

# Análise do Fornecimento de Serviços Ancilares por um Sistema de Armazenamento de Energia Baseado em Bateria

Carolina A. Caldeira \*

\* *Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PE, (e-mail: carolina.caldeira@ufpe.br).*

Lucas V. Hartmann \*\* Camila S. Gehrke \*\*  
Fabiano Salvadori \*\*

\*\* *Universidade Federal da Paraíba, Centro de Energias Alternativas e Renováveis, Smart Grid Group - SG2, (e-mail: salvadori.fabiano@gmail.com).*

---

**Abstract:** This paper presents an analysis of ancillary service provision by a battery-based energy storage system to a distribution system, using a bidirectional three-phase converter. Ancillary services include harmonic compensation, power factor correction and the active power injection by the battery energy storage system during peak and off-peak hours, aiming at minimizing demand costs and reducing power flow. To perform harmonic reduction in the grid current, proportional-integral control was implemented, using the measured grid current. The battery energy storage system's current control was also performed by the same controller, in which it was only necessary to acquire the battery current, also allowing the control of its state of charge. The energy management was performed according to the load curve analysis of the distribution system under study and with the load status of the storage system. Then, the peak and off-peak periods in which the battery would be charged and discharged were defined.

**Resumo:** Este trabalho apresenta uma análise do fornecimento de serviços ancilares por um sistema de armazenamento de energia baseado em baterias à um sistema de distribuição, utilizando um conversor trifásico bidirecional. Os serviços ancilares incluem a compensação de harmônicos, correção do fator de potência e a injeção de potência ativa pelo sistema de armazenamento de energia baseado em baterias, em horários de ponta e fora de ponta, visando a minimização dos custos com demanda e a redução do fluxo de potência. Para realizar a redução de harmônicos na corrente da rede foi implementado o controle proporcional-integral, utilizando a corrente medida na rede. O controle da corrente do sistema de armazenamento também foi realizado pelo mesmo controlador, em que realizou-se apenas a aquisição da corrente na bateria, permitindo também, o controle de seu estado de carga. O gerenciamento de energia foi realizado de acordo com a análise de curva de carga do sistema de distribuição em estudo, e com o estado de carga do sistema de armazenamento. Desta forma, foram definidos o período de ponta e fora de ponta em que a bateria seria carregada e descarregada.

*Keywords:* Battery Energy Storage Systems; Ancillary Services; Energy Management; Electric Power Quality.

*Palavras-chaves:* Sistemas de Armazenamento de Energia em Baterias; Serviços Ancilares; Gerenciamento de Energia; Qualidade de Energia Elétrica.

---

## 1. INTRODUÇÃO

No Brasil, cerca 66,6 % da energia elétrica produzida para suprir a energia demandada nos setores residenciais, comerciais e industriais provém da geração hidrelétrica. Em períodos de baixa hidrologia ou em períodos de alta demanda de consumidores e baixa oferta de energia, ocorre a implantação de bandeira vermelha patamar 1 ou 2. Nestas situações, utiliza-se a geração secundária brasileira, que é a geração termelétrica, a qual além de causar impactos ambientais é uma geração de maior custo comparativamente com as hidrelétricas.

A busca do equilíbrio entre a geração e a demanda de energia elétrica abriu a possibilidade para a inserção de sistemas de armazenamento de energia, visando melhorar a estabilidade da rede elétrica e garantir maior flexibilidade às concessionárias (Byrne et al. (2018)).

Com o avanço das tecnologias de baterias e a redução dos seus custos nos últimos anos, os sistemas de armazenamento de energia em baterias (*battery energy storage system - BESS*) tornaram-se tecnologias robustas e confiáveis capazes de realizar a integração da geração distribuída (GD) na rede elétrica, minimizando os problemas relacionados com a natureza intermitente destas fontes e aumentando a estabilidade e confiabilidade do sistema elétrico (Abuzaid Saeed Gadalla (2019)).

A utilização do *BESS* tornou-se economicamente atrativa no gerenciamento de energia, permitindo realizar um controle mais eficaz do uso da eletricidade em horários de pico no lado da demanda. O *BESS* também é capaz de manter a qualidade da energia entregue ao consumidor, fornecendo energia ininterrupta e menos prejudicial ao meio ambiente. Este tipo de armazenamento de energia fornece a energia necessária durante horários de maior consumo ou horário de ponta, além de possuir a grande vantagem de diminuir consideravelmente os custos com a redução ou extinção da construção de novas linhas de transmissão e distribuição (Sutanto (1999)).

Outro aspecto de grande relevância no setor elétrico está relacionado com o amplo desenvolvimento da eletrônica de potência nos últimos anos, que desencadeou o uso equipamentos que utilizam elementos não-lineares, como diodos e transistores. Uma alternativa para melhorar a qualidade de energia devido a estes elementos é utilizando um conversor trifásico, funcionando como um filtro ativo de potência (FAP). Assim, o barramento CC deste conversor é acoplado a um sistema de geração fotovoltaica e a um *BESS*, ambos integrados à rede elétrica. Desta maneira, é possível fornecer serviços ancilares (SA), como a compensação de harmônicos (Jéssica P. M. Rocha and Gehrke (2017)). Outra forma de fornecer SA para a rede elétrica é com a utilização de um conversor trifásico bidirecional e um conversor *buck-boost* conectado a um sistema de armazenamento de energia em bateria (*BESS*). Dentre as vantagens da integração deste tipo de sistema com a rede local, tem-se o fornecimento de energia ininterrupta ao sistema de distribuição, correção de fator de potência, disposição próxima ao centro de consumo, integração de fontes renováveis e o gerenciamento de picos de carga,

\* Carolina A. Caldeira foi aluna de mestrado do PPGEE/UFPB com bolsa CAPES.

diminuindo o fluxo de potência e os custos do consumidor durante a injeção de potência ativa em horários de ponta e fora de ponta (Zhang et al. (2017)).

Neste trabalho é estudado um sistema de gerenciamento de energia composto por um conversor trifásico bidirecional, funcionando como um FAP, alimentado por um *BESS* de chumbo-ácido, sendo ambos inseridos em um sistema com mesmo perfil de carga da rede de distribuição do Instituto Federal da Paraíba (IFPB). Esta curva de carga foi adaptada em escala para realizar a análise do sistema proposto em simulações e no Laboratório de Otimização de Sistemas de Energia (LOSE). Este estudo teve como objetivo a redução dos custos diários do consumidor com eletricidade, além de auxiliar na redução do fluxo de potência e das correntes harmônicas provenientes das cargas não-lineares conectadas ao ponto de acoplamento comum (PAC), o que compromete a qualidade da energia entregue aos consumidores. Neste estudo foram utilizados dados reais de consumo de potência ativa da instituição e os valores das tarifas utilizados pela concessionária local, com o intuito de analisar as vantagens do sistema de gerenciamento de energia proposto.

## 2. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO EM ESTUDO

Neste estudo, propõe-se um sistema constituído por um conversor trifásico bidirecional conectado ao PAC para redução de distorção harmônica e correção de fator de potência, e pelo conversor *buck-boost* para realizar o controle do *BESS* de Chumbo-Ácido. Para a realização das simulações e ensaios, utilizou-se o sistema elétrico ilustrado na Fig. 1, o qual representa um sistema de distribuição simplificado, constituído pelo sistema proposto e por cargas lineares e não-lineares acopladas ao PAC.

O *BESS* utilizado no sistema de distribuição possui tensão nominal de 90 V, capacidade nominal de 30 A/h e estado de carga inicial (*state of charge - SOC*) de 90 %. A fim de evitar que ocorra subcarga ou sobrecarga do *BESS*, foi imposto no gerenciamento de energia que o SOC compreendesse a faixa de 50 e 90 %.

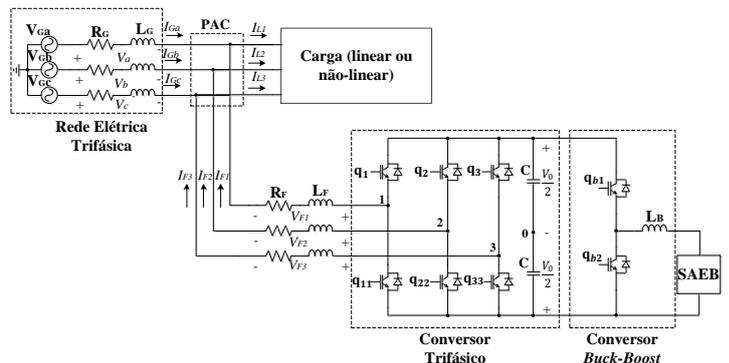


Figura 1. Sistema Elétrico Estudado.

## 3. CONVERSOR BUCK-BOOST E ESTRATÉGIA DE CONTROLE DO BESS

Neste trabalho, o *BESS* é conectado ao barramento CC através do conversor bidirecional *buck-boost*, que realiza

o processo de carga e descarga do BESS. No sistema proposto, o BESS possui tensão de 90 V e o barramento CC tensão de referência de 300 V. Para realizar o controle deste conversor, detectou-se o valor da corrente atual que circula no BESS ( $I_{bat}$ ), comparando-a com um valor de corrente de referência ( $I_B^*$ ). Assim, o sinal de erro é processado pelo controlador PI, o qual tem como saída a tensão de referência ( $V_{bat}$ ) para a modulação PWM seno-triângulo, que gera o ciclo de trabalho responsável pelo acionamento das chaves  $q_{b1}$  e  $q_{b2}$ , dependendo do controle no gerenciamento de energia, ou seja, se o período corresponde a carga (buck) ou descarga do BESS (boost). No diagrama de blocos da Fig. 2 é ilustrado o funcionamento do controle da corrente e SOC do BESS.

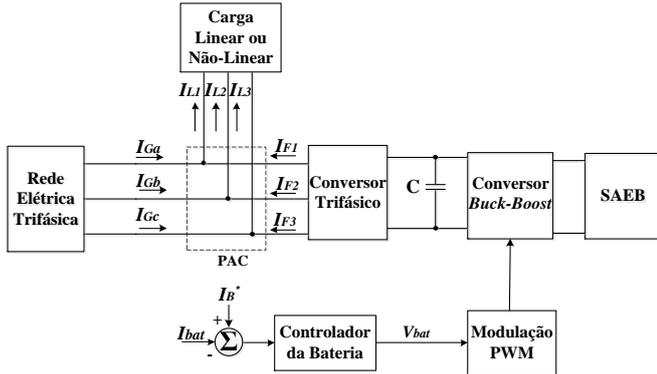


Figura 2. Diagrama em blocos da estratégia de controle do BESS.

#### 4. ESTRATÉGIA DE CONTROLE

A estratégia de controle utilizada foi baseada em (Wu and Jou (1996)), e se caracteriza pela medição de apenas duas correntes da rede, uma tensão da rede e pela tensão do barramento CC, não necessitando detectar as componentes harmônicas da corrente da rede. Durante uma variação de carga, ocorre um desbalanço no fluxo de potência. Por esta razão, o barramento CC equaliza esta variação de potência entre a rede e a carga, o que acarreta na diminuição da sua tensão média. Durante a diminuição da tensão média do capacitor, a corrente inserida pelo filtro aumenta até aumentar também a corrente da rede, para que esta forneça a potência necessária para a carga. Com o aumento da tensão média do capacitor, ocorre a diminuição da corrente fornecida pelo filtro até a corrente da rede diminuir, ou seja, neste caso, a potência fornecida pela rede é maior do que a demandada pela carga. Portanto, o controle da corrente do conversor trifásico é realizado apenas com a medição da corrente da rede (ver Fig. 3).

A corrente de referência do eixo em quadratura ( $I_q^*$ ) é definida nula (ver Fig. 3) para que o conversor forneça potência reativa nula. A corrente de referência do eixo direto ( $I_d^*$ ), por sua vez, é gerada a partir do controlador de tensão, diferença entre a tensão medida nos terminais do barramento CC ( $V_0$ ) e a tensão de referência estabelecida, cujo valor (300 V) é baseado na tensão RMS da fonte de entrada ( $V_G$ ). Após realizar o controle PI, obtém-se as tensões de referência no plano  $dq$ . Utilizando-se a técnica PWM seno-triângulo, com uma frequência de chaveamento de 12 kHz, cada tensão obtida na saída

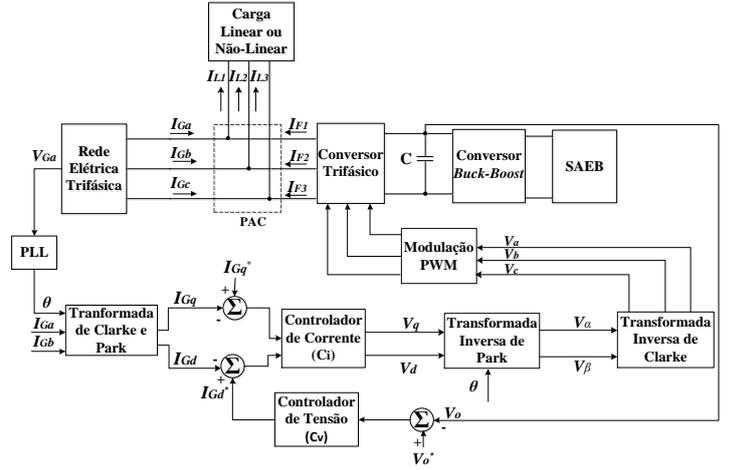


Figura 3. Diagrama em blocos do controle proposto para a compensação de harmônicos.

do controle é comparada com uma onda triangular para o devido acionamento das chaves do conversor trifásico. Como as tensões de entrada são consideradas equilibradas, então as componentes homopolares de tensão e corrente são consideradas nulas. O valor do ângulo  $\theta$ , por sua vez, é obtido através da PLL.

#### 5. RESULTADOS UTILIZANDO SIMULINK<sup>TM</sup>

##### 5.1 Análise da DHT para carga não-linear

As simulações referentes a análise da compensação de harmônicos ocorreram de acordo com o esquema da Fig. 4, onde a carga não-linear consiste de um retificador trifásico a diodos com carga RL.

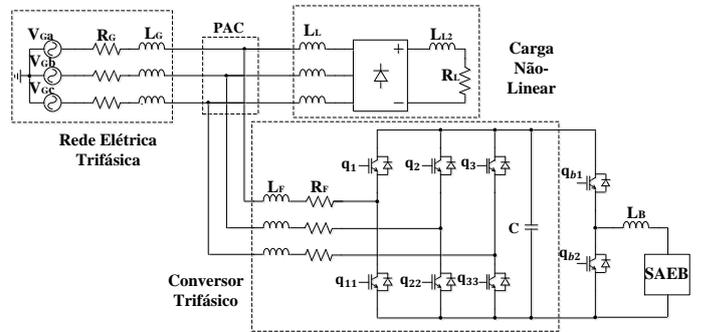


Figura 4. Simulação referente à análise de DHT para carga não-linear.

Os parâmetros utilizados neste estudo para a análise de DHT estão listados na Tabela 1.

Tabela 1. Especificações dos componentes utilizados para a Análise de DHT.

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
$R_G$	0,1 $\Omega$	$L_G$	1 mH
$L_{L1}$	5 mH	$L_{L2}$	1 mH
$R_L$	52 $\Omega$	$L_F$	3 mH
$R_F$	0,2 $\Omega$	$L_B$	9 mH
$C$	2,2 mF	$V_G$	110 $V_{RMS}$
$V_0$	300 V		

As Fig. 5(a) e 5(b) exibem a forma de onda da corrente da rede na fase  $a$ , antes e após o fornecimento de serviços

ancilares ao sistema de distribuição, respectivamente. Em 5(b) houve a inserção do *BESS* e do conversor no sistema com carga não-linear, com a injeção de 6 A pelo *BESS*. O valor da DHT calculada pelo *Simulink*<sup>TM</sup> foi de 26,04 e 8,28 %, respectivamente.

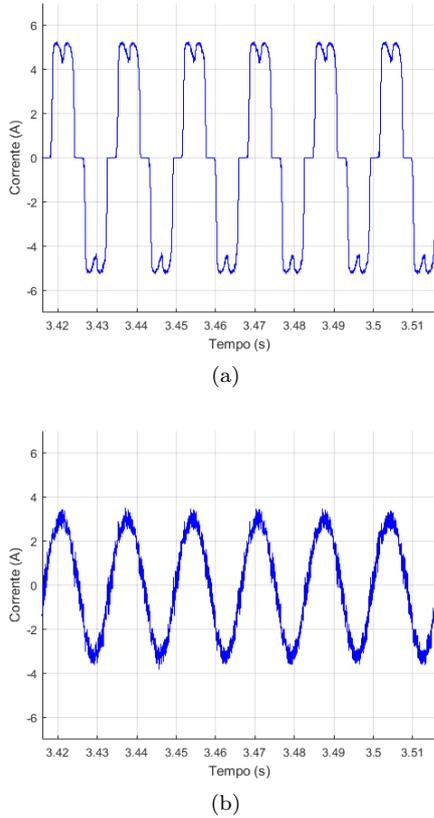


Figura 5. Corrente da rede ( $I_{Ga}$ ) antes e após a compensação de harmônicos.

## 5.2 Análise de energia

Nesta simulação foi realizada a análise de energia do sistema de distribuição em estudo, de acordo com as variações de cargas observadas durante o período de 24 horas. Foi utilizado o esquema da Fig. 6 com 13 variações de carga linear para cada fase, de modo a representar sua curva de carga. Objetivou-se inserir o *BESS* para diminuir os custos do consumidor com energia elétrica, através da redução dos picos de potência ativa. Os parâmetros utilizados nesta análise estão listados na Tabela 2.

Na Fig. 7 observa-se a demanda total em um dia e o seu valor médio. O período de maior consumo de energia ocorre durante o dia, entre 09h45 e 17h15. No entanto, o período de maior valor tarifário encontra-se durante o período entre 17h30 e 20h30. Por esta razão, foram realizados dois cenários para esta simulação: a análise da inserção do *BESS* durante o período compreendido entre 09h45 e 11h45 e entre 13h45 e 17h15, e a análise da inserção do *BESS* durante o período compreendido entre 17h30 e 20h30.

**Cenário 1 – Gerenciamento de energia no horário fora de ponta** Este cenário consistiu das seguintes etapas:

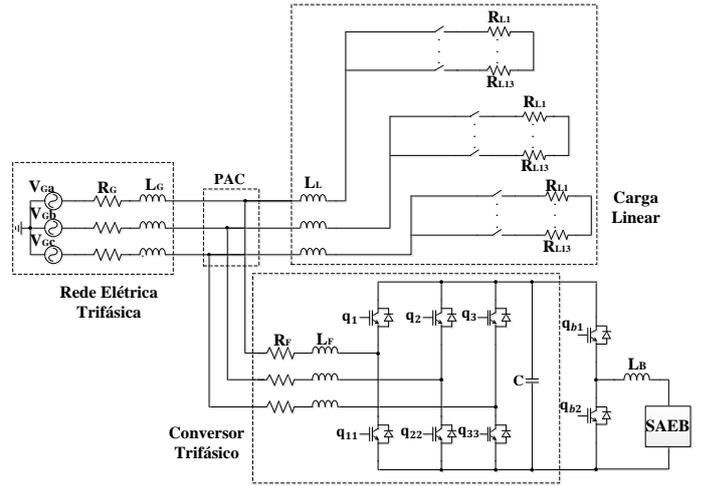


Figura 6. Esquema da simulação referente à análise de energia.

Tabela 2. Especificações dos componentes utilizados para a Análise de energia.

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
$R_G$	0,1 $\Omega$	$L_G$	1 mH
$R_{L1}$	100 $\Omega$	$L_L$	1 mH
$R_{L2}$	67,44 $\Omega$	$R_{L3}$	40,7 $\Omega$
$R_{L4}$	33,72 $\Omega$	$R_{L5}$	29,07 $\Omega$
$R_{L6}$	25,58 $\Omega$	$R_{L7}$	22,09 $\Omega$
$R_{L8}$	19,77 $\Omega$	$R_{L9}$	18,6 $\Omega$
$R_{L10}$	16,28 $\Omega$	$R_{L11}$	15,12 $\Omega$
$R_{L12}$	13,95 $\Omega$	$R_{L13}$	50 $\Omega$
$L_F$	3 mH	$R_F$	0,2 $\Omega$
$L_B$	9 mH	$C$	2,2 mF
$V_G$	110 $V_{rms}$		

- O sistema insere o *BESS* durante o período entre 09h45 e 11h45;
- O *BESS* auxilia a geração principal, injetando 2 A;
- A partir de 11h45 o *BESS* inicia seu carregamento com 1 A;
- Entre 13h45 e 17h15 o *BESS* auxilia a geração principal, injetando 2 A;
- Após 17h15 o *BESS* é desconectado do sistema;
- O *BESS* é carregado a partir de 00h00 com 4 A;
- Quando o SOC atingir novamente 90 %, o *BESS* é desconectado do sistema.

A Fig. 8 exibe a curva de carga com a inserção do *BESS*, onde este injetou potência ativa no sistema durante o horário fora de ponta. Assim, durante o período de descarregamento, o maior pico de demanda neste período diminuiu de 2,59 kW para 2,22 kW, ou seja, o fluxo de potência diminuiu em 14,35 % após a inserção do *BESS* no sistema.

### Cenário 2 – Gerenciamento de energia no horário de ponta

Esta etapa consistiu em injetar 3 A pelo *BESS* durante o horário de pico, de 17h30 a 20h30, e seu carregamento é realizado a partir de 00h00 com 4 A.

A Fig. 9 exibe o perfil da curva de carga com a inserção do *BESS* durante o horário de pico, resultando na redução da demanda de 1,96 kW para 1,40 kW. Logo, houve uma redução de 28,53 % no fluxo de potência.

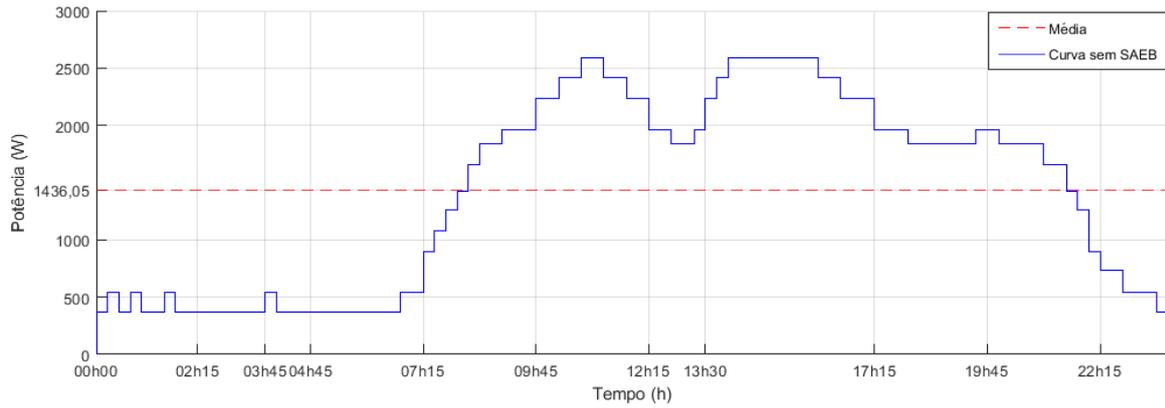


Figura 7. Curva de carga típica de um dia sem serviço ancilar.

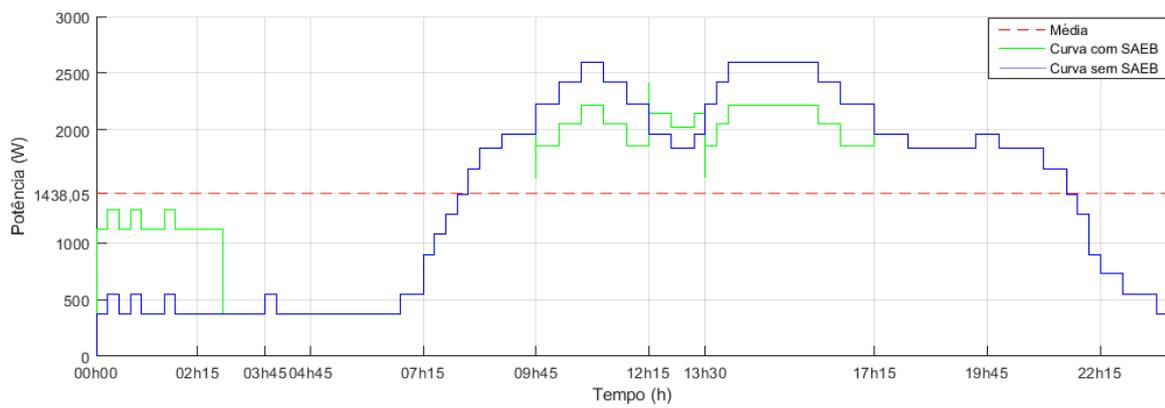


Figura 8. Curva de carga para o Cenário 1.

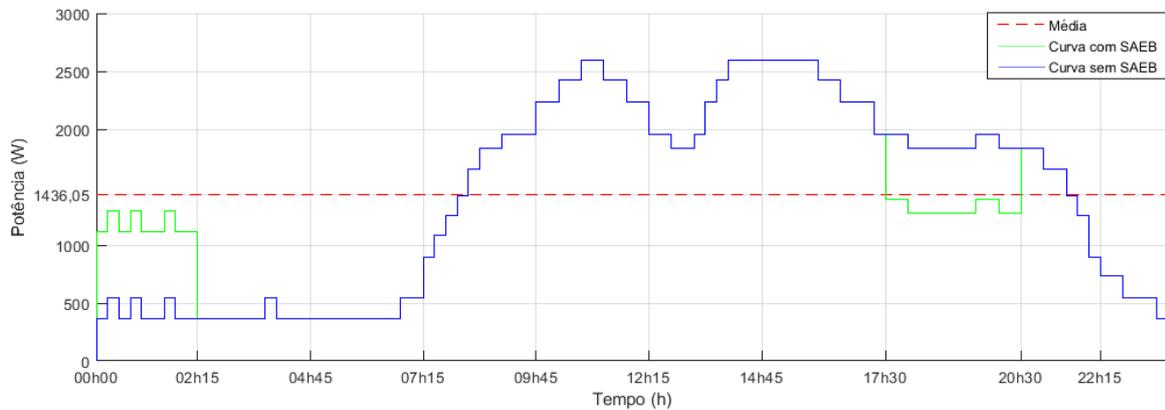


Figura 9. Curva de carga para o Cenário 2.

A Tabela 4 exibe os dados de demanda obtidos nesta simulação antes e após a inserção do *BESS* no sistema de distribuição. Nesta tabela também estão registrados os valores reais de demanda contratada e medida nos horários de ponta e fora de ponta do IFPB. Através dos dados contidos nas Tabelas 3 e 4, obteve-se a economia mensal com demanda fora de ponta, de acordo com a Eq. (1).

Tabela 3. Tarifas de consumo e demanda aplicadas ao IFPB sem impostos.

Demanda (R\$/kW)		Consumo (R\$/kWh)	
Ponta	Fora Ponta	Ponta	Fora Ponta
52,77	17,54	0,36274	0,23109

$$Economia\ mensal = Valor\ medido\ sem\ BESS - Valor\ medido\ com\ BESS$$

$$Economia\ mensal = (P_{anterior} - P_{atual}) \times 17,54 \quad (1)$$

Tabela 4. Valores de demanda da simulação e do IFPB para o horário fora de ponta e de ponta.

Horário	Demanda IFPB		Demanda Simulação		
	Medida	Contratada	Sem BESS	Com BESS	Contratada
Fora de Ponta	497 kW	536 kW	2,6 kW	2,22 kW	2,8 kW
Ponta	378 kW	407 kW	1,96 kW	1,40 kW	2,11 kW

Tabela 5. Economia mensal com o uso do BESS utilizando dados de demanda de ponta e fora de ponta do IFPB.

Horário	Sem BESS	Com BESS	Economia
Fora de Ponta	R\$ 8.717,38	R\$ 7.466,60	R\$ 1.250,78
Ponta	R\$ 19.947,06	R\$ 14.256,87	R\$ 5.690,19

Em virtude da proporcionalidade entre os valores da simulação e os dados medidos do IFPB, foi possível calcular a economia mensal que o sistema de distribuição teria com a redução do pico de demanda nos horários de ponta e fora de ponta, considerando-se sua implementação em um sistema de distribuição real. A Tabela 5 exibe o resultados referentes à economia mensal com a demanda em ambos os períodos, obtidos de acordo com a Eq. (1). Para a realização destes cálculos foi considerado que este perfil de curva de carga se repetiu para todos os dias do mês e foram desconsideradas as perdas nas linhas de transmissão, nos conversores e na bateria.

## 6. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A Fig. 10 exibe a vista frontal da plataforma experimental utilizada para realizar os experimentos referentes à análise de gerenciamento de energia e de DHT.

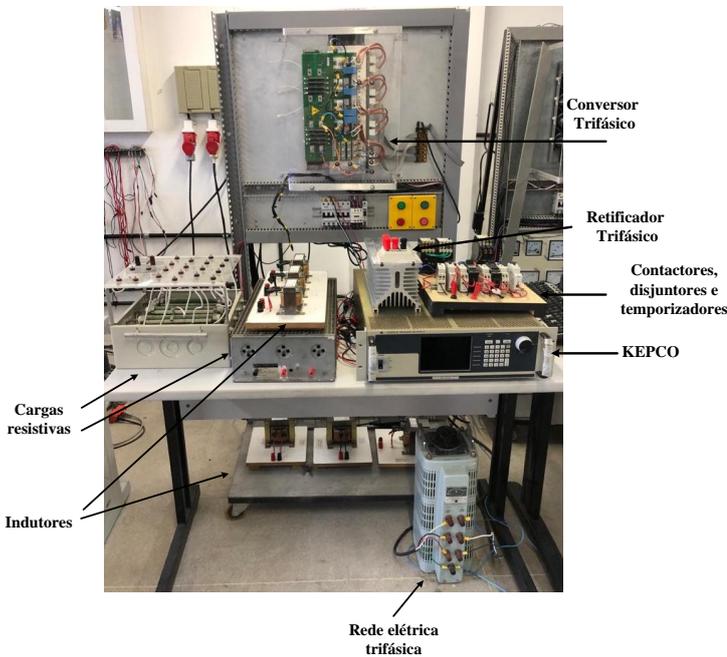


Figura 10. Plataforma Experimental do LOSE.

Para emular o BESS foi utilizada uma fonte de alimentação programável de corrente e tensão de 4 quadrantes, fornecida pela Korea Electric Power Corporation (KEPCO™) (KEPCO INC. (2009)), com uma faixa de tensão de  $\pm 100$  V e uma faixa de corrente de  $\pm 10$  A.

Como a capacidade da plataforma experimental é limitada e a fonte programável tem um limite de operação de 100 V, os experimentos foram realizados com a tensão da rede em  $110 V_{RMS}$  e a fonte programável foi ajustada em 90 V. Os parâmetros utilizados para o experimental da análise de DHT e análise de energia estão descritos na Tabela 6.

Tabela 6. Parâmetros dos experimentais.

Componente	Análise de energia	Análise de DHT
	Valor	Valor
$V_G$	$110 V_{RMS}$	$110 V_{RMS}$
$L_G$	1 mH	1 mH
$L_{L1}$	1 mH	2 mH
$L_{L2}$	—	1 mH
$L_F$	3 mH	3 mH
C	2,2 mF	2,2 mF
$L_B$	9 mH	9 mH
$R_L$	64 e 34 $\Omega$	52 $\Omega$

### 6.1 Análise de DHT para carga não-linear

O ensaio referente à análise da taxa de distorção harmônica da corrente de entrada do sistema de distribuição com a inserção da carga não-linear foi realizado conforme o esquema da Fig. 4.

A Fig. 11 ilustra os sinais da tensão da rede, da corrente da rede e o sinal da corrente da carga na fase *a*, respectivamente, sem o fornecimento de serviços ancilares pelo BESS e conversor. A corrente da rede teve valor de 3,7645 Arms e, com a análise das componentes harmônicas através da função FFT do osciloscópio, obteve-se o cálculo da DHT de 23,89 %.

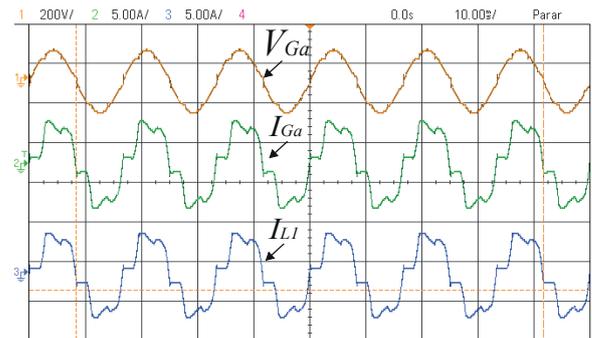


Figura 11. Tensão de entrada ( $V_{Ga}$ ), corrente de entrada ( $I_{Ga}$ ) e corrente da carga ( $I_{L1}$ ).

Na Fig. 12 são apresentados os sinais da corrente do BESS, corrente da rede, corrente da carga e corrente do conversor na fase *a*, respectivamente, durante o fornecimento de serviços ancilares. A corrente da rede teve valor de 2,4951 Arms e o resultado da DHT foi de 12,85 %.

### 6.2 Análise de energia

Para realizar o experimental que analisa o fornecimento de energia pelo BESS ao sistema de distribuição em

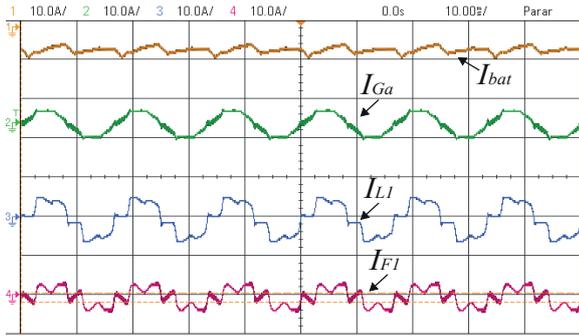


Figura 12. Corrente do BESS ( $I_{bat}$ ), corrente de entrada ( $I_{Ga}$ ), corrente da carga ( $I_{L1}$ ) e corrente do conversor ( $I_{F1}$ ).

estudo, foi realizada uma adaptação das cargas utilizadas na simulação. Neste caso, de acordo com o esquema da Fig. 13, foram utilizadas duas cargas resistivas ( $R_{L1}$  e  $R_{L2}$ ) e uma carga indutiva ( $L_L$ ) para cada fase. Para realizar a variação de carga foram utilizados dois contactores, um disjuntor e dois temporizadores.

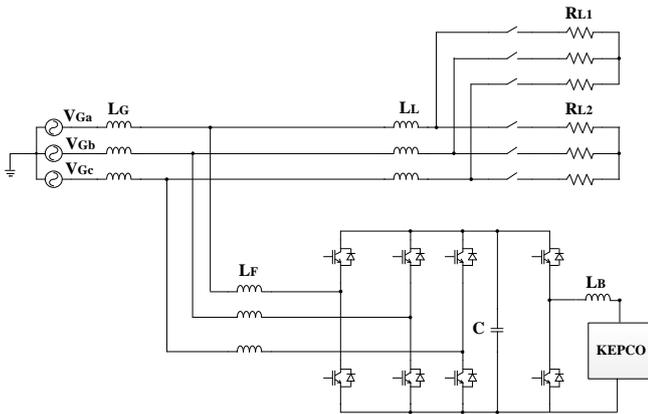


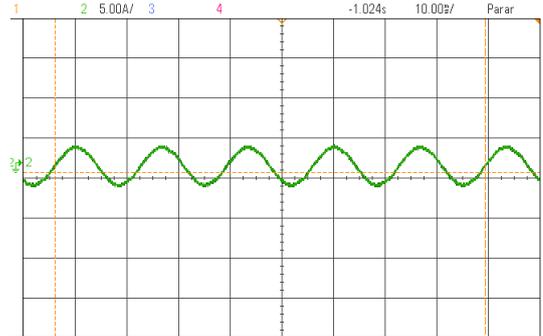
Figura 13. Diagrama do experimento sobre análise de energia.

Para esta análise, foram realizadas as seguintes etapas:

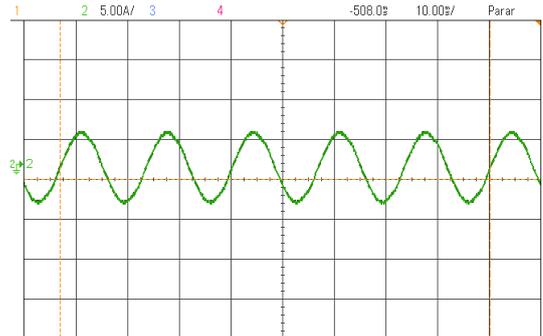
- O sistema iniciou sem carga;
- Após o acionamento do disjuntor, a carga  $R_{L1} = 64 \Omega$  foi inserida. Após alguns segundos, retirou-se a primeira carga e inseriu-se a segunda  $R_{L2} = 34 \Omega$ ;
- Após alguns segundos, retirou-se a segunda carga e o sistema permaneceu sem carga;
- O BESS foi inserido durante o período de variação de carga e retirado juntamente com a retirada das cargas.

**Cenário 1** Foi analisado o comportamento do sistema sem a inserção do conversor trifásico e do BESS para fornecimento de serviços ancilares.

Na Fig. 14 são exibidos o sinal da corrente de entrada/carga para a menor e maior carga, cujos valores foram de 1,666 e 3,064 Arms, respectivamente. Com a análise das componentes harmônicas, através da função FFT do osciloscópio, calculou-se a DHT de 2,34 e 2,06 %, respectivamente.



(a)



(b)

Figura 14. Sinais da corrente de entrada ( $I_{Ga}$ ) sem a inserção do BESS.

**Cenário 2** Este cenário consistiu na análise do gerenciamento de energia com a inserção do BESS e do conversor trifásico. A Fig. 15 apresenta os sinais da corrente do BESS, corrente da carga, corrente da rede e tensão da rede na fase a, respectivamente. Foram injetados 4,0 A pelo BESS no sistema antes das variações de carga. Durante os períodos de variação de carga houveram transitórios na corrente do BESS e, após a retirada da segunda carga, a corrente também apresentou um transitório antes de atingir 0 A.

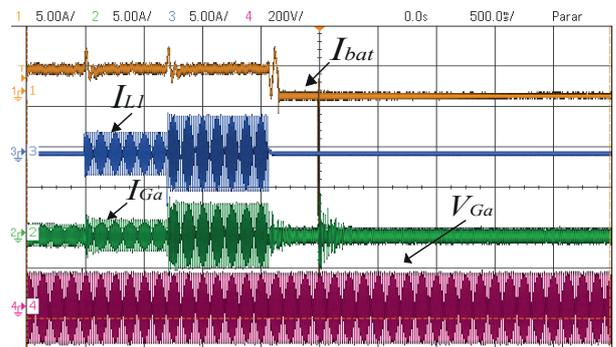


Figura 15. Corrente do BESS ( $I_{bat}$ ), corrente da carga ( $I_{L1}$ ), corrente da rede ( $I_{Ga}$ ) e tensão da rede ( $V_{Ga}$ ).

Nas Fig. 16(a) e 16(b) é possível verificar a redução do valor da corrente da rede para a menor e maior carga, com a inserção do BESS. Os valores medidos foram de 1,025 Arms e 2,480 Arms, respectivamente. Já a DHT para cada sinal foi de 5,37 % e 3,26 %, respectivamente.

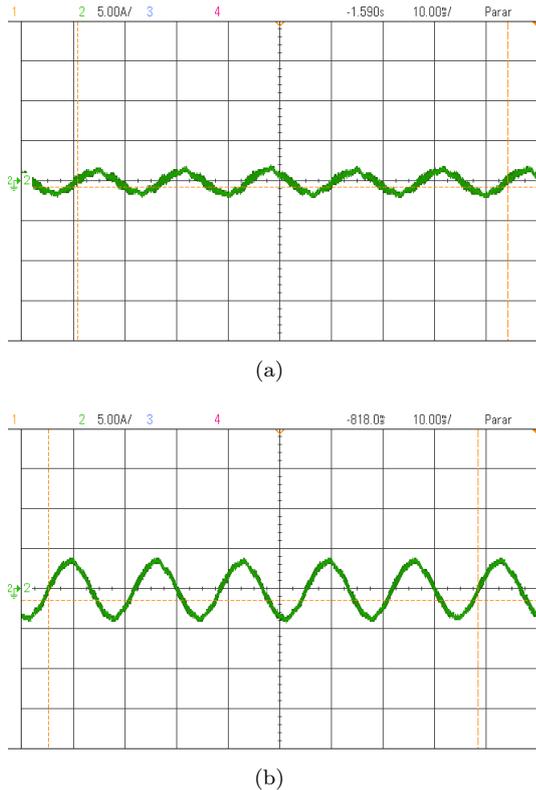


Figura 16. Sinais da corrente de entrada ( $I_{Ga}$ ) com a inserção do *BESS*.

Utilizando o mesmo procedimento, realizado na seção de simulação, da análise da economia gerada para o sistema de distribuição com a redução da demanda, foram obtidos os resultados exibidos na Tabela 7.

Tabela 7. Economia com o uso do *BESS* no horário fora de ponta utilizando dados de demanda do IFPB.

Sem <i>BESS</i>	Com <i>BESS</i>	Economia mensal
R\$ 8.717,38	R\$ 7.054,76	R\$ 1.662,62

## 7. CONCLUSÃO

Analisando os resultados obtidos, constata-se a redução significativa da DHT com a inserção do conversor para compensação de harmônicos, além da economia com energia elétrica obtida com o fornecimento de serviço ancilar pelo *BESS* no sistema de distribuição nos horários de ponta e fora de ponta. Na análise de DHT, constatou-se que em ambos os resultados de simulação e do experimental houve redução significativa da taxa de distorção harmônica com a inserção do conversor trifásico e *BESS*. Na simulação do gerenciamento de energia no horário de ponta, obteve-se uma redução de 14,35 % no fluxo de potência, enquanto que no horário fora de ponta foi obtida uma redução de 28,53 %. Os resultados experimentais, por sua vez, atingiram uma redução de 19,06 % no fluxo de potência. A economia mensal com a redução da demanda no horário fora de ponta na simulação atingiu R\$ 1.250,78, e no horário de ponta atingiu R\$ 5.690,19, não sendo considerados os efeitos das perdas no conversor, nas linhas de transmissão e no *BESS*. Já no resultado experimental, foi

considerada apenas a redução na demanda fora de ponta, que resultou em uma economia mensal de R\$ 1.662,62. Com os resultados da plataforma experimental, obteve-se DHT um pouco acima de 5 % para o caso da inserção da menor carga ( $R_L = 64 \Omega$ ), e DHT abaixo de 5 % com a inserção da maior carga ( $R_L = 34 \Omega$ ). O resultado de DHT para o primeiro caso pode ser justificado pelos componentes da plataforma experimental, os quais não são ideais e podem aumentar a taxa de distorção quando aliados a uma carga menor.

Portanto, a inserção do sistema de armazenamento por baterias juntamente com um conversor trifásico auxiliou na compensação de harmônicos, injeção de potência ativa e na estabilidade do sistema durante variações de carga em horários de ponta e fora de ponta, contribuindo para gerar economia no sistema de distribuição. Os resultados utilizando a simulação e a plataforma experimental corroboram o funcionamento do sistema estudado e também contribuem para a utilização de *BESS* dentro da estrutura da GD e, conseqüentemente, impulsiona a utilização destes com fontes renováveis de energia elétrica.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo financiamento da bolsa de mestrado e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro ao projeto processo nº 312646/2017-8 e ao IFPB pela disponibilização dos dados de consumo de energia.

## REFERÊNCIAS

- Abuzaid Saeed Gadalla, Xiangwu Yan, H.H. (2019). Performance of the battery energy storage systems based on cascaded h-bridge multilevel converter. *The Journal of Engineering*, 2019, 779 – 783.
- Byrne, R.H., Nguyen, T.A., Copp, D.A., Chalamala, B.R., and Gyuk, I. (2018). Energy management and optimization methods for grid energy storage systems. *IEEE Access*, 6, 13231 – 13260.
- Jéssica P. M. Rocha, F.S. and Gehrke, C.S. (2017). Harmonic compensation as ancillary service of a grid-connected photovoltaic power system. *Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*.
- KEPCO INC. (2009). *Operator's Manual: BOP 1000 W – High Power Bipolar Power Supply*.
- Sutanto, D. (1999). Power management solutions for energy management, power quality and environment using battery energy storage systems. *Proceedings of the IEEE 1999 International Conference on Power Electronics and Drive Systems. PEDS'99 (Cat. No.99TH8475)*, 1.
- Wu, J.C. and Jou, H.L. (1996). Simplified control method for the single-phase active power filter. *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, 143, 219–224.
- Zhang, Y., Gevorgian, V., Wang, C., Lei, X., Chou, E., and R. Yang, Q. Li, L.J. (2017). Grid-level application of electrical energy storage. *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 15, 51–58.