

# QUALIDADE DE ENERGIA EM UMA NANORREDE DE DISTRIBUIÇÃO EM CORRENTE CONTÍNUA

Arthur Correa da Fonseca – arthur.fonseca@itec.ufpa.br

Luana Oliveira de Albuquerque – luana.albuquerque@itec.ufpa.br

Wilson Negrão Macêdo – wnmacedo@ufpa.br

Marcos André Galhardo – galhardo@ufpa.br

Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas da Universidade Federal do Pará

## 4.3. Aspectos técnicos de sistemas fotovoltaicos instalados

**Resumo.** Este trabalho apresenta um estudo experimental da qualidade de energia aplicado a uma nanorrede de distribuição em corrente contínua (NDCC) considerando-se o suprimento de cargas de iluminação do tipo LED e banco de cargas resistivas. A NDCC está implantada na área externa do Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas (GEDAE) da Universidade Federal do Pará (UFPA) campus Guamá, cidade de Belém do Pará, Brasil. A NDCC é constituída por três geradores fotovoltaicos e três bancos de baterias distribuídos. Os fenômenos de qualidade de energia observados foram caracterizados com base na recomendação prática para monitoração de qualidade de energia IEEE Std 1159. Para o ensaio proposto eventos de variações de tensão de longa duração e transitório oscilatórios foram registrados, sendo ocasionados tanto pela geração quanto pelas cargas empregadas.

**Palavras-chave:** Qualidade de Energia, Corrente Contínua, IEEE Std 1159.

## 1. INTRODUÇÃO

O final do século 19 foi marcado pela disputa de qual forma de distribuição de energia elétrica prevaleceria. De um lado, Thomas Edison com a empresa *Edison Electric Light Company*, idealizador do sistema de geração, distribuição e cargas em corrente contínua (c.c.), do outro lado, Nikola Tesla e George Westinghouse apresentando um sistema de distribuição em corrente alternada (c.a.). Naquela época, a disponibilidade técnica e avanços tecnológicos, como exemplo, invenção do transformador, possibilitando a elevação e abaixamento do nível de tensão de forma mais eficiente, reduzindo perdas por efeito joule nos condutores, consolidaram a distribuição em corrente alternada até os dias atuais.

No entanto, no decorrer do tempo, com a crescente demanda por energia elétrica, em conjunto com as preocupações ambientais envolvendo a emissão de gases de efeito estufa na atmosfera e o esgotamento de recursos energéticos baseados em combustíveis fósseis, ligados a sistemas convencionais de geração de energia elétrica, observa-se um cenário oposto ao passado (Kumar *et al.*, 2017).

Nessa perspectiva, observa-se a geração e armazenamento de energia elétrica baseados em c.c. cada vez mais presente em empreendimentos comerciais e residenciais, por meio de sistemas fotovoltaicos e baterias. Além disso, a evolução da eletrônica de potência, com dispositivos, por exemplo, fontes chaveadas e sistemas de iluminação a LED empregados em prédios residenciais e comerciais, possuem operação interna em c.c., consequentemente apresentando maior eficiência se suprido por distribuição em c.c. (Elsayed *et al.*, 2015). Assim, observa-se grandes vantagens para implantação de redes de distribuição em corrente contínua em baixa tensão (Thomas, 2010) as quais possuem conversores de potência, em geral com eficiências de conversão c.c.-c.c. acima de 90% (Gorji *et al.*, 2019), como interface entre geração, armazenamento e rede de distribuição.

Nesse contexto, a implantação de microrredes de corrente contínua se provam, tanto tecnicamente quando economicamente, vantajosas em contrapartida a microrredes de corrente alternada. A menor quantidade de estágios de conversão ocasiona o aumento da eficiência global do sistema, ausência de fluxo de potência reativa na rede e, por fim, simplificação de estratégias de controle e gerenciamento são fatores determinantes a essas vantagens. Destaca-se que a utilização de sistemas de distribuição em corrente contínua não surge como um substituto ao modelo c.a., mas como uma forma de melhoria à eficiência do sistema, confiabilidade e controlabilidade (Torres, 2019).

Eventos relacionados à qualidade de energia elétrica estão também presentes em redes elétricas operando em corrente contínua e podem ser classificados como transitórios, de curta duração e de longa duração (regime permanente), sendo referentes à tensão de uma MDCC (Fonseca, 2021). O estudo dos problemas de qualidade de energia e suas formas de mitigação, em especial na distribuição em corrente contínua, é de fundamental importância para um funcionamento correto e eficiente das cargas que são supridas por essa rede. A recomendação IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) – *Recommendation Practice for Monitoring Electric Power Quality* - Std 1159 (2019), estabelece valores de tensão ou corrente (em p.u.), tempo de ocorrência do evento, limites ou valores de referência os quais devem ser tomados como base para o desenvolvimento do estudo ou classificação do evento (Van Den Broeck; Stuyts; Driesen, 2018).

Desta forma, no presente trabalho apresentam-se alguns desses eventos presentes na operação de uma nanorrede de distribuição em corrente contínua (NDCC), dando-se ênfase a eventos transitórios oscilatórios e variações de tensão de longa duração decorrentes do acionamento de cargas e do estágio de carregamento do banco de baterias.

## 2. NANORREDE DE DISTRIBUIÇÃO EM CORRENTE CONTÍNUA DO GEDAE/UFPA

A NDCC em estudo está instalada na área externa do prédio do Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas da Universidade Federal do Pará (GEDAE/UFPA). O prédio está localizado na cidade universitária Prof. José da Silveira Neto – UFPA, cidade de Belém-Pará. Esta NDCC, representada pelo diagrama unifilar da Fig. 1, é formada por três sistemas de geração e armazenamento (SGA), os quais incluem o sistema de geração fotovoltaica (GFV) e armazenamento por meio de bancos de baterias (BB), acessando a NDCC com a utilização de controladores de cargas. A NDCC possui dois bancos de cargas (BC) que estão dispostos ao longo da rede em pontos de conexão distintos e com potências instaladas distintas.

Os três sistemas de geração e armazenamento em conjunto com os bancos de cargas estão localizados sob uma estrutura construída de forma a simular um telhado residencial, facilitando uma ação de manutenção preventiva ou corretiva dos equipamentos, além de oferecer o suporte necessário ao arranjo fotovoltaico. A estrutura também abriga o centro de conexões, o qual acomoda os controladores de carga em um quadro de montagem, conforme apresentado adiante.

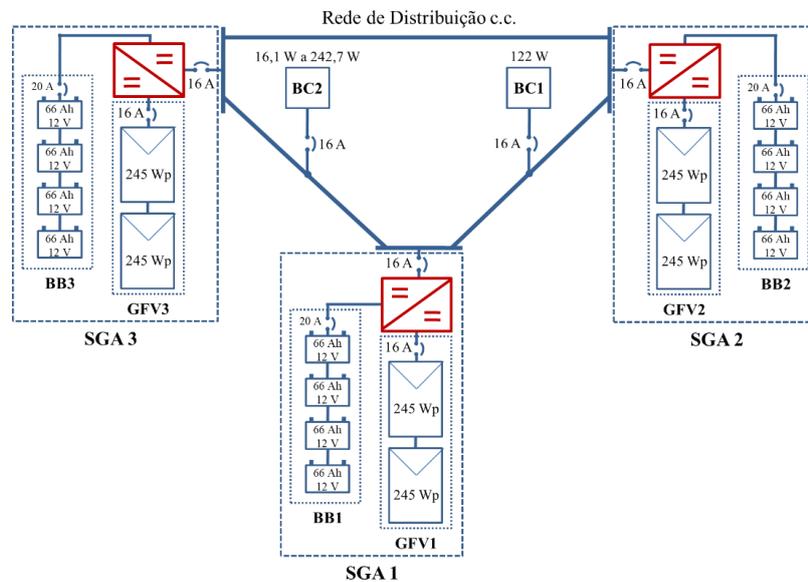


Figura 1 - Diagrama unifilar da NDCC.

A NDCC é classificada como unipolar com tensão nominal de 24 V, possuindo apenas um condutor positivo (+) e um negativo (-). A arquitetura empregada na NDCC é em anel e isolada, não possuindo um *link* com a rede c.a. convencional. O sistema é do tipo isolado da terra e, atualmente, a NDCC possui apenas o controle realizado pelos conversores de potência, de interface com a rede, na gestão do fluxo de potência entre geração, armazenamento e carga.

### 2.1 Rede de distribuição

A rede é suportada por três postes sendo formada por cabos multiplexados de alumínio com dois condutores (V+) e (V-) trançados envoltos de um terceiro cabo nu para sustentação mecânica, conforme apresentado na Fig. 2, confeccionado pela fabricante nacional Alubar. Na Tab. 1 mostram-se as características do condutor.



Figura 2 – Condutor de alumínio multiplexado da NDCC.

Tabela 1 - Características técnicas do condutor cabo de alumínio XLPE 0,6/1 kV da fabricante Alubar.

CARACTERÍSTICA	VALOR	CARACTERÍSTICA	VALOR
Seção transversal	35 mm <sup>2</sup>	Massa linear	137,03 kg/km
Tipo de encordoamento	Compactado	Resistência elétrica em c.c. a 20 °C	0,8037 Ω/km
Isolação	XLPE	Coef. de variação da resist. por temp.	0,00403 °C <sup>-1</sup>

Os postes utilizados para sustentação dos cabos da NDCC são do tipo duplo T com altura de 7 metros e seção quadrada (250G). O SGA 1 possui ponto de conexão no poste P1, e os SGA2 e SGA3 possuem o ponto de conexão com

a NDCC nos postes P2 e P3, como ilustrado na Fig. 3, respectivamente. Do mesmo modo os bancos de cargas BC1 e BC2 estão conectados na metade da distância entre os postes P1 e P2 e entre os postes P1 e P3 da NDCC, respectivamente. O comprimento dos cabos multiplexados de alumínio na rede aérea é de aproximadamente 70 metros.

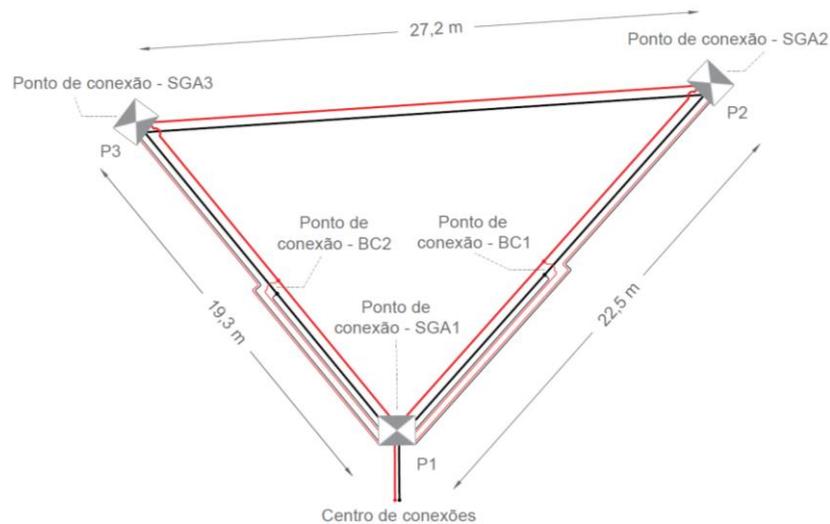


Figura 3 – Esquema da NDCC, com a identificação dos pontos de conexão de cada SGA e BC na rede.

## 2.2 Gerador Fotovoltaico

O gerador fotovoltaico presente em cada SGA é formado pela associação em série de dois módulos fotovoltaicos do fabricante Yingli Solar, modelo YL245P-29b de 245 Wp de potência nominal. As características do gerador constam na Tab. 2.

Tabela 2 - Especificações elétricas do gerador fotovoltaico nas condições padrão de ensaio (STC).

CARACTERÍSTICA	VALOR
Potência Nominal	476,5 Wp
Tensão de Máxima Potência	58,44 V
Corrente de Máxima Potência	8,15 A
Tensão de Circuito Aberto	74,42 V
Corrente de Curto-Circuito	8,16 A

Os geradores estão dispostos em um telhado, como é possível observar na Fig. 4, localizado na área de testes do prédio do GEDAE/UFPA. Todos os geradores possuem sua orientação para o norte magnético, com desvio azimutal igual a 13° nordeste, sob ângulo de inclinação de 11° em relação ao plano horizontal.



Figura 4 – Disposição de cada GFV no telhado.

## 2.3 Banco de Baterias

Os bancos de baterias estão dispostos sob a estrutura de telhado e são formados por quatro baterias seladas de chumbo ácido em associação série-paralelo, cada uma. As baterias que compõem o banco são do modelo BLUETOP D27M, da fabricante Optima Batteries, Fig. 5, tendo tensão nominal de 12 V e capacidade nominal de 66 Ah (C/20).



Figura 5 – Banco de baterias sob a cobertura do telhado.

Cada banco de baterias possui uma associação em paralelo de um conjunto de duas baterias de 12 V conectadas em série, proporcionando um banco com tensão nominal de 24 V e capacidade nominal de 132 Ah. Considerando que as baterias já estiveram em uso anteriormente, passando por elevado stress de umidade, temperatura e descargas profundas, cada banco possui, aproximadamente, 70% da capacidade nominal (Torres, 2019).

## 2.4 Centro de Conexões

O centro de conexões (quadro elétrico) acomoda os controladores de carga que realizam a interface dos GFV e BB com o barramento c.c. da NDCC. Para o SGA 1 foi utilizado o controlador de carga da fabricante *Outback Power* modelo SCCM20-100R com tensão nominal de saída de 24 V e possibilita operação com corrente máxima de saída de até 20 A, possuindo também a função de seguimento do ponto de máxima potência (SPMP) do gerador fotovoltaico. Para os SGAs 2 e 3, por sua vez, foi utilizado o controlador de carga da fabricante *EPEVER* modelo XTRA series – 2210N, também com tensão nominal de saída de 24 V e corrente máxima de saída de até 20 A. Assim como o outro modelo utilizado para o SGA 1, o controlador de carga da *EPEVER* também possui a tecnologia SPMP. Além disso, para o último modelo, destaca-se a possibilidade da operação com baterias de íon de lítio além de interface para comunicação e registro de dados utilizando *data loggers*, comercializados pela própria marca, com objetivo da obtenção de parâmetros elétricos do sistema fornecidos pelo próprio controlador de carga.

A conexão de cada GFV e BB além dos pontos de conexão para os bancos de cargas com o barramento c.c. da NDCC são realizados por meio de disjuntores c.c., conforme é ilustrado na Fig. 6. O centro de conexões também dispõe de espaço sobressalente para disposição de sistemas de medições, monitoração ou alterações na configuração da NDCC.

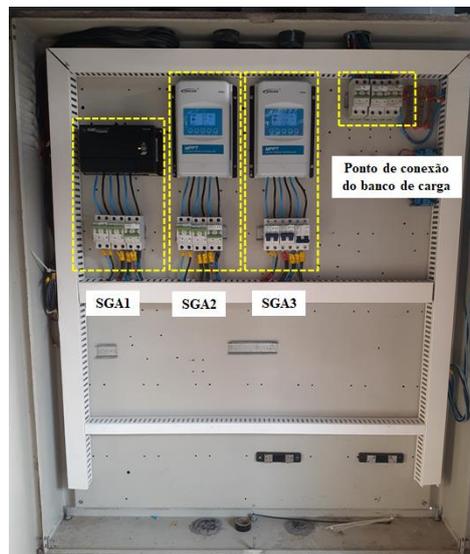


Figura 6 – Centro de conexão sob a cobertura de telhado.

## 3. BANCO DE CARGAS APLICADOS NOS ENSAIOS

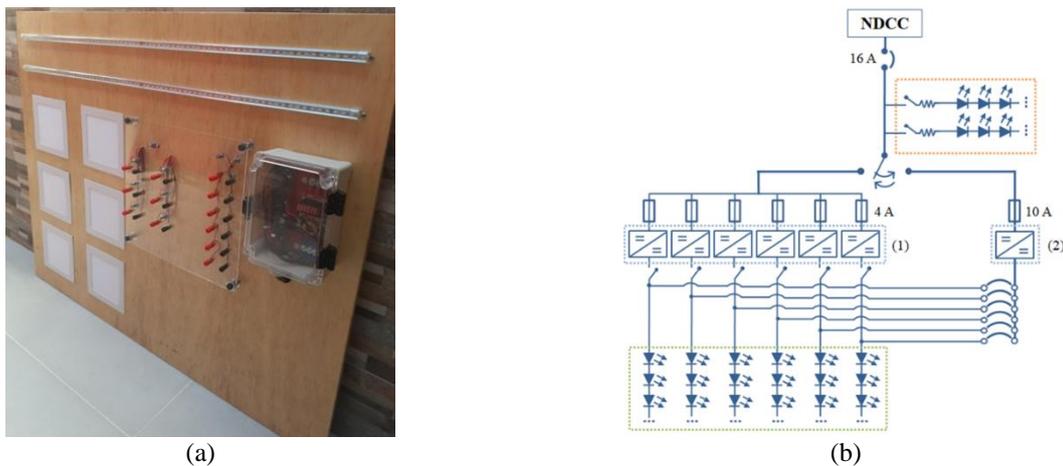
Para fins de testes de demanda e consumo na NDCC, bem como a avaliação do impacto na tensão de suprimento com a inserção de cargas, empregam-se bancos de carga. Os bancos foram pensados considerando premissas distintas: o banco de cargas nº 1 (BC1) é constituído de cargas de iluminação LED, as quais são cargas comuns utilizadas em

residências e encontradas facilmente no mercado. O banco de cargas n° 2 (BC2) foi pensado como um banco de carga que pudesse causar um maior impacto na demanda e tensão de suprimento durante sua entrada ou saída da rede.

### 3.1 Banco de carga n° 1

A iluminação artificial utilizando lâmpadas LED aplicada em residências, ambientes de trabalho ou vias públicas é realidade pelo preço de mercado competitivo se comparada à vida útil e eficiência de conversão de energia elétrica em energia luminosa em relação às lâmpadas fluorescentes e incandescentes. Nesse sentido, o BC1 ilustrado na Fig. 7(a) foi confeccionado com a utilização de iluminação a LED em dois tipos disponíveis no mercado: barra de LEDs e Painéis LED SLIM com conversor c.c.-c.c. A potência demandada pelo referido banco de carga pode ser de até 122 W e o consumo pode ser de até 2,92 kWh/dia.

As barras de LED fixadas em uma estrutura de compensado, ilustrado dentro do pontilhado laranja na Fig. 7(b), operam com tensão nominal c.c. de 24 V e possuem uma chave alavanca para acionamento individual, sendo conectadas diretamente na rede c.c., isto é, sem a utilização de conversores c.c.-c.c. As luminárias painéis LED, ilustrado dentro do pontilhado verde da Fig. 7(b), estão arranjadas de forma a possibilitar duas configurações distintas, sendo essas, a utilização de um conversor c.c.-c.c. descentralizado (1) ou centralizado (2).



(a)

(b)

Figura 7 – BC1 (a) e esquemático do circuito (b).

Cada carga de iluminação é acionada de forma individual por meio de chaves alavancas disponíveis no painel de acionamento. Para os painéis de LED do BC1 foi realizada a troca do *driver* de fábrica por um conversor c.c.-c.c. do tipo *step up* ou *boost*, conforme constam os dados técnicos na Tab. 3, configurando-se a tensão de saída do conversor c.c.-c.c. para 36 Vcc, tendo em vista que não foi possível encontrar no mercado local luminárias com *drivers* que operassem com tensão nominal de entrada de 24 Vcc. A escolha de utilizar conversores c.c.-c.c. sob duas estratégias diferentes, centralizado e descentralizado, se torna interessante por mostrar qual configuração pode estar mais passível a sofrer influências de um distúrbio da rede de distribuição.

Tabela 3 – Características técnicas do conversor c.c.-c.c. *boost* descentralizado (1) e centralizado (2).

CARACTERÍSTICA	VALOR (1)	VALOR (2)
Tensão de entrada	5 – 32 Vcc	8 – 45 Vcc
Tensão de saída	5,5 – 36 Vcc	12 – 50 Vcc
Corrente máxima de entrada	4 A	8 A
Corrente máxima de saída	2,5 A	10 A
Eficiência de conversão	88 – 95 %	88 – 92 %
Frequência de chaveamento	400 kHz	156 kHz

### 3.2 Banco de carga n° 2

O BC2 consiste em uma carga resistiva, ilustrado na Fig. 8, capaz de dissipar uma potência de até 242,7 W, sob uma tensão de 24 Vcc. A mesma possui 15 elementos resistivos, cada um com resistência de 35,6  $\Omega$ , possibilitando diversas formas de conexões série e paralelo. Essa carga é normalmente comercializada para ser utilizada como aquecedor de ar, sendo fabricada, nesse caso, pela IMC (Indústria de Aparelhos Elétricos).



Figura 8 – Carga resistiva.

#### 4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para a obtenção dos parâmetros elétricos do sistema referente à operação diária da NDCC, foi utilizado o componente acessório da fabricante EPEVER modelo eLOG01 como *data logger*. O *data logger* em questão possui comunicação individual com o controlador de carga da mesma marca EPEVER (SGA2 e 3) por meio da interface serial RS485 e registra dados de componente c.c. de tensão e corrente da geração, baterias e barramento c.c. da NDCC, além de *status* do controlador de carga e da bateria, empregando-se uma amostragem de 1 minuto para cada parâmetro. Para a obtenção dos dados de irradiância utilizou-se o registrador *FieldLogger* da fabricante Novus, em conjunto com uma célula de referência de silício monocristalino (Si – Sensor), modelo Spektron 210, com faixa de medição de 0 a 1500 W/m<sup>2</sup> e saída de 75 mV correspondente a 1000 W/m<sup>2</sup>.

As medições de qualidade de energia (QEE) foram realizadas *in loco* com a utilização de um osciloscópio digital portátil da fabricante Fluke® modelo 190-204 (4 canais) em conjunto das pinças de tensão VPS410 para medição dos valores de tensão elétrica e as garras da fabricante Fluke® modelo 80i-110s e fabricante Minipa modelo HR30 para medição dos valores de corrente elétrica. Os parâmetros elétricos mensurados, considerando as componentes c.c. e c.a., foram os valores de tensão e corrente do BC1 e do BC2 nos pontos indicados na ilustração da Fig. 9, sob a amostragem de 16 milissegundos, de forma a avaliar o impacto no suprimento para o BC1 durante o acionamento do BC2.

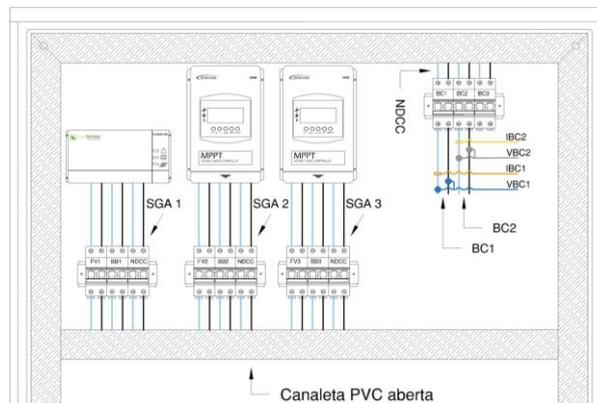


Figura 9 – Disposição das pinças de tensão e garras de corrente para medição.

Os ensaios para verificação da qualidade de energia (QEE) na tensão de suprimento foram realizados de duas formas, em um primeiro momento utilizando o conversor c.c.-c.c. centralizado e posteriormente o conversor c.c.-c.c. descentralizado sob quatro (4) cenários distintos:

1. NDCC com a geração fotovoltaica em horário de alta irradiância (horário de meio dia).
2. NDCC com geração fotovoltaica em horário de baixa irradiância (horário da manhã ou tarde).
3. NDCC sem geração fotovoltaica e com bancos de baterias carregados.
4. NDCC sem geração fotovoltaica e com bancos de baterias parcialmente descarregados.

Para o último caso (ensaio 4) os bancos de baterias foram descarregados até o momento em que os controladores informaram o *status* de baixa tensão, conforme indicam os respectivos *datasheets* de cada fabricante. A sequência de ação para realização dos ensaios de QEE, em um primeiro momento, se deu pelo acionamento do conversor c.c.-c.c. e posterior acionamento das cargas de forma individual. Após acionamento completo do BC1 é realizado acionamento do BC2 com configuração de 2,37  $\Omega$  (15 elementos resistivos em paralelo) pelo tempo de três minutos e posterior saída de ambos BCs de forma sequencial como de início.

#### 4.1 Operação da NDCC – GEDAE/UFPA

Para exemplificação de monitoramento da tensão em regime permanente na NDCC, apresenta-se na Fig. 10(a) uma situação em que não há demanda de nenhuma carga conectada nos diferentes pontos de conexão à rede da NDCC. Nesse caso, os dados referentes à geração e armazenamento correspondem ao SGA2. O registro foi realizado no dia 28 de outubro de 2021, em um dia em que pela parte da tarde (a partir das 14:00) houve ocorrência de chuva, como também é possível observar na Fig. 10(a) nos dados de irradiância no plano do gerador. No início da manhã é possível verificar o modo de carregamento *boost* (tensão constante) do banco de baterias no intervalo de duas horas até o momento em que se tem a predominância do estado de flutuação, o qual a tensão da bateria permanece em 27,6 V, ou 1,15 p.u., considerando a tensão de referência da NDCC de 24 V, linha pontilhada vermelha da Fig. 10(b). Destaca-se que os valores de tensão para os modos de carregamento são referentes aos *pre-set* da fabricante para baterias de chumbo ácido.

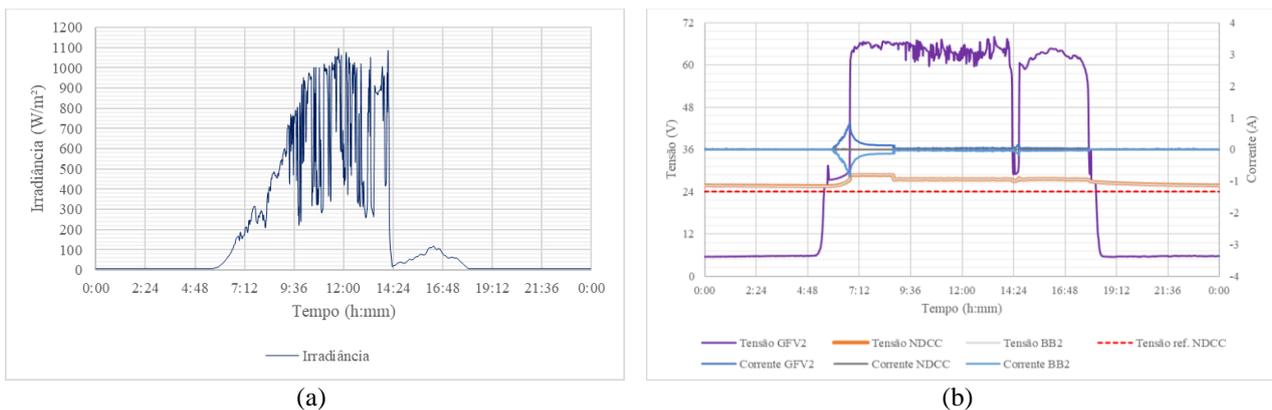


Figura 10 – Dados de irradiância (a) e NDCC (b).

É interessante destacar que o nível de tensão do barramento c.c. da NDCC é determinado pelo nível de tensão das baterias de cada SGA conectado à rede. Para a situação apresentada a tensão da rede é determinada pelo BB2 do SGA2. Na Fig. 11 ilustra-se o estado de carregamento da bateria, onde registrou-se o carregamento apenas durante o início da manhã e o estágio de flutuação no decorrer do dia.

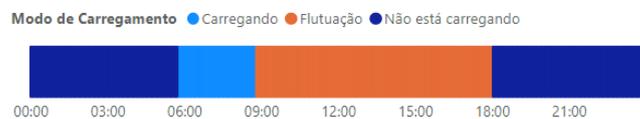


Figura 11 – Estado de carregamento do BB2 durante um dia.

#### 4.2 Conversor c.c.-c.c. centralizado

A fim de avaliar o impacto na tensão de suprimento da NDCC com a inserção de cargas com conversores c.c.-c.c., inicialmente acionou-se o conversor c.c.-c.c. centralizado para posterior acionamento dos painéis LED. A tensão do barramento c.c. alcançou valores instantâneos máximos próximos a 40 V para ambos os casos, com e sem geração fotovoltaica. Desse modo, registrou-se um evento transitório como ilustrado na Fig. 12, com duração próxima a 2 milissegundos (ms) e componentes espectrais próximas a 3 kHz. O acionamento do conversor foi realizado também tanto com a geração fotovoltaica presente quanto apenas com os bancos de baterias, obtendo-se resultados próximos de duração e magnitude.

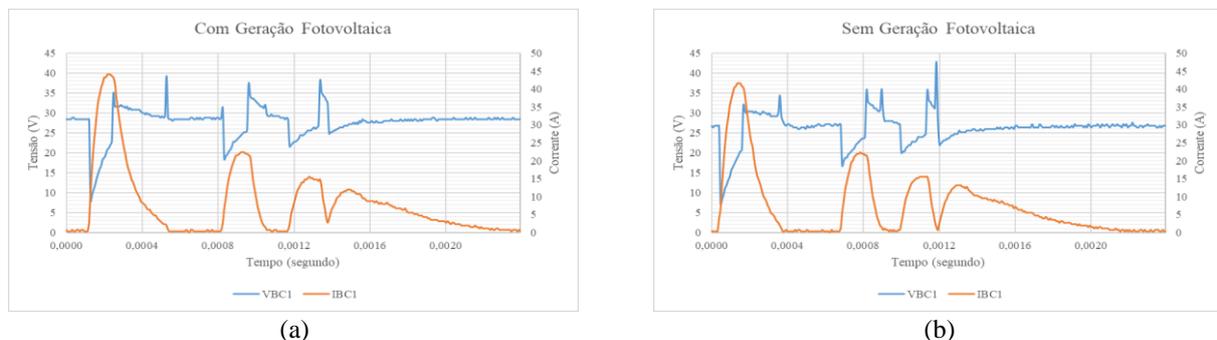


Figura 12 – Evento transitório oscilatório após acionamento do conversor c.c.-c.c. centralizado.

Na sequência, em um intervalo de 480 segundos, fez-se o acionamento e o desligamento gradual dos painéis de LED e do BC2 em cada ensaio (Fig. 13). De forma geral foram registradas sobretensões durante todos os ensaios, caracterizadas

como variações de longa duração, visto que a tensão do barramento c.c. permaneceu acima de 1,1 p.u., com exceção do ensaio 4 utilizando a NDCC apenas com os bancos de baterias descarregados. Além disso, foram registradas diminuições no nível de tensão da NDCC resultado tanto do acionamento do BC2 no ensaio 1 e 2, como também devido ao sombreamento do gerador fotovoltaico pela passagem de nuvens, nos instantes 275 e 300 segundos do ensaio 2. Para os ensaios 3 e 4 não foram registradas diminuições no nível de tensão durante o acionamento do BC2.

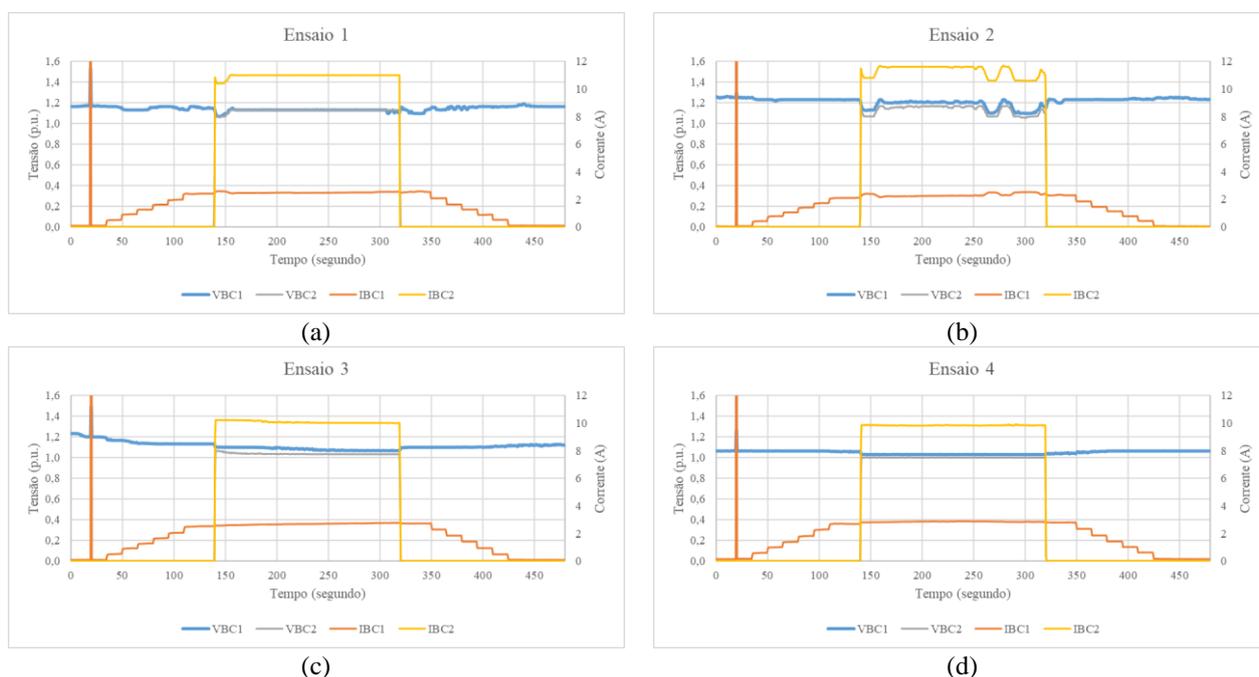


Figura 13 – Evento variações de longa duração utilizando conversor c.c.-c.c. centralizado.

A recomendação americana IEEE Std 1159 (2019) caracteriza eventos de variações de longa duração como sendo eventos com magnitudes acima de 1,1 p.u. até 1,2 p.u. com duração maior que 3 minutos e eventos transitórios oscilatórios de baixa frequência como sendo eventos com componente espectral menor que 5 kHz. Desse modo, para os ensaios com o conversor c.c.-c.c. centralizado foi registrado evento transitório e variações de longa duração, conforme constam na Tab. 4.

Tabela 4 – Eventos transitório e variações de longa duração com conversor c.c.-c.c. centralizado.

Ensaio	Transitório			Variações de longa duração	
	Oscilatório			Sobretensão	
	Duração (ms)	Magnitude (p.u.)	Componente Espectral (kHz)	Duração (minutos)	Magnitude (p.u.)
1	2,28	0,33 – 1,63	2,94	8	1,15
2				8	1,22
3	2,18	0,30 – 1,78	3,43	5	1,11
4				-	-

### 4.3 Conversor c.c.-c.c. descentralizado

Do mesmo modo, nos ensaios inserindo-se ao mesmo tempo um conjunto de seis conversores c.c.-c.c. descentralizados operando à vazio, constatou-se o evento transitório com duração próxima a 3 milissegundos e componente espectral próximas a 3 kHz. O acionamento dos conversores foi realizado também tanto com a geração fotovoltaica presente quanto apenas com os bancos de baterias, obtendo-se resultados próximos de duração e magnitude, nesse caso, alcançando-se valores instantâneos máximos próximos a 35 V.

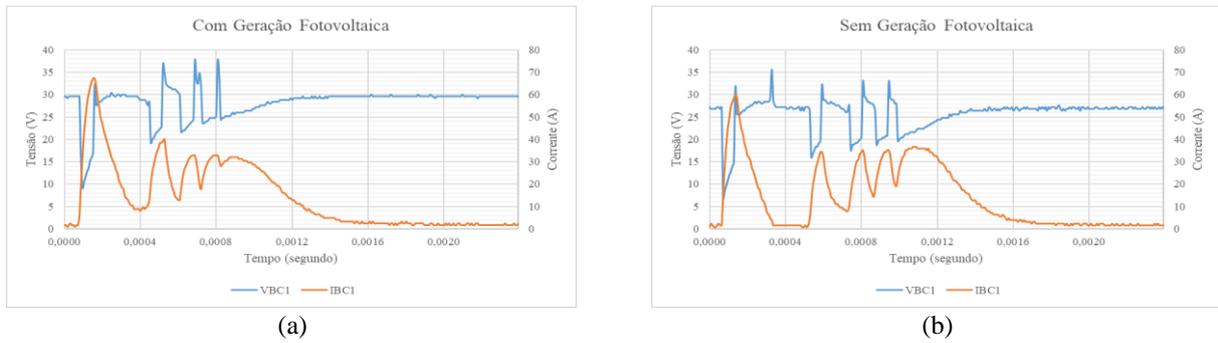


Figura 14 – Evento transitório oscilatório após acionamento do conversor c.c.-c.c. descentralizado.

Na sequência, realizou-se o acionamento e desligamento gradual de cada painel de LED e do BC2. Assim como nos ensaios para o conversor c.c.-c.c. centralizado, também foram registradas sobretensões durante todos os ensaios, visto que a tensão do barramento c.c. permaneceu acima de 1,1 p.u., com exceção do ensaio 4 utilizando a NDCC apenas com os bancos de baterias descarregados. Além disso, foram registradas diminuições no nível de tensão da NDCC resultado do acionamento do BC2 no ensaio 1 e 2. Para os ensaios 3 e 4 não foram registradas diminuições no nível de tensão durante o acionamento do BC2.

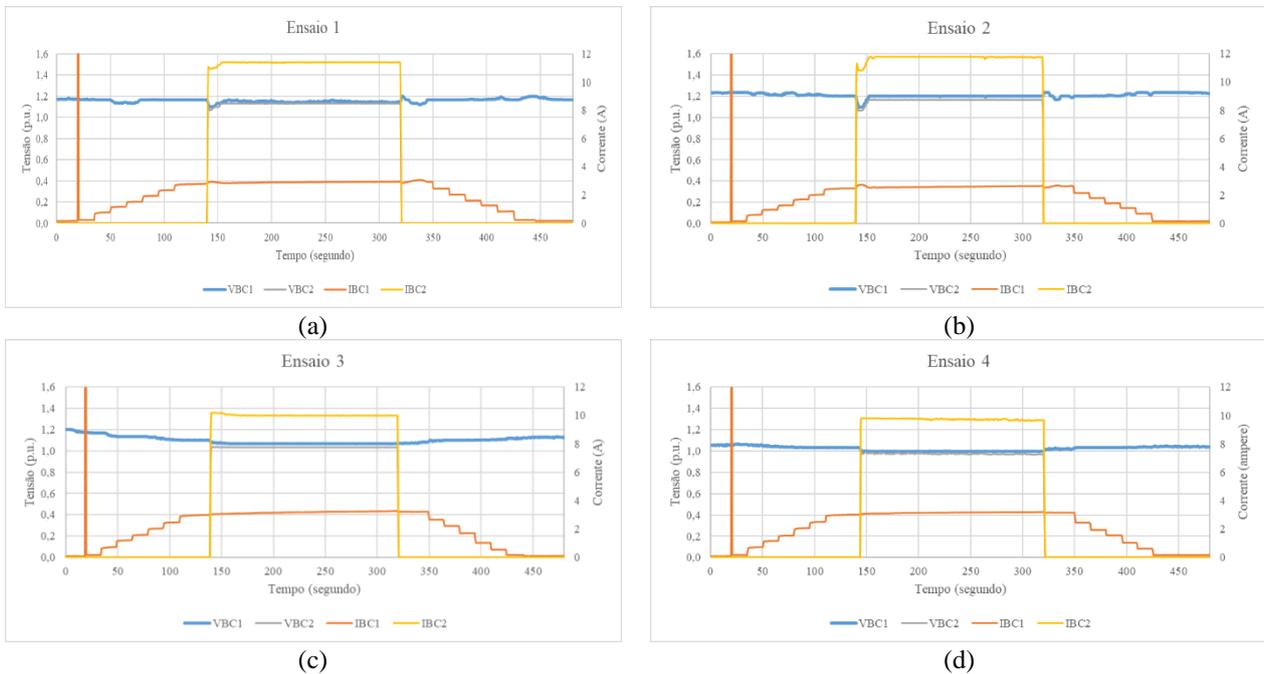


Figura 15 – Evento variações de longa duração utilizando conversor c.c.-c.c. descentralizado.

Na Tab. 5 caracteriza-se o evento transitório e as variações de tensão de longa duração registrados para os ensaios utilizando o conversor c.c.-c.c. descentralizado, de acordo com a recomendação IEEE Std 1159.

Tabela 5 – Eventos transitório e variações de longa duração com conversor c.c.-c.c. descentralizado.

Ensaio	Transitório			Variações de longa duração	
	Oscilatório			Sobretensão	
	Duração (ms)	Magnitude (p.u.)	Componente Espectral (kHz)	Duração (minutos)	Magnitude (p.u.)
1	3,33	0,38 – 1,56	2,94	8	1,16
2				8	1,21
3	3,52	0,28 – 1,48	3,19	4	1,12
4				-	-

Cabe ressaltar que nos ensaios realizados, a intensidade luminosa dos painéis LED, do BC1, que estavam em operação durante a entrada e saída do BC2 não sofreram impactos quanto à variação na iluminância ou interrupção da operação, seja com a utilização de conversores c.c.-c.c. centralizado ou descentralizados. Além disso, nenhum dispositivo de proteção, fusível, disjuntor ou proteção interna dos controladores de carga foram atuados ou avariados devido aos eventos registrados.

## 5. CONCLUSÃO

Como apresentado nos ensaios realizados, eventos de longa duração e transitório foram registrados. O evento de longa duração relacionado à sobretensão na tensão da rede é visto como um ponto onde se pode haver mitigação, visto que a NDCC não possui mecanismo de controle para o nível de tensão da rede. Os impactos na tensão de suprimento da NDCC, proveniente da entrada do BC2 e variação da geração fotovoltaica, resultaram em diminuições e aumentos no nível de tensão da rede. Destaca-se ainda, como interessante, a realização desses subensaios utilizando novos bancos de baterias.

O evento transitório oscilatório, como resposta ao acionamento dos conversores na rede, mostrou uma elevada magnitude na tensão da rede, o que podem influenciar outras cargas mais sensíveis ou instrumentos de medições conectados na NDCC. Destaca-se, também, a significativa magnitude de corrente de pico requisitada por ambos os conversores, podendo-se mitigar este efeito por meio de estratégias de pré-carga ou inserção dos conversores já com carga ligada (painel de LED), ocasionando maior amortecimento da corrente elétrica. Nesse sentido, também é interessante o estudo de entrada de conversores na NDCC observando o impacto dos mesmos na rede sob diferentes estratégias ou formas de acionamento pelos usuários e em conjunto com outras cargas operando na rede.

### Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Os autores agradecem também ao GEDAE/UFPA pela infraestrutura para realização da pesquisa e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo apoio ao projeto de pesquisa aprovado na Chamada CNPq/Equinor Energia Ltda. 2018.

### REFERÊNCIAS

- Elsayed, A. T.; Mohamed, A. A.; Mohammed, O. A. DC microgrids and distribution systems: An overview. *Electric Power Systems Research*, v. 119, p. 407–417, 2015.
- Fonseca, A. C. Qualidade da Energia Elétrica em uma Nanorrede de Distribuição em Corrente Contínua, 19. Fev. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), Belém, Brasil: Universidade Federal do Pará.
- Gorji, S. A., Sahebi, H. G., Ektesabi, M., Rad, A. B. Topologies and Control Schemes of Bidirectional DC–DC Power Converters: An Overview, in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 117997-118019, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2937239.
- IEEE, 2019. Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. *IEEE Std 1159-2019*, pp.1-98, doi: 10.1109/IEEESTD.2019.8796486.
- Kumar, D., Zare, F., Ghosh, A., DC Microgrid Technology: System Architectures, AC Grid Interfaces, Grounding Schemes, Power Quality, Communication Networks, Applications, and Standardizations Aspects, in *IEEE Access*, vol. 5, pp. 12230-12256, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2705914.
- Thomas, B. A. Edison revisited: Impact of DC distribution on the cost of LED lighting and distributed generation, 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Palm Springs, CA, 2010, pp. 588-593, doi: 10.1109/APEC.2010.5433612.
- Torres, P. F. Desenvolvimento e Modelagem de uma Nanorrede de Distribuição em Corrente Contínua em Baixa Tensão com Sistemas de Geração Distribuída, 23. Out. 2019. Dissertação de Mestrado, Belém, Brasil: Universidade Federal do Pará.
- Van Den Broeck, G.; Stuyts, J.; Driesen, J. A critical review of power quality standards and definitions applied to DC microgrids. *Appl. Energy* 2018, 229, 281–288.
- Veríssimo, P. H. A. Laboratório de Sistemas Híbridos e Minirredes: Processo de Montagem, Instalação, Comissionamento e Ensaios Operacionais, 30. Dez. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), Belém, Brasil: Universidade Federal do Pará.

### QUALITY OF ENERGY APPLIED TO A DC NANOGRID

**Abstract.** *This work presents a study of power quality applied to a direct current distribution nanogrid (DCDN) considering the supply of LED lighting loads and resistive load bank. The NDCC is located in the external area of the Group for the Study and Development of Energy Alternatives (GEDAE) of the Federal University of Pará (UFPA) at the Guamá campus, city of Belém do Pará, Brazil. The NDCC consists of three distributed photovoltaic generators and three battery banks. The observed power quality phenomena were characterized based on the IEEE Std 1159 power quality monitoring recommendation. Transient oscillatory and long-term voltage variations events were recorded for the proposed test, caused by the generation and loads employed.*

**Key words:** DC Nanogrid; Power Quality; IEEE Std 1159.