

# O futuro da energia

no Brasil é  
distribuído!



## ■ ***Estudos de transmissão sob influência de MMGD Análise do efeito em rede de subtransmissão***

- Luís Fernando A. M. Nogueira

Consultor especialista da MRTS



# Introdução

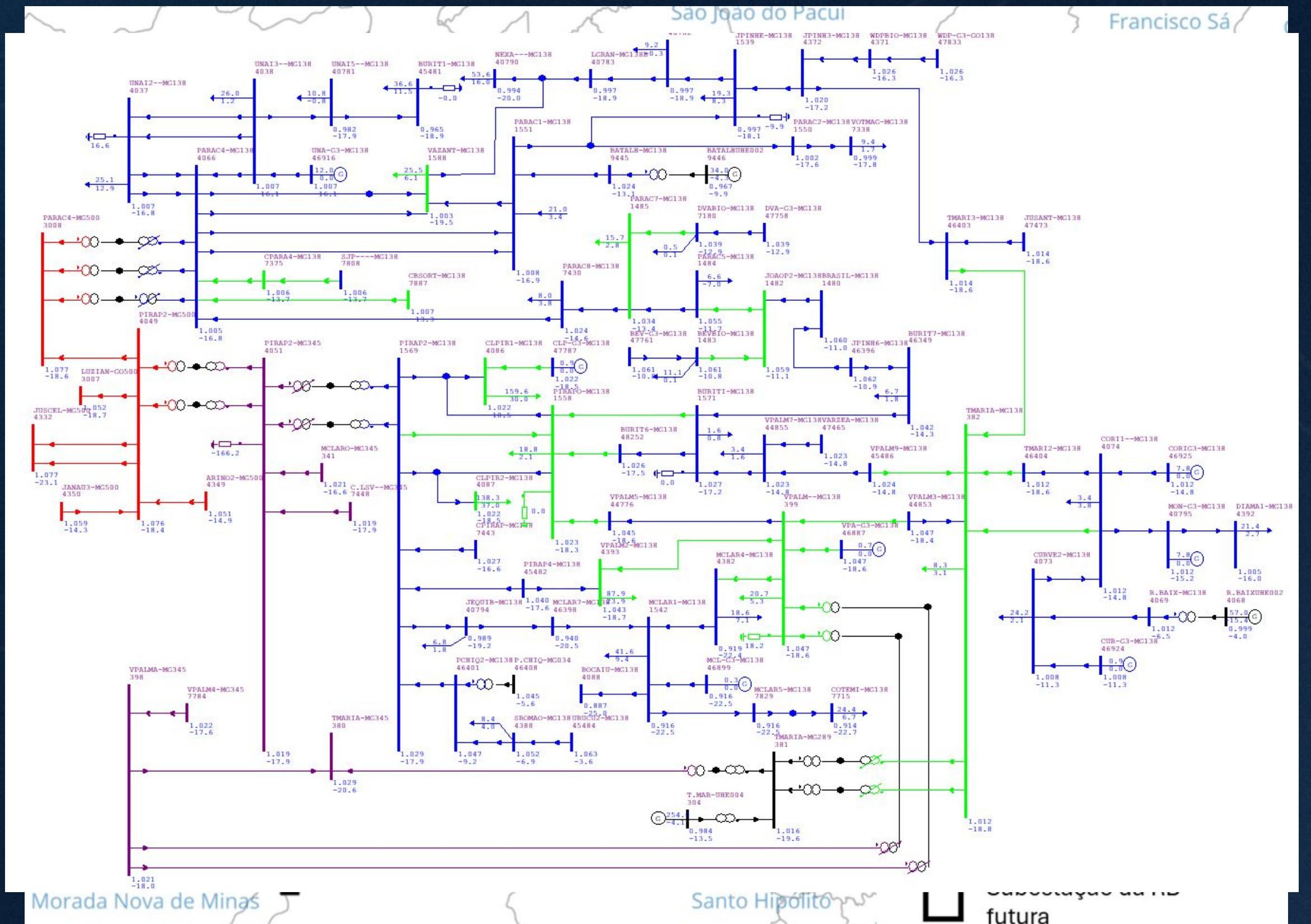
- A avaliação inicial em MT/BT explorou o alimentador complexo PRRU07, da CEMIG, localizado nos municípios de Buritizeiro e Pirapora, no Norte de MG.
- A região inicial incluiu os municípios de Buritizeiro, Pirapora e Várzea da Palma, além de parte de Unidades Consumidoras (UCs) de municípios adjacentes atendidas a partir de Subestações de Distribuição (SED) localizadas nos municípios principais mencionados.
- Os estudos MT/BT foram um primeiro ensaio para a avaliação de desempenho de rede e avaliação de aplicação de BESS para ramais de distribuição.
- A proposta desta etapa é investigar os efeitos no desempenho do sistema em regime permanente “com” e “sem”:
  - i. MMGD na alta tensão (AT) (138kV), e
  - ii. efeito concentrado de equipamentos BESS fisicamente alocados ao longo da rede de distribuição, concentrados ilustrativamente em barra de fronteira (BT/AT), para que se possa aferir o impacto conjunto de MMGD e BESS na rede de subtransmissão / transmissão.

# Considerações

## Região inicial de estudo MT/BT

- A quantidade de alimentadores e os montantes propostos de BESS resultantes da etapa anterior **NÃO** foi suficiente para sensibilizar o nível AT.
- Foi necessário expandir a abrangência de análise com a consideração de um montante maior de BESS equivalentes, portanto, em nível de área elétrica.
- BESS estão representados na fronteira entre as redes MT/BT e AT □ representam **EQUIVALENTES** de equipamentos menores distribuídos ao longo de circuitos MT/BT.
- Necessário redefinir o montante dos BESS para nível de **ÁREA ELÉTRICA**.

## Região de estudo no Norte de MG

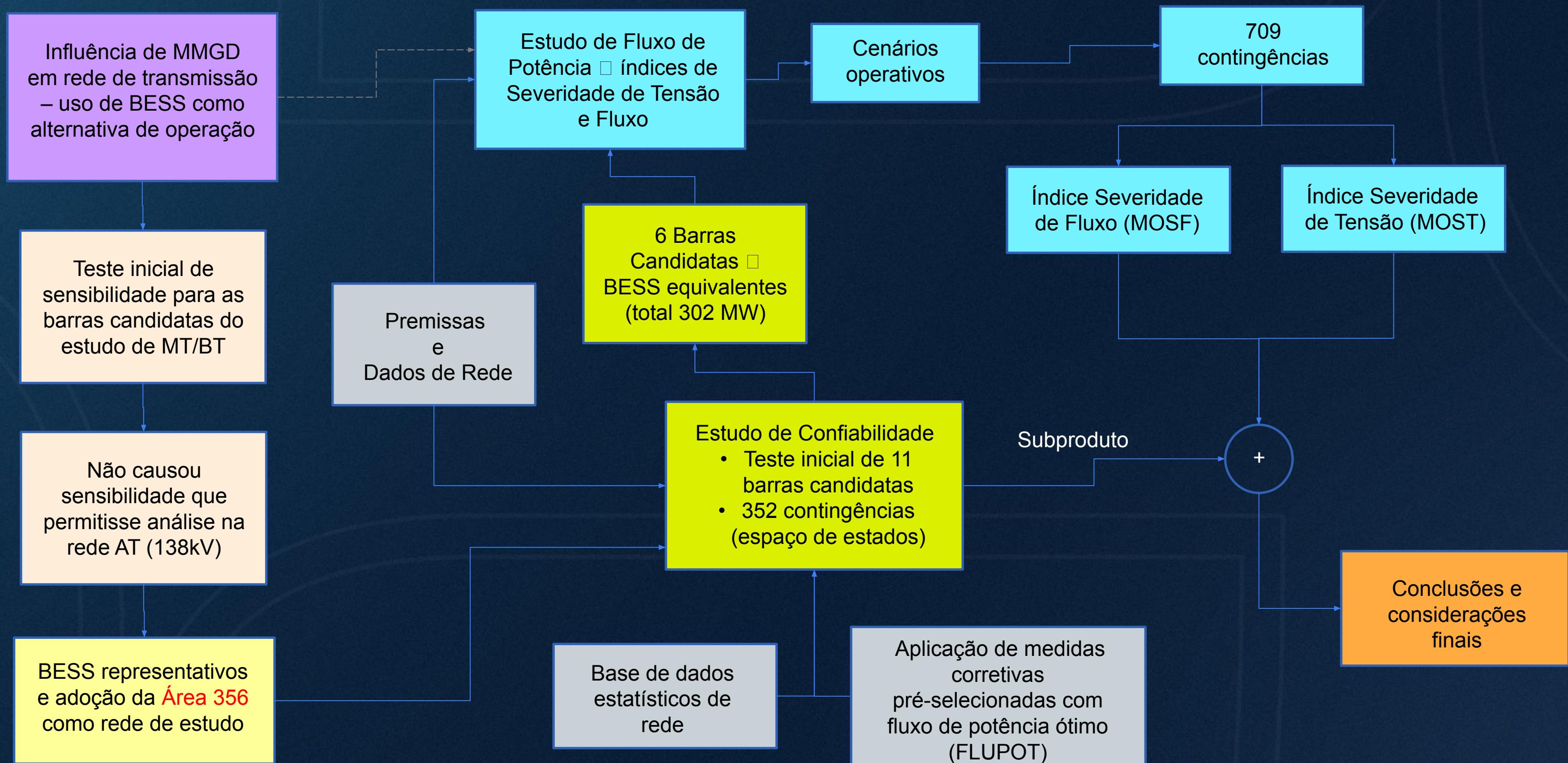


Morada Nova de Minas

Santo Hipólito

Universidade da  
futura

# Mapa e organização do estudo



# Considerações

## Premissas – patamares de carga e indicação geográfica da área de estudo

- **Carga máxima noturna:** representa os maiores valores de carga líquida, caracterizada pelos valores de carga global subtraída dos despachos previstos de GD e MMGD (ausência de geração solar).
- **Carga máxima diurna:** representa os valores coincidentes de carga global e de MMGD, correspondentes ao horário de **maior carga global** para cada distribuidora durante o período diurno (usinas fotovoltaicas centralizadas alcançam valores expressivos, assim como o montante instalado e previsto de GD e MMGD).
- **Carga mínima diurna:** valores coincidentes de carga global e de MMGD, correspondentes ao horário de **menor carga líquida** para cada distribuidora durante o período diurno (geração solar máxima).

(Fonte: RT-ONS DPL 0523/2024 – PAR/PEL 2024 – Ciclo 2025-2029 – TOMO 7 – Área Minas Gerais)



# Considerações

## Premissas

- Casos de referência do PAR/PEL 2025, ciclo 2026–2030, ano 2027, Área 356, sazonalidade de inverno, por haver maior amplitude entre patamares de carga diurna (máxima e mínima) e por se apresentar mais solicitante em termos de controle de tensão, portanto, mais representativo para os objetivos do estudo.

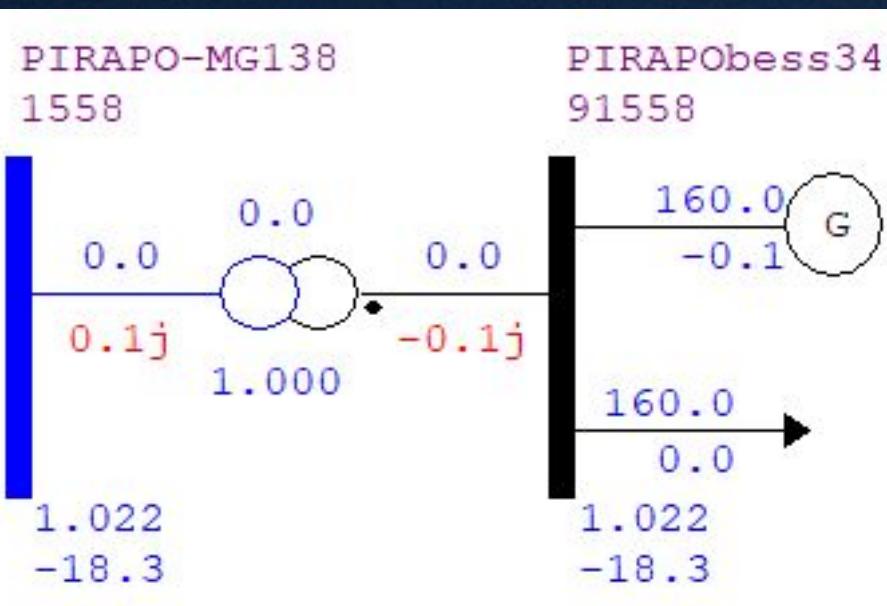
Carga patamar/sazonalidade	Inverno	Verão	Geração patamar/sazonalidade	Inverno	Verão
Máxima noturna (MW)	1534	1538	Máxima noturna (MW)	170	217
Máxima diurna (MW)	1559	1586	Máxima diurna (MW)	1733	1784
Mínima diurna (MW)	1226	1355	Mínima diurna (MW)	1121	1274

- Área escolhida apresenta equilíbrio entre geração e carga (**autossuficiência**) □ MMGD estimada de forma expedita por diferença, barra a barra, em relação ao patamar de ~~carga noturna~~ ~~de geração~~ para avaliação de efeitos

Balanço na área para máx. diurna	MW	Balanço na área para mín. diurna	MW	Balanço na área para máx. noturna	MW
Cg	1558.8	Cg	1226.1	Cg	1533.9
UHE	159.0	UHE	43.0	UHE	142.0
UFV	996.9	UFV	575.8	UFV	0.0
MMGD estimada	576.6	MMGD estimada	502.0	MMGD estimada	27.8
G total	1732.5	G total	1120.8	G total	169.8

Balanço na área para máx. noturna	MW
Cg	1533.9
UHE	142.0
UFV	0.0
MMGD estimada	27.8
G total	169.8

barra PV com geração e carga em equilíbrio e injeção inicial nula para emular descarga ou carregamento.  
(Na etapa de dimensionamento, NH2/FLUPOT com despacho livre)



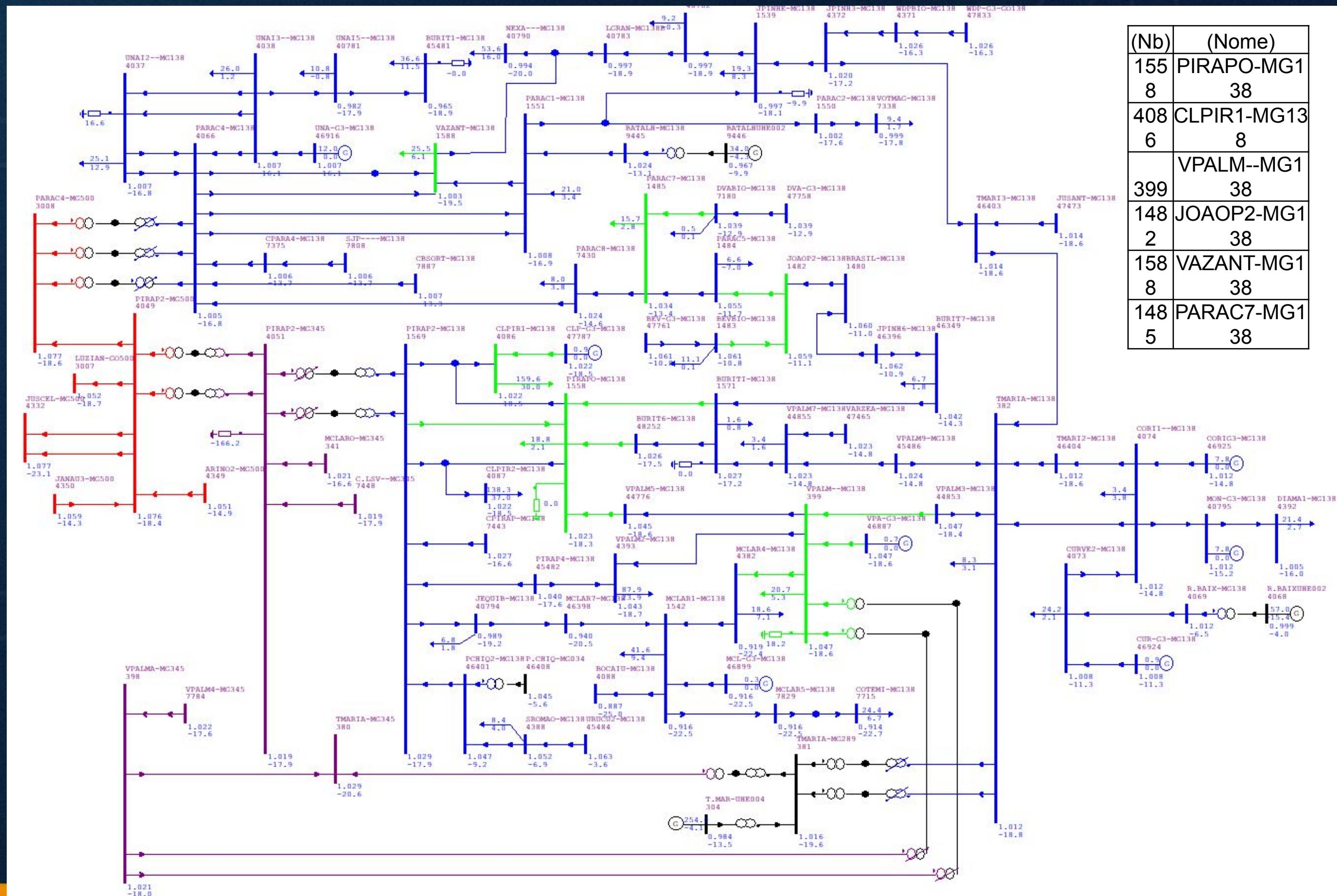
# **Considerações**

*BESS equivalentes representativos – Premissas*

# Considerações

## Dimensionamento dos BESS Equivalentes – Análise de Confiabilidade – Premissas

- Representação unifilar da Área 356 MG – DIT/DIST (Norte). Caso de referência.
- Seleção realizada por desempenho elétrico e níveis de tensão próximos à violação.
- Pontos de interligação com a rede básica: Paracatu IV, Pirapora II 500kV (ambas na cor vermelha) e Pirapora 345kV (cor roxa).
- Consolidação de barras mais propícias para estudo: 6 barras candidatas a receber sistema BESS Equivalentes – indicadas



# **Estudo simplificado de desempenho elétrico**

*Regime Permanente*

## **Área 356 – MG - DIT/DIST (Norte)**

### **Efeitos na Alta Tensão**

*Tensão de transmissão 138kV*

- Estudo em regime Permanente
- Estudo de fluxo de potência
  - Índices de Severidade
- Resumo numérico dos resultados.

# Estudo simplificado de desempenho elétrico – Regime Permanente

## Objetivos

- Tendo em conta as considerações iniciais, avaliar o efeito da MMGD na rede de transmissão 138kV (AT) da Área Elétrica 356 por meio de análise de fluxo de potência.
- O estudo comprehende a aplicação de contingências N-1 (total de 709 contingências pré-selecionadas) e monitoramento da Área 356, até a 3º vizinhança das barras de interligação da área com a rede básica (i.e. Paracatu IV 500/138kV e Pirapora II 500/345/138kV).
  - MMGD estimada de forma expedita por diferença, barra a barra, em relação ao patamar de carga noturna, para avaliação de efeitos “com” e “sem” MMGD.
  - Considera os 6 equipamentos BESS equivalentes representativos identificados por meio de análise prévia, disponibilizados simultaneamente na rede elétrica.
  - Métrica □ utilizar o recurso de Índices de Severidade para avaliação de desempenho da rede elétrica, **COM** e **SEM** a presença de MMGD e dispositivos BESS equivalentes. Considera o desempenho global a partir da aplicação de todas as contingências para a Área 356.

# Estudo simplificado de desempenho elétrico – Regime Permanente

Premissas e metodologia (notas sobre os Índices de Severidade)

- Monitoração de fluxo

$$IS_F = \frac{\sum_{i=1}^n MVA^2}{\sum_{i=1}^n CAP^2}$$

onde

n:	Número de violações.
IS:	Índice de severidade.
MVA:	Fluxo de potência aparente do circuito, é utilizado o maior valor entre $k-m$ ou $m-k$ .
CAP:	Capacidade do circuito em MVA, pode-se utilizar a capacidade de emergência.

- Monitoração de tensão

$$IS_T = \sum_{i=1}^n (VIOL)^2 \cdot 10^4$$

onde

n:	Número de violações.
IS:	Índice de severidade.
VIOL:	Violação da tensão.

# Estudo simplificado de desempenho elétrico – Regime Permanente

## Cenários avaliados, resultados resumidos e conclusões – máxima diurna

- A tabela a seguir considera as seguintes variações de cenário:

- Tensão (T) – opera controlando a tensão, como um compensador síncrono (não carrega e nem descarrega);
- Cg – opera no modo carga, carregando as baterias;
- G – opera no modo gerador, descarregando energia; e

cenário #	Tensão	Cg	G	MMGD	iSev MOST	iSev MOSF	convergidos	perdas A356
sbess	N	N	N	S	172.46	2.91	681	40.8
c6bess_cg	S	S	N	S	163.67	4.32	642	42.6
c6bess_g	S	N	S	S	184.96	1.33	690	45.4
sgdsb	N	N	N	N	1600.26	4.23	691	51.1
sgd6b_cg	S	S	N	N	1646.09	5.68	699	57.1
sgd6b_g	S	N	S	N	1591.6	2.60	699	51.7

Balanço na área máx. diurna	MW
Cg	1558.8
UHE	159.0
UFV	996.9
MMGD estimada	576.6
G total	1732.5

Balanço na área máx. diurna sem GD	MW
Cg	1558.8
UHE	159.0
UFV	710.7
MMGD estimada	38.3
G total	908.0

- A partir dos resultados entre cenários “com” e “sem” MMGD/GD, constata-se (i) clara deterioração dos níveis de tensão para os cenários em que a MMGD/GD não está presente. Da mesma forma, observa-se que o (ii) pior desempenho em termos de carregamento também ocorre para os cenários sem MMGD/GD. Quanto às (iii) perdas totais da Área 356, os maiores valores também foram constatados para os cenários sem MMGD/GD.
- A operação dos BESS representativos como cargas ou como geradores produzem efeitos marginais sobre os índices de tensão. Em relação aos índices de fluxo, constata-se melhora para a operação como gerador e piora dos índices para o cenário de carregamento. Ao se considerar o cenário em que a geração MMGD/GD e UFV e cargas são máximas (máxima carga global), a operação do BESS como gerador pode trazer benefício para a rede elétrica em termos de desempenho (considera o critério N-1).

# Estudo simplificado de desempenho elétrico – Regime Permanente

Cenários avaliados, resultados resumidos e conclusões – mínima diurna

- A tabela a seguir considera as seguintes variações de cenário:

- Tensão (T) – opera controlando a tensão, como um compensador síncrono (não carrega e nem descarrega);
- Cg – opera no modo carga, carregando as baterias;
- G – opera no modo gerador, descarregando energia; e

cenário #	Tensão	Cg	G	MMGD	iSev MOST	iSev MOSF	convergidos	perdas A356
sbess	N	N	N	S	182.94	2.82	684	24.2
c6bess_cg	S	S	N	S	81.74	4.22	686	26.3
c6bess_g	S	N	S	S	128.61	1.21	688	28.1
sgdsb	N	N	N	N	193.47	2.82	685	28.7
sgd6b_cg	S	S	N	N	180.95	4.28	687	34.6
sgd6b_g	S	N	S	N	191.83	1.22	684	29.0

Balanço na área mín. diurna	MW
Cg	1226.1
UHE	43.0
UFV	575.8
MMGD estimada	502.0
G total	1120.8

Balanço na área mín. diurna sem GD	MW
Cg	1226.1
UHE	43.0
UFV	368.8
MMGD estimada	30.9
G total	442.7

- Da mesma forma que constatado para o patamar de carga máxima diurna, observa-se melhora dos índices de tensão para a rede operando com a MMGD/GD. Para a avaliação de fluxos, o desempenho “sem” MMGD/GD e “com” resultou similar.
- Considerando-se a análise de desempenho relativa aos fluxos, constata-se padrão similar ao observado no patamar de carga máxima diurna, em que a operação como gerador resulta em melhores índices.
- Observa-se que a presença dos BESS equivalentes é satisfatória para o controle de tensão, quando comparado o desempenho em relação ao caso de referência, com destaque para a operação como carga (carregamento).

## Conclusões e Considerações Finais

- A partir das premissas e considerações adotadas, observa-se melhoria das condições operativas da Área 356 com a presença de MMGD/GD.
  - As diferenças dos Índices de Severidade de tensão são bastante evidentes para os dois patamares de carga avaliados (máxima e mínima diurna).
  - Desempenho em termos de índices de Severidade de fluxo mostra-se melhor, embora marginalmente, para o patamar de carga máxima diurna. Para o patamar de carga mínima não foram observadas diferenças consideráveis.
  - Redução de perdas na Área 356 □ 20% para o patamar de carga máxima diurna e de 16% para o patamar de carga mínima diurna.

# Conclusões e Considerações Finais

- Observa-se que há sempre uma condição de melhoria do desempenho da rede em termos de tensão e de fluxo. Assim, uma análise pormenorizada e individualizada, que considere a combinação dos modos de operação (carga e geração) para as subestações selecionadas, poderá indicar situações ainda melhores que aquelas constatadas na presente avaliação (papel do DSO).
- De tudo quanto avaliado, e considerando a flexibilidade operativa proporcionada, a adoção ilustrativa de equipamentos BESS representativos em barras de fronteira BT/AT, pode ser considerada positiva, onde pertinente, como **opção de planejamento** para reforço das redes MT/BT, com efeitos benéficos para a alta tensão (AT).
- Registra-se ainda a vantagem (“efeito colateral”) de que um BESS contribui para o balanço energético nos patamares de carga leve e pesada, **aumentando a flexibilidade e contribuindo para menores cortes de geração (*curtailment*)** e também no desempenho elétrico da rede de transmissão.

## Conclusões e Considerações Finais

Confiabilidade  
(como SUBPRODUTO)

- MMGD: A partir da comparação entre os cenários “com” e “sem” MMGD, observa-se redução de 20% do índice de Expectância de Energia não Suprida (EENS) para o patamar de carga máxima diurna e de 38% para o patamar de carga mínima diurna, em relação ao cenário sem MMGD. Portanto, para as premissas adotadas, considera-se que a MMGD produz reflexos positivos para o sistema de alta tensão (AT).
- MMGD + BESS: Os índices sistêmicos apontam melhora generalizada do desempenho de confiabilidade, a partir da adoção de dispositivos BESS. Há redução de 57% na Expectância de Energia não Suprida (EENS) para o patamar de carga máxima diurna, e de 48% para o patamar de carga mínima diurna, em relação ao cenário sem MMGD, quando comparados os casos “com” e “sem” BESS, com MMGD presente.

# Obrigado!

# **Apêndice**

## *Resultados da Análise de Confiabilidade*

### **APÊNDICE**

#### **Área 356 – MG - DIT/DIST (Norte)**

#### **Efeitos na Alta Tensão**

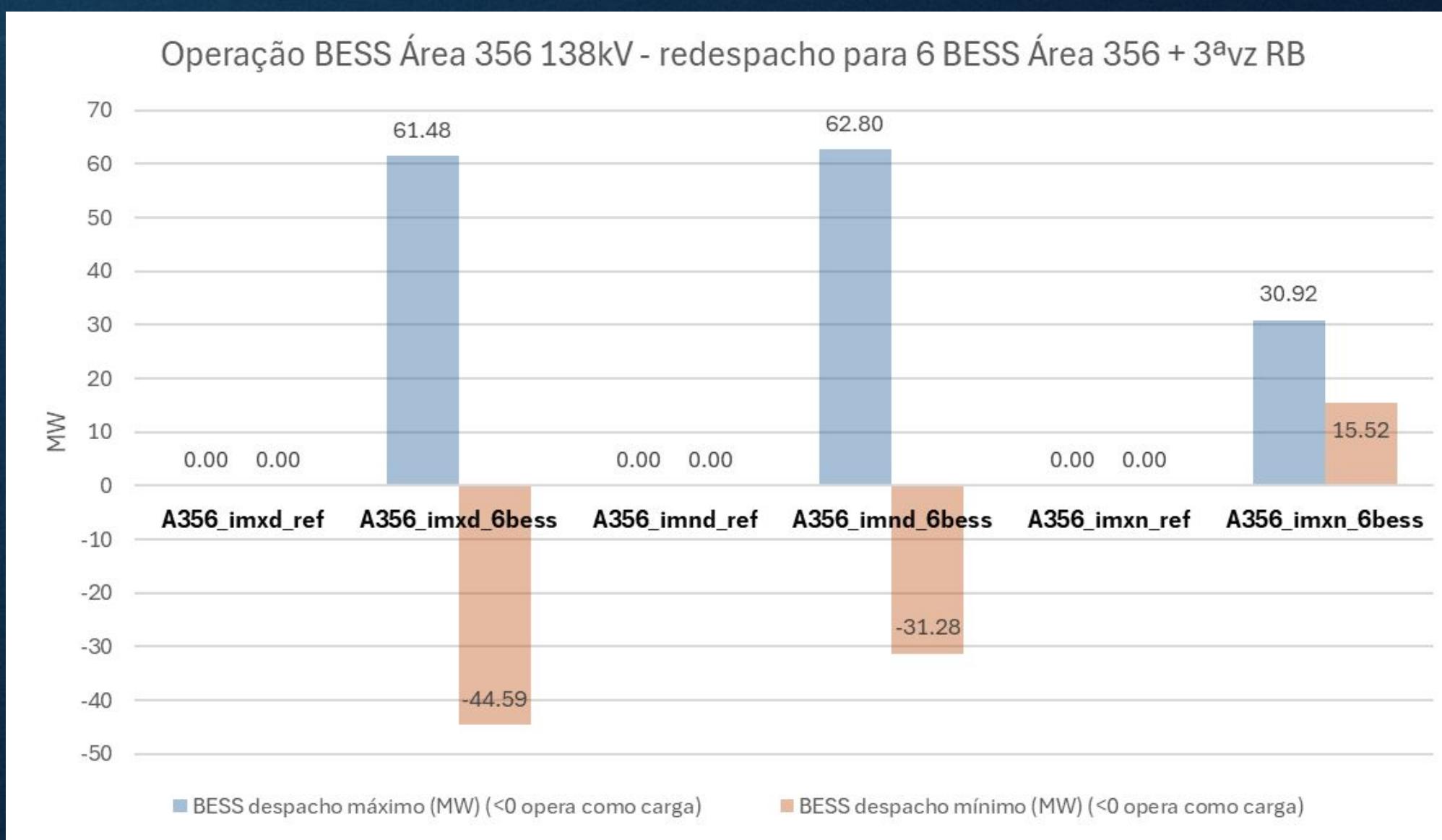
*Tensão de transmissão 138kV*

- Estudo em regime Permanente
- Resultados do **Estudo de Confiabilidade**
- Resumo numérico dos resultados.

# Apêndice

## Resultados da Análise de Confiabilidade – Dimensionamento dos BESS Equivalentes

- Valores representam o resultado do dimensionamento do BESS Equivalente, com acionamento máximo e mínimo identificado individualmente (para uma subestação).
- A tabela indica os resultados de dimensionamento para cada subestação, considerando os extremos identificados para todo o espaço de estados (352 contingências).
  - Os valores da tabela resumem os extremos identificados na varredura de todos os espaços de estado válidos para os dois cenários analisados. Positivo para operação como gerador e negativos para operação como carga.
  - Critério para obtenção do valor BESS (MW): o maior valor absoluto verificado para os cenários de carga máxima e mínima diurna.
  - O total alocado em dispositivos BESS Equivalentes corresponde a 302 MW.



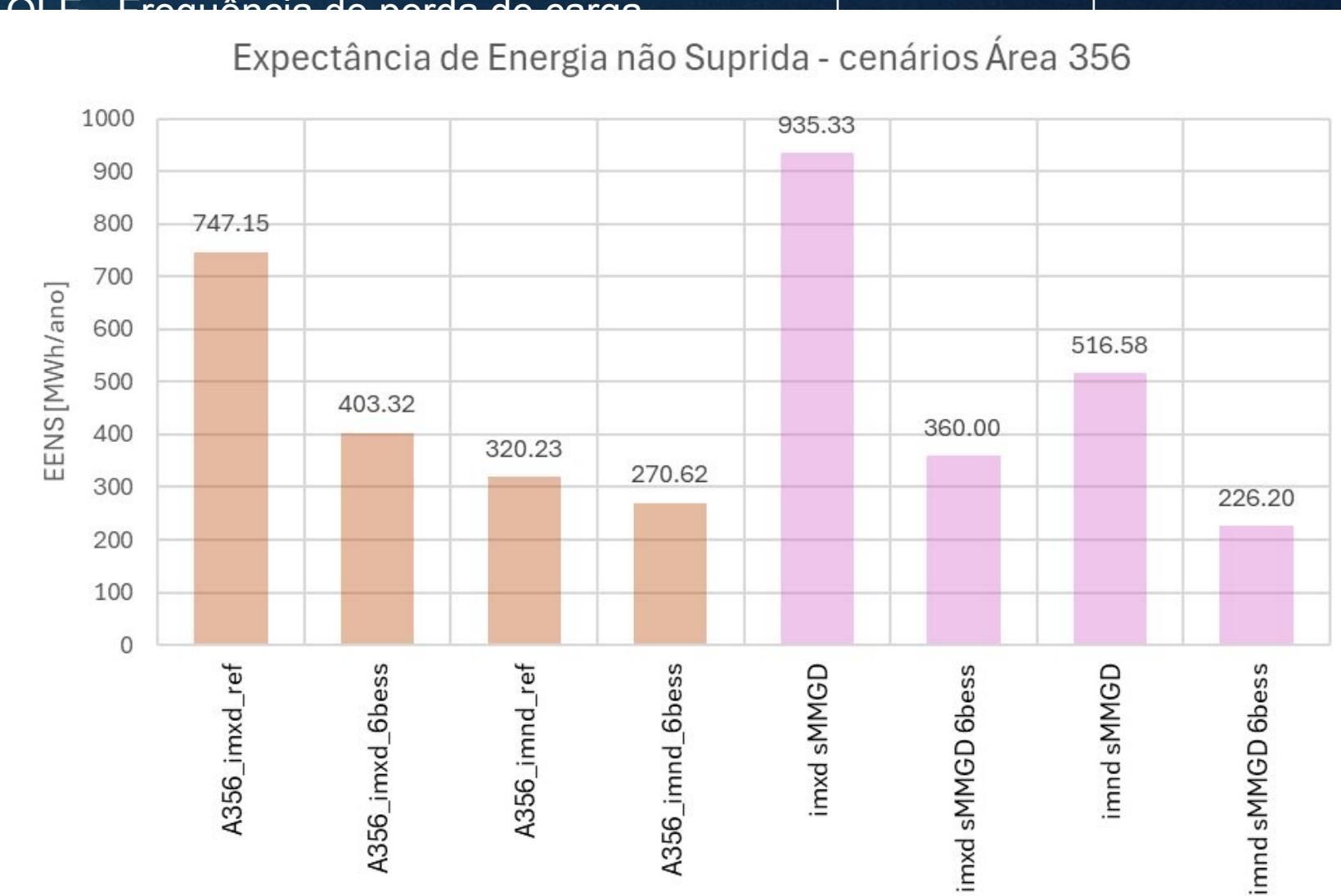
(Nb)	Nome	Máximo (MW)	Mínimo (MW)	BESS (MW)
barra_91558	PIRAPO-MG138	30	-41	41
barra_94086	CLPIR1-MG138	63	4	63
barra_90399	VPALM--MG138	61	-8	61
barra_91482	JOAOP2-MG138	45	-29	45
barra_91588	VAZANT-MG138	41	-45	45
barra_91485	PARAC7-MG138	47	-20	47

# Apêndice

## Resultados da Análise de Confiabilidade – sensibilidade “com” e “sem” BESS equivalentes

- Cenário de despacho *Business As Usual* (BAU) com valores pré-existentes no caso de referência PAR/PEL

	Referência   máx. diurna	Referência   mín. diurna	Referência   máx. diurna	Referência   min. diurna
Área 356 MG - DIT/DIST (Norte)	A356_imxd_6be	A356_imnd_6be	imxd sMMGD 6bess	imnd sMMGD 6bess
Indicador de Confiabilidade	A356_imxd_ref ss imxd_p1_ref	A356_imnd_ref ss imnd_p2_ref	imxd_p11_sgd	imnd_p21_sgd imnd_p22_sgd_6b
LOLP - Probabilidade de perda de carga (%)	0.425879000%	0.231962000%	0.276323000%	0.259508000%
LOLE - Expectância de perda de carga (h/ano)	37.3070000	20.3199000	24.2059000	14.1889000
EENS - Freqüência de perda de carga	747.15	403.32	320.23	226.20



- Resultados avaliados com o conjunto de barras candidatas (seis barras) a receber o equipamento BESS equivalente.
- Observa-se, por meio dos índices sistêmicos, melhora generalizada do desempenho de confiabilidade com a adoção de dispositivos BESS. Por exemplo, para o cenário com MMGD há redução da EENS de 46% para o patamar de carga máxima diurna, e de 15% para o patamar de carga mínima diurna.
- Cenário sem MMGD apresenta EENS superior aos demais cenários quando comparados os mesmos patamares de carga. A consideração de BESS equivalente reverte o resultado. Observa-se que o caso de carga máxima noturno foi utilizado como comparativo e referência para seleção de subestações que possuem GD.

# Apêndice

## Conclusões dos resultados da Análise de Confiabilidade – SUBPRODUTO

- A partir dos cenários sem MMGD, observa-se claramente pelo índice de Expectância de Energia não Suprida (EENS) que há benefício na consideração da MMGD para o sistema de distribuição. Constatase elevação de 25% de EENS para o caso sem MMGD equivalente em relação ao caso com MMGD no patamar de carga máxima diurna e de 61% para o patamar de carga mínima diurna. Portanto, entende-se que a MMGD para o caso em referência produz reflexos positivos para o sistema de alta tensão (AT).
- O total alocado em dispositivos BESS Equivalentes corresponde a 302 MW, distribuídos entre seis subestações (barras), da seguinte forma: 1558 PIRAPO-MG138 (41 MW), 4086 CLPIR1-MG138 (63 MW), 399 VPALM--MG138 (61 MW), 1482 JOAOP2-MG138 (45 MW), 1588 VAZANT-MG138 (45 MW), 1485 PARAC7-MG138 (47 MW).
- Se consideradas MMGD e BESS em relação ao caso sem MMGD e sem BESS, o desempenho do sistema, em termos de confiabilidade, passa a ser o melhor observado para os cenários e patamares e carga avaliados, com redução de 57% para a EENS referente ao patamar de carga máxima diurna e de 47% para o patamar de carga mínima diurna.
- Os demais índices apresentam comportamento similar, o que induz à conclusão de que há reflexos positivos para o sistema AT com a consideração de MMGD, em termos de confiabilidade, que pode ser potencializada com a adoção de sistemas BESS diluídos pelo sistema de distribuição.
- Os índices sistêmicos apontam melhora generalizada do desempenho de confiabilidade, a partir da adoção de dispositivos BESS. Há redução de 46% na Expectância de Energia não Suprida (EENS) para o patamar de carga máxima diurna, e de 16% para o patamar de carga mínima diurna, quando comparados os casos “com” e “sem” BESS com MMGD presente.

# Obrigado!