

CONTROLE DE TENSÃO E COMPENSAÇÃO DE POTÊNCIA REATIVA EM REDES COM ELEVADA PENETRAÇÃO DE MICROGERAÇÃO



Walmir Freitas, Professor, Ph.D.

University of Campinas – UNICAMP

<http://www.dsee.fee.unicamp.br/~walmir>

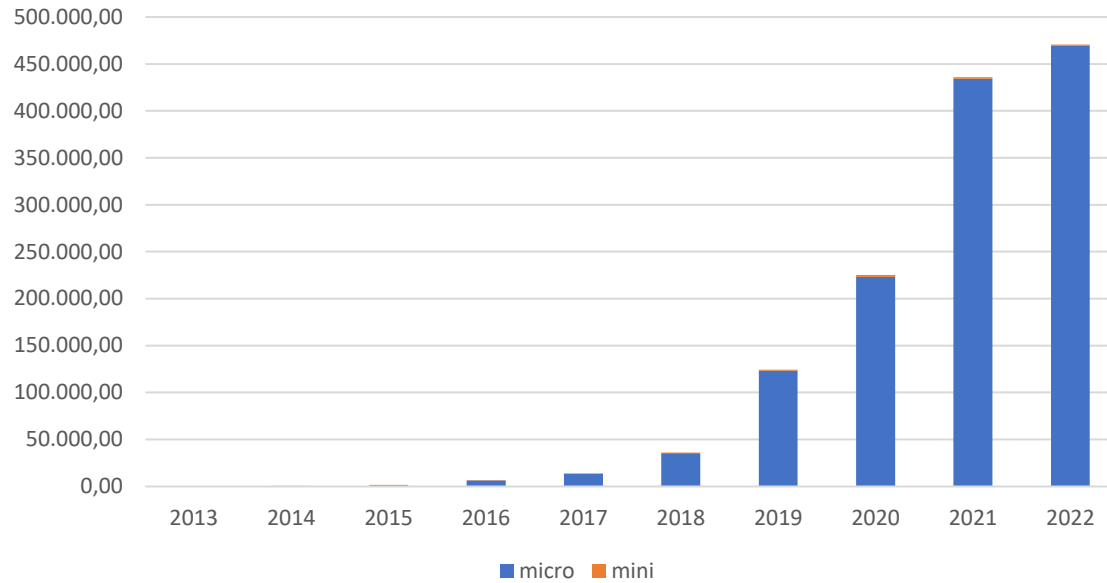
*The opinions expressed in this presentation and on the following slides are solely those of the **presenter** and not necessarily those of CPFL Energia, UNICAMP, and other partners. CPFL Energia and UNICAMP do not guarantee the accuracy or reliability of the information provided herein.*

Agenda

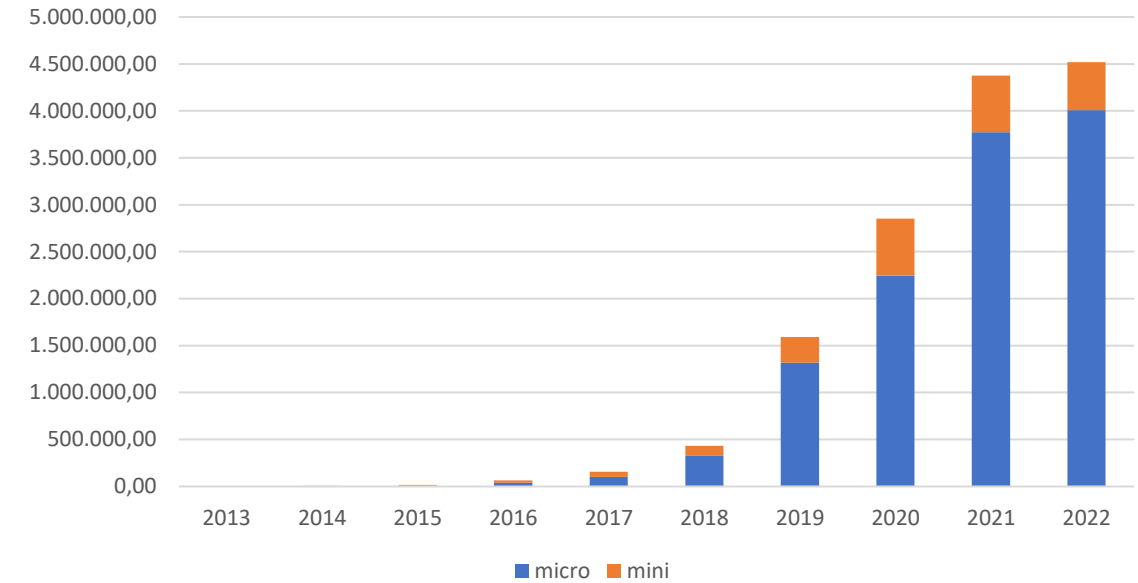
- ✓ Motivações
- ✓ **Metodologia proposta**: problema e concepção da solução
- ✓ **Desafios**:
 - Complexidade e capacidade de simulação
 - Disponibilidade e qualidade de dados
- ✓ Exemplo de aplicação
- ✓ Comentários

Motivações: crescimento da mini e microgeração distribuída

Unidades instaladas por ano



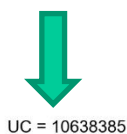
Potência instalada por ano (kW)



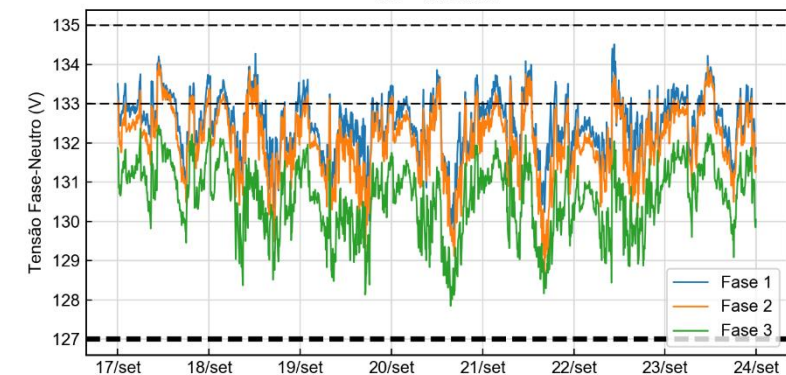
- ✓ Capacidade instalada: 14,0 GW
- ✓ Unidades instaladas: 1.314.331
- ✓ Micro: 99,9% solar
- ✓ Quantidade de novas instalações por minuto comercial:
 - 2021 = 3,6 unidades/minuto comercial – 1 a cada 17 segundos!
 - 2022 = 3,9 unidades/minuto comercial – 1 a cada 15 segundos!

Campanha de medição:

- ✓ **45 qualímetros** instalados em transformadores MT/BT e UCs – 10 segundos/30 dias
- ✓ **231 medidores CA/CC** instalados em geradores PVs – 1 min / 1 ano
- ✓ **231 medidores de faturamento eletrônico** instalados em UCs – 5-60 min – 1 ano
- ✓ **+ 2 bilhões de dados medidos**



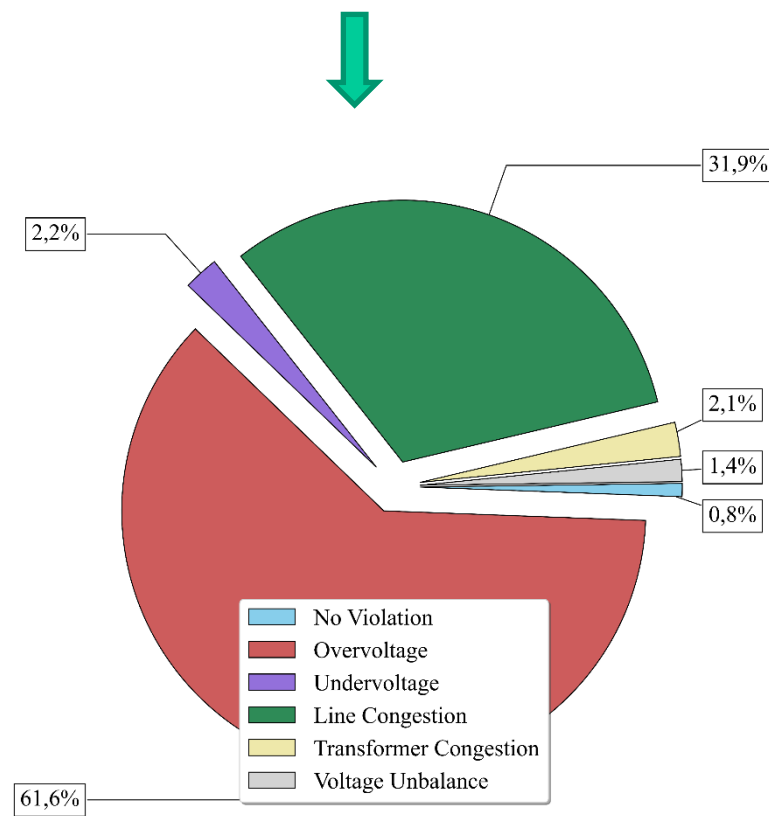
UC = 10638385



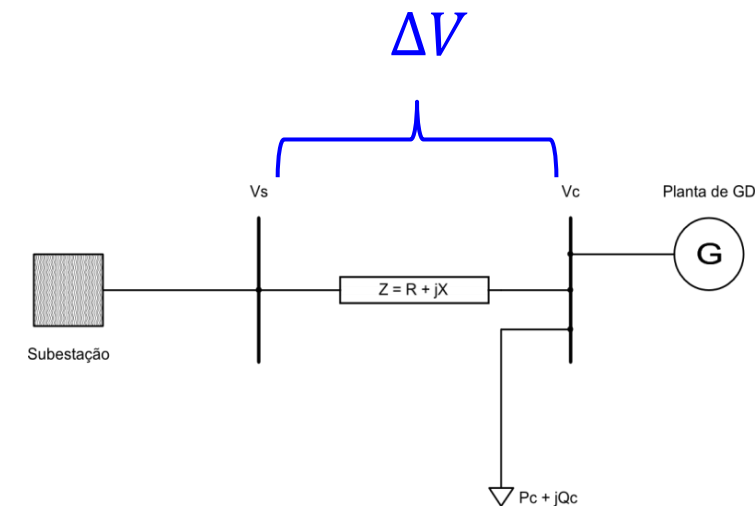
Tensão de atendimento precária: DRP > 20%

Simulação:

- ✓ +85.000 redes secundárias analisadas empregando **Monte Carlo**
- ✓ **+8 bilhões de cálculos de fluxo de potência**

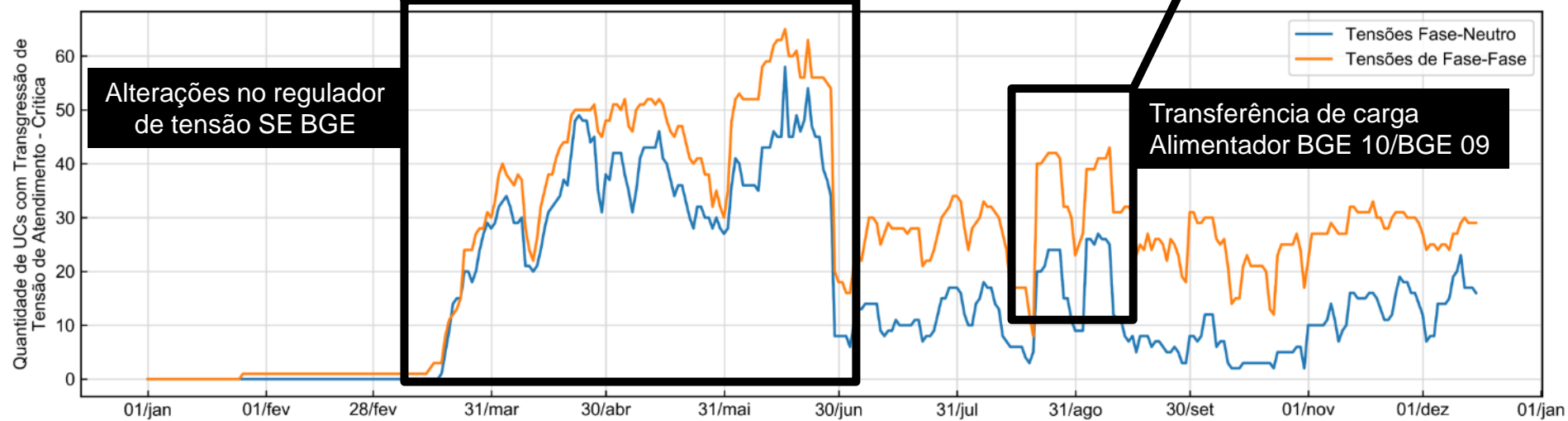
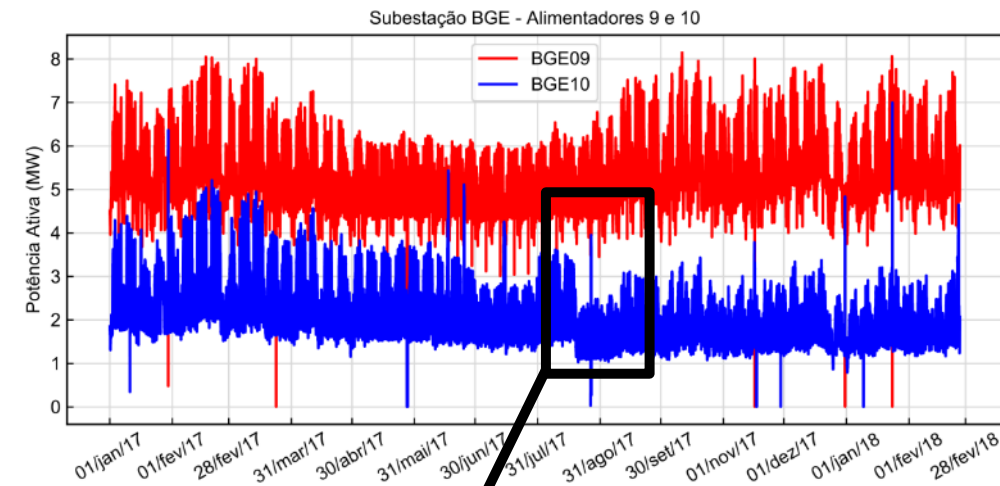
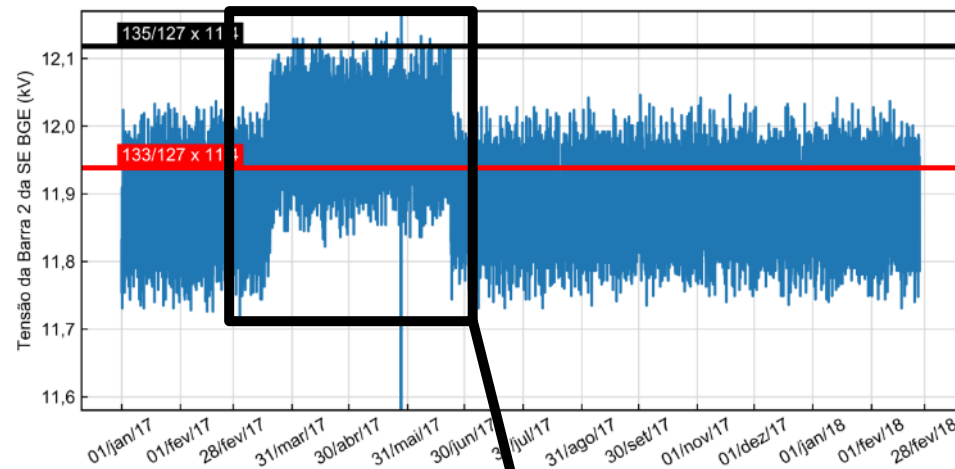


Análise analítica:



$$\Delta V \approx \frac{R(P_G - P_C) + X(Q_G - Q_C)}{V_C}$$

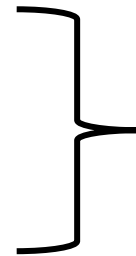
$$\Delta V_G \approx R P_G + X Q_G$$



Soluções pelo lado da rede

✓ Reforço de redes de BT:

- Recondutoramento
- Remanejamento de cargas/trecho
- Divisão de redes



Eficiente para problemas localizados

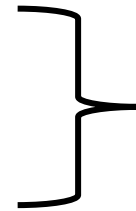
Ineficiente para problemas generalizados

*



✓ Readequação dos procedimentos de controle de tensão e compensação de potência reativa:

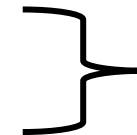
- Regulador de tensão de subestação e de linha
- Banco de capacitores chaveados
- Alteração permanente de tap dos transformadores MT/BT *



Ineficiente para problemas localizados

Eficiente para problemas generalizados

✓ Instalar controladores eletrônicos avançados de regulação de tensão e compensação de potência reativa (Custom Power)

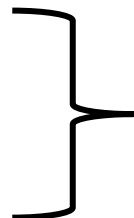


Necessidade de maturidade tecnológica

Soluções pelo lado do acessante de BT

✓ Inversores inteligentes

✓ Sistemas de armazenamento de energia



Dificuldades regulatórias: concessionária é responsável pela segurança pessoal/patrimonial e pela qualidade do produto e serviço

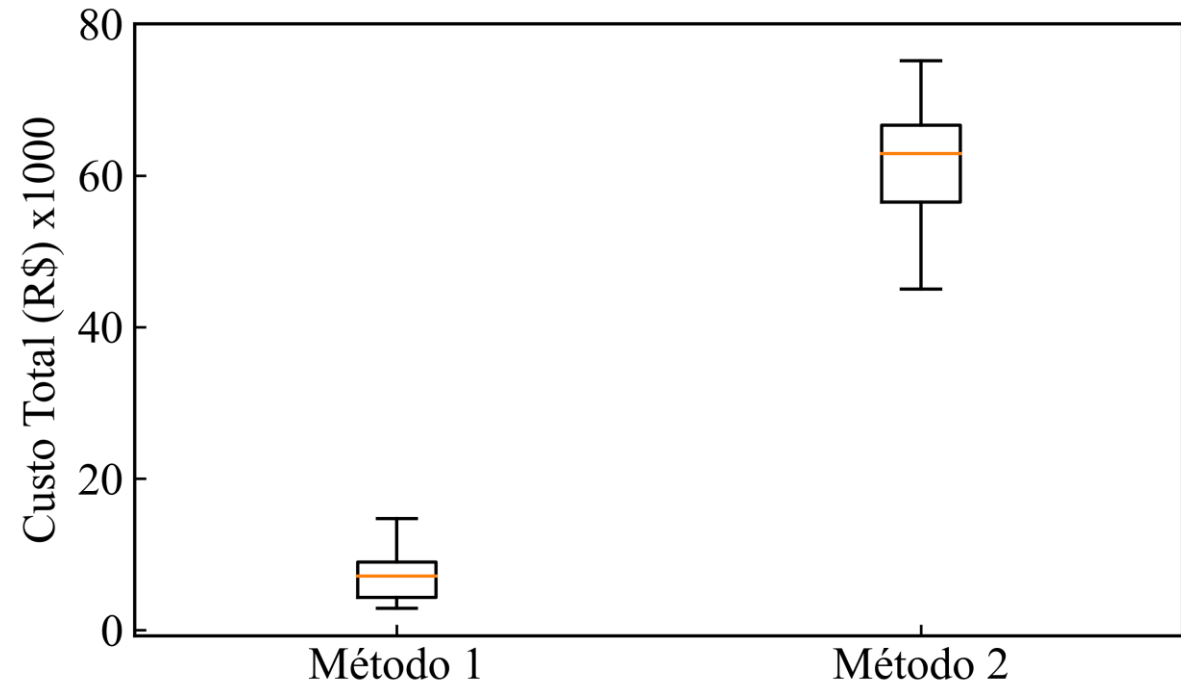
Baixa eficiência (inversores) – relação R/X em redes BT

Alto custo (baterias)

- Desenvolver e aplicar metodologia **técnico-econômica probabilística** para determinar os melhores procedimentos e práticas de engenharia para **regulação de tensão** e **compensação de potência reativa** em redes com elevada penetração de **microgeração fotovoltaica**

Custos considerados:

- ✓ transgressão de tensão de atendimento
- ✓ violação de fator de potência
- ✓ perdas técnicas
- ✓ manutenção de equipamentos (atuação de comutadores de reguladores e chaves de capacitores)



Comparação técnico-econômica probabilística entre dois procedimentos

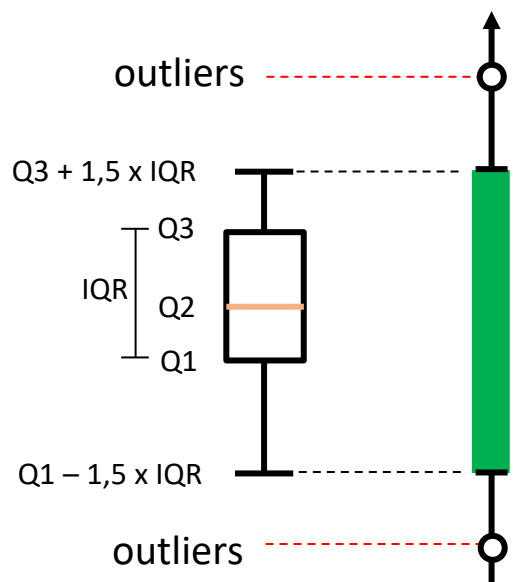
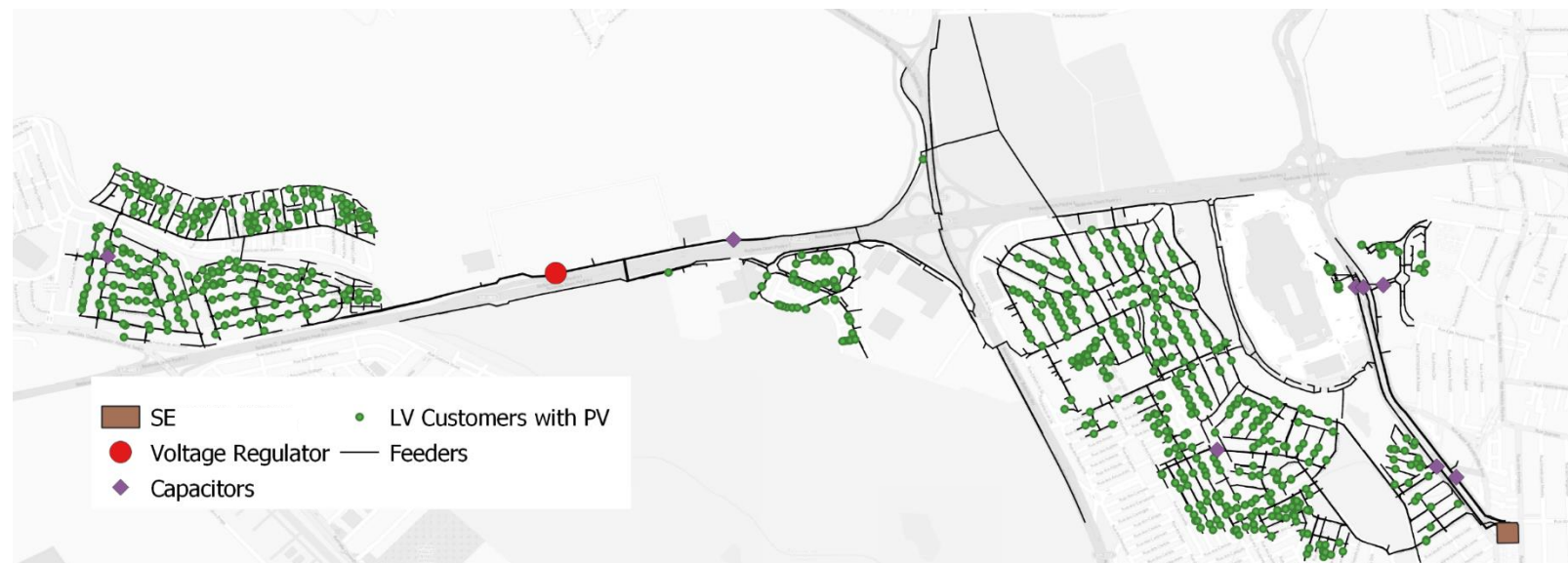
DESAFIOS:

COMPLEXIDADE E CAPACIDADE DE SIMULAÇÃO

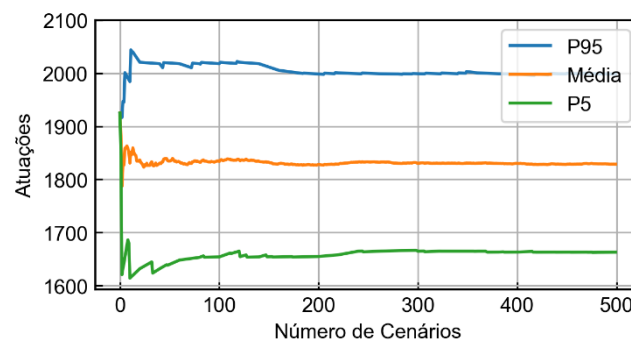
- Para analisar cenários com múltiplos **microgeradores** fotovoltaicos, é necessário responder as seguintes perguntas:
 - ✓ *Qual o percentual de consumidores com microgeradores FVs?*
 - ✓ *Quais consumidores possuem microgeradores FVs?*
 - ✓ *Qual o tipo de conexão do microgerador FV (monofásico, bifásico, trifásico)?*
 - ✓ *Qual a potência nominal do microgerador FV?*
 - ✓ *Qual a potência gerada pelo microgerador FV em certo instante do dia?*
- Como responder a todas essas perguntas e gerar resultados com determinado **grau de confiabilidade**?
- Empregar técnicas determinísticas pode gerar resultados demasiadamente **otimistas** ou **pessimistas**.

Solução: empregar métodos **probabilísticos** que permitam modelar aspectos **estocásticos** fornecendo grau de **risco/confiança (confiabilidade)** dos resultados para balizar a tomada de decisão.

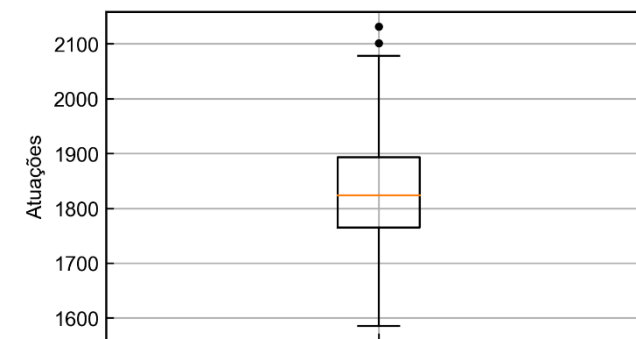
Monte Carlo é uma classe de métodos **estatísticos** que se baseiam em amostragens aleatórias massivas (**cenários**) para obter resultados numéricos repetindo sucessivas simulações um elevado número de vezes para calcular **probabilidades**



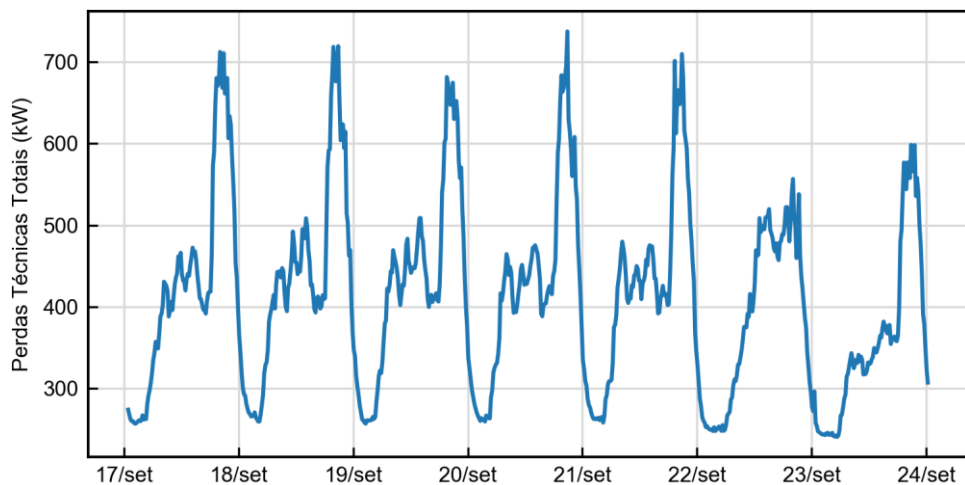
Box plot



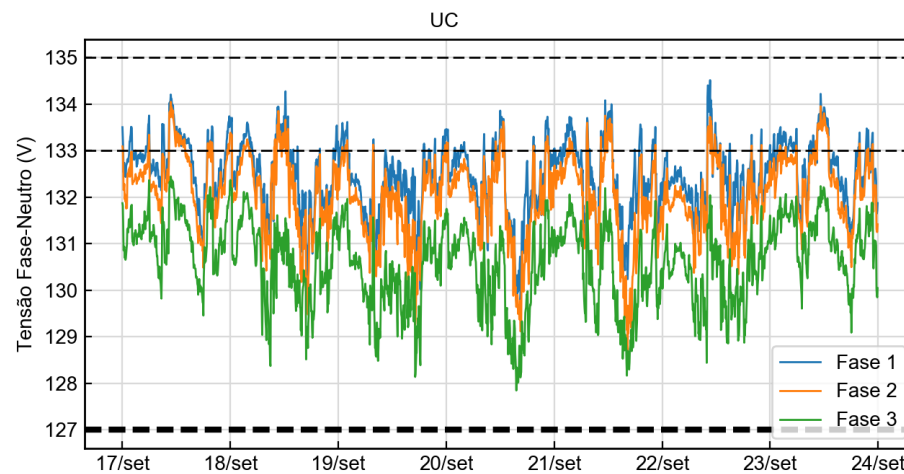
Probabilidade:
✓ 90% de chance de o número de atuações estar entre 1663 e 1998



Distribuição dos dados:
✓ Em 50% dos casos o número de atuações está entre 1765 e 1892

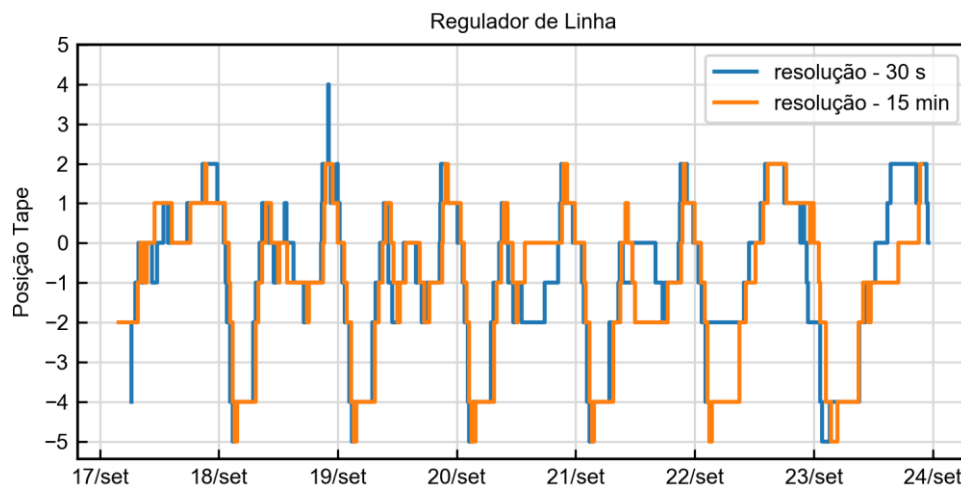


Resolução requerida: **horas**



Resolução requerida: **minutos**

Tensão de atendimento
DRC = 0
DRP ~ 20%

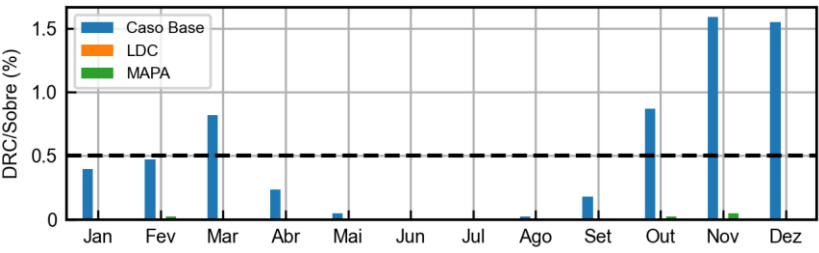
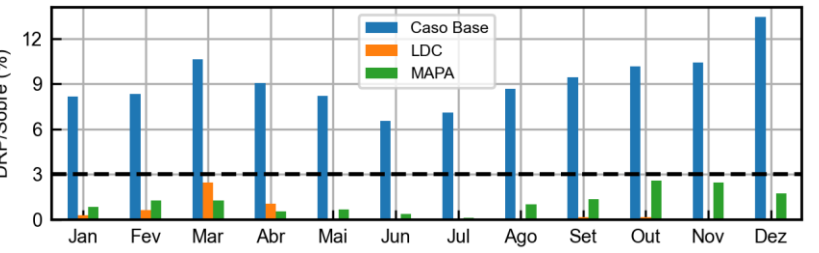


Resolução requerida: **segundos**

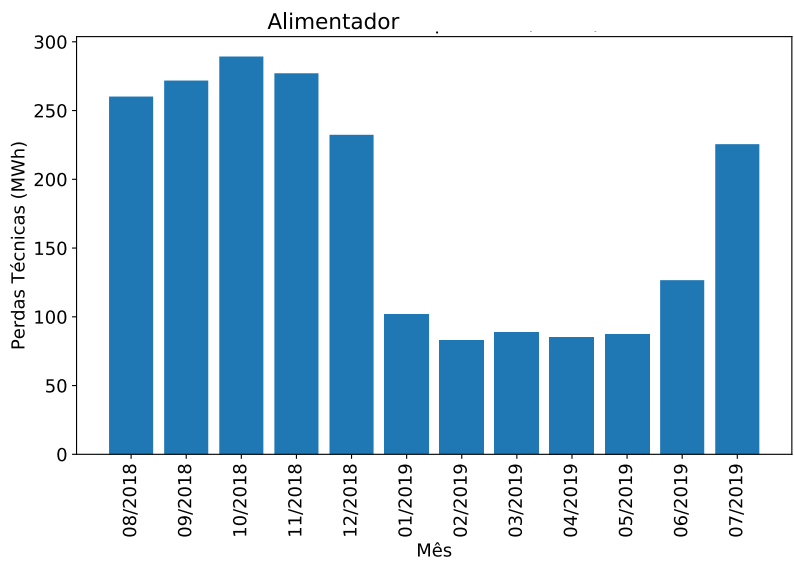
Delay regulador: **105 s**
Resolução 30 s – 151 atuações
Resolução 15 min – 132 atuações

DRP e DRC de sobretensão:

UC

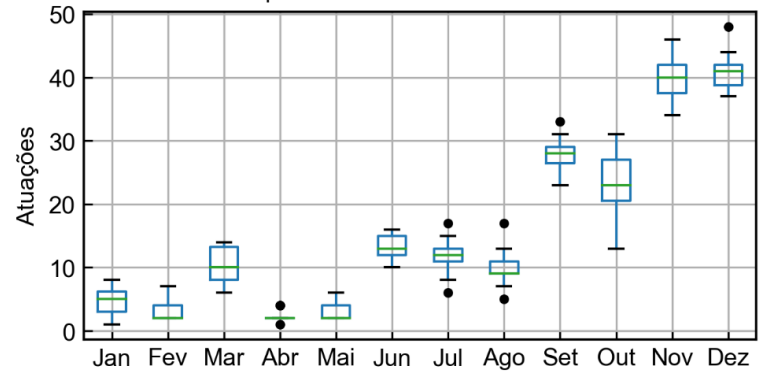


Perdas técnicas:

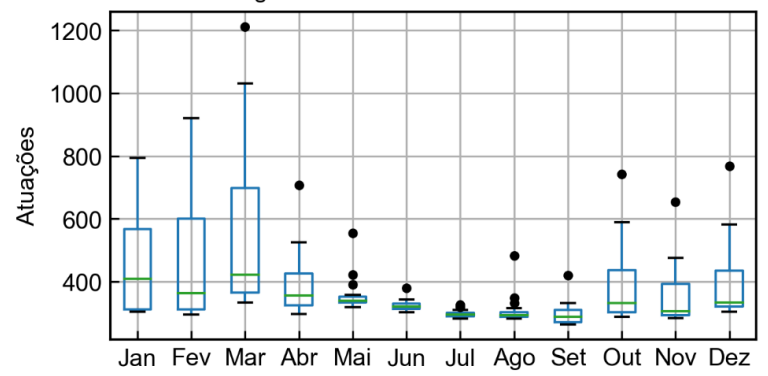


Número de atuações:

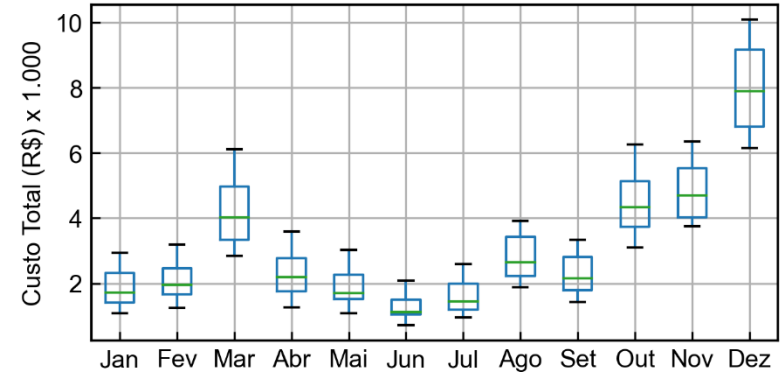
Capacitor



Regulador



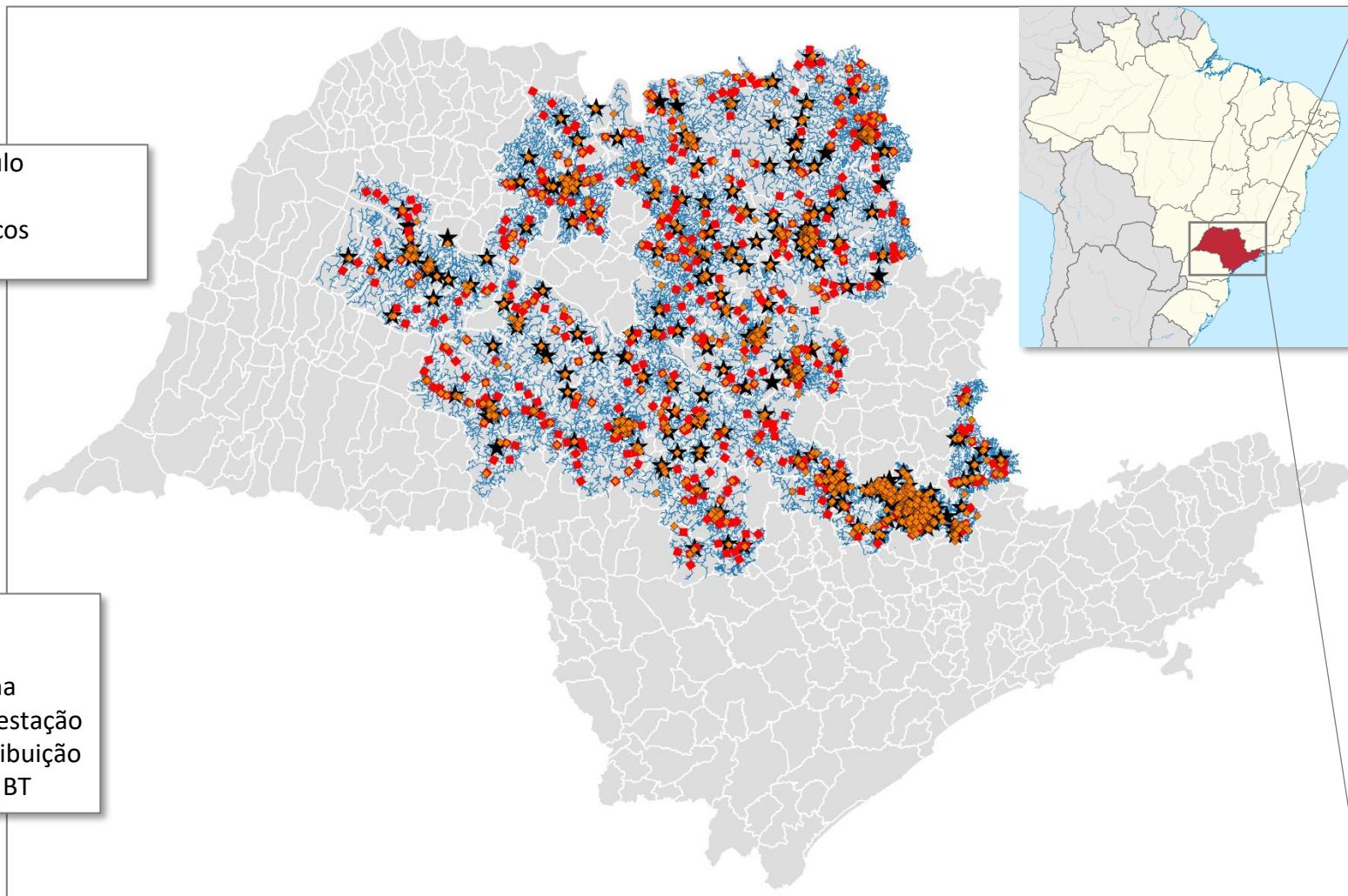
Custo total:



Isto é o que precisamos modelar o mais próximo da realidade o possível:

234 cidades no estado de São Paulo
244 subestações de distribuição
335 circuitos (subestações) elétricos
354 transformadores de potência

1.446 alimentadores primários
2.054 bancos de capacitores
482 reguladores de tensão na linha
331 OLTCs ou reguladores de subestação
237.572 transformadores de distribuição
4.641.904 consumidores de MT e BT



*Esta imagem corresponde à visualização do GIS da CPFL Paulista: redes de MT + BT juntas com 244 subestações, 2.054 bancos de capacitores e 482 reguladores de tensão na linha.

- ✓ Análises série-temporais de **longo prazo** (1 ano) com alta **resolução/granularidade** (segundos)
- ✓ Análises estocásticas-probabilísticas (**milhares de cenários**)
- ✓ Análise de todos conjuntos elétricos (**milhares de alimentadores**)

Projeção no início do projeto:

	<i>Etapa 2</i>	<i>Projeção</i>
N_{NTRS}	1	335
N_{PFV}	1	11
$N_{CENÁRIOS}$	1.000	1.000
$N_{WORKERS}$	100	100
\bar{t}_{SIM}	45 min	30 x 52 x 45 min
<i>Passo</i>	30 seg	1 seg
<i>Horizonte</i>	7 dias	365 dias
T_{TOTAL}	~ 7,5 horas	~ 5.000 anos

Soluções:

Desenvolvimentos dos **modelos, automação, e motor de cálculo (UNICAMP)**: ganho **+100 vezes**

Desenvolvimentos de **técnicas de processamento paralelo (UNICAMP)**: ganho **+250 vezes**

Desafios:

- Número de circuitos
- Dimensão dos circuitos
- Alta resolução/granularidade (série-temporal)
- Horizonte temporal
- Número de cenários (análise de risco)



Esforços:

- Redução do número de nós dos circuitos
- Granularidade/resolução adaptativa (passo adaptativo)
- Modelagem das cargas (P_{cte} , I_{cte} ou Z_{cte})
- Melhorias no processamento das curvas de carga
- Aplicação de técnicas de agregação de curva de carga
- Melhorias na máquina de cálculo do OpenDSS

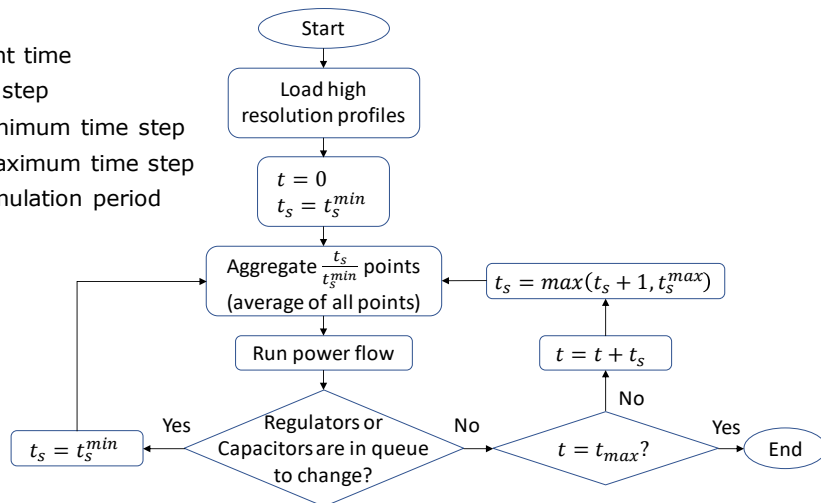


Granularidade/resolução adaptativa (passo adaptativo - fluxo de carga série-temporal)

Ideia: Reduzir o número de simulações variando dinamicamente (de forma adaptativa) o tamanho do passo do fluxo de carga série-temporal (granularidade/resolução) durante pequenas alterações das variáveis de interesse.

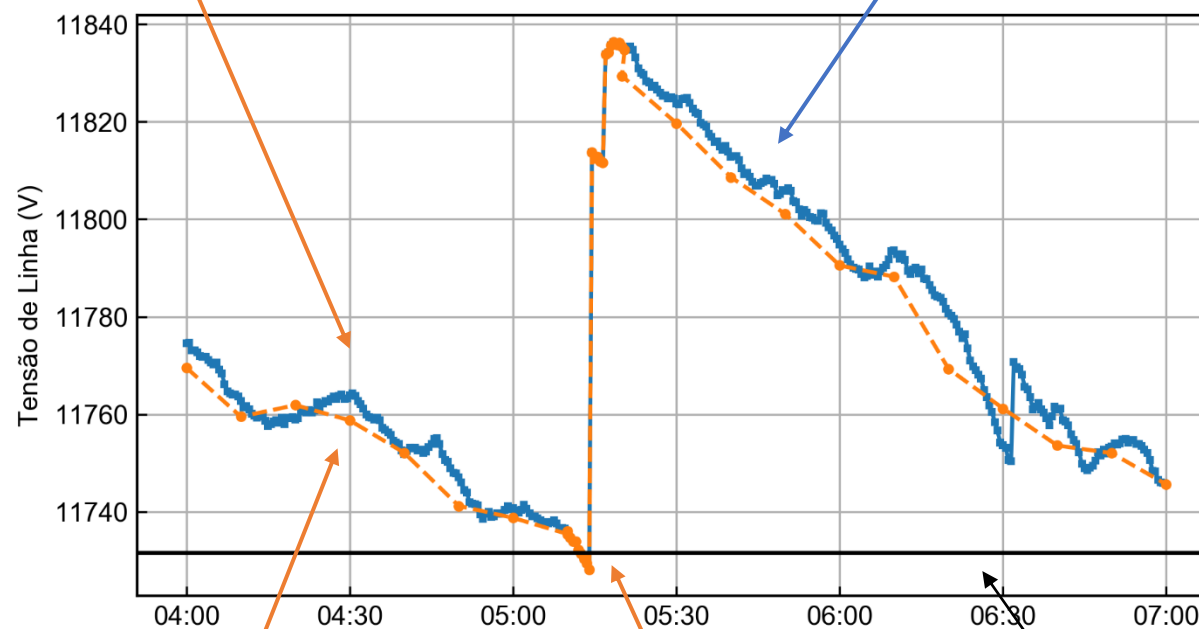
Variable Step Time-Series Simulation

t : current time
 t_s : time step
 t_s^{min} : minimum time step
 t_s^{max} : maximum time step
 t_{max} : simulation period



Tensão de linha com passo adaptativo

Tensão de linha com passo fixo (30 segundos)



Passo de 10 min

Passo de 30 segundos

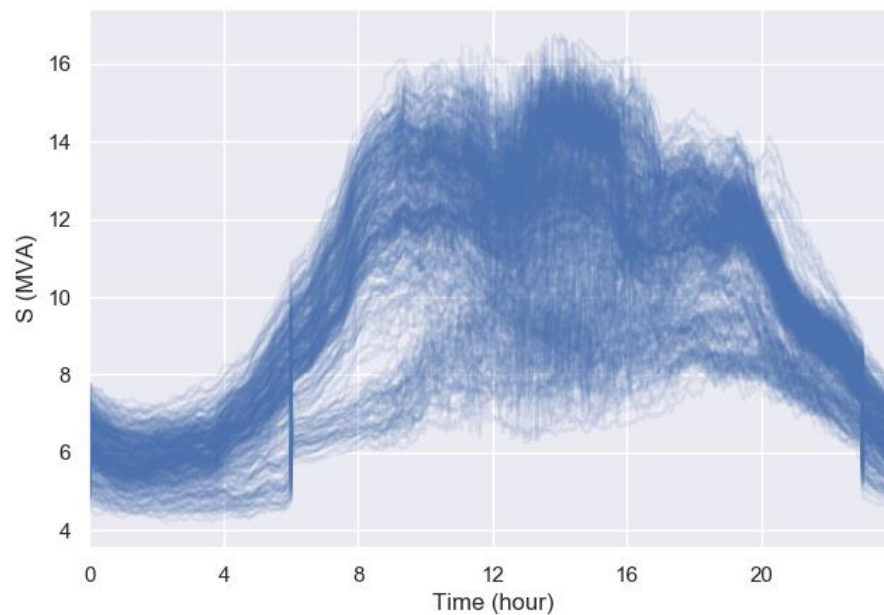
Limite inferior da banda do regulador

Clusterização das curvas de carga

Ideia: durante o ano, diversos dias são similares em termos de curva de carga.

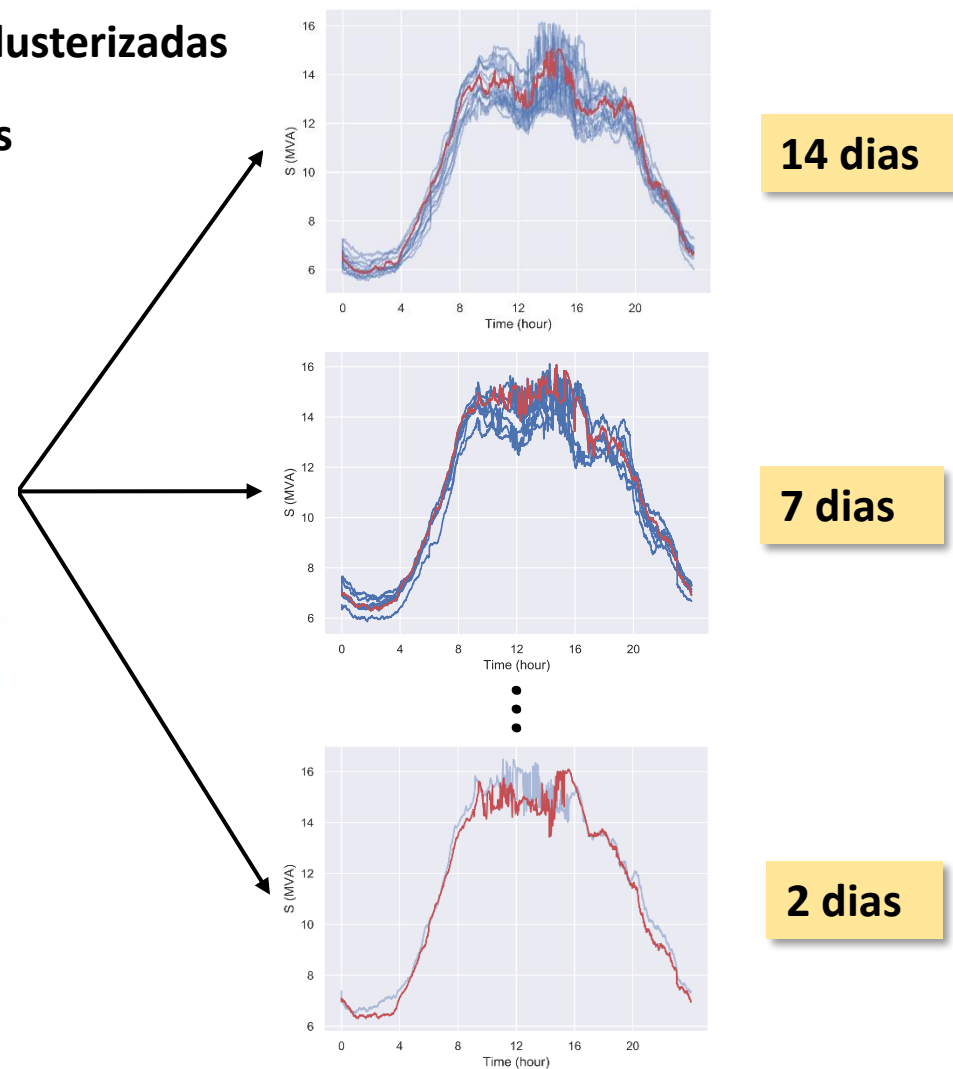
Tais dias podem ser clusterizados, ou seja, representados por uma curva de carga, reduzindo a quantidade de simulações

■ Curvas de carga representativas clusterizadas
■ Curvas de carga dos consumidores



365 dias

99 clusters representando 365 dias.



Melhorias no motor de cálculo

Melhorias no processo de cálculo de fluxo de carga (solução do sistema $I = Y \cdot V$)

- ✓ Inicialmente, **19% do tempo gasto na função Solution.Solve() do OpenDSS** era gasto de fato solucionando-se o sistema de equações $I = Y \cdot V$. **Os outros 81% eram gastos em outras tarefas como segue:**
 - **Tarefa:** Elemento EnergyMeter do OpenDSS consumia 38% do tempo de solução (para atualizar as perdas nos circuito)
 - **Solução:** Implementação de um novo EnergyMeter com performance 50% superior a do original
 - **Tarefa:** Cálculo das atualizações do vetor de injeções de corrente (I) consumia 23% do tempo de solução
 - **Solução:** Re-implementação dessa rotina em linguagem de melhor desempenho e mudanças no método para cálculo apenas dos elementos que foram modificados
 - **Tarefa:** Cerca de 20% do tempo de solução era gasto verificando-se o status (aberto/fechado) dos terminais dos elementos
 - **Solução:** Modificação para realizar este procedimento apenas quando houver alteração de estado. Como esse tipo de operação não ocorre nos estudos do projeto foi possível praticamente eliminar esse tempo

Processamento (carregamento) dos perfis de carga

As diversas curvas de carga derivadas do centro de telemedição, fornecidas pelo simulador ou típicas com alta resolução possuem uma elevadíssima quantidade de informação para ser carregada e processada pelo OpenDSS, demandando uma elevada quantidade de memória e tempo computacional.

Tais curvas podem ser fornecidas para simulação com o OpenDSS via:

- Arquivos de texto (.csv, .dss) via Interface COM
- Arquivos HDF (*Hierarchical Data Format*¹) via Interface COM
- Arquivos HDF via Interface C-API²

¹ https://en.wikipedia.org/wiki/Hierarchical_Data_Format

² C-API: <https://dss-extensions.org/>: interface desenvolvida e mantida pela equipe da UNICAMP



OpenDSS oficial do EPRI.

O repositório SVN é rastreado e modificações importantes são portadas para DSS Extensions.

Grupo de projetos open-source, formado para atender as necessidades da comunidade de usuários.

Motor do OpenDSS com correções extras, diversas modificações e extensões (APIs e funções).
Exposto através de interface C plana, facilmente empregada por diversas linguagens.

Interfaces específicas para linguagens variadas. Expõem o motor do OpenDSS e diversas das extensões de APIs e de funcionalidade.

Principais desenvolvedores: [Paulo Meira \(UNICAMP\)](#), Dheepak Krishnamurthy (NREL)

Benchmark

- 7 dias de simulação com resolução de 30 segundos (20.160 *snapshots*)
- Penetração FV = 30%, cenário 0

Modelo de Carga	Redução do Circuito	Motor / Interface	Passo Variável	Cluster	Perdas Totais (%)	NRP – Subtensão (total)	NRC – Subtensão (total)	NRP – Sobretensão (total)	NRC – Sobretensão (total)	Fator de Potência SE (média)	Operação Capacitores	Operação Reguladores	Tempo (s)
PRODIST	Não	COM	Não	Não	2,62	6139	0	4159	618	0,9835	39	97	6148
PRODIST	Não	C-API	Não	Não	2,62	6139	0	4159	618	0,9835	39	97	438
P(I) e Q(Z)	Não	C-API	Não	Não	2,62	5748	0	4145	618	0,9835	39	97	427
P(I) e Q(Z)	Sim	C-API	Não	Não	2,62	5748	0	4143	615	0,9835	39	97	425
P(I) e Q(Z)	Sim	C-API	Não	Sim	2,64	5490	0	4025	674	0,9765	33	93	252
P(I) e Q(Z)	Sim	C-API	Sim	Não	2,62	5896	0	4413	637	0,9861	39	132	173
P(I) e Q(Z)	Sim	C-API	Sim	Sim	2,64	6043	0	4231	810	0,9795	33	120	72

Ganho de ~85 vezes

- ✓ Implementação de **técnicas avançadas de fatoração da matriz Y** (e.g., fatoração simbólica, refatoração parcial, refatoração inteligente etc.) → **+100 vezes**

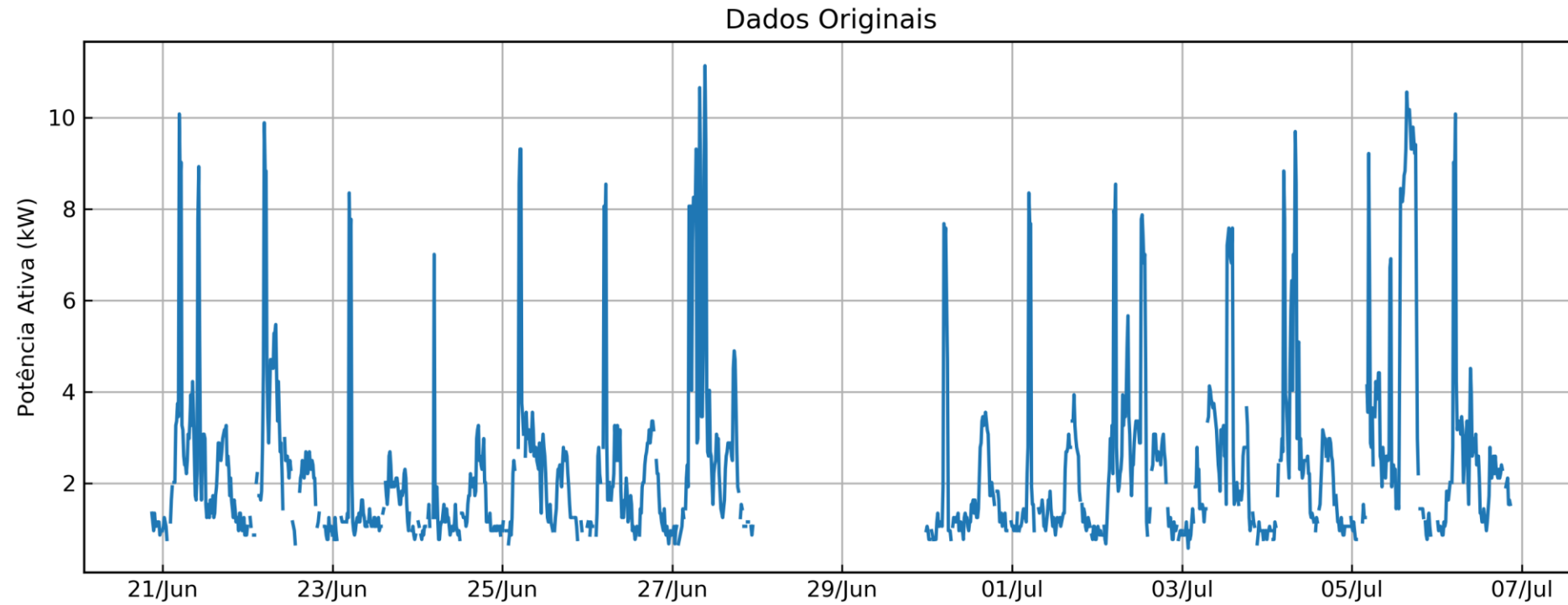
DESAFIOS:

DISPONIBILIDADE E QUALIDADE DOS DADOS

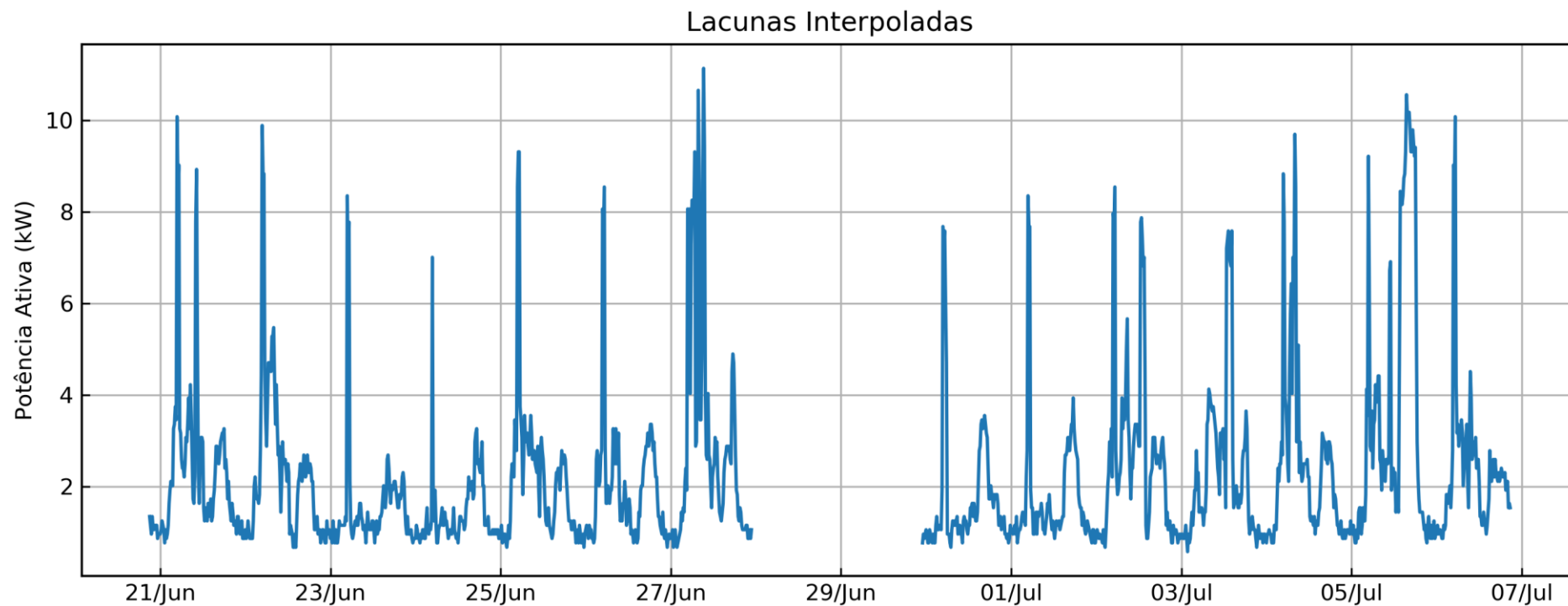
- Modelagem dos circuitos elétricos no OpenDSS (topologia, conectividade, dados de condutores):
 - ✓ Base de dados corporativa (completa)
 - ✓ GIS
 - ✓ BDGD
 - ✓ Metodologia de conversão, correção e preenchimento de dados faltantes (UNICAMP)
- Ajustes e tipos de controle dos reguladores de tensão da subestação, reguladores de linha e bancos de capacitores controláveis:
 - ✓ Base de dados corporativa (completa)
 - ✓ GIS
 - ✓ Informações da Gestão de Ativos (GA)
 - ✓ Normas e padrões
 - ✓ Metodologia de correção e preenchimento de dados faltantes (UNICAMP)
- Levantamento dos consumidores do grupo B candidatos a adotarem a microgeração solar fotovoltaica (metodologia desenvolvida pela UNICAMP)

- Curvas de demanda/geração dos consumidores:
 - ✓ Grupo A:
 - Medições
 - Resolução: 15 minutos
 - Metodologia de preenchimento de dados faltantes (UNICAMP)
 - ✓ Grupo B1:
 - BDGD
 - Campanha de medição e poses e hábitos
 - Simulador de curvas (UNICAMP)
 - Resolução: 1 segundo
 - ✓ Demais consumidores tipo B:
 - Curvas típicas da campanha de medição
 - Resolução: 15 minutos
 - ✓ Microgeração Fotovoltaica (FV):
 - Medições do projeto Telhados Solares (UNICAMP)
 - Resolução: 1 minuto

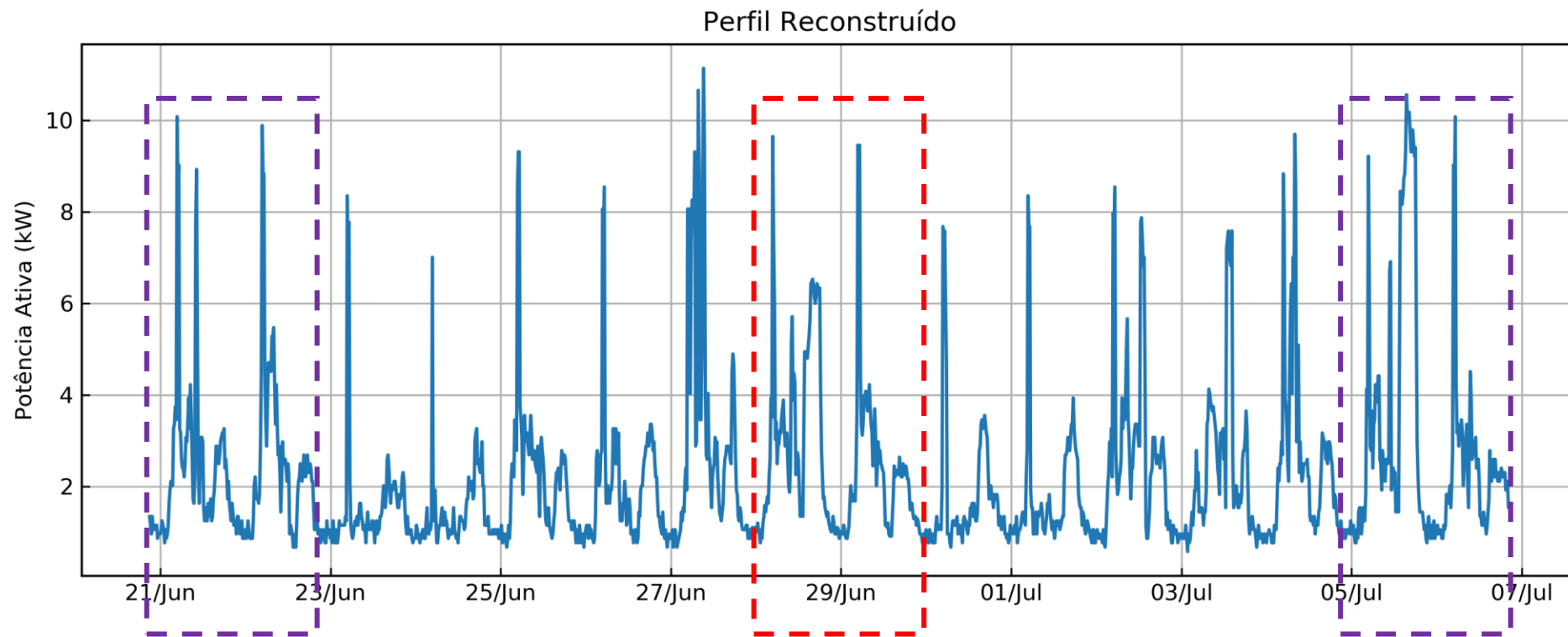
Problema: existências de lacunas em razão de perda de dados



Solução 1: pequenas lacunas: dados são interpolados linearmente entre os pontos que estão faltando (lacuna máxima de 2 horas)



Solução 2: grandes lacunas: a média entre os dados dos 7 dias anteriores e dos 7 dias posteriores, se ambos existirem, é empregada

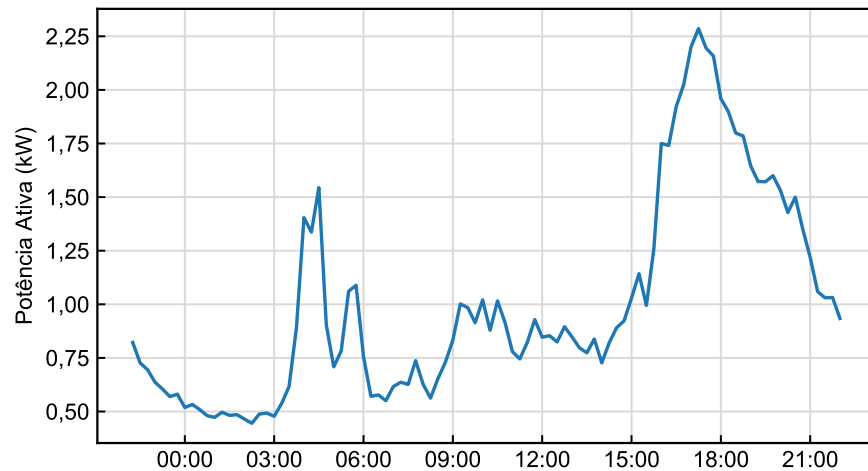


Dificuldades: maior resolução (granularidade) e diversidade

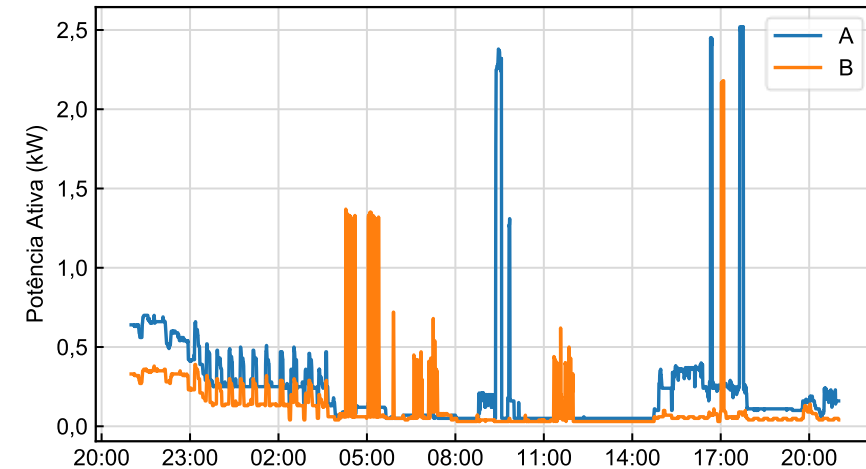
Solução: Desenvolver simulador probabilístico de curvas de carga

Principais informações :

1. Probabilidade da residência ter o eletrodoméstico
2. Probabilidade de uso do eletrodoméstico pelos residentes
3. Modelagem de alta resolução do consumo dos eletrodomésticos



(a) Curva de carga derivada da campanha de medição:
Baixa resolução: 15 minutos
Baixa diversidade: 10 padrões de 3 dias
Carga equilibrada entre as fases

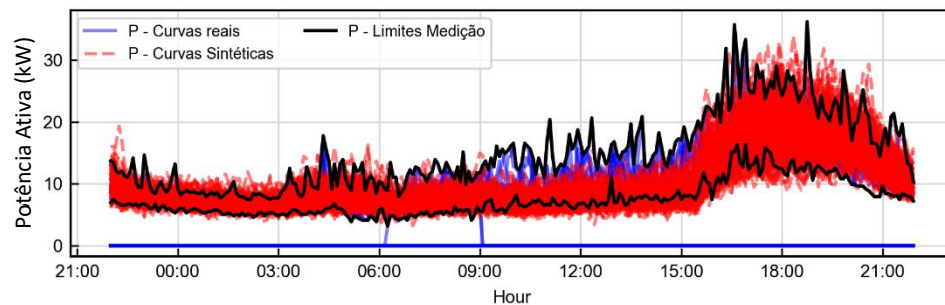


(b) Curva de carga obtida via simulador:
Alta resolução: **1 segundo**
Alta diversidade: **1500+ padrões de 365 dias**
Carga desequilibrada entre as fases

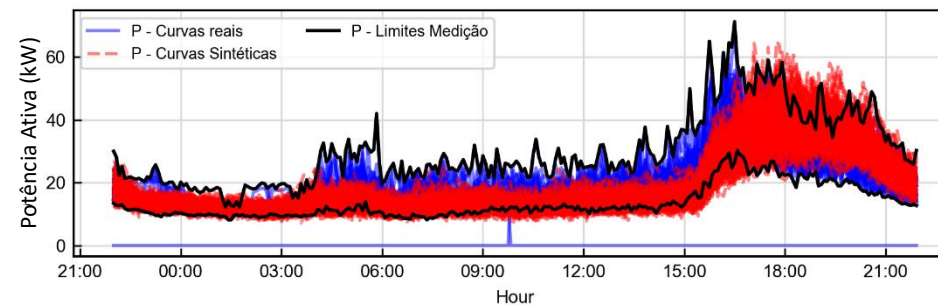
Perfis sintéticos foram comparados com medições reais (Campanha RTP – 2016 – 5 min de resolução)

13 transformadores com 100% de UCs B1 foram selecionados para validação

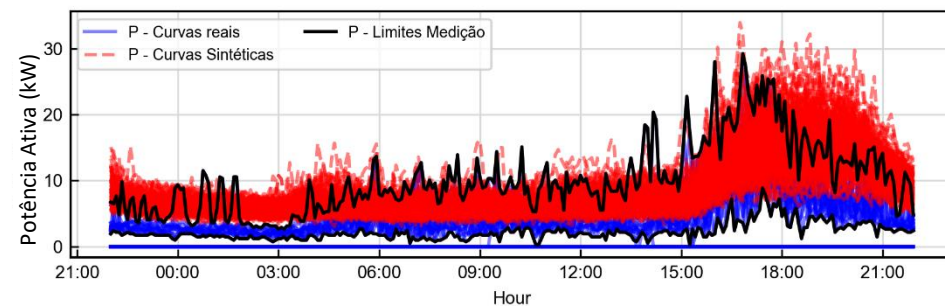
Transformador 1



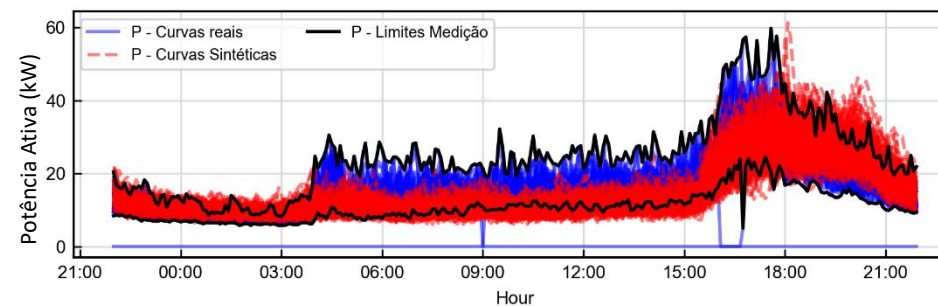
Transformador 2



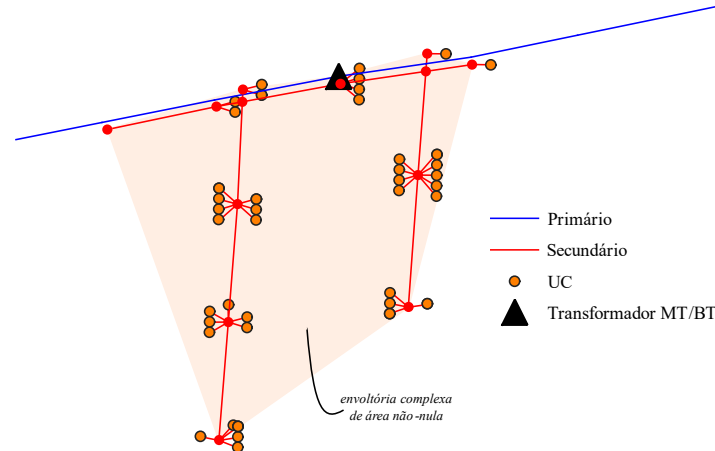
Transformador 3



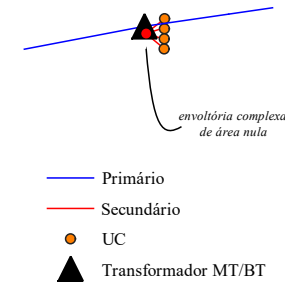
Transformador 4



Os cenários de adoção consistem em mapear, com base nos dados de consumidores da distribuidora, aqueles que possuem características compatíveis com a instalação de microgeradores fotovoltaicos e determinar potência nominal de tais sistemas hipotéticos mais propensos a serem instalados.



(a)

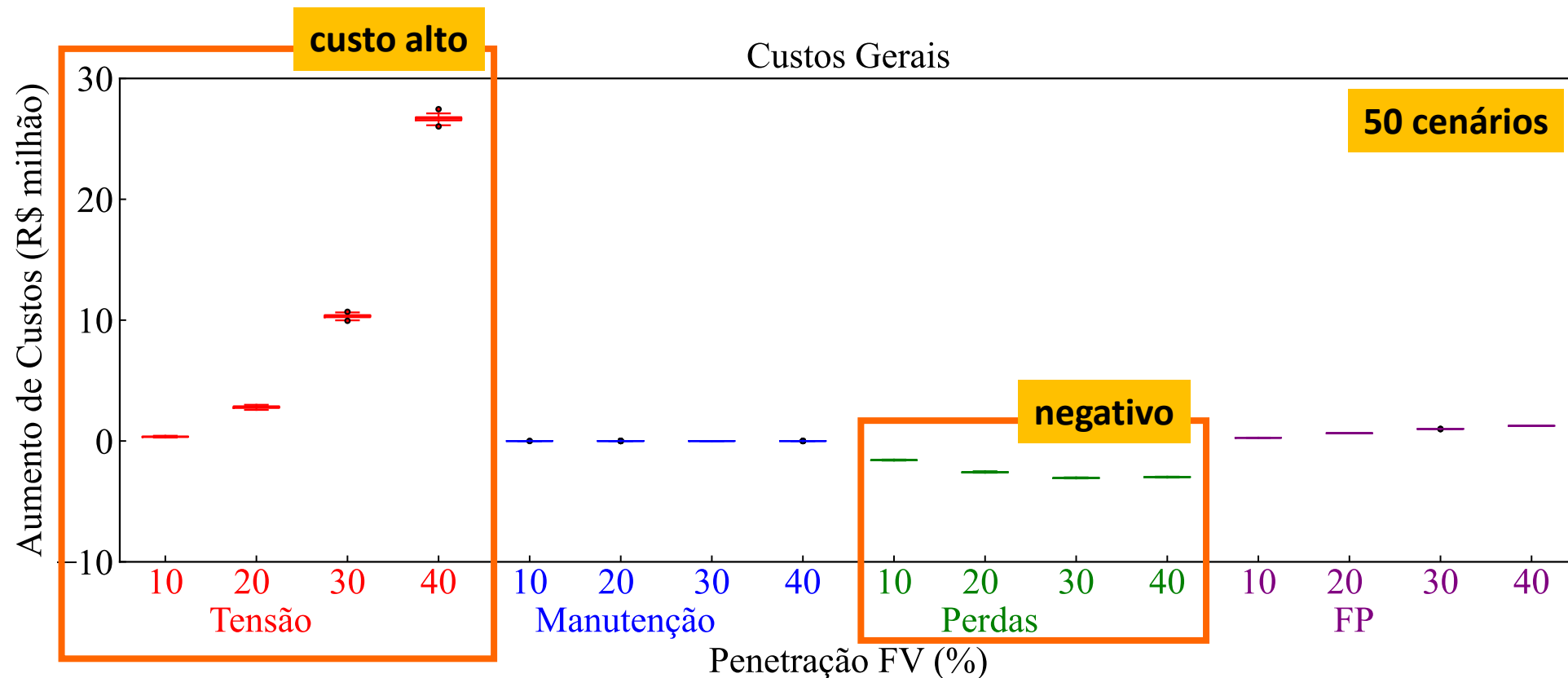


(b)

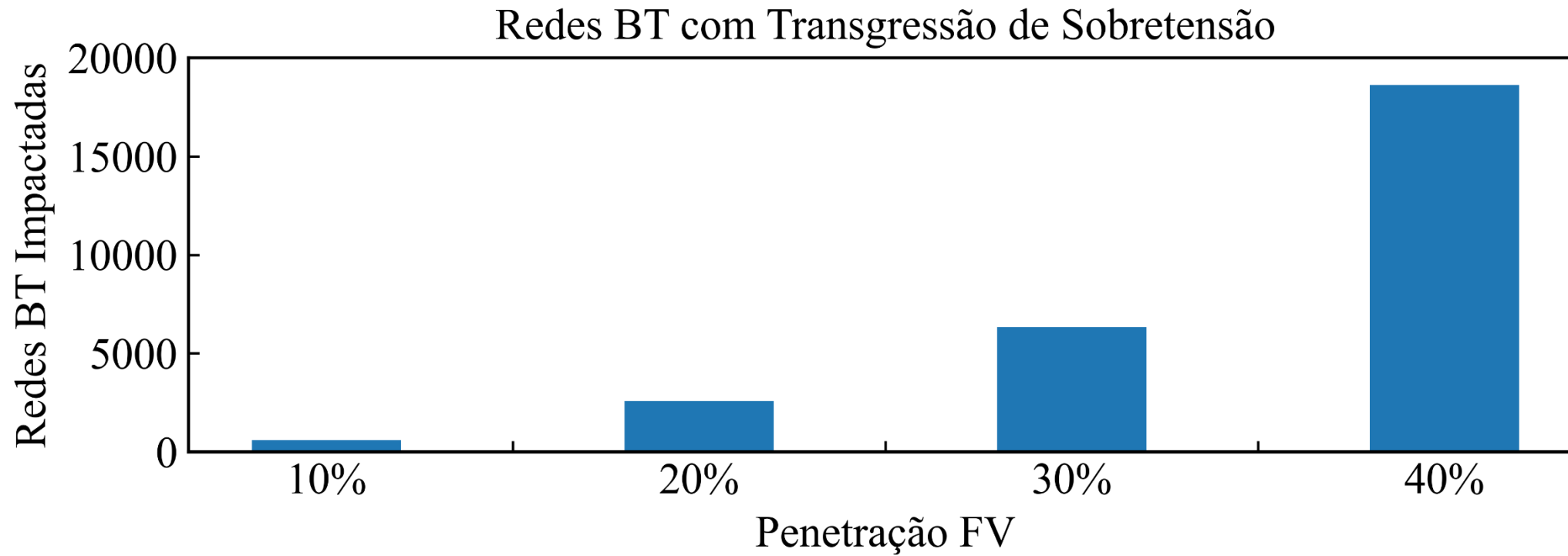
Exemplo: Critério de área zero: redes secundárias com envoltória complexa de área (a) não-nula e (b) nula.

EXEMPLO DE RESULTADOS:

- ✓ O custo de compensação por transgressão de tensão predomina sobre o custo total causado pela penetração de FV
- ✓ O custo é mais expressivo para penetrações de FV de 30% e 40%, apresentando valores de **R\$ 12 milhões** e **R\$ 29 milhões**, respectivamente

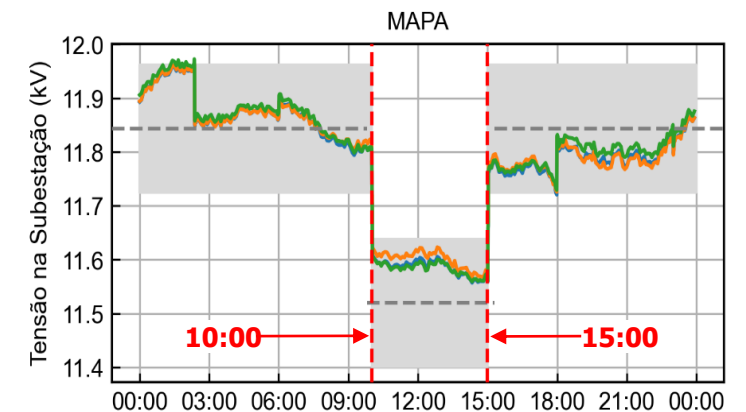
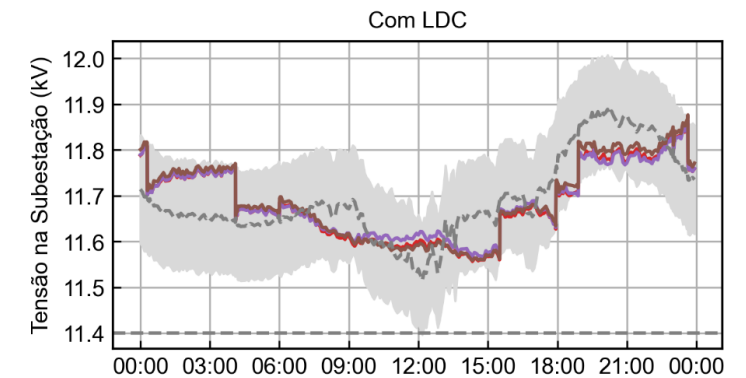
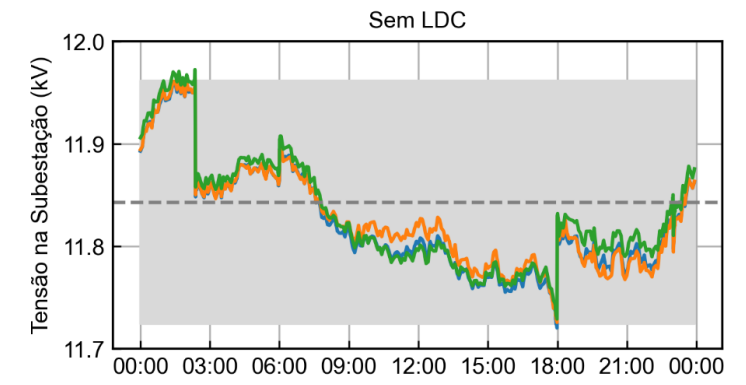


- ✓ Problema de característica **generalizada** com elevadíssima penetração de microgeração

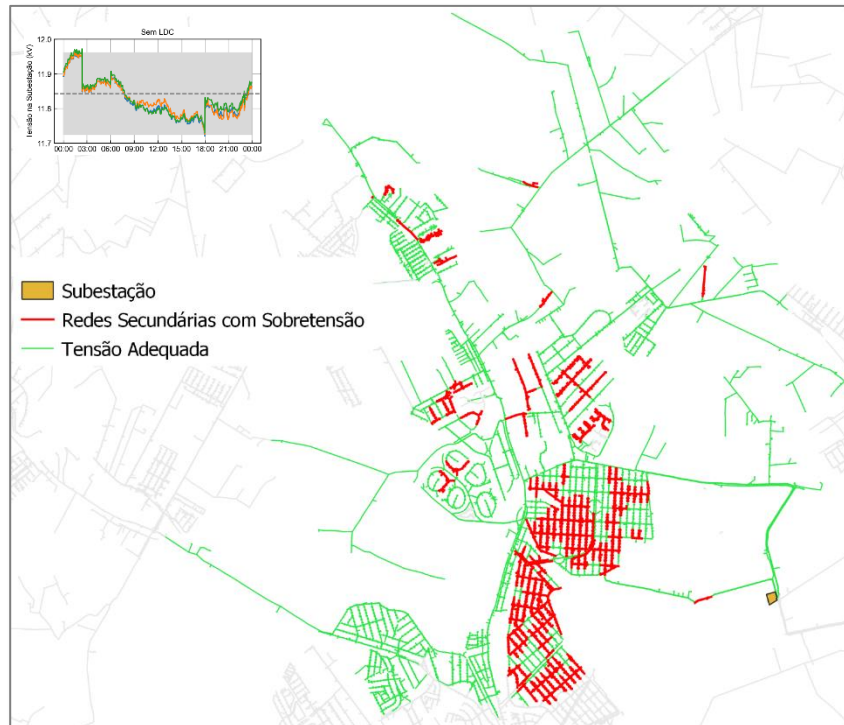


Comparação dos custos considerando as seguintes alternativas:

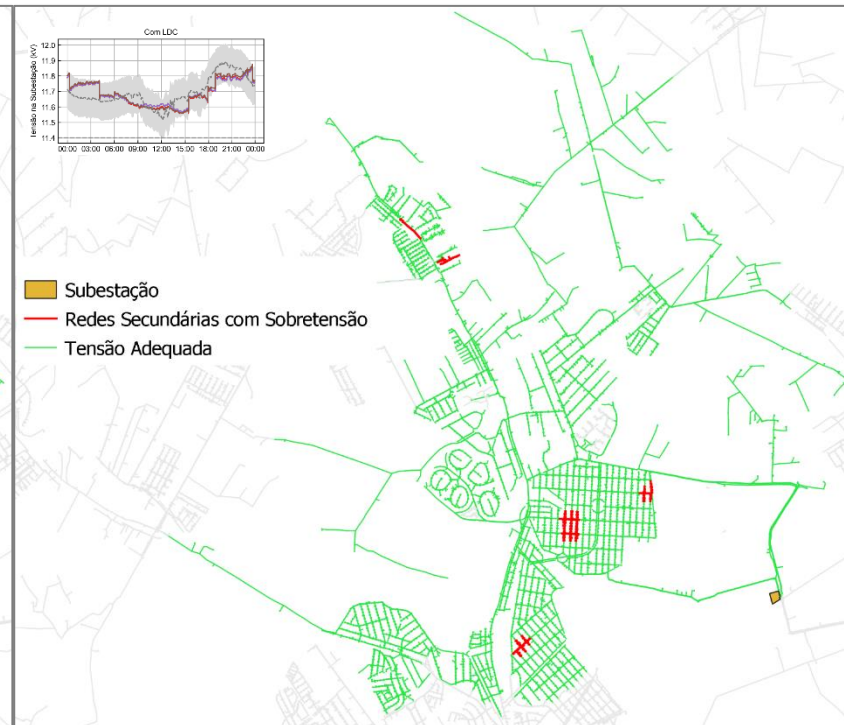
- ✓ Estratégia **padrão** (tensão de referência constante $\sim 1,035$ pu)
- ✓ Variação (**redução**) nos ajustes de referências de reguladores de tensão de subestação e de linha
- ✓ Uso de *Line Drop Compensation* (**LDC**) em reguladores de tensão
- ✓ Ajuste horosazonal da referência de tensão de reguladores de subestação e de linha (**MAPA**)



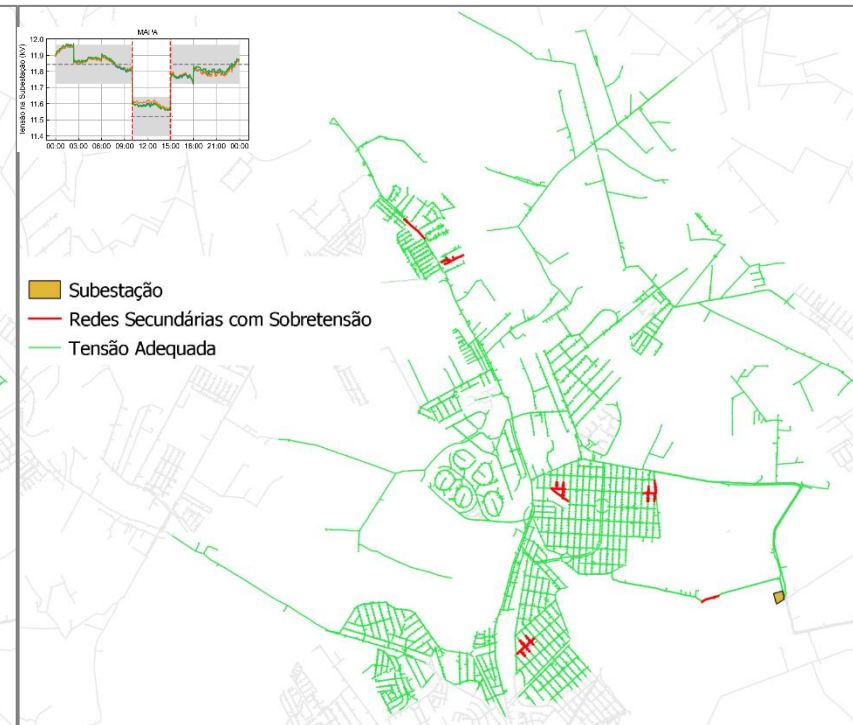
Caso Base, 1.040 UCs, 83 Redes BT



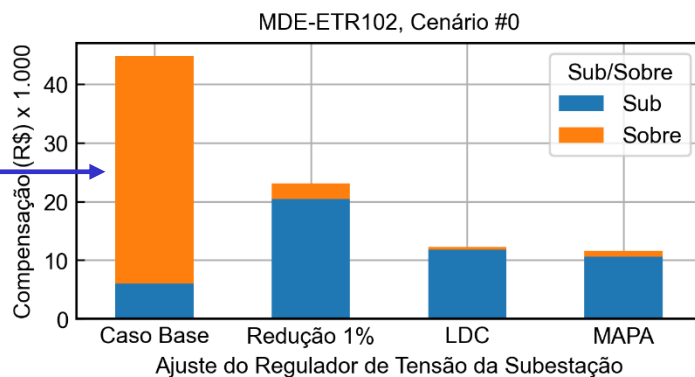
LDC, 56 UCs, 6 Redes BT



MAPA, 58 UCs, 6 Redes BT



Compensação de sobretensão decorrente da inserção FV SEM mudanças na filosofia/ajuste do regulador de tensão



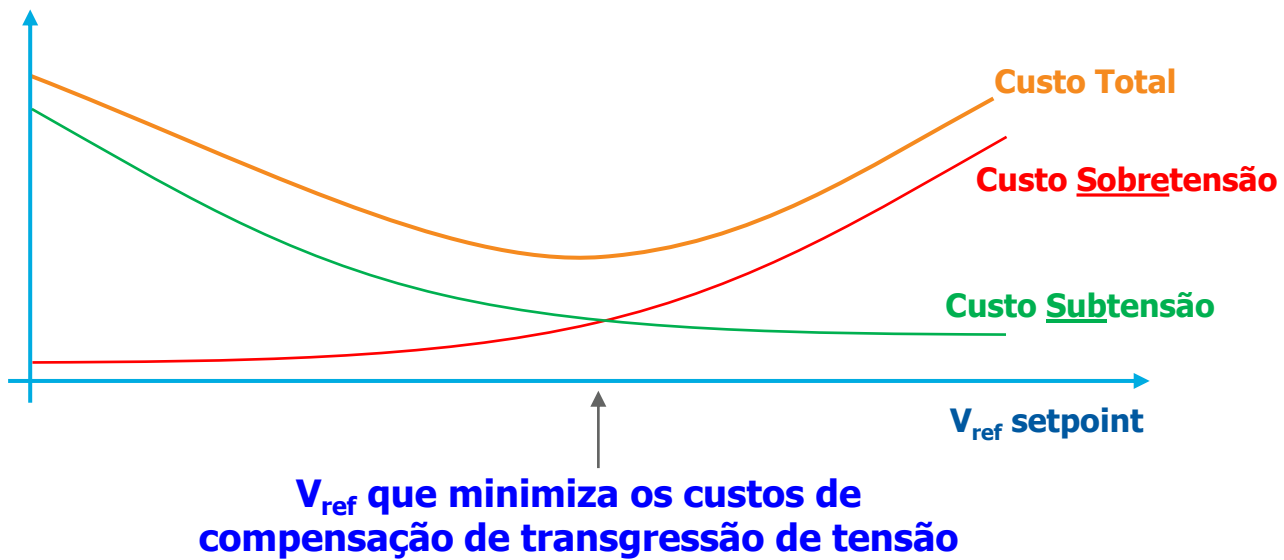
Tomada de decisão:

Custo maior e disperso
(com sobretensão dominante: estratégia atual)



Custo menor e concentrado
(com subtensão dominante: estratégia alternativa)

Custo de Compensação de Transgressão de Tensão (R\$)



Comentários:

- ✓ Pode ser formulado como um problema de otimização

Problema:

- ✓ É impraticável do ponto de vista de operacionalização

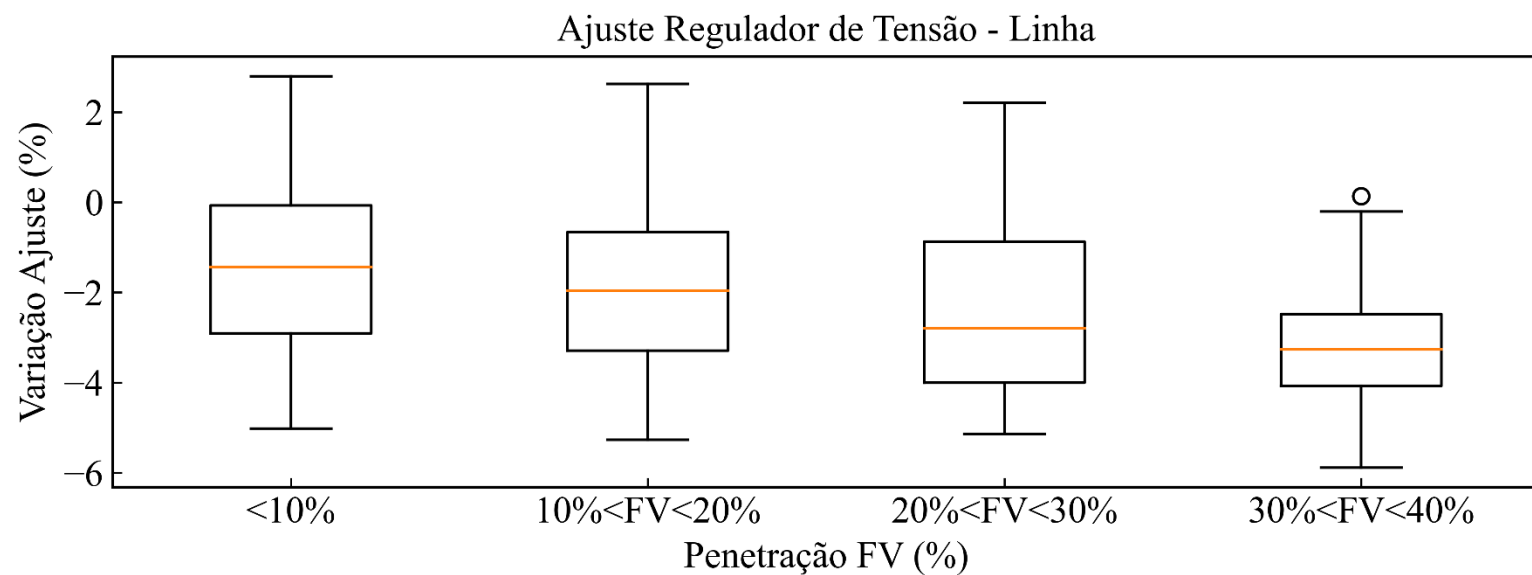
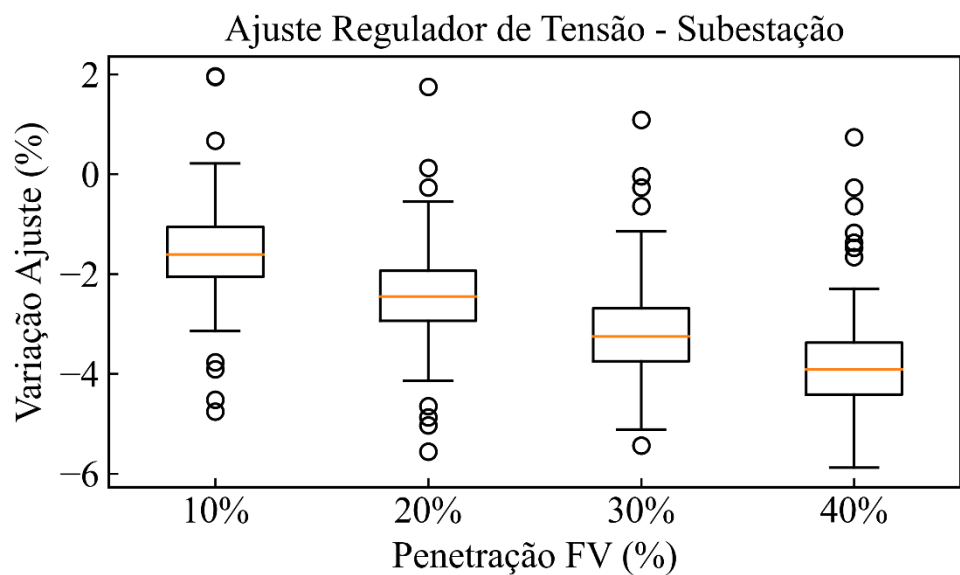
Solução:

- ✓ Encontrar ajustes de boa qualidade empregando regra simples

Proposta de norma:

Penetração FV	Redução da referência de tensão (10h/15h) – Regulador de tensão da subestação	Redução da referência de tensão (10h/15h) – Regulador de tensão de linha
10%	-1,0%	0,0%
20%	-2,0%	-0,5%
30%	-2,5%	-1,0%
40%	-3,0%	-2,5%

Validação: metodologia heurística



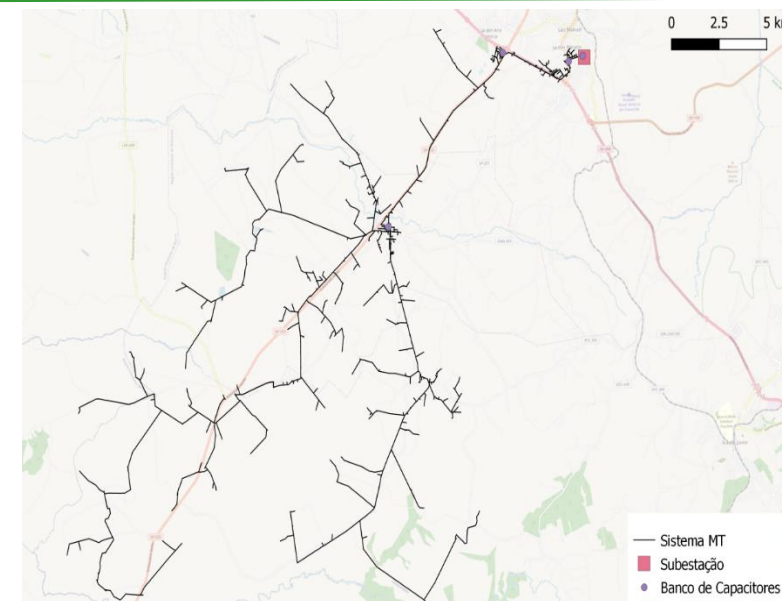
Problema: decidir modo de controle e ajustes

- ✓ corrente
- ✓ fator de potência
- ✓ tempo
- ✓ potência reativa

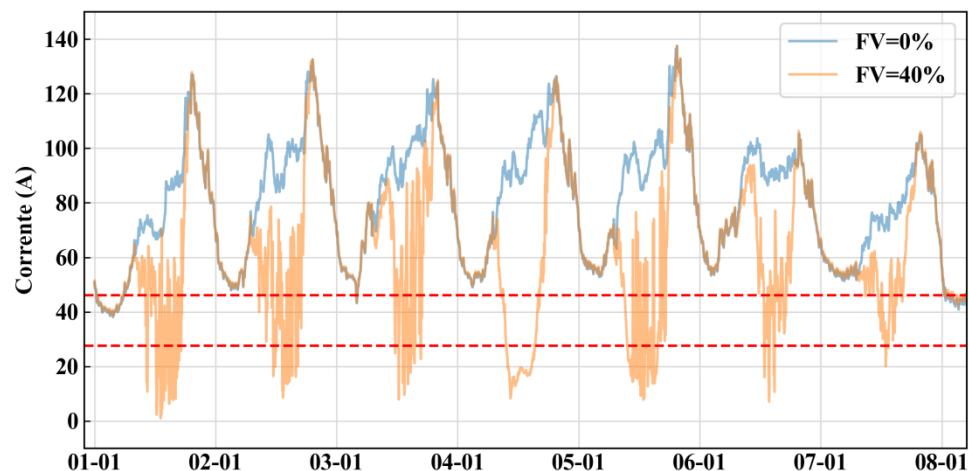
Conclusão:

- ✓ corrente e fator de potência: não são apropriados com elevada penetração de microgeração
- ✓ potência reativa: melhor opção

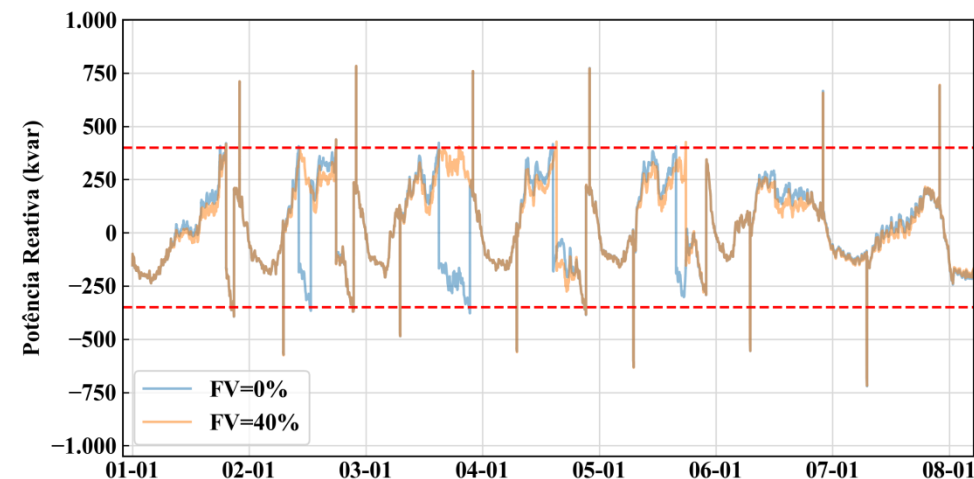
Estratégia de controle	Penetração FV (%)	Custo de transgressão de tensão (R\$)	Perdas técnicas (GWh)	Média FP*	Operações
Corrente	0	27.657,00	1,713	0,964	0
Potência reativa	0	6.268,00	1,711	0,978	949
Corrente	40	131.897,00	1,541	0,931	772
Potência reativa	40	108.461,00	1,540	0,948	983



Banco de Capacitores Controlado por **Corrente**

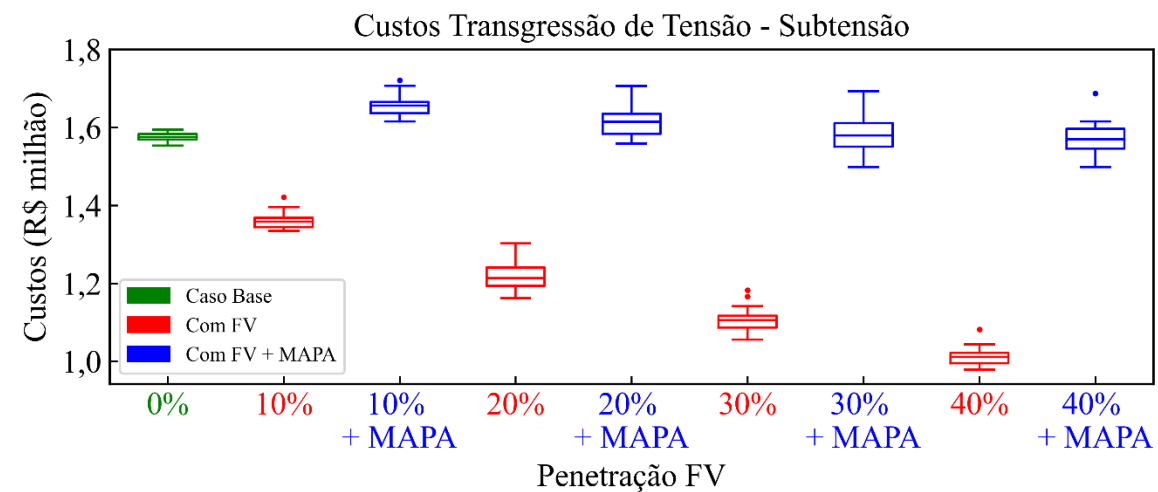
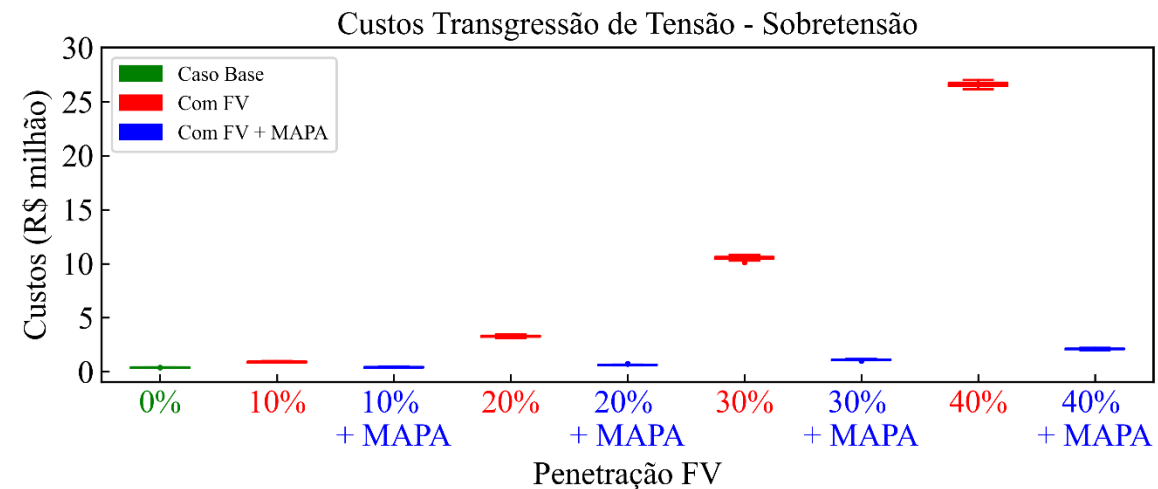
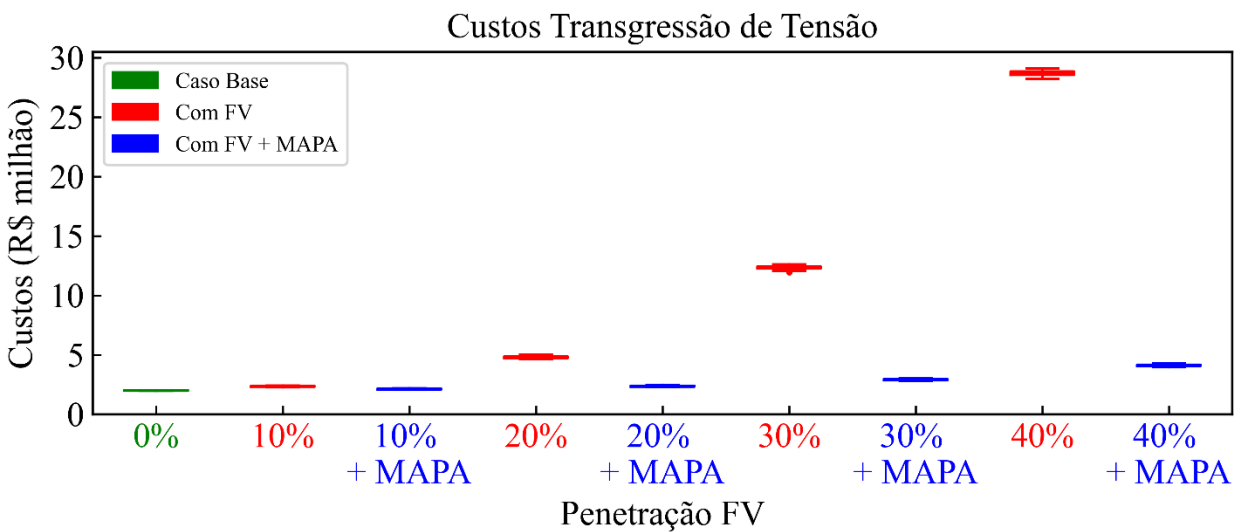


Banco de Capacitores Controlado por **Potência Reativa**



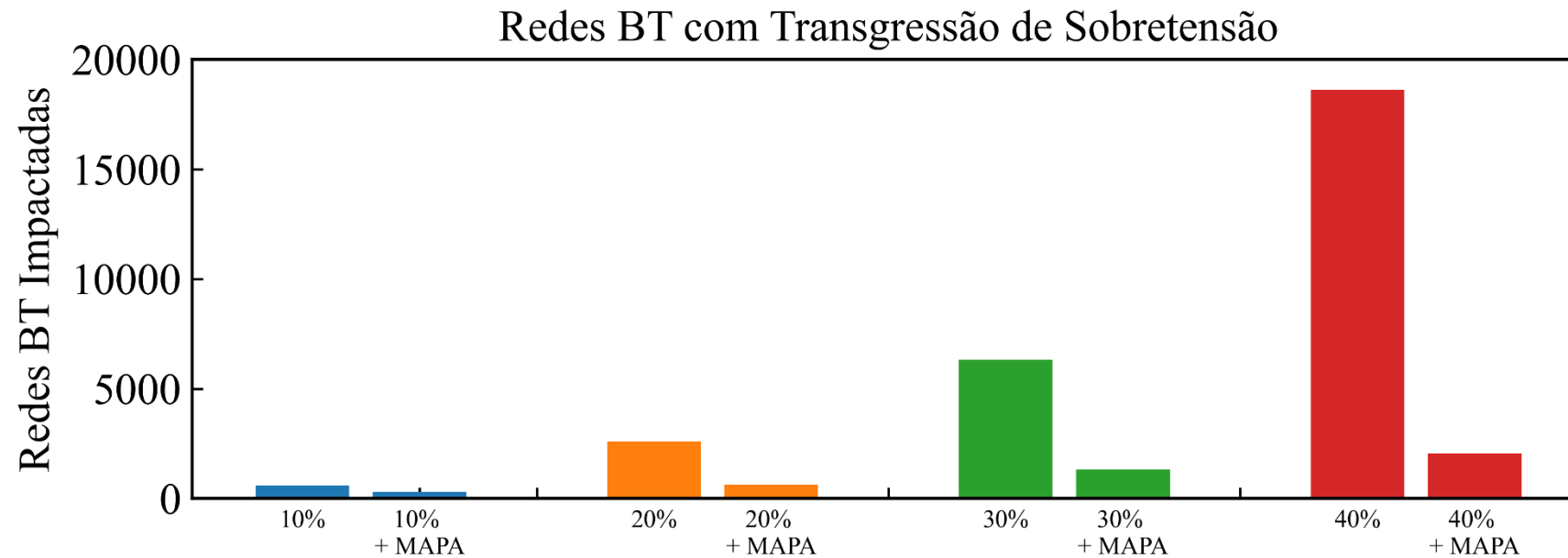
Redução do custo

30% Penetração de FV: custo reduzido de 12M para 3M
40% Penetração de FV: custo reduzido de 29M para 5M



Redução do problema generalizado (transformação em problema localizado)

90% de redução dos sistemas BT impactados (40% de penetração FV)



Conclusões:

- ✓ A metodologia **técnico-econômica probabilística** desenvolvida mostrou-se útil para tomada de decisão do ponto de vista planejamento estratégico
- ✓ Soluções readequando a utilização de **tecnologias existentes** são eficientes

Comentários:

- ✓ Demanda **elevadíssima para modelagem do problema** – dados e suposições
- ✓ Demanda **computacional elevadíssima** – resolução, granularidade, cenários

Sugestões:

- ✓ Melhorar qualidade de dados: reguladores e capacitores
- ✓ Sequência:
 - Ajustar banco de capacitores
 - Ajustar reguladores

Obrigado

Walmir Freitas, Professor, Ph.D.

University of Campinas – UNICAMP

<http://www.dsee.fee.unicamp.br/~walmir>