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

AESABESP 40 Anos
Associação dos Engenheiros da Sabesp

37ETC-07381

Otimização topológica de redes de esgoto e minimização de CAPEX com machine learning e SIG

Eduardo Magalhães Vieira
E-Agua

O custo do traçado só aparece no fim do projeto

Retrabalho a *cada* rota

Cada alternativa estudada exige redesenho e novas revisões pelo projetista.

Custo só no fim

O CAPEX só é apurado depois que o traçado já está desenhado.

Ótimo fora de alcance

Não há tempo hábil no projeto para orçar todas as rotas possíveis até a EEE.

Proposta: usar o custo de implantação como critério do traçado desde o primeiro trecho.

Objetivo: o traçado de menor custo no QGIS

O projetista indica apenas PVs iniciais, ponto final (EEE) e restrições. A ferramenta encontra a rota de menor custo de implantação, com base nas composições do SINAPI.

Roteamento A*

Algoritmo que busca a rota de menor custo até a EEE

ML explicável

XGBoost estima o custo; SHAP mostra o peso de cada variável

VCA × MND

Vala a céu aberto ou método não destrutivo, por trecho

Proposta de EEE

Estação elevatória de esgoto quando a gravidade não basta

Edição interativa

Ajustes recalculados na hora e memorial pronto para exportar

Arquitetura da ferramenta: grafos, ML e SINAPI

1 Dados GIS

Eixo das ruas e raster

PVs iniciais e ponto final (EEE)

Modelo treinado (.joblib), melhoria de entrada

2 Grafo + A*

Nós = poços de visita

Arestas = trechos possíveis

Peso = custo SINAPI em R$

3 Custo + ML

Orçamento SINAPI

XGBoost estima o custo no memorial

SHAP mostra o que pesa no custo

4 Decisão construtiva

VCA ou MND por trecho

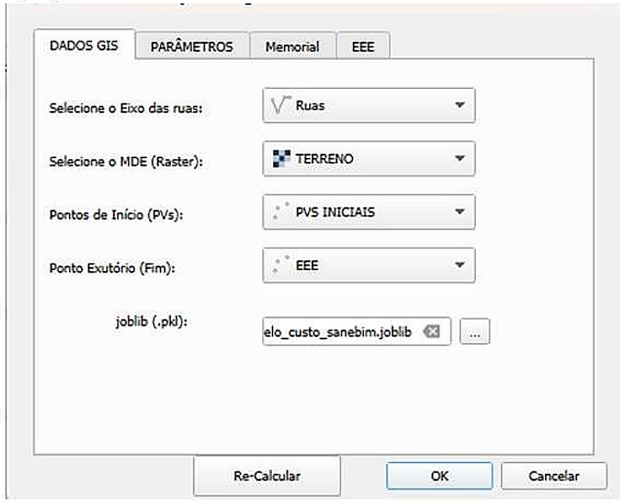
Sinalização de EEE

Pré-dimensionamento do DN

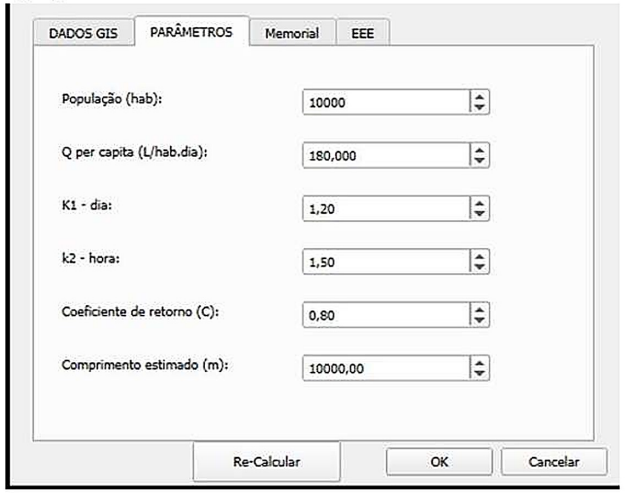
Saída: memorial técnico por trecho, com os poços de visita e tubos prontos para exportar em um software de dimensionamento hidráulico

Interface da ferramenta no QGIS

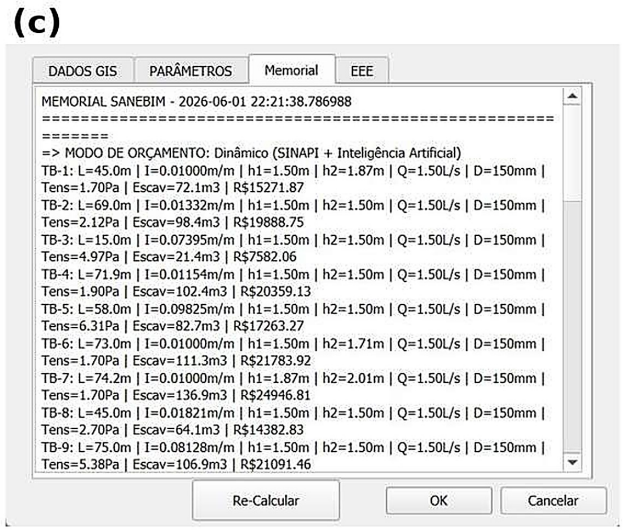
(a)



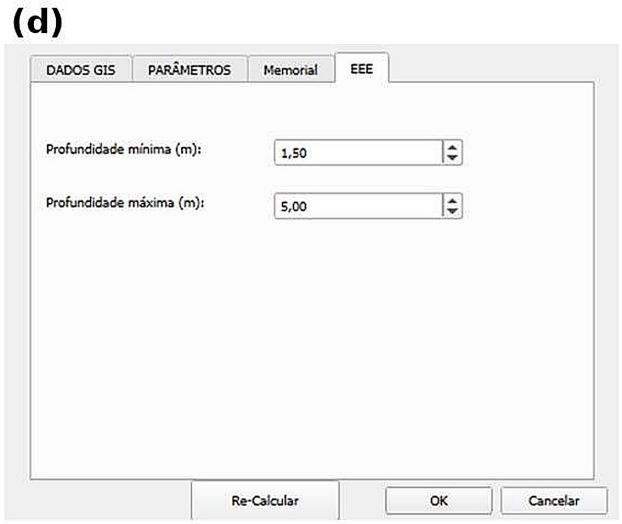
(b)



(c)



(d)



a

DADOS GIS

Eixo das ruas, raster do terreno (MDE), PVs iniciais, ponto final (EEE) e modelo de custo treinado (.joblib).

b

PARÂMETROS

População, consumo per capita, K1, K2 e coeficiente de retorno.

c

MEMORIAL

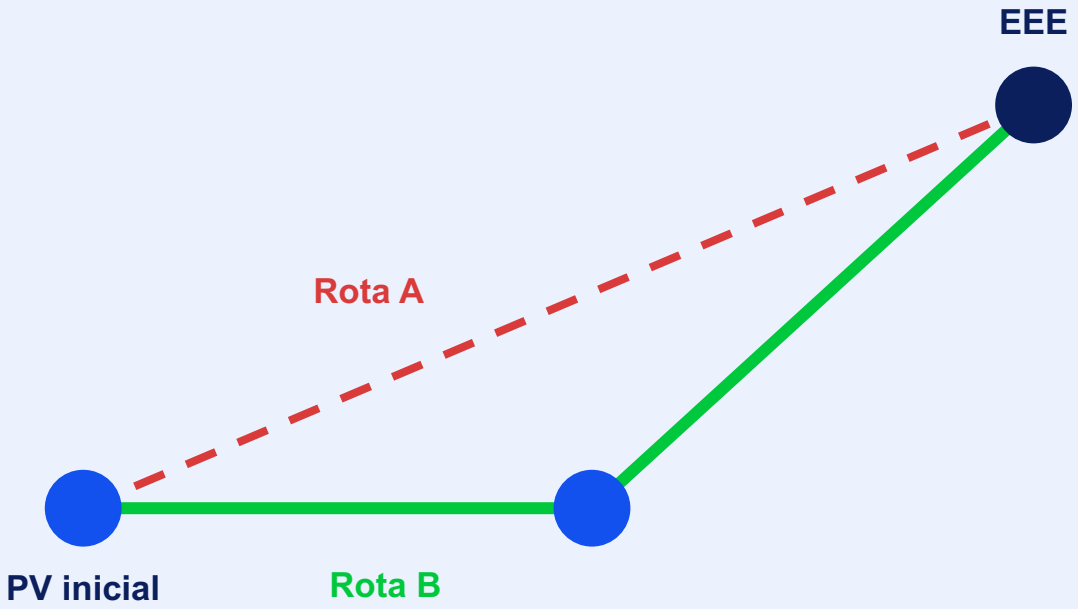
Resultado por trecho: L, I, h, Q, DN, tensão trativa, escavação e R$ por trecho.

d

EEE

Profundidades mínima e máxima que limitam o traçado e definem o método construtivo e a indicação de EEE.

Roteamento A* com custo em R$ por trecho



f(n) = g(n) + h(n)

g(n) soma dos custos de cada trecho já percorrido, calculados um a um com o SINAPI

Grafo e A* implementados em Python

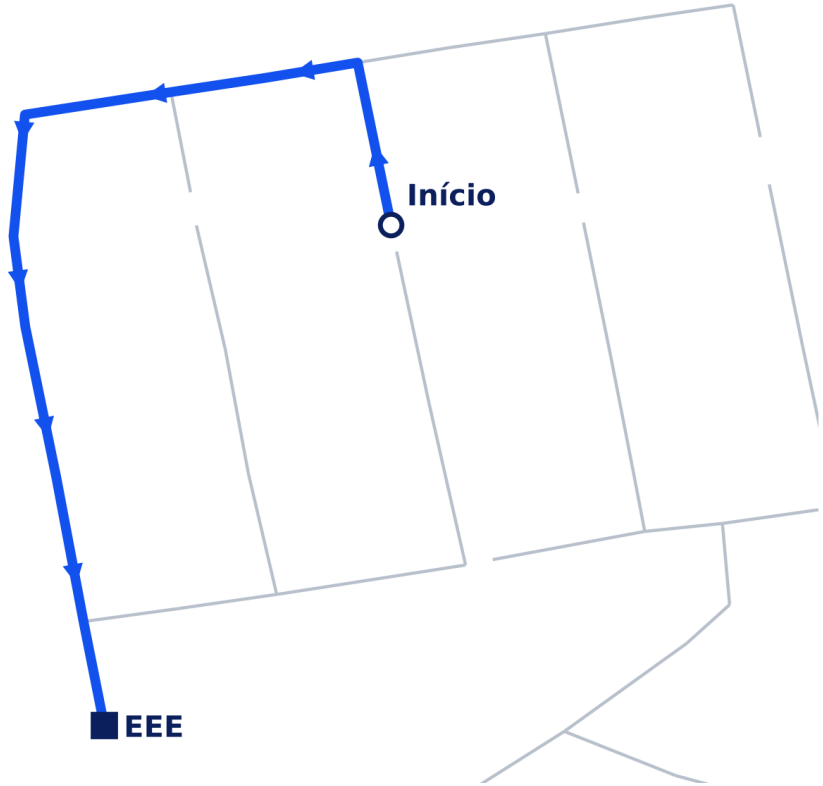
PVs viram nós e trechos possíveis viram arestas, com peso igual ao custo do trecho.

Buscando o melhor caminho

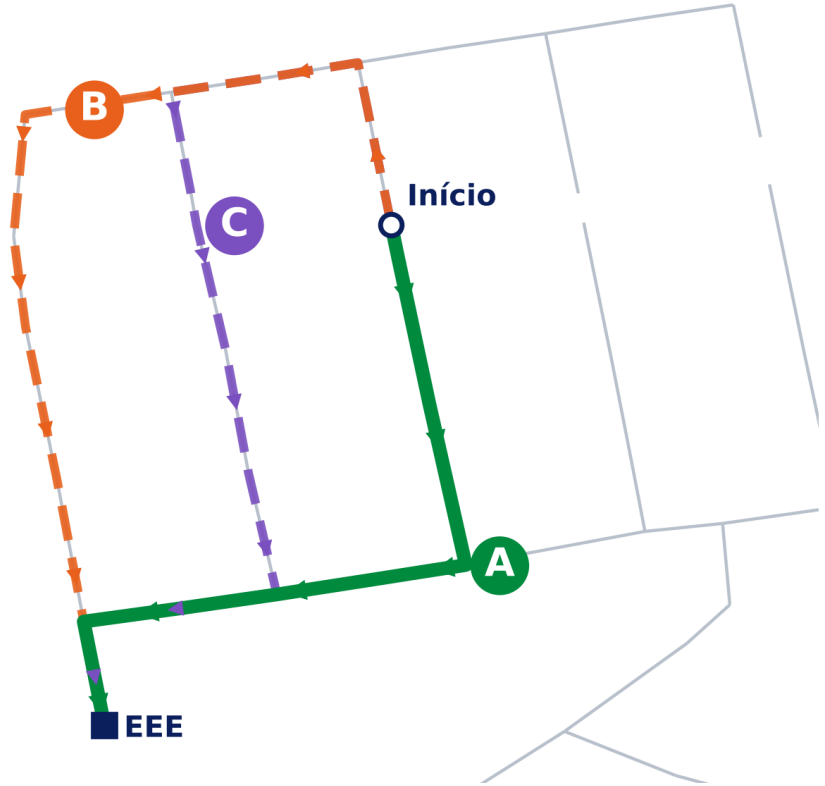
Em cada ponto, calcula o custo de cada trecho vizinho e segue pelo menor f(n). Como a linha reta nunca superestima, a rota é a de menor custo.

Mais ruas no grafo, mais caminhos comparados

Eixo só com a rede projetada
1 caminho possível até a EEE



Eixo completo das ruas
3 caminhos possíveis; a ferramenta fica com o de menor custo



Classificação construtiva e indicação de EEE

ID_TUBO	TB-1
DECLIV	0,01
DIAMETRO	150
MATERIAL	PVC
Q_FINAL	1,500
D_TEORICO	57,49
VELOC	0,66
LAMINA	0,19
COMPRIM	45,00
TENS_TRAT	1,70
H_MONT	1,50
H_JUS	1,87
VOL_ESCAV	72,12
VOL_REAT	82,02
TUBO_QUEDA	Nao
SUB_BACIA	SB-1
METODO	MND
CUSTO_M	339,37
CUSTO_TOT	15271,87

Perfil de rebaixo ao longo do traçado

Profundidade > máx. da concessionária?

Sim

Sinaliza necessidade de EEE
e reinicia a cota de fundo a partir desse ponto

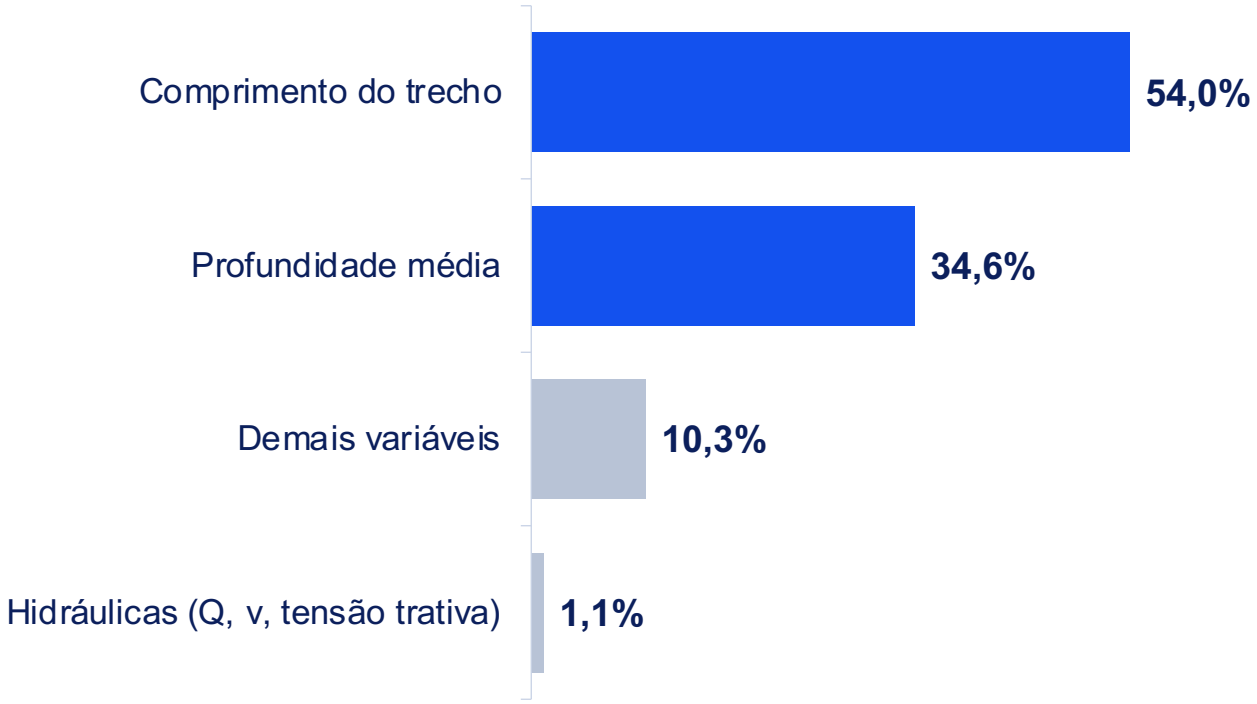
Não

VCA (vala aberta) ou MND (sem abrir vala)
pré-classificação pela extensão do trecho

Dispensa a análise manual trecho a trecho.

Machine learning: estimar e explicar o custo

Peso de cada variável no custo por metro (% do total)



R^2 0,9931

erro médio de 1,8% em trechos que o modelo não viu no treino

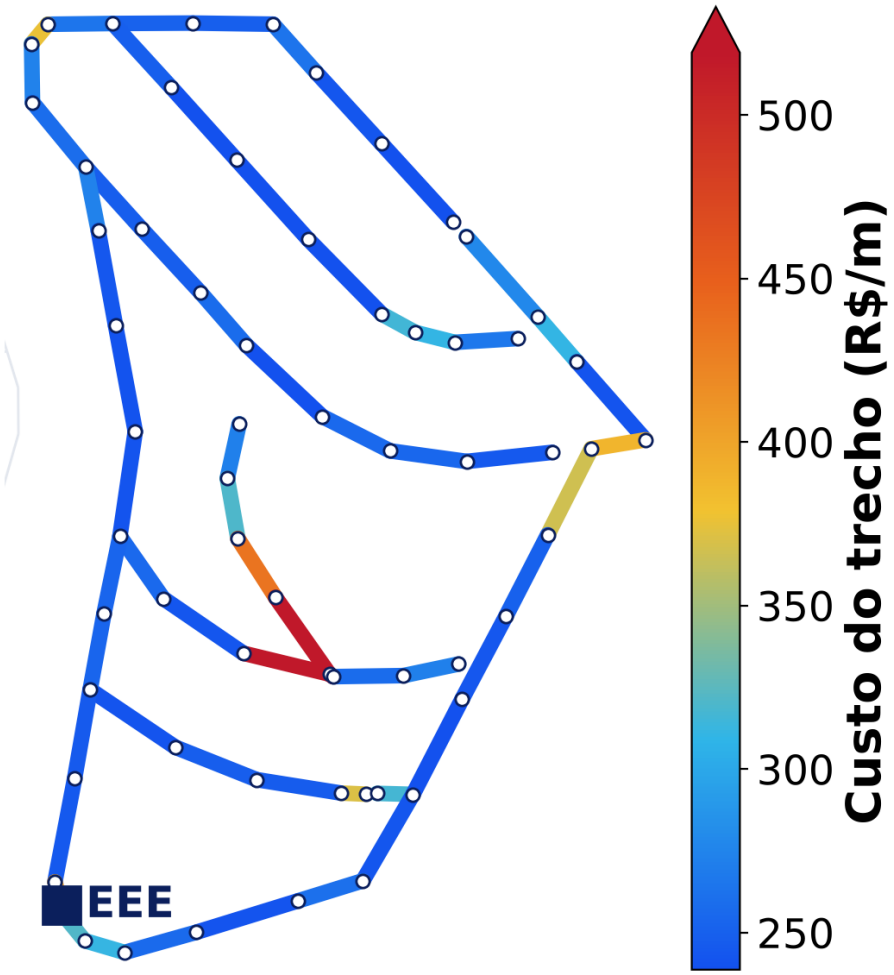
XGBoost treinado com 1.213 trechos de traçados reais

88,6%

do custo vem do comprimento do trecho e da profundidade (SHAP)

É aí que a ferramenta economiza: rede na profundidade mínima e menos PVs. No memorial, o ML estima o custo de cada trecho.

Cada trecho com seu custo, método e confiança



62 trechos em 4,4 km

cada um com seu custo em R$/m, calculado automaticamente

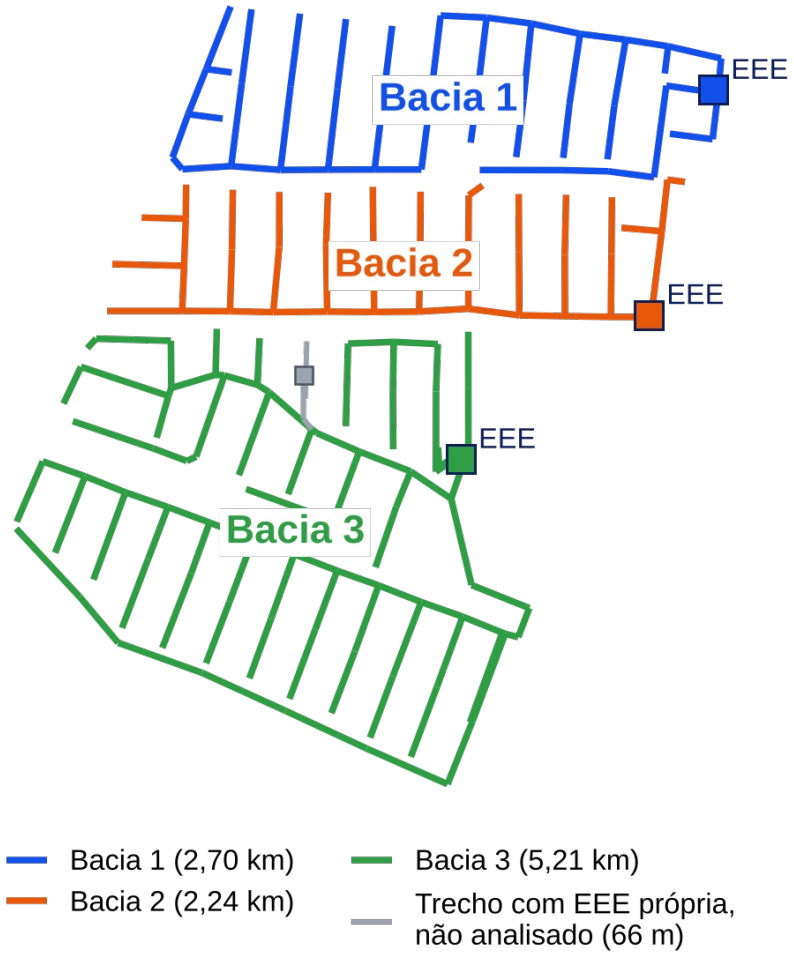
36 MND e 26 VCA

pré-classificação do método construtivo por trecho

± R$ 5/m (1,8%)

erro médio do XGBoost na estimativa de custo de cada trecho

Aplicação em rede real: 10 km



−10,6%

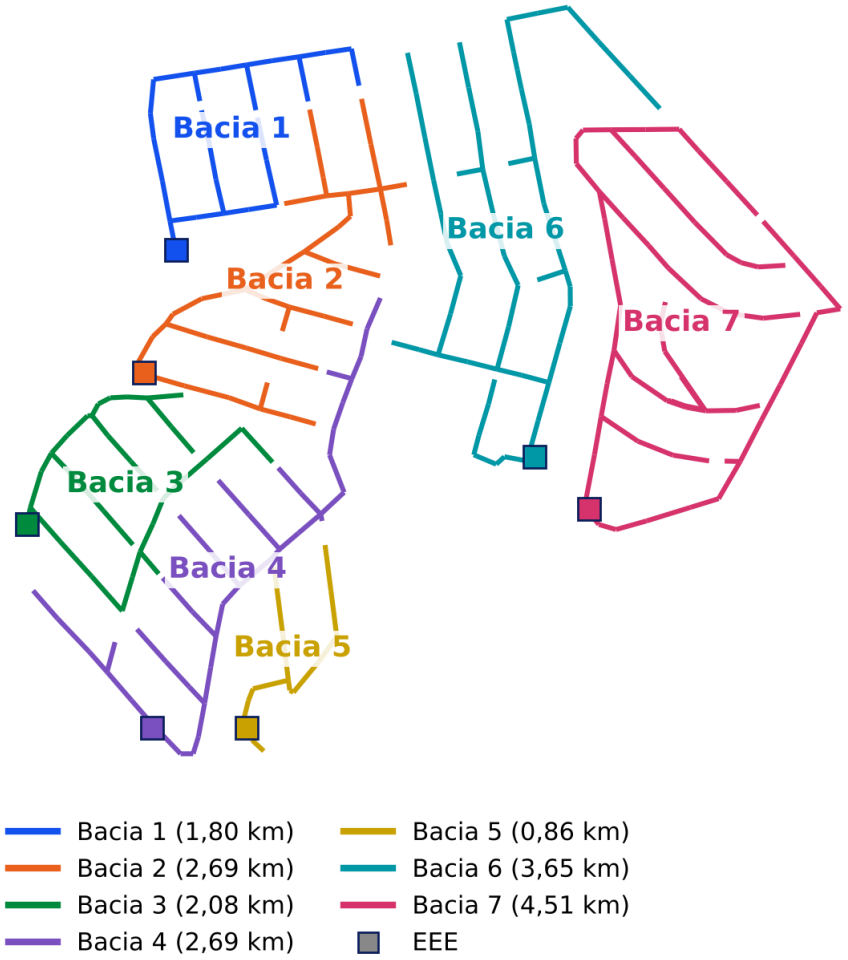
CAPEX da rede

em relação ao projeto convencional (SewerGEMS)

Menos trechos e rede mais rasa

com o mesmo traçado do projetista em 99,8% da extensão

Aplicação em rede real: 18 km



−18,9%

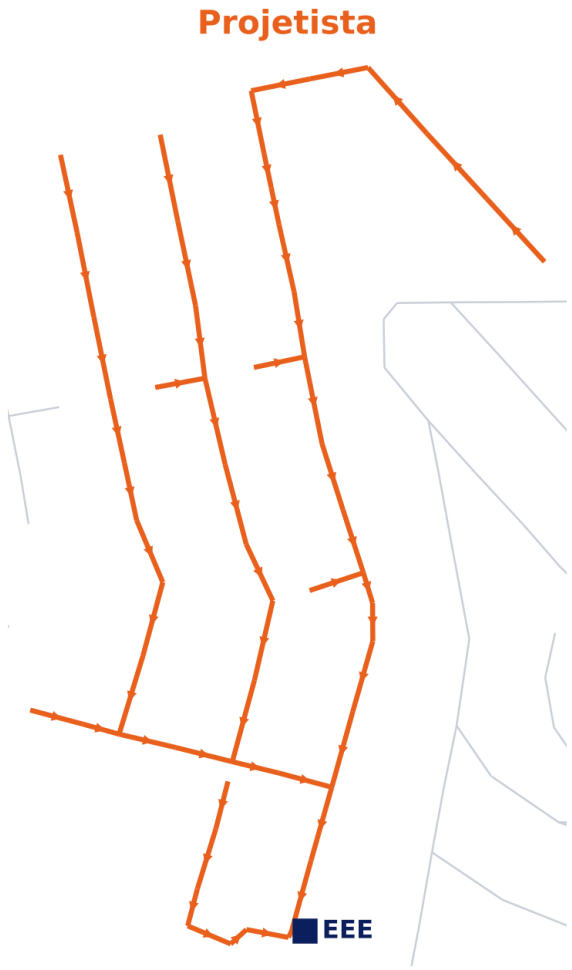
CAPEX da rede

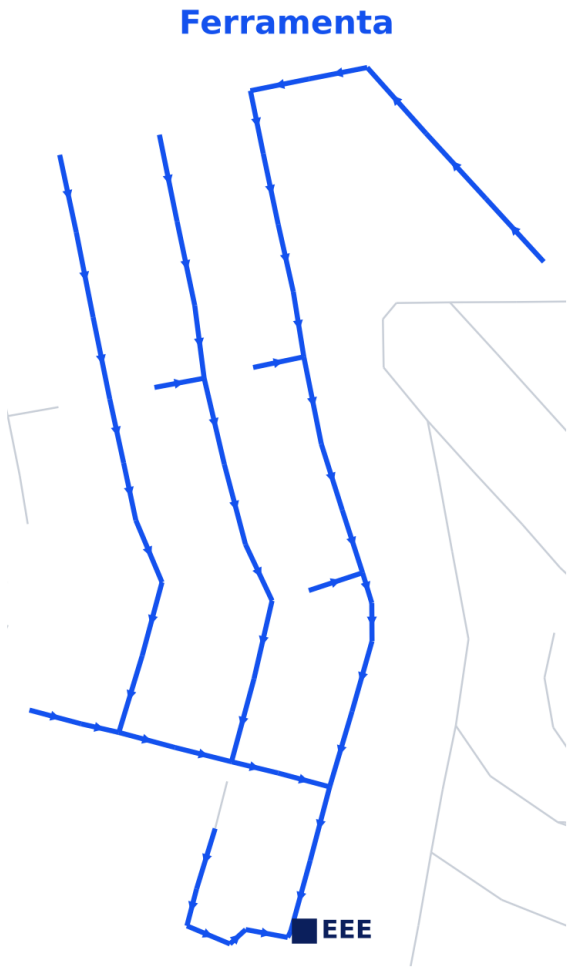
em relação ao projeto convencional (SewerGEMS)

Menos trechos e rede mais rasa

acompanhando o terreno, em 18 km de rede e 7 elevatórias

Traçado no nível de um projetista experiente





99,7%

da extensão desta sub-bacia com o mesmo sentido de escoamento do projetista

Nas demais sub-bacias, a ferramenta também chegou ao traçado de um projetista experiente, guiada pelo custo.

Tempo de traçado: horas contra minutos

Projetista sênior

≈ 2h30

para traçar 10 km de rede

uma alternativa por vez; cada mudança exige redesenhar

Ferramenta no QGIS

–93%

de tempo: cerca de 10 min para traçado, perfil, verificação da NBR 9649 e CAPEX

várias alternativas comparadas pelo custo em cada execução

Limitações e trabalhos futuros

Limitações

1. Base de treino restrita a DN 150 mm em PVC
2. Custo-alvo é o orçamento teórico SINAPI, não o custo de obra
3. Tendência a propor travessias em busca de rotas curtas
4. Não considera profundidade de ligações prediais nem interferências

Próximos passos

1. Novos diâmetros, materiais (PEAD) e topografias, aprendizado offline em lotes
2. Calibrar com custos de obra e ajustar os pesos da combinação SINAPI + ML e das penalidades
3. Custo explícito de travessias na função objetivo, proposta de redes duplas
4. Incluir ligações prediais, e interferências. Avaliar terrenos ao longo dos PVs, tipos de solo, pavimento da rua.

Considerações finais

Encontro Técnico AESABESP
37º Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente
AESABESP 40 Anos
Associação dos Engenheiros da Sabesp

1

Custo como critério primário

O custo orienta o traçado desde o primeiro trecho. Em 28 km de redes reais, o CAPEX caiu 10,6% e 18,9%, com o mesmo traçado do projetista.

2

ML explicável orienta o projeto

Comprimento e profundidade explicam 88,6% do custo, o que justifica cada escolha de rota.

3

Ferramenta livre e aplicável

Em QGIS, para concessionárias e projetistas usarem livremente.

Obrigado!

Eduardo Magalhães Vieira
eduardo.magalhaes@e-agua.com

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

AESABESP 40 Anos
Associação dos Engenheiros da Sabesp