0.049	0.070	<b>1.008</b>	<b>0.878</b>	0.035	2.075	2.699
	Volume	0.090	0.135	0.144	0.105	0.075	0.075	0.624	

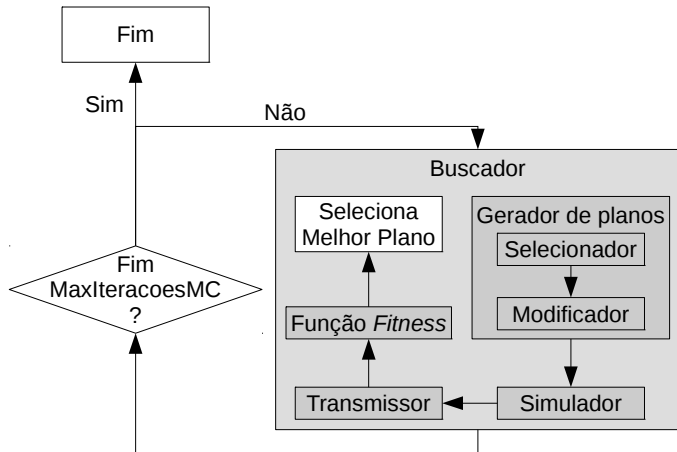
Tabela: Séries de *fits* para os mesmos dois planos

Parâmetros aplicados no cálculo:

$percMinEnergia = 0.1$  /  $penalidadeEnergia = 2.0$  /  $pesoEnergia = 0.7$

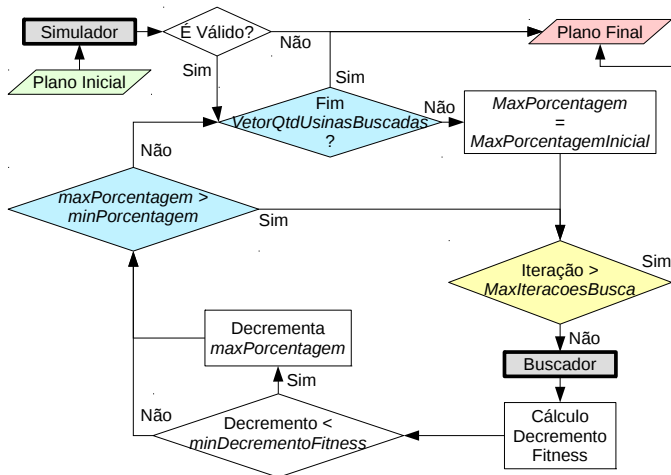
$percMinVolume = 0.5$  /  $penalidadeVolume = 2.0$  /  $pesoVolume = 0.3$

# Buscador





# Otimizador



## Método de avaliação

- Os componentes foram implementados na linguagem C++
- Os testes foram executados em um nodo de um servidor com 4 *sockets* Intel Xeon E5-4627 v2 @ 3.30GHz com 8 núcleos por socket, 256GB de memória RAM e sistema operacional Debian 8.8
- Os resultados foram divididos em:
  - Resultados da simulação: para garantir a correção das simulações
  - Resultados da otimização: para analisar a eficácia do modelo proposto

## Método de avaliação

- Verificar se os resultados da simulação correspondem com os resultados esperados
- Para exemplificar foram escolhidas as usinas Machadinho e Itá
  - Pertencem ao subsistema Sul
  - Estão instaladas no mesmo rio
  - Uma possui reservatório e a outra é fio d'água.
  - Usadas em outros trabalhos correlacionados [Andriolo, 2014]

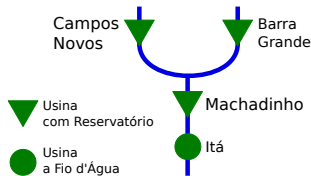
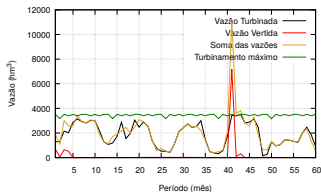
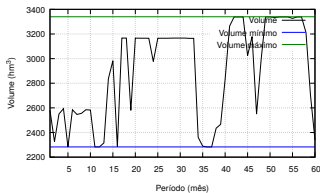


Figura: Usinas de exemplo.

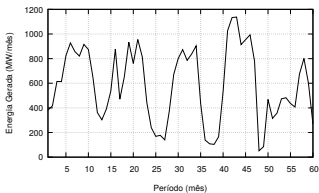
# Séries de vazão, volume e energia: Machadinho (Inicial)



(a) Vazão

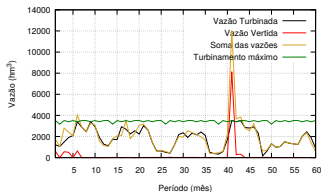


(b) Volume

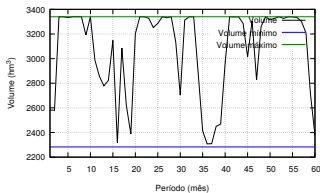


(c) Energia

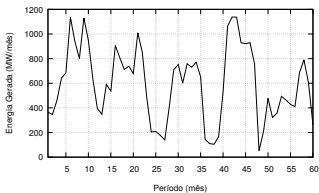
# Séries de vazão, volume e energia: Machadinho (Final)



(a) Vazão

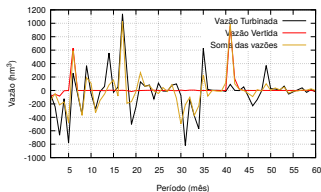


(b) Volume

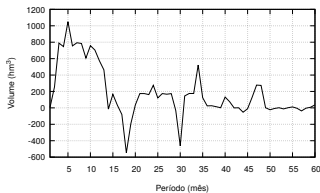


(c) Energia

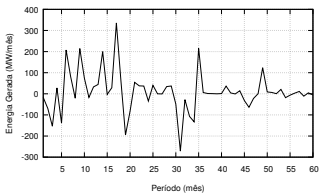
# Reflexo das alterações nas ações operacionais: Machadinho



(a) Diferença - Vazão

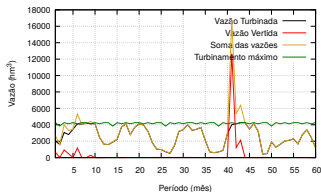


(b) Diferença - Volume

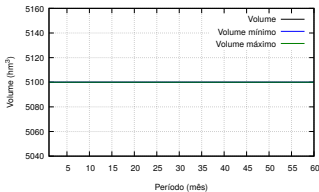


(c) Diferença - Energia

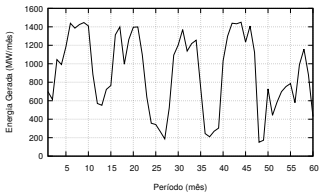
# Séries de vazão, volume e energia: Itá (Inicial)



(a) Vazão

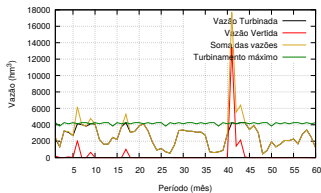


(b) Volume

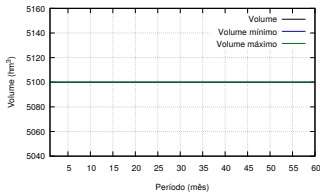


(c) Energia

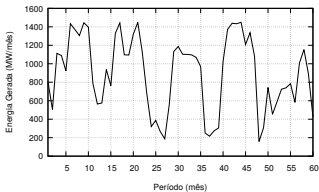
## Séries de vazão, volume e energia: Itá (Final)



(a) Vazão



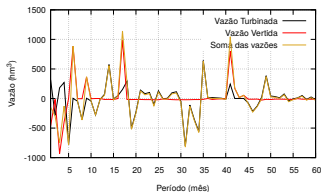
(b) Volume



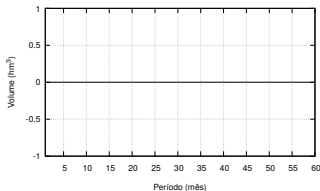
(c) Energia



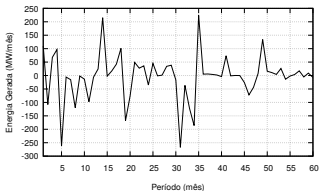
# Reflexo das alterações nas ações operacionais: Itá



(a) Diferença - Vazão



(b) Diferença - Volume



(c) Diferença - Energia

## Parâmetros de execução

Parâmetro	Valor
<i>maxIteracoesBusca</i>	2500
<i>maxIteracoesMC</i>	256
<i>maxPorcentagemInicial</i>	0.275
<i>decrementoPorcentagem</i>	0.75
<i>minPorcentagem</i>	0.1
<i>minDecrementoFitness</i>	0.001
<i>vetorQtdUsinasBuscadas</i>	0 / 0 50 25 10
<i>usePeriodoCritico</i>	Verdadeiro

**Tabela:** Parâmetros de execução do algoritmo otimizador.

## Parâmetros de busca

Parâmetro	<b>CpMdPd</b>	<b>CpMiPd</b>	<b>CpMdPi</b>	<b>CpMiPi</b>	<b>SpPd</b>	<b>SpPi</b>
<i>percMinVolume</i>	0.50	0.30	0.50	0.30	999.9	999.9
<i>penalidadeVolume</i>	2.0	2.0	2.0	2.0	1.0	1.0
<i>pesoVolume</i>	0.3	0.3	1.0	1.0	0.3	1.0
<i>percMinEnergia</i>	0.10	0.30	0.10	0.30	999.9	999.9
<i>penalidadeEnergia</i>	2.0	2.0	2.0	2.0	1.0	1.0
<i>pesoEnergia</i>	0.7	0.7	1.0	1.0	0.7	1.0

**Tabela:** Conjuntos de parâmetros de busca

**CpMdPd** = Com penalidades, Mínimos diferentes, Pesos diferentes;

**CpMiPd** = Com penalidades, Mínimos iguais, Pesos diferentes;

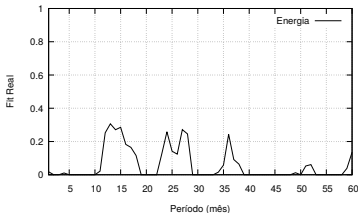
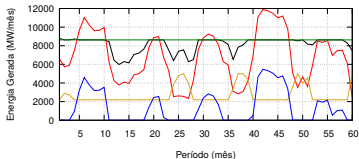
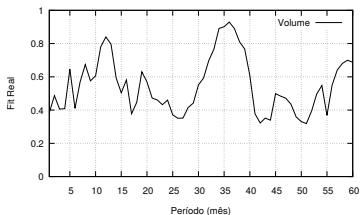
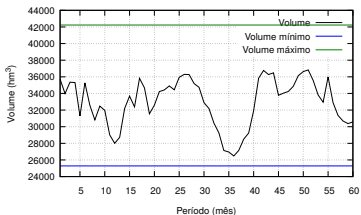
**CpMdPi** = Com penalidades, Mínimos diferentes, Pesos iguais;

**CpMiPi** = Com penalidades, Mínimos iguais, Pesos iguais;

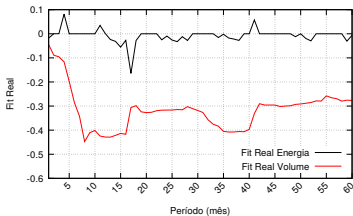
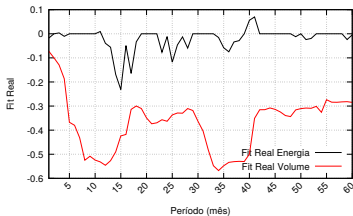
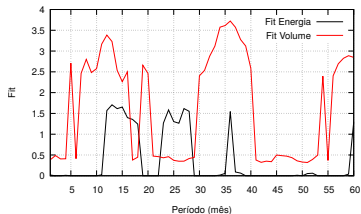
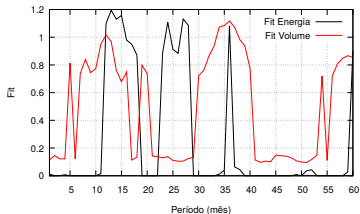
**SpPd** = Sem penalidades, Pesos diferentes;

**SpPi** = Sem penalidades, Pesos iguais;

# Resultados da simulação do plano inicial: Subsistema Sul



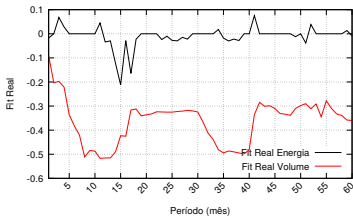
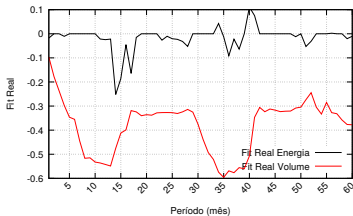
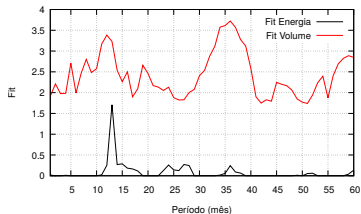
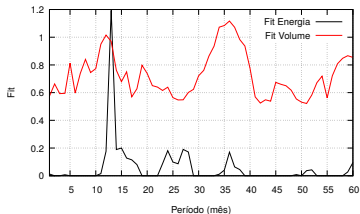
# Fits e Fits Reais: Subsistema Sul



(a) CpMdPd

(b) CpMdPi

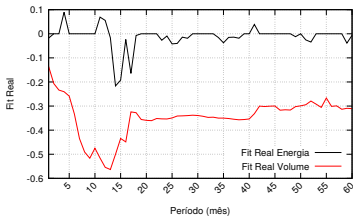
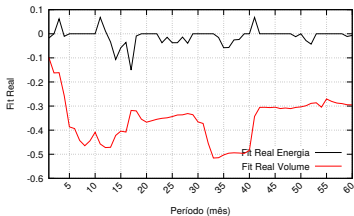
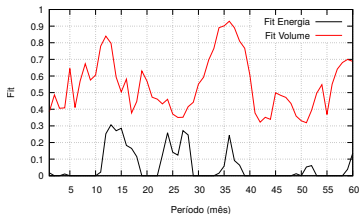
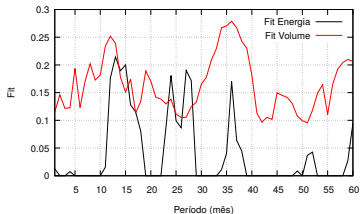
# Fits e Fits Reais: Subsistema Sul



(a) CpMiPd

(b) CpMiPi

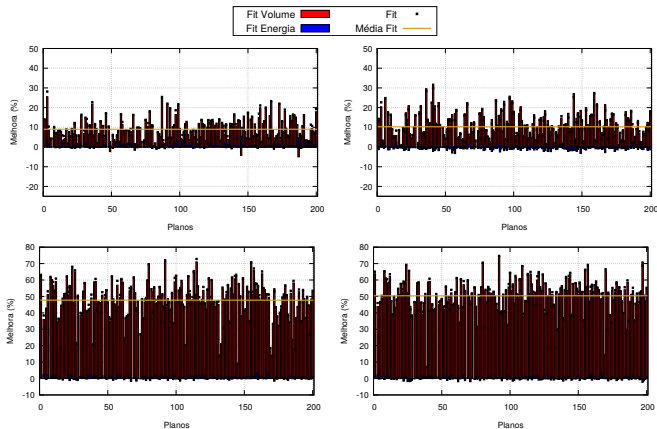
# Fits e Fits Reais: Subsistema Sul



(a) SpPd

(b) SpPi

# Melhora dos *Fits* Reais de diversos planos

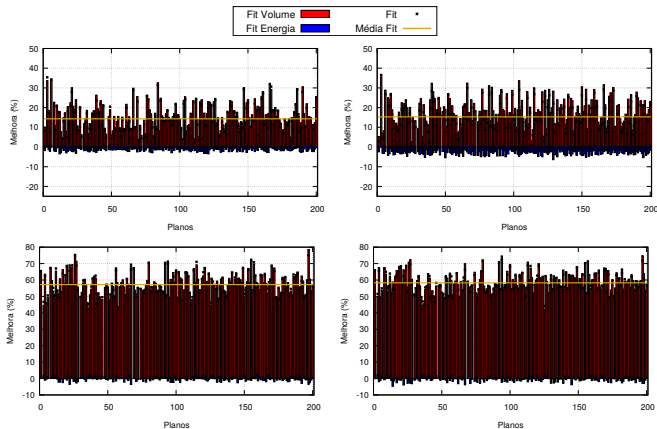


(a) CpMdPd

(b) CpMdPi



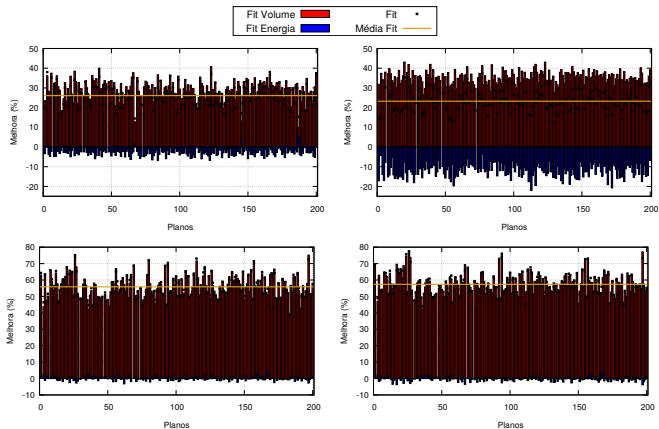
# Melhora dos *Fits* Reais de diversos planos



(a) CpMiPd

(b) CpMiPi

# Método de avaliação



(a) SpPd

(b) SpPi

## Análise do tempo de execução: Busca no Subsistema Sul

<i>Threads</i>	Tempo médio (s)	<i>Speedup</i>	Eficiência
001	0.29150	1.00000	1.00000
002	0.23083	1.26285	0.63142
004	0.13825	2.10857	0.52714
006	0.10056	2.89876	0.48313
008	0.07954	3.66486	0.45811
012	0.05618	5.18829	0.43236
016	0.04368	6.67321	0.41708
024	0.03186	9.15081	0.38128
032	0.02549	11.43402	0.35731

**Tabela:** Tempo médio de execução de uma iteração de busca apenas no subsistema Sul.

Tempo médio para gerar o plano: 0,000125s

Tempo médio para simular o plano: 0,001201s

## Análise do tempo de execução: Busca no Sistema inteiro

<i>Threads</i>	Tempo médio (s)	<i>Speedup</i>	Eficiência
001	1.38986	1.00000	1.00000
002	0.85108	1.63306	0.81653
004	0.47338	2.93606	0.73402
006	0.33192	4.18729	0.69788
008	0.25870	5.37256	0.67157
012	0.18173	7.64780	0.63732
016	0.14283	9.73118	0.60820
024	0.10845	12.81560	0.53398
032	0.07345	18.92209	0.59132

**Tabela:** Tempo médio de execução de uma iteração de busca em todas as usinas.

Tempo médio para gerar o plano: 0.001866s  
Tempo médio para simular o plano: 0.003610s

# Contribuições

- Foi apresentado uma implementação funcional de um simulador de despacho hidrelétrico capaz de simular um plano de despacho hidrelétrico e de verificar o atendimento às restrições operativas num curto espaço de tempo.
  - Base para outros trabalhos, facilitando a implementação de outros métodos de busca

# Propostas

- Foram propostos dois métodos:
  - um método de busca local, inspirado no método de Monte Carlo, capaz de encontrar planos melhores que o plano inicial num curto período de tempo
  - ... e um método para otimizar os parâmetros de busca após as iterações que não retornam planos melhores, inspirado no algoritmo têmpera simulada e no método de Subida de Encosta.
- O método de otimização implementado, resultante da combinação desses dois métodos, foi capaz de encontrar planos significativamente melhores em todos os testes realizados, com todos os conjuntos de parâmetros e com todos os planos iniciais, num curto período de tempo.




## Trabalhos futuros

### Métodos de busca mais elaborados

Como trabalhos futuros sugere-se o uso de métodos mais elaborados de busca no intuito de encontrar planos ainda melhores pois, dada a natureza puramente aleatória do método proposto, é muito provável que alguns dos valores gerados sejam ruins.

### Uso de técnicas de reconhecimento de padrões nos dados gerados

O método proposto produz uma grande quantidade de dados, pois gera e avalia milhares de planos distintos, que podem ser usados por algoritmos de reconhecimento de padrões com o propósito de detectar quais alterações são mais ou menos relevantes.

-  Andrieu, C., de Freitas, N., Doucet, A. e Jordan, M. I. (2003).  
An introduction to mcmc for machine learning.  
*Machine Learning*, 50(1):5–43.
-  Andriolo, R. F. (2014).  
Acoplamento elétrico energético no planejamento da operação  
em médio prazo com restrição de transmissão.  
Dissertação de Mestrado.
-  Bessa, M. R., Vallejos, C. A., Detzel, D. H., Mine, M., Marcílio,  
D. C., Oening, A. P., Matioli, L. C., Haas, P., Fernandes, T. S.,  
Silva, F. et al. (2013).  
Otimização do despacho hidrotérmico mediante algoritmos  
híbridos com computação de alto desempenho: modelo  
phoenixvii.



*Em Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica CITENEL. Anais... Rio de Janeiro: Inovação Tecnológica em Energia Elétrica.*



Detzel, D. H. M., Mine, M. R. M., Bessa, M. R. e Bloot, M. (2014).

Cenários sintéticos de vazões para grandes sistemas hídricos através de modelos contemporâneos e amostragem.

*RBRH: revista brasileira de recursos hídricos*, 19(1):17–28.



Hammersley, J. (2013).

*Monte carlo methods.*

Springer Science & Business Media.



Russell, S. e Norvig, P. (1995).

A modern approach.

*Artificial Intelligence. Prentice-Hall, Egnlewood Cliffs*, 25:27.