



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

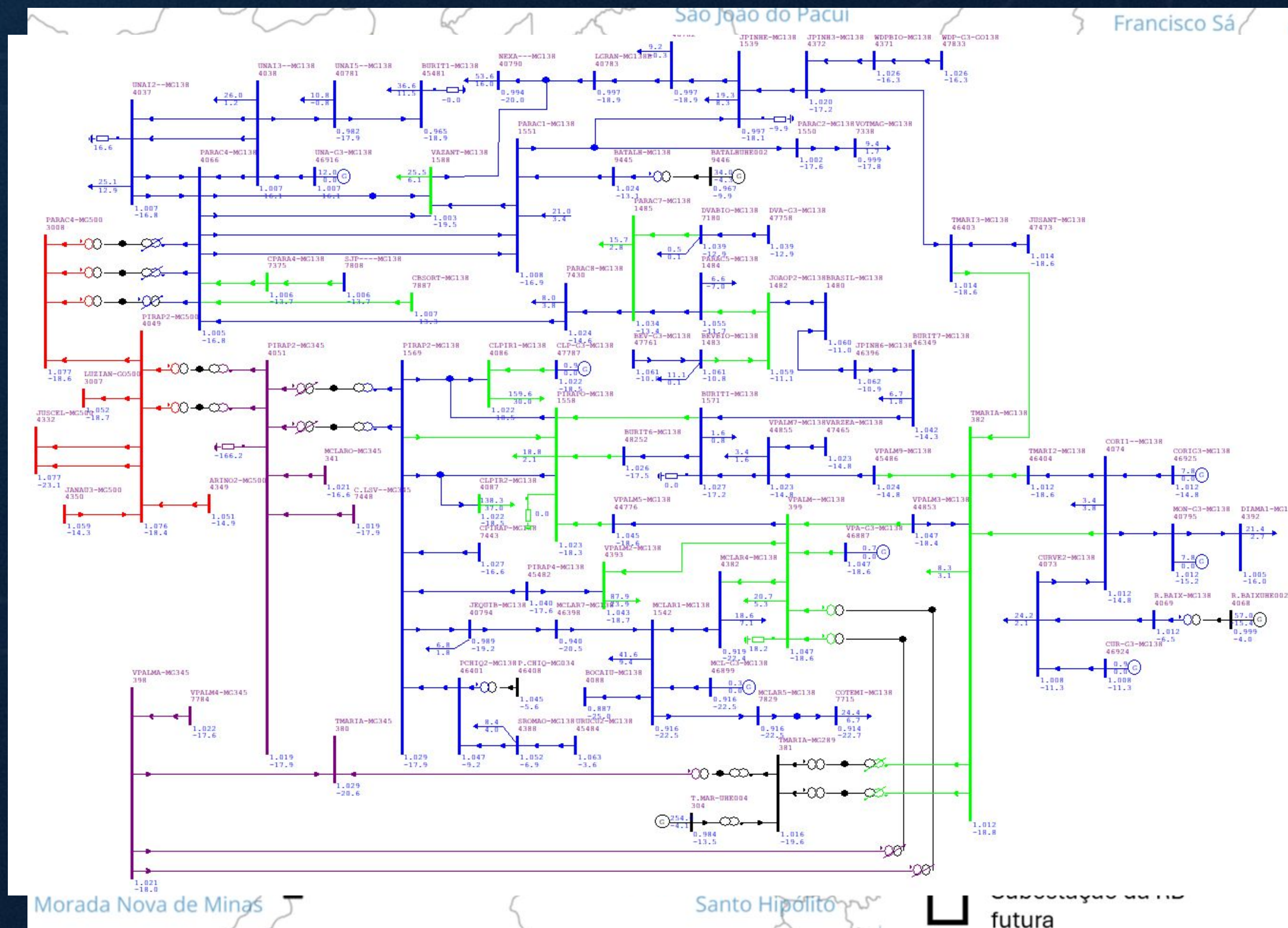
- A avaliação inicial em MT/BT explorou o alimentador complexo PRRU07, da CEMIG, localizado nos municípios de Buritizeiro e Pirapora, no Norte de MG.
- A região inicial incluiu os municípios de **Buritizeiro**, **Pirapora** e **Várzea da Palma**, além de parte de Unidades Consumidoras (UCs) de municípios 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 ramaís 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

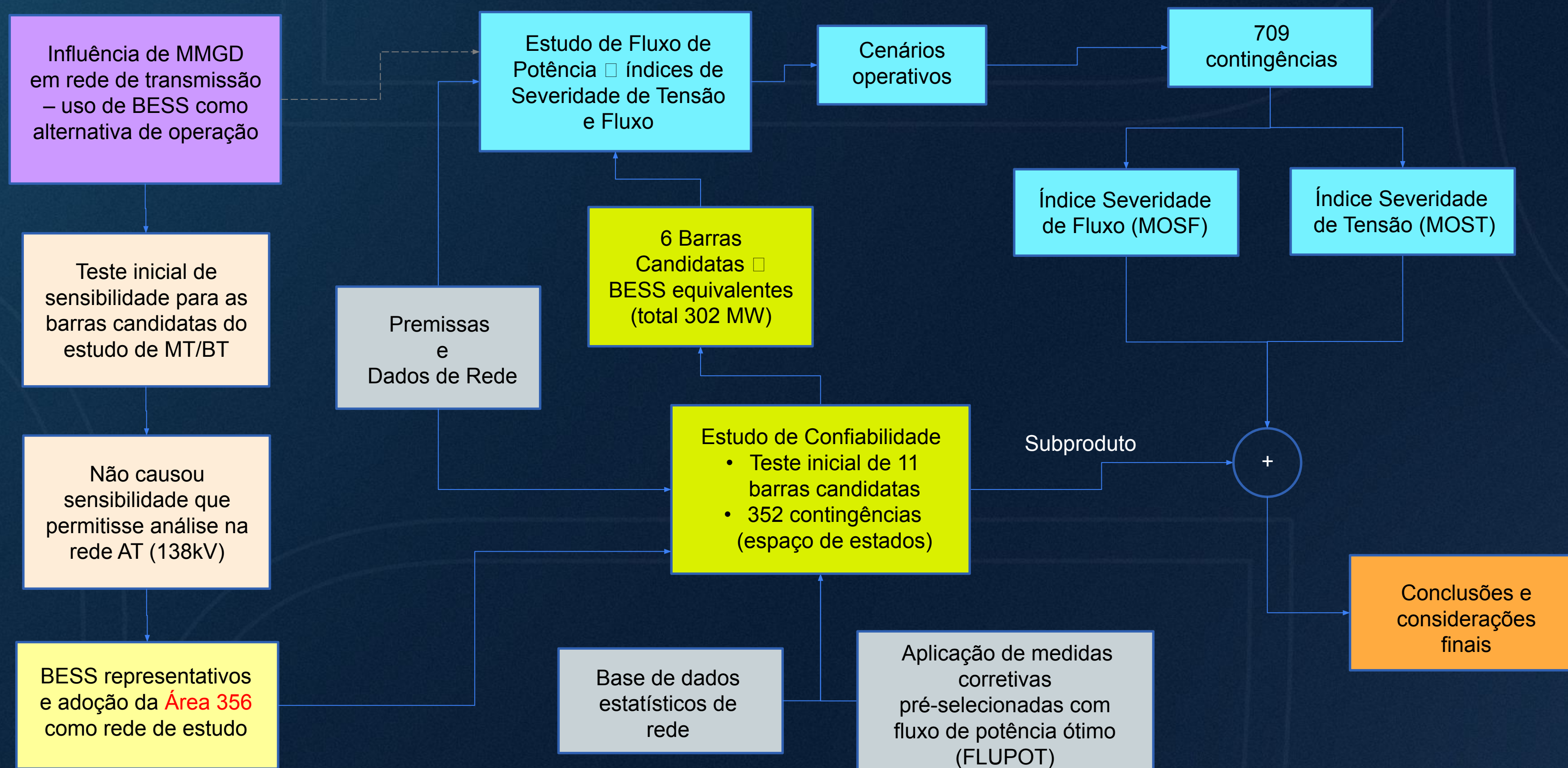
Região inicial de estudo MT/BT

- 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



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)



Fonte mapa : ONS

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
Máxima noturna (MW)	1534	1538
Máxima diurna (MW)	1559	1586
Mínima diurna (MW)	1226	1355

Geração patamar/sazonalidade	Inverno	Verão
Máxima noturna (MW)	170	217
Máxima diurna (MW)	1733	1784
Mínima diurna (MW)	1121	1274

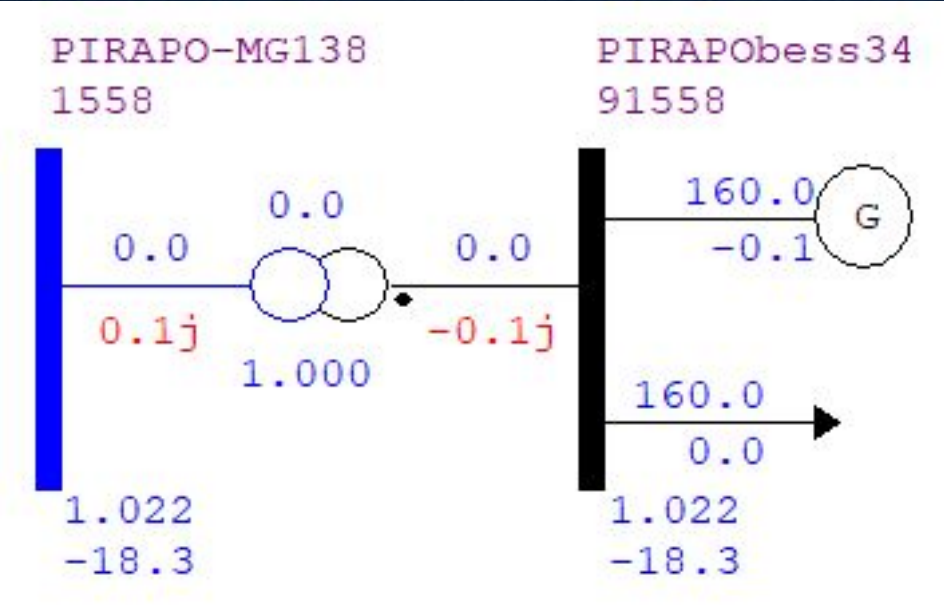
- Área escolhida apresenta equilíbrio entre geração e carga (autossuficiência) □ MMGD estimada de forma expedita por diferença, barra a barra, em relação ao patamar de carga noturna, para avaliação de efeitos “com” e “sem” MMGD.

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

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

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

Modelagem de 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

-
- Diagrama de rede elétrica detalhado da subestação de transmissão de 138 kV. O diagrama mostra a configuração das barras, disjuntores, transformadores e linhas de transmissão, com dados técnicos associados a cada elemento.
- Legenda:**
- | (Nb) | (Nome) |
|------|-------------|
| 155 | PIRAPÓ-MG1 |
| 8 | 38 |
| 408 | CLPIR1-MG13 |
| 6 | 8 |
| | VPALM--MG1 |
| 399 | 38 |
| 148 | JOAOP2-MG1 |
| 2 | 38 |
| 158 | VAZANT-MG1 |
| 8 | 38 |
| 148 | PARAC7-MG1 |
| 5 | 38 |

(Nb)	(Nome)
155 8	PIRAPO-MG1 38
408 6	CLPIR1-MG13 8
399	VPALM--MG1 38
148 2	JOAOP2-MG1 38
158 8	VAZANT-MG1 38
148 5	PARAC7-MG1 38

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 compreende a aplicação de contingências N-1 (total de 709 contingências pré-selecionadas) e monitoramento da Área 356, até a 3ª 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 <i>k-m</i> ou <i>m-k</i> .
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	convergidados	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 planeamento** 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, **umentando a flexibilidade e contribuindo para menores cortes de geração** (*curtailment*) e também no desempenho elétrico da rede de transmissão.

Conclusões e Considerações Finais

- 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.

Confiabilidade
(como SUBPRODUTO)

Obrigado!



APÊNDICE

Área 356 – MG - DIT/DIST (Norte)

Efeitos na Alta Tensão

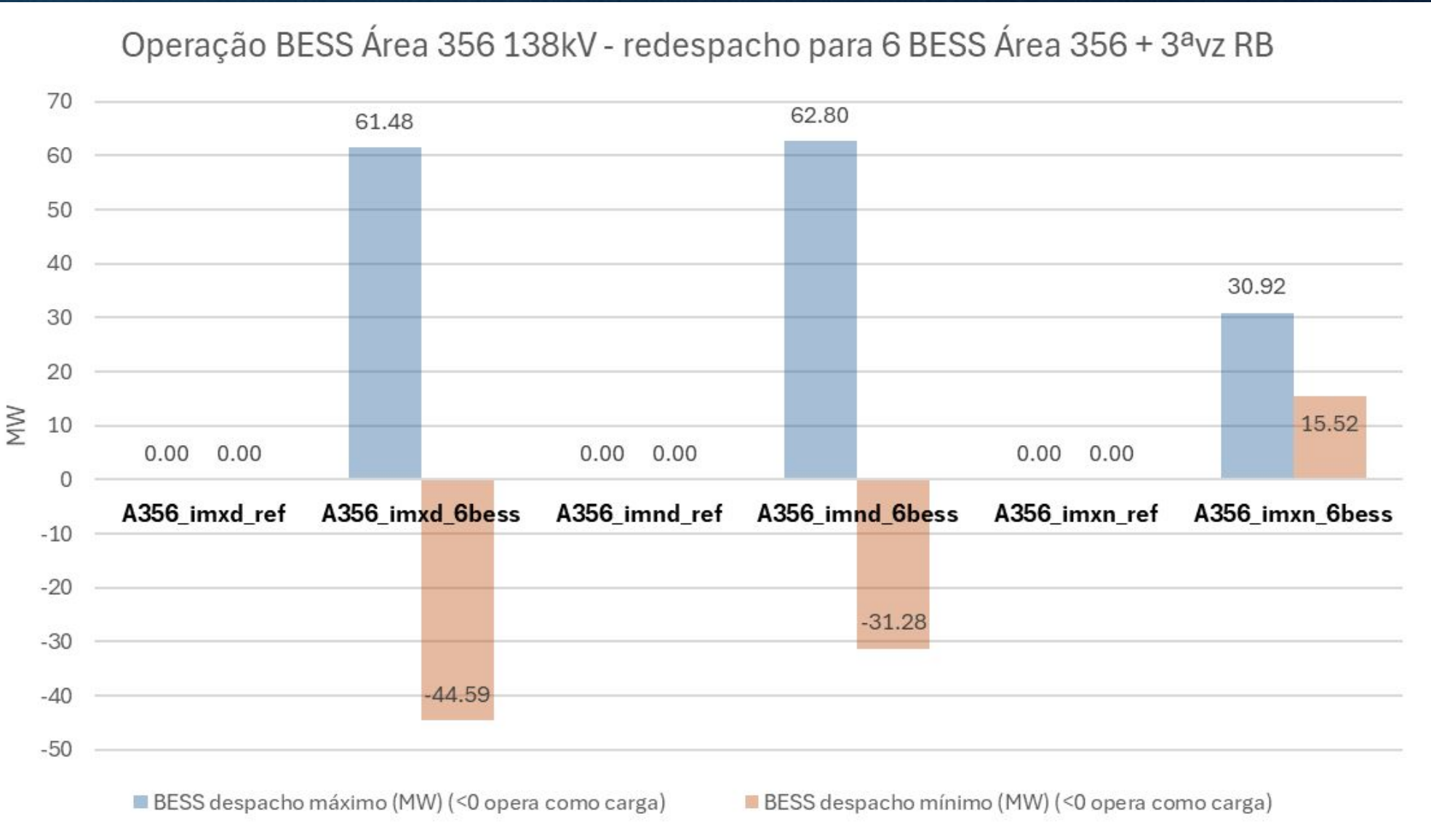
Tensão de transmissão 138kV

- 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**.

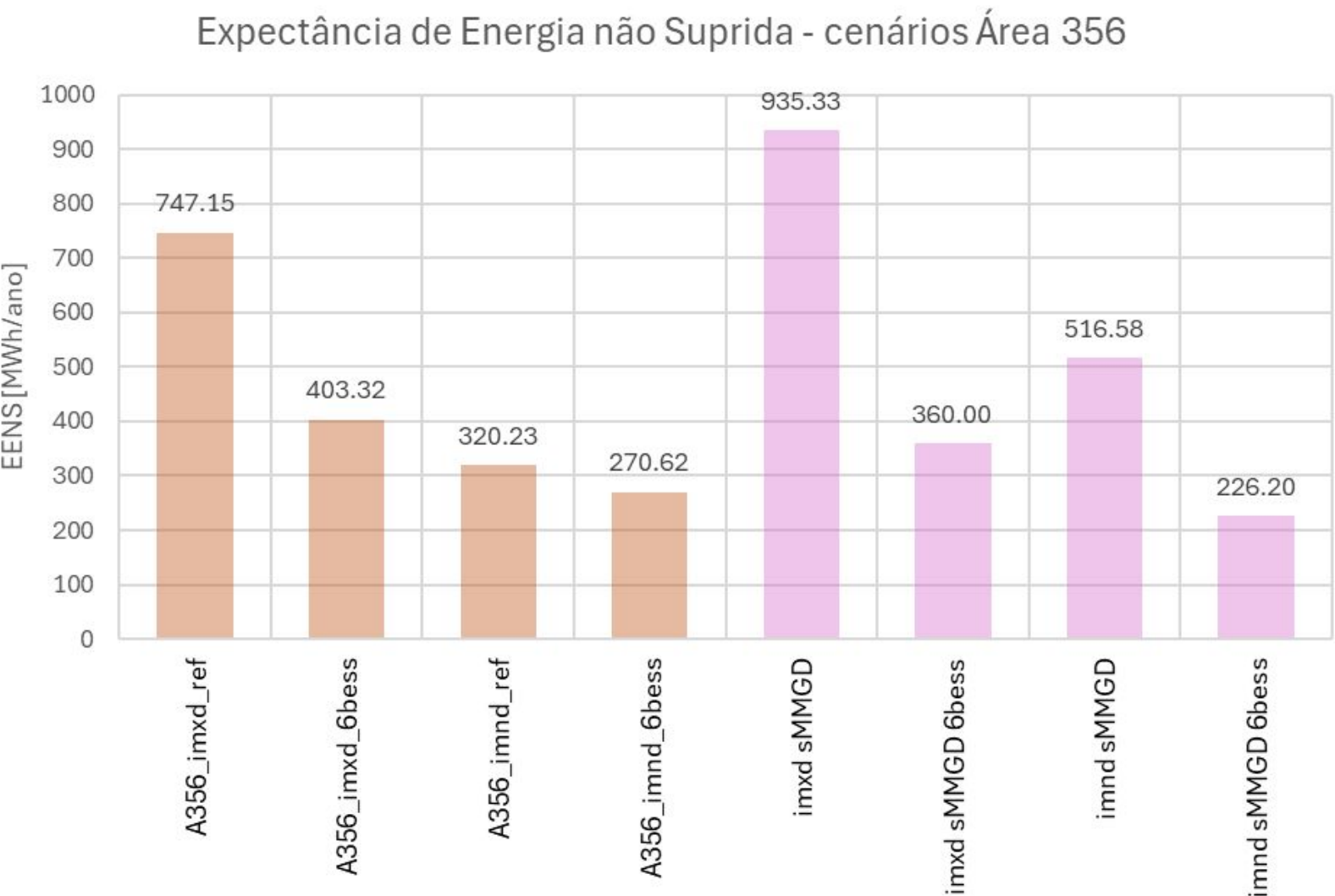
(Nb)	Nome	Máximo (MW)	Mínimo (MW)	BESS (MW)
barra_91558	PIRAPO-MG138	30	-41	41
barra_94086	CLPIR1-MG138	63	4	63
barra_90399	VPALM--MG138	61	-8	61
barra_91482	JOAOP2-MG138	45	-29	45
barra_91588	VAZANT-MG138	41	-45	45
barra_91485	PARAC7-MG138	47	-20	47

Apêndice

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

- Cenário de despacho *Business As Usual* (BAU) com valores pré-existent 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_ref	A356_imxd_6bess	A356_imnd_ref	A356_imnd_6bess	imxd sMMGD	imxd sMMGD 6bess	imnd sMMGD	imnd sMMGD 6bess
Indicador de Confiabilidade	imxd_p1_ref	imxd_p10_6bess	imnd_p2_ref	imnd_p20_6bess	imxd_p11_sgd	imxd_p12_sgd6b	imnd_p21_sgd	imnd_p22_sgd_6b
LOLP - Probabilidade de perda de carga (%)	0.425879000%	0.231962000%	0.276323000%	0.241392000%	0.389773000%	0.157130000%	0.259508000%	0.161974000%
LOLE - Expectância de perda de carga (h/ano)	37.3070000	20.3199000	24.2059000	21.1459000	34.1441000	13.7645000	22.7329000	14.1889000
LOLE - Frequência de perda de carga (h/ano)	25.8717000	20.5000000	25.8717000	20.5000000	39.4630000	12.0819000	22.0922000	12.0034000
EENS - Expectância de Energia não Suprida (MWh/ano)	747.15	403.32	320.22500	270.62000	935.33100	360.00000	516.57600	226.20300
Resultados avaliados com e sem o conjunto de barras candidatas (seis barras) a receber o equipamento BESS equivalente.	0.036555300	0.030892700	0.106773000	0.041095900	0.058969800	0.025822300		
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. Constata-se **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!

