

D2.3.1 - Especificação e Estudo do Dimensionamento

Relatório

*Especificação e estudo de dimensionamento do sistema de
armazenamento de energia (BESS) com baterias 2ª vida para projeto
Asprela+ Sustentável*



Esta publicação reflete apenas a opinião do autor. A Agência e a República Portuguesa não são responsáveis por qualquer utilização que possa ser feita da informação que contém.

Descrição Documento

Sigla do Projeto	ASPRELA + SUSTENTÁVEL
ID Acordo de Concessão	
Pacote de Trabalho	WP2
Nível de Divulgação	
Parceiro Principal	EFACEC Energia
Versão	1.0

Histórico Documento

Data	Autor	Parceiro	Alterações
14/11/2023	Fernando Xavier	EFACEC Energia	



Índice

1	Introdução	4
2	Racional do Estudo de Dimensionamento	5
3	Estudo de Dimensionamento	7
3.1	Estudo de Dimensionamento – caso de uso 1	10
3.1.1	Caso de uso 1: Sem sistema de armazenamento de energia	11
3.1.2	Caso de uso 1: Sistema de armazenamento de energia (EoL útil de 12 kWh)	12
3.1.3	Caso de uso 1: Sistema de armazenamento de energia (EoL útil de 30 kWh)	14
3.1.4	Caso de uso 1: Conclusão	17
3.2	Estudo de Dimensionamento – caso de uso 2	1
3.2.1	Caso de uso 2: Sem sistema de armazenamento de energia	1
3.2.2	Caso de uso 2: Sistema de armazenamento de energia (EoL útil de 12 kWh)	3
3.2.3	Caso de uso 2: Sistema de armazenamento de energia (EoL útil de 30 kWh)	6
3.2.4	Caso de uso 2: Sistema de armazenamento de energia (EoL útil de 54 kWh)	8
3.2.5	Caso de uso 2: Conclusão	10
3.3	Estudo de Dimensionamento – comparação dos casos de uso 1 e 2	1
3.4	Estudo de Dimensionamento – conclusão	5
4	Proposta de Dimensionamento	6
5	Especificação Técnica	8
6	Referências	9



1 Introdução

O objetivo do entregável D2.3.1 é justificar e apresentar o estudo de dimensionamento do sistema de armazenamento de energia que irá ser instalado na Escola Agra do Amial, o qual fará uso de baterias de segunda vida, provenientes de veículos elétricos. O facto de as baterias serem de segunda vida, é uma imposição do projeto relacionada com o *work package* onde esta aplicação se insere (Work Package 2 – Economia Circular e Ambiente) e tem como objetivo demonstrar a viabilidade de uma estratégia circular através da reutilização de baterias de veículos elétricos para armazenamento de energia renovável (solar fotovoltaica);

Enquanto membro da comunidade energética alvo do projeto Asprela + Sustentável, a Escola Agra do Amial apresenta um padrão característico de consumo de energia elétrica conhecido, o qual se pretende racionalizar e descarbonizar, através da instalação de uma central solar de microgeração fotovoltaica – com 14,3 kWp de potência instalada – e de um sistema de armazenamento de energia com baterias (neste caso de segunda vida), a fim de potenciar o uso de energia elétrica armazenada sempre que haja excesso de produção de energia renovável, face ao consumo de energia apresentado pela Escola.

O estudo proposto incidirá nas vertentes aplicacionais, com destaque para a aplicação pretendida, bem como para casos de uso significativos e que espelhem a realidade do consumo de energia elétrica da Escola Agra do Amial e de um perfil de geração de energia renovável coerente com dados tipicamente aceites como sendo de referência.



2 Racional do Estudo de Dimensionamento

Uma vez que há registo histórico do consumo de energia elétrica da Escola Agra do Amial, referente ao ano de 2022, serão utilizados dados desse histórico para formular os casos de uso.

Relativamente à geração solar fotovoltaica, uma vez que a respetiva central ainda não foi instalada, far-se-á uma previsão de geração, considerando a informação obtida através do simulador PVGIS da Comissão Europeia (1).

Considera-se que o sistema de armazenamento de energia deverá ter em consideração dois casos de uso, representativos de situações extremas de consumo de energia e de geração renovável:

- Caso de uso 1 – janeiro de 2022 (dias 9, 10 e 11)
 - Consumo elevado de energia elétrica, nomeadamente no aquecimento e na iluminação;
 - Menor produção fotovoltaica, devido à menor radiação solar – fonte renovável – e à menor duração diária a que se manifesta.
- Caso de uso 2 – maio de 2022 (dias 15, 16 e 17)
 - Menor consumo de energia elétrica, devido às temperaturas amenas e à iluminação natural;



- Maior produção fotovoltaica, devido à maior radiação solar – fonte renovável –, à maior eficiência dos painéis fotovoltaicos sujeitos a temperaturas ainda amenas, e à maior duração diária a que se manifesta.

Os dois casos de uso englobam dias adjacentes, sendo que o primeiro é um dia não laboral – domingo – e os restantes são dias úteis, nomeadamente segunda-feira e terça-feira.



3 Estudo de Dimensionamento

Para o estudo de dimensionamento, foi simulado o perfil de geração fotovoltaico referente à localização da Escola Agra do Amial, no Porto. O simulador PVGIS permitiu obter a informação de geração fotovoltaica patente na Figura 1.

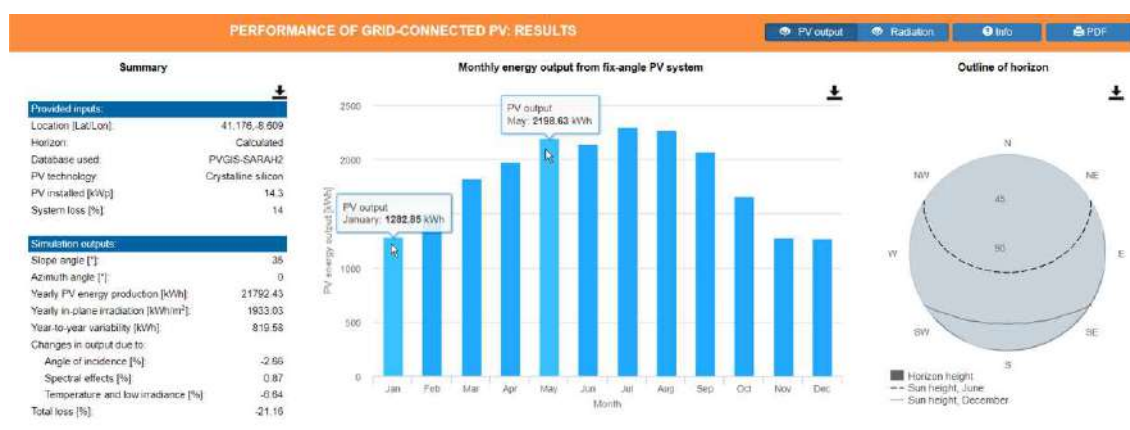


Figura 1 – potencial energético gerado pela central de microgeração fotovoltaica da Escola Agra do Amial

Uma vez que não há mais dados, além dos apresentados, optou-se por admitir que, nos dois casos de uso, o modelo que irá sustentar o estudo de dimensionamento, considera, como assunção, que os dias alvo de estudo têm o céu limpo, pelo que a radiação solar será a máxima possível, nesses dias. Admitiu-se também que o dito modelo considera, também como assunção, que, em média, o comportamento típico de um dia é representativo do comportamento típico do respetivo mês.

Assim, considerando que a produção de energia fotovoltaica é de 1282,85 kWh no mês de janeiro então, em média, cada dia de janeiro produzirá um 31 avos desse valor, ou seja, 41,38 kWh diários.



Reciprocamente, no mês de maio, considerando que a produção de energia fotovoltaica é de 2198,63 kWh então, em média, cada dia de maio produzirá um 31 avos desse valor, ou seja, 70,92 kWh diários.

Através do simulador PVGIS, é possível obter-se a curva de radiação solar média diária de cada um dos meses de janeiro e de maio. Sabendo que a produção de energia fotovoltaica apresenta uma curva evolutiva semelhante à da radiação solar e sabendo qual é o valor total diário de energia fotovoltaica que, em média, é possível gerar, então pode obter-se a curva diária de evolução expectável de energia que a central de microgeração fotovoltaica pode produzir, em cada um dos cenários previstos ou seja, num dia típico de janeiro ou de maio.

A Figura 2 ilustra a produção típica da central de microgeração fotovoltaica da Escola Agra do Amial, em intervalos de quinze minutos, referente ao mês de janeiro.

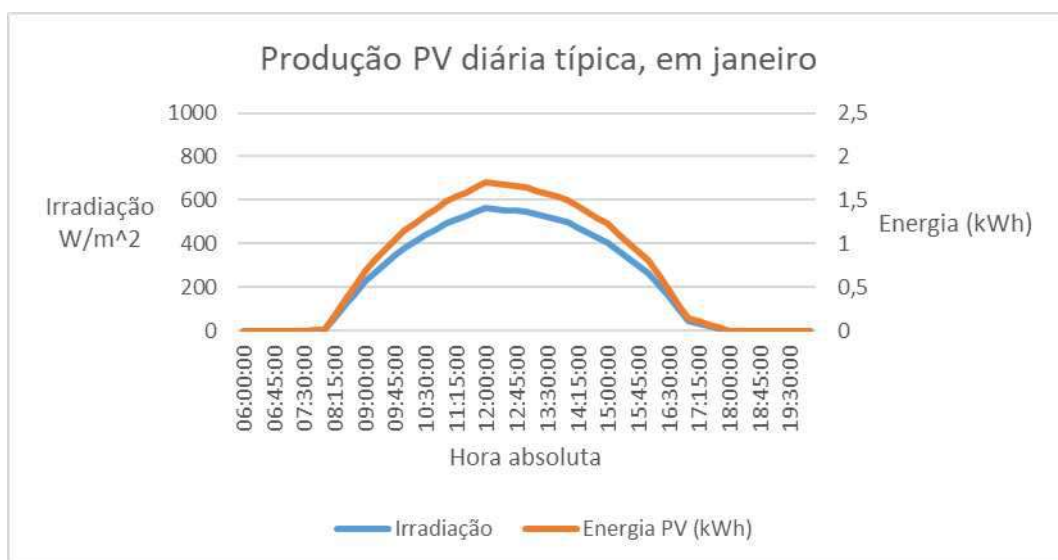


Figura 2 – produção típica da central de microgeração fotovoltaica da Escola Agra do Amial, em janeiro



A Figura 3 ilustra a produção típica da central de microgeração fotovoltaica da Escola Agra do Amial, em intervalos de quinze minutos, referente ao mês de maio.

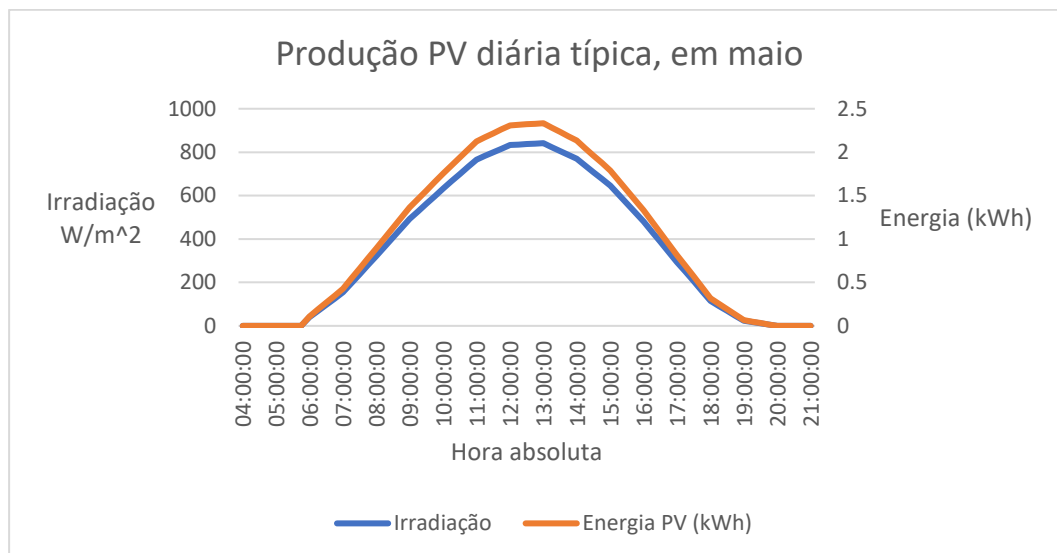


Figura 3 – produção típica da central de microgeração fotovoltaica da Escola Agra do Amial, em maio

Foi desenvolvido um modelo que simula o comportamento do sistema elétrico da Escola Agra do Amial, no qual consta a interligação à rede do operador de rede, a qual, para efeito do estudo, se admite como sendo em BT. O modelo compreende ainda o perfil do consumo energético de quatro dias de janeiro de 2022, referentes ao caso de uso 1, bem como de quatro dias de maio de 2022, referentes ao caso de uso 2. Quanto à central de microgeração fotovoltaica, o modelo considera que o perfil de geração de energia apresentado na Figura 2 ilustra as ocorrências em cada um dos quatro dias consecutivos do mês de janeiro alvo do estudo – caso de uso 1 – e que o perfil de geração de energia apresentado na Figura 3 ilustra as ocorrências em cada um dos quatro dias consecutivos do mês de maio alvo do estudo – caso de uso 2. Finalmente, o modelo considera diferentes opções de dimensionamento para o sistema de armazenamento de energia, considerando um *c-rate* de 0,25.



O recurso a diferentes opções de dimensionamento do sistema de baterias permitirá tecer conclusões quanto à capacidade energética que deve ser instalada no sistema de baterias, objeto deste estudo de dimensionamento. Tal capacidade instalada será obtida a partir da capacidade útil – EoL – que se estima ser necessária no fim de vida do sistema de baterias, tendo em consideração vários critérios, como sendo a profundidade de descarga admissível do sistema de baterias, o decaimento energético ao fim de 10 anos e o desempenho dos diferentes componentes principais do sistema de baterias.

3.1 Estudo de Dimensionamento – caso de uso 1

O caso de uso 1 refere-se a um contexto de utilização de recursos energéticos durante um período de quatro dias consecutivos, no mês de janeiro. Esse período caracteriza-se pelo consumo residual típico de um dia de sábado e outro de domingo e pelo consumo substancialmente acrescido durante os dias úteis em que há atividade escolar, sendo de notar que tal consumo expressa o recurso a aquecimento e a iluminação artificial. O perfil de produção de energia em janeiro da central de microgeração fotovoltaica – com potência instalada de 14,3 kWp – é a que está apresentada na **Figura 2**. O comportamento do sistema de energia da Escola Agra do Amial foi simulado sem sistema de baterias e também para várias configurações EoL do sistema de baterias – BESS –, sendo que são apresentados diferentes gráficos que ilustram esse comportamento.

Neste caso de uso, o consumo da Escola durante os quatro dias é de 754,0 kWh. A energia verde produzida pela central PV no mesmo período é de 165,5 kWh.



3.1.1 Caso de uso 1: Sem sistema de armazenamento de energia

A Figura 4 ilustra o comportamento do sistema elétrico da Escola Agra do Amial, quando equipado apenas com a central de microgeração fotovoltaica pelo que, neste caso, o sistema de armazenamento de energia por baterias – BESS – foi excluído da instalação que equipa a Escola.

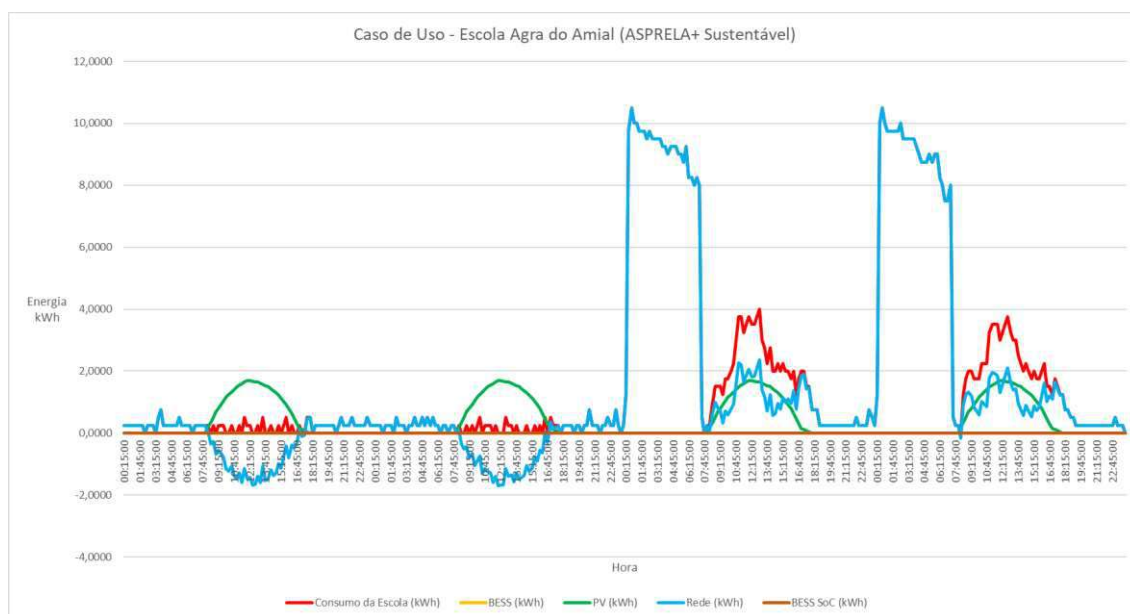


Figura 4 – gráfico de tendência do comportamento energético dos componentes do sistema – sem BESS (0 kWh)

Como se pode constatar, não há qualquer uso energético por parte do sistema de baterias – BESS –, o qual foi excluído desta configuração. A partir da Figura 4, pode constatar-se o seguinte:

- No domingo, enquanto a radiação solar o permitir, a central de microgeração fotovoltaica – PV – alimenta exclusivamente a carga da Escola, nesse período;



- Ainda nesse período, todo o excedente de produção renovável é devolvido à rede elétrica de distribuição;
- Nos dias seguintes – segunda-feira e terça-feira – o consumo energético é suportado a partir da rede elétrica de distribuição, sendo que tal consumo é parcialmente suportado pela central de microgeração fotovoltaica – PV –, enquanto a radiação solar o permitir.

Da simulação efetuada, no período de quatro dias consecutivos constatou-se o seguinte:

- Energia verde gerada na central PV, consumida na Escola: 92,96 kWh
 - % energia verde, consumida na Escola: 12,33 %
- Energia oriunda da rede elétrica de distribuição, consumida na Escola: 661,04 kWh
 - % energia da rede de distribuição, consumida na Escola: 87,67 %
- Energia fornecida pela central de baterias – BESS –, consumida na Escola: não aplicável
 - % energia oriunda do BESS não aplicável
- Energia gerada na central PV e devolvida à rede (não usada na escola): 72,56 kWh
 - % energia verde desperdiçada, devolvida à rede de distribuição: 43,84 %

3.1.2 Caso de uso 1: Sistema de armazenamento de energia (EoL útil de 12 kWh)

A Figura 5 ilustra o comportamento do sistema elétrico da Escola Agra do Amial, quando equipado com um BESS de capacidade útil EoL de 12 kWh e com a mesma central de microgeração fotovoltaica.



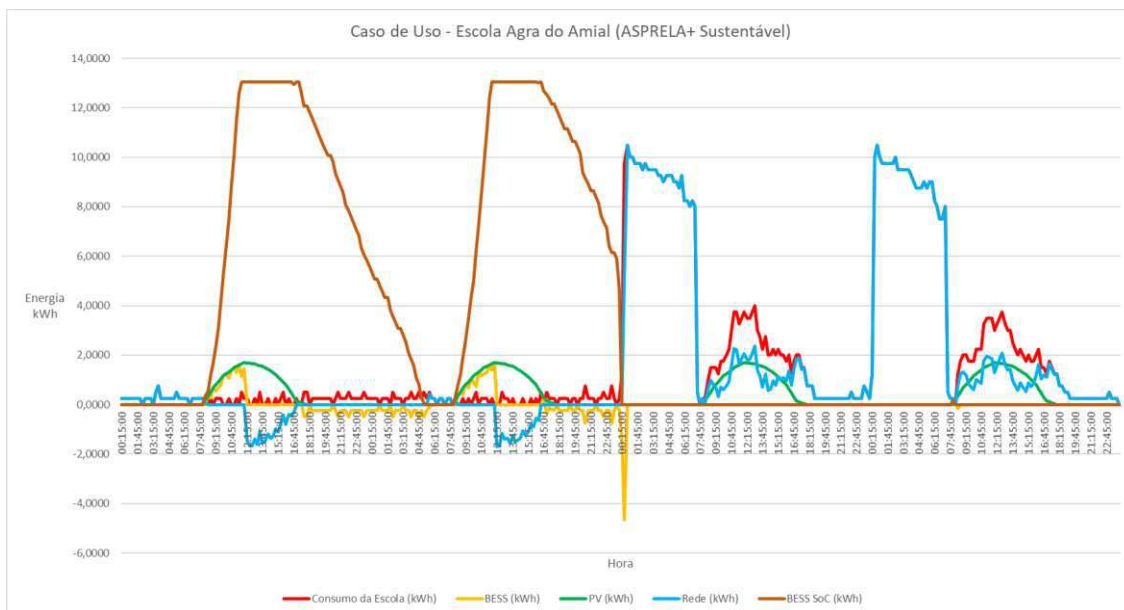


Figura 5 – gráfico de tendência do comportamento energético dos componentes do sistema – BESS (12 kWh EoL útil)

Como se pode constatar, agora há uso energético por parte do sistema de baterias – BESS –, o qual tanto carrega a partir da central PV, quanto descarrega para a Escola. O estado de carga – energia útil acumulada em cada intervalo de 15 minutos – do BESS também é apresentado. A partir da Figura 5, pode constatar-se o seguinte:

- No domingo, enquanto a radiação solar o permitir, a central de microgeração fotovoltaica – PV – alimenta a carga da Escola, nesse período;
- Ainda nesse período, todo o excedente de produção renovável é usado para carregar a bateria do BESS, até que a sua capacidade máxima útil seja atingida, ocasião em que o excedente de produção renovável é devolvido à rede elétrica de distribuição;



- Pode observar-se que o estado de carga do BESS satura nos 13 kWh, valor que corresponde à energia máxima que o BESS necessita ver carregada nas suas baterias para que possa disponibilizar 12 kWh de energia útil, admitindo uma eficiência *round trip* – RTE – em corrente alternada no valor de 92%;
- Nos dias seguintes – segunda-feira e terça-feira – todo o consumo energético é suportado a partir da rede elétrica de distribuição, sendo que tal consumo é parcialmente suportado pela central de microgeração fotovoltaica – PV –, enquanto a radiação solar o permitir. Nestes dias úteis, não há excedentes de geração PV que possam ser armazenados no BESS.

Da simulação efetuada, no período de quatro dias consecutivos constatou-se o seguinte:

- Energia verde gerada na central PV, consumida na Escola: 92,96 kWh
 - % energia verde, consumida na Escola: 12,33 %
- Energia oriunda da rede elétrica de distribuição, consumida na Escola: 634,66 kWh
 - % energia da rede de distribuição, consumida na Escola: 84,17 %
- Energia fornecida pela central de baterias – BESS –, consumida na Escola: 26,38 kWh
 - % energia oriunda do BESS 3,50%
- Energia gerada na central PV e devolvida à rede (não usada na escola): 41,65 kWh
 - % energia verde desperdiçada, devolvida à rede de distribuição: 25,16 %

3.1.3 Caso de uso 1: Sistema de armazenamento de energia (EoL útil de 30 kWh)

A Figura 6 ilustra o comportamento do sistema elétrico da Escola Agra do Amial, quando equipado com um BESS de capacidade útil EoL de 30 kWh e com a mesma central de microgeração fotovoltaica.



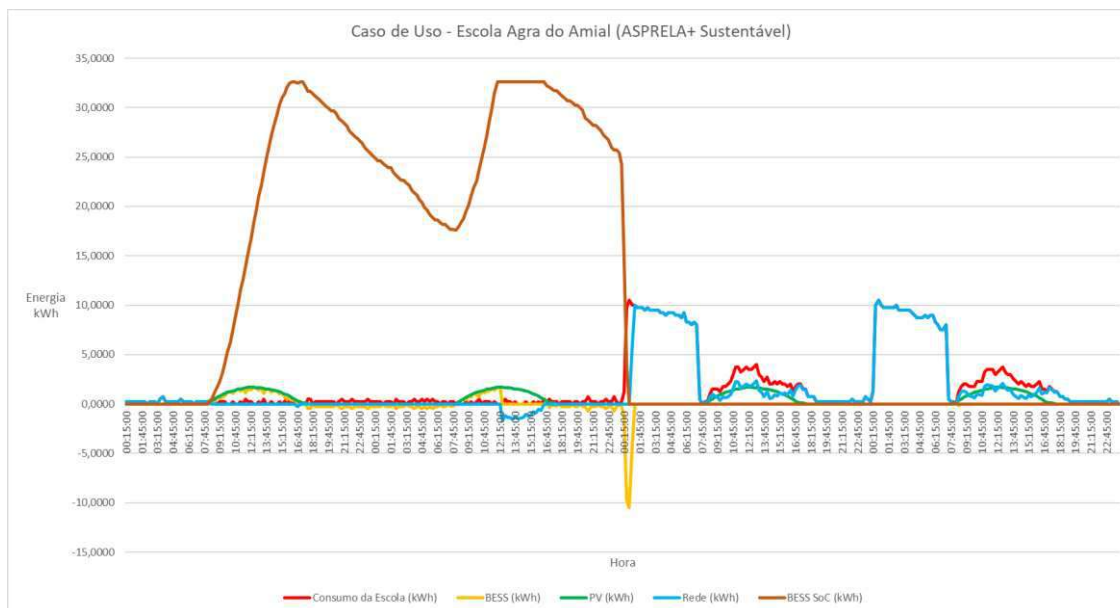


Figura 6 – gráfico de tendência do comportamento energético dos componentes do sistema – BESS (30 kWh EoL útil)

Como se pode constatar, continua a haver uso energético por parte do sistema de baterias – BESS –, o qual tanto carrega a partir da central PV, quanto descarrega para a Escola. O estado de carga – energia útil acumulada em cada intervalo de 15 minutos – do BESS também é apresentado. A partir da Figura 6, pode constatar-se o seguinte:

- No domingo, enquanto a radiação solar o permitir, a central de microgeração fotovoltaica – PV – alimenta a carga da Escola, nesse período;
- Ainda nesse período, todo o excedente de produção renovável é usado para carregar a bateria do BESS, até que a sua capacidade máxima útil seja atingida, ocasião em que o excedente de produção renovável é devolvido à rede elétrica de distribuição;



- Pode observar-se que o estado de carga do BESS satura, por pouco tempo, nos 32,6 kWh, valor que corresponde à energia máxima que o BESS necessita ver carregada nas suas baterias para que possa disponibilizar 30 kWh de energia útil, admitindo uma eficiência *round trip* – RTE – em corrente alternada no valor de 92%;
- No dia seguinte – segunda-feira – quase todo o consumo energético é suportado a partir da rede elétrica de distribuição, sendo que tal consumo é parcialmente suportado pela central de microgeração fotovoltaica – PV –, enquanto a radiação solar o permitir. O consumo da Escola durante a primeira hora deste dia útil é totalmente suportado pelo BESS. Neste dia útil, não há excedentes de geração PV que possam ser armazenados no BESS.
- No dia seguinte – terça-feira – todo o consumo energético é suportado a partir da rede elétrica de distribuição, sendo que tal consumo é parcialmente suportado pela central de microgeração fotovoltaica – PV –, enquanto a radiação solar o permitir. Neste dia útil, não há excedentes de geração PV que possam ser armazenados no BESS.

Da simulação efetuada, no período de quatro dias consecutivos constatou-se o seguinte:

- Energia verde gerada na central PV, consumida na Escola: 92,96 kWh
 - % energia verde, consumida na Escola: 12,33 %
- Energia oriunda da rede elétrica de distribuição, consumida na Escola: 613,10 kWh
 - % energia da rede de distribuição, consumida na Escola: 81,31 %
- Energia fornecida pela central de baterias – BESS –, consumida na Escola: 47,94 kWh
 - % energia oriunda do BESS 6,36%
- Energia gerada na central PV e devolvida à rede (não usada na escola): 19,31 kWh
 - % energia verde desperdiçada, devolvida à rede de distribuição: 11,66 %



3.1.4 Caso de uso 1: Conclusão

Quaisquer outras configurações de armazenamento de energia com capacidade superior, não trarão benefício à Escola, uma vez que há saturação dos valores de energia verde entregues à Escola, os quais correspondem ao máximo possível, bem como há saturação dos valores da energia oriunda da rede de distribuição, os quais correspondem também ao máximo possível, dado o padrão de consumo de energia.



Tabela 1 – resumo dos cenários do caso de uso 1 – quatro (4) dias seguidos em janeiro, entre sábado e terça-feira

Cenário	Energia consumida na Escola	Energia verde gerada no PV	Energia consumida a partir da rede	Energia verde consumida a partir do PV	Energia verde consumida a partir do BESS	Energia verde devolvida à rede
Sem Bateria, 0 kWh EoL úteis	754,00 kWh	165,53 kWh	661,04 kWh	92,96 kWh	Não aplicável	72,56 kWh
BESS 20,38 kWh 12 kWh EoL úteis			634,66 kWh		26,38 kWh	41,65 kWh
BESS 50,95 kWh 30 kWh EoL úteis			613,10 kWh		47,94 kWh	19,31 kWh

3.2 Estudo de Dimensionamento – caso de uso 2

O caso de uso 2 refere-se a um contexto de utilização de recursos energéticos durante um período de quatro dias consecutivos, no mês de maio. Esse período caracteriza-se pelo consumo residual típico de um dia de sábado e outro de domingo e pelo consumo durante os dias úteis, característico dos dias em que há atividade escolar, sendo de notar que tal consumo expressa um menor recurso a aquecimento e a iluminação artificial. O perfil de produção de energia em maio da central de microgeração fotovoltaica – com potência instalada de 14,3 kWp – é a que está apresentada na **Figura 3**. O comportamento do sistema de energia da Escola Agra do Amial foi simulado sem sistema de baterias e também para várias configurações EoL do sistema de baterias – BESS –, sendo que são apresentados diferentes gráficos que ilustram esse comportamento.

Neste caso de uso, o consumo da Escola durante os quatro dias é de 223,0 kWh. A energia verde produzida pela central PV no mesmo período é de 283,7 kWh.

3.2.1 Caso de uso 2: Sem sistema de armazenamento de energia

A **Figura 7** ilustra o comportamento do sistema elétrico da Escola Agra do Amial, quando equipado apenas com a central de microgeração fotovoltaica pelo que, neste caso, o sistema de armazenamento de energia por baterias – BESS – foi excluído da instalação que equipa a Escola.



Como se pode constatar, não há qualquer uso energético por parte do sistema de baterias – BESS –, o qual foi excluído desta configuração. A partir da **Figura 7**, pode constatar-se o seguinte:

- No domingo, enquanto a radiação solar o permitir, a central de microgeração fotovoltaica – PV – alimenta exclusivamente a carga da Escola, nesse período;
- Ainda nesse período, todo o excedente de produção renovável – substancialmente superior ao valor homólogo de janeiro – é devolvido à rede elétrica de distribuição;
- Nos dias seguintes – segunda-feira e terça-feira – o consumo energético é suportado a partir da rede elétrica de distribuição, sendo que tal consumo é parcialmente suportado pela central de microgeração fotovoltaica – PV –, enquanto a radiação solar o permitir. Durante o início da produção PV, ocorre restituição de energia à rede de distribuição.

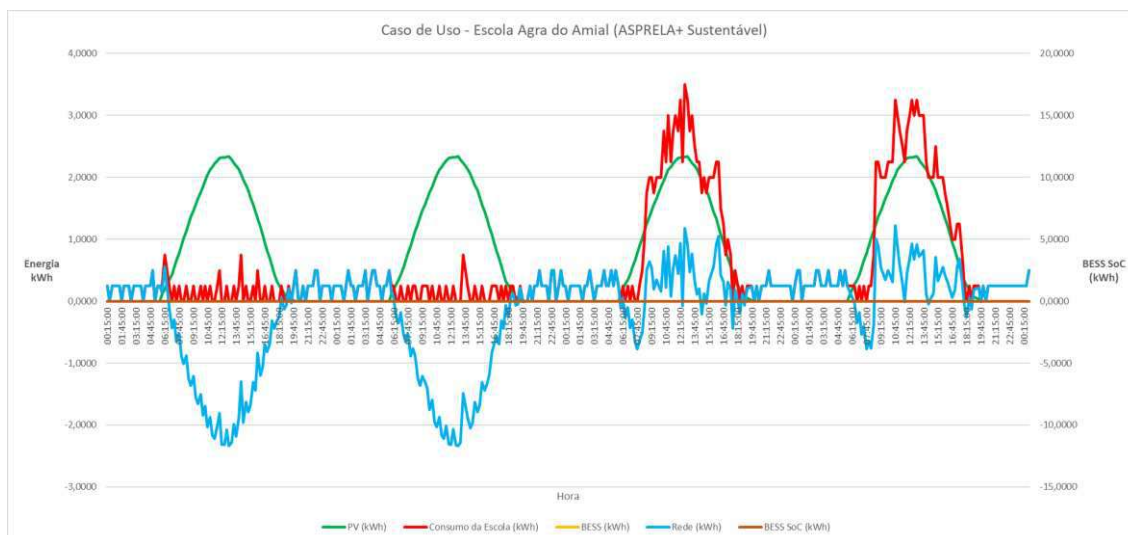


Figura 7 – gráfico de tendência do comportamento energético dos componentes do sistema – sem BESS (0 kWh)

Da simulação efetuada, no período de quatro dias consecutivos constatou-se o seguinte:



- Energia verde gerada na central PV, consumida na Escola: 145,48 kWh
 - % energia verde, consumida na Escola: 65,23 %
- Energia oriunda da rede elétrica de distribuição, consumida na Escola: 77,52 kWh
 - % energia da rede de distribuição, consumida na Escola: 34,77 %
- Energia fornecida pela central de baterias – BESS –, consumida na Escola: não aplicável
 - % energia oriunda do BESS não aplicável
- Energia gerada na central PV e devolvida à rede (não usada na escola): 138,21 kWh
 - % energia verde desperdiçada, devolvida à rede de distribuição: 48,72 %

3.2.2 Caso de uso 2: Sistema de armazenamento de energia (EoL útil de 12 kWh)

A Figura 8 ilustra o comportamento do sistema elétrico da Escola Agra do Amial, quando equipado com um BESS de capacidade útil EoL de 12 kWh e com a mesma central de microgeração fotovoltaica.



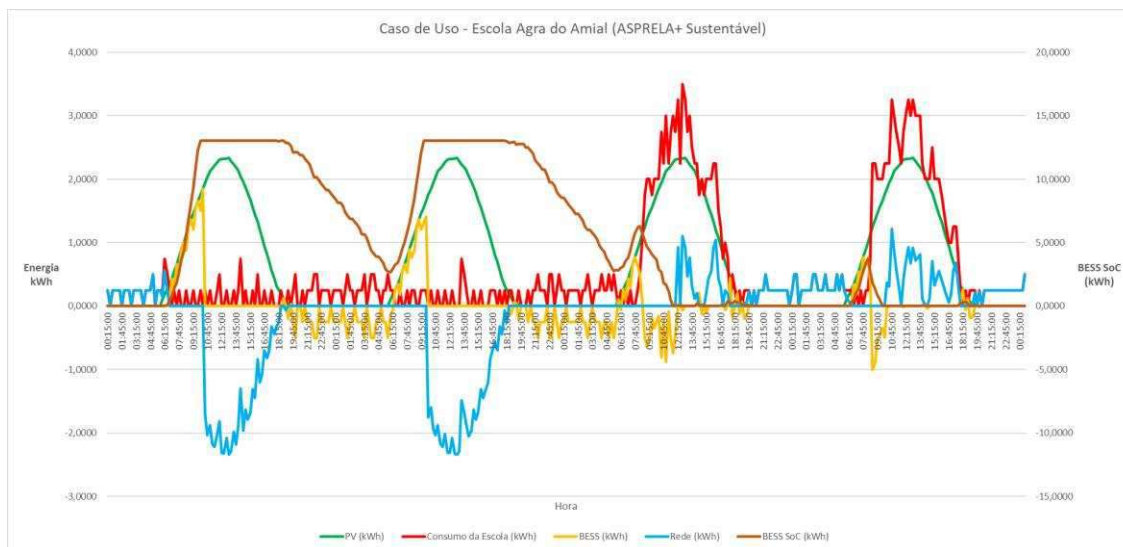


Figura 8 – gráfico de tendência do comportamento energético dos componentes do sistema – BESS (12 kWh EoL útil)

Como se pode constatar, agora há uso energético por parte do sistema de baterias – BESS –, o qual tanto carrega a partir da central PV, quanto descarrega para a Escola. O estado de carga – energia útil acumulada em cada intervalo de 15 minutos – do BESS também é apresentado. A partir da Figura 8, pode constatar-se o seguinte:

- No domingo, enquanto a radiação solar o permitir, a central de microgeração fotovoltaica – PV – alimenta a carga da Escola, nesse período;
- Ainda nesse período, todo o excedente de produção renovável é usado para carregar a bateria do BESS, até que a sua capacidade máxima útil seja atingida, ocasião em que o excedente de produção renovável é devolvido à rede elétrica de distribuição;
- Pode observar-se que o estado de carga do BESS satura nos 13 kWh, valor que corresponde à energia máxima que o BESS necessita ver carregada nas suas baterias para que possa



disponibilizar 12 kWh de energia útil, admitindo uma eficiência *round trip* – RTE – em corrente alternada no valor de 92%;

- No dia seguinte – segunda-feira – durante cerca de metade do dia, todo o consumo energético é suportado a partir da central de microgeração fotovoltaica – PV – e do BESS, sendo que, na segunda metade do dia, o consumo é suportado pela rede elétrica de distribuição e pelo PV, com contribuições residuais do BESS. Neste dia útil, há alguns excedentes de geração PV que são armazenados no BESS, no início da produção PV.
- No dia seguinte – terça-feira – quase todo o consumo energético é suportado a partir da rede elétrica de distribuição, sendo que tal consumo é parcialmente suportado pela central de microgeração fotovoltaica – PV –, enquanto a radiação solar o permitir. De manhã e durante cerca de hora e meia, não há recurso a energia da rede, sendo de notar o contributo do BESS nesse período. Neste dia útil, há alguns excedentes de geração PV que são armazenados no BESS, no início da produção PV.

Da simulação efetuada, no período de quatro dias consecutivos constatou-se o seguinte:

- Energia verde gerada na central PV, consumida na Escola: 145,48 kWh
 - % energia verde, consumida na Escola: 65,23 %
- Energia oriunda da rede elétrica de distribuição, consumida na Escola: 45,10 kWh
 - % energia da rede de distribuição, consumida na Escola: 20,22 %
- Energia fornecida pela central de baterias – BESS –, consumida na Escola: 32,42 kWh
 - % energia oriunda do BESS 14,54 %
- Energia gerada na central PV e devolvida à rede (não usada na escola): 101,54 kWh
 - % energia verde desperdiçada, devolvida à rede de distribuição: 35,79 %



3.2.3 Caso de uso 2: Sistema de armazenamento de energia (EoL útil de 30 kWh)

A Figura 9 ilustra o comportamento do sistema elétrico da Escola Agra do Amial, quando equipado com um BESS de capacidade útil EoL de 30 kWh e com a mesma central de microgeração fotovoltaica.

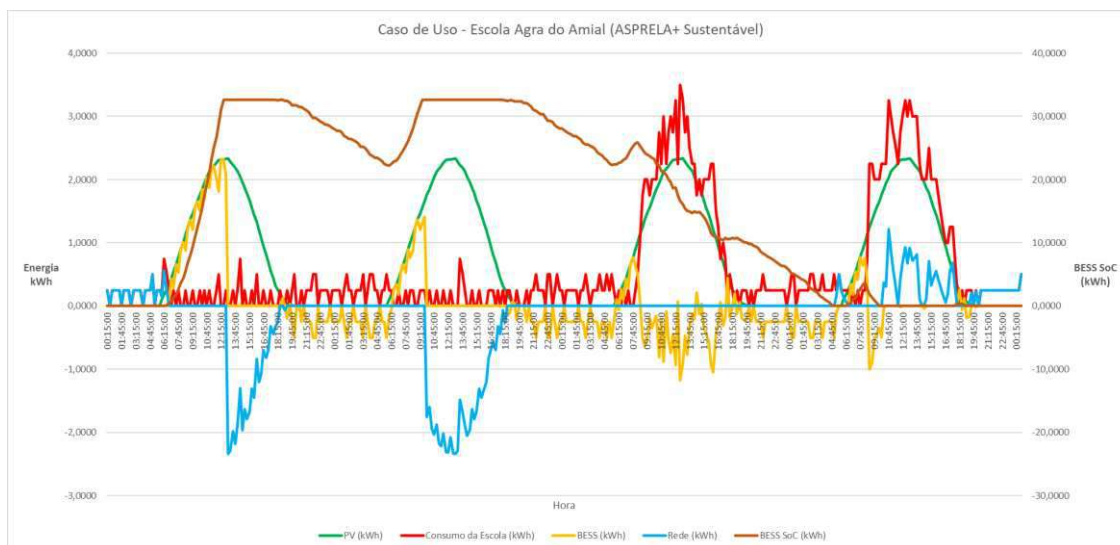


Figura 9 – gráfico de tendência do comportamento energético dos componentes do sistema – BESS (30 kWh EoL útil)

Como se pode constatar, continua a haver uso energético por parte do sistema de baterias – BESS –, o qual tanto carrega a partir da central PV, quanto descarrega para a Escola. O estado de carga – energia útil acumulada em cada intervalo de 15 minutos – do BESS também é apresentado. A partir da Figura 9, pode constatar-se o seguinte:

- No domingo, enquanto a radiação solar o permitir, a central de microgeração fotovoltaica – PV – alimenta a carga da Escola, nesse período;



- Ainda nesse período, todo o excedente de produção renovável é usado para carregar a bateria do BESS, até que a sua capacidade máxima útil seja atingida, ocasião em que o excedente de produção renovável é devolvido à rede elétrica de distribuição;
- Pode observar-se que o estado de carga do BESS satura nos 32,6 kWh, valor que corresponde à energia máxima que o BESS necessita ver carregada nas suas baterias para que possa disponibilizar 30 kWh de energia útil, admitindo uma eficiência *round trip* – RTE – em corrente alternada no valor de 92%;
- No dia seguinte – segunda-feira – todo o consumo energético é suportado pela central de microgeração fotovoltaica – PV –, enquanto a radiação solar o permitir, bem como pelo BESS. Neste dia útil, há alguns excedentes de geração PV que são armazenados no BESS, no início da produção PV.
- No dia seguinte – terça-feira – quase todo o consumo energético é suportado a partir da rede elétrica de distribuição, sendo que tal consumo é parcialmente suportado pela central de microgeração fotovoltaica – PV –, enquanto a radiação solar o permitir. De manhã e durante cerca de quatro horas, não há recurso a energia da rede, sendo de notar o contributo do BESS e do PV, nesse período. Neste dia útil, há alguns excedentes de geração PV que são armazenados no BESS, no início da produção PV.

Da simulação efetuada, no período de quatro dias consecutivos constatou-se o seguinte:

- Energia verde gerada na central PV, consumida na Escola: 145,48 kWh
 - % energia verde, consumida na Escola: 65,23 %
- Energia oriunda da rede elétrica de distribuição, consumida na Escola: 25,52 kWh
 - % energia da rede de distribuição, consumida na Escola: 11,44 %
- Energia fornecida pela central de baterias – BESS –, consumida na Escola: 52,00 kWh



- % energia oriunda do BESS 23,32 %
- Energia gerada na central PV e devolvida à rede (não usada na escola): 81,02 kWh
 - % energia verde desperdiçada, devolvida à rede de distribuição: 28,56 %

3.2.4 Caso de uso 2: Sistema de armazenamento de energia (EoL útil de 54 kWh)

A Figura 10 ilustra o comportamento do sistema elétrico da Escola Agra do Amial, quando equipado com um BESS de capacidade útil EoL de 54 kWh e com a mesma central de microgeração fotovoltaica.

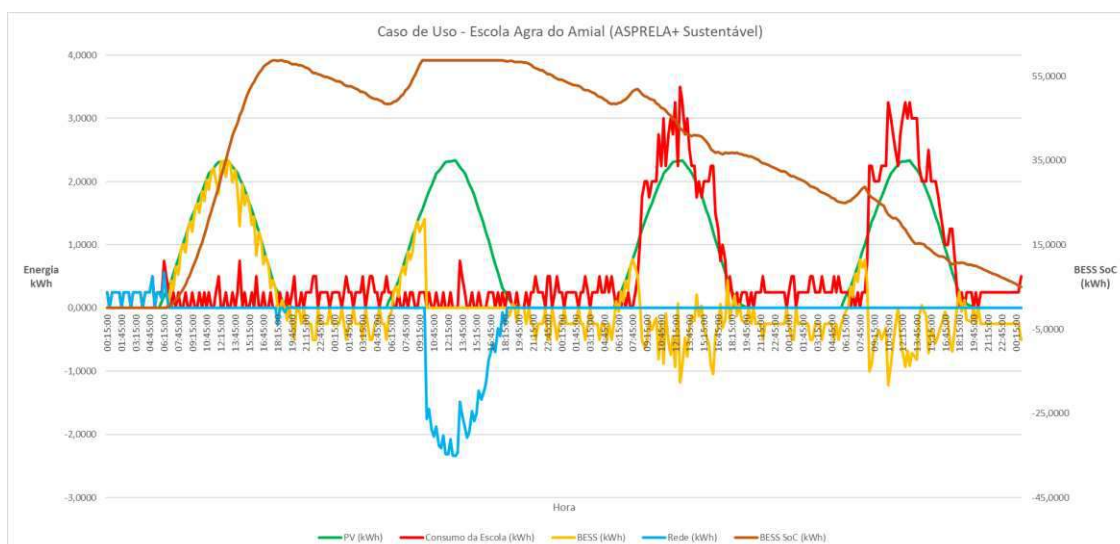


Figura 10 – gráfico de tendência do comportamento energético dos componentes do sistema – BESS (54 kWh EoL útil)

Como se pode constatar, continua a haver uso energético por parte do sistema de baterias – BESS –, o qual tanto carrega a partir da central PV, quanto descarrega para a Escola. O estado de carga – energia



útil acumulada em cada intervalo de 15 minutos – do BESS também é apresentado. A partir da Figura 10, pode constatar-se o seguinte:

- No domingo, enquanto a radiação solar o permitir, a central de microgeração fotovoltaica – PV – alimenta a carga da Escola, nesse período;
- Ainda nesse período, todo o excedente de produção renovável é usado para carregar a bateria do BESS, até que a sua capacidade máxima útil seja atingida. Neste contexto, nunca ocorre qualquer excedente de produção renovável, pelo que não há energia devolvida à rede elétrica de distribuição;
- Pode observar-se que o estado de carga do BESS satura nos 58,7 kWh, valor que corresponde à energia máxima que o BESS necessita ver carregada nas suas baterias para que possa disponibilizar 54 kWh de energia útil, admitindo uma eficiência *round trip* – RTE – em corrente alternada no valor de 92%;
- Nos dias seguintes – segunda-feira e terça-feira – todo o consumo energético é suportado pela central de microgeração fotovoltaica – PV –, enquanto a radiação solar o permitir, bem como pelo BESS. Nestes dias úteis, há alguns excedentes de geração PV que são armazenados no BESS, no início da respetiva produção PV. Em situação alguma há devolução de energia gerada pela central PV à rede elétrica de distribuição. Ao final do terceiro dia, o BESS ainda dispõe de energia para providir parte das necessidades de consumo da Escola durante o período noturno do dia seguinte.

Da simulação efetuada, no período de quatro dias consecutivos constatou-se o seguinte:

- Energia verde gerada na central PV, consumida na Escola: 145,48 kWh
 - % energia verde, consumida na Escola: 65,23 %



- Energia oriunda da rede elétrica de distribuição, consumida na Escola: 5,68 kWh
 - % energia da rede de distribuição, consumida na Escola: 2,55 %
- Energia fornecida pela central de baterias – BESS –, consumida na Escola: 71,84 kWh
 - % energia oriunda do BESS 32,22 %
- Energia gerada na central PV e devolvida à rede (não usada na escola): 52,86 kWh
 - % energia verde desperdiçada, devolvida à rede de distribuição: 18,63 %

3.2.5 Caso de uso 2: Conclusão

Quaisquer outras configurações de armazenamento de energia com capacidade superior, não trarão benefício à Escola, uma vez que há saturação dos valores de energia verde entregues à Escola ou armazenados no BESS, os quais correspondem ao máximo possível, bem como deixa de haver qualquer consumo a partir da rede de distribuição.



Tabela 2 – resumo dos cenários do caso de uso 1 – quatro (4) dias seguidos em maio, entre sábado e terça-feira

Cenário	Energia consumida na Escola	Energia verde gerada no PV	Energia consumida a partir da rede	Energia verde consumida a partir do PV	Energia verde consumida a partir do BESS	Energia verde devolvida à rede
Sem Bateria 0 kWh EoL úteis	223,00 kWh	283,69 kWh	77,53 kWh	145,48 kWh	Não aplicável	138,21 kWh
BESS 20,38 kWh 12 kWh EoL úteis			45,10 kWh		32,42 kWh	101,54 kWh
BESS 50,95 kWh 30 kWh EoL úteis			25,52 kWh		52,00 kWh	81,02 kWh
BESS 91,71 kWh 54 kWh EoL úteis			5,68 kWh		71,84 kWh	52,86 kWh

3.3 Estudo de Dimensionamento – comparação dos casos de uso 1 e 2

Admite-se que a eficiência *round trip* AC/AC – em corrente alternada, acima designada como RTE – é de 92%. Este valor resulta do facto de se considerarem os seguintes desempenhos de cada um dos principais componentes:

- Eficiência DC – em corrente contínua – das baterias é: 95,8%
- Eficiência AC/DC do inversor é: 98,0%

A eficiência *round trip* AC/AC é calculada como segue: $RTE = Eff_{Bat} * Eff_{Inv}^2$

Admite-se também que o decaimento energético – *Energy Decay* – ao fim de 10 anos da capacidade útil no início de vida do sistema de baterias – BoL – é de 20%. Admite-se ainda que a profundidade de descarga – DoD – em que o sistema de baterias vai operar é de 80%. Estes, são valores comuns, tipicamente encontrados em baterias de ião-lítio, como é o caso das baterias de segunda vida que se pretende utilizar no projeto.

Assim, a capacidade a instalar – dimensionamento teórico de um BESS, em função da energia útil prevista para o respetivo fim de vida ou *Useful Energy* EoL – é a que corresponde à seguinte fórmula:

$$Capacidade\ Instalada = \frac{\left(\frac{\left(\frac{Useful\ Energy\ EoL}{RTE} \right)}{(1 - Energy\ Decay)} \right)}{DoD} \text{ em kWh}$$



Em resumo, as configurações do BESS alvo dos estudos efetuados para os casos de uso 1 e 2, são as seguintes:

Tabela 3 – configurações do BESS para os casos de uso 1 e 2

Opção BESS	Energia útil no EoL	Capacidade instalada
BESS #1	12 kWh	20,38 kWh
BESS #2	30 kWh	50,95 kWh
BESS #3	54 kWh	91,71 kWh

No estudo efetuado, fizeram-se várias simulações em torno de múltiplas possibilidades de capacidade instalada, quer para o caso de estudo 1 – janeiro –, quer para o caso de estudo 2 – maio.



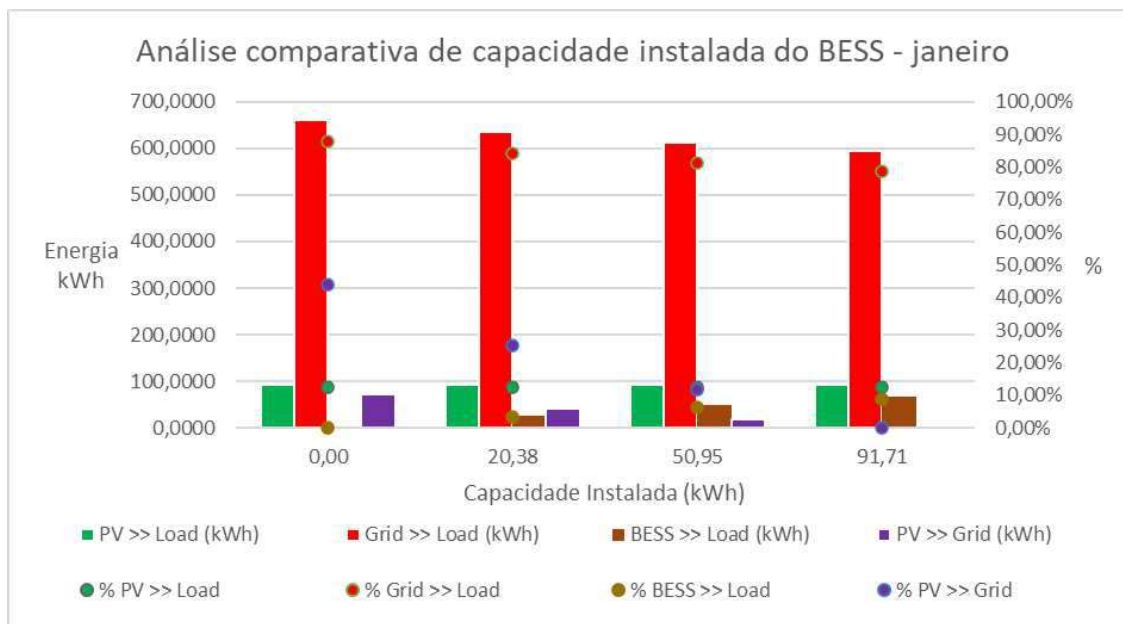


Figura 11 – análise comparativa de capacidade instalada do BESS, para o caso de uso 1 – janeiro



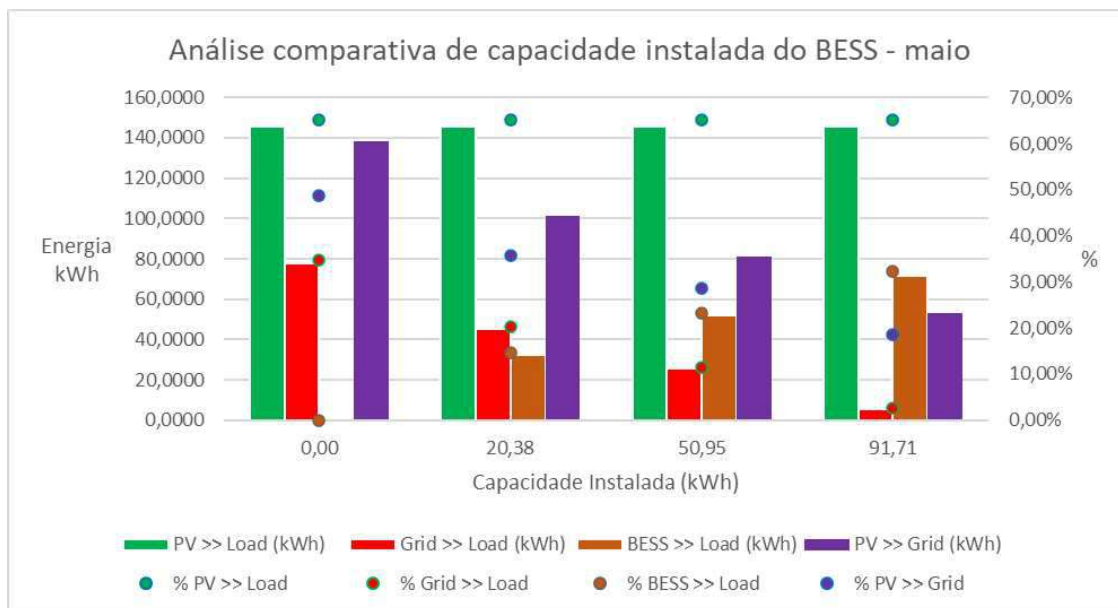


Figura 12 – análise comparativa de capacidade instalada do BESS, para o caso de uso 2 – maio

Na Figura 11, pode constatar-se que o impacto de um BESS na redução da energia fornecida pela rede de distribuição – sempre acima dos 78,8% –, é muito pequeno. Constata-se também que, com BESS dimensionados a partir de uma capacidade instalada superior a 91,71 kWh, deixa de haver desperdício de energia verde. O contributo de mitigação de desperdício de energia verde de um BESS com capacidade instalada de 20,38 kWh, é de cerca de 18,7%, face à sua não inclusão no sistema de energia que alimenta a Escola, valor este inferior ao de quaisquer outras opções de dimensionamento do BESS.

Na Figura 12, pode constatar-se que o impacto de um BESS na redução da energia fornecida pela rede de distribuição – sempre abaixo dos 20,2% –, é muito grande, nomeadamente na configuração de 91,71 kWh – na ordem dos 2,6%. Constata-se também que, com BESS dimensionados a partir de uma capacidade instalada superior a 91,71 kWh, praticamente não há desperdício de energia verde, ainda



que o excedente – não usada na carga nem armazenado no BESS – seja sempre devolvido à rede. O contributo de mitigação de desperdício de energia verde de um BESS com capacidade instalada de 20,38 kWh, é de cerca de 12,9%, face à sua não inclusão no sistema de energia que alimenta a Escola, valor este inferior ao de quaisquer outras opções de dimensionamento do BESS. O contributo de mitigação de desperdício de energia verde de um BESS com capacidade instalada de 50,95 kWh, é de cerca de 20,2%, face à sua não inclusão no sistema de energia que alimenta a Escola.

3.4 Estudo de Dimensionamento – conclusão

As três configurações de BESS que foram analisadas têm potencial de implementação, uma vez que, no mercado, há fornecedores de sistemas de armazenamento de energia – que recorrem a baterias de segunda vida – cujas soluções admitem configurações tais como as analisadas.

O impacto de um BESS com quaisquer das configurações estudadas, far-se-á sentir positivamente na mitigação da energia verde desperdiçada, bem como na minimização da energia obtida a partir da rede de distribuição. Não obstante, tais impactos são pouco expressivos – ainda que perceptíveis – nos períodos de inverno, nomeadamente em janeiro, em que o consumo energético é elevado e a produção PV é reduzida. Esses impactos são claramente expressivos quando se trata de períodos com menor consumo energético e maior capacidade de produção PV, tal como é o caso do mês de maio.



4 Proposta de Dimensionamento

Face ao exposto na secção 3.4, propõe-se um BESS dimensionado para uma capacidade instalada de cerca de 20 kWh – tal como o do BESS da configuração #1 – e que providenciará uma energia útil no EoL de cerca de 12 kWh, uma vez que o mesmo permite obter vantagens significativas em períodos onde é possível maximizar a entrega de energia obtida através de produção PV, não descurando a possibilidade de ser igualmente útil – ainda que com um impacto substancialmente menor – em períodos de inverno, caracterizados por um maior consumo e uma menor capacidade de produção de origem renovável.

As duas opções adicionais de dimensionamento do BESS que foram estudadas, ainda que aportem um desempenho melhor ao sistema de energia que serve a Escola, terão um impacto maior no respetivo custo, sendo que se estima que o BESS da configuração #2 e da configuração #3, apresentem valores de investimento duas e quatro vezes superiores ao da configuração #1, respetivamente.

Como ressalva, salienta-se o facto de este estudo não prever a realização de uma análise comparativa de investimento, tendo em conta as múltiplas opções analisadas e o respetivo valor de investimento, compreendendo também a componente de monetização da energia adquirida ou devolvida à rede de distribuição, cujas tarifas não são do conhecimento da equipa de projeto. O facto de também não haver dados históricos relativos à produção de energia a partir da fonte renovável no local de implementação do BESS, não abona a favor da elaboração de tal estudo. Em suma, tal estudo deveria ser elaborado num horizonte temporal de cinco a sete anos, considerando o desempenho energético de todos os dias de cada ano ou, no limite, considerando o desempenho mensal médio durante todos os meses do período em análise, cuja heurística de cálculo simplificado teria ainda de ser formulada.



Num contexto hipotético de análise comparativa de investimento, far-se-iam quatro comparações, considerando a inexistência do BESS e as três alternativas estudadas de BESS. Como proposta de análise, procurar-se-ia analisar os *cash-flows* anuais atualizados ao ano de investimento, considerando o investimento inicial no BESS e a monetização diária dos ganhos ou perdas energéticas. Para o efeito deste estudo, considera-se como sendo irrelevante o investimento na central PV, uma vez que a decisão de instalação da mesma é, no caso do projeto, independente da forma como o BESS seria ou não dimensionado.

O resultado de tal estudo comparativo, se aplicável, seria obtido através da comparação dos valores VAL e TIR obtidos para cada contexto analisado, em função do dimensionamento de cada BESS.



5 Especificação Técnica

Após a realização de uma consulta ao mercado, foi possível considerar um conjunto de ofertas de índole comercial e técnico, as quais se mapeiam tecnicamente no dimensionamento energético proposto na secção 4. Os requisitos técnicos gerais a respeitar, são os seguintes:

- Sistema de baterias
 - Baterias de segunda vida, de tecnologia de íão lítio, com *c-rate* inferior a 1C, perspetivando-se um ciclo diário de utilização
 - Capacidade instalada de cerca de 20 kWh
 - Capacidade útil BoL não inferior a 16 kWh
 - Capacidade útil EoL não inferior a 12 kWh
 - Gama de temperatura de operação: 20 °C a 30 °C
 - BMS – *Battery Management System*
 - Interface de processo com os sistemas SCADA da Efacec, através de protocolo MODBUS RTU ou equivalente
 - Proteção DC do circuito de baterias
 - Montagem em armário metálico de dimensões adequadas, incluindo todos os componentes e ligações elétricas internas – de comunicação, de controlo e de sinais digitais ou de medida analógica
- Conversão de potência
 - Um ou mais inversores para uma configuração trifásica, do tipo Multiplus-II 48/3000/70-50 230V GX, ou equivalente



- Proteção AC do inversor
 - Contador trifásico de energia
 - Montagem em armário metálico de dimensões adequadas, incluindo todos os componentes e ligações elétricas internas – de comunicação, de controlo e de sinais digitais ou de medida analógica
- Ar condicionado
 - Sistema de climatização, a fim de garantir uma temperatura média de 25 °C da sala que irá acolher o BESS
 - Sistema de deteção e supressão de incêndios, através de gás inerte NOVEC 1230, ou equivalente

6 Referências

1. https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/

