Encontro Técnico AESABESP
37º Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente

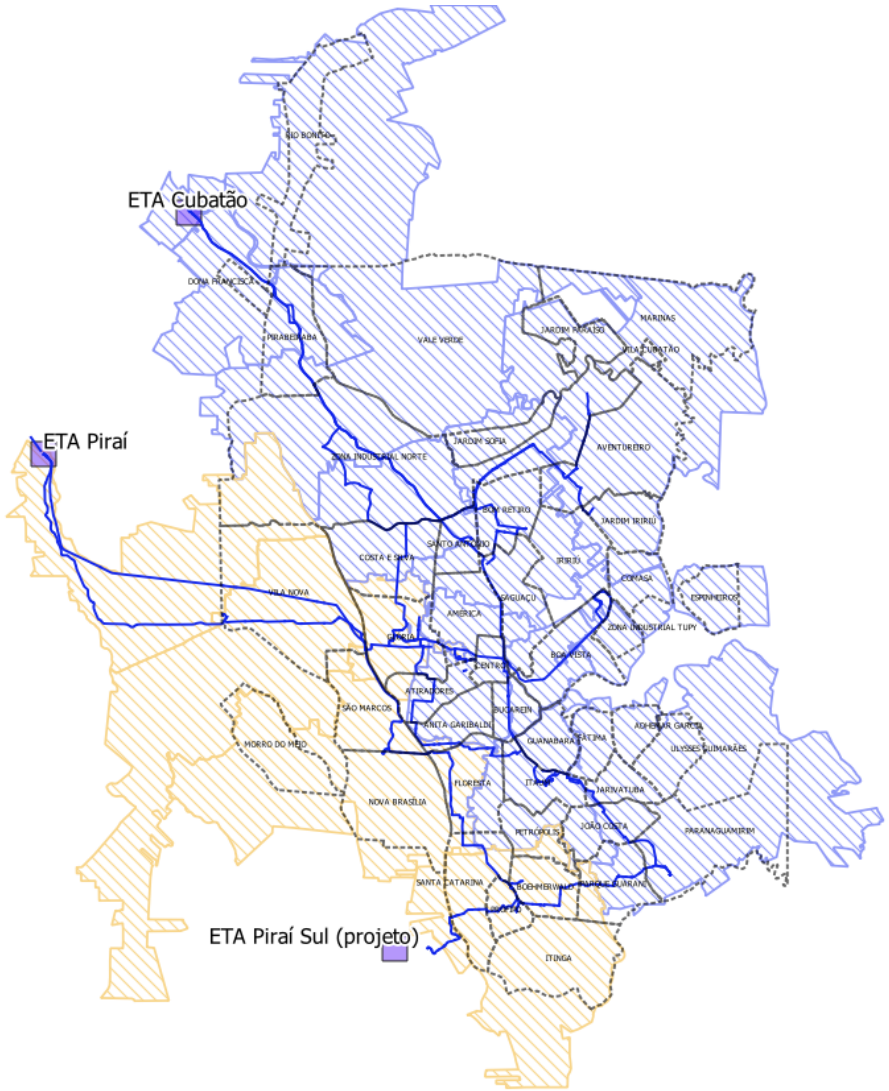
AESABESP 40 Anos
Associação dos Engenheiros da Sabesp

37ETC-07375

Sistema de apoio à decisão baseado em combinação de previsões para operação otimizada de reservatórios

Fabrizio Silva Campos
Lucas Emanuel Martins
Companhia Águas de Joinville

Sistema de abastecimento de água de Joinville,SC



673.980
População atendida

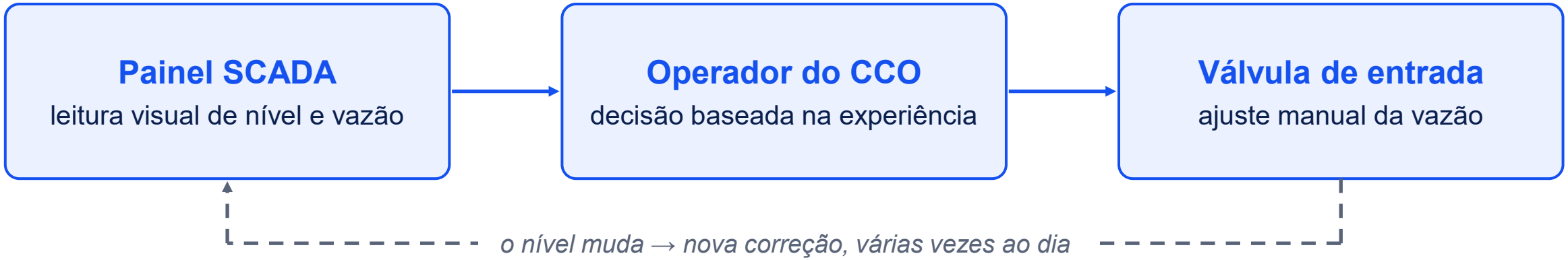
2.200 l/s
Produção / ETAs

12
Reservatórios

171.322
Ligações de Água Ativa



O desafio: operação reativa de reservatórios



Decisões variam entre turnos e equipes

Baixa rastreabilidade das decisões

Dependência de profissionais experientes

Pergunta: é possível prever a demanda e recomendar a vazão de entrada otimizada?

Objetivos

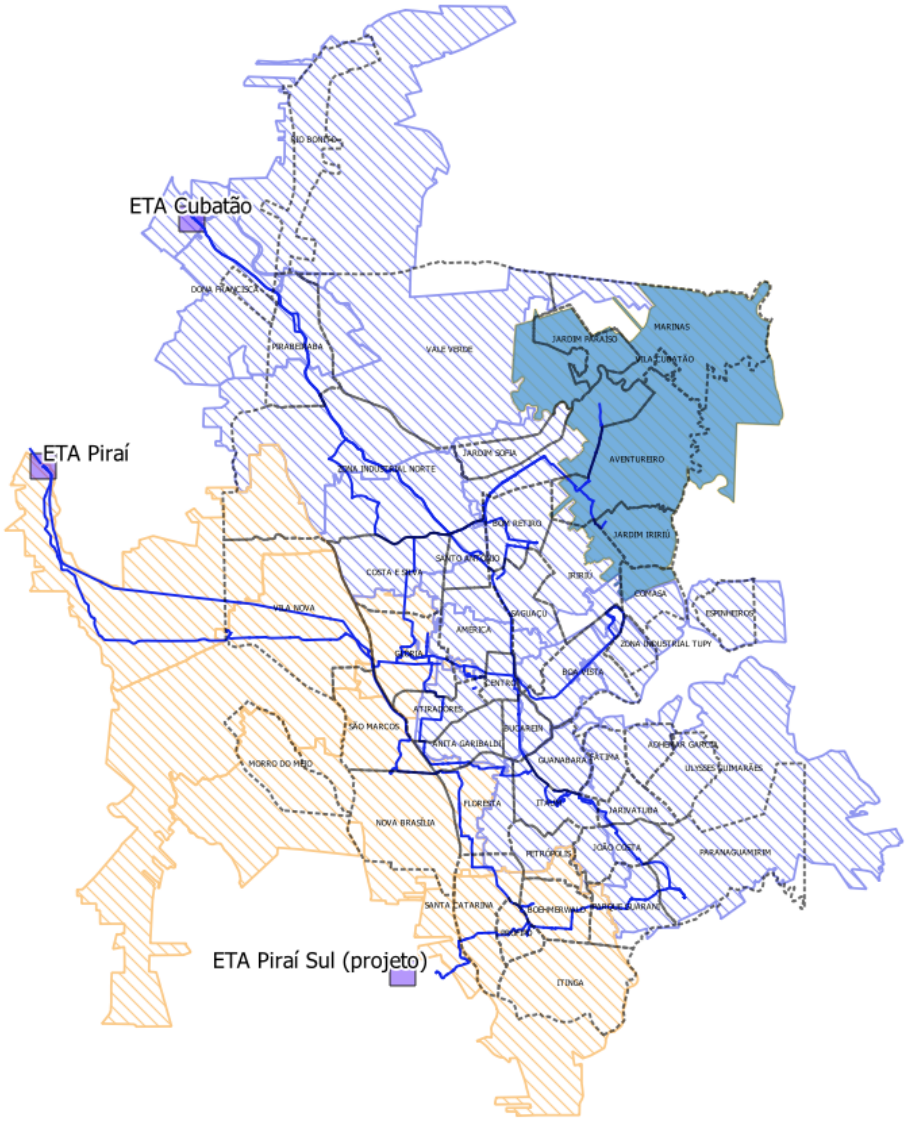
Geral

Desenvolver ferramenta de suporte à decisão para o planejamento operacional de curto prazo de reservatórios em SAA, integrando previsão de demanda baseada em combinação de modelos de aprendizado de máquina à otimização não-linear da vazão de entrada.

Específicos

a) Desenvolver um modelo combinado para previsão da demanda;
b) Formular matematicamente o problema de otimização da vazão de entrada;
c) Implementar uma ferramenta interativa, baseada em ambiente Shiny;
d) Realizar avaliação por simulação contrafactual sobre operação real de reservatório de SAA urbano.

Área de Estudo – R7



23.059
Ligações de Água Ativa

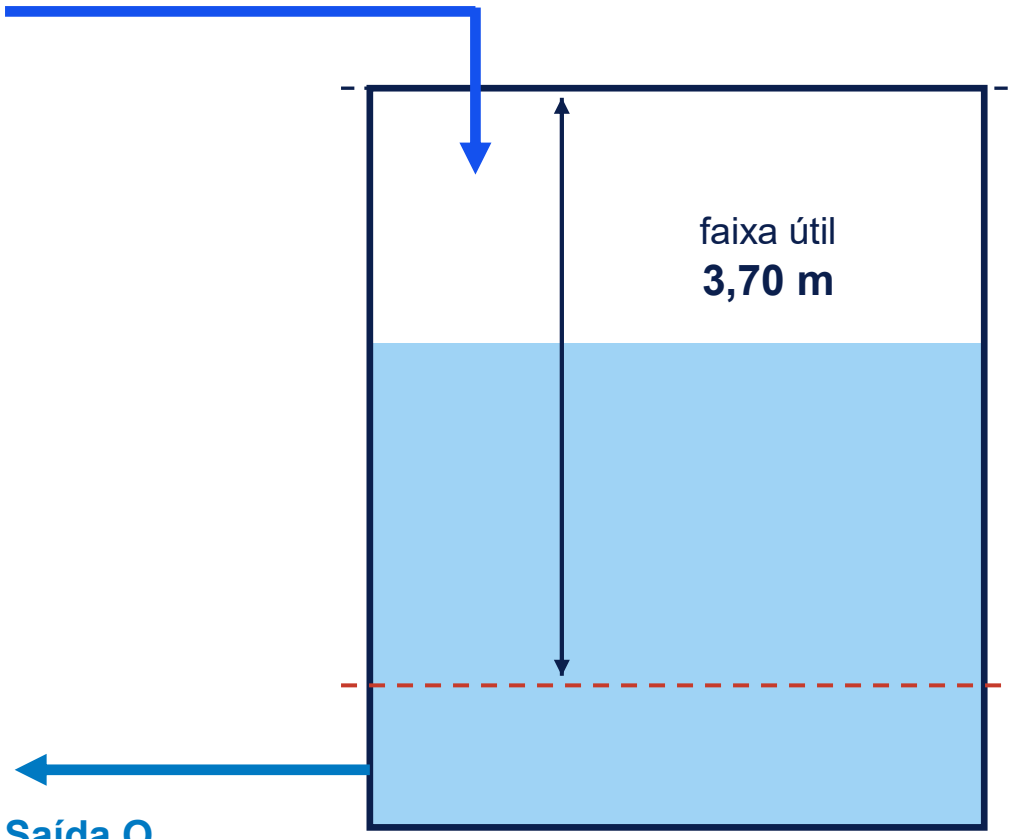
350 l/s
Vazão Média

90.714
População atendida

95 %
Categoria Residencial

Reservatório real de um setor urbano

Entrada Q_e · válvula autuada (controlável)



Saída Q_s
demanda do setor

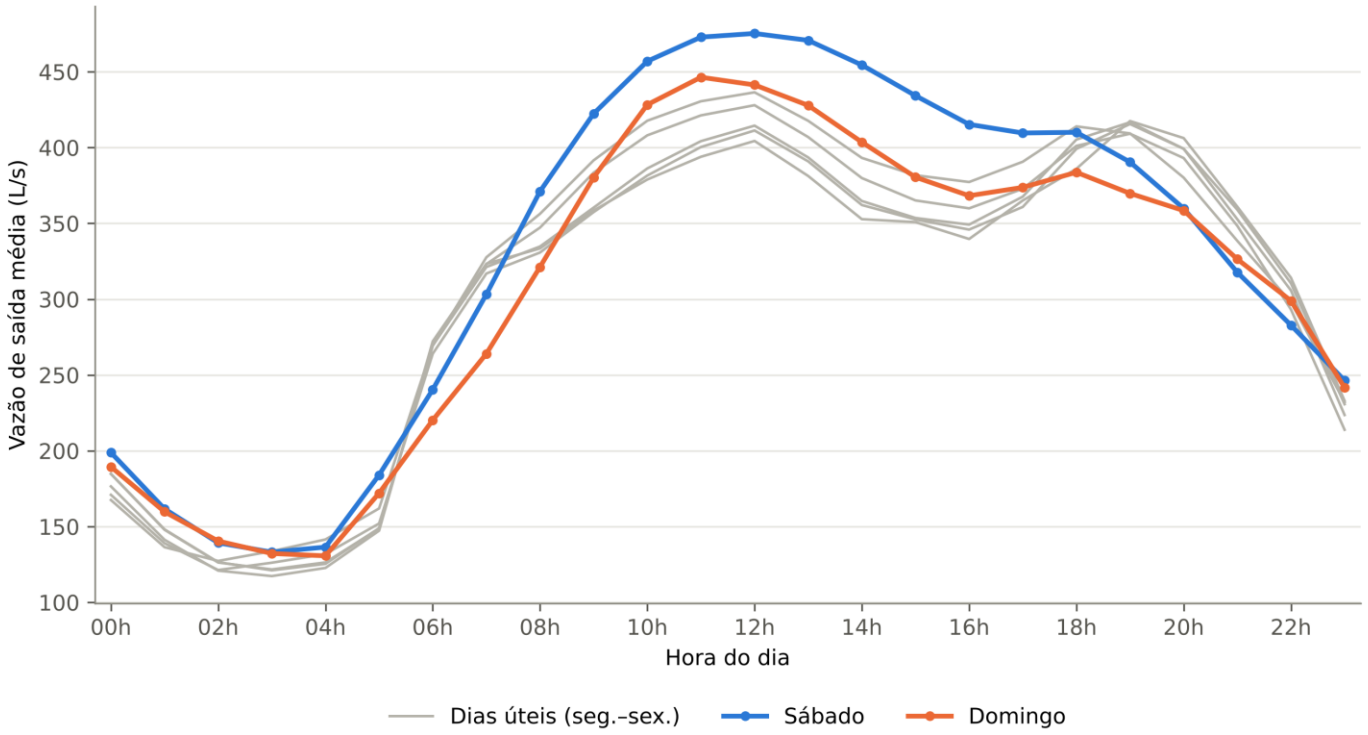
1.110 m²
área da seção horizontal

5.084 m³
volume total

Dados horários
nível e vazões do SCADA, jan–abr/2026

Clima
base meteorológica pública georreferenciada

Série temporal de demanda de água

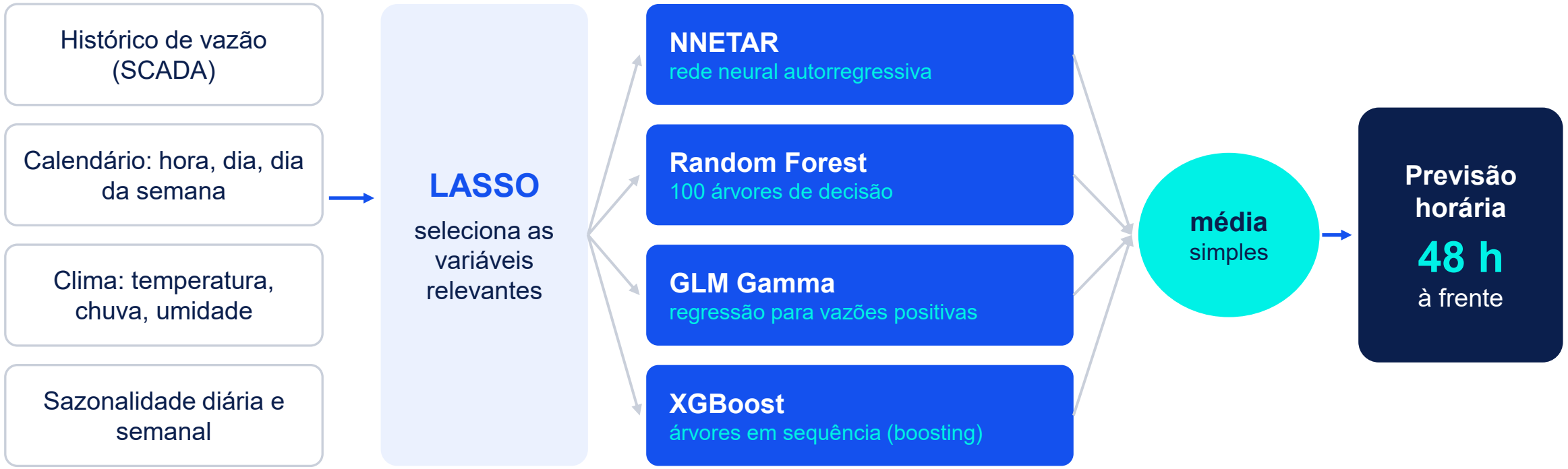


Vazão de saída média (dados SCADA)

Série temporal: medições ordenadas no tempo

1. **Ciclo diário (24 h)**
   madrugada baixa, picos de manhã e à noite
2. **Ciclo semanal (168 h)**
   fins de semana deslocam os picos
3. **Clima e calendário**
   temperatura, chuva, dia da semana
4. **Variabilidade**
   cada dia × hora varia: uma curva média fixa não basta

Previsão por combinação de modelos



Por que combinar? modelos com vieses diferentes se compensam e demonstram vantagem frente a modelos univariados. Evidência da competição Battle of Water Demand Forecasting (Alvisi et al., 2025)

Otimização da vazão de entrada

Encontro Técnico AESABESP
37º Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente

1 Decisão

Minimização do número de manobras

ex.: vazão noturna + vazão diurna

Mais patamares só se melhorarem o resultado

2 Restrições

$0 \leq Q_e \leq Q_{e,máx}$

nível dentro da faixa segura:

$h_{mín} + m_{inf} \leq h \leq h_{máx} - m_{sup}$

3 Objetivo adotado

Operação equilibrada: min Var(Q_e)

alimentação estável → menos manobras

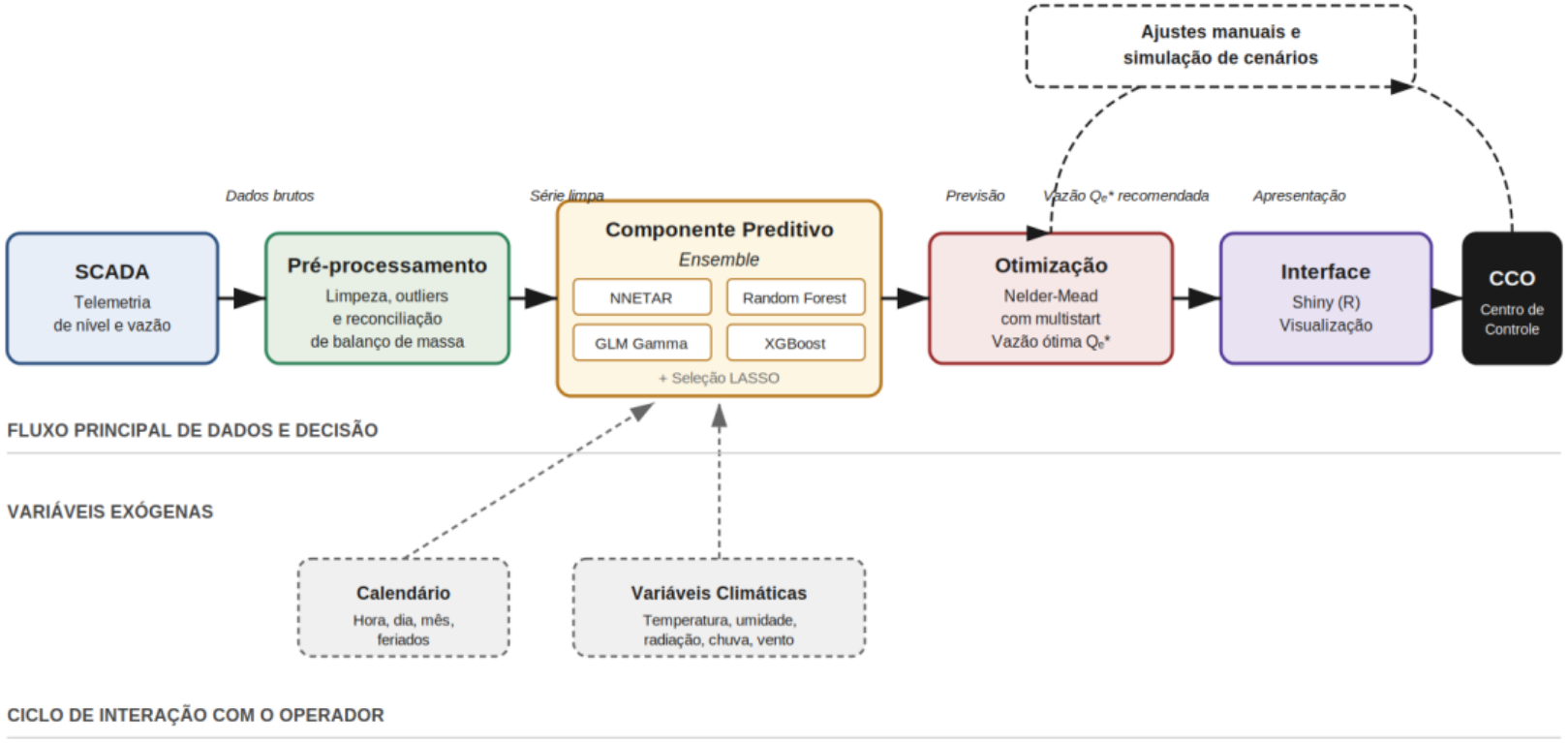
Solver: Nelder-Mead com multistart

Horizonte rolante
planeja vários dias, aplica só o primeiro

Dia 1 aplicado	**Dia 2** planejado	**Dia 3** planejado

→ recalcula a cada novo dia com previsão atualizada

Do SCADA à decisão, em camadas



Aquisição → pré-processamento → previsão → otimização → **interface ao CCO**

Análise contrafactual

Encontro Técnico AESABESP
37º Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente

Cenário Real

Operação efetivamente realizada pelo CCO — vazões, nível e manobras extraídos do log do SCADA

Cenário Simulado

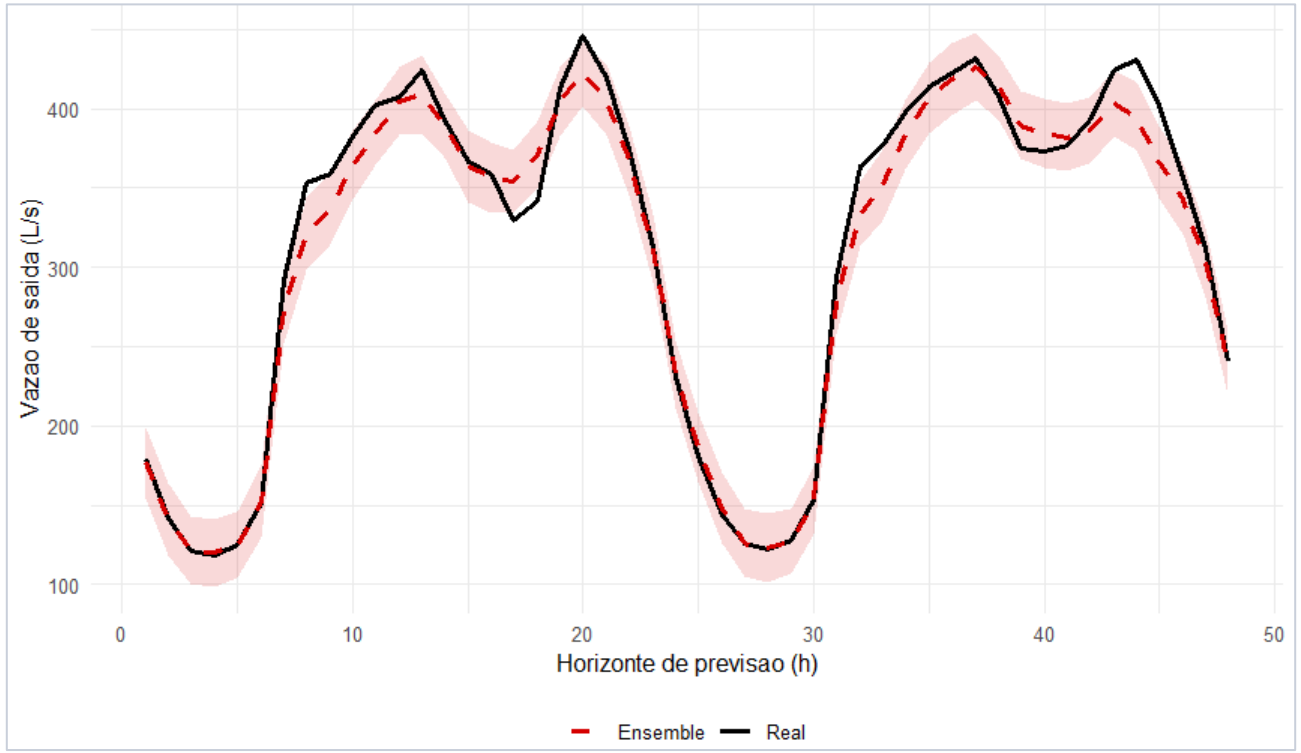
Todo dia às 0 h → Previsão só com dados passados → Otimização da vazão de entrada → Nível recalculado com a demanda real

Período: jan–abr/2026

treino inicial · 1.344 h	avaliação · 03/03 a 30/04/2026 · 1.382 h ≈ 58 dias

Indicadores: manobras por dia · variabilidade da vazão de entrada · horas na faixa segura · amplitude diária do nível

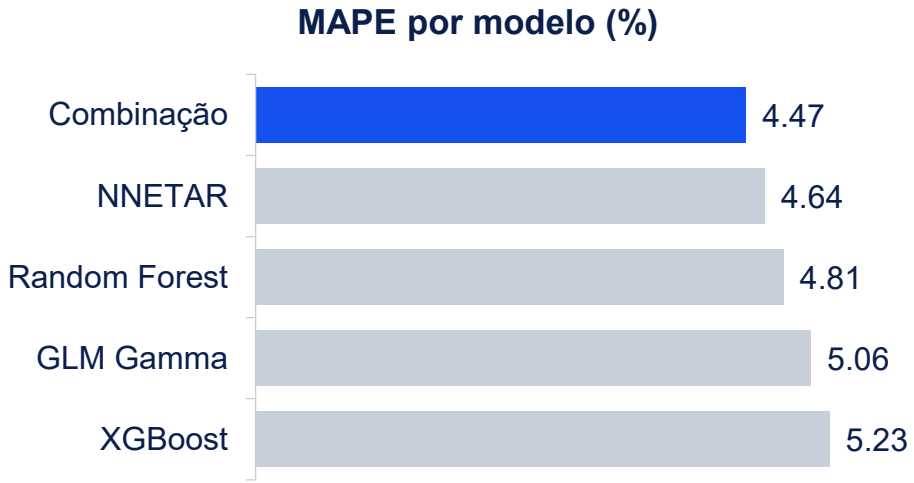
Resultados – Previsão de Demanda



Previsão combinada (vermelho) × observado (preto), 48 h a partir de 05/03/2026

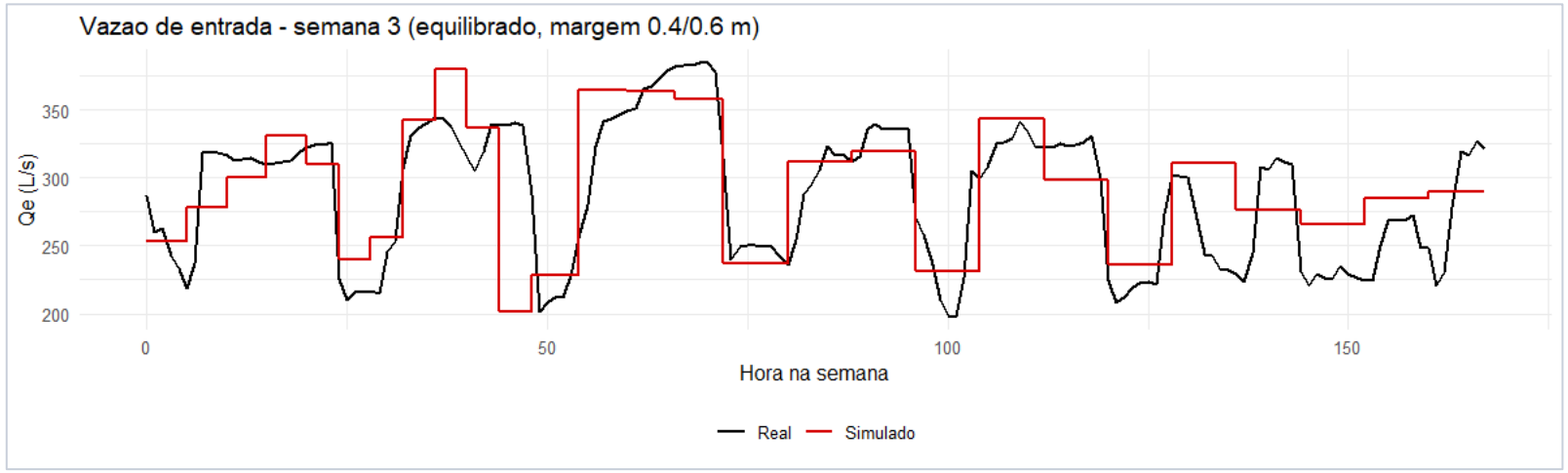
4,47 %

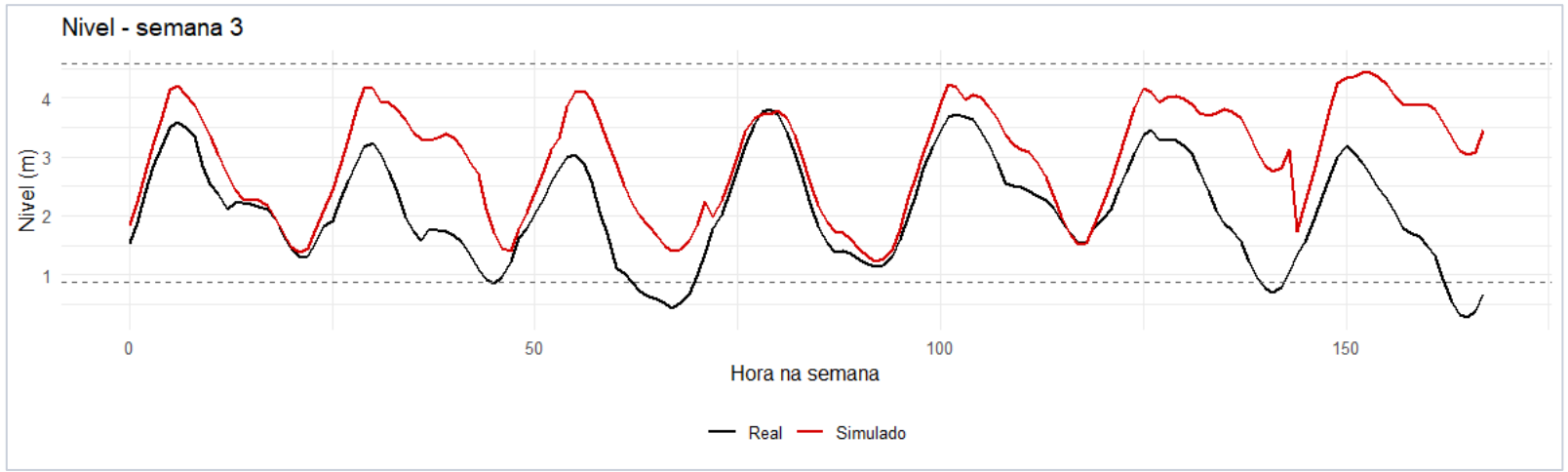
erro percentual médio (MAPE) da combinação
3,12 % sem os 12 dias atípicos



Validação em janela móvel: treino de 8 semanas, horizonte de 48 h

Resultados – Operação





Vazão de entrada

Real: correções frequentes ao longo do dia

Simulado: poucos patamares programados

Nível

O simulado percorre melhor a faixa útil: maior uso do efeito-pulmão

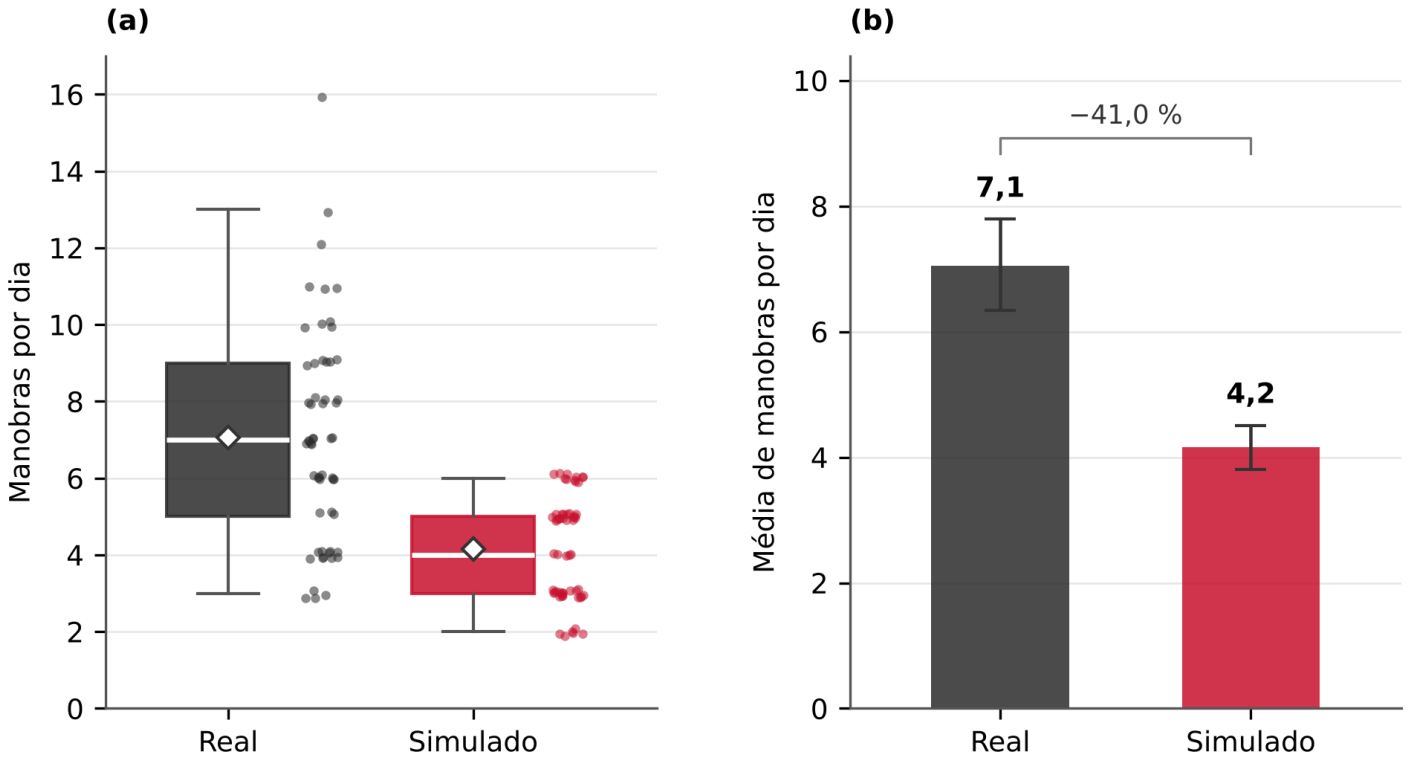
Resultados

−41 %
manobras por dia
7,1 → 4,2

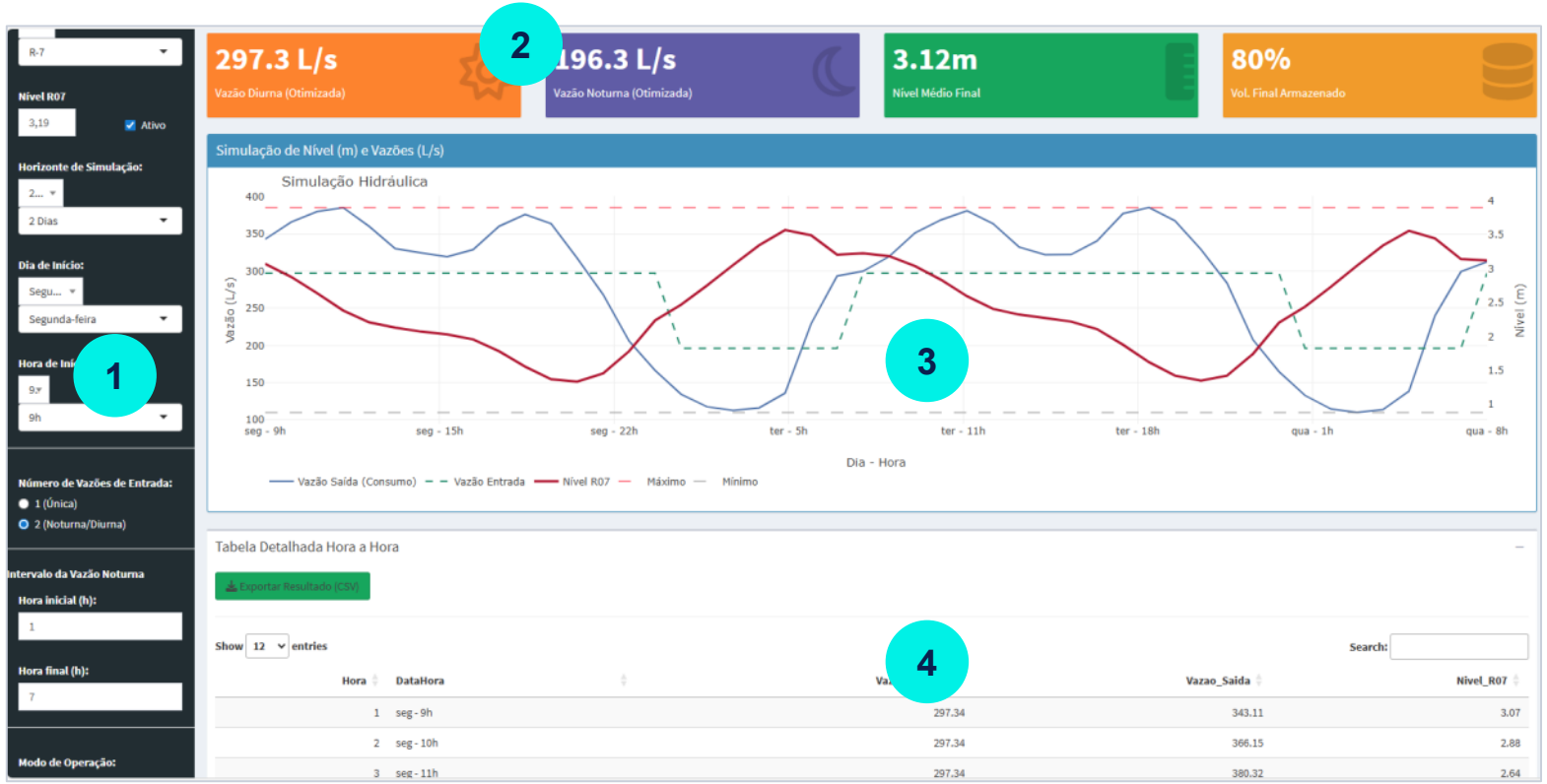
402 → 237
manobras no período
≈ 58 dias

+23 %
amplitude diária do nível
2,42 → 2,97 m

95,5 %
horas na faixa segura
real: 94,9 %



A ferramenta: interface para o CCO



1 **Parâmetros**
reservatório, nível inicial, horizonte de 1, 2 ou 7 dias, 1 ou 2 vazões

2 **Indicadores**
vazões recomendadas e nível final

3 **Gráfico**
demanda, entrada e nível na faixa segura

4 **Tabela hora a hora**
com exportação em CSV

R + Shiny | **Software livre** | **Otimizar ou simular manualmente** | **Decisão final do operador**

Escalabilidade da Solução

✓ **Dados reais**
séries do SCADA e clima público; ≈ 2 meses de operação real avaliados

✓ **Rotina do CCO**
recomendação diária às 0 h, em poucos patamares de vazão

✓ **Baixo custo**
software livre (R + Shiny), sem licenças

✓ **Transferível**
recalibrar previsão e margens para cada reservatório

Próximos passos

- Validação prospectiva supervisionada no CCO
- Custo energético tarifário na função objetivo
- Coordenação de múltiplos reservatórios

Conclusões

Encontro Técnico AESABESP
37º Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente

1 **Previsão é o fator crítico**

a vazão ideal depende da demanda futura

2 **Combinar modelos funciona**

menor erro entre as abordagens: MAPE de 4,5 %

3 **Ganho operacional real**

−41 % de manobras e +23 % de uso do efeito-pulmão, sem perda de segurança

4 **Do reativo ao antecipatório**

decisões padronizadas, auditáveis e compartilháveis

Obrigado!

Encontro Técnico AESABESP
37º Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente

AESABESP 40 Anos
Associação dos Engenheiros da Sabesp

Fabrizio Silva Campos
fabrizio.campos@aguasdejoinville.com.br
(47) 98900-2093
Companhia Águas de Joinville

Coautores

Lucas Emanuel Martins
Companhia Águas de Joinville