

## GABRIEL

Geração de Afluências Baseada em  
Regressões e Índices do Setor Elétrico

30 de março de 2010



## GABRIEL

---

- ▶ Análise estocástica, modelagem e geração de séries temporais hidrológicas anuais, mensais ou semanais para uso em modelos de simulação ou otimização.
- ▶ Está integrado ao SDDP.
  - Cenários hidrológicos gerados pelo GABRIEL podem ser “importados” pelo SDDP no cálculo da política estocástica.
  - Séries geradas pelo SDDP podem ser validadas pelo GABRIEL.

## Funcionalidades

---

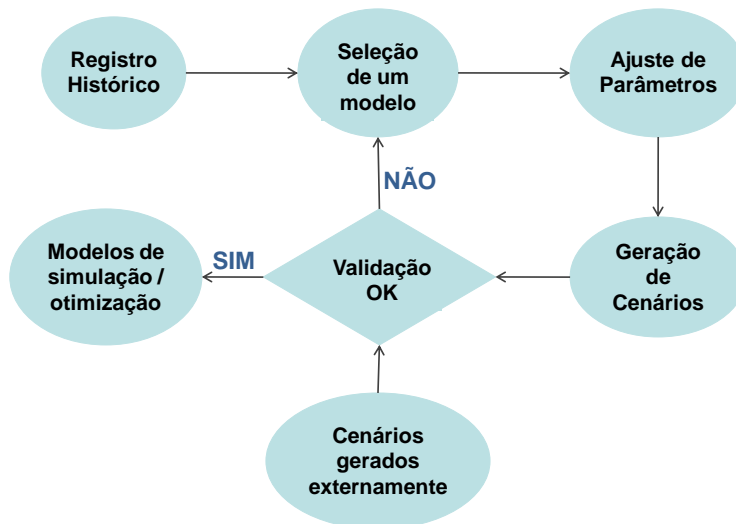
- ▶ Geração de cenários hidrológicos a partir de diversos modelos matemáticos;
- ▶ Módulos para a verificação e validação da qualidade das séries geradas com respeito a estatísticas de interesse;
- ▶ Validação de séries geradas por outros modelos.

## Etapas

---

- ▶ Seleção – escolhe-se um modelo;
- ▶ Estimação – estimam-se seus parâmetros;
- ▶ Validação – verifica-se se o processo é bem representado;
  - Se determinadas estatísticas ou grandezas observadas no registro de dados histórico são preservadas.
- ▶ O modelo poderá ser empregado para gerar cenários ou estatísticas de interesse que servirão de entrada para estudos de simulação/otimização estocástica.

## Funcionamento do GABRIEL



## Manipulação do Registro Histórico

- ▶ **Classificação de Postos** → Principais, Desagregados, Satélites e Insuficientes;
- ▶ **Postos Principais** → São geradas séries sintéticas por meio do modelo escolhido;
- ▶ **Postos Desagregados** → É aplicado um tipo de desagregação:
  - Médias Ponderadas → Através do cálculo da média ponderada das vazões dos postos principais imediatamente a jusante e a montante do posto em questão;
  - Método dos Momentos → Equações desenvolvidas por Mejía e Rousselle.
  - Agrupamento de Postos → Possibilita a desagregação via método de momentos. Ex: colocar os postos da mesma bacia em um mesmo grupo. Cada grupo deve possuir ao menos um posto principal.

## Manipulação do Registro Histórico (Cont.)

---

- ▶ **Postos Satélites** → As séries sintéticas são geradas a partir de equações apropriadas que representam intervenções humanas como desvios d'água feitos em canais, bombas, túneis e outros.
- ▶ **Postos Insuficientes** → Não há informações suficientes em relação a estes postos para habilitar a geração de cenários hidrológicos.

## Seleção do Modelo

---

- ▶ A simulação estocástica de séries temporais hidrológicas é baseada em modelos matemáticos. A escolha de um determinado modelo depende da particularidade de sua aplicação.
- ▶ Fatores a se considerar:
  - Características físicas e estatísticas do processo sob consideração;
  - Disponibilidade de dados;
  - Complexidade do sistema;
  - Propósito geral do estudo.

## Modelos Disponíveis

---

- AR(p) ou PAR(p) com p=1,2.. até p=6.

$$\frac{Q_{t,i} - \mu_{t,i}}{\sigma_{t,i}} = \sum_{k=1}^p \varphi_k \left( \frac{Q_{t-k,i} - \mu_{t-k,i}}{\sigma_{t-k,i}} \right) + \varepsilon_t$$

- A ordem pode ser definida pelo usuário ou por um ajuste automático baseado na independência dos resíduos (ordem do modelo determinada para cada posto, em cada mês).

- ARMA(1,1) ou PARMA(1,1).

$$\frac{Q_{t,i} - \mu_{t,i}}{\sigma_{t,i}} = \varphi_1 \left( \frac{Q_{t-1,i} - \mu_{t-1,i}}{\sigma_{t-1,i}} \right) - \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \varepsilon_t$$

## Modelos Disponíveis (Cont.)

---

- PAR Generalizado → Uma regressão baseada nas vazões acumuladas nos últimos meses possui apenas um parâmetro.

$$\frac{Q_{t,i} - \mu_{t,i}}{\sigma_{t,i}} = \varphi_1 \sum_{k=x_1}^{y_1} \frac{Q_{t-k,i} - \mu_{t-k,i}}{\sigma_{t-k,i}} + \dots + \varphi_n \sum_{k=x_n}^{y_n} \frac{Q_{t-k,i} - \mu_{t-k,i}}{\sigma_{t-k,i}} + \varepsilon_{t,i}$$

- Desagregação Espaço-Temporal

- Um modelo AR(1) é utilizado para geração de cenários de vazões médias anuais para os postos principais;
- É feita uma desagregação espacial baseada no modelo de Mejía e Rousselle, de modo que, ao final, todos os postos possuam séries sintéticas anuais;
- É feita uma desagregação temporal que transforma estas séries anuais em mensais ou semanais (modelo de Lane).

## Ajuste de Parâmetros

---

### ► Métodos de Estimação

- Postos principais → Método dos Mínimos Quadrados ou Método de Momentos.
- Postos desagregados → Método de Mejía e Rousselle para a desagregação espacial e Método de Lane para a desagregação temporal.

## Módulo de Validação

---

- As séries hidrológicas devem preservar propriedades periódicas amostrais:
  - Médias;
  - Variâncias;
  - Covariâncias;
  - Características particulares dos processos hidrológicos (sequência de anos secos / úmidos).
- O GABRIEL foi idealizado como “laboratório” para testar diferentes modelos com funções de geração e validação de séries hidrológicas.

## Teste de Máximo Déficit

---

- ▶ A ideia do teste é calcular o tamanho de um reservatório hipotético para regularizar uma vazão igual a uma percentagem fixa da MLT.
- ▶ Modelos PAR tendem a ser “otimistas”, ou seja, não representam bem fenômenos de baixa frequência, tais como uma sequência de anos com vazões abaixo da MLT.
  - O tamanho do reservatório determinado a partir das vazões sintéticas tende a ser menor que o tamanho reservatório calculado com os dados históricos.
- ▶ Modelos de Desagregação
  - Por partirem da preservação da correlação das vazões anuais representam melhor estes fenômenos de baixa frequência.
  - O reservatório hipotético tende a ser maior ao determinado com séries geradas pelo modelo PAR(p). Às vezes é maior também que o reservatório “histórico”.

## GABRIEL vs. Modelo hidrológico do SDDP

---

- ▶ **Modelo não-paramétrico** → os ruídos históricos são diretamente sorteados ao invés das distribuições de probabilidades ajustadas.
  - *Redução da variação amostral* → todos os ruídos históricos são utilizados na geração dos cenários hidrológicos (a permutação dos ruídos é responsável pela variabilidade das vazões).
  - Menor quantidade de parâmetros necessários.
- ▶ **Ajuste de modelos só para postos selecionados e métodos de geração indiretos via desagregação espacial para os demais** → diminui-se a ocorrência de vazões incrementais negativas e redução do número de parâmetros ajustados.
- ▶ **Utilização de séries de vazões naturais** → evita-se que erros de medição sejam significativos com relação à série temporal (usinas em cascata tornam a série de vazões incrementais cada vez mais suscetível a erros de medição).
- ▶ **Generalização da estrutura das regressões** → opção para a vazão prevista num instante de tempo depender do volume acumulado nos últimos T períodos.

## Método não-paramétrico

---

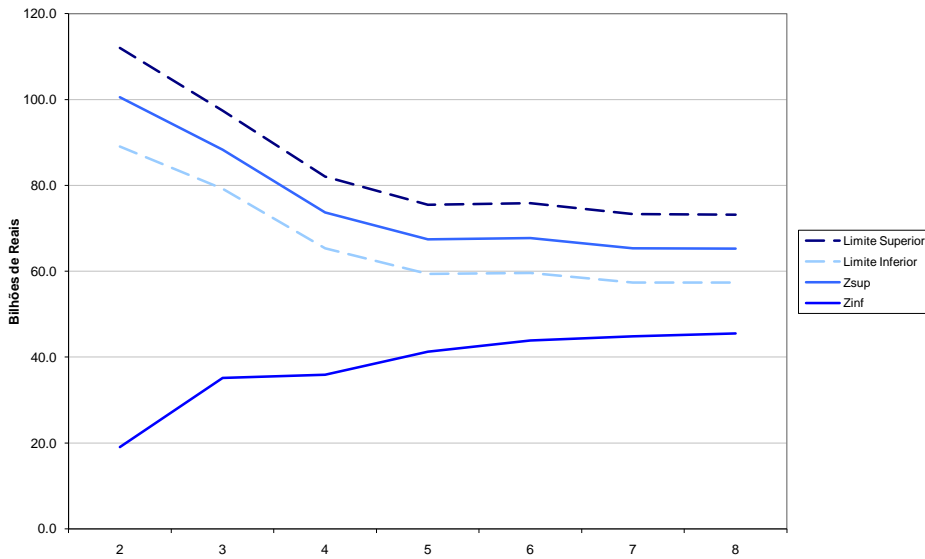
- ▶ No método paramétrico, uma distribuição de probabilidades (ex: lognormal) é ajustada aos resíduos e o sorteio deles é feito a partir dessa distribuição.
- ▶ No método não-paramétrico, os resíduos históricos são sorteados diretamente para formar as séries sintéticas geradas.
  - Cada resíduo é sorteado exatamente  $Y$  vezes. Por exemplo, supondo que o registro histórico tenha 50 anos e  $Y=3$ , serão gerados  $50 \times 3 = 150$  cenários para simulação forward e 50 cenários backward. A média histórica é preservada pelo modelo e a variância amostral é reduzida. O número de séries forward e backward está condicionado ao número de anos do histórico.
  - A outra opção é permitir um sorteio aleatório de resíduos (com reposição) na qual um ruído pode ser sorteado mais de uma vez e outro nenhuma. A média sintética poderá divergir da média histórica para amostras pequenas.

## Estudo de Caso

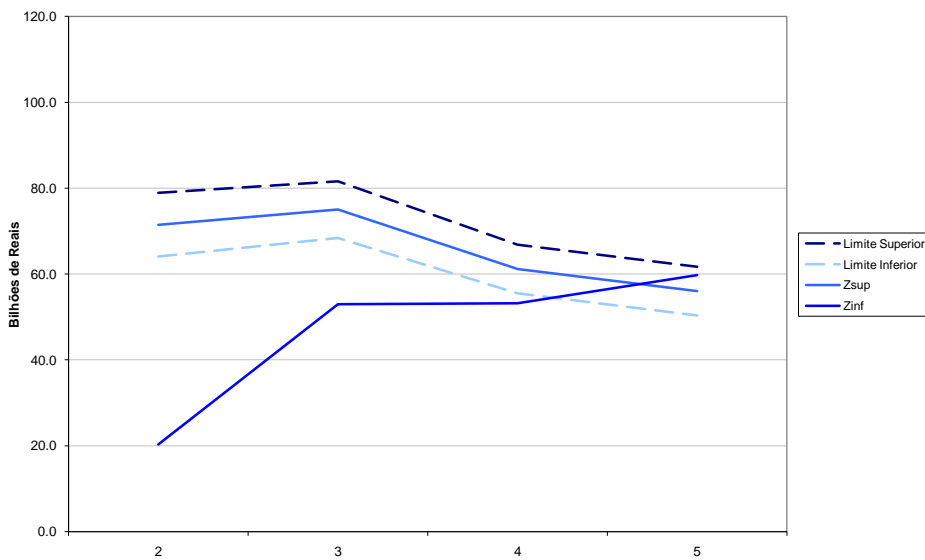
---

- ▶ Caso Brasileiro – PMO de Janeiro de 2009 – com 120 etapas, 210 séries forward e 70 séries backward;
- ▶ Geração de séries sintéticas, pelo modelo PAR(3);
- ▶ Comparação de Convergência e de CMO com SDDP.

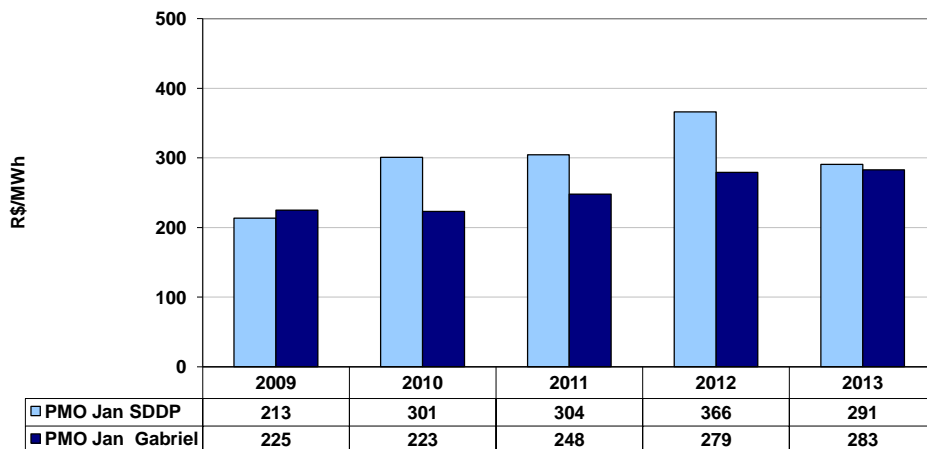
## Gráfico de Convergência – SDDP



## Gráfico de Convergência – SDDP com Gabriel



## Gráfico – CMO Anual – Sudeste



## Estudo de Caso

- ▶ Caso Brasileiro – PMO de Janeiro de 2009 – com 120 etapas, 75 séries forward e 75 séries backward;
- ▶ Geração de séries sintéticas, pelo modelo de Desagregação Espaço-Temporal;
- ▶ Validação de Média, Desvio Padrão e Correlação de:
  - Vazões naturais mensais;
  - Vazões incrementais mensais.
- ▶ Teste de Máximo Déficit para a Região Sudeste.

## Percentagem de Falhas

---

- ▶ Percentagem dos postos que falharam;
- ▶ Total de postos para SE: 100 postos
- ▶ Vazões Naturais

Sudeste	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Média	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
Desvio Padrão	3%	3%	9%	7%	3%	4%	2%	3%	6%	2%	2%	3%
Correlação	73%	3%	4%	3%	13%	1%	2%	1%	11%	7%	3%	10%

- ▶ Vazões Incrementais

Sudeste	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Média	3%	2%	3%	2%	2%	3%	3%	2%	2%	3%	3%	3%
Desvio Padrão	26%	27%	33%	25%	24%	29%	30%	34%	36%	23%	27%	27%
Correlação	67%	32%	32%	27%	30%	33%	35%	34%	35%	41%	35%	38%

## Máximo Déficit

---

- ▶ As séries sintéticas para este caso geram um reservatório da ordem de 68244 MWm, que é maior que o reservatório histórico (48525 MWm) para o Sudeste, utilizando um fator de 60% da MLT.
- ▶ Como esperado, o modelo de desagregação foi conservador.
- ▶ Esse resultado é dificilmente obtido quando se usa um modelo PAR(p), pois este tipo de modelo não preserva tão bem as séries secas.



PSR

**Obrigado!**

 [www.psr-inc.com](http://www.psr-inc.com)

 [psr@psr-inc.com](mailto:psr@psr-inc.com)

 +55 21 3906-2100

 +55 21 3906-2121