



O futuro da
energia no Brasil é
distribuído!



Palestra resultados das simulações na Baixa Tensão

· Vinicius Souza



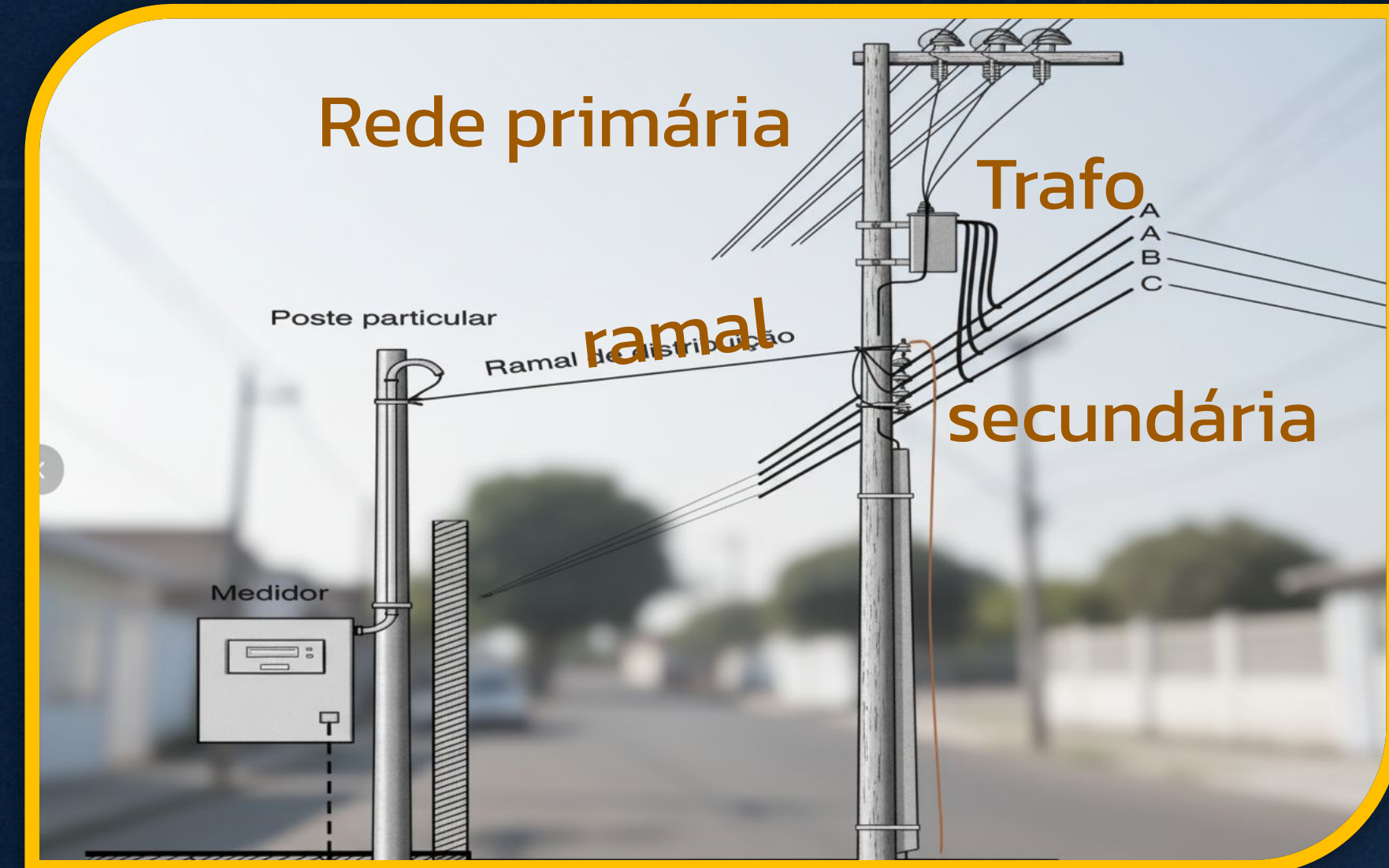
Objetivos

- 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.



Seleção dos alimentadores

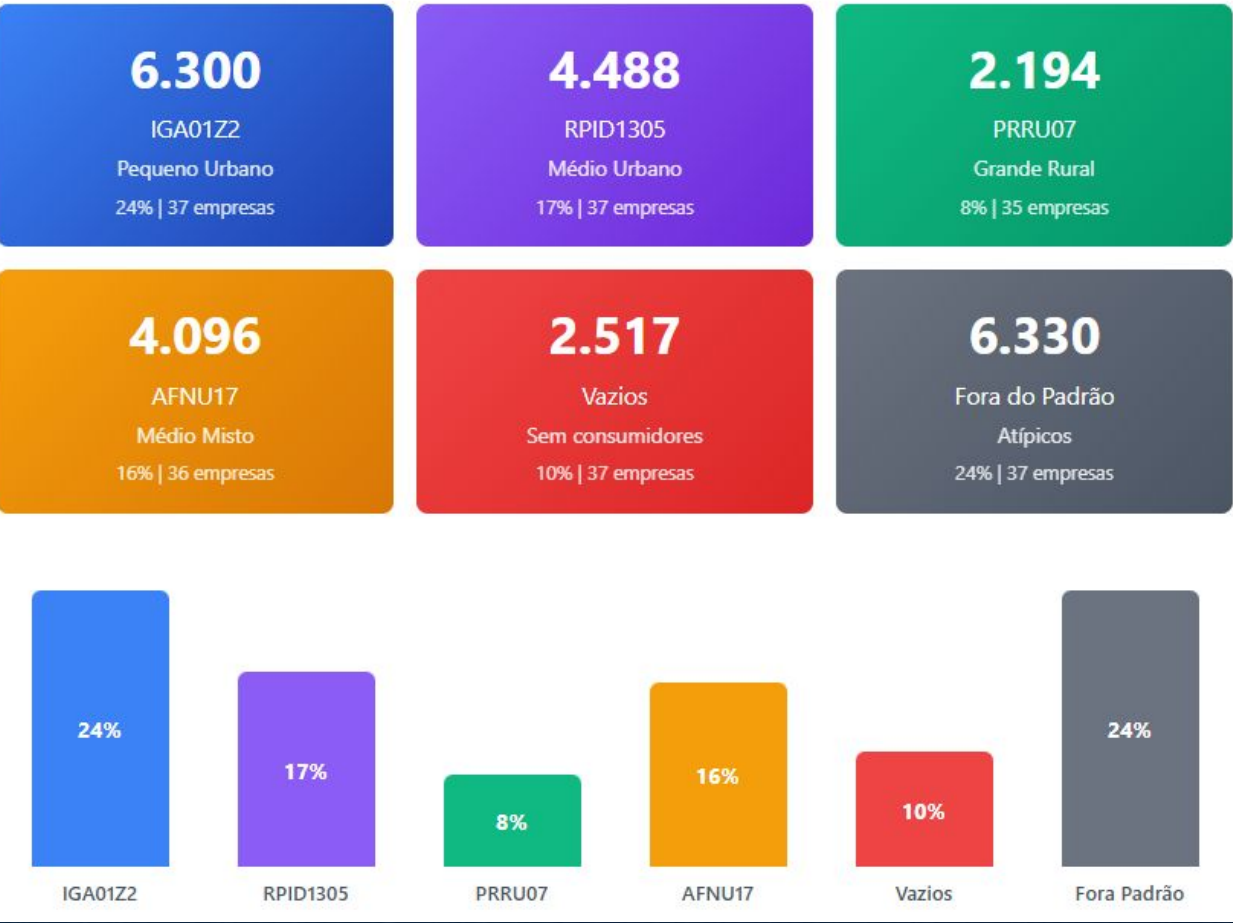
Clusterização de Alimentadores de Distribuição

Análise de ~26 mil alimentadores em 37 distribuidoras brasileiras



Distribuição dos Alimentadores por Cluster

Como os 26 mil alimentadores se agrupam nos perfis identificados



Pequeno Urbano IGA01Z2

EQTL Piauí | 6.300 alimentadores (24%)



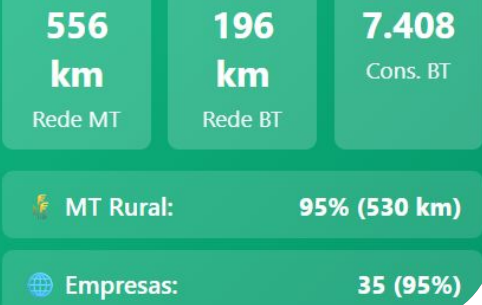
Médio Urbano RPID1305

EDP São Paulo | 4.488 alimentadores (17%)



Grande Rural PRRU07

CEMIG Minas Gerais | 2.194 alimentadores (8%)



Médio Misto AFNU17

CEMIG Minas Gerais | 4.096 alimentadores (16%)



Alimentadores Vazios

2.517

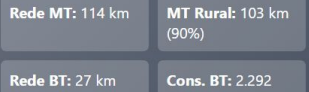
10% do total | 37 empresas



Fora do Padrão

6.330

24% do total | 37 empresas



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
CEEE_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

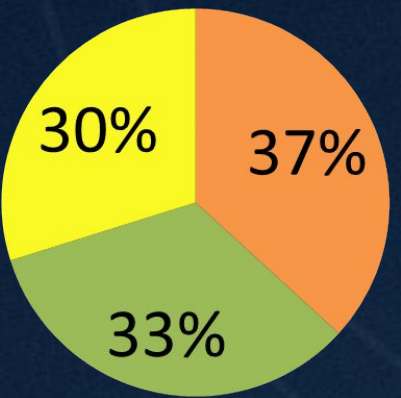
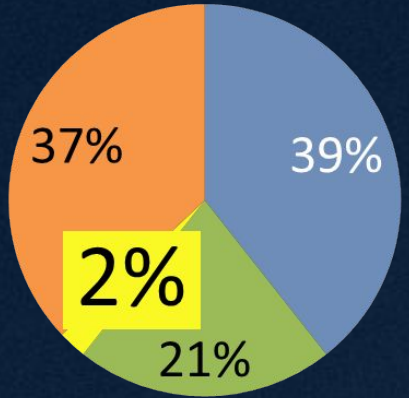


- As redes secundárias são identificadas por código de instalação do transformador MT/BT
- Foram definidos 8 clusters
- Foi selecionado um representante de cada cluster identificado no alimentador AFNU17



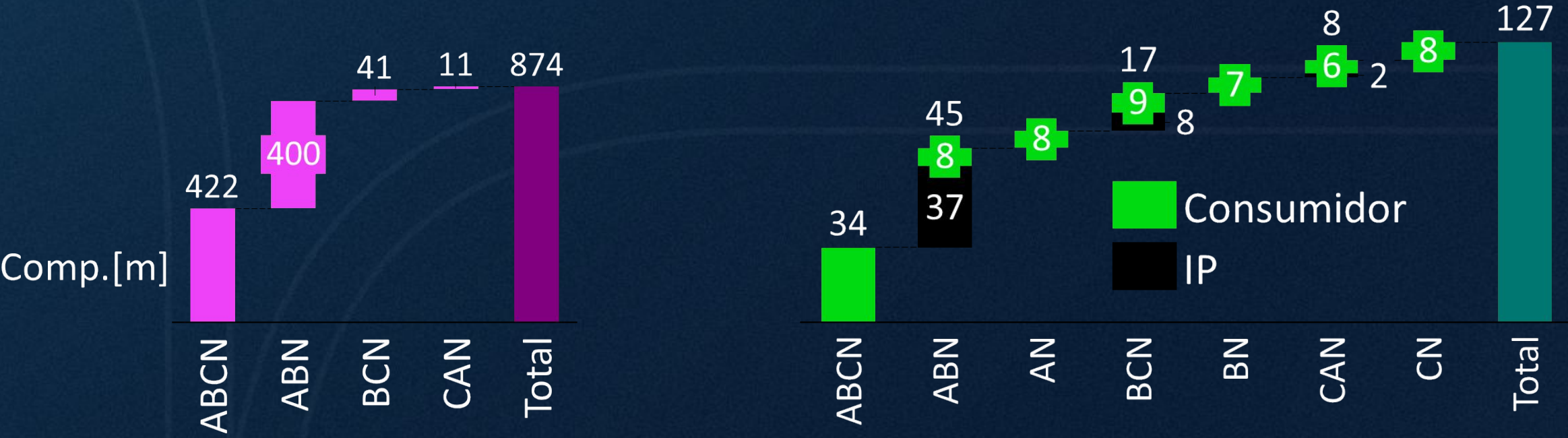
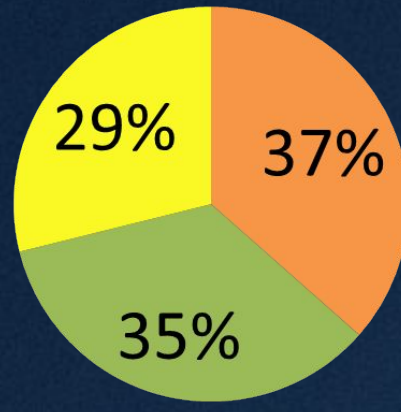
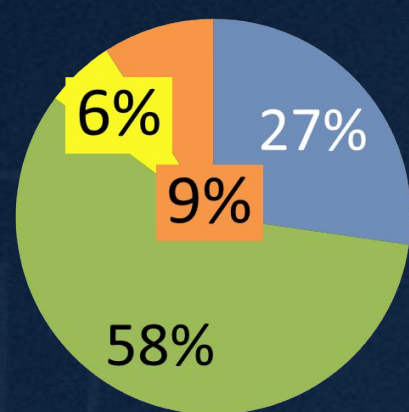
Cluster 1 (23023) T:12.6% C:1.8%	Cluster 2 (30954) T:31.3% C:0.3%
Cluster 3 (4711) T:2.2% C:15.7%	Cluster 4 (4655) T:2.8% C:19.8%
Cluster 5 (4767) T:14.8% C:24.9%	Cluster 6 (4795) T:2.3% C:13%
Cluster 7 (30975) T:30.8% C:0.9%	Cluster 8 (4844) T:3.3% C:23.7%

Rede Secundária: "Trafo 4844" – CEMIG – AFNU17



Carga [kWh]

93 kVA



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

■ Caso 1 – Saturação de Rede Secundária

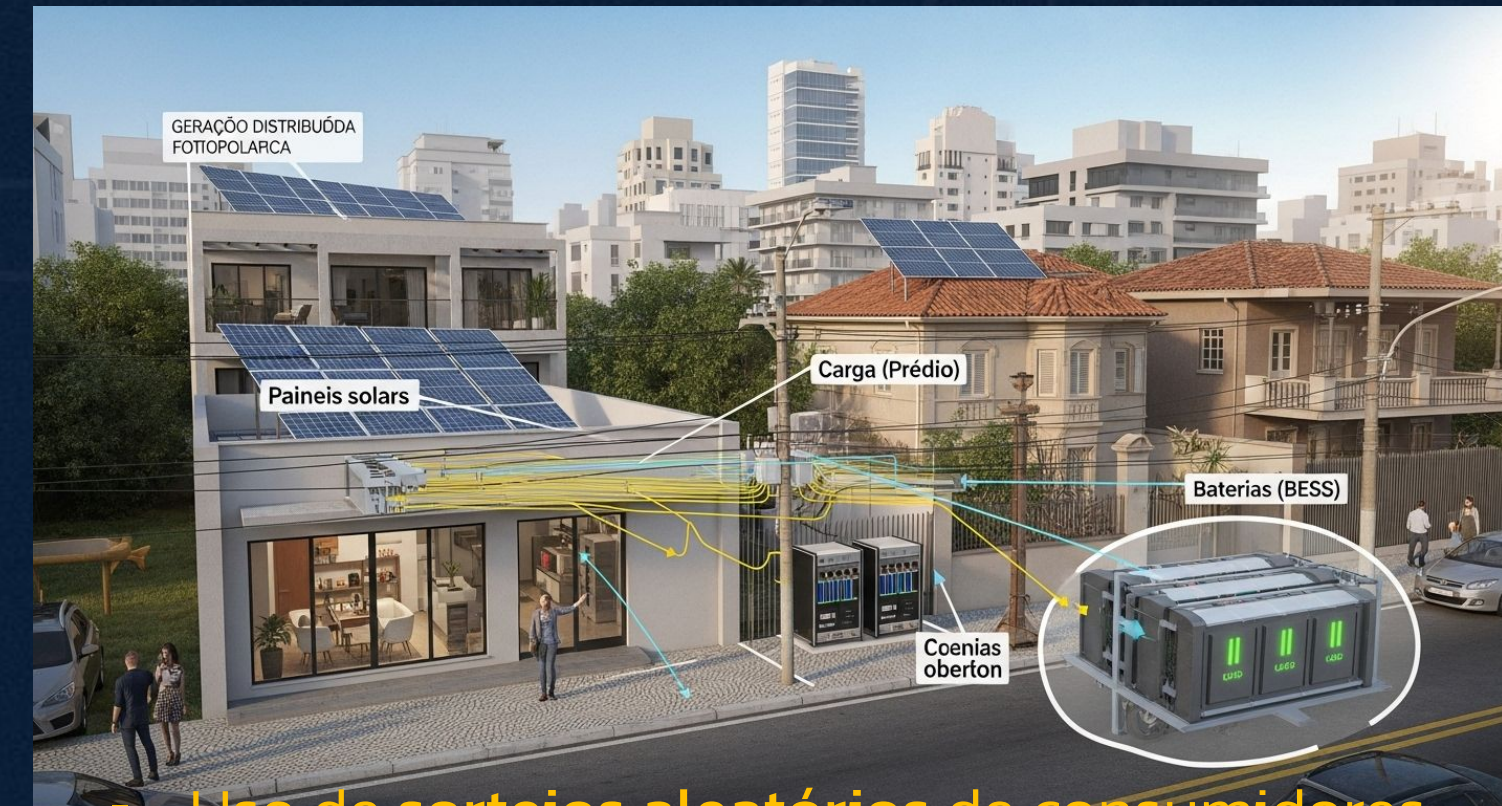
- Expansão gradativa de micro GD em uma única rede BT
- Simulação completa do alimentador
- Monitoramento de todas as barras da rede BT
- Repete para outras 07 redes secundárias

■ 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

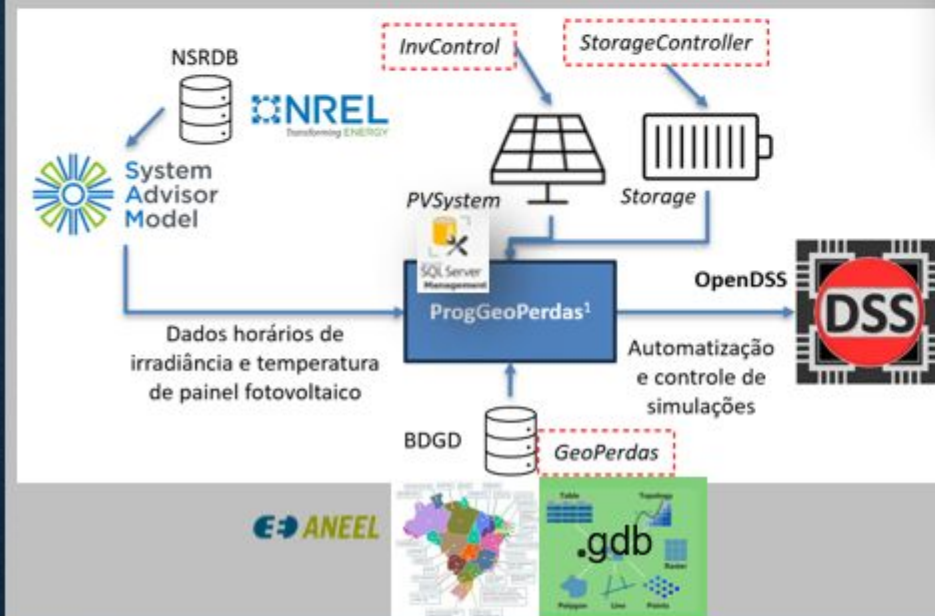


- Uso de sorteios aleatórios de consumidores
- Inserção de GD até o limite técnico
- Testes com diferentes tipos de carga, redes e transformadores
- Derivação de indicadores a partir dos resultados
- Perdas, sobretensão, sincronização de carga, Multas DRP e DRC

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

Clusterização de Alimentadores de Distribuição

Análise de ~26 mil alimentadores em 37 distribuidoras brasileiras

~26.000

Alimentadores Totais

37

Distribuidoras

~99% do total do Brasil

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%

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 1

Caso 2

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

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

3. Simulações

- 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**

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

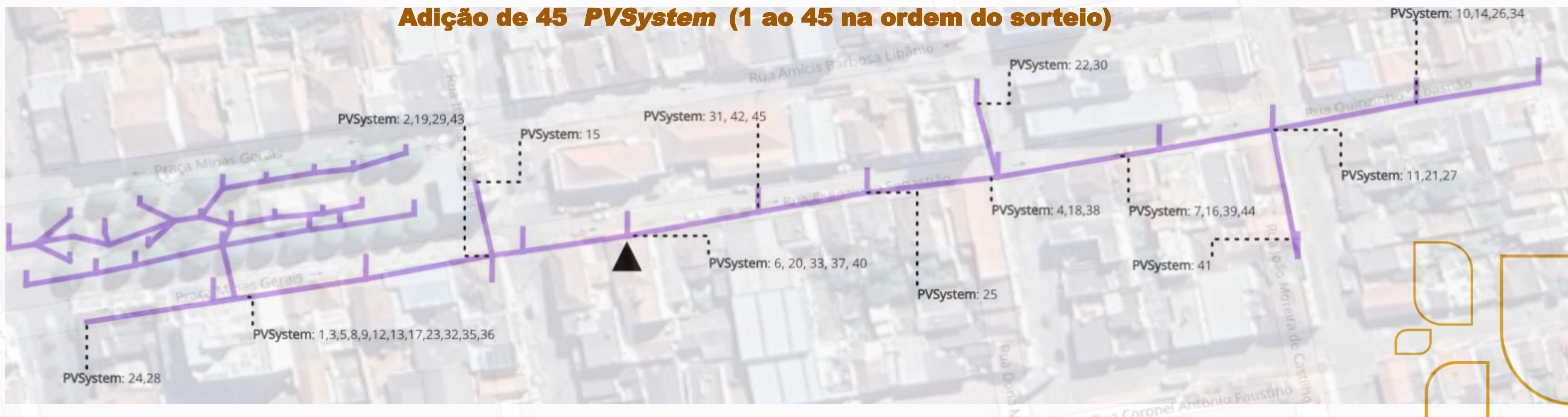
Critérios

- 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

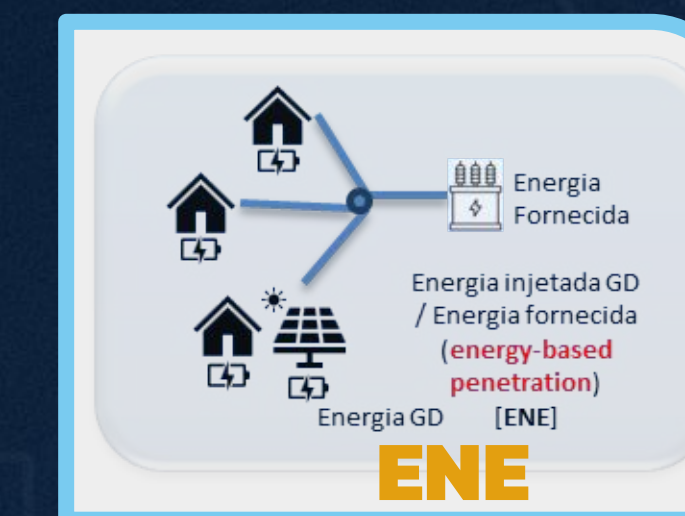
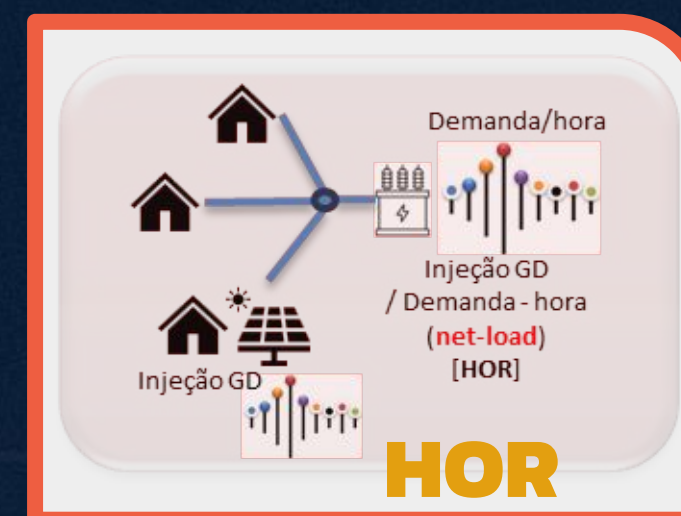
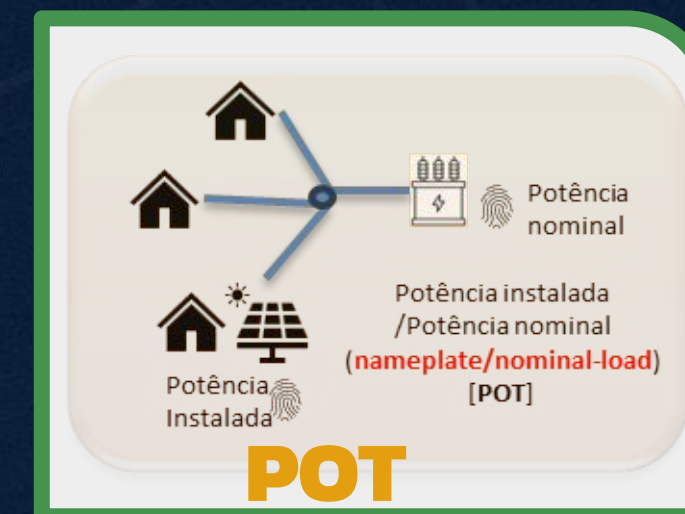
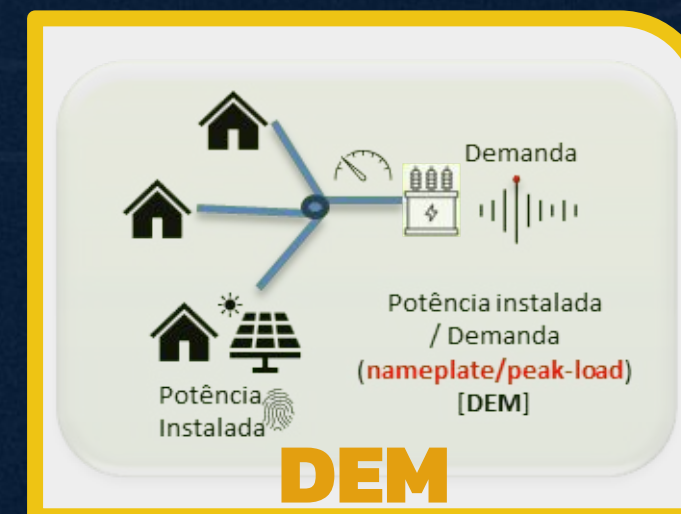
Adição de 45 PVSystem (1 ao 45 na ordem do sorteio)



Indicadores de penetração de GD (1/2)

- 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 ✓

Internacionais



- 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\$)

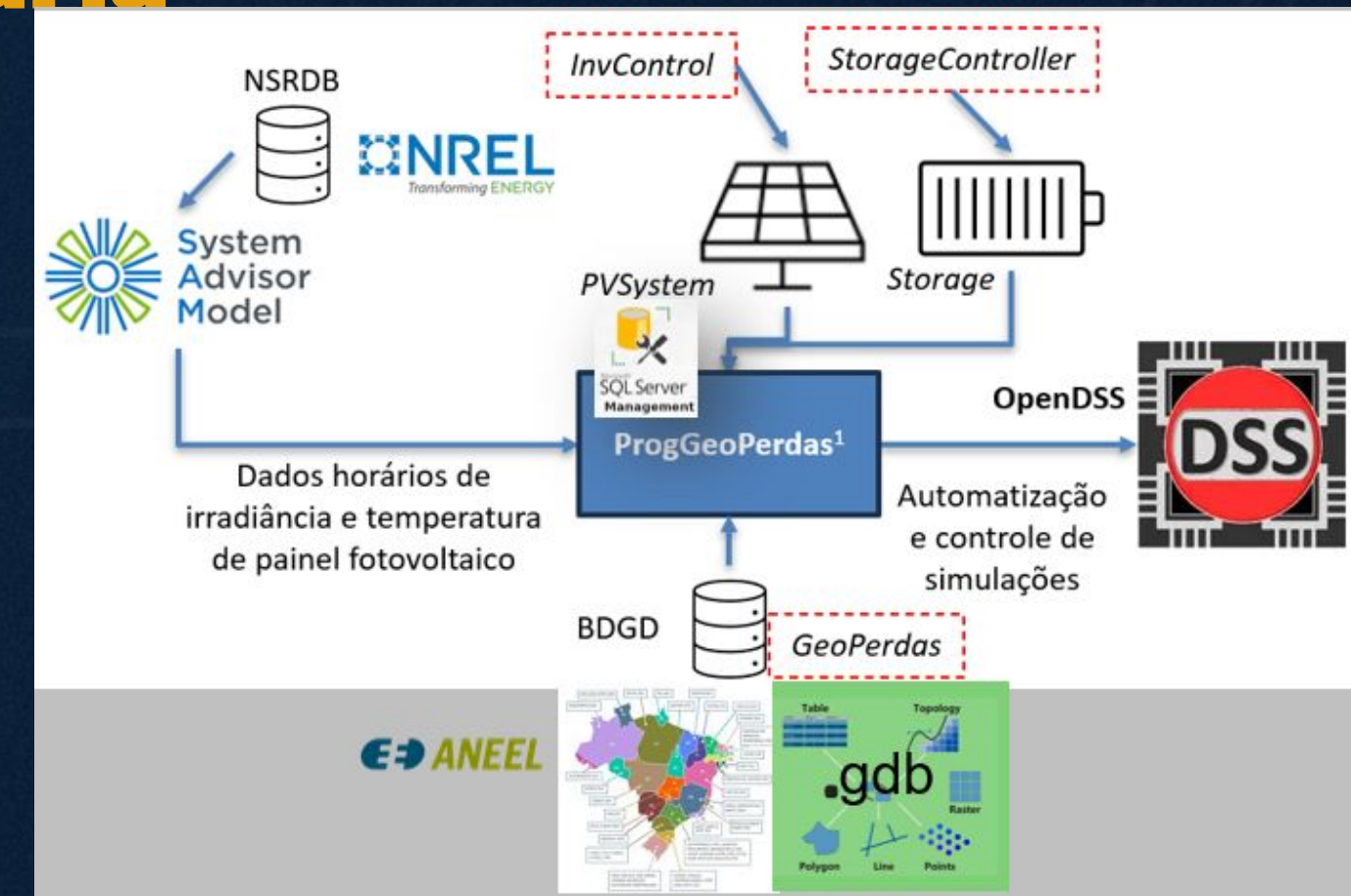
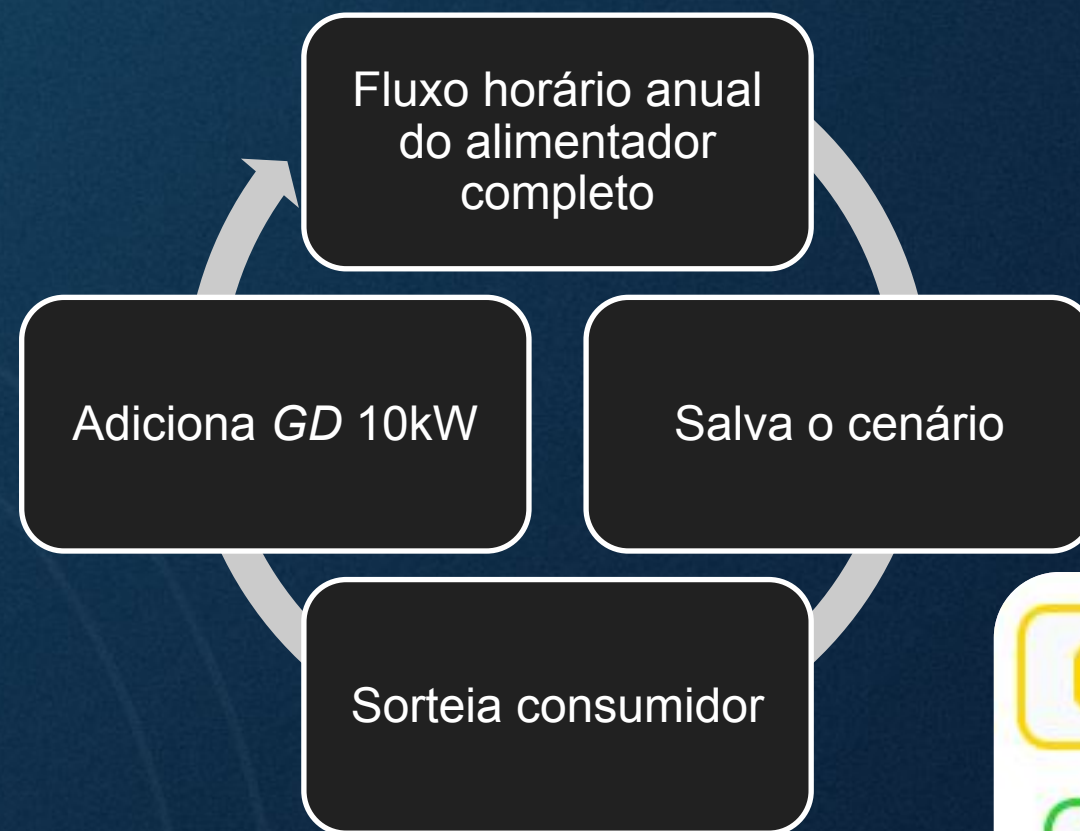
DRC (R\$)

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



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%

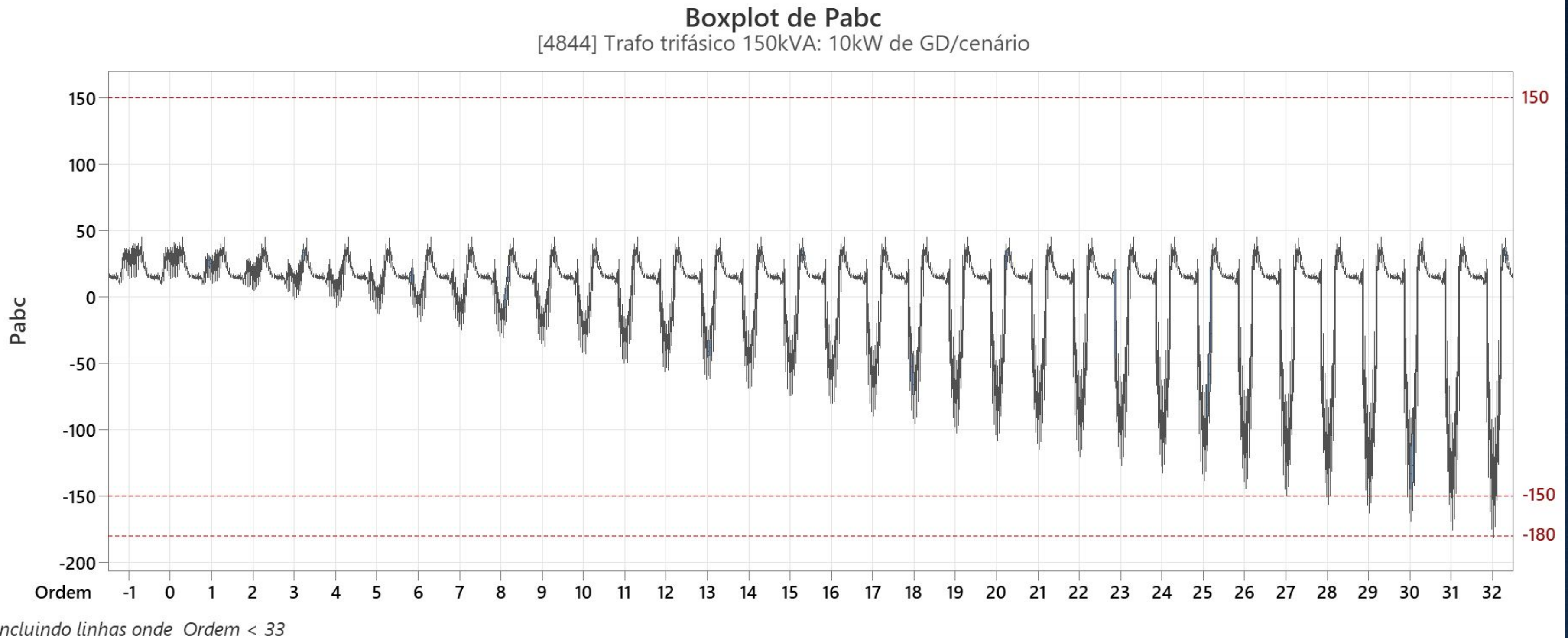
Cluster 6 (4795) T:2.3% | C:13%

Cluster 7 (30975) T:30.8% | C:0.9%

Cluster 8 (4844) T:3.3% | C:23.7%

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

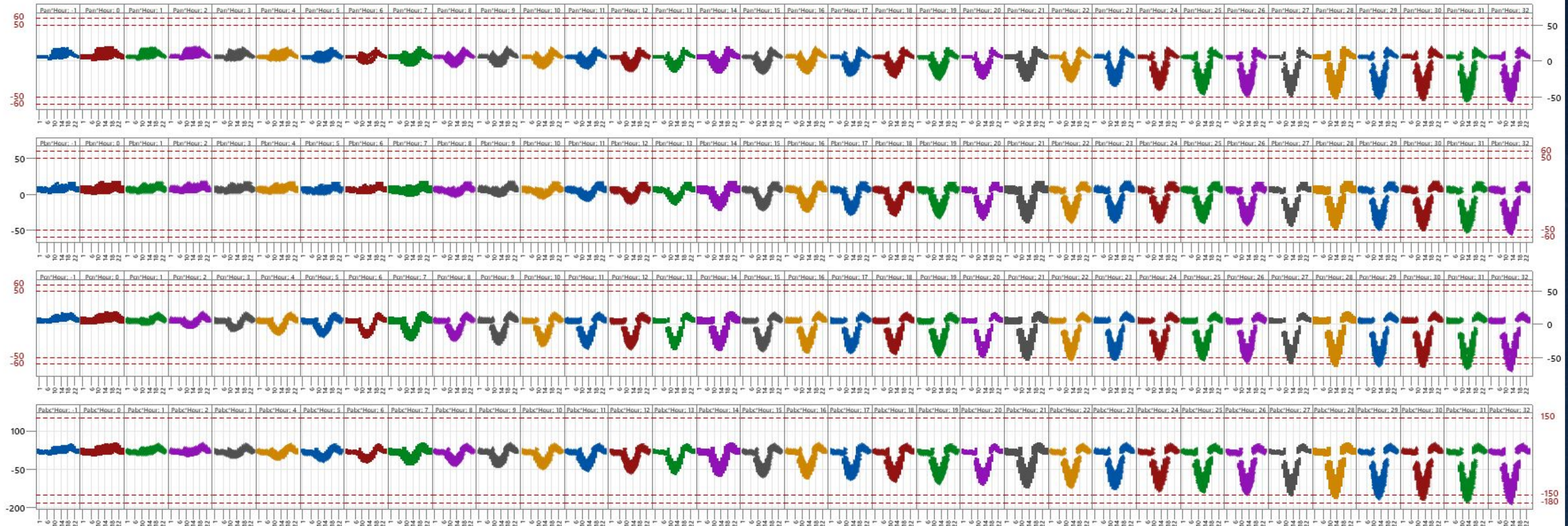
- Gráfico de potência com 32 cenários de penetração de GD, com 36 dias típicos cada, com 24 horas cada



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

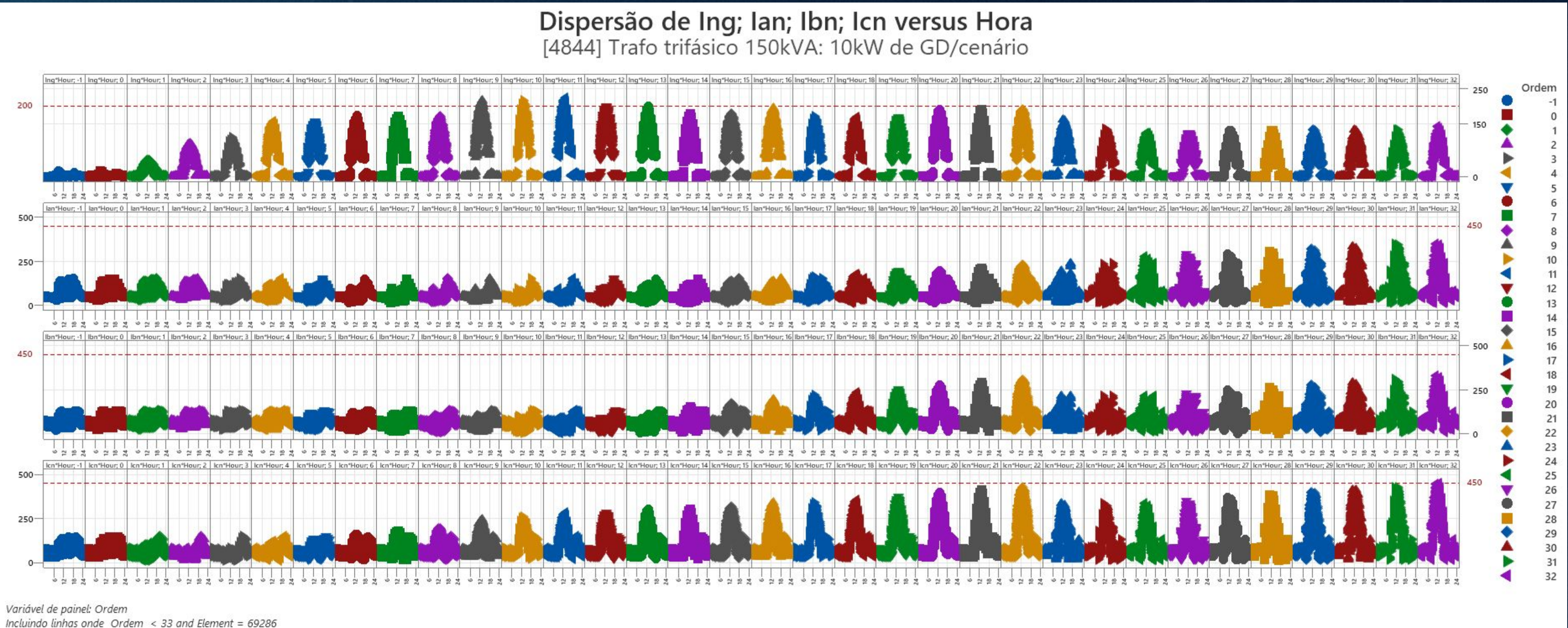
- Gráfico de potência com 32 cenários de penetração de GD, com 36 dias típicos cada, com 24 horas cada

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%

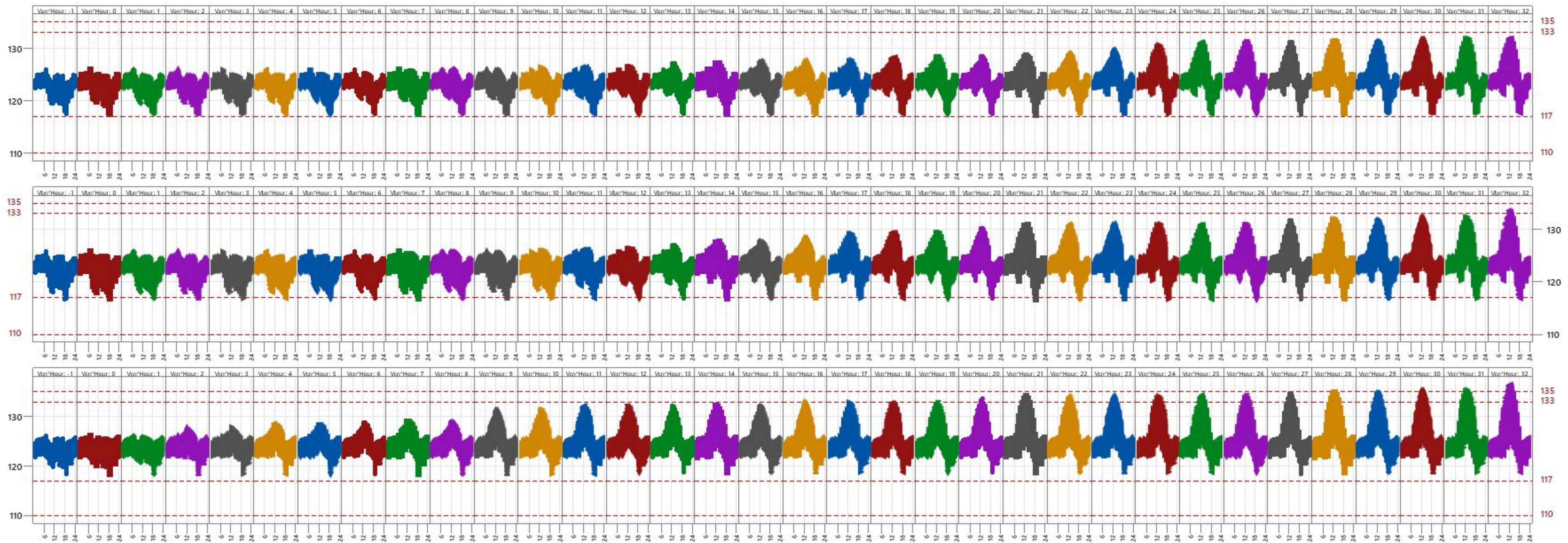
- Gráfico de corrente com 32 cenários de penetração de GD, com 36 dias típicos cada, com 24 horas cada



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

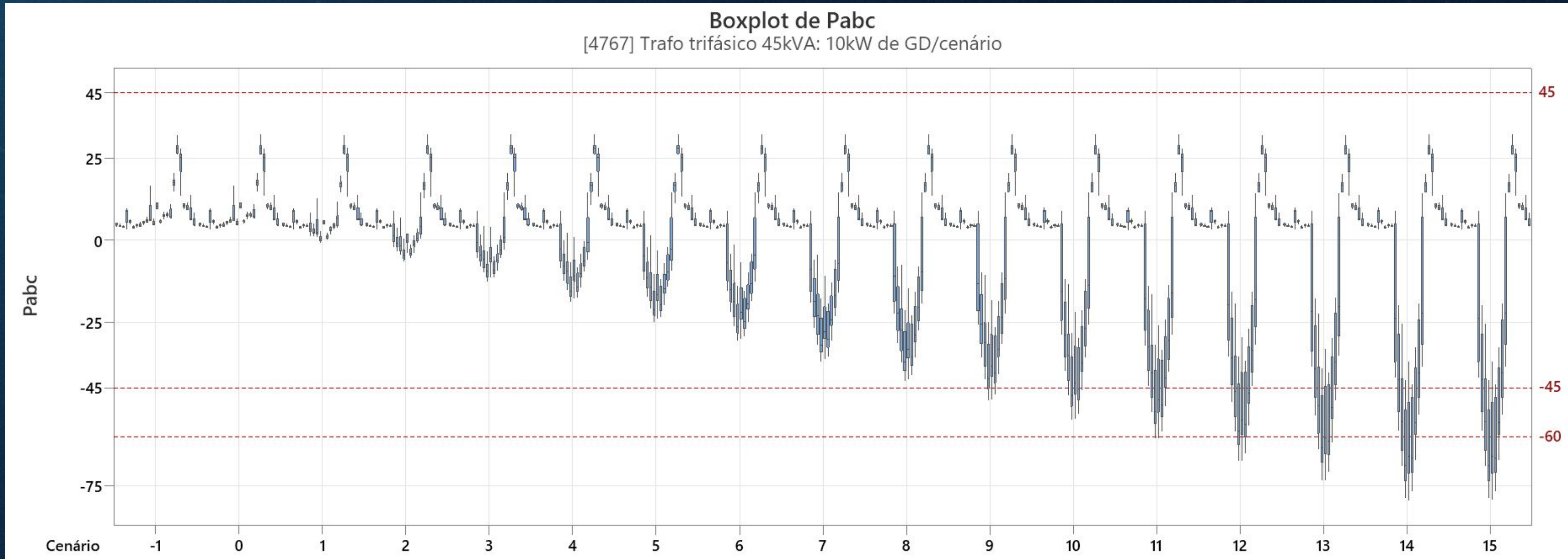
- Gráfico de tensão com 32 cenários de penetração de GD, com 36 dias típicos cada, com 24 horas cada

Dispersão de Van; Vbn; Vcn versus Hora
[4844] Trafo trifásico 150kVA: 10kW de GD/cenário



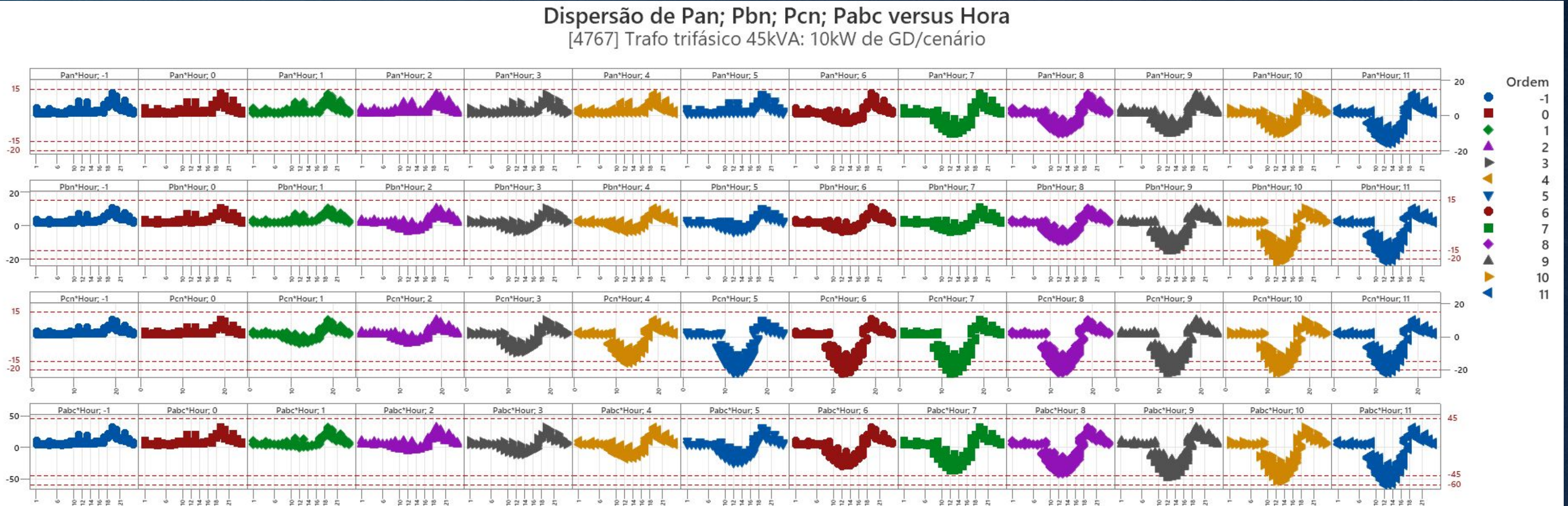
Análise gráfica "Trafo 4767" – POT de 0% a 333%

- 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%

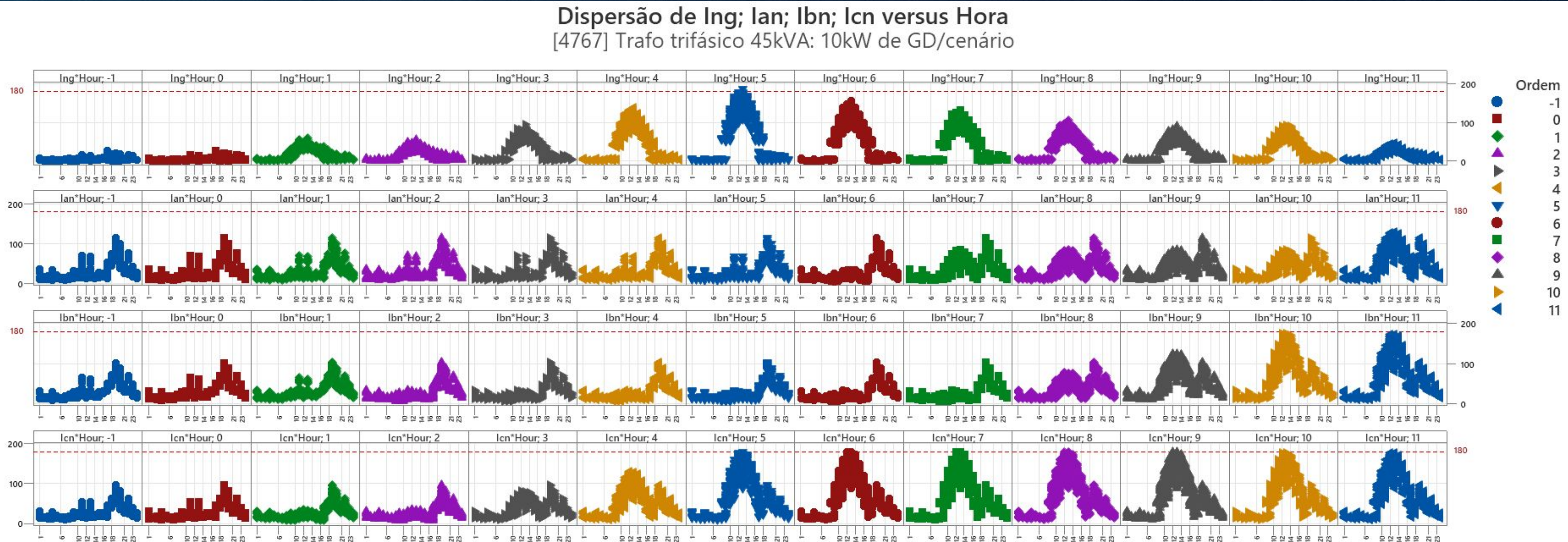
- Gráfico de potência com 11 cenários de penetração de GD, com 36 dias típicos cada, com 24 horas cada



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

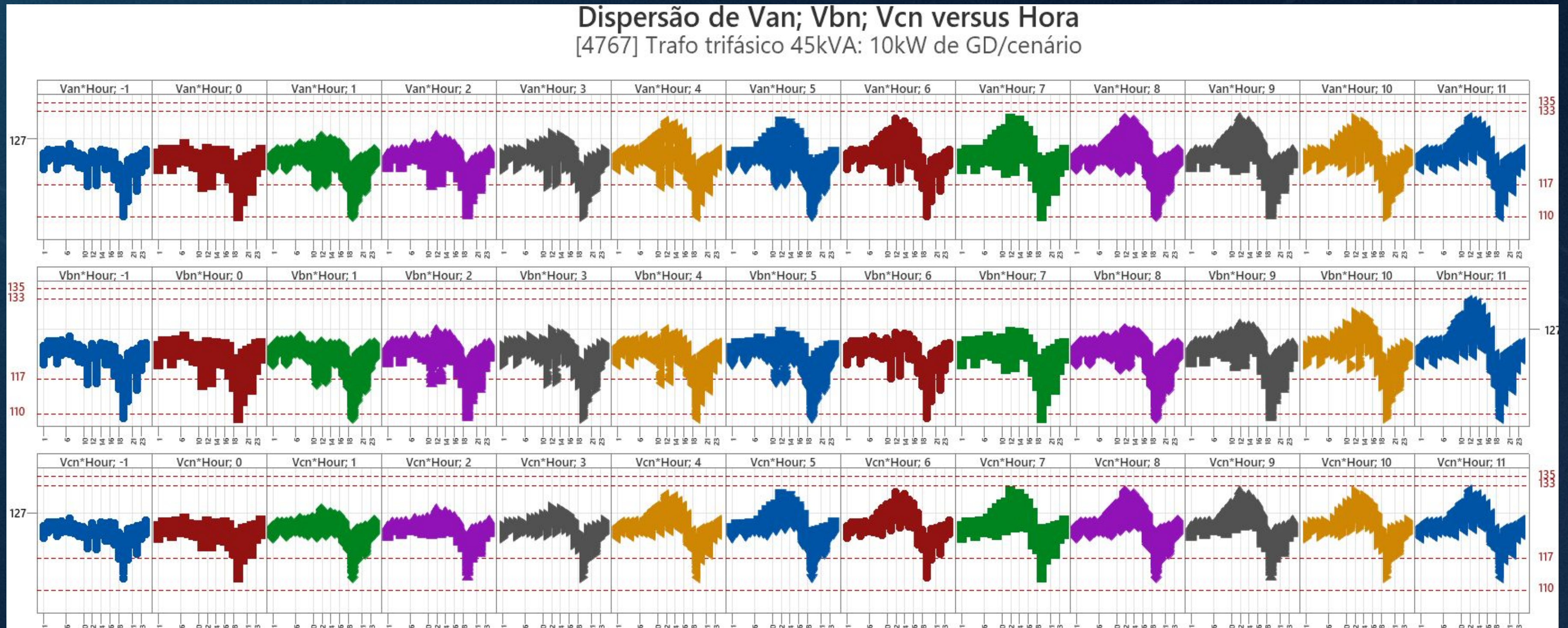


Variável de painel: Ordem

Incluindo linhas onde ORDEM < 12 And Element = 68026

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

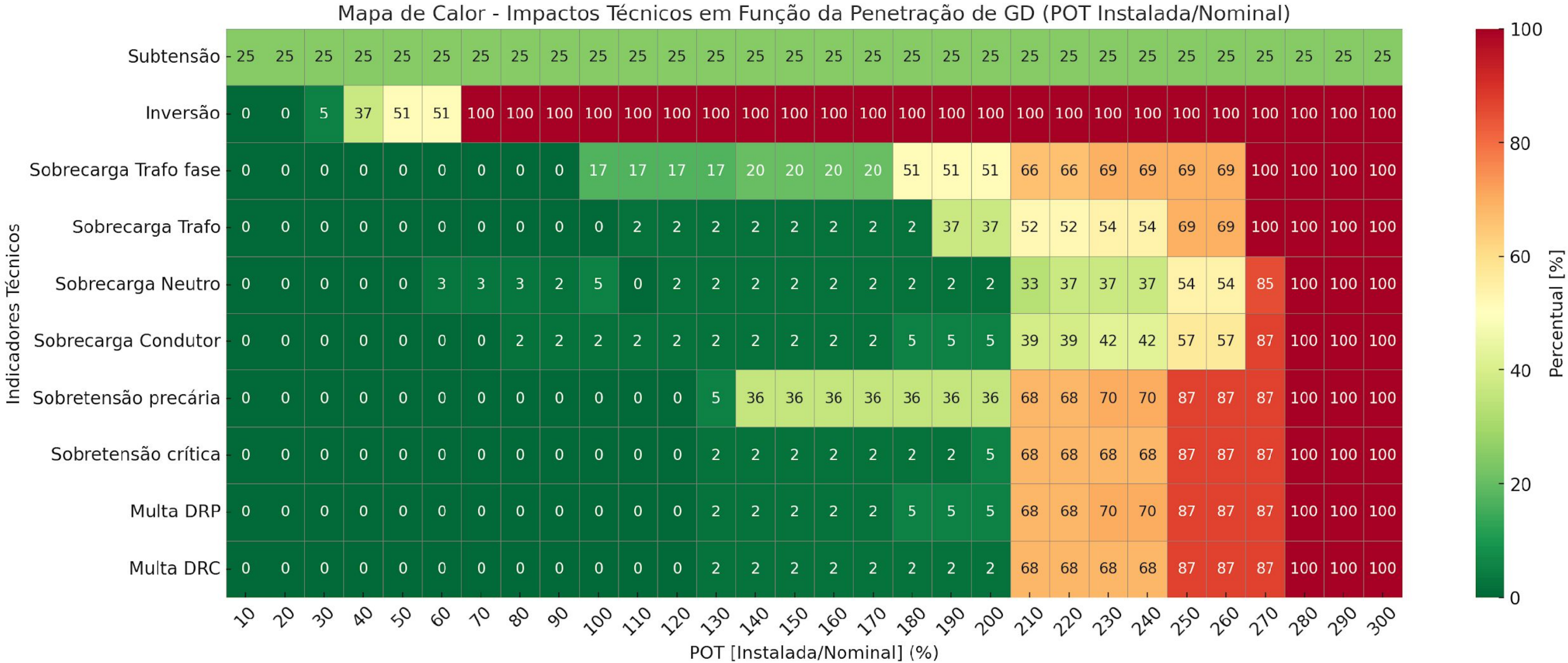
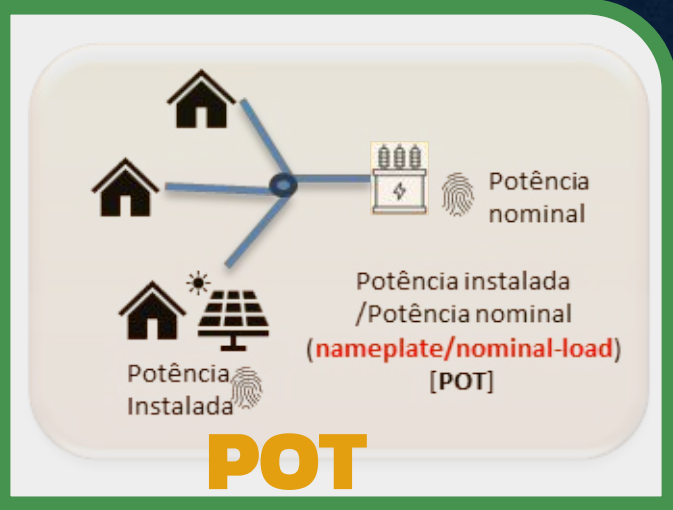


Análise gráfica "Trafo 4767" – POT de 0% a 244%

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

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 4767	<44									
	<89									
	<111									
	<133									
	<200									
	<244									

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

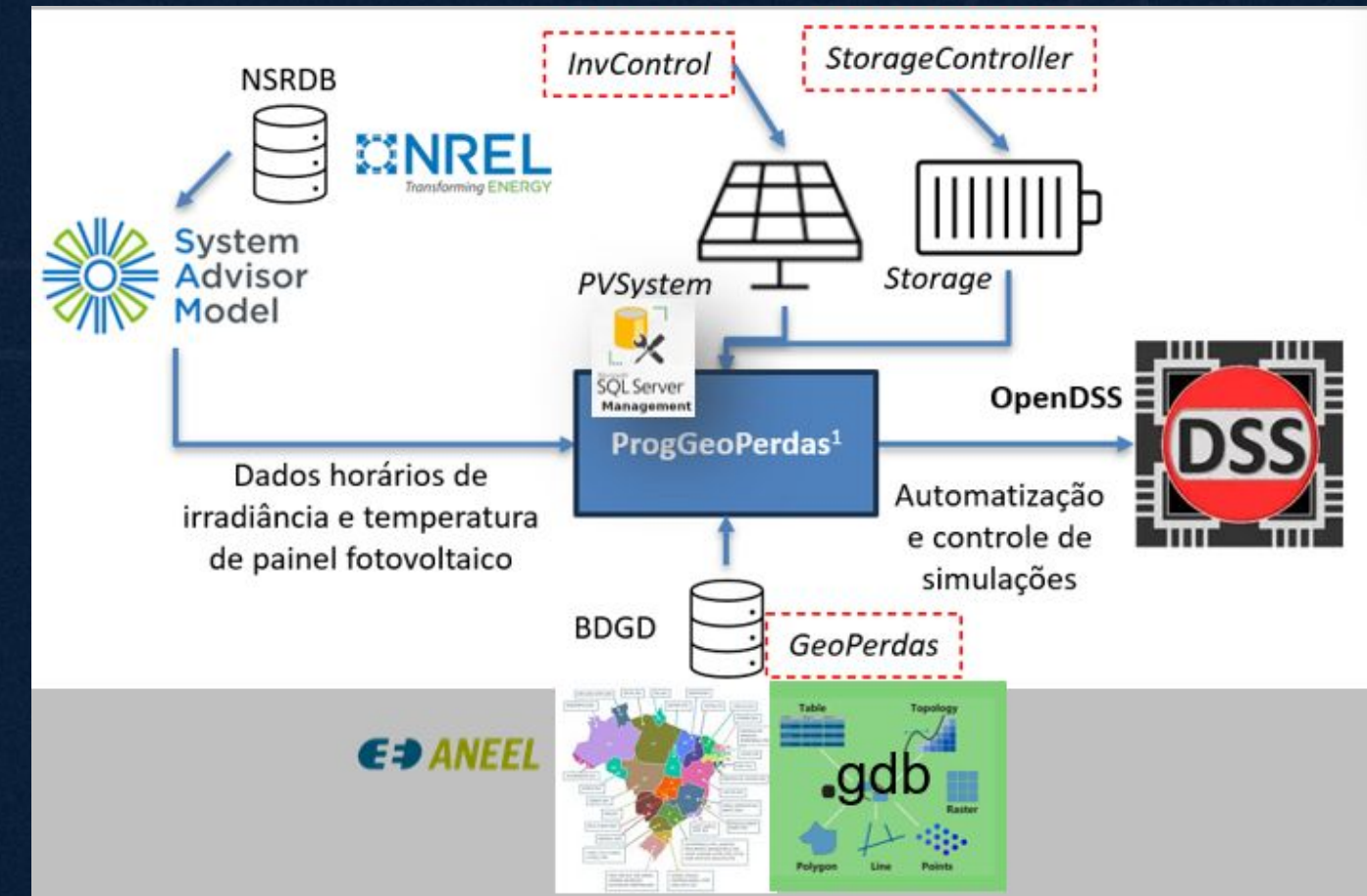
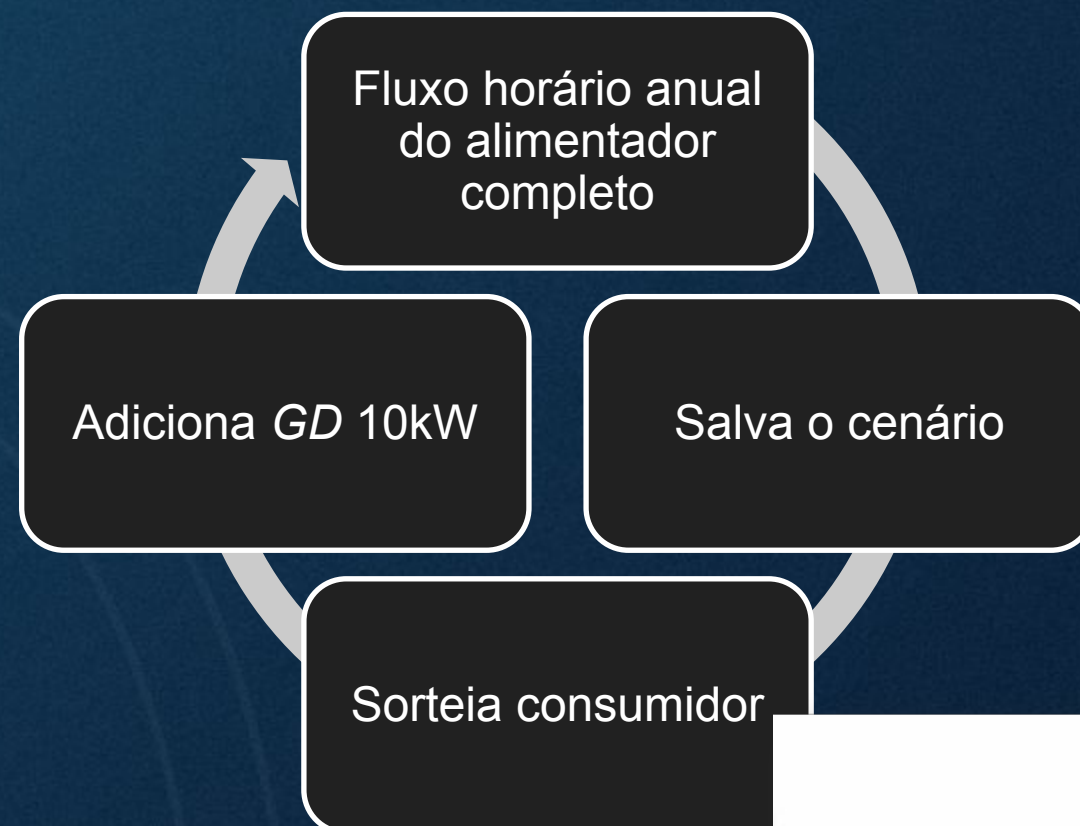


Diagram illustrating the calculation of POT (Potência Instalada / Potência nominal).

The diagram shows three inputs contributing to the POT calculation:

- Potência Instalada (represented by a house and solar panel icon)
- Potência nominal (represented by a house and people icon)
- Potência nominal (represented by a house and people icon)

The formula for POT is:

$$POT = \frac{\text{Potência Instalada}}{\text{Potência nominal}}$$

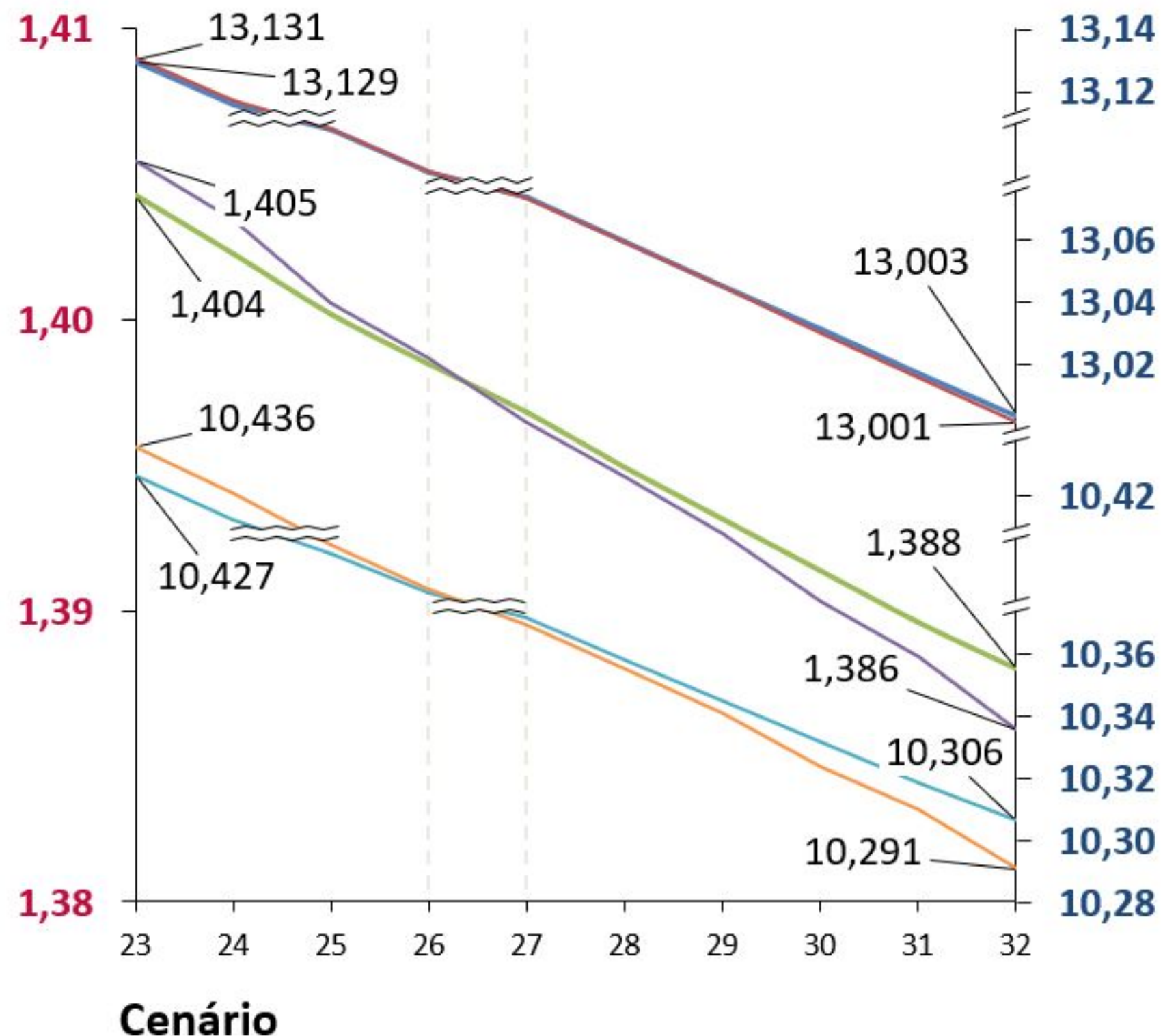
The result is labeled as POT (nameplate/nominal-load) [POT].



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

Perda técnica [GWh/ano]

Injetada [GWh/ano]



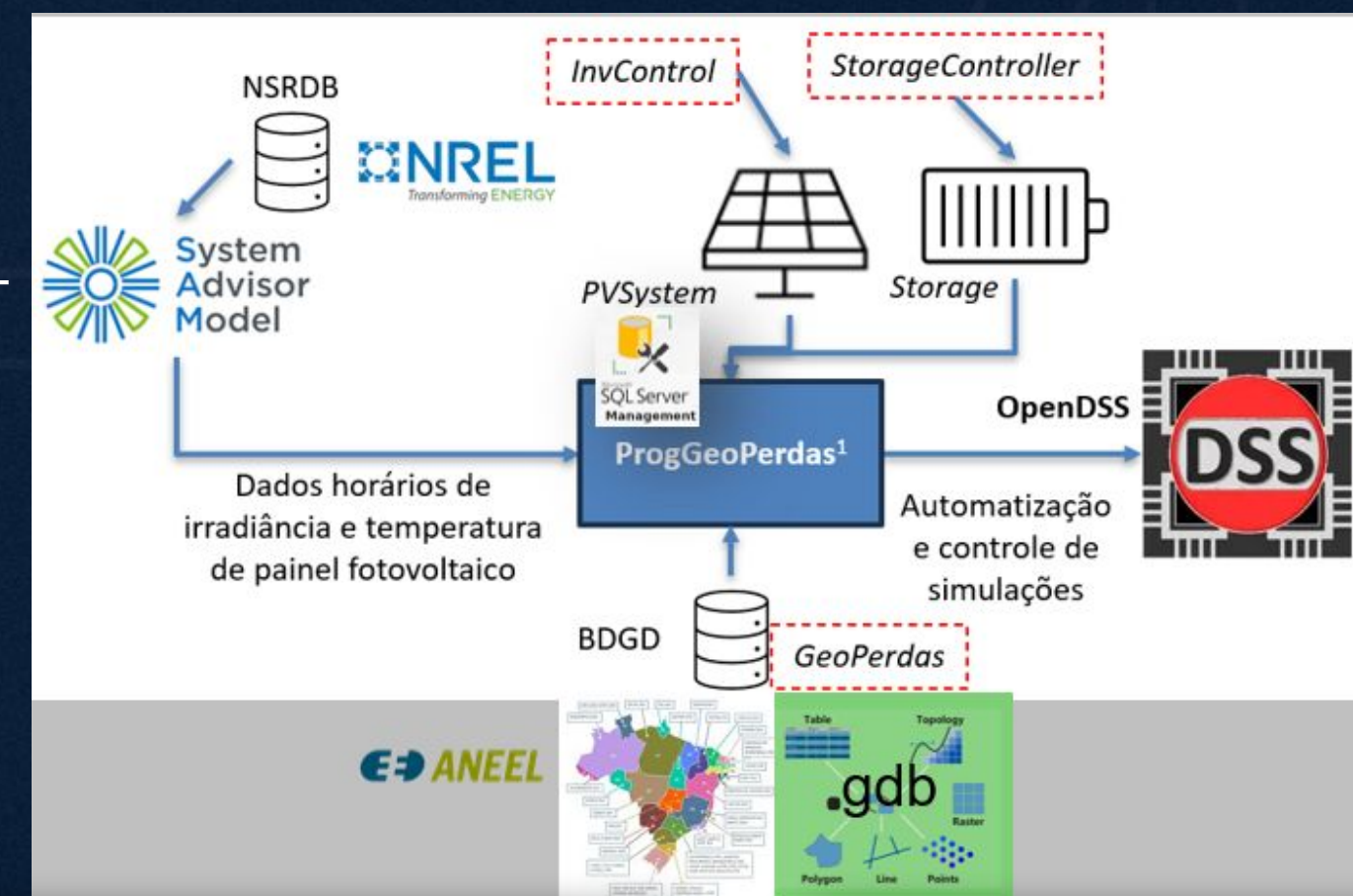
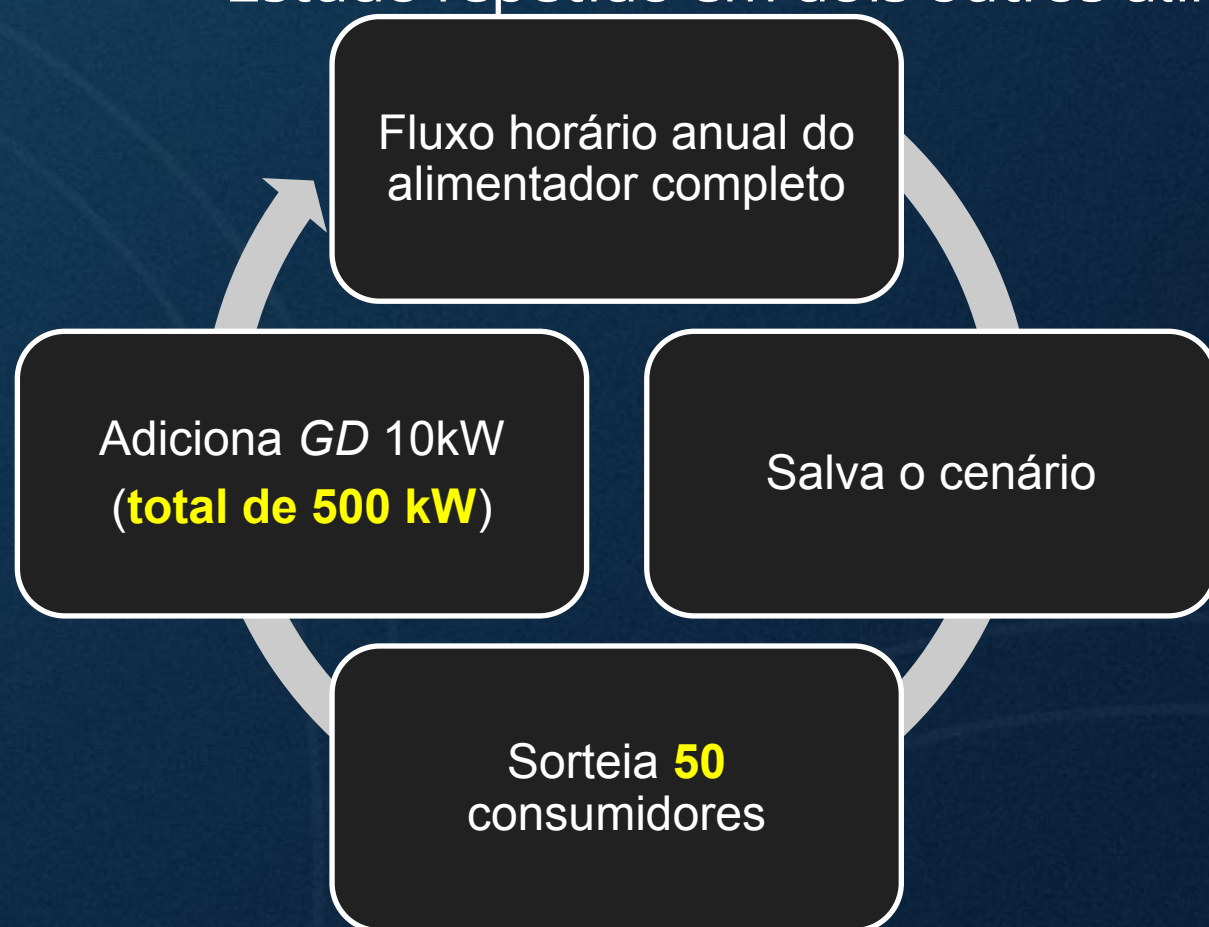
■ Energia Injetada e Perda técnica no Alimentador AFNU17 (com/sem BESS) VS Cenário

Trafo entra em **sobrecarga** -> BESS reduz perdas técnicas

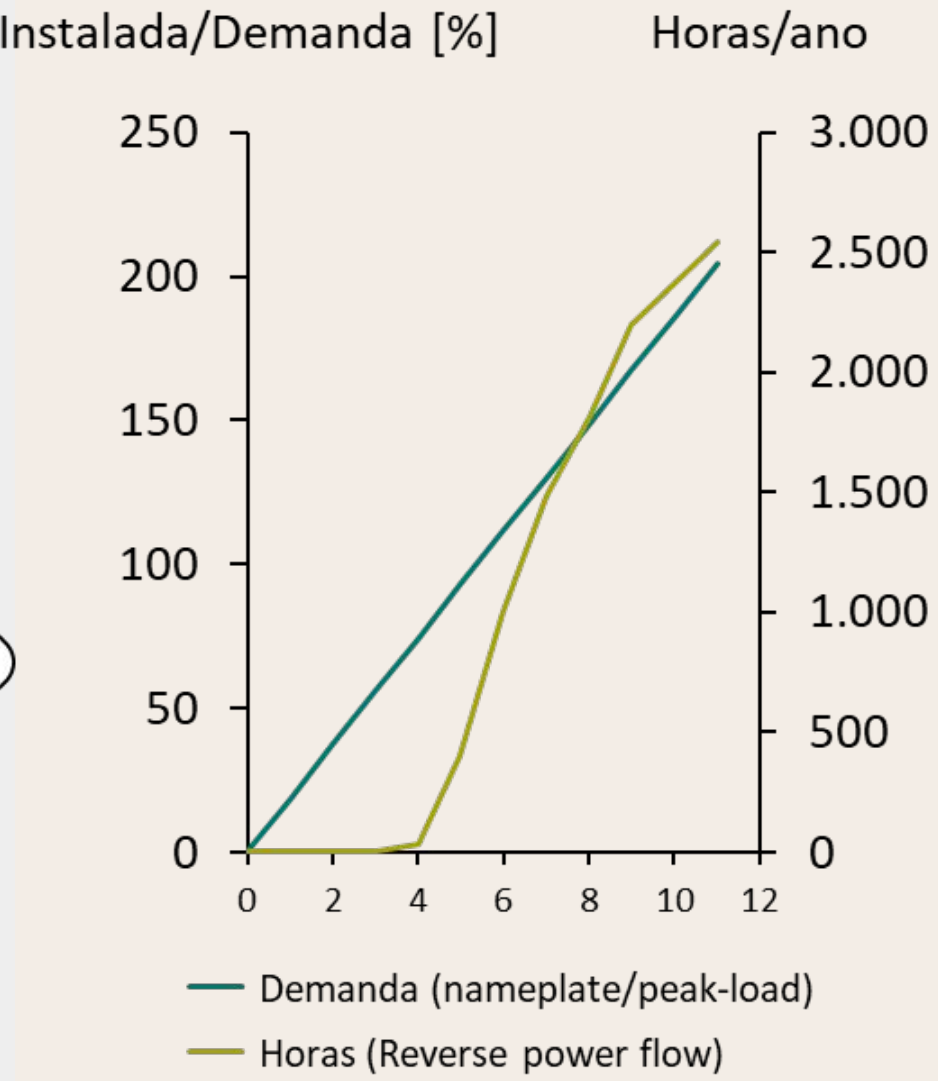
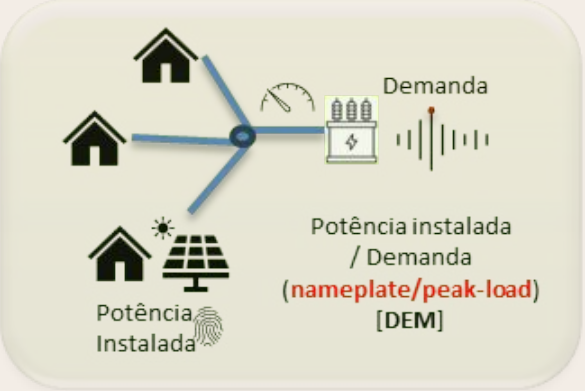
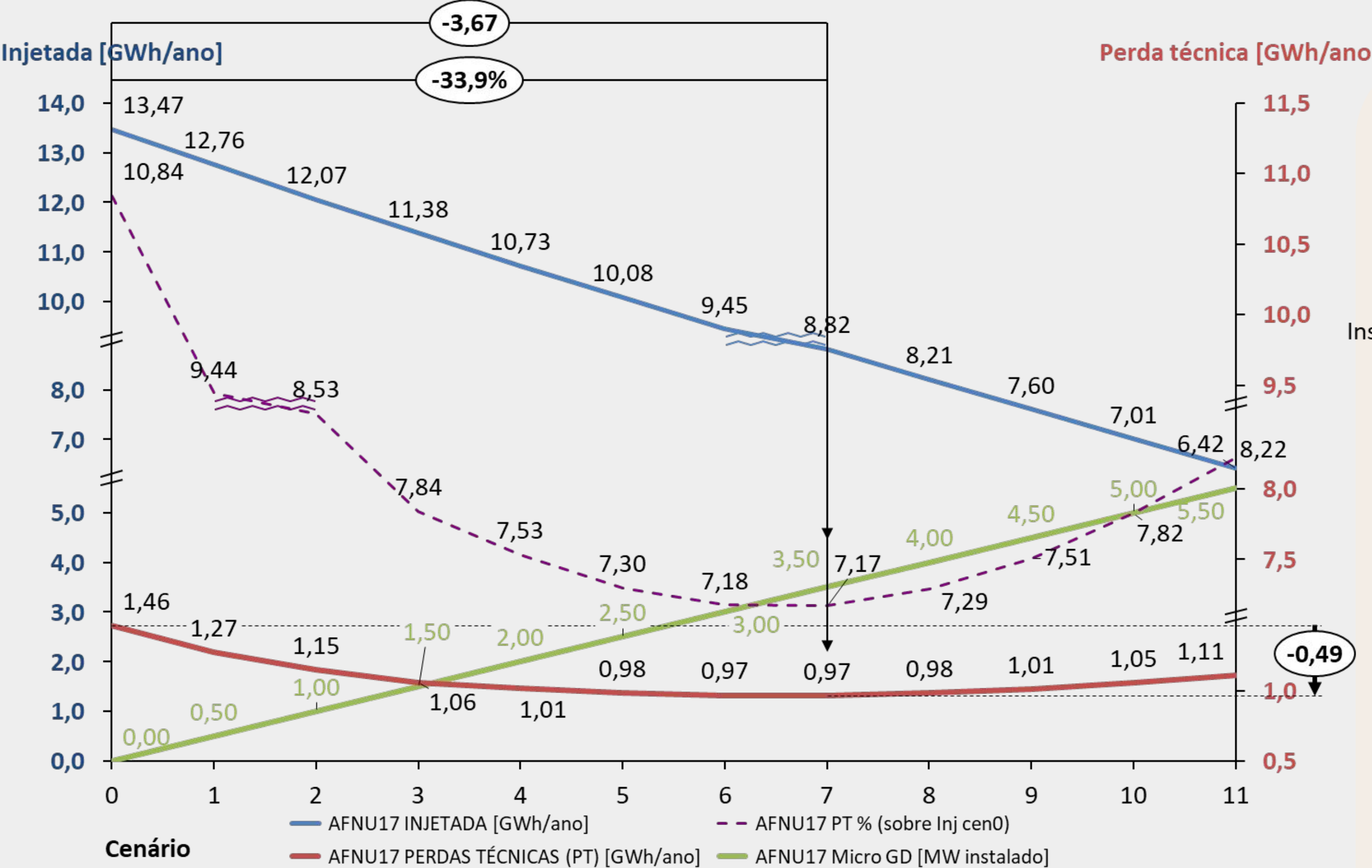
- AFNU17 INJETADA [GWh/ano]
- BESS_23 AFNU17 INJETADA [GWh/ano]
- AFNU17 PERDAS TÉCNICAS (PT) [GWh/ano]
- BESS_23 AFNU17 PERDAS TÉCNICAS (PT) [GWh/ano]
- AFNU17 PT % (sobre Inj cen0)
- BESS_23 AFNU17 PT % (sobre Inj cen0)

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

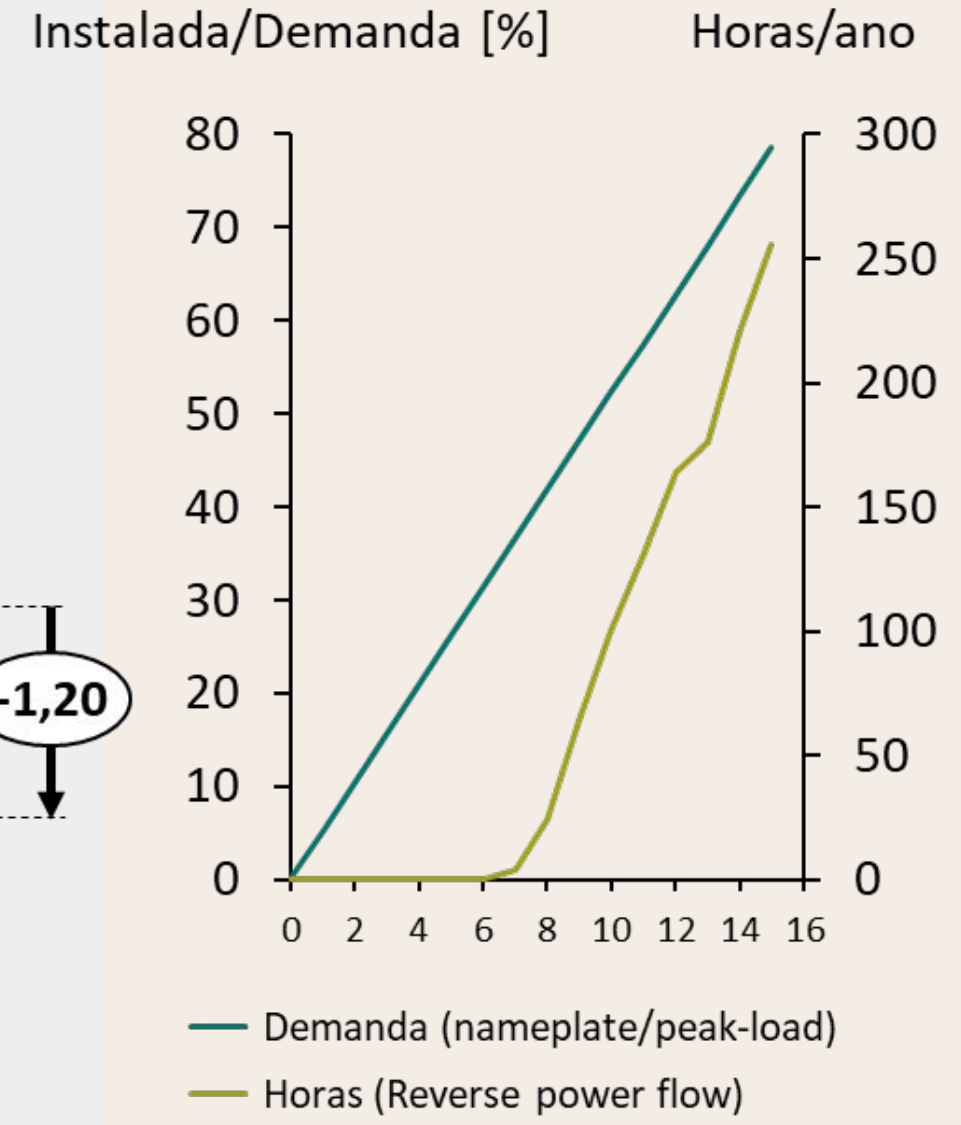
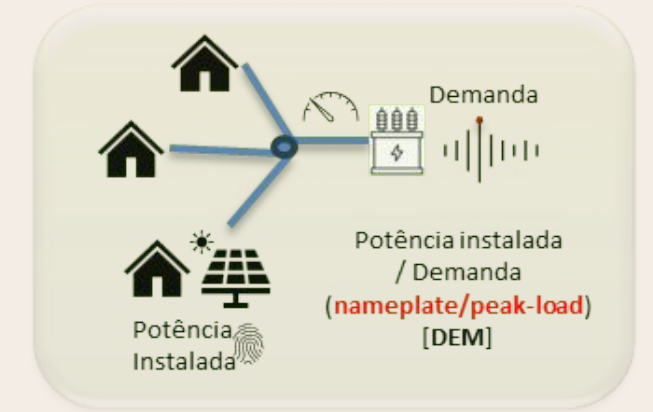
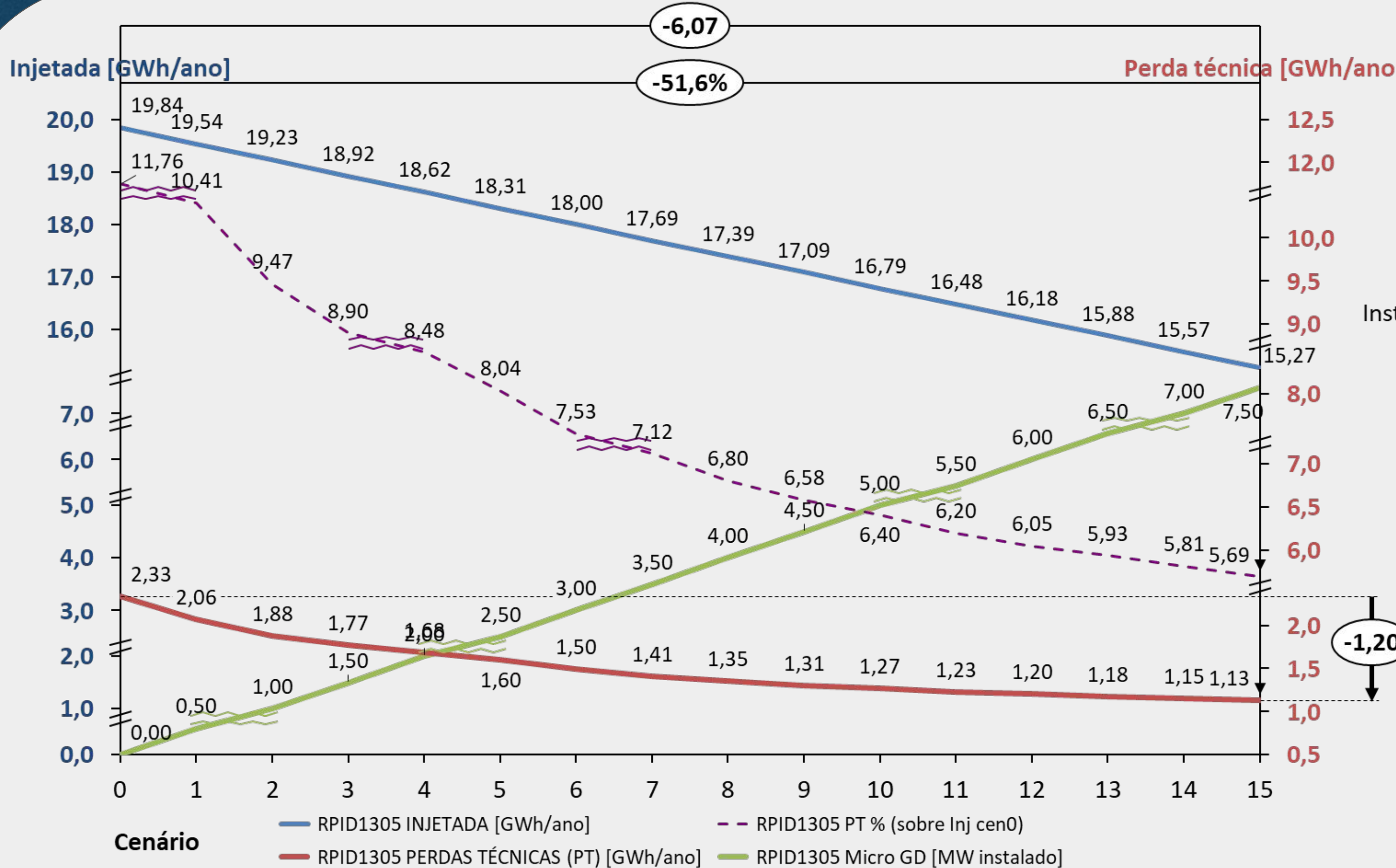
- Expansão gradativa e simultânea de micro GD em múltiplas redes secundária de um alimentador
- Monitoramento de todas as barras da rede secundária e das barras MT dos consumidores conectados.
- Análise focada no efeito sobre as perdas técnicas globais do alimentador, identificando pontos de inflexão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



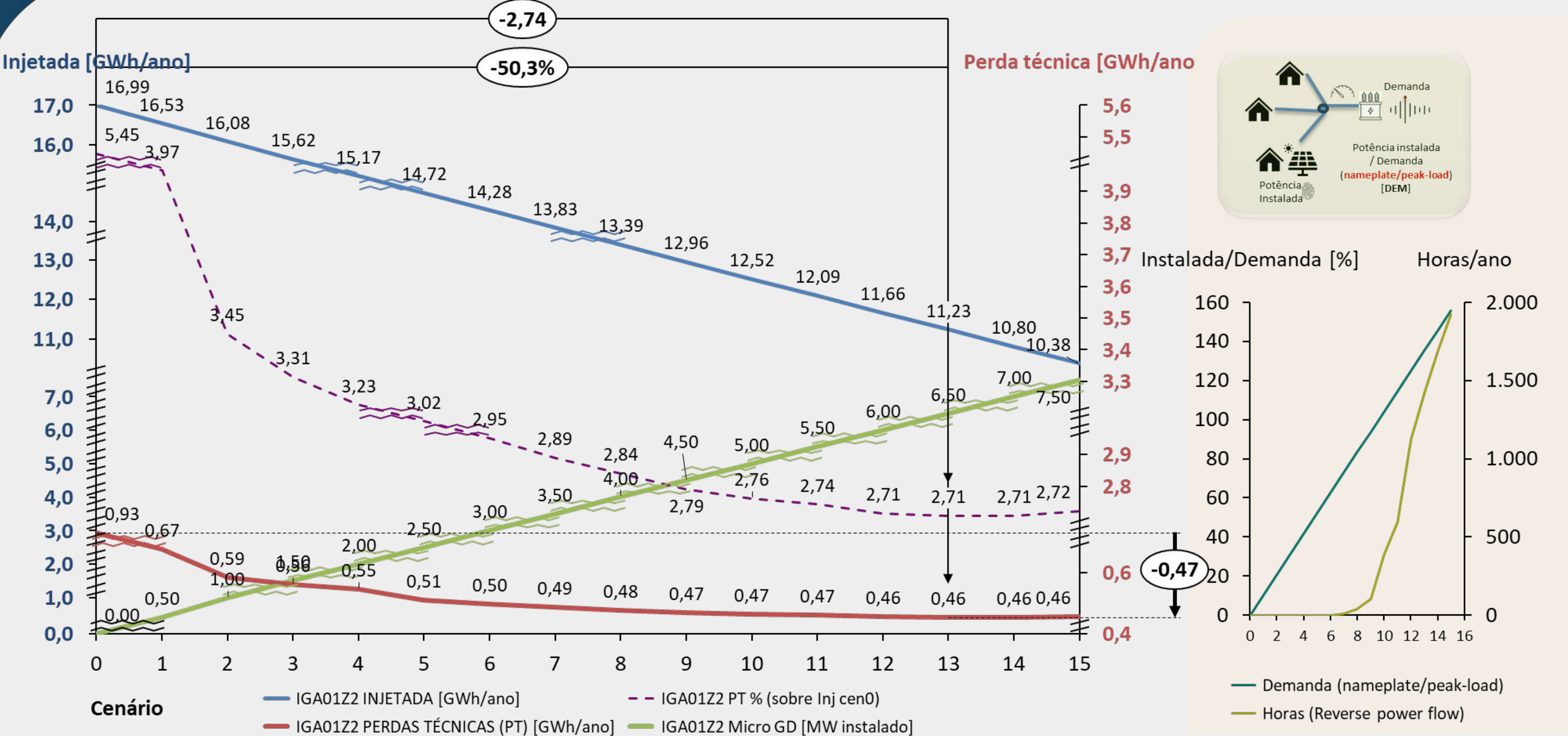
Caso 3 – Resultados – Alimentador AFNU17 – (16%)



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

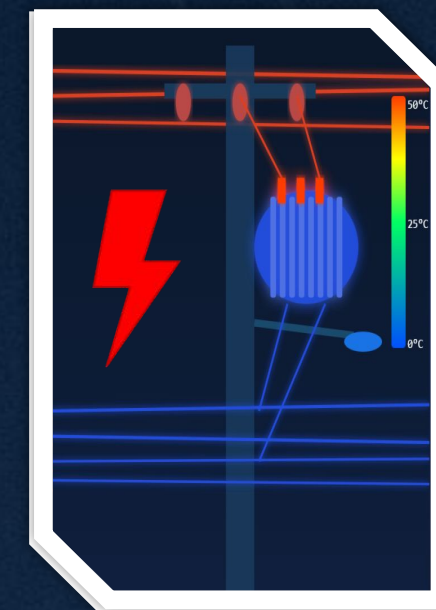
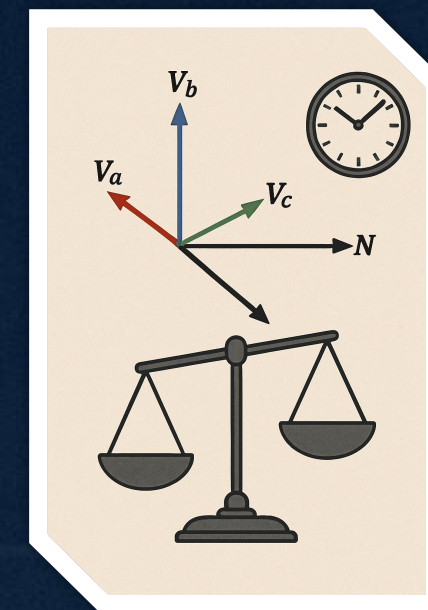
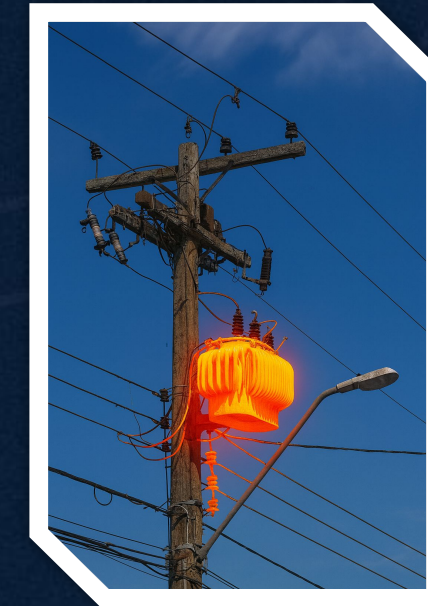
- ~25% das redes BT já apresentam **subtensão** no estado inicial
- Fluxo invertido não implica precariedade de tensão
- Sobretensão precária surge apenas com POT > 100
- Multas DRP/DRC tornam-se significativas com POT \geq 200
- BESS elimina sobretensão diurna e subtensão noturna, mas não deve impedir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



Obrigado!

