

MEDIÇÃO E INDICADORES DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA EM NANORREDE DE DISTRIBUIÇÃO C.C.

Jair Silva de Souza – jairsouza012@gmail.com

Instituto Federal do Pará

Marcos André Barros Galhardo – galhardo@ufpa.br

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

4.4. Controle e monitoramento de sistemas fotovoltaicos

Resumo. *A medição confiável de parâmetros elétricos é fundamental para a operação de qualquer sistema elétrico. Desta forma, quando se aborda a produção e utilização de energia elétrica em corrente contínua (c.c.), as aplicações neste ramo têm ganhado importância atualmente com a expansão de sistemas fotovoltaicos e sistemas de armazenamento em bancos de baterias. As tecnologias atuais são capazes de realizar tal tarefa, porém ainda há espaço para o desenvolvimento de normativas e meios mais econômicos e adequados para obtenção de indicadores da qualidade de energia elétrica em tais sistemas. Neste artigo são abordados alguns fenômenos de qualidade de energia elétrica (QEE) que podem estar presentes em redes operando em c.c., assim como técnicas de medição para aquisição de sinais elétricos nestas redes. Diante isto, expõe-se os requisitos considerados para o desenvolvimento de um protótipo de medidor digital com capacidade de registro de indicadores de QEE aplicado em uma nanorrede de distribuição em c.c. com tensão nominal de 24 V, suprida por geradores fotovoltaicos distribuídos e com energia armazenada em banco de baterias. Verifica-se que muitos fenômenos de QEE em redes c.a. se aplicam direta ou de forma análoga em redes c.c., assim, identificaram-se preliminarmente tais eventos presentes em uma nanorrede c.c. e buscou-se o desenvolvimento de um protótipo de medidor a ser implantado em tal nanorrede, capaz de registrar indicadores relacionados a eventos em regime permanente e transitório como ripple, variações de tensão de longa duração e transitórios oscilatórios.*

Palavras-chave: Nanorredes c.c., Qualidade de Energia Elétrica, Medição em c.c.

1. INTRODUÇÃO

Com a utilização cada vez maior de fontes de energia que produzem diretamente em corrente contínua (c.c.), que é o caso dos geradores fotovoltaicos, bem como o crescimento da aplicação de sistemas de armazenamento de energia elétrica, que são predominantemente em c.c., e com o uso cada vez mais comum de equipamentos eletrônicos, tanto de potência quanto de processamento de sinais, considerando-se ainda que a conversão c.c.-c.c. vem sendo tornando mais eficiente que a conversão c.a.-c.c. (Mariethoz e Delaforge, 2017) para uma determinada classe de tensão e potência, todos estes pontos tendem ao uso de c.c. para sistemas de distribuição como uma solução não somente viável, como também de maior eficiência energética.

Sendo assim, é natural que haja no futuro o uso cada vez maior e em maior potência de dispositivos c.c. nos mais diversos setores do sistema elétrico (geração, transmissão e distribuição). Por exemplo, em instalações de sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição, ao invés do uso de conversores c.c.-c.a. (inversor), haverá o uso mais frequente de conversores c.c.-c.c. com maior eficiência na conversão (Vossos et al., 2017).

Porém, estas vantagens não garantem imunidade da tecnologia aos problemas de Qualidade de Energia Elétrica (QEE), sendo encontrados problemas análogos aos sistemas operando em c.a., dentre eles pode-se destacar eventos transitórios, variações de curta e longa duração, tanto de tensão quanto de corrente.

A detecção de fenômenos de QEE e o cálculo de seus indicadores variam em relação à complexidade de medição e registro, partindo-se, por exemplo, desde uma sobretensão (evento em regime permanente) até picos de tensão com duração na ordem de microssegundos (evento transitório). Para a detecção de eventos, registro e determinação de índices de QEE primeiramente devem ser definidos parâmetros para caracterização, como por exemplo, duração, frequência e valor pu, além das técnicas (tratamento do sinal e processamento matemático) de medição.

O desenvolvimento de medidores para avaliação de QEE deve ser capaz de não somente exibir os valores médios ou rms medidos (tensão, corrente, potência, por exemplo) e cumulativos (energia, ampère-hora, por exemplo), mas de registrar eventos transitórios, ou seja, armazenar na memória dados que indiquem parâmetros relacionados ao evento ocorrido. Sendo assim, é necessário conhecer o que ocorre em uma rede c.c. e dimensionar a capacidade do medidor para registrar os eventos mais comuns presentes nela. Os níveis de tensão e corrente esperados são os fatores mais básicos para dimensionamento, porém, em um contexto de eventos transitórios em redes operando em c.c., a taxa de amostragem do conversor analógico-digital também ganha importância singular.

Desta forma, o objetivo deste artigo é mostrar a atuação dos fenômenos de QEE em sistemas de distribuição em c.c. e o desenvolvimento de um medidor, a ser implantado em nanorrede c.c., capaz de medir e registrar tais fenômenos.

2. FENÔMENOS E INDICADORES DE QEE

Nesta seção apresentam-se alguns fenômenos de QEE comumente presentes em redes c.a. e a avaliação destes segundo a sua aplicabilidade para redes em c.c. Entre eles são abordados: *ripple*, *offset* c.a. (análogo ao *offset* c.c. dos casos c.a.), harmônicos, inter-harmônicos, *notching* e ruído.

2.1 A Nanorrede

A nanorrede de distribuição em c.c tomada como aplicação para a detecção e registro de eventos de QEE está instalada na área externa do Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas da Universidade Federal do Pará, cidade de Belém-Pará. A nanorrede possui topologia em anel, tensão nominal de 24 V e cerca de 200 metros de extensão. A nanorrede é formada por três geradores fotovoltaicos distribuídos e três sistemas de armazenamento por meio de bancos de baterias (Sistemas de Armazenamento e Acumulação, SGA), que suprem energia à nanorrede via a utilização de controladores de cargas. Há também três bancos de cargas (BC) distintos, contendo conversores c.c.-c.c. e c.c.-c.a., que estão dispostos ao longo da rede em diferentes pontos conexão.

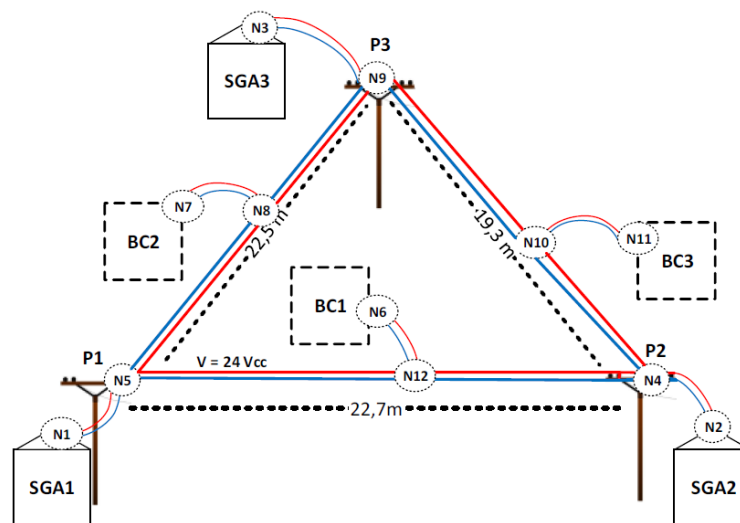


Figura 1 – Nanorrede c.c. Fonte: Torres (2019).

Cada SGA é composto por dois módulos fotovoltaicos de 245 Wp e quatro baterias de 12 V e 66 Ah.

As cargas são conectadas em pontos distintos da nanorrede, tendo-se atualmente a seguinte configuração: BC1 possui potência nominal de 122 W, composto por lâmpadas LED; BC2 é composto por banco de resistores, podendo-se variar a potência do banco de 16 a 242 W; e BC3 é composto por cargas c.a. ligadas por meio de um conversor c.c.-c.a.

2.2 Ripple de Tensão e Corrente

O *ripple* é definido na EN 61000-4-7 (2002) como variação da tensão sobre um nível c.c. em regime permanente e na IEC 60050 (2018) como um nível pulsante derivado pela remoção da componente c.c., nota-se que ambas as definições são muito genéricas e, apesar de não citar diretamente, podem ser aplicadas à corrente também. Por elas pode-se concluir que tudo o que está fora do nível c.c. em regime permanente seria considerado *ripple*.

Na Fig. 2 exemplifica-se a representação de *ripple* de corrente com um nível c.c. de 1,49 A, amplitude pico-vale de aproximadamente 0,6 A e com frequência de 120 Hz (múltipla inteira de 2 da frequência fundamental da rede c.a.). Esta medição foi realizada a partir da nanorrede c.c. descrita na subseção 2.1, convém destacar que a nanorrede possui interface com a rede c.a. via um conversor c.a.-c.c (inversor) de onda senoidal pura.

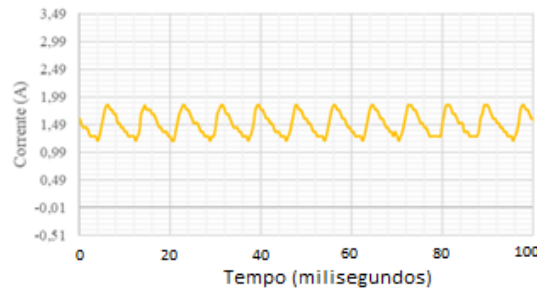


Figura 2 - Forma de onda da corrente com *ripple*. Fonte: Fonseca (2021).

2.3 *Offset c.a.*

O *Offset c.a.* é a presença de uma forma de onda c.a. em torno do nível c.c. Ocorre majoritariamente nos sistemas c.c. que possuem algum sistema c.a. integrado onde se verificam acoplamentos magnéticos ou galvânicos com o(s) sistema(s) c.a. (VDA Empfehlung 320, 2014), o que reflete no lado c.c. a frequência fundamental da rede (50 ou 60 Hz) ou seus múltiplos inteiros em 2, 3 ou 6 (Mariscotti, 2007).

Como exemplo, pode-se ver a ocorrência na nanorrede em questão, onde na Fig. 2 há uma ondulação na corrente com um período aproximado de 8,33 ms, ou seja, com uma frequência de 120 Hz. Considerando que a rede c.a. em questão opera em 60 Hz, então a frequência fundamental da componente alternada da corrente que circula no lado c.c. oscila com o dobro da frequência da rede c.a.

O *Offset c.a.* pode causar incremento em perdas elétricas e assim como variações de tensão à níveis intoleráveis, causando falha na operação via atuação de proteção por sub ou sobretensão. Normalmente, a operação dos conversores c.c.-c.c. pode proporcionar a atenuação da componente c.a. via seus capacitores de filtro (Broeck, Stuyts e Driesen, 2018).

Dentro das definições apresentadas, pode-se encontrar outros fenômenos de característica semelhante, porém que levam outras denominações, ou seja, uma classe de fenômenos de qualidade de energia que estão ligados à distorção do nível c.c., que seriam *notching*, harmônicos, inter-harmônicos e ruído. Todos estes eventos possuem origens distintas ligadas à operação de equipamentos em um sistema elétrico.

2.4 Harmônicos e inter-harmônicos

As componentes harmônicas são definidas para redes em c.a. na recomendação IEEE Std 1159 (2019), como sendo formas de onda senoidais que possuem frequência múltipla inteira da frequência fundamental e as componentes inter-harmônicas como sendo as de múltiplos não inteiros, porém, o termo componente fundamental pode não ser aplicado ou ter significado a casos em c.c. (Magro e Mariscotti, 2006). O principal parâmetro de quantificação da distorção harmônica em c.a. é a Distorção Harmônica Total (da sigla em inglês, THD) e existem algumas propostas de termos análogos aos THD aplicados à c.c. Por exemplo, em Barros, Apráiz e Diego (2018) é apresentado o termo Fator de Distorção de *ripple* (da sigla em inglês, RDF).

Os harmônicos e inter-harmônicos podem ser produzidos em função do chaveamento interno de um conversor c.c.-c.c., o que produz componentes alternadas de mais alta frequência e que estão em função da frequência de chaveamento do conversor (Mariscotti, 2002). A Recomendação IEEE 519 (2014) destaca que eles podem aumentar as perdas nos capacitores de filtro e nos próprios condutores, além de distúrbios nos sinais de comunicação e nos equipamentos de medição.

Note que em *offset c.a.* foi relatado sobre o acoplamento entre rede c.a. e *link c.c.*, citando que o acoplamento que pode ocorrer com frequências múltiplas inteiras da frequência da rede c.a., o que pode ser considerado como a presença de componentes harmônicas na rede c.c. Além disso, em Kirkham (2009) se considera que para redes c.c., harmônicos, inter-harmônicos são sinônimos para *ripple*, ressaltando apenas que harmônicos e inter-harmônicos são tratados ou avaliados no domínio da frequência, enquanto que *ripple* no domínio do tempo.

2.5 *Notching* e Ruído

O *Notching* é definido na Recomendação IEEE 1159 (2019) para sistemas c.a. como sendo um distúrbio de tensão periódico causado pela operação normal de equipamentos de eletrônica de potência quando ocorre comutação de corrente entre fases. Na Recomendação IEEE 519 (2014) define-se como um distúrbio de comutação (ou outra causa) na forma de onda padrão de tensão, durando menos de 0,5 ciclo, que é inicialmente de polaridade oposta à forma de onda e é, portanto, subtraído da forma de onda normal em termos do valor de pico da tensão de distúrbio, como pode ser notado na Fig. 3. Nota-se que estas definições são bem específicas, além de bem ligadas à operação em c.a., porém pode-se aplicar o conceito para os casos em c.c.

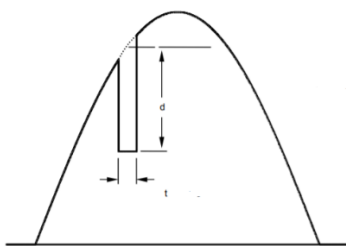


Figura 3 – Exemplo de *Notching*. Fonte: Adaptado de Recomendação IEEE 519 (2014).

O *Notching* é caracterizado pelo valor em pu da queda ou elevação de tensão e pela duração. Em sistemas c.c. uma das principais causas é dada pela comutação em conversores c.c.-c.c. com capacitância insuficiente, seja ela causada por sobrecarga ou falha no capacitor (Broeck, Stuyts e Driesen, 2018).

Este fenômeno é geralmente atenuado pelos capacitores (e baterias no caso de redes de distribuição c.c.) ao longo da rede c.c., de forma que em geral não é considerado significativo para a definição dos indicadores de qualidade de energia em c.c. (Barros, Apráiz e Diego, 2018).

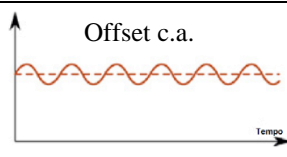

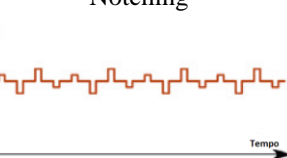

O ruído, por sua vez, é entendido como uma interferência oriunda de fontes externas e aleatórias. A categoria mais conhecida é o ruído branco, que é definido como processo matematicamente aleatório não autocorrelacionado com função densidade espectral de potência constante (Howard, 2015).

No entanto, a ideia de ruído é ampla, podendo abranger os efeitos das não linearidades e das incertezas inerentes aos componentes empregados. Conversores cc.-c.a. , por exemplo, podem ser considerados uma potencial fonte de ruído, visto que realizam comutações (comportamento não linear) produzem distúrbios de alta frequência que podem se propagar pelo equipamento, carga, rede de alimentação e pelo ar (Suela, 2016), além de distúrbios internos que afetam a dinâmica do conversor e o desempenho geral, como: efeitos parasitas, erros de medição, temperatura ambiente (Mazumder, Nayfeh e Boroyevich, 2001) (Sangswang e Nwankpa, 2003).

Tanto o *Notching*, ruído e inter-harmônicas aumentam as perdas, a corrente nos capacitores de filtro e distúrbios nos equipamentos de medição e comunicação (Broeck, Stuyts e Driesen, 2018). Uma das técnicas conhecidas para atenuar o efeito de algumas fontes de ruído é com o uso de gaiola de Faraday por volta do equipamento (Andrioli, 2021).

Na Tab. 1 tem-se um resumo dos fenômenos de QEE em regime permanente aplicados à rede c.c. apresentados nesta seção.

Tabela 1 - Fenômenos de qualidade de energia de regime permanente, indicadores e causas. Fonte: Adaptado de Broeck, Stuyts e Driesen (2018).

Fenômeno	Indicador	Causa
 <p>Offset c.a.</p>	Magnitude	Acoplamento Eletromagnético Falha em conexão na conversão CA-C.C.
 <p>Harmônicos e Inter-harmônicos</p>	Conteúdo Espectral	Chaveamento de conversores
 <p>Notching</p>	Magnitude (Distorção)	Chaveamento de conversores
 <p>Ruído</p>	Conteúdo Espectral	Chaveamento de conversores Sistemas de comunicação

2.6 Índice de *Ripple*

As representações numéricas, via indicadores ou fatores, que caracterizam a natureza de um evento de QEE, normalmente são baseadas em informações de tempo e/ou frequência da forma de onda relacionada ao distúrbio na tensão ou corrente. A aplicabilidade destes indicadores em circunstâncias práticas é determinada pela relevância de seus efeitos, ou seja, quais faixa de valores estes fenômenos podem assumir sem que haja prejuízo à operação e vida útil dos equipamentos envolvidos.

A medição ou verificação de *ripple* sempre foi algo pertinente na eletrônica, sendo normalmente dois parâmetros os principais a serem usados para sua caracterização: magnitude e frequência de oscilação. Com relação à magnitude, dois índices são definidos na IEC 60050 (2018), o fator de pico da ondulação, que é "a razão entre o valor pico a vale do conteúdo de ondulação e o valor absoluto da componente contínua (X_{CC}) em uma forma de onda pulsante", dado na Eq. (1) (Barros, Apráiz e Diego, 2018).

$$fator\ de\ pico\ do\ ripple(\%) = \frac{X_{pico-vale}}{X_{cc}} 100\% \quad (1)$$

Por outro lado, o fator r.m.s. da ondulação é definido como "a razão do valor r.m.s. da ondulação para o valor absoluto da componente contínua (X_{CC}) em uma forma de onda pulsante", dado na Eq. (2) (Barros, Apráiz e Diego, 2018).

$$fator\ rms\ do\ ripple(\%) = \frac{X_{ripple(rms)}}{X_{cc}} 100\% \quad (2)$$

Conforme mencionado na subseção 2.4, uma forma de caracterizar a distorção espectral da ondulação sobre um sinal c.c. é o uso do Fator de Distorção de Ripple (RDF), que é um índice semelhante ao THD para distorção harmônica em redes de sistemas c.a. Matematicamente, o RDF pode ser definido como a raiz quadrada da soma dos quadrados da razão entre a amplitude de uma dada componente harmônica da ondulação, G_n , e o nível c.c., G_0 (valor médio do sinal), como é dado na Eq. (3). As componentes G_n são obtidas usando a análise da Transformada Discreta de Fourier (da sigla em inglês, DFT), até uma ordem específica nl (Barros, Apráiz e Diego, 2018).

$$RDF = \sqrt{\sum_n^{nl} \left(\frac{G_n}{G_0}\right)^2} 100\% \quad (3)$$

Para os casos em c.a., o Prodlist (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) da Agência Nacional de Energia Elétrica – Aneel (2021), em seu quinto módulo que rege sobre sistemas de medição e procedimentos de leitura, diz que os medidores devem ter a capacidade de medir componentes harmônicas até a 40ª ordem.

2.7 Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD)

As Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD) podem ser caracterizadas por alterações instantâneas, momentâneas ou temporárias na tensão, dependendo da duração de cada fenômeno. As VTCD são bem definidas para redes em c.a., como a variação do valor rms da tensão nominal por um tempo maior que 0,5 ciclo da frequência da rede, porém menor ou igual a 1 min (IEEE Std 1159, 2019). No caso, acima de 1 minuto já é considerada variação de tensão de longa duração. VTCD normalmente são causadas por operações de chaveamento, falhas e grandes flutuações de potência no sistema.

Em EN50160 (2019) são adotadas definições semelhantes, mas há a especificação de 0,9 e 1,1 p.u. como sendo os níveis limite para quedas e aumentos de tensão, respectivamente. Uma interrupção no suprimento é definida como "uma condição em que a tensão nos terminais de alimentação é inferior a 5% da tensão de referência". Além disso, em EN50160 (2019) é definido o limite entre interrupções de curto e longa duração em 3 minutos. Observa-se que estas definições também podem ser aplicadas a sistemas de distribuição em c.c. sem reformulação, embora os níveis relacionados aos limites possam ser um assunto para análise e discussão posterior.

Na ABNT NBR IEC 61000-4-30 (2011) define-se afundamento de tensão como sendo uma redução temporária da tensão em um ponto do sistema elétrico abaixo de um limiar, enquanto a elevação está associada a um aumento temporário de tensão em um ponto do sistema elétrico acima de um limiar.

Elevações de tensão podem ter um impacto mais prejudicial na operação de um equipamento, uma vez que a infraestrutura do sistema (por exemplo, conversores c.c.-c.c., cabeamento, etc) pode sofrer ruptura irreversível do isolamento. Por outro lado, a diminuição de tensão pode fazer com que dispositivos sejam desligados e desconectados, o que tem um impacto na disponibilidade do sistema. Além disso, aumento de perdas podem ocorrer em caso de afundamento de tensão, pois os níveis de corrente podem aumentar para distribuir a mesma quantidade de potência. Outra consequência do afundamento é a instabilidade da tensão na presença de cargas de potência constantes, à medida que as margens de estabilidade diminuem (Emadi, Khaligh, Rivetta e Williamson, 2006).

2.8 Transientes impulsivos e oscilatórios

Os transientes impulsivos são definidos como mudanças súbitas de frequência, tensão, corrente ou ambas que são unidirecionais em polaridade (IEEE, 2019). Por outro lado, os transientes oscilatórios também estão associados às mudanças rápidas na tensão ou corrente e com uma oscilação relacionada à frequência natural do sistema, este fenômeno ocorre com mudança de polaridade na forma de onda para os casos em c.a., mas em c.c. é comum que ocorra de modo unidirecional. Os transientes impulsivos são caracterizados por seu tempo de subida, tempo de descida e magnitude de pico, enquanto os transientes oscilatórios são caracterizados por seu espectro de frequência e duração. Na Recomendação IEEE Std 1159 (2019) é definido que os transientes oscilatórios são dados conforme a frequência de oscilação f , como de baixa frequência para $f < 5$ kHz, média para $5 \text{ kHz} < f < 500 \text{ kHz}$ e alta para $0,5 \text{ MHz} < f < 5 \text{ MHz}$. Estas definições propostas podem ser igualmente aplicáveis às redes c.c.

Os transientes impulsivos e oscilatórios na rede c.c. podem ser causados por descargas atmosféricas ou operações de comutação repentinas que causam tensões induzidas. Isso pode causar ruptura de isolamento ou ressonâncias no sistema (Broeck, Stuyts e Driesen, 2018).

Na fig. 4 se encontra um registro de um transitório na nanorrede em questão, onde se nota um transitório oscilatório unidirecional de corrente, este fato ocorre devido ao circuito interno do conversor c.c.-c.c empregado que alimenta a carga, nele há um diodo no estágio de entrada que impede que a corrente circule no sentido contrário. Cabe destacar que o transitório oscilatório de corrente provocou neste caso alterações significativas no nível de tensão, tanto afundamentos (0,3 pu) quanto elevações (1,75 pu).

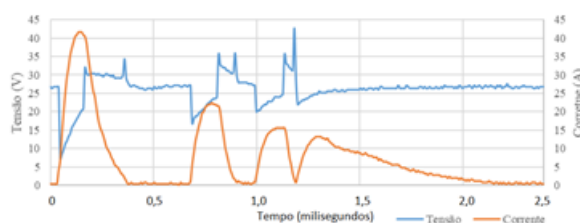


Figura 4 – Tensão e Corrente durante um Transitório Oscilatório (Fonseca, 2021).

3. TÉCNICAS DE MEDIÇÃO

A medição de sinais elétricos é composta basicamente por quatro etapas fundamentais: transdução, amplificação, filtragem de sinais, conversão analógico-digital e processamento, conforme ilustrado no diagrama da Fig. 5.



Figura 5 - Fluxo da medição eletrônica. Fonte: Autoria Própria.

3.1 Transdução c.c.

Os casos em que o transdutor utiliza a indução magnética em sua operação são aplicados para a transdução c.a., por exemplo, os métodos que utilizam transformadores ou bobina de rogowski. Na Tabela 2 há um comparativo das técnicas mais empregadas para transdução em c.c.

Tabela 2 - Métodos de transdução de tensão e/ou corrente para medição. Fonte: Kirkham (2009).

Método	Vantagens	Desvantagens
Shunt (Corrente) Divisor de Tensão (Tensão)	<ul style="list-style-type: none"> Baixo Custo Simple construção Dispositivo passivo 	<ul style="list-style-type: none"> Não isolado Exige seccionamento Dissipa calor Menor imunidade a ruído
Torque eletromecânico (Tensão e corrente)	<ul style="list-style-type: none"> Simple construção Tecnologia madura 	<ul style="list-style-type: none"> Mecânico (peças móveis) Baixa corrente
Magneto resistores (Tensão e corrente)	<ul style="list-style-type: none"> Incerteza baixa 	<ul style="list-style-type: none"> Não linear (em malha aberta)

		<ul style="list-style-type: none"> • Influenciado pela temperatura (em malha aberta)
<i>Fluxgate current comparator</i> (Corrente)	<ul style="list-style-type: none"> • Custo baixo para dispositivo com baixa exatidão • Tecnologia madura 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto custo para maior exatidão • Dispositivo Ativo
Efeito Hall (Tensão e corrente)	<ul style="list-style-type: none"> • Isolação galvânica • Praticidade 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensibilidade em altas temperaturas • Dispositivo Ativo
Efeito Faraday (Corrente)	<ul style="list-style-type: none"> • Ótima isolamento galvânica 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilizado para sistemas de alta tensão • Dispositivo Ativo

Para a medição em sistemas de potência, o isolamento galvânico é importante para a vida útil dos dispositivos de medição e segurança da instalação, sendo que ele pode ser obtido utilizando transdutores que transformam o sinal elétrico em sinal de outra natureza, como, por exemplo, magnética ou luminosa. Além do mais, o transdutor precisa representar o sinal na saída com linearidade (tanto de módulo quanto de fase) e boa resposta em frequência dentro da faixa de operação.

3.2 Amplificação e Filtragem de sinal

O sinal obtido na saída de um transdutor normalmente é de intensidade muito diferente das utilizadas na operação dos conversores analógico-digitais, além de ter contido uma grande gama de ruídos. Sendo assim, se faz necessária uma etapa de amplificação para adequação do nível e da faixa do sinal à entrada dos conversores e filtro dos ruídos.

Para a conversão analógico digital é necessário que o sinal a ser digitalizado seja composto apenas do sinal de interesse, ou seja, não tenha ruídos e tão pouco frequências além do dobro da frequência máxima do sinal de interesse. Para isso é necessário a utilização de um filtro conhecido como *anti-aliasing*, que é basicamente um filtro passa baixa com frequência de corte próximo à máxima frequência de interesse (Santos e Junior, 2005).

3.3 Conversão Analógico-digital e processamento

Os conversores analógico-digitais (da sigla em inglês ADC) apresentam capacidade que devem ser dimensionadas para cada faixa de medição, destacando-se a resolução, dada em bits, e a taxa de amostragem, dada em amostras por segundo (da sigla em inglês SPS).

A resolução estará ligada ao quanto a medição será dividida, ou seja, quanto maior a resolução, maior será a proximidade ao valor real medido. A taxa de amostragem está ligada, mais diretamente, à velocidade com que é feita esta medição.

A maioria dos ADC atualmente se dividem em algumas categorias, como: de ultra-alta velocidade, de alta velocidade, para aplicações gerais, de precisão, isolados e com entrada em corrente. Uma característica construtiva relevante é a arquitetura interna do ADC, dentre elas se destacam os de rampa dupla, de aproximação sucessiva, paralelo (*flash*), de canal (*pipeline*), de interpolação, de dobramento (*folding*), ou ambos (de dobramento e interpolação), e os sobreamostrados ou sigma-delta ($\Sigma-\Delta$). Todas estas arquiteturas, com exceção da sigma-delta, seguem o teorema de Nyquist, ou seja, operam mantendo uma razão pequena (1,5 a 10 vezes) entre sua frequência de amostragem e a frequência de amostragem mínima calculada pelo teorema de Nyquist (Rodrigues, 2011).

Em função da aplicação, pode-se destacar os ADC de precisão, que geralmente operam com uma taxa de amostragem baixa, em torno de 2.000 SPS, com resoluções de 16 a 24 bits, geralmente com arquiteturas *pipeline*, sigma-delta ou aproximação sucessiva, com uma Relação Sinal Ruído (da sigla em inglês SNR) em torno de 130 dB para os ADC de 24 bits e com uma demanda de 15 mW (Rodrigues, 2011).

Como mencionado na subseção 2.5, o ruído é intrínseco à operação de sistemas eletrônicos e sua quantificação se expressa pela relação sinal-ruído que é uma razão entre as potências de um sinal contendo algum tipo de informação e o ruído presente nesse mesmo sinal. Quanto mais alto for a SNR, menor será o efeito do ruído sobre a informação desejada, como pode ser interpretado pela Eq. (4).

$$SNR_{db} = 10 \log \left(\frac{P_{sinal}}{P_{ruído}} \right) \quad (4)$$

Além do ruído branco, há outro tipo de ruído existente em ADC, mesmo nos ideais, que é o de quantização, que vem a ser o erro inserido pela aproximação do valor analógico (que pode assumir qualquer valor) para o valor digital (que apenas pode assumir valores predeterminados) mais próximo. Por sua vez, este ruído limita a exatidão das amostras digitais, chegando ao ponto de que se o nível de ruído total for maior que a resolução do conversor, então os últimos bits

não serão dados como efetivo. Deste raciocínio surge o conceito de Número Efetivo de bits (da sigla em inglês, ENOB), sendo este um dos critérios utilizados para avaliar o desempenho de um conversor (Rodrigues, 2011).

Cabe destacar que os conversores sigma-delta atuam com sobreamostragem, o que diminui a sensibilidade destes à ruídos (fora o de quantização), desta forma, tendem a ter um bom ENOB, sendo assim, aconselhados para medições de precisão em sistemas de potência.

Além de parâmetros operacionais, como o valor da frequência em que a SNR diminuiu de 3dB, conhecida como limite superior da banda passante do conversor ou banda-passante de resolução efetiva (da sigla em inglês, ERBW), este valor é muito importante visto que indica o limite ou faixa de frequência sobre a qual o conversor deve ser utilizado.

Após a digitalização do sinal, as palavras (compostas por bits do tamanho do número de bits do conversor) surgem a cada novo ciclo de amostragem, logo, o processamento deve ser capaz de comportar todo o fluxo de dados proveniente do conversor. Estes dados são utilizados para operações matemáticas, a fim de se obter informação sobre o sinal medido.

3.4 Medidor Projetado

O medidor foi projetado para atender as demandas de medição e registro de fenômenos de QEE em sistemas c.c. encontrados na nanorrede c.c. Como é necessária a medição de eventos transientes que fogem do ponto de operação do sistema (tensão nominal de 24 V ou 1 pu), logo, a faixa de medição deve ser ampla (de 0 a 3 pu), implicando também a necessidade de um alto número de bits de resolução para o conversor AD.

Em relação à medição de corrente, ele deve ter a capacidade de registro bidirecional de corrente, na faixa de -50 a 50 A, promover isolamento galvânico e ter uma largura de banda adequada ao propósito de medição. O sensor utilizado para aquisição de sinais da corrente foi um sensor de efeito hall da YHDC, que opera com 5 V, faixa de medição de -50 a 50 A e largura de banda de 0 a 50 kHz, linearidade de 1% e exatidão de 1%.

Para a amplificação e filtragem foi projetado um filtro de configuração Butterworth passa-baixas, de 2 polos, utilizando o amplificador operacional LM358N, mostrado na Fig. 5 (esquerda). Este filtro provê um decaimento no ganho de -40 dB por década a partir da frequência de corte, que será aproximadamente 2.160 Hz, conforme pode ser visto no diagrama de Bode apresentado na Fig. 5 (direita).

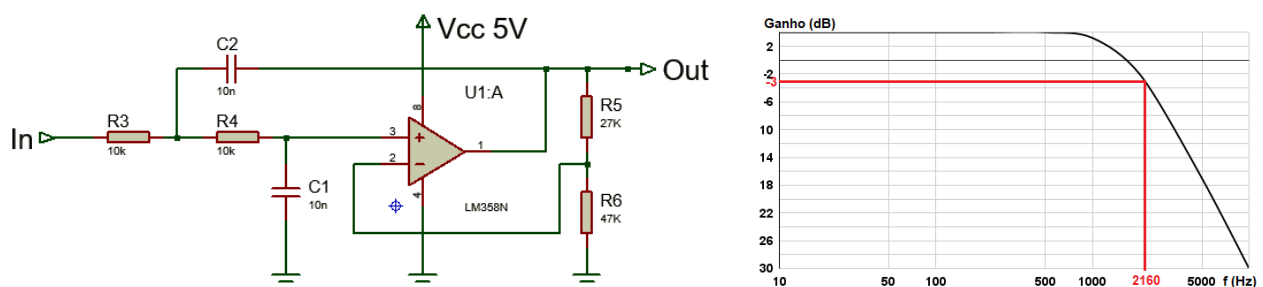


Figura 5 – Amplificador e Filtro Anti-aliasing projetado (esquerda) e Diagrama de Bode (direita).

Fonte: Autoria própria.

O conversor AD utilizado foi o ADS1256 com 30 kSPS de taxa de amostragem e até 24 bits de resolução efetiva (Texas Instruments, 2013), que considerando a faixa de tensão a ser medida, obtém-se uma resolução ou menor variação incremental de 4,17 microvolts; e 5,96 microamperes para a corrente.

Para processamento dos dados obtidos, emprega-se um computador de placa única Raspberry Pi 4, Modelo B, com 4 GB de memória RAM.

Na Fig. 6 há a fotografia tomada do medidor parcialmente montado, onde pode-se destacar seus principais componentes: 1- Módulo baseado no conversor AD ADS1256; 2- Amplificador e filtro *anti-aliasing*; 3- Raspberry Pi 4; 4- Conversor c.a.-c.c. e c.c.-c.c. para fornecimento de energia; 5- Borne de entrada de energia c.c.; 6 –Borne de entrada de sinal de tensão e corrente; 7 – Seletor de fonte de energia (c.c. ou c.a.); 8 – Borne de entrada de energia c.a.; 9 - Garras de entrada de sinal de tensão ; 10 – Garras de entrada de energia c.c.; 11 – Sensor de corrente de Efeito Hall. Destaca-se ainda a blindagem empregada no compartimento do medidor, feita com fitas de alumínio, a fim de atenuar ruídos irradiados por fontes externas.

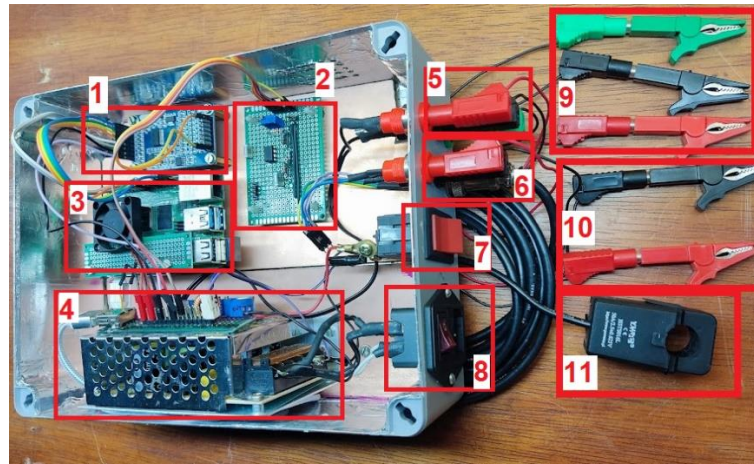


Figura 6 – Medidor de QEE para c.c. confeccionado. Fonte: autoria própria.

4. Conclusão

Os fenômenos de qualidade de energia elétrica ocorrem em qualquer modo de distribuição, seja corrente contínua ou alternada. As normas existentes atualmente estão maduras quanto às definições dos fenômenos de QEE para corrente alternada, no entanto, alguns conceitos e parâmetros podem ser extrapolados ou adaptados para corrente contínua.

Os valores dos indicadores de QEE aplicados a c.c. devem ser testados para obter valores limites que serão utilizados como parâmetros de QEE para futuras instalações elétricas em c.c. No caso da nanorrede em questão, portanto, há ainda a necessidade de melhor avaliação dos indicadores de QEE e seus impactos na operação do sistema, que serão obtidos na nanorrede onde o medidor será aplicado.

Considera-se o registro do Fator de Distorção de Ripple (RFD) na nanorrede c.c., sendo que este indicador se mostra como equivalente à Distorção Harmônica Total (THD) utilizada em redes operando em corrente alternada, ressaltando que o RFD concatena harmônicos e outras variações periódicas no nível de tensão e/ou corrente.

Para o desenvolvimento do protótipo de medidor, o condicionamento do sinal é de vital importância para o bom desempenho da medição e vida útil do equipamento de medição, além de que os componentes eletrônicos encontrados no mercado atualmente abrangem as etapas necessárias para aquisição e condicionamento de sinais, empregado no projeto e construção do equipamento de medição.

O desenvolvimento de medidores capaz de mensurar e registrar fenômenos de qualidade de energia em correntes contínua é também complexo e exige alta capacidade de processamento, devido à presença de componentes nos sinais de tensão e corrente com frequências diferentes de zero, devendo o equipamento possuir elevada taxa de amostragem para o propósito de obtenção de indicadores de QEE, seja em regime permanente ou transitório, bem como há a necessidade de proteção contra ruídos para evitar erros de medição.

REFERÊNCIAS

- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica: Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 5 – Sistemas de Medição e Procedimentos de Leitura (Revisão 6) 2021.
- ANDRIOLI, C. J., 2021. Análise Discriminante Do Ruído De Fundo Em Imagens De Ressonância Magnética De Extremidades, Dissertação de Mestrado, CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI, São Bernardo do Campo.
- Barros, J., Apráiz, M., Diego R. I., 2018. Definition and Measurement of Power Quality Indices in Low Voltage DC Networks," 2018 IEEE 9th International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS), 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/AMPS.2018.8494865.
- Broeck, G. V., Stuyts, J., Driesen J., 2018. A critical review of power quality standards and definitions applied to DC microgrids, Applied Energy, Volume 229, Pg 281-288, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.07.058>.
- Emadi, A., Khaligh, A., Rivetta, CH., Williamson, GA., 2006. Constant Power Loads and Negative Impedance Instability in Automotive Systems: Definition, Modeling, Stability, and Control of Power Electronic Converters and Motor Drives. <https://doi.org/10.1109/TVT.2006.877483>.
- EN 61000-4-7, 2002. Electromagnetic compatibility (EMC) – parte 4-7: Testing and measurement techniques – General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto.
- Europe Standards, EN50160, 2019. Voltage Characteristics in Public Distribution Systems.

- Fonseca, A. C., 2021. Qualidade Da Energia Elétrica Em Uma Nanorrede De Distribuição Em Corrente Contínua, Trabalho de Conclusão de Curso, UFPA, Belém.
- Howard, R. M., 2015. White noise: A Time Domain Basis, International Conference on Noise and Fluctuations (ICNF), pp. 1-4, doi: 10.1109/ICNF.2015.7288581.
- IEC 60050. International Electrotechnical Vocabulary (IEV 161-02-25).
- IEC 61000-4-30, 2015. Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques. Power quality measurement methods.
- IEEE Standards Association. IEEE Std 1159, 2019. IEEE recommended practice for monitoring electric power quality, doi: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2009.5154067>.
- IEEE Standards Association. IEEE Std 519-2014. Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems.
- Kirkham, H. Current Measurement Methods for the Smart Grid. 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting. IEEE, 2009.
- Magro, M. C. , Mariscotti, A., Pinceti, P. Definition of Power Quality Indices for DC Low Voltage Distribution Networks," 2006 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2006, pp. 1885-1888, doi: 10.1109/IMTC.2006.328304
- Mariethoz, S., Delaforge, T., 2017. A New Hybrid Isolated DC-DC Converter Topology for Realizing Very High Efficiency Isolated AC-DC Chargers. doi: 10.1109/VPPC.2017.8330953.
- Mariscotti, A., 2002. Analysis Of The Dc Link Current Spectrum In Voltage Source Inverters.
- Mariscotti, A., 2007. Methods For Ripple Index Evaluation In DC Low Voltage Distribution Networks. IMTC 2007 - Instrumentation and Measurement Technology Conference.
- Mazumder, S.K., Nayfeh, A.H., Boroyevich, D., 2001. Theoretical and Experimental Investigation of the Fast-and Slow-Scale Instabilities of a dc-dc Converter," IEEE Trans. Power Electron., vol. 16, issue 2, pp. 201-216.
- Rodrigues, S. A., 2011. Conversor Analógico-digital Assíncrono, Tese, UFPA, Campina Grande.
- Torres, P. F., 2019. Desenvolvimento E Modelagem De Uma Nanorrede De Distribuição Em Corrente Contínua Em Baixa Tensão Com Sistemas De Geração Distribuída, Dissertação, UFPA, Belém.
- Sangswang, A.; Nwankpa, C. O., 2003. Noise Characteristics of DC-DC boost converters: an experimental validation study, Proceedings of the 2003 American Control Conference, pp. 2306-2310 vol.3, doi: 10.1109/AC.C..2003.1243418.
- Santos, I. N., Junior, A. J. P. R., 2005. Uma Proposta De Condicionador De Sinais Para Aquisição De Dados Em Um Instrumento De Medição Da Qualidade Da Energia Elétrica, UFU, Uberlândia.
- Suela, F. 2016. Medição de Ruídos Eletromagnéticos Irradiados em Sistemas de Geração Fotovoltaica, Dissertação de Mestrado, UFPA, Belo Horizonte.
- Texas Instruments, 2013. Datasheet: ADS1256 Very Low Noise, 24-Bit Analog-to-Digital Converter.
- VDA Empfehlung 320, 2014. Elektrische und elektronische Komponenten im Kraftfahrzeug 48V-Bordnetz.
- Vossos, V., Pantano, S., Heard, R., Brown, R. 2017. DC Appliances and DC Power Distribution A Bridge to the Future Net Zero Energy Homes.

MEASUREMENT AND INDEX OF POWER QUALITY IN MICROGRID DC DISTRIBUTION

Abstract. *Reliable measurement of electrical parameters is critical to the operation of any electric power system. Thus, when the production and use of electric power in direct current (dc) is approached, the applications in this field have gained importance nowadays with the expansion of photovoltaic systems and storage systems in batteries. Current technologies can perform this task, but there is still room for developing standards and more economical and adequate means to obtain indicators of power quality (PQ) in such systems. In this paper, some phenomena of power quality that may be present in grids operating in dc are discussed and measurement techniques for the acquisition of electrical signals in these grids. Given this, the requirements considered for developing a prototype of a digital meter capable of recording PQ indicators applied in a dc with a nominal voltage of 24 V, supplied by distributed photovoltaic generators and with energy stored in a battery. It is verified that many PQ phenomena in ac apply directly or analogously in dc grids. Thus, preliminary such events were identified in a dc, and we sought to develop a prototype meter to be deployed in such a nanogrid, capable of recording indicators related to steady-state and transient events such as ripple, long-term voltage variations and oscillatory transients.*

Key words: *DC Nanogrids, Power Quality, DC Measurement.*