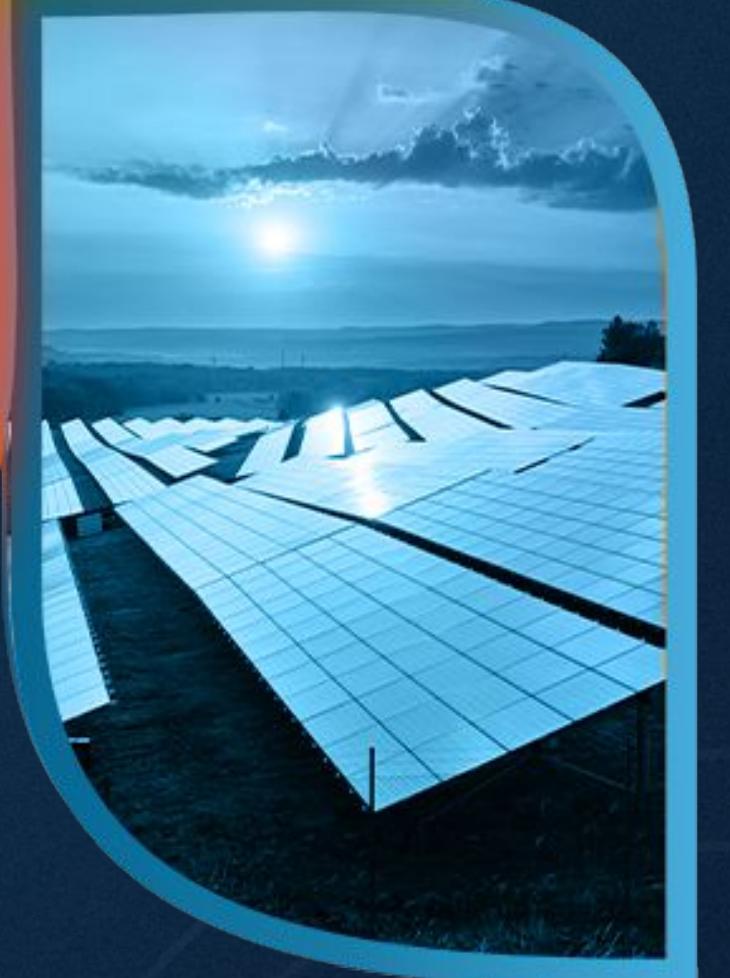


O futuro da energia

no Brasil é
distribuído!





Palestra resultados das simulações na Baixa Tensão

- Vinicius Souza



Objetivos

- Discutir os impactos técnicos da **expansão da micro e minigeração distribuída (MMGD)** nas redes de distribuição

- Trazer **evidências numéricas e simulações reais**

- Avaliar **indicadores técnicos e estatísticos** que permitam fundamentar o debate regulatório

- Contribuir para o aperfeiçoamento das **normas da ANEEL**

- Avançar na construção de uma **visão técnica consistente**



Redes de distribuição de energia elétrica

■ Números do Brasil (37 maiores empresas)

□ 27 mil alimentadores (99% nos estudos)

□ 3 milhões de km de rede primária

86% na zona rural

□ 6 milhões de transformadores BT (270 GVA instalados)

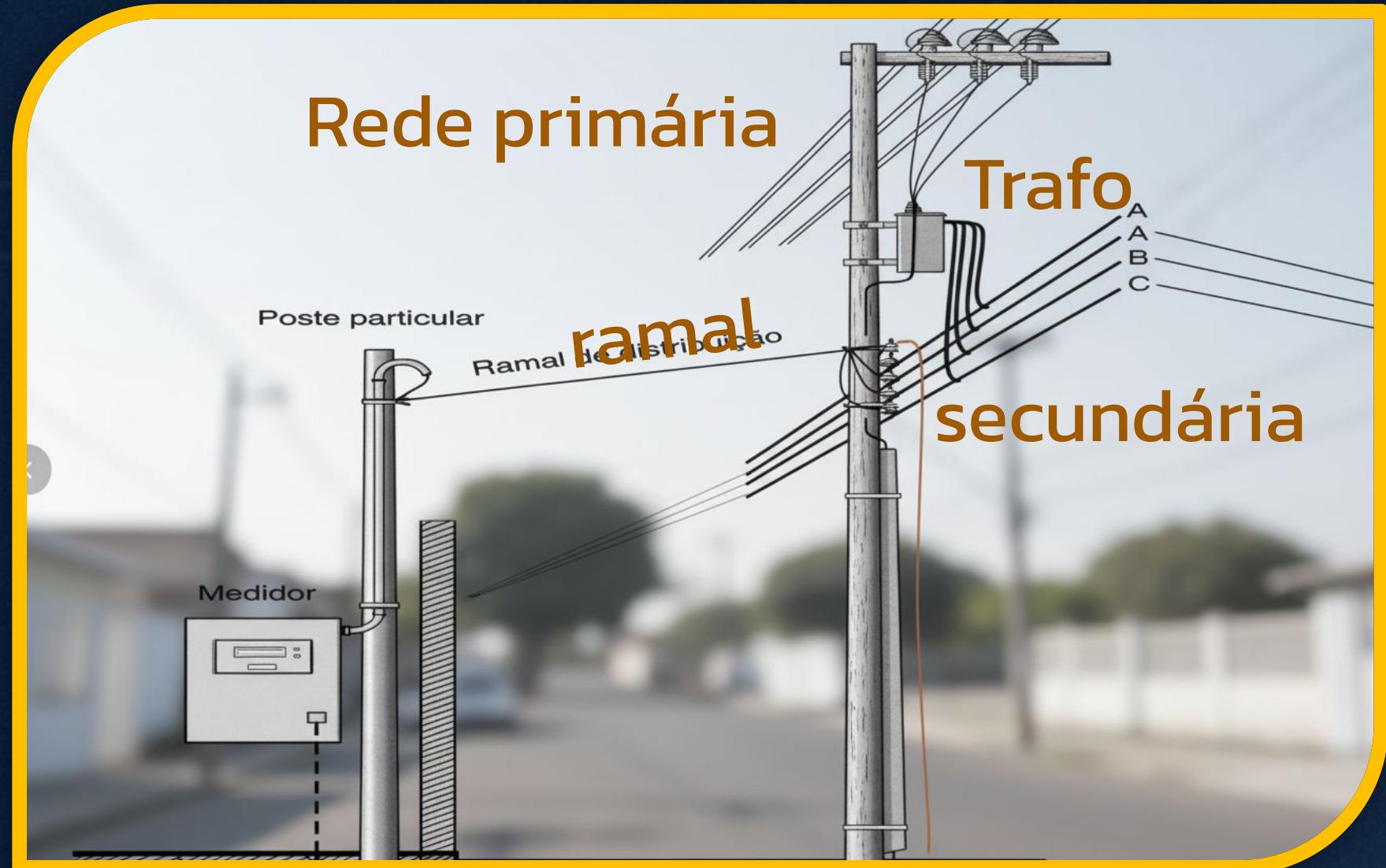
55% possuem apenas Ramal de Ligação

25% alimentam prédios

□ 1,3 milhão de km de rede secundária (+2,3 milhão de km de Ramal de Ligação)

□ 102 milhões de unidades consumidoras BT (+350 mil MT)

□ 3,2 milhões de unidades de geração BT (+53 mil MT)



Maior base de dados verificada do mundo – A BDGD

A BDGD é uma das maiores e mais completas bases de dados do setor elétrico mundial.

É padronizada pela ANEEL, aberta e cobre:

- ✓ +100 milhões de unidades consumidoras
- ✓ +7 milhões de km de rede

Todo o **vínculo elétrico por fase**, do consumidor ao sistema de transmissão.

A **Nota de Qualidade (IQ_BDGD)** atesta sua confiabilidade:

- Elevado rigor na apuração
- Garante robustez dos mecanismos regulatórios
- Perdas, Indicadores de continuidade, Mercado energético, base de remuneração, conciliação contábil, Opex regulatório, custos médios, revisão tarifária e Fiscalização
- Determina diretamente a credibilidade da distribuidora perante a ANEEL.

Não existe, hoje, outro país que publique e padronize uma base tão ampla, detalhada e regulatória quanto a BDGD, com esse nível de granularidade elétrica, espacial e contábil em todo o sistema de distribuição.

The screenshot shows a web browser displaying the ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) website. The URL in the address bar is dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/base-de-dados-geografica-da-distribuidora-bdgd. The page title is "Base de Dados Geográfica da Distribuidora - BDGD". The header includes the ANEEL logo and navigation links for "Conjuntos de dados", "Organizações", "Grupos", and "Sobre". Below the title, there are sections for "Seguidores" (0), "Organização" (ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica), and "Base de Dados Geográfica da Distribuidora - BDGD". To the right, there are tabs for "Conjunto de dados", "Grupos", and "Fluxo de Atividades". The main content area describes the BDGD as a part of the SIG-R system, detailing its purpose and how it represents the real electrical grid of the distributor. It also mentions the PRODIST module and the BDGD manual.

Seleção dos alimentadores



Distribuição dos Alimentadores por Cluster



- Alimentador PRRU07 – CEMIG – Buritizeiro/MG (Norte do estado)
- Alimentador AFNU17 – CEMIG – Alfenas/Serrânia/MG (Sul do estado)
- Alimentador RPID1305 – EDP SP – Pindamonhangaba/SP – (Vale do Paraíba)
- Alimentador IGA01Z2 – EQTL PI – Teresina/PI

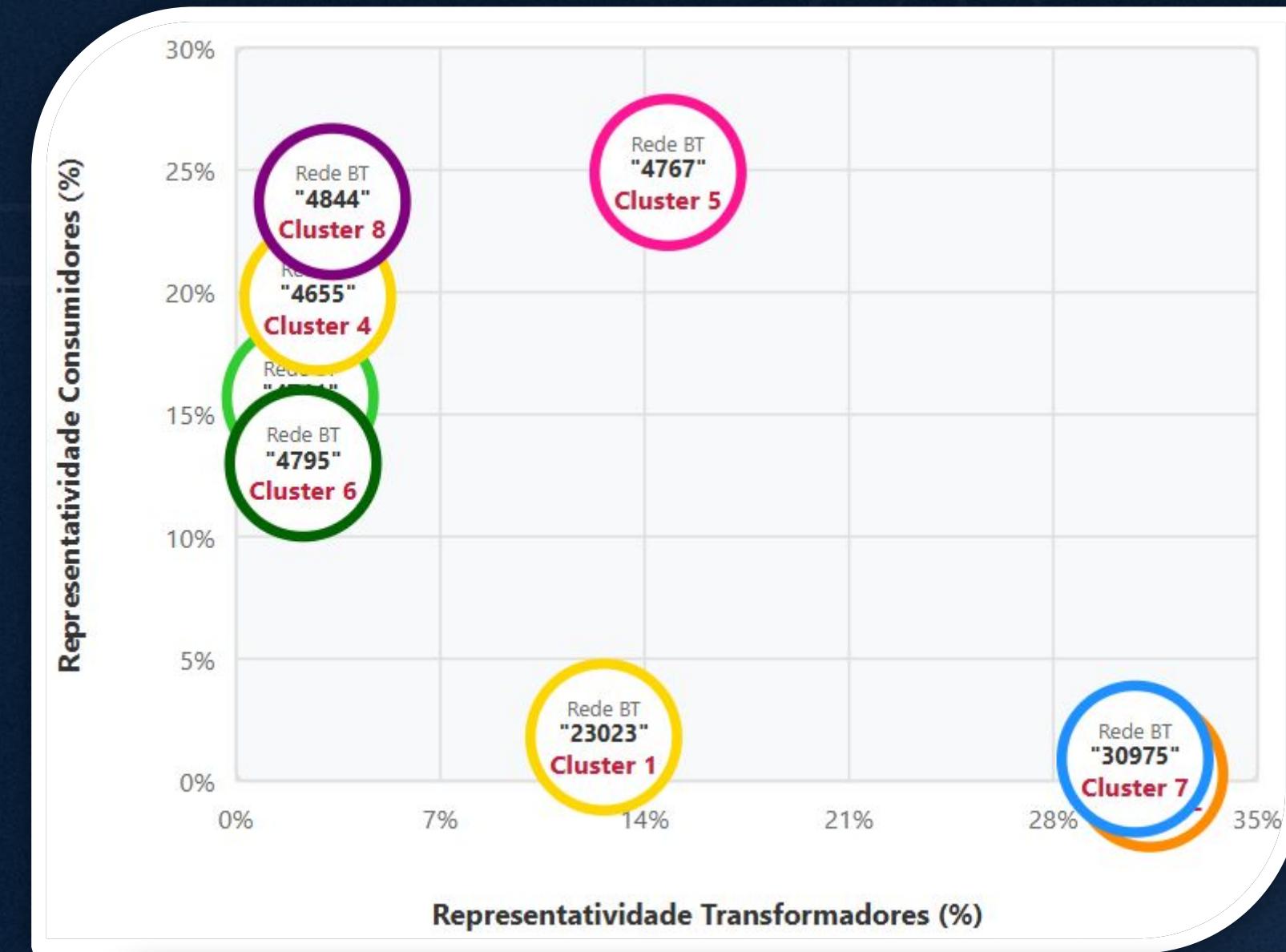
EMPRESA (BDGD 2024)	AFNU17 Médio Misto	RPID1305 Médio Urbano	IGA01Z2 Pequeno Urbano	PRRU07 Grande Rural	VAZIOS Sem Consumidor	FORA Fora do Padrão	TOTAL
AMAZONAS_ENERGIA_2024	67	62	193	3	59	199	583
CEA_EQTL_2024	9	6	40	3	3	17	78
CEE_EQTL_2024	87	110	189	12	25	121	544
CELESC_DIS_2024	193	164	282	56	97	167	959
CEMIG_MG_2024	466	442	296	264	438	550	2456
COPEL_DIS_2024	243	311	527	129	189	477	1876
CPFL_PAULISTA_2024	313	238	596	40	94	355	1636
CPFL_PIRATININGA_2024	49	112	172	3	85	130	551
CPFL_SANTA_CRUZ_2024	57	13	51	7	29	58	215
EDP_ES_2024	59	58	112	27	16	184	456
EDP_SP_2024	37	167	211	4	86	100	605
ENEL_CE_2024	125	116	138	191	43	115	728
ENEL_RJ_2024	80	163	199	20	67	101	630
ENERGISA_AC_2024	16	12	33	13	19	27	120
ENERGISA_MINAS_RIO_2024	55	24	31	20	5	82	217
ENERGISA_MS_2024	65	55	71	45	10	113	359
ENERGISA_MT_2024	83	70	128	63	49	280	673
ENERGISA_PB_2024	103	76	60	94	9	71	413
ENERGISA_RO_2024	48	30	50	35	76	83	322
ENERGISA_SE_2024	43	26	42	39	16	24	190
ENERGISA_SUL_SUDESTE_2024	76	36	70	15	59	89	345
ENERGISA_TO_2024	44	26	34	36	12	87	239
EQTL_AL_2024	50	36	55	45	20	63	269
EQTL_GO_2024	153	128	109	94	104	295	883
EQTL_MA_2024	147	89	89	122	26	123	596
EQTL_PA_2024	109	106	215	73	25	174	702
EQTL_PI_2024	74	40	54	81	12	56	317
LIGHT_2024	11	473	470	10	81	668	1713
NEOENERGIA_BRASILIA_2024	21	116	77	1	82	106	403
NEOENERGIA_COELBA_2024	313	159	243	325	126	320	1486
NEOENERGIA_COSERN_2024	139	50	72	75	13	46	395
NEOENERGIA_ELEKTRO_2024	220	117	185	66	167	224	979
NEOENERGIA_PERNAMBUCO_2024	221	109	218	142	34	162	886
RGE_2024	300	114	348	34	104	275	1175
RORAIMA_ENERGIA_2024	17	9	33	0	10	20	89
SANTA_MARIA_2024	3	3	4	7	1	13	31
TOTAL GERAL	4.096	4.488	6.300	2.194	2.517	6.330	25.925

Seleção das Redes Secundárias



- Representatividade medida por Transformadores MT/BT: Quantidade de Ativos de rede
- Representatividade medida por Consumidores: Quantidade de consumidores

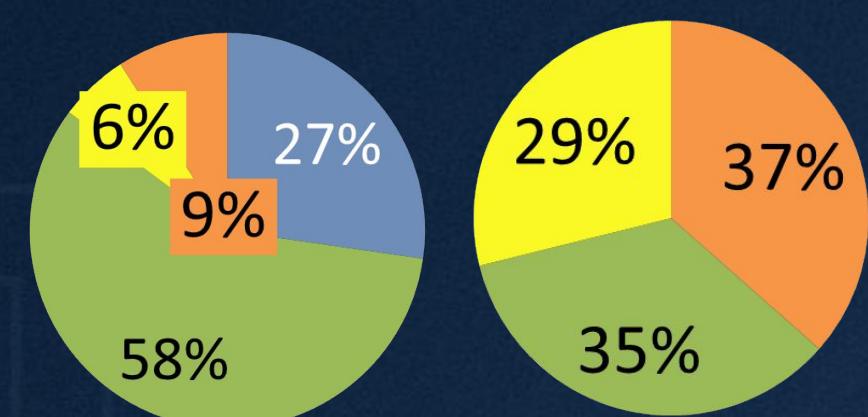
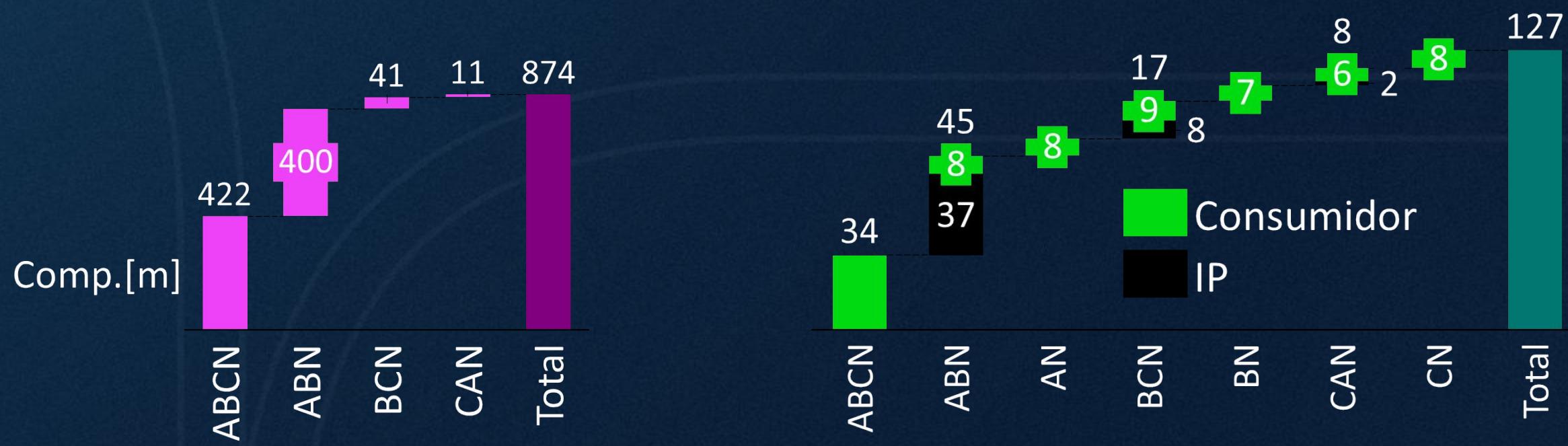
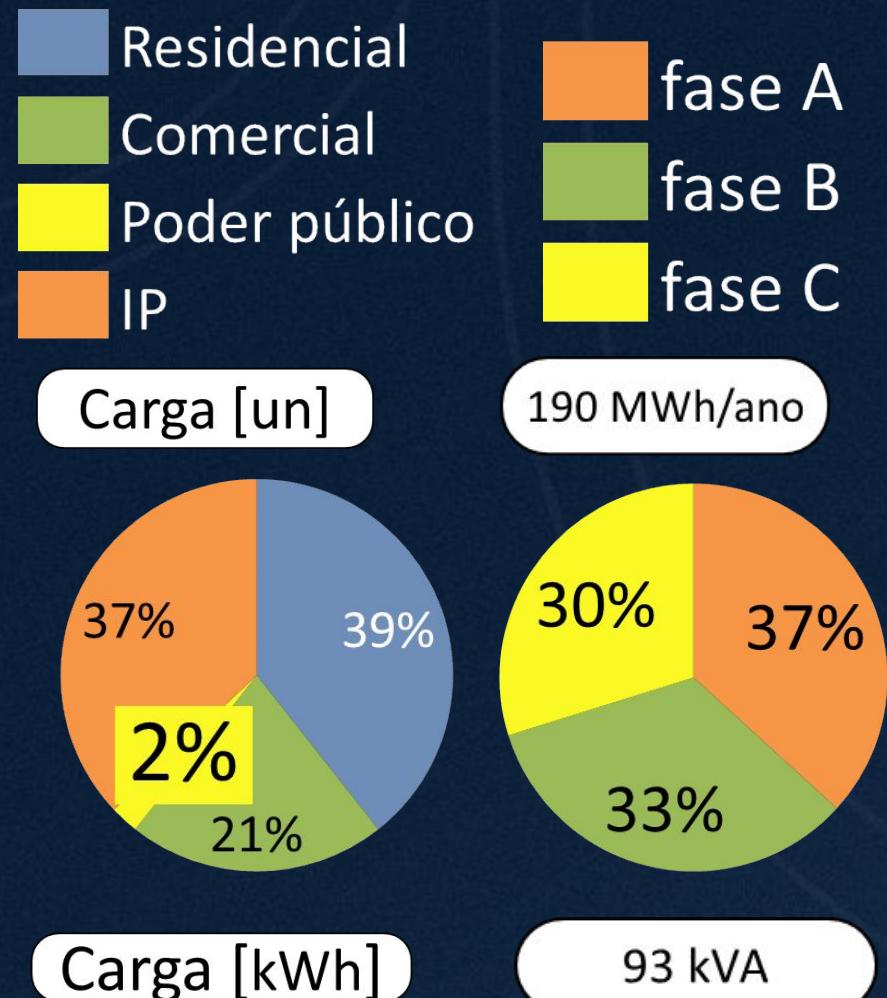
- As redes secundárias são identificadas por código de instalação do transformador MT/BT
- Foram definidos 8 clusters
- Foi selecionado um representante de cada cluster identificado no alimentador AFNU17



Cluster 1 (23023) T:12.6% C:1.8%	Cluster 2 (30954) T:31.3% C:0.3%
Cluster 3 (4711) T:2.2% C:15.7%	Cluster 4 (4655) T:2.8% C:19.8%
Cluster 5 (4767) T:14.8% C:24.9%	Cluster 6 (4795) T:2.3% C:13%
Cluster 7 (30975) T:30.8% C:0.9%	Cluster 8 (4844) T:3.3% C:23.7%

Rede Secundária: "Trafo 4844" – CEMIG –

AFNU17



Metodologia: Simulação para Avaliação de Capacidade de Hospedagem em Redes Secundárias e efeitos nas Redes Primárias

■ Caso 1 – Saturação de Rede Secundária

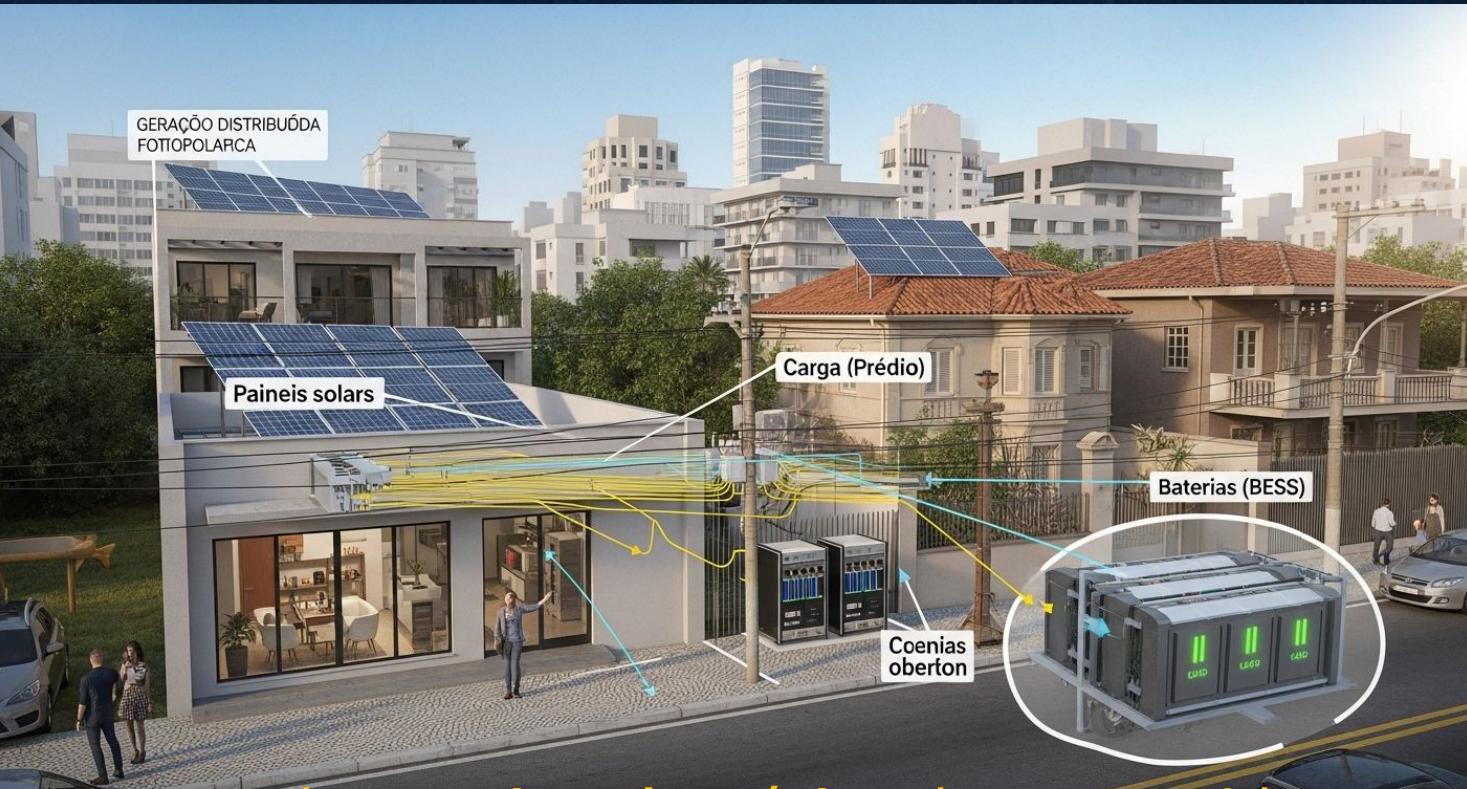
- Expansão gradativa de micro GD em uma única rede BT
- Simulação completa do alimentador
- Monitoramento de todas as barras da rede BT
- Repete para outras 07 redes secundárias

■ Caso 2 – Controle de Saturação de Rede Secundária com BESS

- Expansão gradativa de micro GD em uma única rede BT
- Simulação completa do alimentador, monitorando todas as barras da rede secundária
- Implantação de BESS antes da saturação para permitir a **continuidade** da expansão de GD

■ Caso 3 – Avaliação do Impacto de micro GD nas Perdas Técnicas do Alimentador

- Expansão gradativa e simultânea de micro GD em múltiplas redes BT de um alimentador
- Monitoramento de todas as barras da rede secundária e dos consumidores conectados nas redes primárias.
- Análise focada no efeito sobre as perdas técnicas globais do alimentador e na identificação de pontos de inflexão
- Estudo repetido em dois outros alimentadores para validação



- Uso de **sorteios aleatórios** de consumidores
- Inserção de GD até o **limite técnico**
- Testes com **diferentes** tipos de carga, redes e transformadores
- Derivação de **indicadores** a partir dos resultados
- Perdas, sobretensão, sincronização de carga, Multas DRP e DRC

Indicadores de Diagrama dos estudos de caso de micro

1. Tratamento de dados

- Dados Abertos** da ANEEL (**BDGD e MMGD**)
- Carrega em **SQL Server** – banco de dados
- Executa **GeoPerdas.sql** – rotinas ANEEL
- Executa **ProgGeoPerdas.exe** – controla OpenDSS
- Executa **Data Quality**
- Todo processo em banco de dados auditável
- Adiciona modelo **MMGD** (**PVSystem.dss**) (**TS 013/22 ANEEL**)
- Incorpora Banco Nacional de **Radiação Solar**
- Adiciona modelo **BESS** (**Storage.dss**)
- Adiciona Medidores MT e BT (**Monitors.dss**)



2. Seleção das redes

Seleção de 04 alimentadores típicos diversificados



Análise Comparativa				
Ponto	Demanda de GD	Densidade de Carga	Qualidade da BDGD	Representatividade Nacional
CEMIG 1	ELEVADA	BAIXA	MÉDIA	BAIXA
CEMIG 2	MÉDIA	MÉDIA	MÉDIA	ELEVADA
EDP 1	MÉDIA	ELEVADA	MÉDIA	MÉDIA
EQUATORIAL 1	ELEVADA	MÉDIA	ELEVADA	ELEVADA

Medida	PRRU07	AFNU17	RPID1305	IGA01Z2
[km rede MT urbano]	29	24	59	17
[km rede MT rural]	600	162	0	0
[km rede BT]	69	44	104	48
[Trafo mono]	582	238	25	0
[Reguladores]	5	3	2	0
[NUC MT]	15	12	16	41
[NUC BT]	6642	3993	12448	2795
[GD BT]	100	21	61	270
[GD MT]	6	3	2	9
[Injeção/Consumo]	47%	2%	1%	12%

Caso 1

- Análise de **99%** das redes BT do Brasil
- Seleção: **08** redes secundárias do alimentador **AFNU17** que mais representam as distribuidoras

Comprimento, Fornecimento, Carregamento, Classe de consumo, Faseamento



Caso 2

- Seleção de **01** rede secundária típica do alimentador **AFNU17**

Relatórios OpenDSS

Potências, tensões e correntes, por hora, por fase, por dia, por **Monitor**

Caso 3

- Seleção de **todas** as redes secundárias habilitadas dos alimentadores **AFNU17**, **RPID1305** e **IGA01Z2**

Energia por tipo-dia, por mês, por **Meter**

- Cenários base
 - "-1" = Sem MMGD
 - "0" = Com MMGD MT
- Expansão
 - Consumidor sorteado instala GD 10kW
 - Expande por Consumidor
 - Monitora grandeza na MT
 - Monitora todos os pontos BT
- Todo cenário simula
 - 365 dias, 24 horas, 01 dia útil/mês, 01 sábado/mês, 01 domingo/mês

Relatórios OpenDSS

Potências, tensões e correntes, por hora, por fase, por dia, por **Monitor**

Energia por tipo-dia, por mês, por **Meter**

Relatórios OpenDSS

Potências, tensões e correntes, por hora, por fase, por dia, por **Monitor**

Energia por tipo-dia, por mês, por **Meter**

Relatórios OpenDSS

Potências, tensões e correntes, por hora, por fase, por dia, por **Monitor**

Energia por tipo-dia, por mês, por **Meter**

3. Simulações

- Executa o **AFNU17** com expansão gradativa de micro GD na **rede BT 01**

Reinicia o processo para **rede BT 02**

Até a **rede BT 08**

Sempre +10kW por cenário

- Executa o **AFNU17** com expansão gradativa de micro GD na **rede BT selecionada**

Sempre +10kW por cenário

- Executa os alimentadores **AFNU17**, **RPID1305** e **IGA01Z2**

Expansão gradativa e simultânea de micro GD em todas as **redes BT**

Sempre +10kW, porém com sorteio de 50 redes secundárias = 500 kW por cenário

4. Resultados

Impacto na rede secundária

Comportamento dos principais Indicadores

Indicador de penetração por capacidade das redes e por energia fornecida

Benefícios do BESS

Critérios de projeto Impacto reduzido

Situações não resolvidas

Benefícios da expansão de micro GD na rede MT

Ponto de inflexão de Perdas técnicas

Indicador de penetração horária

Alocação de micro GD nas redes

Áreas

Fluxo horário anual do alimentador completo

Adiciona GD 10kW

Salva o cenário

Sorteia consumidor

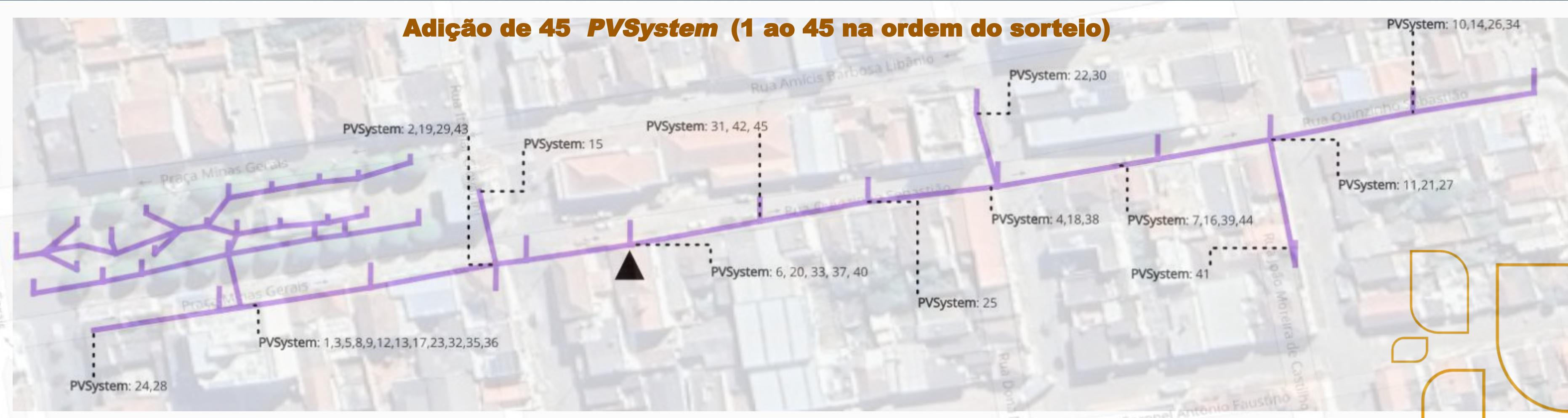
Critérios

- Não sortear mais de um consumidor para a mesma posição geográfica/elétrica
- PVSystem assume a fase do consumidor
- A demanda é mantida (sem o "Efeito rebound")

Observabilidade

- *Meter*: Saída do alimentador e saída do transformador
- *Monitor*: Saída do alimentador e todos os trechos da rede BT analisada
- **3,7 milhões** de registros de tensão por fase, por rede BT analisada

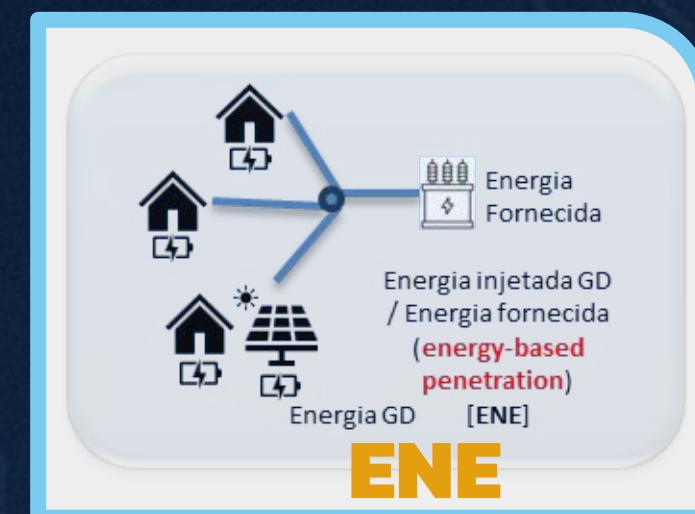
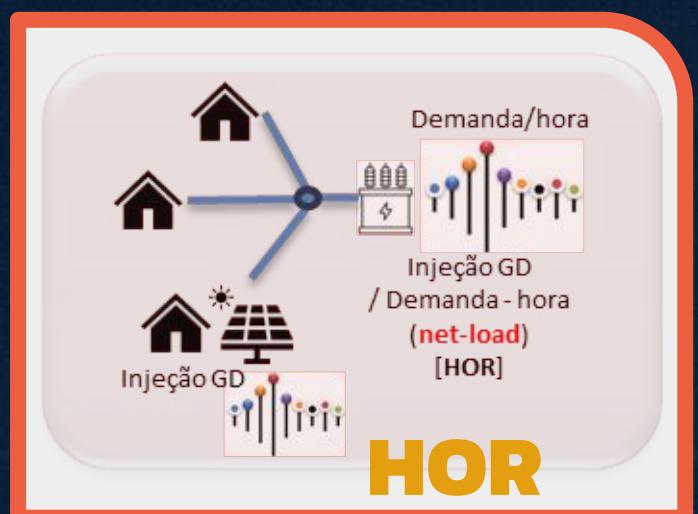
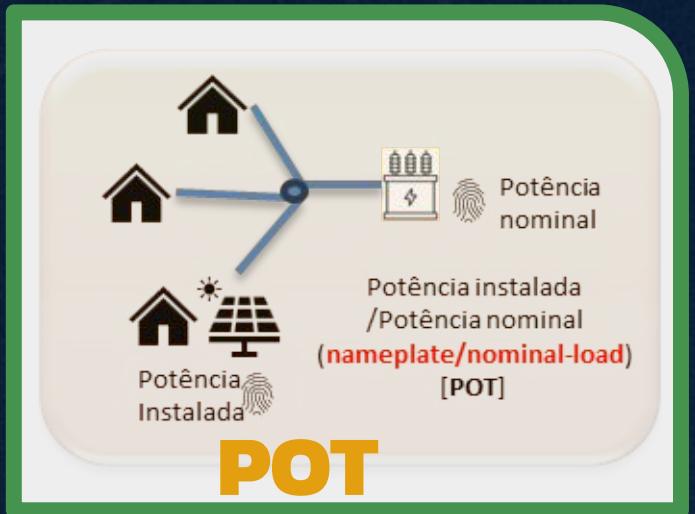
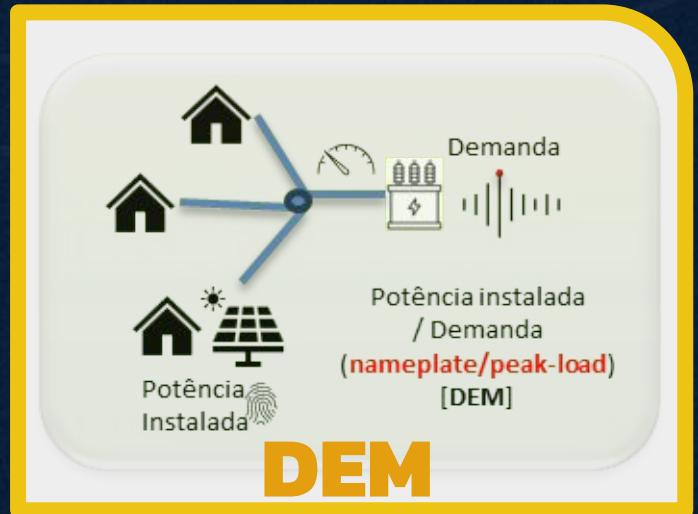
Adição de 45 PVSystem (1 ao 45 na ordem do sorteio)



Indicadores de penetração de GD (1/2)

Internacionais

- • nameplate/peak-load
- nameplate/nominal-load
- energy-based penetration
- net-load
- Voltage level violation / Voltage violation hours (%) / Over/Under Voltage exceedance
- Overloading / Ampacity violation
- Reverse power flow hours / reverse flow magnitude
- Voltage unbalance index / negative sequence voltage ratio
- Losses as % of energy delivered / Loss ratio
- Hosting Capacity threshold



- • Relação demanda [DEM]: Potência instalada da GD sobre a Demanda verificada - nameplate/peak-load
- Relação potência [POT]: Potência instalada da GD sobre a Potência nominal - nameplate/nominal-load
- Horas de Fluxo Reverso [HOR]: Quantidade de horas com fluxo invertido - Reverse power flow hours / magnitude
- Relação energia [ENE]: Energia injetada da GD sobre Energia fornecida - energy-based penetration

Indicadores de penetração de GD (2/2)

■ Carregamento

Condutores

Capacidade na fase

Capacidade no neutro

Transformadores

Nominal – Unidade

Térmico – Unidade

Nominal – Por enrolamento

Térmico – Por enrolamento

■ Perdas

Perda técnica em energia

Perda técnica em energia / energia injetada base (%)

■ Tensão

Ocorrência

Subtensão

Sobretensão

Relevância

DRP (%)

DRP (%)

Violação

DRP (R\$)

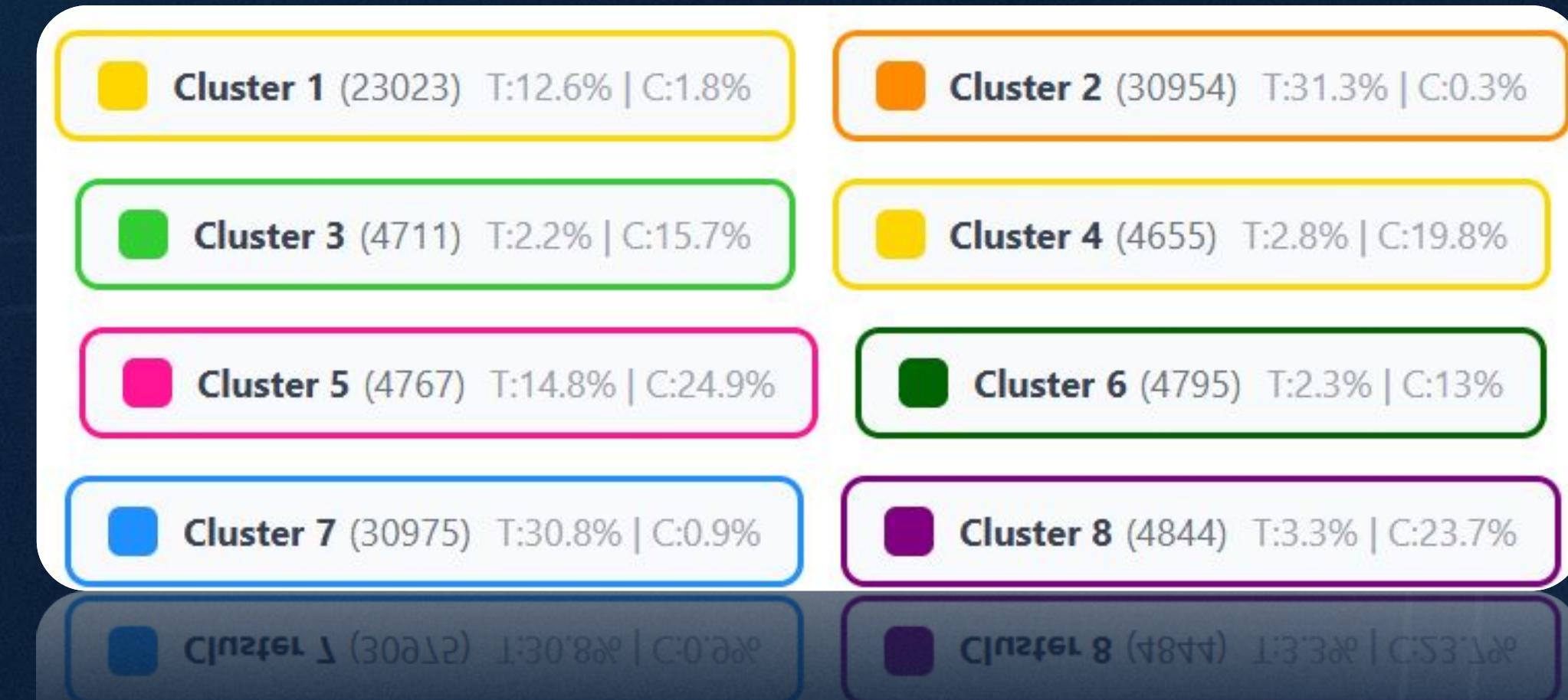
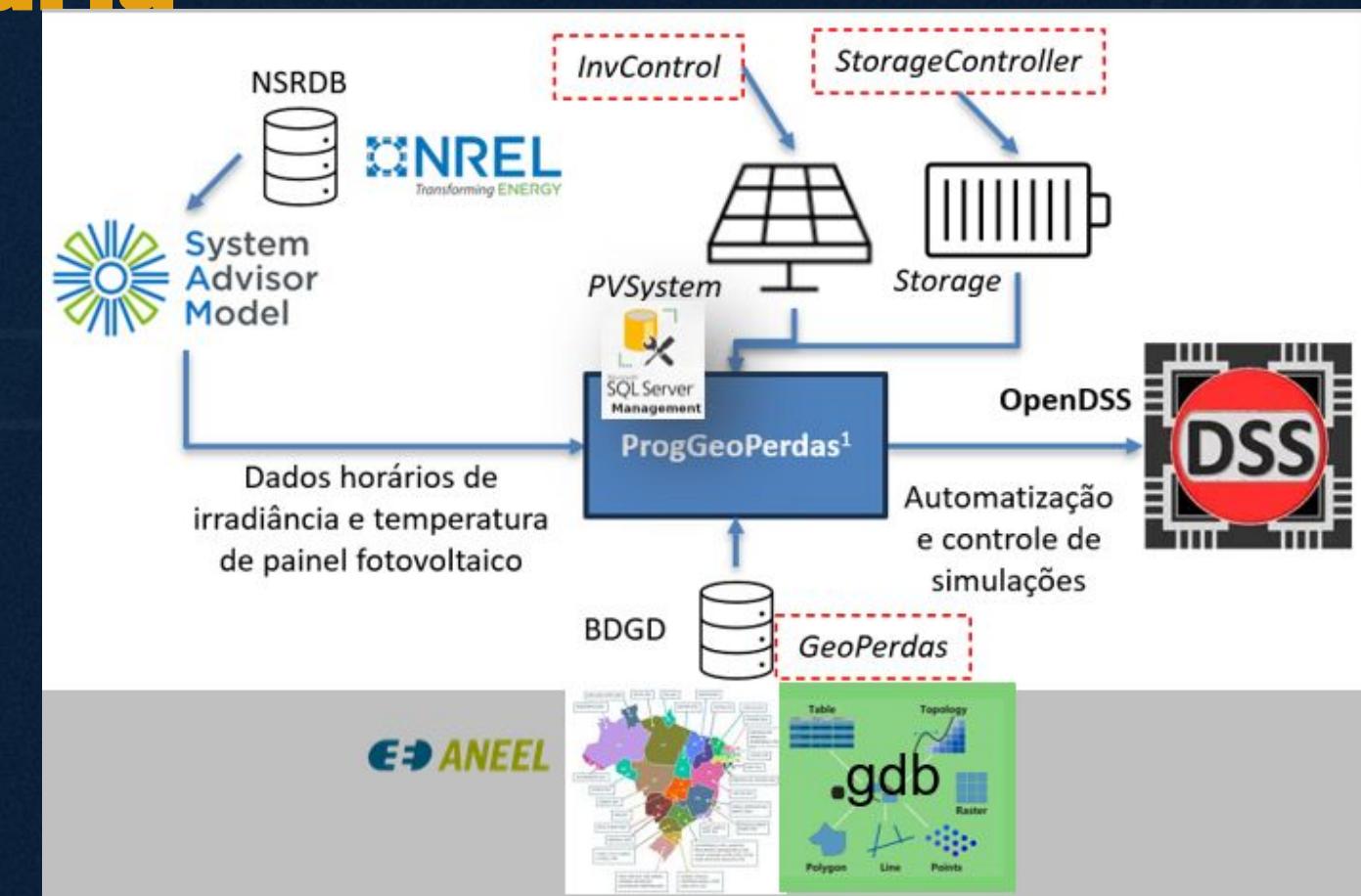
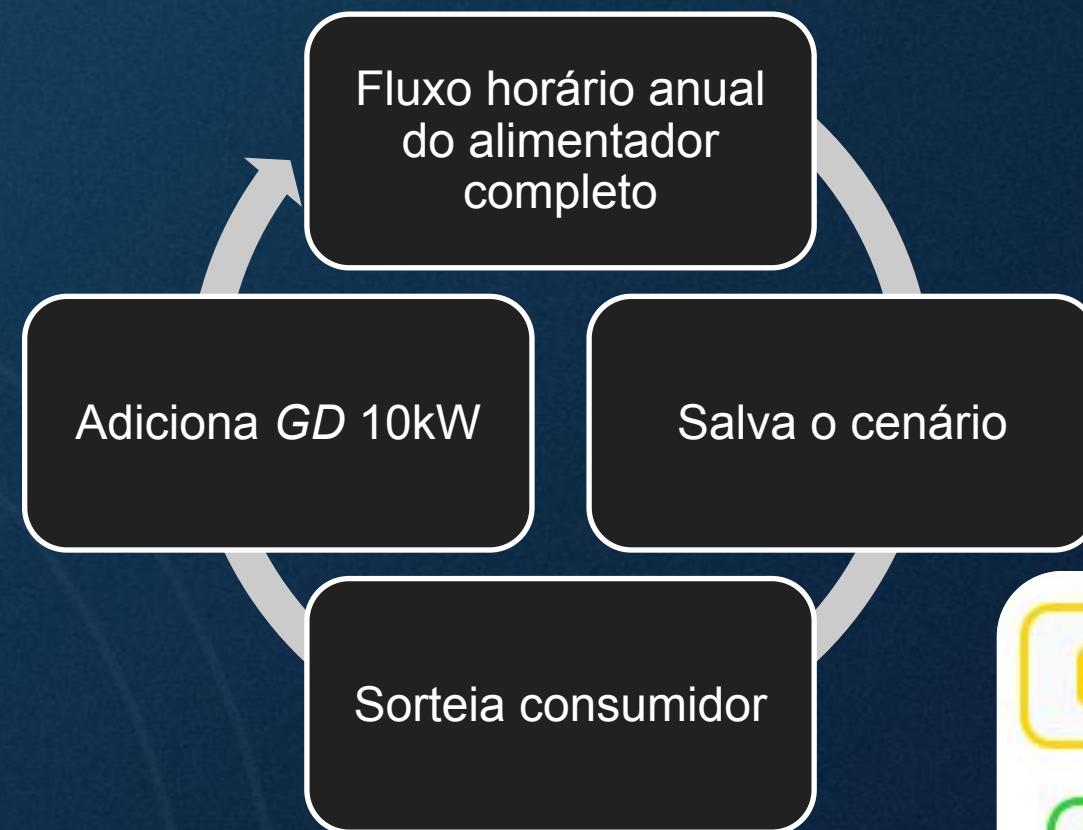
DRC (R\$)

DRP: Duração Relativa da Transgressão de Tensão Precária;

DRC: Duração Relativa da Transgressão de Tensão Crítica

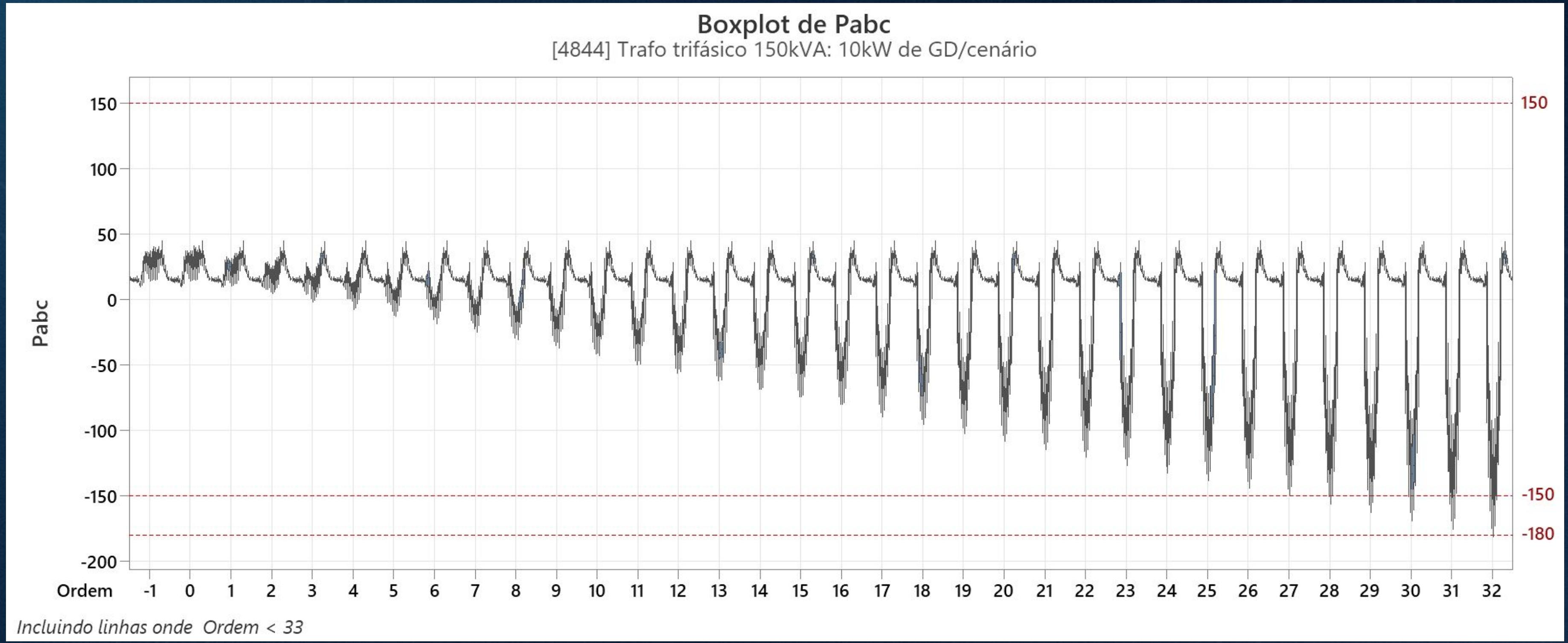
Caso 1: Saturação de Rede Secundária

- Expansão gradativa de micro GD em uma única rede secundária
- Simulação completa do alimentador
- Monitoramento de todas as barras da rede secundária
- Repete para outras 07 redes secundárias



Análise gráfica “Trafo 4844” – POT de 0% a 213%

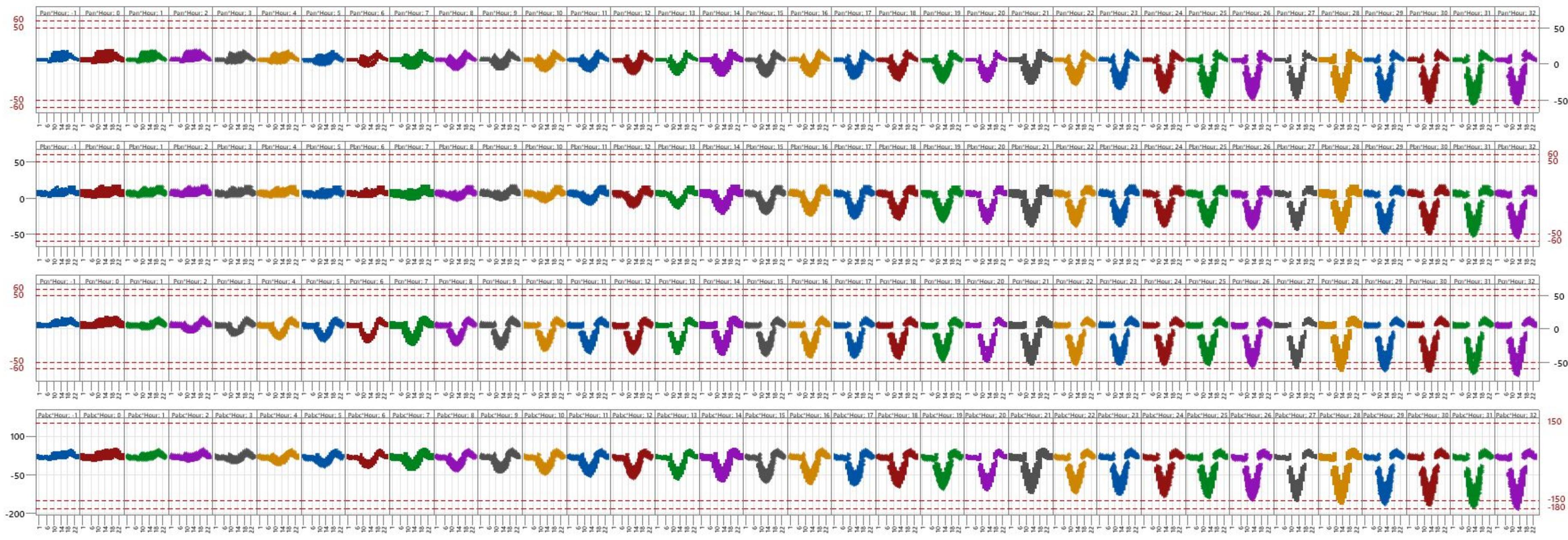
- Gráfico de potência com 32 cenários de penetração de GD, com 36 dias típicos cada, com 24 horas cada



Análise gráfica "Trafo 4844" – POT de 0% a 213%

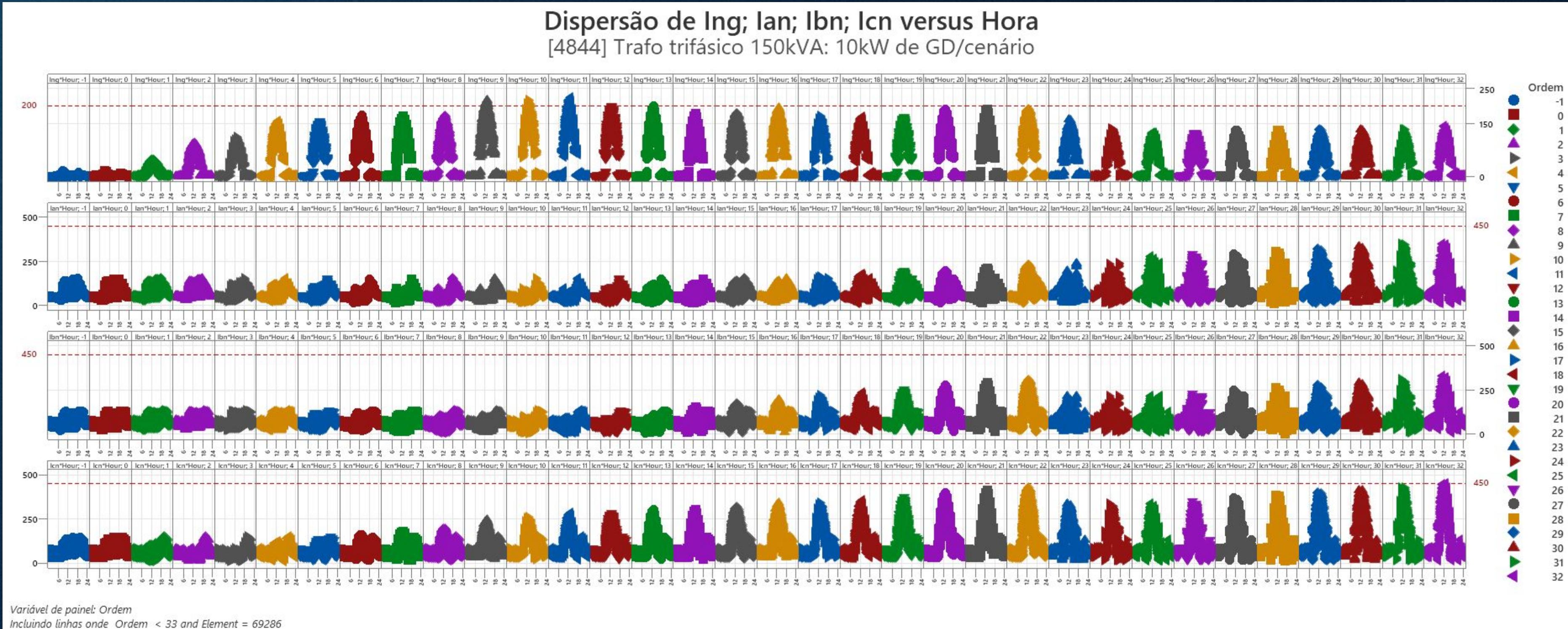
- Gráfico de potência com 32 cenários de penetração de GD, com 36 dias típicos cada, com 24 horas cada

Dispersão de Pan; Pbn; Pcn; Pabc versus Hora
[4844] Trafo trifásico 150kVA: 10kW de GD/cenário



Análise gráfica “Trafo 4844” – POT de 0% a 213%

- Gráfico de corrente com 32 cenários de penetração de GD, com 36 dias típicos cada, com 24 horas cada

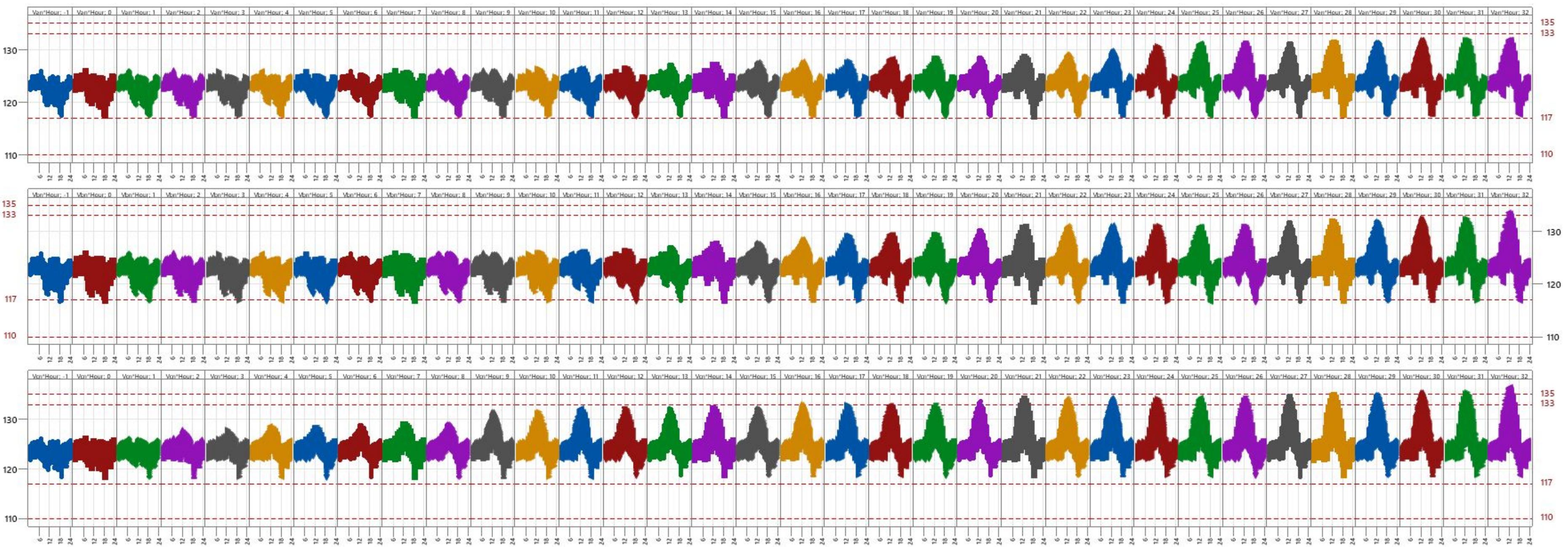


Análise gráfica “Trafo 4844” – POT de 0% a 213%

- Gráfico de tensão com 32 cenários de penetração de GD, com 36 dias típicos cada, com 24 horas cada

Dispersão de Van; Vbn; Vcn versus Hora

[4844] Trafo trifásico 150kVA: 10kW de GD/cenário

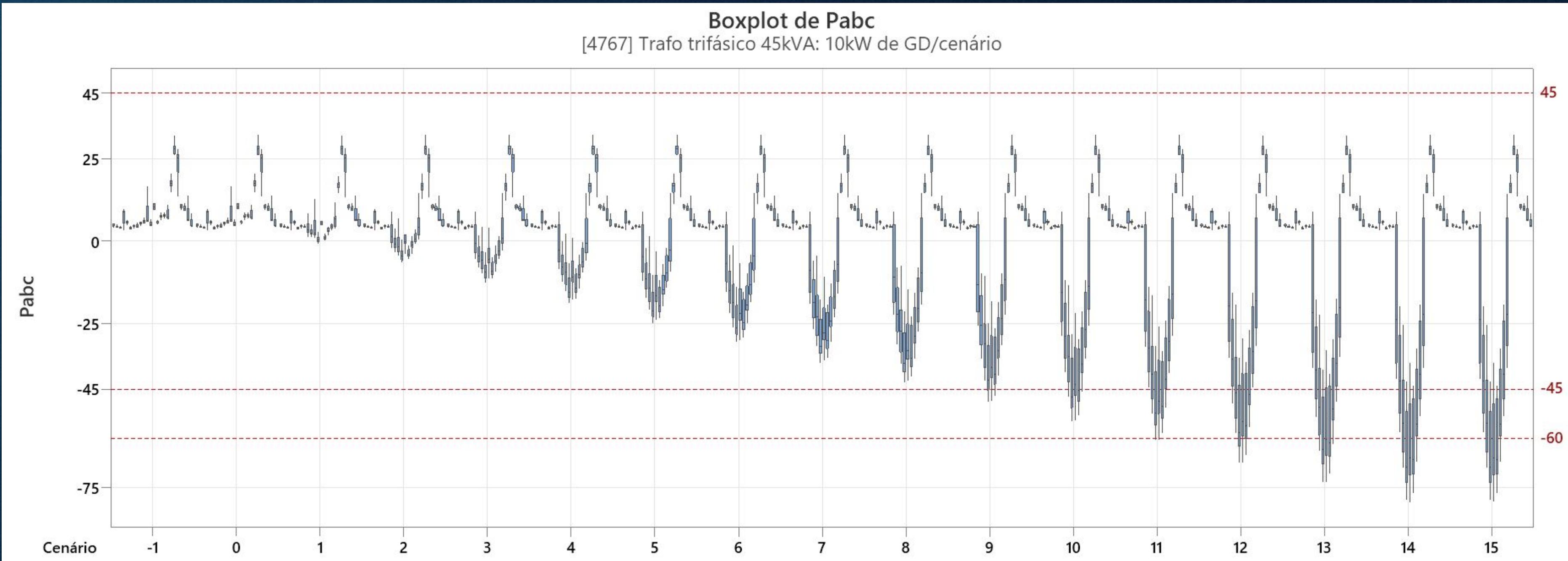


Análise gráfica “Trafo 4844” – POT de 0% a 213%

- Matriz de status dos indicadores monitorados em função da penetração de GD – [POT]

Análise gráfica “Trafo 4767” – POT de 0% a 333%

- Gráfico de potência com 15 cenários de penetração de GD, com 36 dias típicos cada, com 24 horas cada

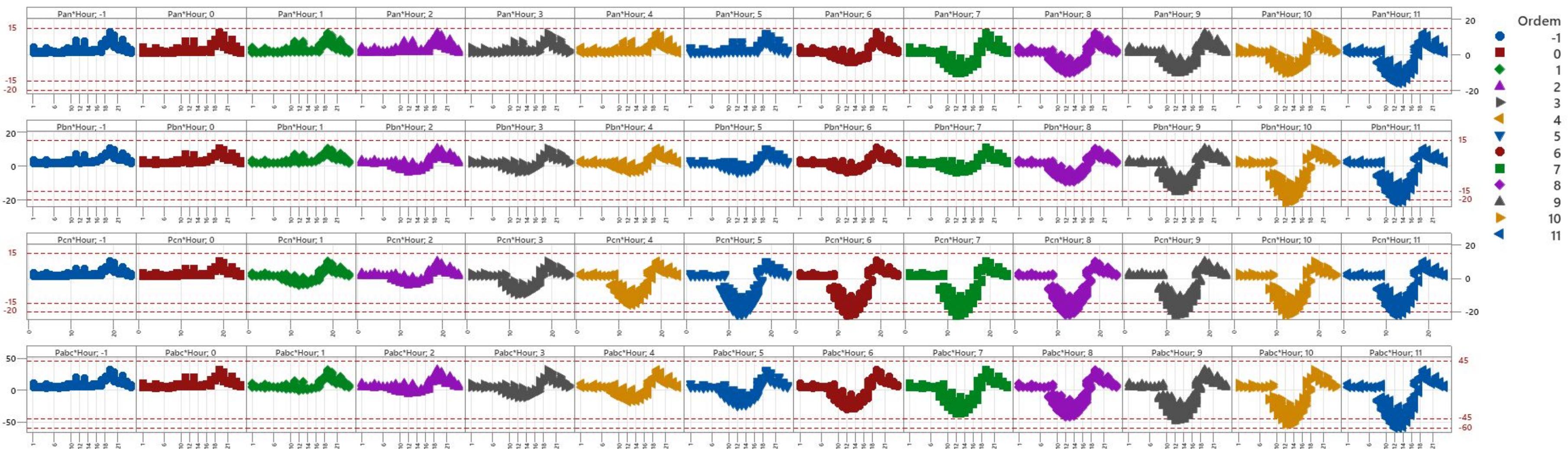


Análise gráfica “Trafo 4767” – POT de 0% a 244%

- Gráfico de potência com 11 cenários de penetração de GD, com 36 dias típicos cada, com 24 horas cada

Dispersão de Pan; Pbn; Pcn; Pabc versus Hora

[4767] Trafo trifásico 45kVA: 10kW de GD/cenário

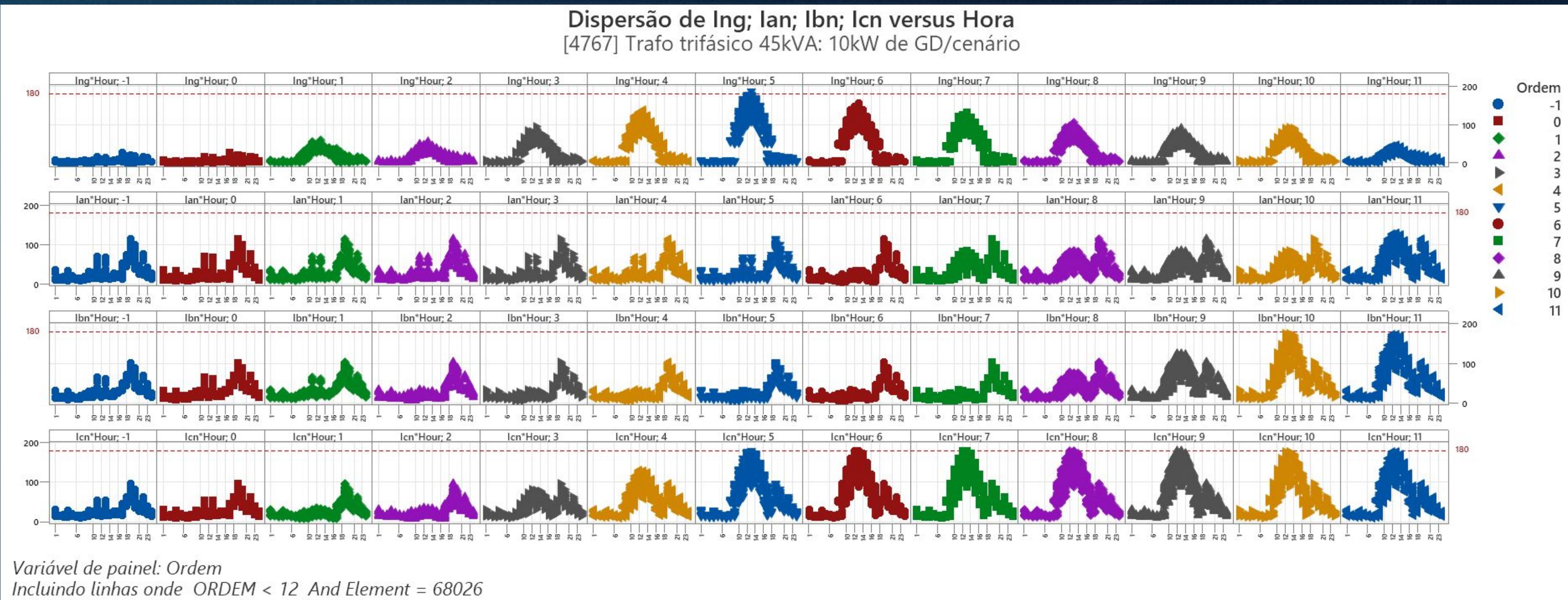


Variável de painel: Ordem

Incluindo linhas onde ORDEM < 12

Análise gráfica "Trafo 4767" – POT de 0% a 244%

- Gráfico de corrente com 11 cenários de penetração de GD, com 36 dias típicos cada, com 24 horas cada

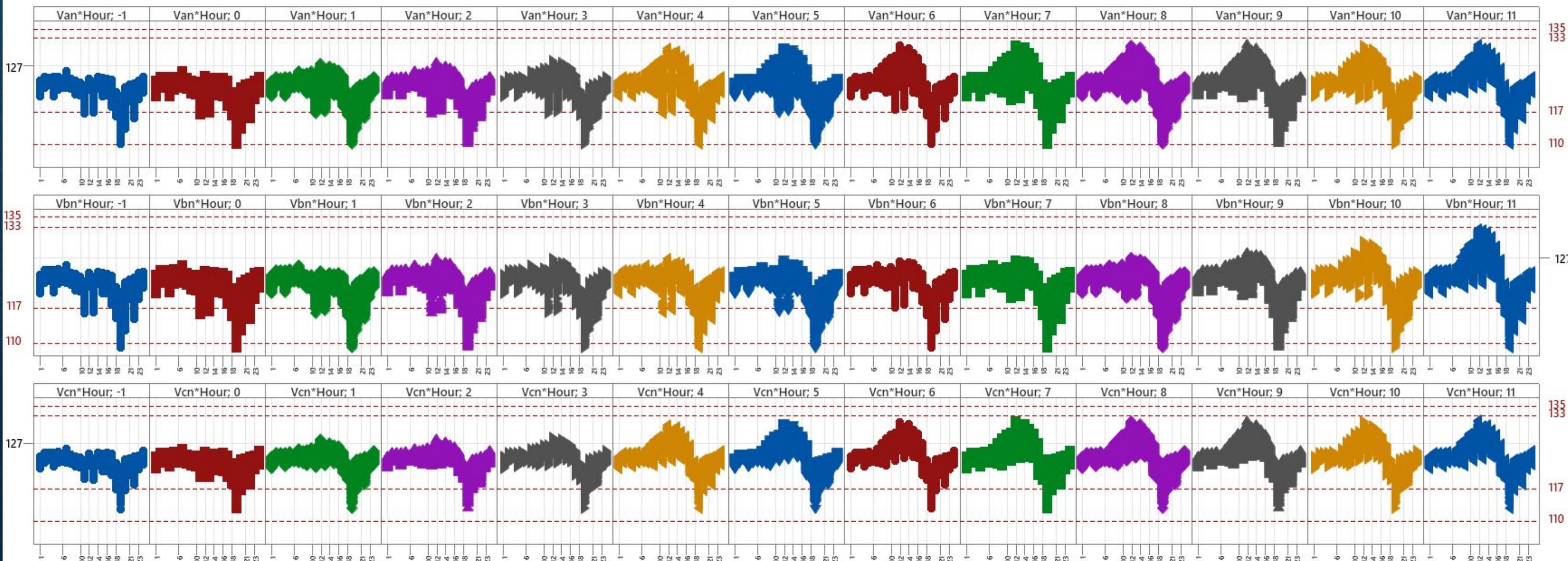


Análise gráfica "Trafo 4767" – POT de 0% a 244%

- Gráfico de tensão com 11 cenários de penetração de GD, com 36 dias típicos cada, com 24 horas cada

Dispersão de Van; Vbn; Vcn versus Hora

[4767] Trafo trifásico 45kVA: 10kW de GD/cenário

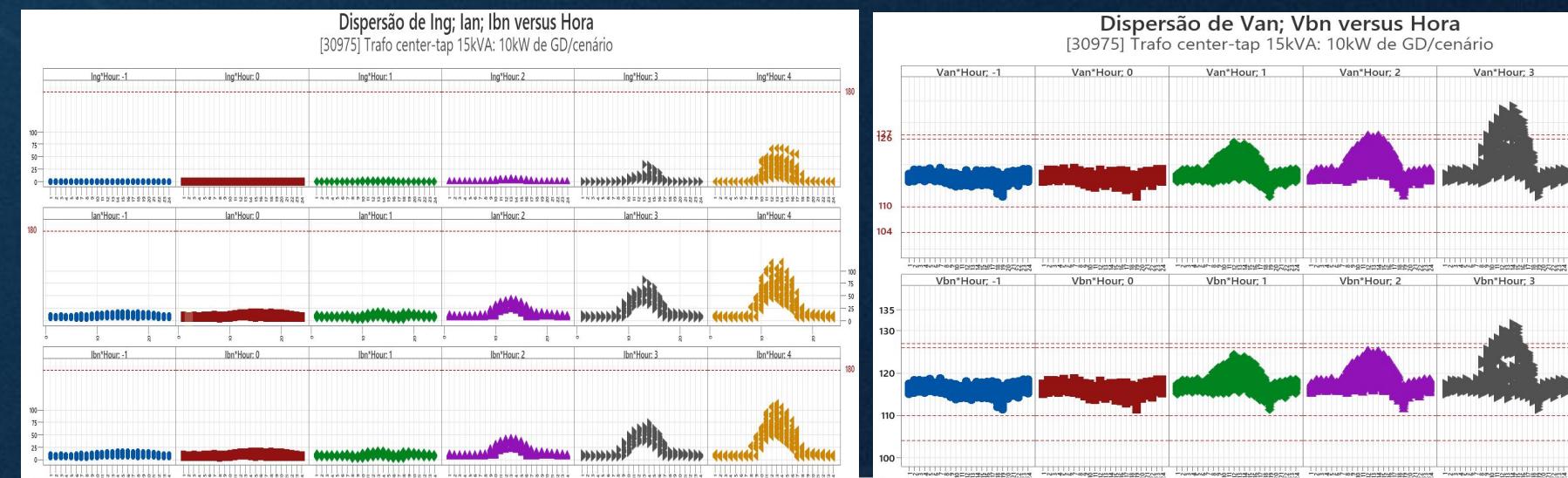
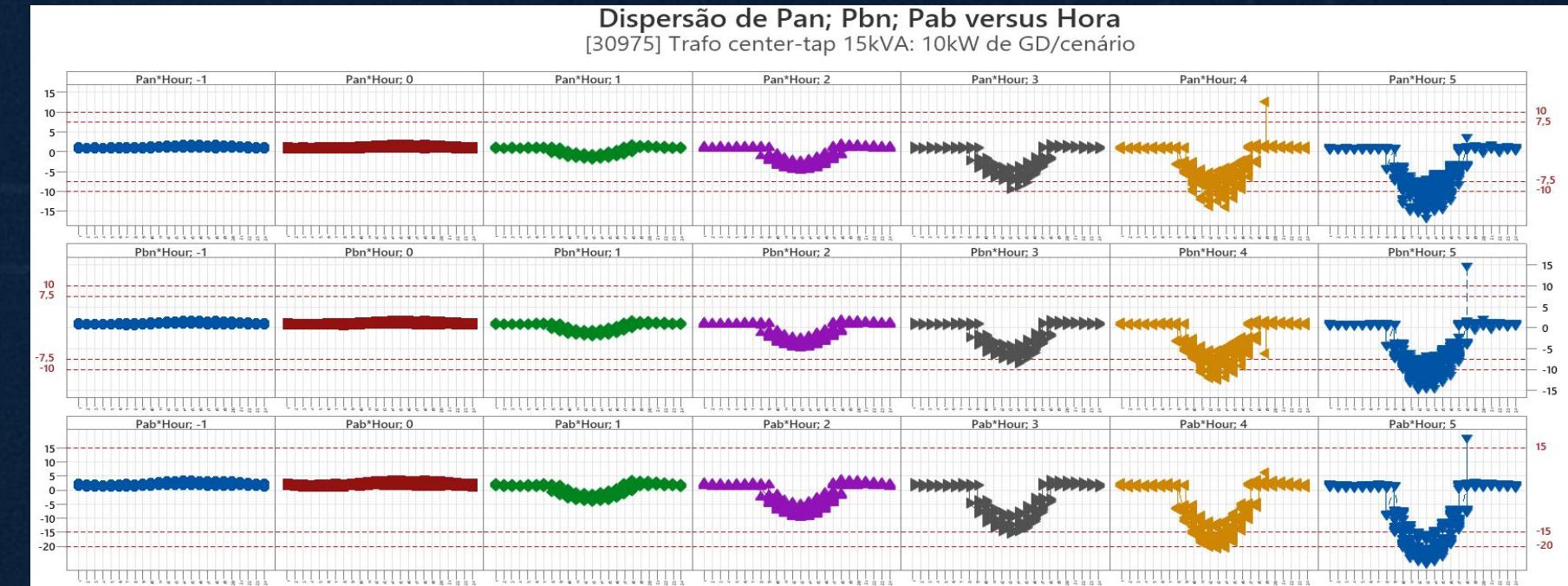
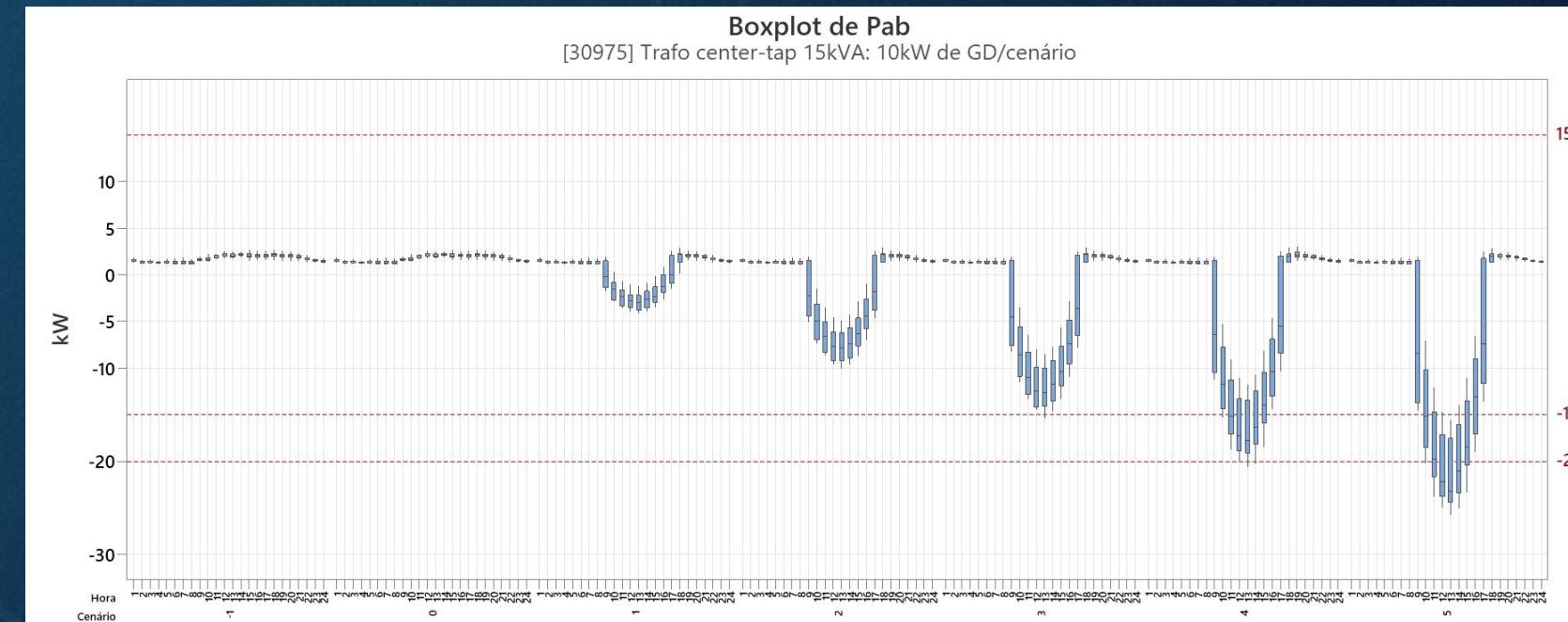


Análise gráfica “Trafo 4767” – POT de 0% a 244%

- Matriz de status dos indicadores monitorados em função da penetração de GD – [POT]

Análise gráfica “Trafo 30975” – POT de 0% a 333%

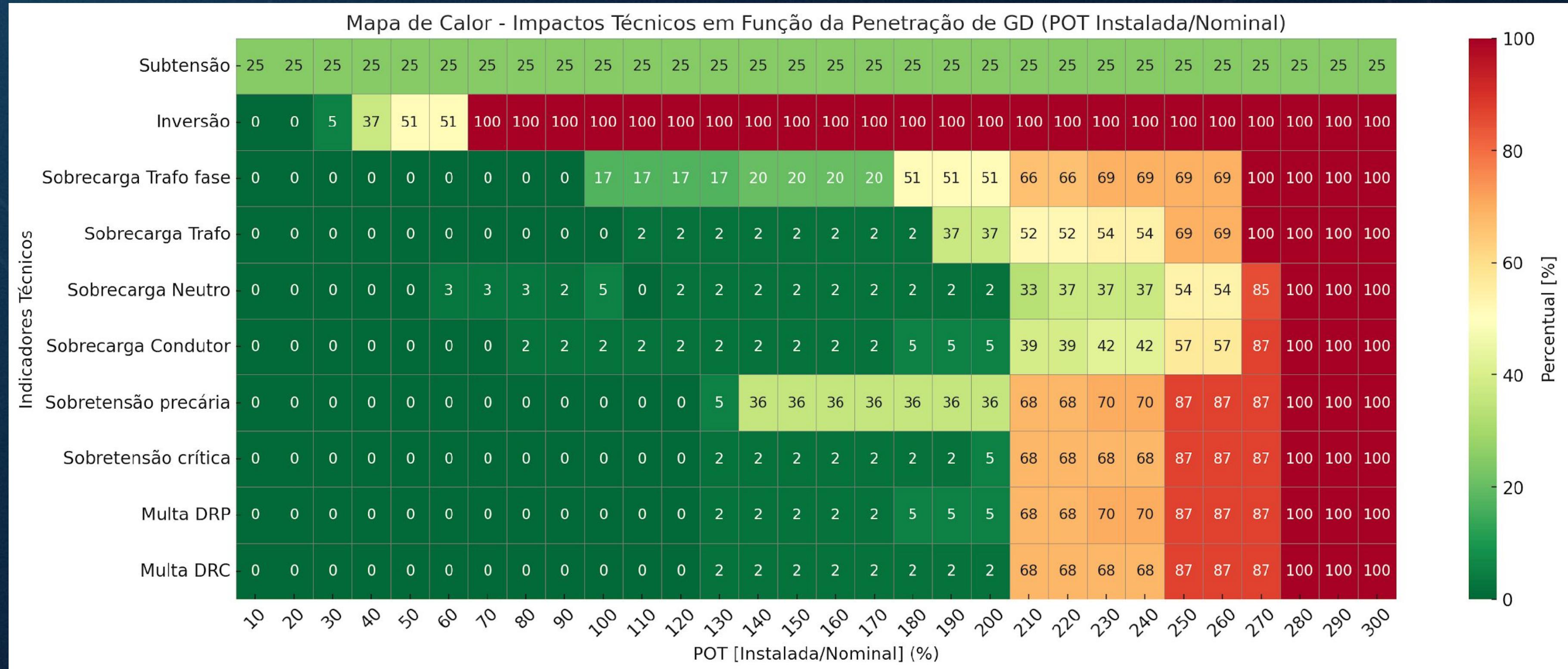
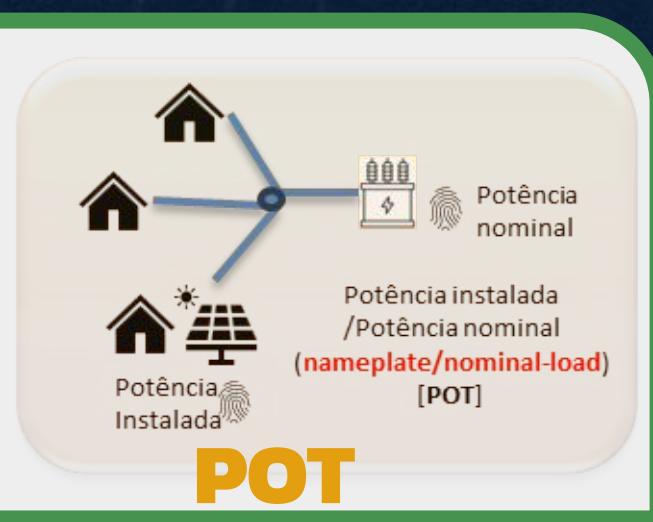
- Gráfico de potência, corrente e tensão com 5,4 e 3 cenários de penetração de GD, com 36 dias típicos cada, com 24 horas cada



- **Limite técnico:** A partir de 20 kW instalados ($POT>133$), a rede apresentou tensão precária
 - Na consolidação, **todos** os indicadores foram considerados violados a partir de $POT>267$ (40 kW instalados)

Potência instalada GD / Potência nominal do transformador BT [%]	Subtensão	Inversão	Sobrecarga Trafo fase	Sobrecarga Trafo	Sobrecarga Neutro	Sobrecarga Condutor	Sobretensão precária	Sobretensão crítica	Multa DRP	Multa DRC
Trafo 30975	<67									
	<133									
	<200									
	<267									

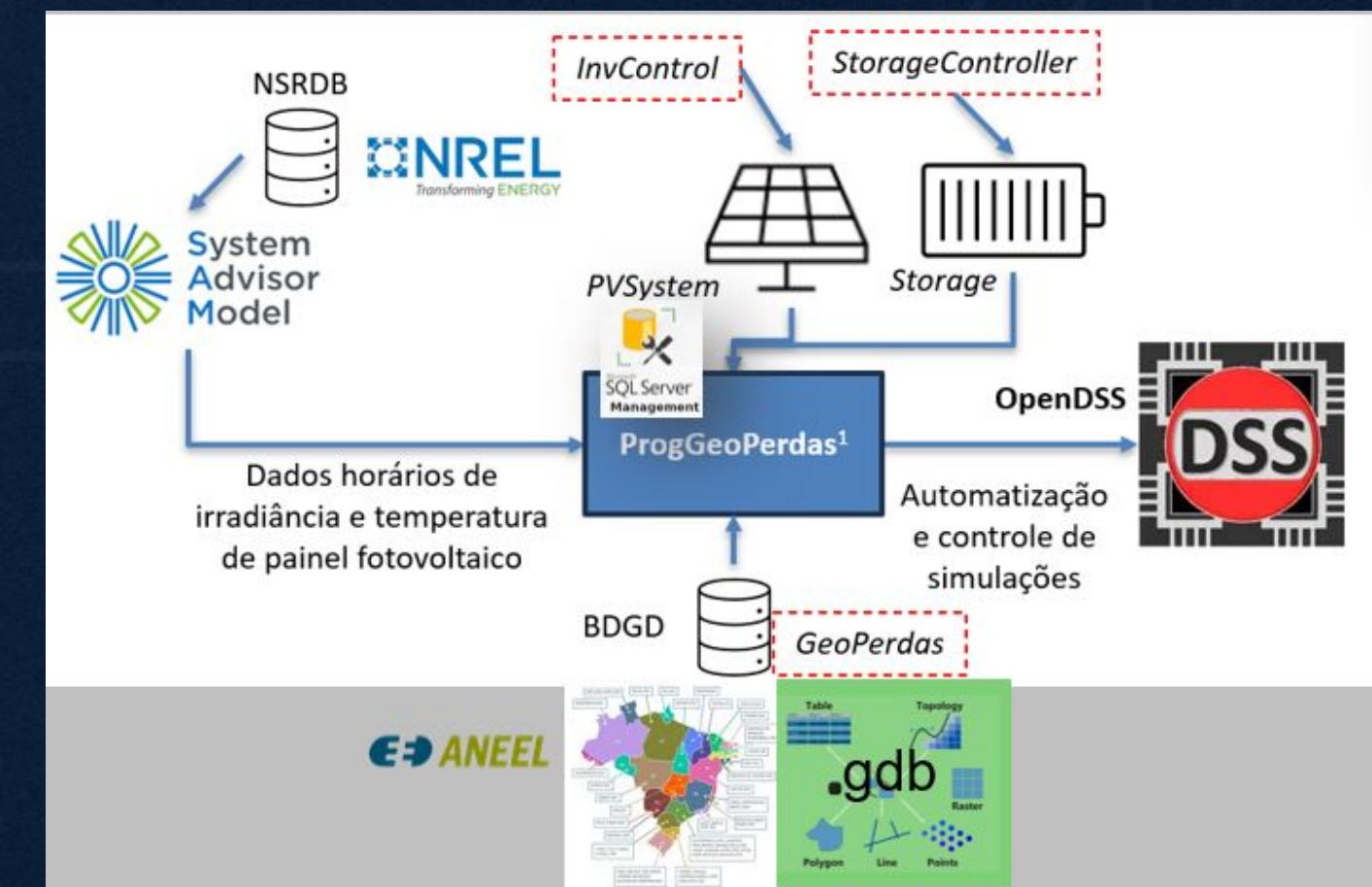
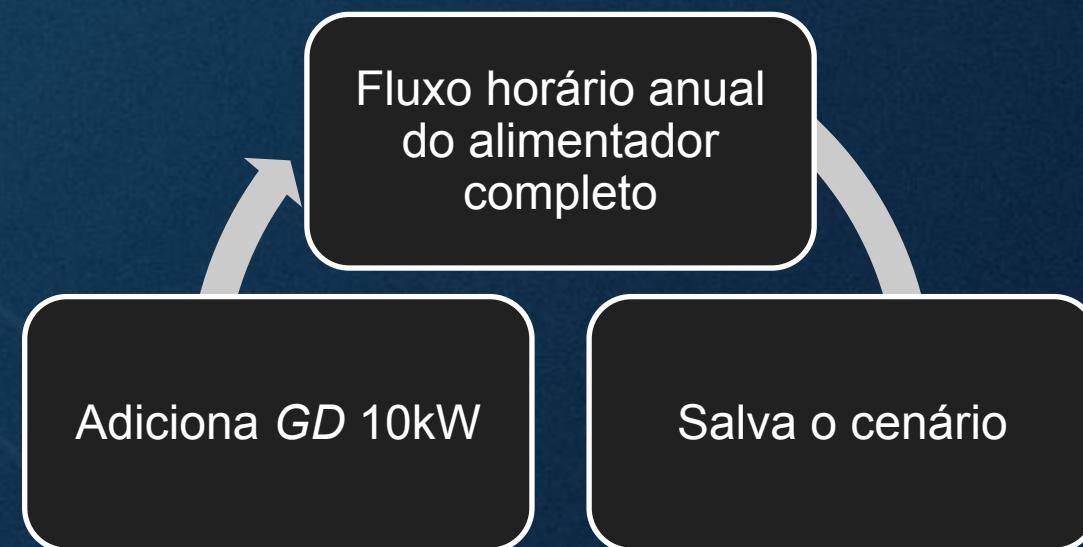
Caso 1 – Mapa de Calor dos Impactos Técnicos da micro GD em Função do Nível de Penetração (POT)



Caso 2: Controle de Saturação de Rede Secundária com BESS

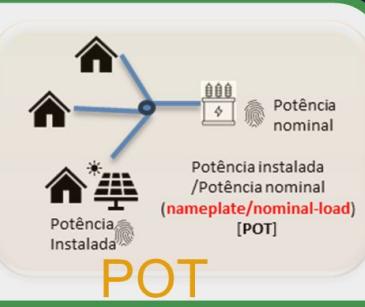
(1/3)

- Expansão gradativa de micro GD em uma única rede secundária
- Simulação completa do alimentador, monitorando todas as barras da rede secundária
- Implantação de BESS antes da ocorrência de saturação, permitindo continuidade da expansão de GD



Trafo 4844

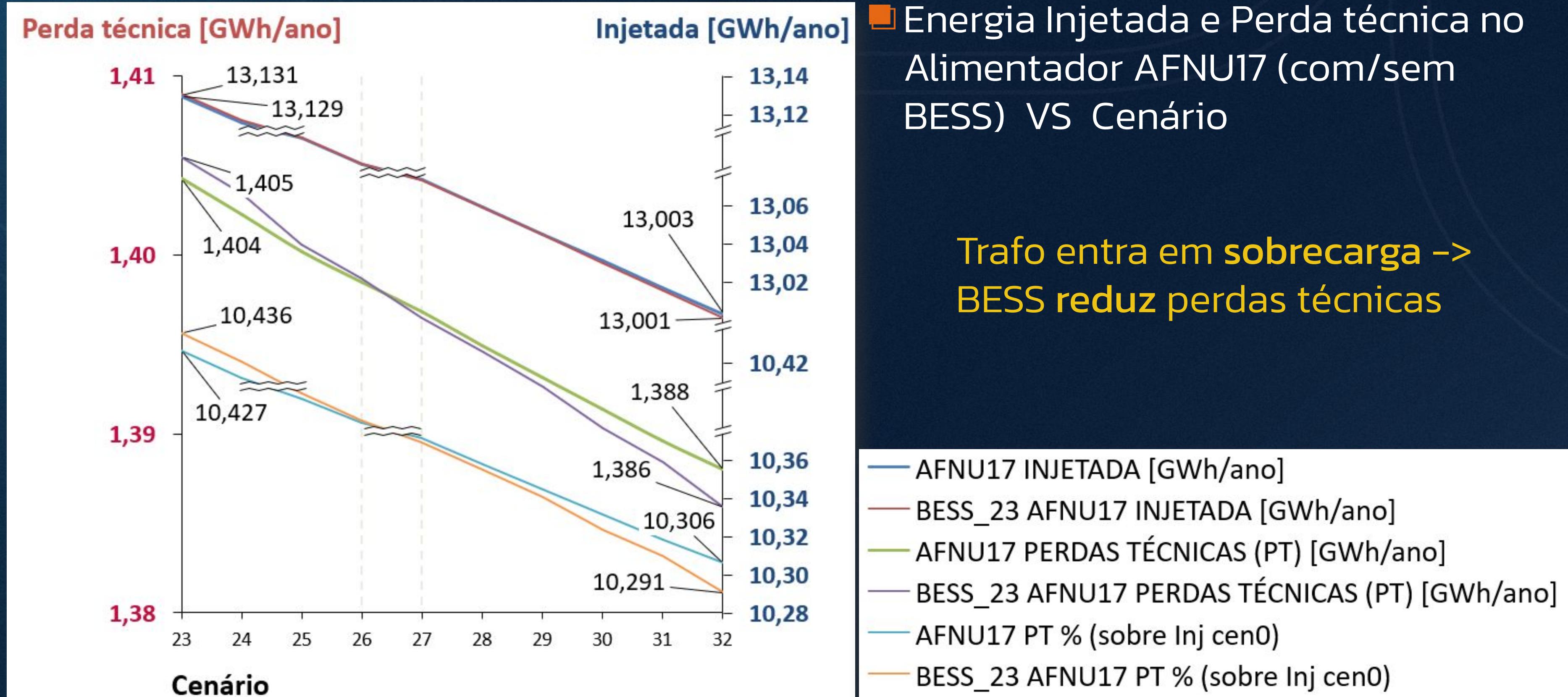
Caso 2: Controle de Saturação de Rede Secundária com BESS (2/3)



Curva do dia seguinte



Caso 2: Controle de Saturação de Rede Secundária com BESS (3/3)



Caso 3: Avaliação do Impacto de micro GD nas Perdas Técnicas do Alimentador

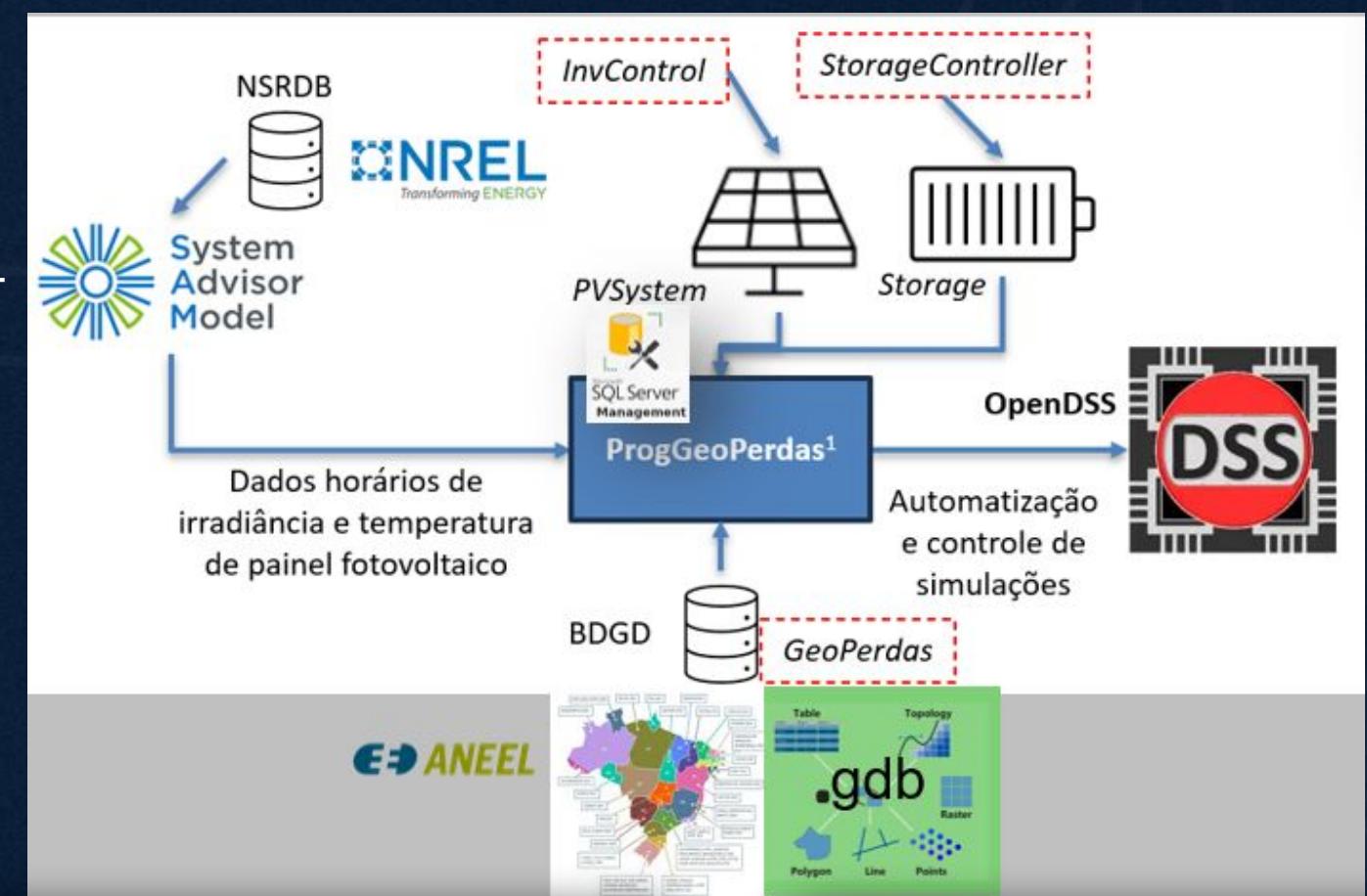
- Expansão gradativa e simultânea de micro GD em múltiplas redes secundária de um alimentador
- Monitoramento de todas as barras da rede secundária e das barras MT dos consumidores conectados.
- Análise focada no efeito sobre as perdas técnicas globais do alimentador, identificando pontos de inflexão
- Estudo repetido em dois outros alimentadores para validação

Fluxo horário anual do alimentador completo

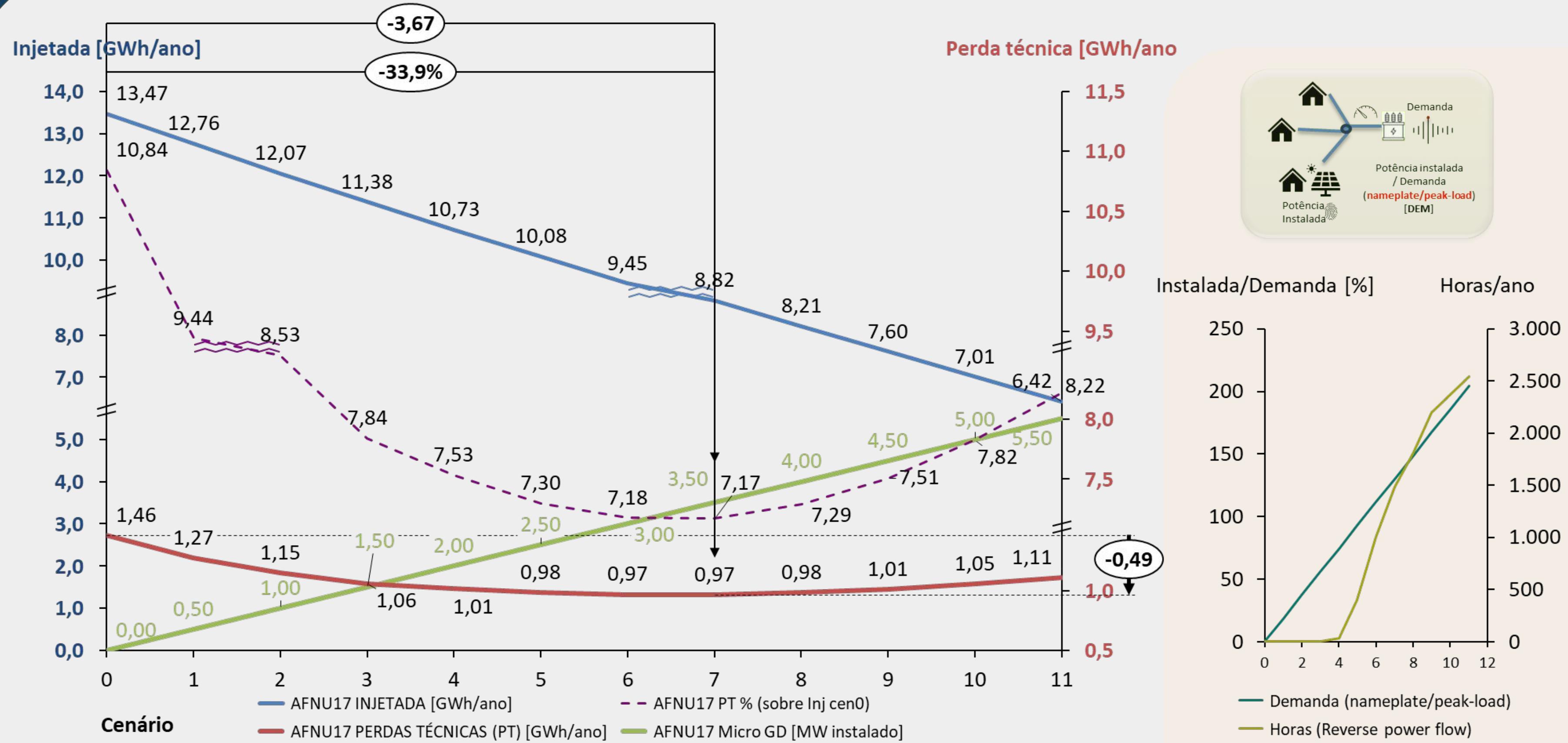
Adiciona GD 10kW
(total de 500 kW)

Salva o cenário

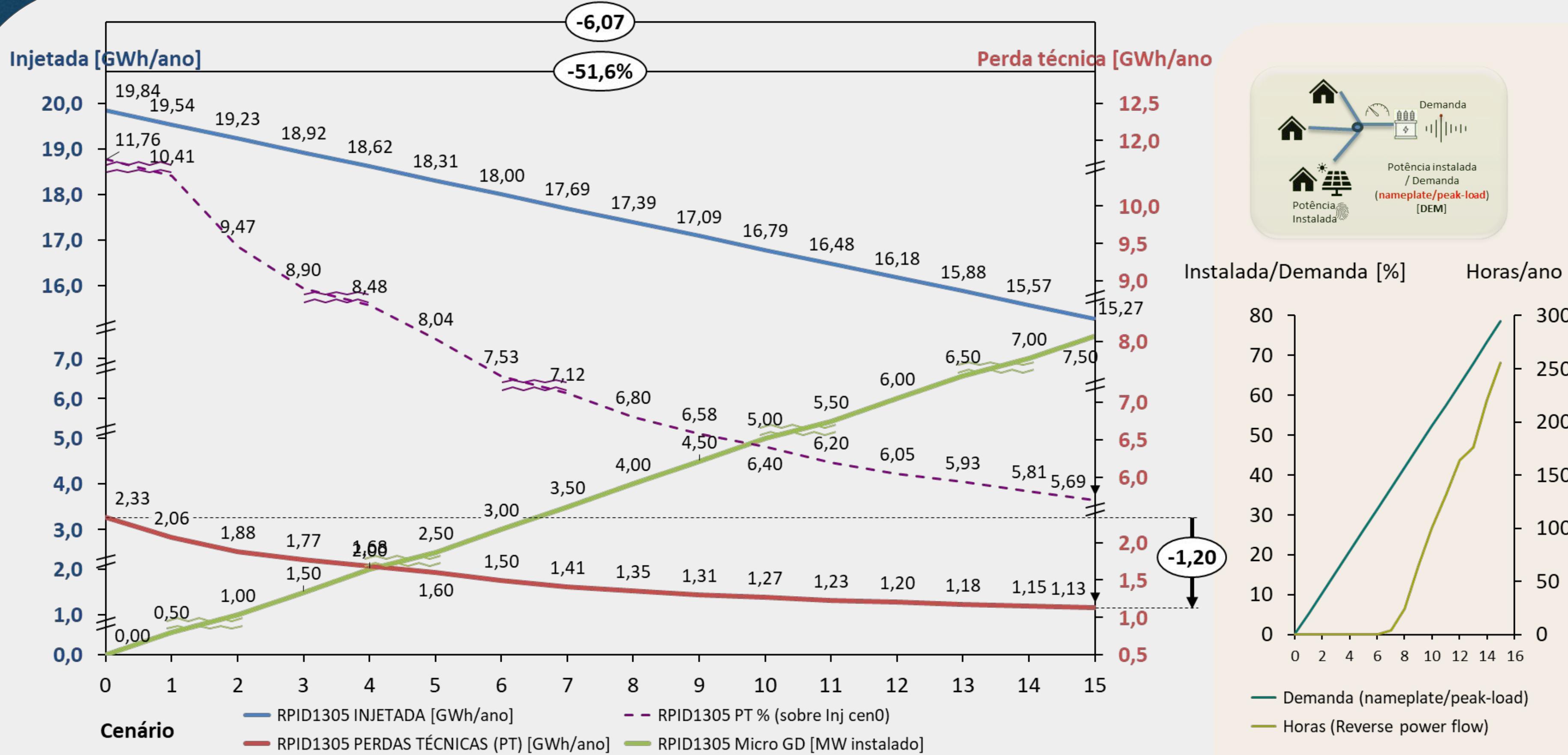
Sorteia **50** consumidores



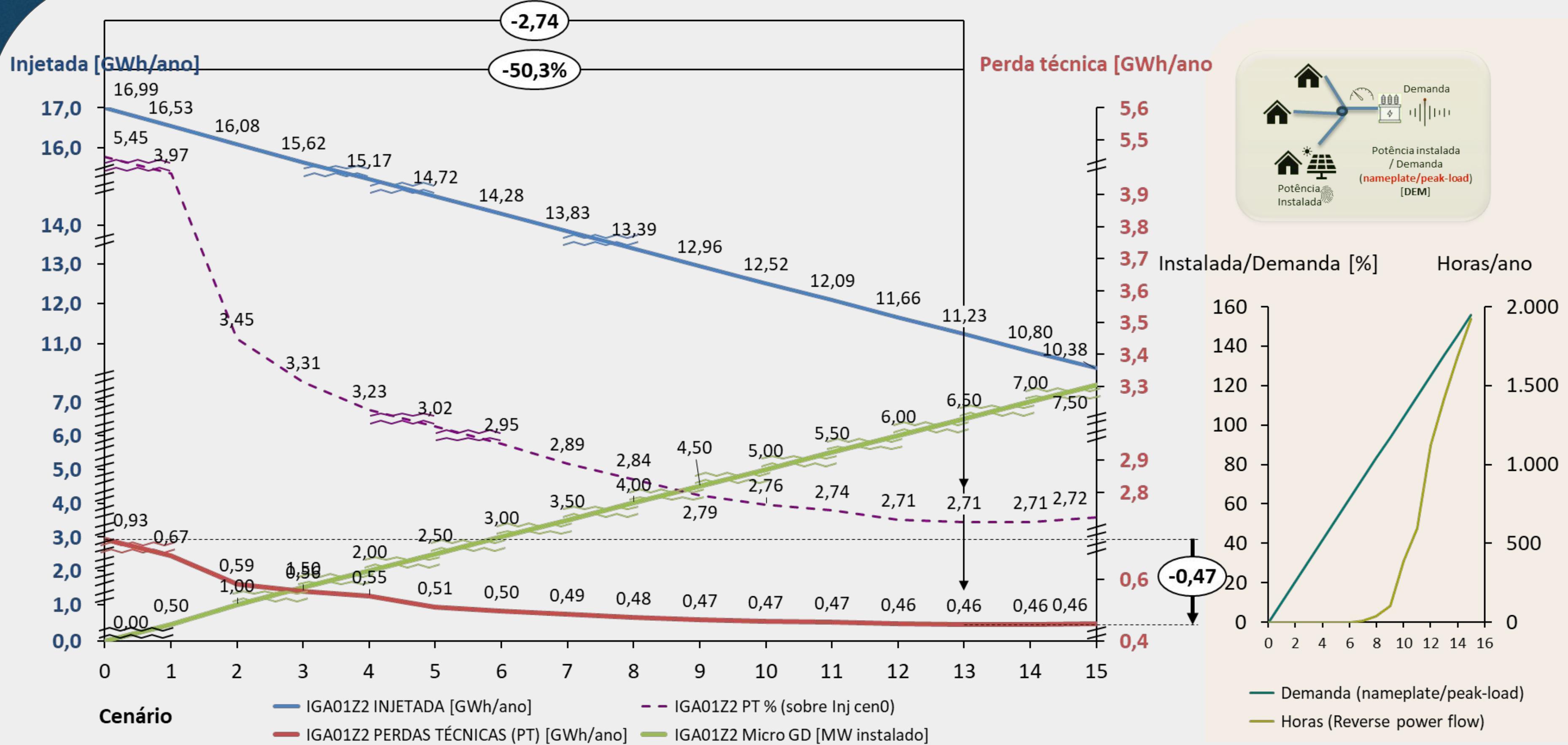
Caso 3 – Resultados – Alimentador AFNU17 – (16%)



Caso 3 – Resultados – Alimentador RPID1305 – (17%)



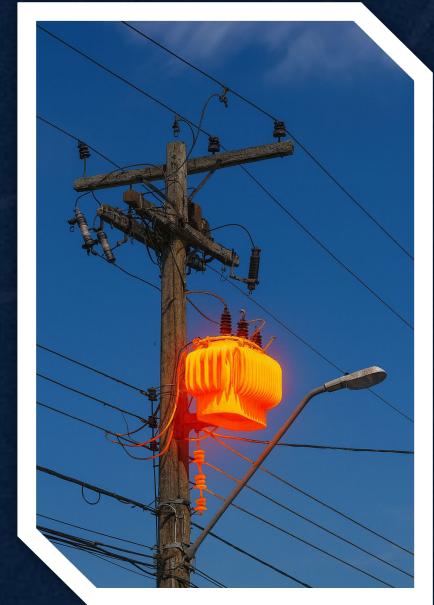
Caso 3 – Resultados – Alimentador IGA01Z2 – (24%)



Conclusões

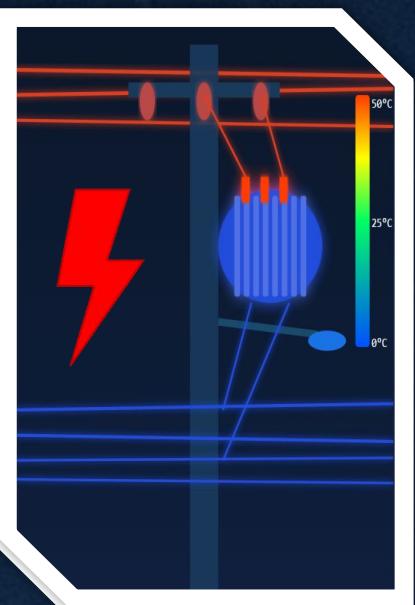
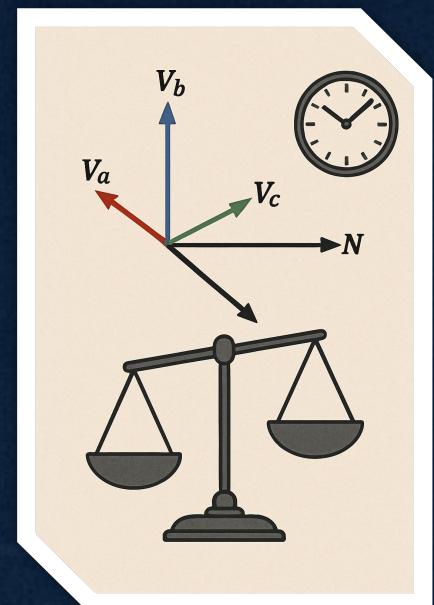
Carregamento

- *PVsystem* garantiu representação fiel da potência gerada
- Inversão de fluxo inicia em POT=30 (5% dos trafos) e atinge 100% em POT=70
- O desequilíbrio de geração entre fases sobrecarrega um enrolamento mais cedo
- BESS pode ser mais conveniente no limite técnico



Tensão

- ~25% das redes BT já apresentam **subtensão** no estado inicial
- Fluxo invertido **não** implica precariedade de tensão
- **Sobretensão** precária surge apenas com $POT > 100$
- Multas DRP/DRC tornam-se significativas com $POT \geq 200$
- BESS elimina sobretensão diurna e subtensão noturna, mas não deve impedir inversão de fluxo



Neutro

- Corrente no neutro **sobe** rapidamente mesmo com carga equilibrada, **reduz** com balanceamento e estabiliza com aumento de GD (maior distribuição)
- Variação não afetaria cobertura **tarifária** caso capturada no modelo de Perdas
- BESS não deve resolver o problema de balanceamento

Perdas técnicas

- Perdas aumentam localmente na rede secundária, mas **reduzem globalmente** no alimentador
- Ponto ótimo varia: 3,5 MW a 7,5 MW → Redução de 34% a 52%
- A distorção alocativa entre perdas técnicas e não técnicas resulta em distorção de incentivos
- BESS se apresenta melhor na rede BT quando o trafo está prestes a sobrecarregar

Obrigado!