

OPTIMIZAÇÃO DA EXPLORAÇÃO DE ALBUFEIRAS EM PERÍODOS CRÍTICOS. ESTUDO DE CASO: ALBUFEIRA DE CAHORA BASSA, MOÇAMBIQUE

Hélder R. E. Francisco ^{a,b}; José P. P. de Gouveia Lopes de Almeida ^b*

* Autor correspondente: helder.francisco@hcb.co.mz; helder.francisco@student.uc.pt

^a Hidroeléctrica de Cahora Bassa, Vila de Songo, Moçambique

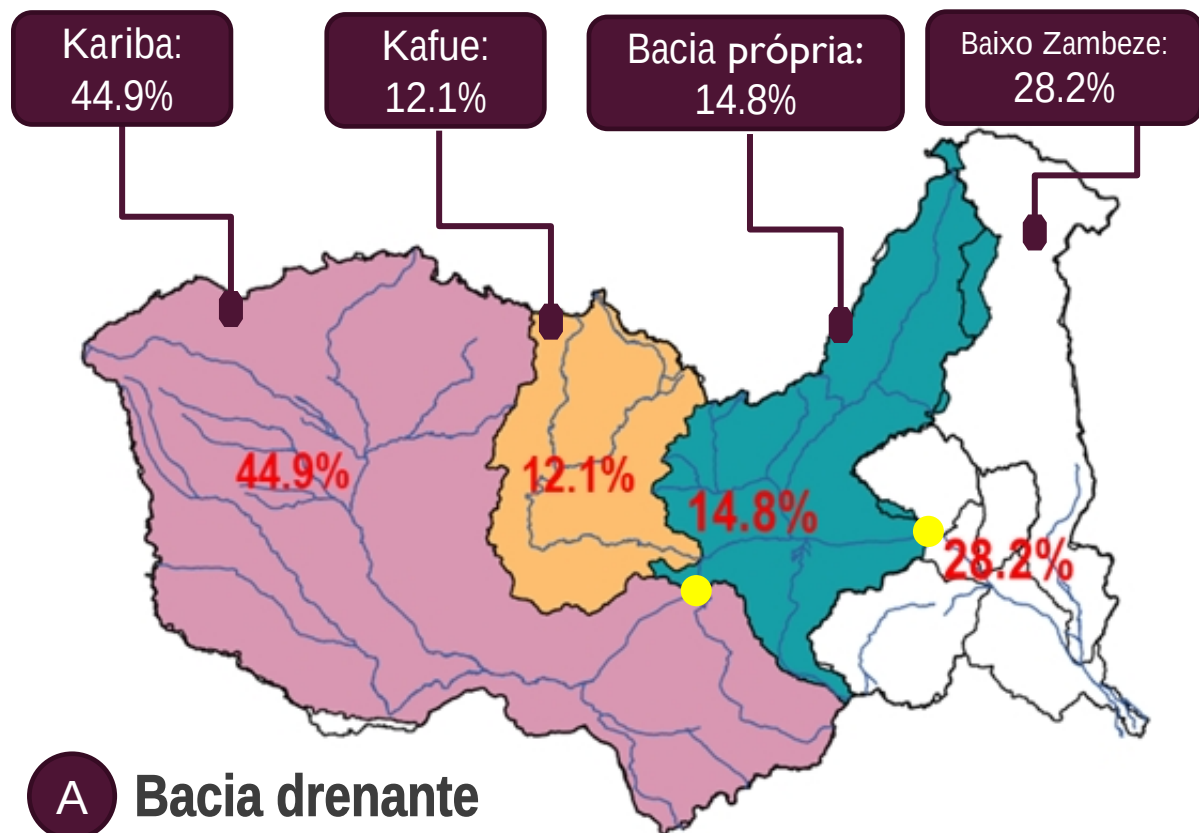
^b Universidade de Coimbra, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Portugal

Maputo, 28 de Maio de
2025

CONTEÚDO DA APRESENTAÇÃO

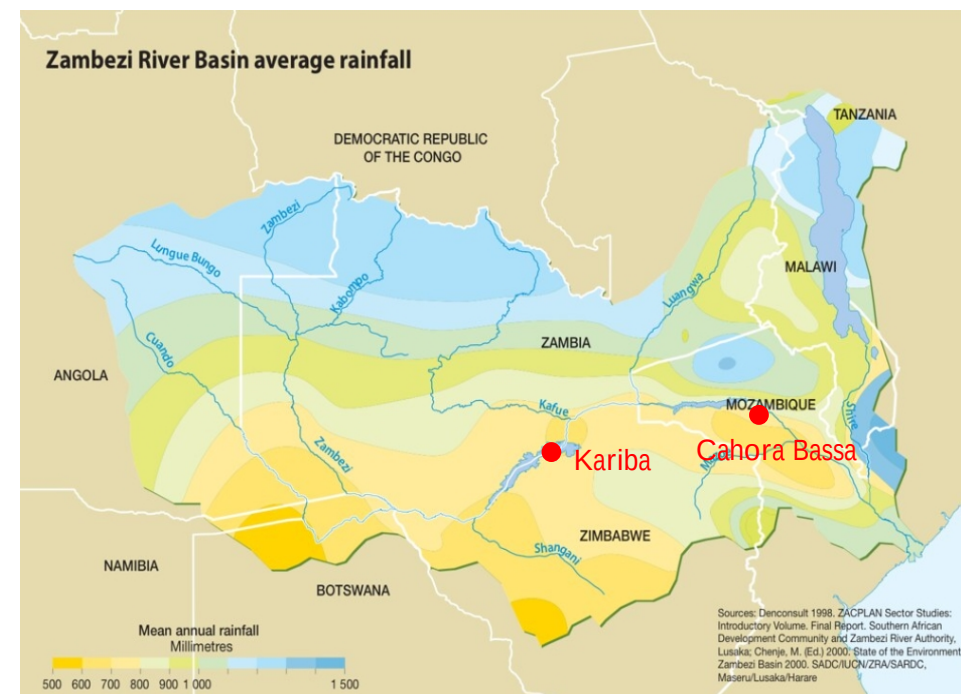
1. Contextualização
2. Objectivos
3. Materiais e Métodos
4. Resultados e discussão
5. Considerações finais

1. CONTEXTUALIZAÇÃO (1/5)



A Bacia drenante

- > Área da Bacia do Zambeze: ≈ 1.4 milhões de km^2 ;
- > $\approx 70\%$ da Bacia está a montante de Cahora Bassa;
- > Infra-estruturas a montante controlam $\approx 55\%$ da área drenante; e,
- > Área drenante a montante não infra-estruturada e importante: $\approx 15\%$.



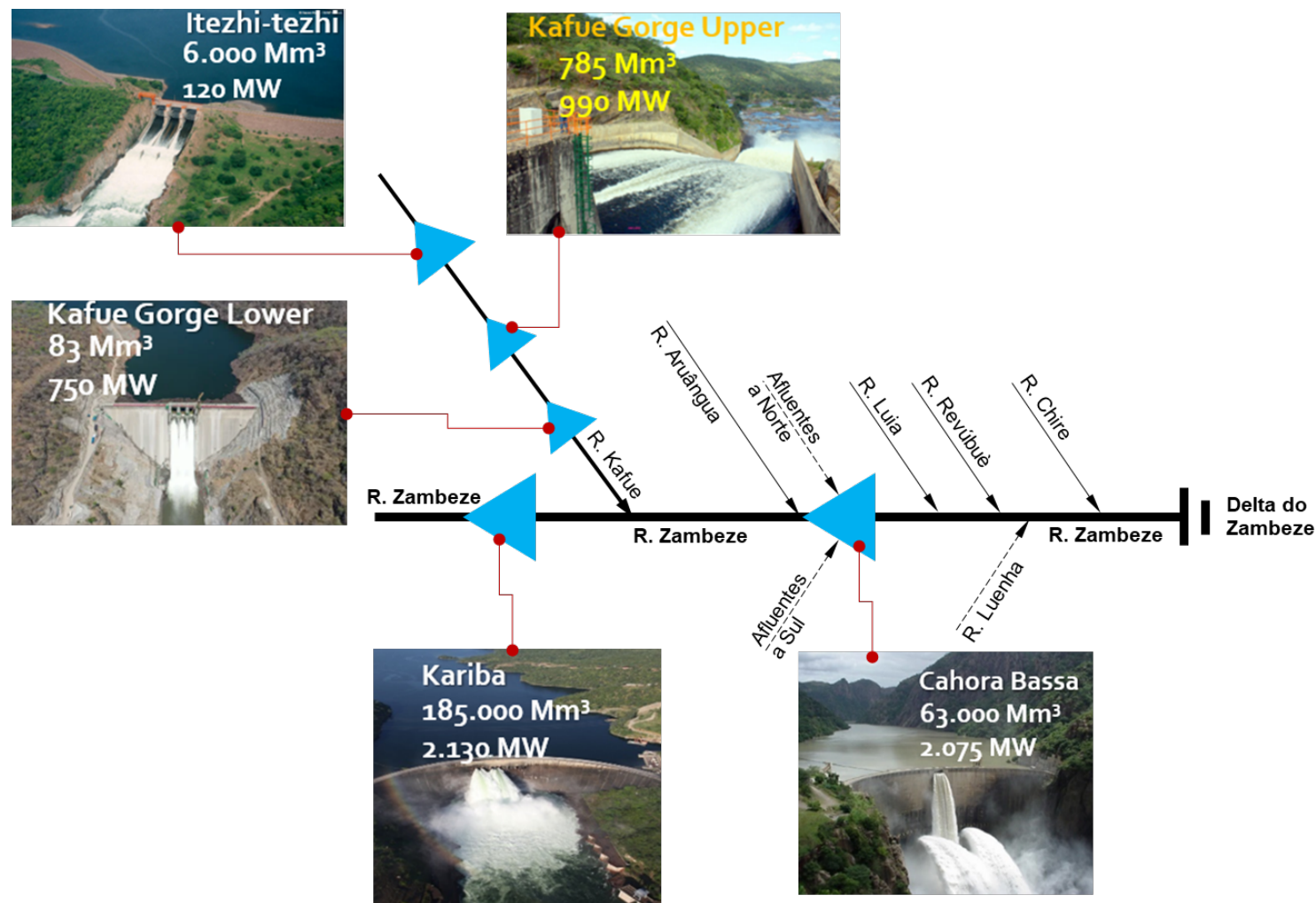
Fonte: www.grida.no/resources/5138, consultado em 04/05/2025

B Precipitação

- > Média anual: 900 mm;
- > Região mais pluviosa: norte da Bacia; e,
- > Contribuição média de Kariba para Cahora Bassa: 53% do escoamento anual.

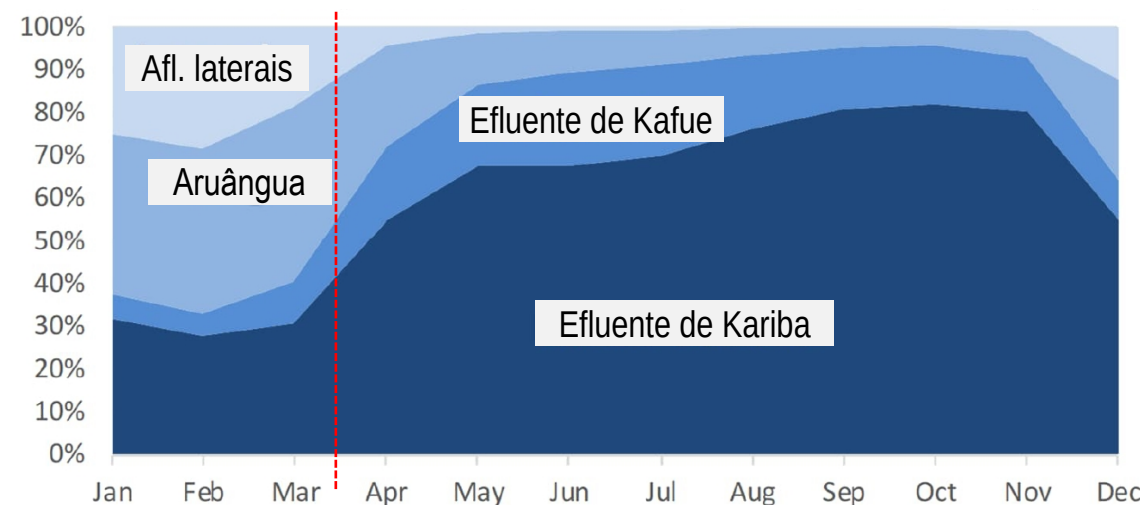
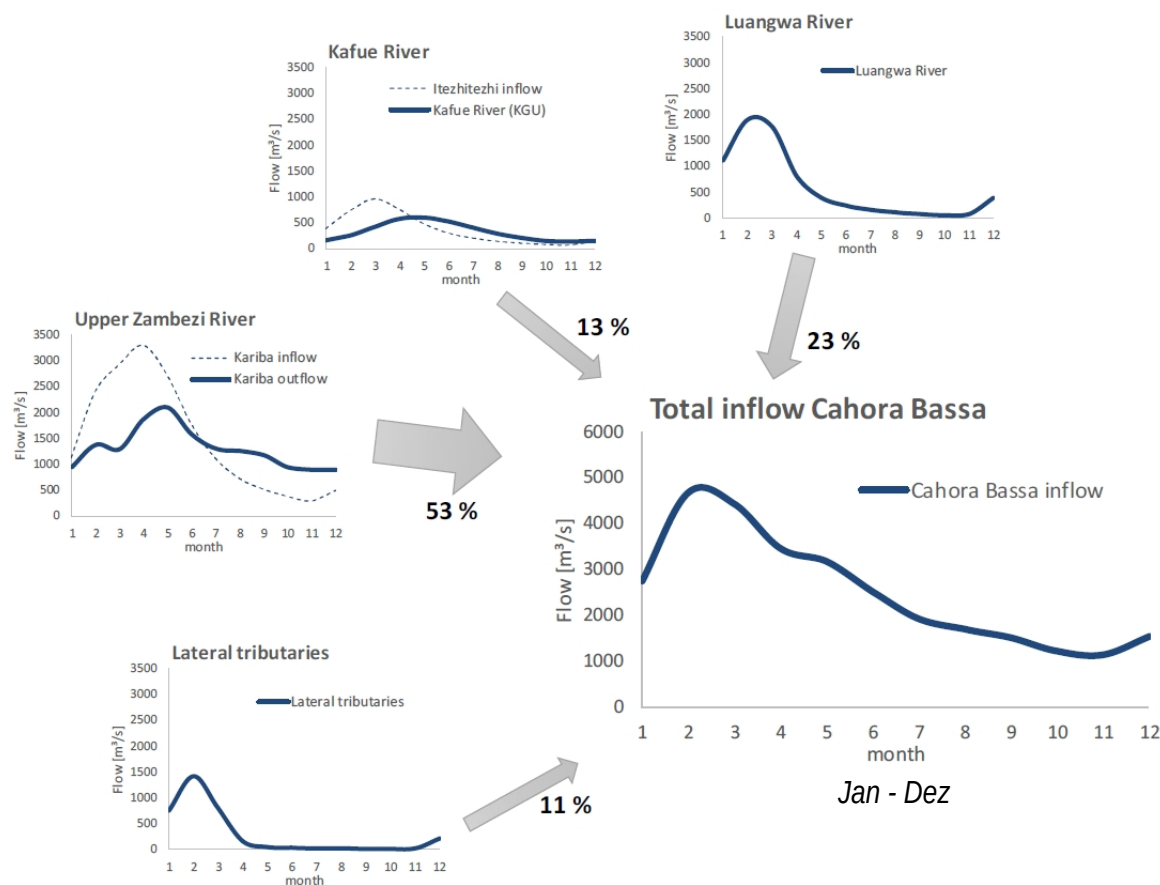
1. CONTEXTUALIZAÇÃO (2/5)

C Infra-estruturas hidráulicas na bacia hidrográfica do Zambeze



1. CONTEXTUALIZAÇÃO (3/5)

D Caudal médio mensal afluyente à Cahora Bassa (1961-1990)

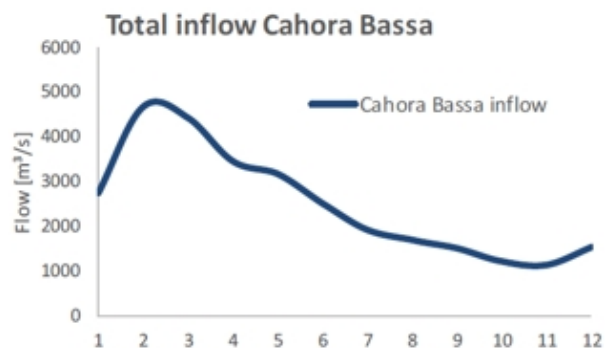


Abril a Dezembro: escoamentos dominados por Kariba ($\approx 70\%$)

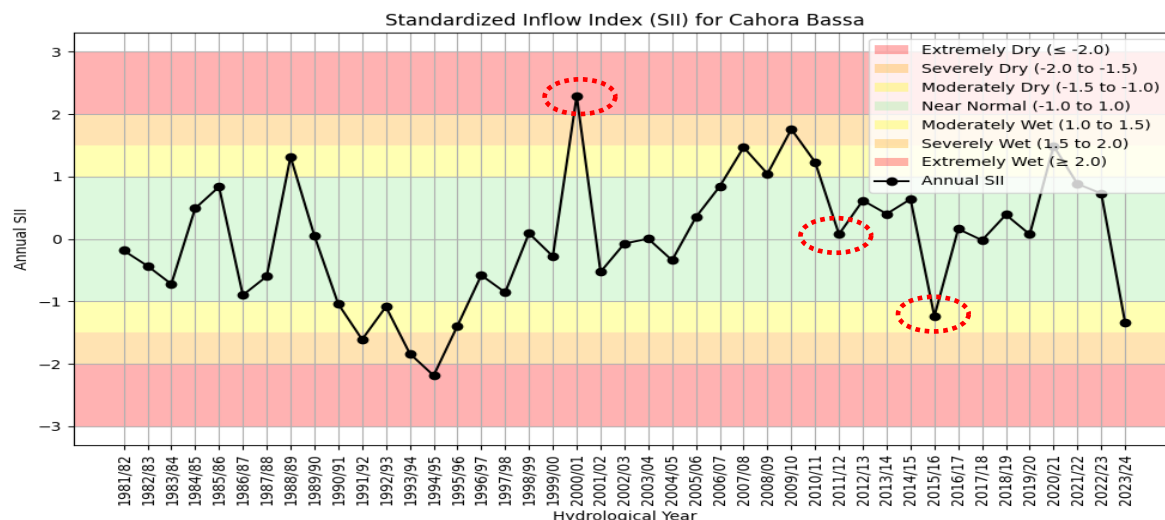
JFM: escoamentos dominados pelo rio Aruângua e tributários directos ($\approx 70\%$)

1. CONTEXTUALIZAÇÃO (4/5)

E Variabilidade intra e inter-anual dos caudais afluentes



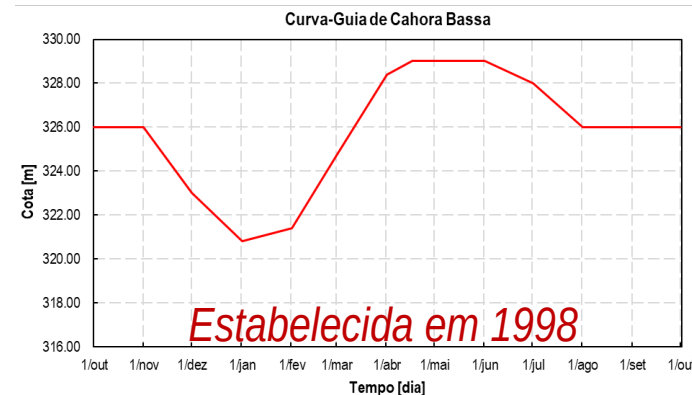
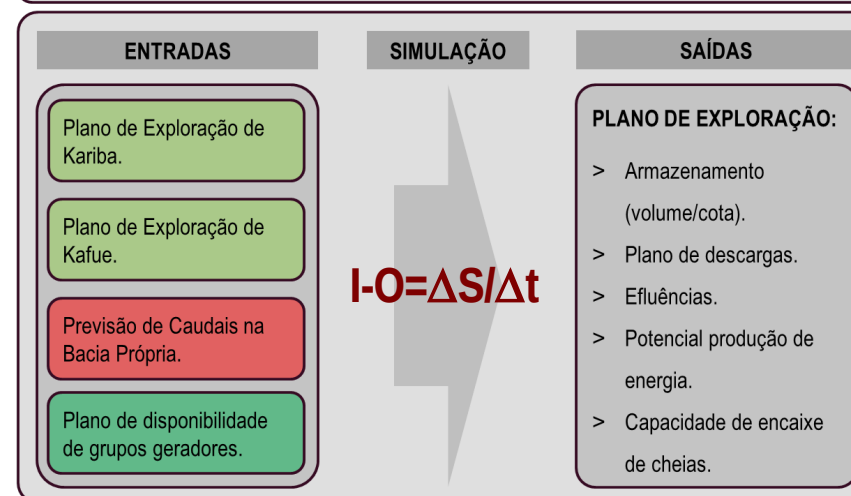
Fonte: AFRY (2023). Climate Resilience Assessment for Cahora Bassa



Fonte: Mahunguana e Matola (2024)

F Metodologia de planificação e gestão da albufeira de Cahora Bassa

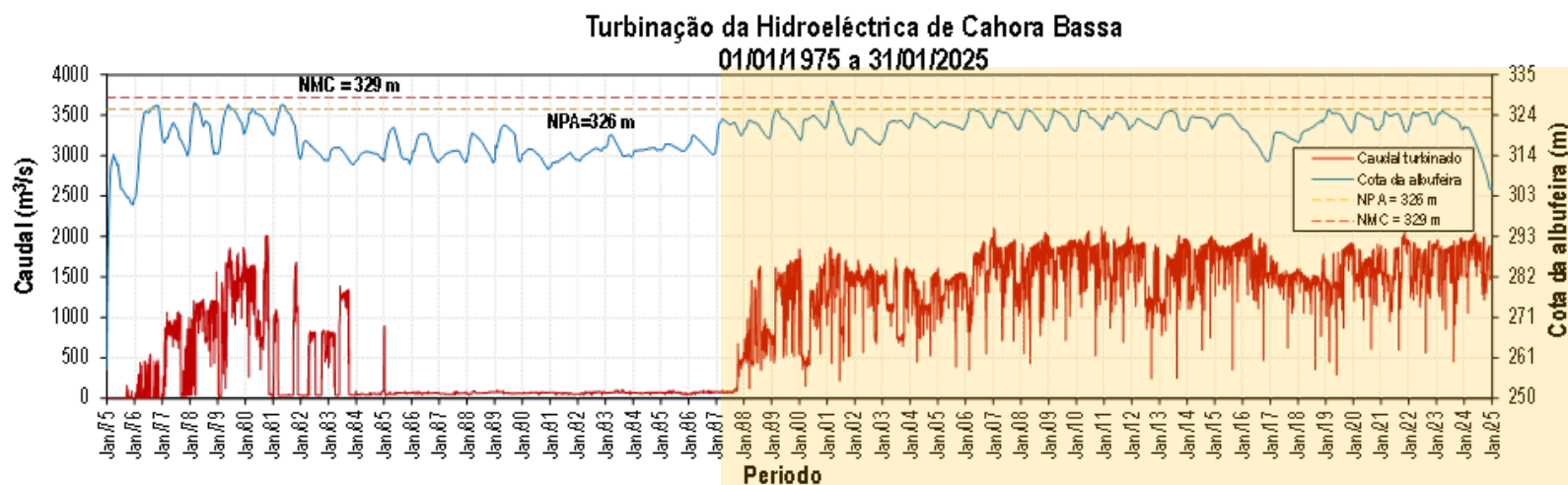
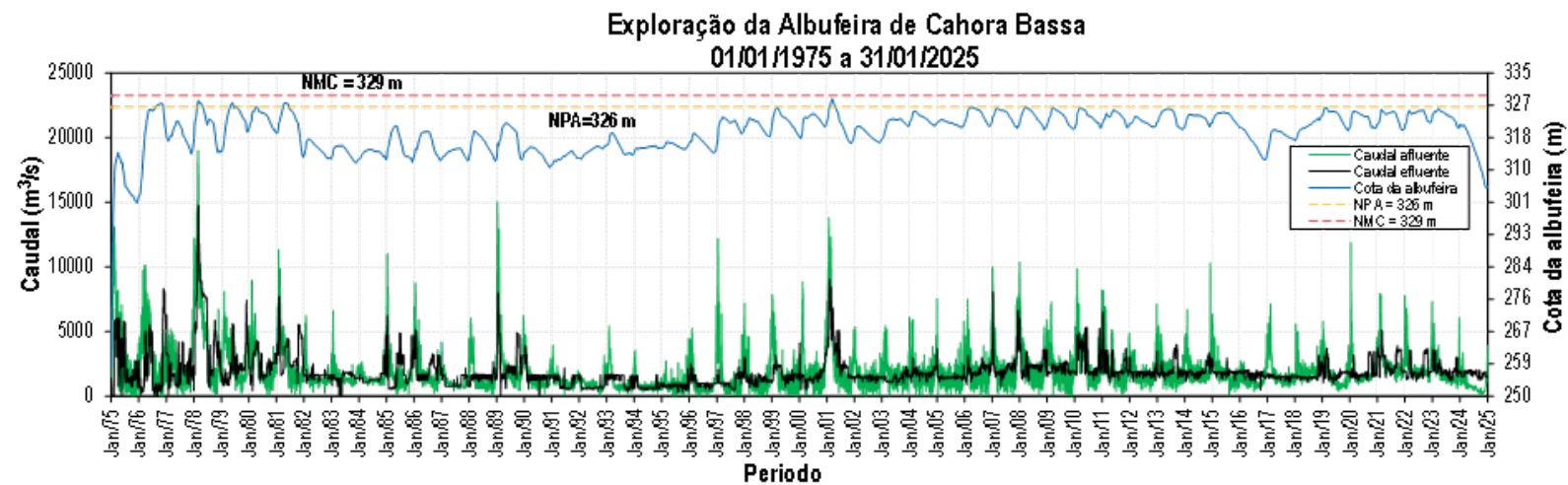
MODELO DE SIMULAÇÃO PARA A PLANIFICAÇÃO DA EXPLORAÇÃO DE CAHORA BASSA



Fonte: HCB (2008). Normas de Exploração da Barragem, Obras Anexas e Albufeira

1. CONTEXTUALIZAÇÃO (5/5)

G Histórico de exploração da albufeira de Cahora Bassa e produção da Central de geração de energia



Período de exploração
plena da Central Sul de
Geração de Energia:
desde 1998

2. OBJECTIVOS

2.1. Geral

- > Formular e resolver um modelo matemático determinístico para a optimização da exploração da albufeira de Cahora Bassa, considerando os benefícios sociais e económicos para diversos hidrogramas afluentes típicos de anos húmidos, normais e secos, incorporando as restrições relativas à segurança hidráulico-operacional e capacidade produtiva.

2.2. Específicos

- > Formular um modelo matemático determinístico de optimização da exploração da albufeira e proceder à sua implementação computacional para permitir a sua resolução por meios de cálculo automático;
- > Comparar os resultados da exploração para três cenários tipo (húmido, normal e seco) com os resultados simulados para a exploração optimizada;
- > Avaliar potenciais impactos do ajustamento pontual da curva-guia; e,
- > Analisar as melhores estratégias com base nos cenários considerados.

3. MATERIAIS E MÉTODOS (1/3)

3.1. Materiais

i. Características do empreendimento:

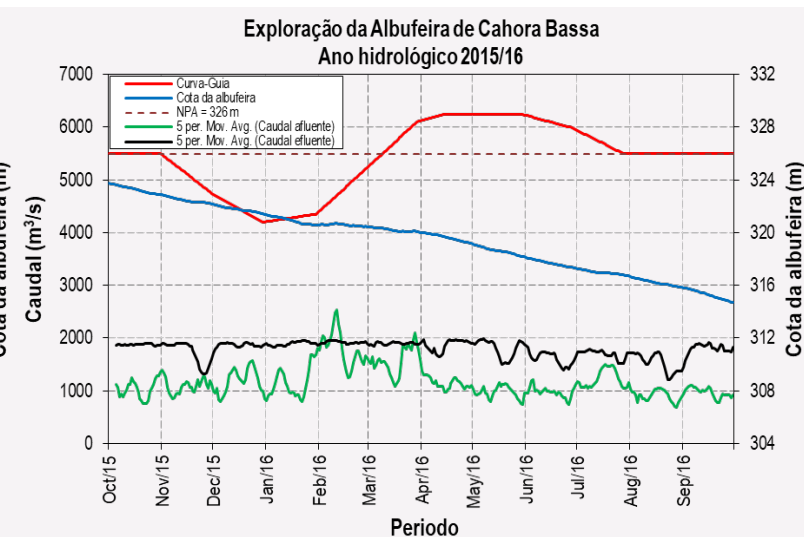
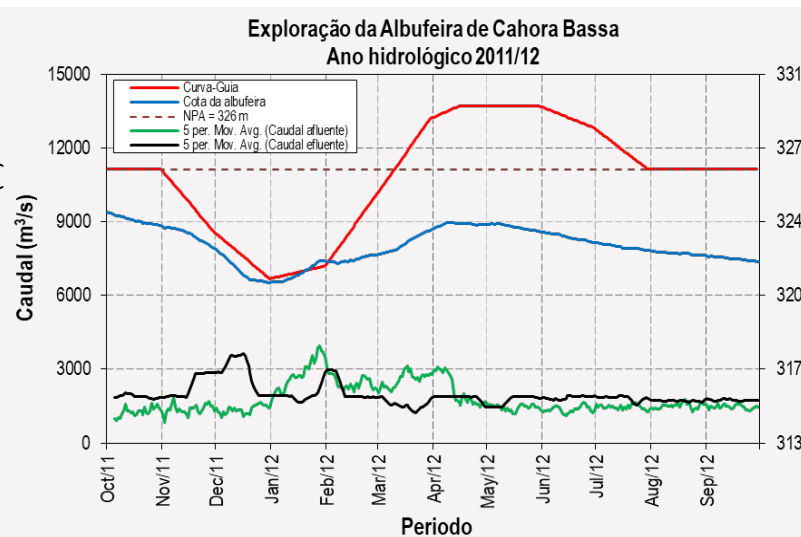
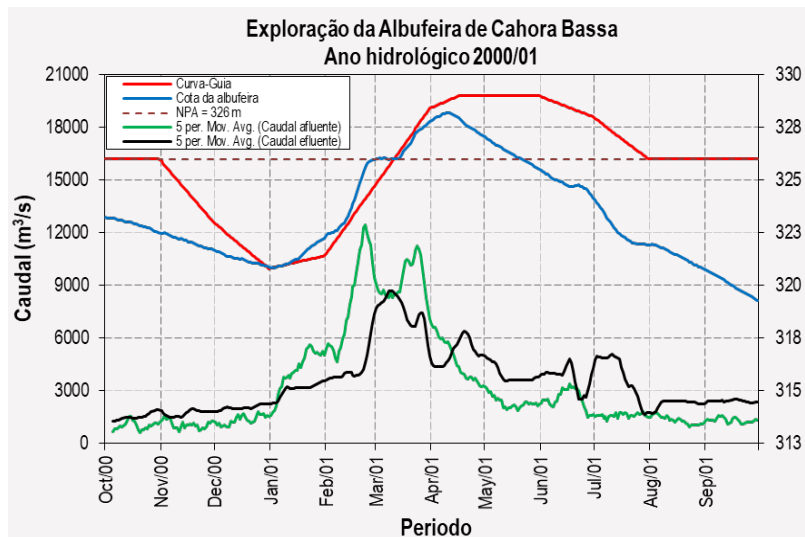
- > Curvas características da albufeira: $V(z_m)$ e $A(z_m)$;
- > Curva de vazão do rio na restituição: $z_j(Q_e)$;
- > Curva-guia / curva de segurança hidráulico-operacional: $Z_g(t)$;
- > Curvas de vazão dos descarregadores: Q_d ;
- > Características das turbinas: $P(t)$; $Q_T(t)$

ii. Dados operacionais do empreendimento

[caudal afluente (Q_a); caudal turbinado (Q_T); caudal descarregado (Q_d); volumes de água armazenada (V) e níveis de água na albufeira (z_m), Evaporação (Ev) e potência instalada (P)]

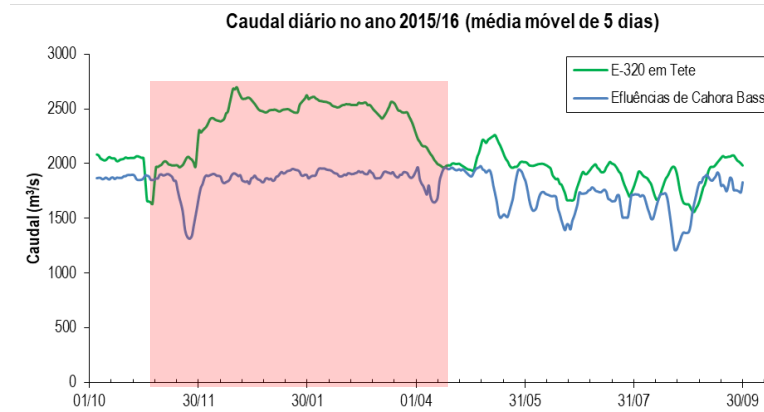
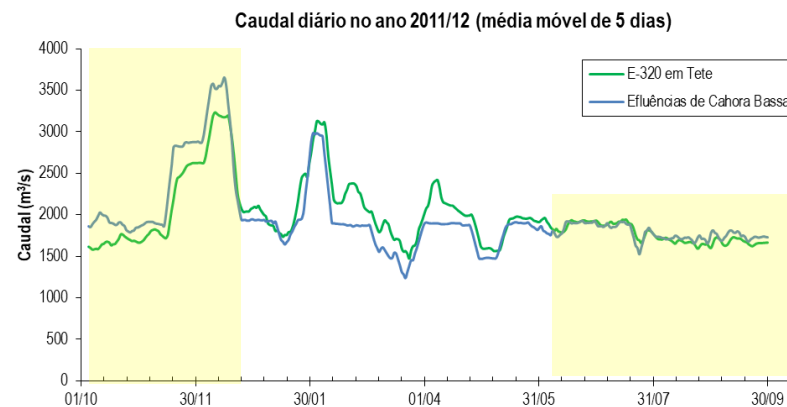
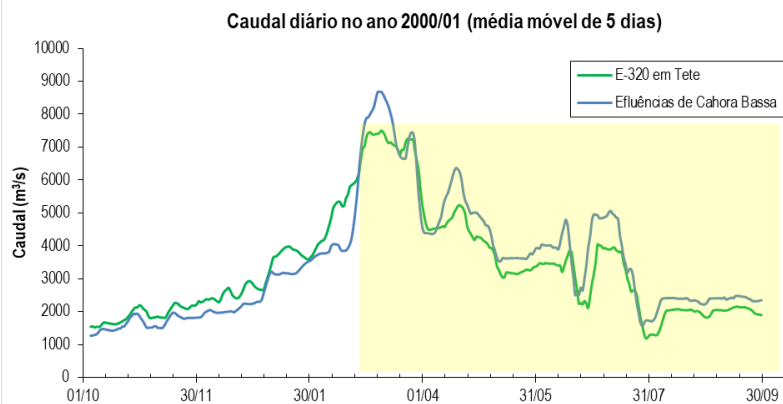
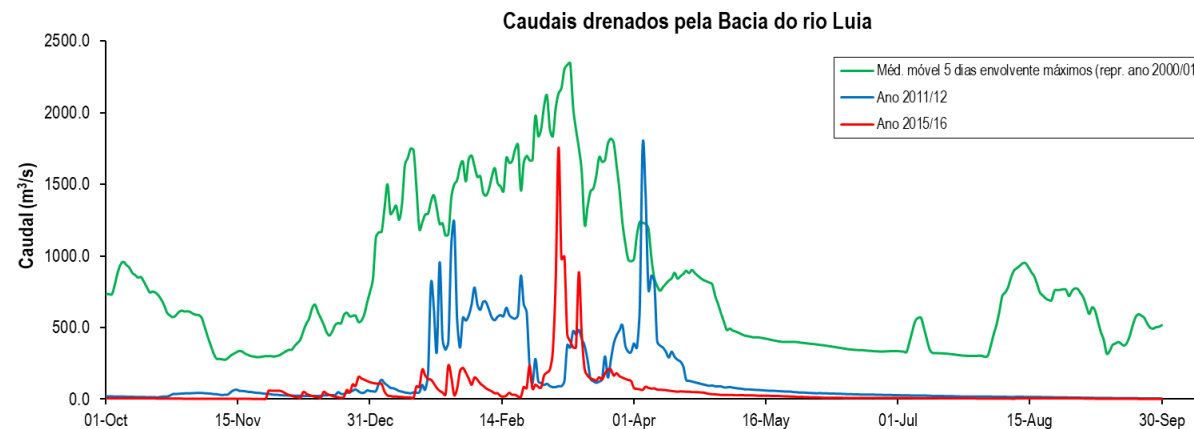
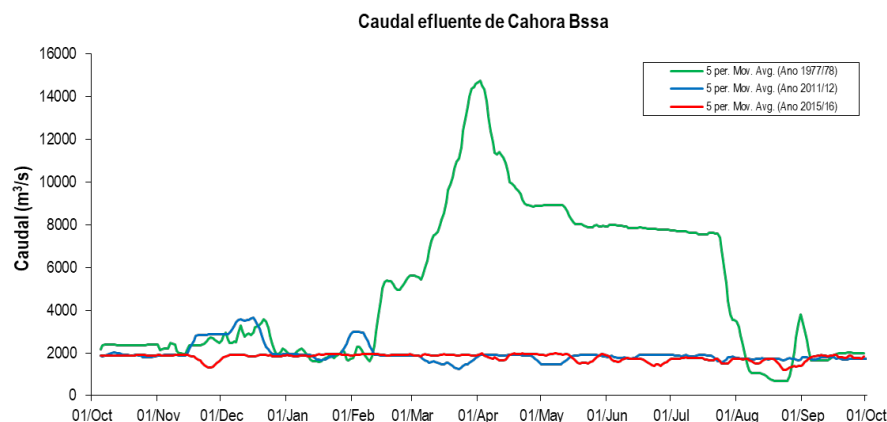
- > **Ano** hidrológico extremamente **húmido**: **2000/01**
- > **Ano** hidrológico **normal**: **2011/12**
- > **Ano** hidrológico moderadamente **seco**: **2015/16**

iii. Caudais do rio Luia (afluente do rio Zambeze a montante da cidade de Tete) e rio Zambeze **em Tete** (estação hidrométrica E-320).



3. MATERIAIS E MÉTODOS (2/3)

3.1. Materiais (cont.)



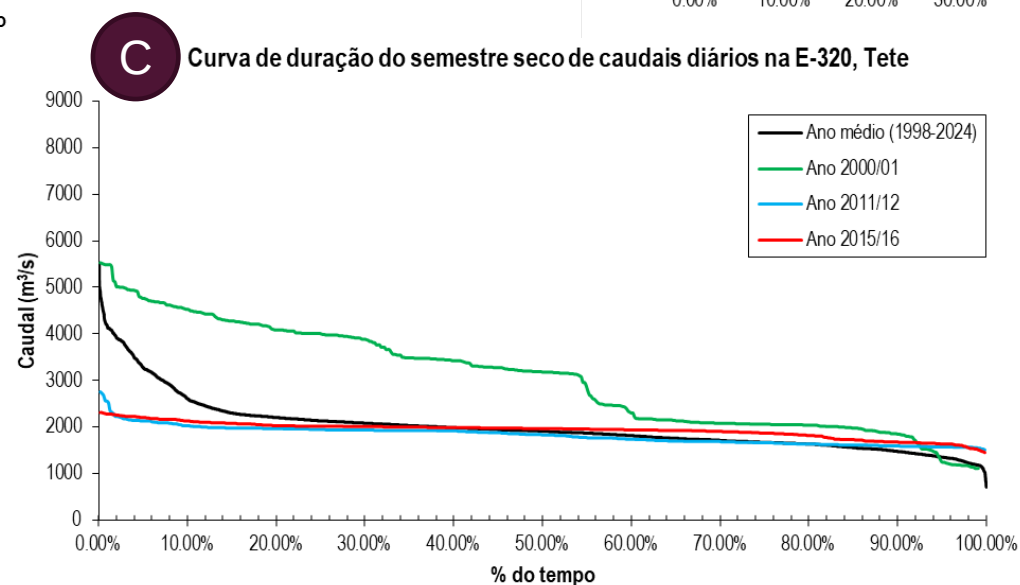
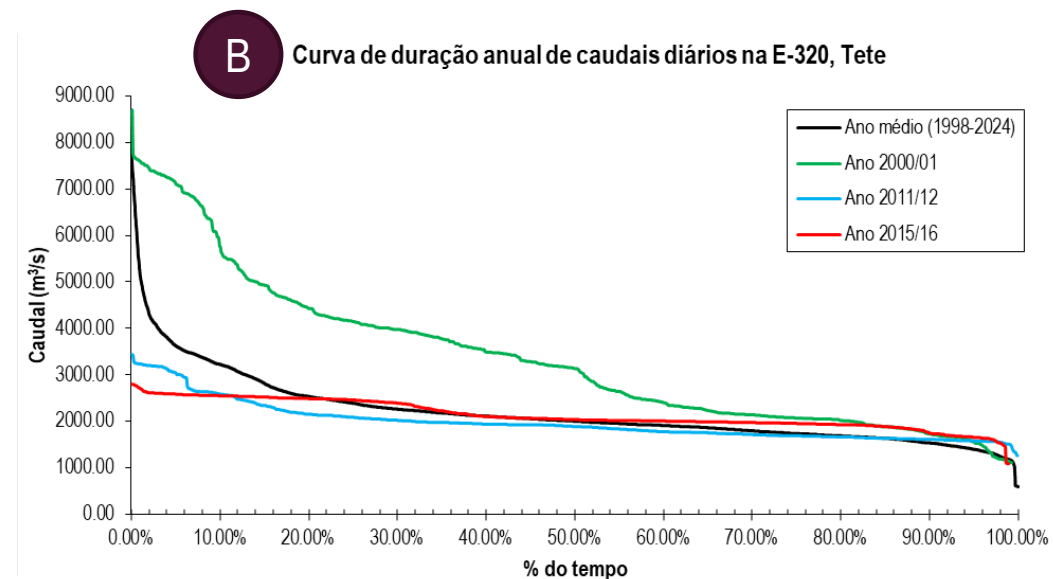
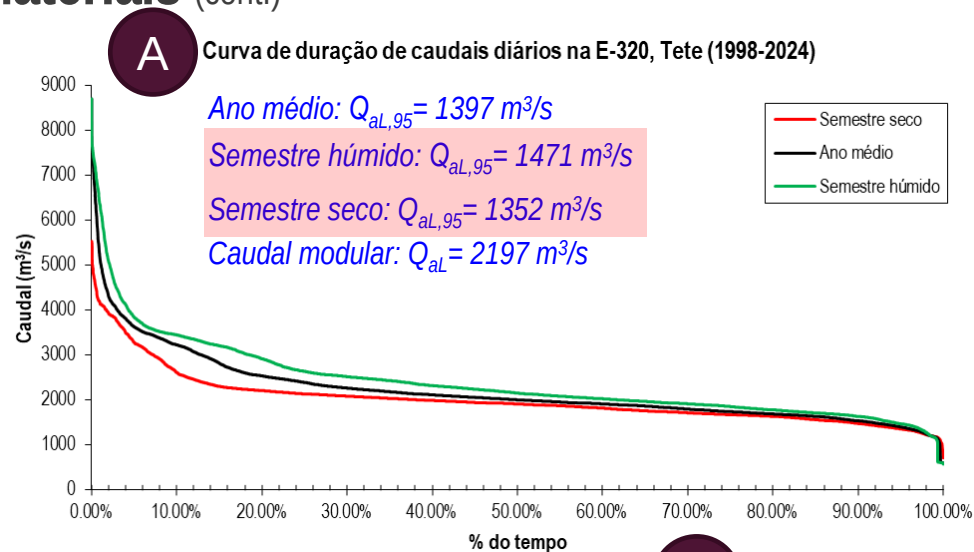
Hidrograma em Tete segue o padrão do hidrograma efluente de Cahora Bassa, mas com o pico mais abatido durante a estiagem. *Prenúncio da época chuvosa ter iniciado mais cedo na Bacia do rio Luia.*

Hidrograma em Tete segue o padrão do hidrograma efluente de Cahora Bassa, mas com o pico mais abatido durante a estiagem. *Prenúncio da época chuvosa ter iniciado mais tarde na Bacia do rio Luia.*

Hidrograma em Tete **NÃO** segue o padrão do hidrograma efluente de Cahora Bassa. *A situação poderia ser explicada por uma contribuição significativa da Bacia do rio Luia, mas os registos não justificam essa grande diferença.*

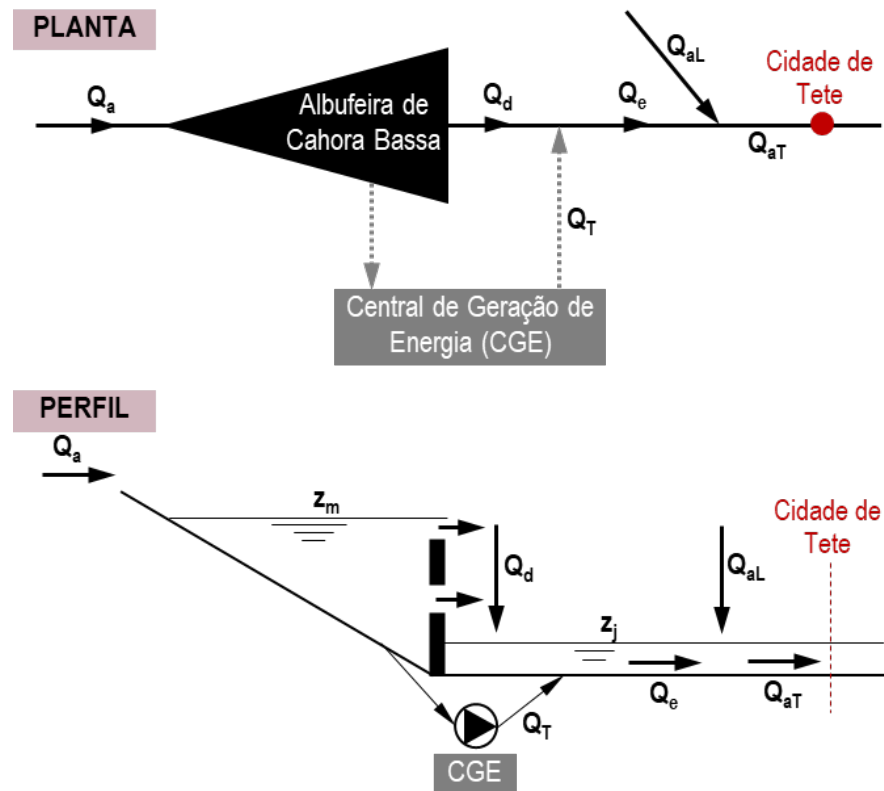
3. MATERIAIS E MÉTODOS (2/3)

3.1. Materiais (cont.)



3. MATERIAIS E MÉTODOS (3/3)

3.2. Métodos



Legenda:

- Q_a - caudal afluyente à albufeira de Cahora Bassa
- Q_T - caudal turbinado
- Q_d - caudal descarregado
- Q_e - caudal efluente para o rio Zambeze
- Q_{aL} - caudal do rio Luia afluyente ao rio Zambeze
- Q_{aT} - caudal afluyente à cidade de Tete

Formulação do modelo matemático:

> Função-objectivo:

> Sujeito à:

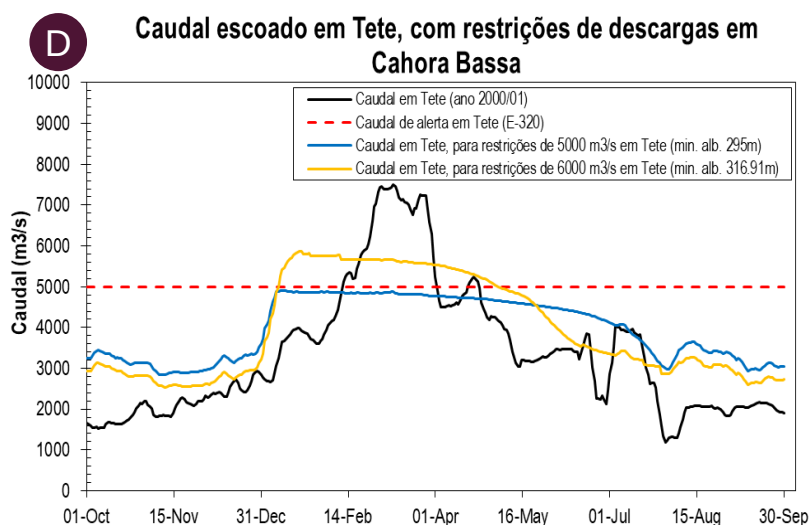
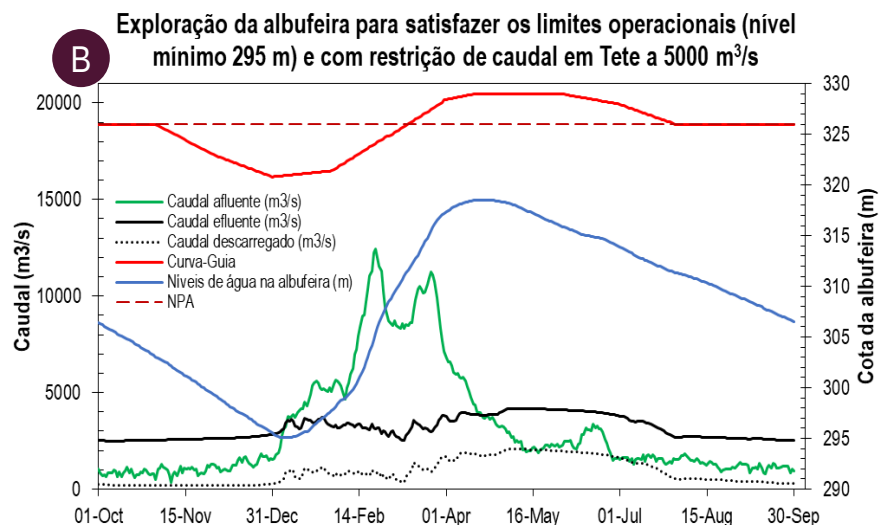
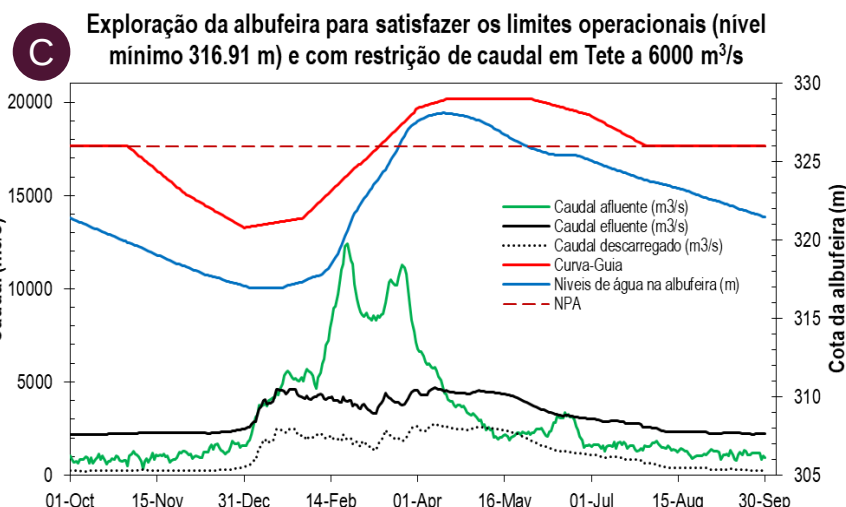
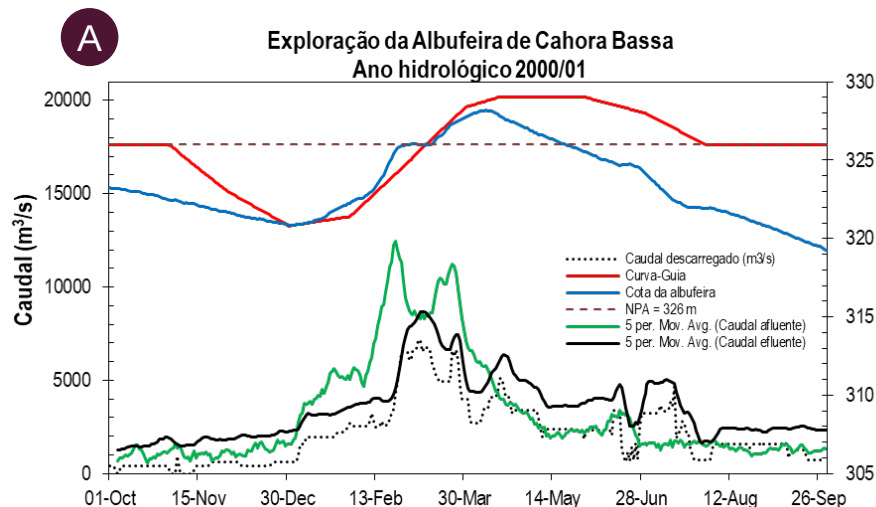
- ✓ $En(t) = \alpha \cdot P(t) \cdot N(t)$; $\alpha = 92\%$ - disp. média dos grupos geradores; $En(t)$ [MWh]
- ✓ $Hu(t) = \beta \cdot \{0,5 \cdot [z_m(t) - z_m(t-1)] - [193,64 + (Q_e/23,38244923)^{0,53179}]\}$; $\beta = 98\%$
- ✓ $z_m(t) = 256,5 + \{[V(t) + 10.906]/0,22218\}^{1/2,95873}$
- ✓ $P(t) = \eta \cdot \gamma \cdot Q_T(t) \cdot Hu(t) \cdot 10^{-6}$ $\eta = 95\%$; $\gamma = 9800 \text{ N/m}^3$ $P(t)$ [MW]
- ✓ $N(t)$ - número de horas do período em análise
- ✓ $Q_e = Q_T + Q_d$
- ✓ $Q_{aT} = Q_e + Q_{aL}$

Resolução: Programação Não-Linear usando o solver KNITRO do GAMS

Discretização temporal: dia!

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO (1/3)

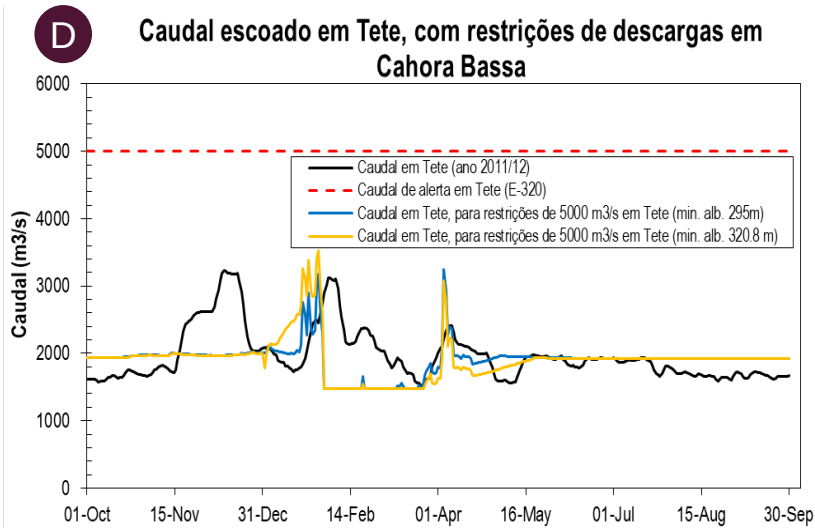
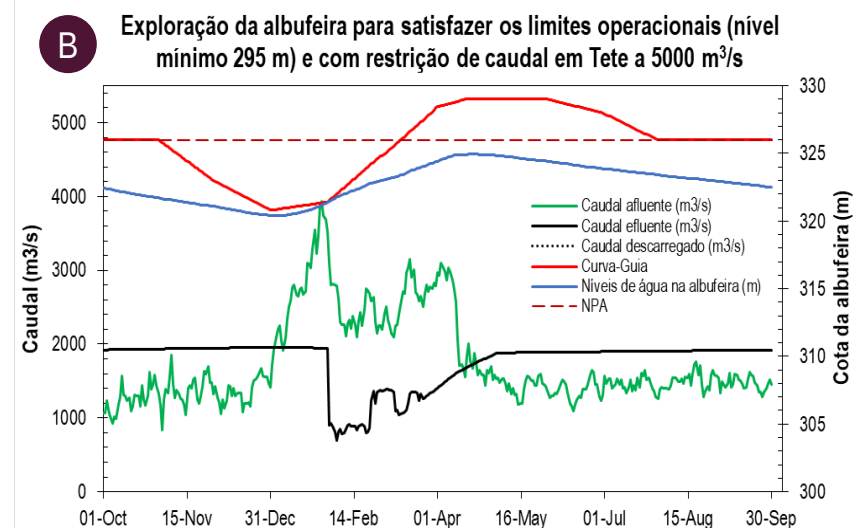
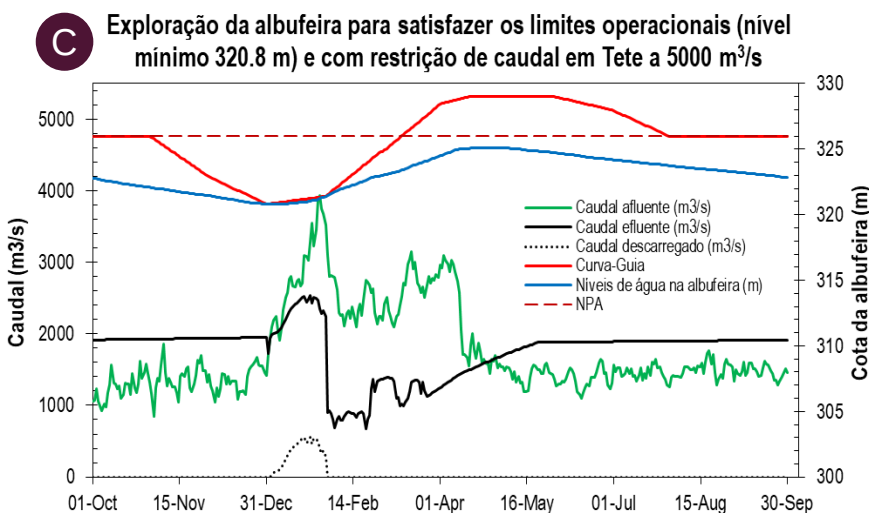
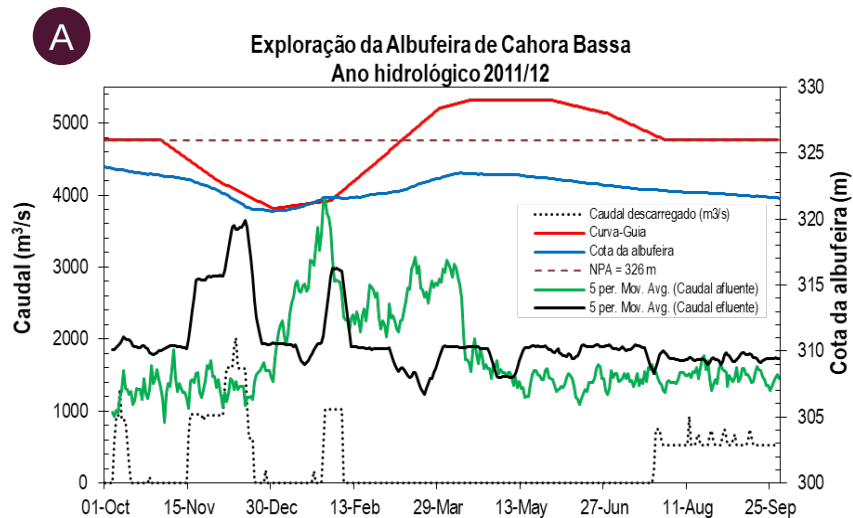
Ano húmido: Potencial de produção de energia na capacidade máxima (16,7 TWh)



- > Para nível mínimo da Albufeira de 320.8m e aflúências similares as de 2000/01, no modelo não foi possível satisfazer simultaneamente as restrições operacionais e de caudal de 5000m³/s em Tete (ex.: Fig. A e D);
- > Exploração da Albufeira entre o NME e o NPA, conjugado com escoamentos do rio Luia, numa sequência de anos húmidos, evita cheias e inundações em Tete (Fig. B e D);
- > Esta abordagem exige uma fiabilidade elevada das previsões de aflúências de curto, médio e longo termo para não comprometer a produção de energia;
- > Para o nível mínimo de 316.91 m (Prob. Exc. 95%) e aligeiramento da restrição em Tete (6000 m³/s; +0,5m do alerta) afigura-se melhor abordagem para cheias frequentes (Fig. C e D).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO (2/3)

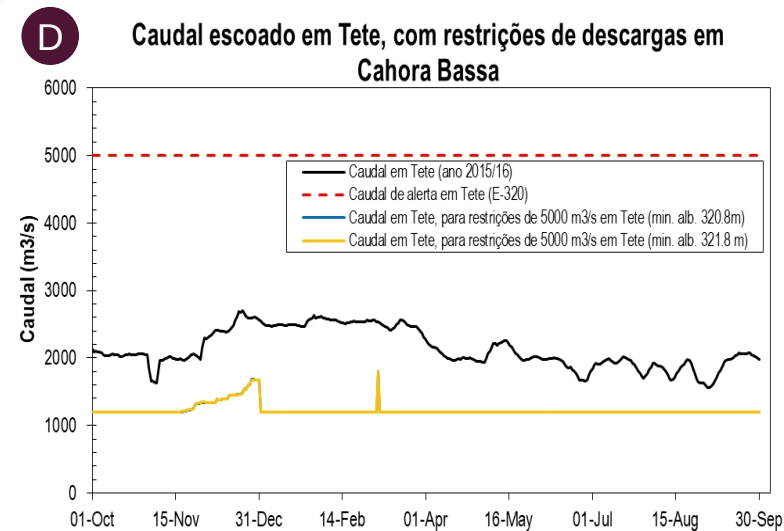
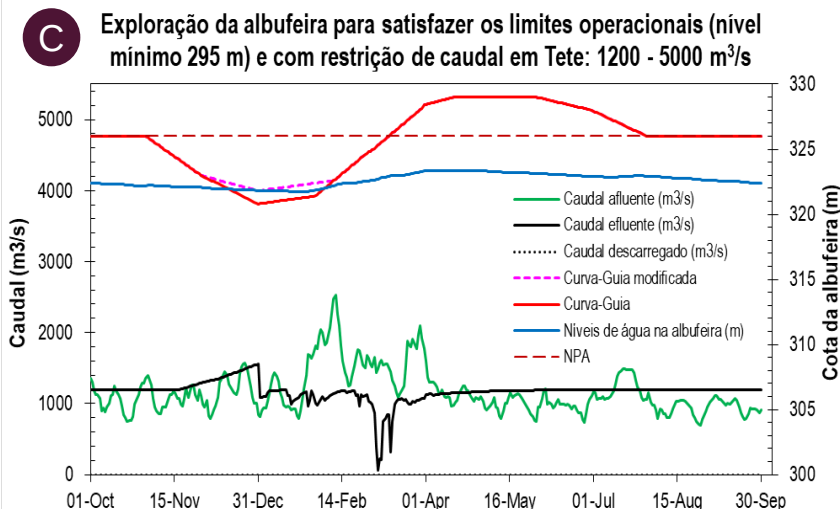
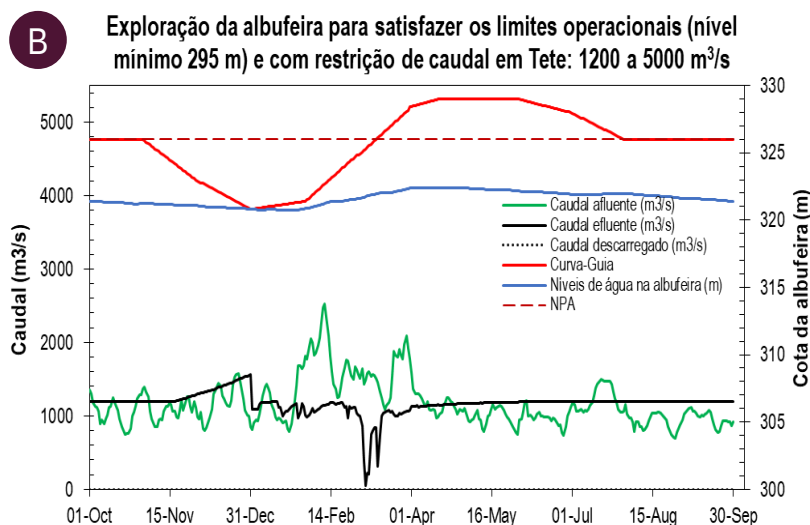
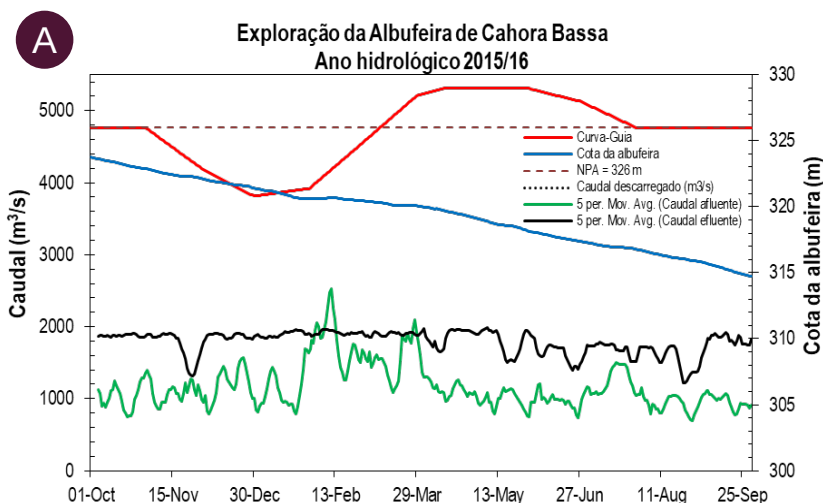
Ano normal: Potencial de produção de energia em 93% da capacidade máxima (15,4 GWh)



- > Numa sequência de anos normais, não se coloca a necessidade de incrementar a capacidade de encaixe de cheias, com o rebaixamento do nível da Albufeira a 31 de Dezembro para além do mínimo da curva-guia;
- > Uma possível superação deste mínimo para conter mais água para a produção de energia não se revela oportuna;
- > Sem ter em consideração o padrão de consumo de energia, o período entre Fevereiro e Maio é o ideal para a manutenção de alguns equipamentos do Sistema de Geração e Conversão de Energia;
- > É possível satisfazer simultaneamente as restrições operacionais do empreendimento de Cahora Bassa e de caudais máximos em Tete.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO (3/3)

Ano seco: Potencial de produção de energia em 62% da capacidade máxima (10.3 a 10.4 GWh) >



Numa sequência de anos secos, não se consegue satisfazer o caudal mínimo definido neste estudo, para a E-320 em Tete, nos semestres seco e húmido. O caudal mínimo em Tete é reduzido em 10 a 20%, passando para 1200 m³/s (Fig. B);

> Ainda em anos secos, testando um cenário de aumento do mínimo da curva-guia em 1 m (321.8m), taxa de descida da curva-guia de Nov. para Dez. de 7 para 4 cm, ainda é possível satisfazer o caudal de 1200 m³/s em Tete e incrementar a produção de energia em cerca de 1% (Fig. C);

> Pelo facto de se procurar maximizar a produção de energia, a solução óptima salvaguarda o máximo possível de água na Albufeira para garantir uma maior queda, e satisfazendo o caudal mínimo em Tete.



5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

- > Os resultados do modelo de optimização da exploração da Albufeira podem contribuir para sinalizar eventuais oportunidades do ponto de vista da gestão de aproveitamentos hidroeléctricos de fins múltiplos. No entanto, devem ser entendidos como limites superiores resultantes de uma optimização matemática que não traduz necessariamente toda a complexidade e imprevisibilidade de uma exploração real.
- > O contínuo investimento no monitoramento de variáveis hidrometeorológicas e desenvolvimento de modelos de previsão de afluências e de demandas quer de água, assim como de energia, tornam-se factores determinantes para uma melhor compreensão da dinâmica do sistema e minimização do grau de incertezas na gestão operacional de Albufeiras.

Obrigado!