

NANORREDES EM CORRENTE CONTÍNUA: PRINCIPAIS CONFIGURAÇÕES E UM CASO PRÁTICO APLICADO NA AMAZÔNIA

Victor Parente de Oliveira Alves¹

<https://orcid.org/0000-0002-5857-3923>

Arthur Correa da Fonseca²

<https://orcid.org/0000-0001-7235-0745>

Claudomiro Fábio de Oliveira Barbosa³

<https://orcid.org/0000-0001-6557-1048>

Wilson Negrão Macêdo⁴

<https://orcid.org/0000-0002-6097-8620>

Marcos André Barros Galhardo⁵

<http://orcid.org/0000-0001-6248-5187>

RESUMO

Este artigo busca apresentar um panorama geral acerca do emprego de redes de distribuição de energia elétrica em corrente contínua, especialmente de redes de pequeno porte, podendo ser classificadas como nanorredes e microrredes. Para isso, expõe-se uma revisão da literatura de forma resumida e discute-se a respeito das possíveis configurações destes tipos de redes sob diversos aspectos, tais como polaridade e estruturas, além de destacar importantes vantagens de sua utilização frente às redes em corrente alternada. Ademais, identifica-se a possibilidade de utilização de redes em corrente contínua para o suprimento de eletricidade em comunidades remotas na Amazônia, sendo dado destaque a apresentação de um caso prático de uma de nanorrede em corrente contínua experimental em escala real implementada na área de testes do Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas (GEDAE) da Universidade Federal do Pará (UFPA), que posteriormente foi aprimorada e replicada em campo para atendimento, atualmente, de oito residências e uma igreja às margens do Rio Piramanha, na Ilha das Onças, município de Barcarena, estado do Pará. Como resultados do presente artigo avalia-se a relevância das nanorredes como uma alternativa exequível e satisfatória para o suprimento energético de comunidades não atendidas pela rede elétrica convencional, tomando-se as experiências do estudo de caso real, bem como uma discussão sobre a aplicabilidade em outras comunidades remotas na Amazônia.

Palavras-chave

Nanorrede; Distribuição em corrente contínua; Comunidades remotas; Amazônia.

Submetido em: 09/01/2024 – Aprovado em: 26/01/2024 – Publicado em: 29/01/2024

1 Mestrando em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará (GEDAE), Pará, victor.oliveira.alves@itec.ufpa.br.

2 Doutorando em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará (GEDAE), Pará, arthur.fonseca@itec.ufpa.br.

3 Docente, Mestre em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará (GEDAE), Pará, cfob@ufpa.br.

4 Docente, Doutor em Energia, Universidade Federal do Pará (GEDAE), Pará, wnmacedo@ufpa.br.

5 Docente, Doutor em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará (GEDAE), Pará, galhardo@ufpa.br.



DIRECT CURRENT NANOGRID: MAIN CONFIGURATIONS AND A PRACTICAL CASE APPLIED IN THE AMAZON

ABSTRACT

This article aims to provide an overview of the use of direct current electrical distribution grids, especially small-scale ones classified as nanogrids and microgrids. It presents a brief literature review and discusses various aspects of these network types, such as polarity and structures. Additionally, it highlights significant advantages of employing DC grids over alternating current grids. Furthermore, the article explores the potential use of DC networks for electricity supply in remote communities in the Amazon. It emphasizes a practical case study of an experimental real-scale DC nanogrid implemented in the testing area of the *Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas* (GEDAE) at the *Universidade Federal do Pará* (UFPA). This nanogrid was later improved and replicated in the field to provide electricity to twelve residences and a church along the Piramanha River on Ilha das Onças, municipality of Barcarena, state of Pará. The article evaluates the relevance of nanogrids as a feasible and satisfactory alternative for supplying energy to communities without access to conventional electrical grids, drawing on the experiences of the real case study. It also discusses the applicability of this approach to other remote communities in the Amazon.

Keywords

Nanogrid; Direct current distribution; Remote communities; Amazon.

1 INTRODUÇÃO

A utilização de redes de distribuição em corrente contínua data do final do século XIX, período conhecido como “Guerra das Correntes”, quando um intenso embate envolvendo a distribuição de energia elétrica envolvia o inventor norte americano Thomas Edson, idealizador do sistema de geração, distribuição e cargas em corrente contínua e Nikola Tesla, inventor e engenheiro croata que contemplou o conceito de corrente alternada, em 1886 juntamente com a ideia do uso dos transformadores para elevação do nível de tensão elétrica. Devido às limitações tecnológicas da época, é possível considerar que naquele momento Tesla saiu vitorioso na disputa, todavia, a partir do ano de 1947, com a invenção do transistor e a avanços na eletrônica, os sistemas em corrente contínua voltaram a ser debatidos e estudados (WOUDSTRA et al., 2013).

Alguns fatores ainda foram e são primordiais para a difusão de sistemas em corrente contínua (c.c.) atualmente, como é o caso do aprimoramento da eletrônica de potência, com o incremento na eficiência de conversores eletrônicos de potência, tais como estágios c.c.-c.c., por exemplo. As redes em corrente contínua apresentam algumas vantagens em relação às redes em corrente alternada (c.a.), sendo uma das principais o fato da redução de perdas, podendo-se eliminar alguns estágios conversores de potência. Cita-se ainda que as redes em corrente contínua evitam a circulação de potência não ativa, implicando na simplificação do controle de tensão da rede. Ainda, as redes c.c. não requerem o mesmo nível de sincronização que as redes c.a., sendo mais propícias à integração de fontes renováveis.

O aprimoramento da eficiência fica ainda mais evidente nos casos em que o suprimento se dá em c.c. e as cargas também são supridas diretamente em corrente contínua, pois assim, elimina-se a utilização de inversores (conversores c.c.-c.a). Tem-se ainda a flexibilidade deste tipo rede para várias aplicações, além da possibilidade de se agregar dispositivos de geração e armazenamento em c.c. (como sistemas fotovoltaicos e banco de baterias, respectivamente) ao longo de sua extensão e reduzindo a complexidade no sincronismo dos elementos conectados à rede.

A Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC, 2017) caracteriza os sistemas em corrente contínua baseado no nível de tensão c.c. conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização dos níveis de tensão c.c.

Caracterização	Intervalo de tensão c.c.
Alta tensão	$> 1.500 \text{ V}$
Baixa tensão	$\leq 1.500 \text{ V}$
Extrabaixa tensão	$\leq 120 \text{ V}$

Fonte: Adaptado de IEC (2017).

Considerando os sistemas em extra-baixa tensão, segundo Modu et al. (2023), é comum distinguir as microrredes e nanorredes em função da potência de carga e/ou capacidade de geração, sendo designado nanorrede para os sistemas de menor potência. Todavia, cabe destacar que não há, ainda, um consenso na literatura sobre as faixas de potência em que cada uma está inserida. Para tanto, será considerado neste trabalho, o termo nanorrede para se referir às duas redes em corrente contínua apresentadas como caso prático, as quais são abordadas no presente artigo em tópicos posteriores.

Desse modo, as redes de extra-baixa tensão em corrente contínua mostram-se como alternativas tecnicamente viáveis para o atendimento energético (eletrificação) de famílias em locais remotos, como é o caso de muitas áreas da Amazônia. A Amazônia Legal é a região do Brasil com a maior concentração de pessoas sem acesso à eletricidade, chegando próximo de um milhão, segundo dados apresentados em IEMA (2021).

Assim, para o suprimento de eletricidade em comunidades remotas na Amazônia, torna-se importante selecionar em fase de projeto a melhor configuração para os sistemas de geração, armazenamento e distribuição de energia elétrica, levando em consideração aspectos técnicos como a área de implementação, quantidade de unidades consumidoras a serem supridas, dentre outros. Além disso, é imprescindível considerar as características modulares da utilização de redes de distribuição de eletricidade em corrente contínua, com a agregação de sistemas baseados em fontes renováveis, em especial a solar fotovoltaica, dado ao satisfatório potencial para aproveitamento do recurso solar no país.

Salienta-se que a eletrificação de comunidades não supridas pela rede elétrica convencional é de extrema importância para o incremento na qualidade de vida destas pessoas, visto que a energia elétrica traz diversos benefícios diretos e indiretos.

Sendo assim, baseado na relevância e nas vantagens para a utilização de nanorredes ou microrredes de distribuição em corrente contínua, com especial aplicação no suprimento de comunidades remotas na Amazônia, o presente artigo está estruturado da seguinte forma: primeiro é realizada uma revisão sobre redes em corrente contínua em extra-baixa e baixa tensão, bem como das características técnicas que as envolvem. Em seguida, apresentam-se as nanorredes implementadas pelo Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas da Universidade Federal do Pará (GEDAE/UFPA), passando para a aplicabilidade e escalabilidade deste tipo de sistema na Amazônia. Por fim, apresentam-se as conclusões do trabalho desenvolvido.

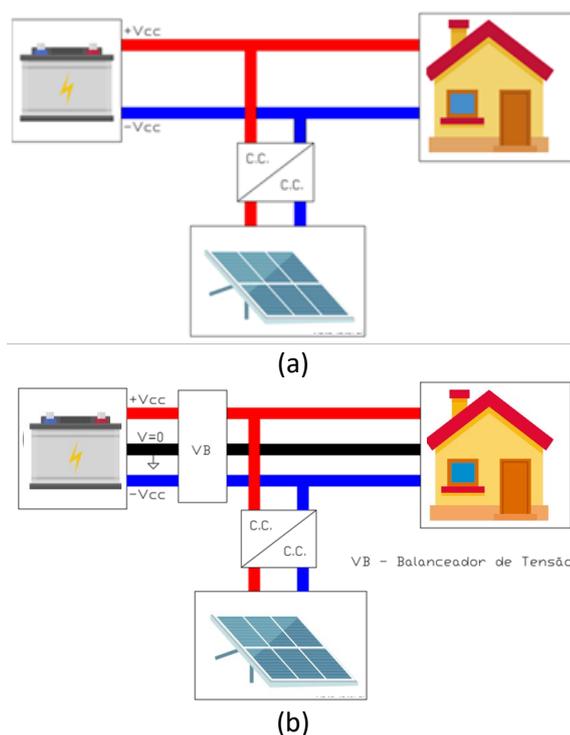
2 REVISÃO DE LITERATURA

A topologia de uma rede em corrente contínua é uma característica que deve ser cuidadosamente considerada, visto que impacta diretamente na flexibilidade, custo de implementação, controlabilidade, robustez, escalabilidade, resiliência, dentre outros (MODU et al., 2023). A característica em questão engloba vários aspectos, conforme apresentado a seguir, considerando possíveis configurações de nanorredes e microrredes operando em extra-baixa ou baixa tensão.

2.1 Polaridade

As duas configurações mais comuns em termos de polaridade são a unipolar e bipolar e fazem referência ao nível de tensão no barramento principal da rede. Na Figura 1 estão ilustradas as configurações de rede distribuição c.c. do tipo unipolar e bipolar.

Figura 1. Configurações de uma rede em corrente contínua em extra-baixa tensão (a) unipolar e (b) bipolar.



Fonte: Os autores.

Na configuração unipolar as cargas são conectadas diretamente nos polos positivo e negativo do barramento c.c. (apenas dois fios), sendo de menor complexidade e mais fácil implementação quando comparada às redes bipolares, todavia, também são mais suscetíveis a falhas por perda de uma linha.

Quando se trata de redes (em extrabaixa tensão e corrente contínua) bipolares, são sistemas elétricos compreendidos em três fios, sendo o polo positivo, o polo negativo e o polo neutro, $V_{c.c.} = 0$ V. Com este tipo de rede é possível obter uma maior flexibilidade em relação ao nível de tensão de operação, podendo ela operar em $+V_{cc}$, $-V_{cc}$ e $2 \times V_{cc}$. Nesta configuração a rede torna-se mais robusta em caso de falha em uma das linhas, uma vez que as outras duas podem continuar alimentando o sistema. Em contrapartida, Moussa et al. (2018) indica que devido à possibilidade de assimetria nas tensões positivas e negativas é necessário que haja um sistema de controle mais sofisticado entre os equipamentos condicionadores de potência presentes na rede, fazendo com que a complexidade e custo de implementação aumentem.

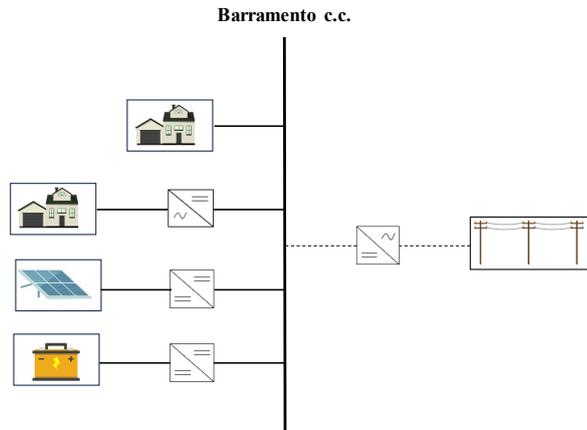
2.2 Estrutura

A estrutura de uma rede em corrente contínua está associada à forma de conexão entre o barramento c.c. principal, às cargas do sistema e, eventualmente, a uma rede em corrente alternada. É possível encontrar na literatura diversas configurações no que diz respeito à estrutura, sendo as principais delas destacadas a seguir.

2.2.1 Estrutura Radial

Nesta configuração, a potência é transmitida às cargas em um único caminho, por meio do barramento c.c. principal. Nesse caso, há um ponto comum de conexão entre as cargas, sistemas de geração de energia e sistemas de armazenamento, sendo preferencialmente implementada em instalações residenciais dado que, salvo exceções, todas as cargas operam em extrabaixa tensão ou em baixa tensão (MODU et al., 2023; KUMAR et al., 2017). Na Figura 2 ilustra-se um esquema geral deste tipo de estrutura para uma rede em corrente contínua.

Figura 2. Estrutura radial para uma rede em corrente contínua.



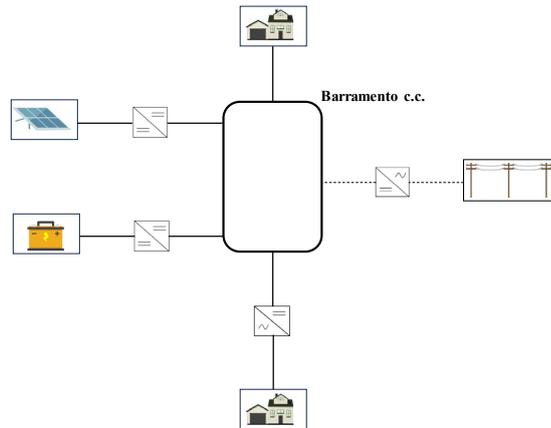
Fonte: Os autores

Devido à simplicidade de implementação da estrutura radial e menores custos envolvidos, este é o tipo mais comum em sistemas de distribuição. Além disso, é possível que em diversos casos as cargas e fontes (geradores e/ou armazenadores de energia) sejam instaladas próximas, diminuindo, assim, perdas na transmissão. Todavia, um sistema com estrutura radial possui confiabilidade menor quando comparado a outras configurações possíveis. Isso acontece uma vez que a perda de parte da rede pode implicar em interrupções no suprimento das cargas conectadas ao barramento c.c. principal, ou ainda, em caso de problemas no barramento c.c. principal, pode ocorrer a interrupção geral do sistema (KUMAR et al., 2017; MENG et al., 2017; PRABHALA et al., 2018; RAZMI e LU 2022).

2.2.2 Estrutura Anel

A estrutura em anel, ilustrada na Figura 3, permite que o fluxo de potência ocorra em dois caminhos, sendo, portanto, mais flexível em uma situação de eventual falta no sistema quando comparada a uma rede com estrutura radial. Nesta estrutura, é possível que o anel seja dividido por meio de chaves comutadoras isolando um trecho defeituoso para que ele não venha a influenciar a operação da parcela que não está sobre condição de falta (PRABHALA et al., 2018).

Figura 3. Estrutura anel para uma rede em corrente contínua.



Fonte: Os autores.

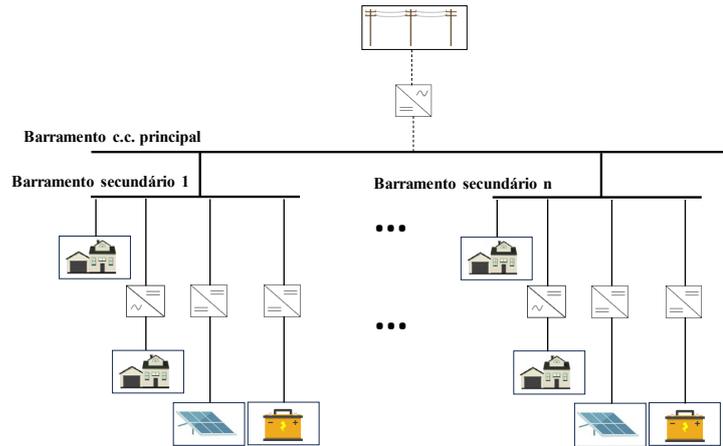
A implementação desse modelo é mais complexa e requer um investimento financeiro maior do que a estrutura radial, sendo mais recomendada para redes urbanas e industriais. Além disso, devido à maior robustez em casos de falha, há métodos de proteção específicos desenvolvidos para esse tipo de rede, como os apresentados em Mohanty e Pradhan (2019) e Zhang et al. (2019).

2.2.3 Outras Possíveis Estruturas

Há ainda na literatura outras possíveis configurações de redes em corrente contínua no que diz respeito à sua estrutura. Estas são derivadas das estruturas radial e em anel, sendo apresentadas a seguir as que se destacam.

A estrutura de múltiplos barramentos (Figura 4) pode ser caracterizada como uma expansão da estrutura radial convencional, sendo cada conjunto formado pelos componentes que estão conectados aos barramentos c.c. secundários, havendo o intercâmbio de energia entre esses barramentos secundários que por sua vez estão conectados ao barramento c.c. principal da rede. Além disso, Modu et al. (2023) e Leng et al. (2022) destacam que na configuração de múltiplos barramentos é possível isolar um barramento que eventualmente esteja em condição de falta e possa vir a afetar os demais barramentos da rede, até que o mesmo volte a operar normalmente.

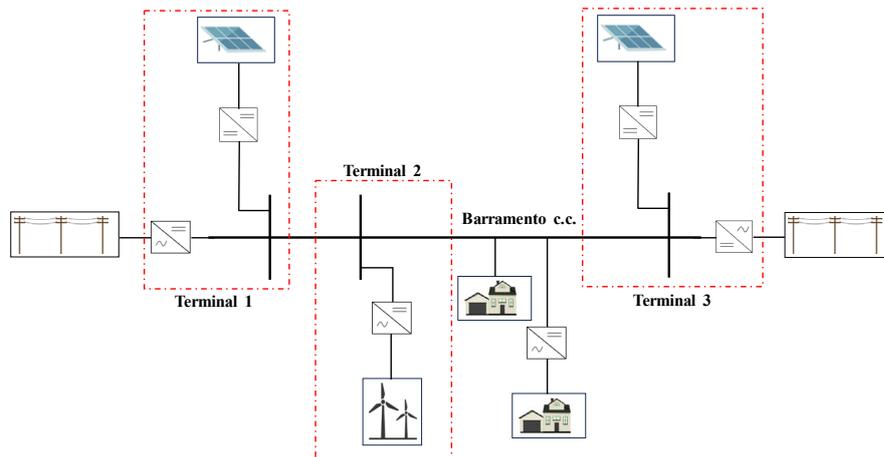
Figura 4. Estrutura com múltiplos barramentos para uma rede em corrente contínua.



Fonte: Os autores.

A estrutura de múltiplos terminais (Figura 5) foi concebida inicialmente para operações de sistemas em corrente contínua em alta tensão, tendo a interface realizada por meio de conversores c.a.-c.c. de duas ou mais redes em corrente alternada e/ou geradores c.a.. Esta configuração apresenta certa flexibilidade, visto que o sistema busca alcançar o equilíbrio no compartilhamento de energia entre as unidades do sistema. Para isso, conversores são empregados para equilibrar automaticamente a incompatibilidade de potência entre os terminais (MODU et al., 2023; XU et al., 2008).

Figura 5. Estrutura com múltiplos terminais para uma rede em corrente contínua.

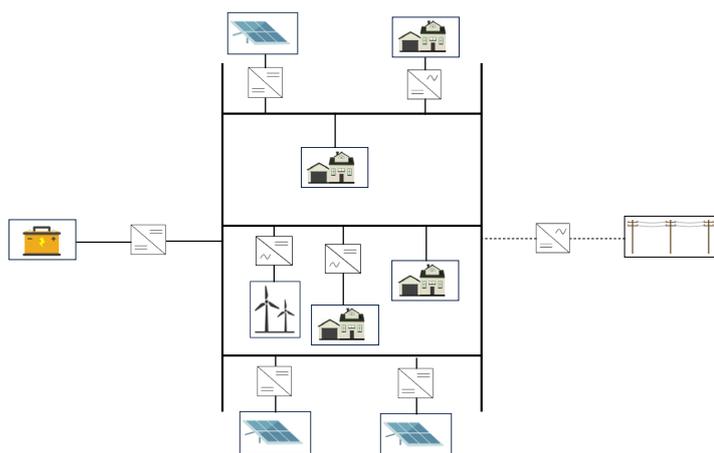


Fonte: Os autores.

Outras duas possíveis configurações, consideradas como expansões da estrutura radial são: estrutura em escada (Figura 6) e estrutura zonal (Figura 7). A primeira acrescenta robustez e confiabilidade ao sistema, mas atrelado a isso está o maior custo de implementação visto que mais de um anel forma o conjunto. Sendo assim, um anel pode fornecer ou solicitar energia dos demais anéis presentes no sistema. A rede nesta configuração permite, ainda, o fluxo de potência por mais de um caminho e melhor gerenciamento de falhas, pois é possível isolar, em caso de mal funcionamento de um dos anéis, apenas este ramo do circuito, não comprometendo o restante do sistema (MODU et al., 2023; PRABHALA et al., 2018).

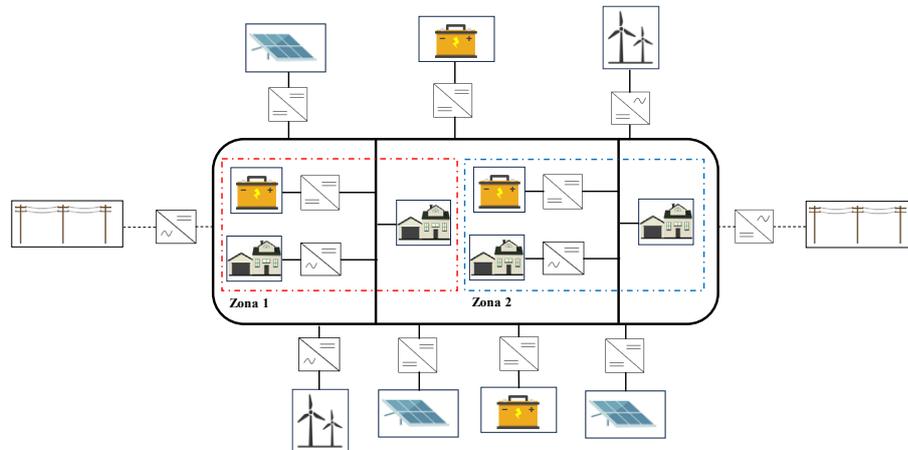
A estrutura zonal, conforme destaca Kumar et al. (2017), pode ser classificada como um conjunto de nanorredes ou microrredes c.c. conectados em cascata em configuração simétrica onde o sistema é dividido em zonas e cada zona está ligada a dois barramentos c.c. redundantes. Nesta configuração, há maior disponibilidade energética às cargas, visto que estas podem ser atendidas de três formas distintas, sendo: múltiplos barramentos c.c. simultaneamente, sequencialmente ou exclusivamente por um barramento c.c.

Figura 6. Estrutura em escada para uma rede em corrente contínua.



Fonte: Os autores.

Figura 7. Estrutura zonal para uma rede em corrente contínua.



Fonte: Os autores.

3 CASO PRÁTICOS: NANORREDES C.C. IMPLEMENTADAS

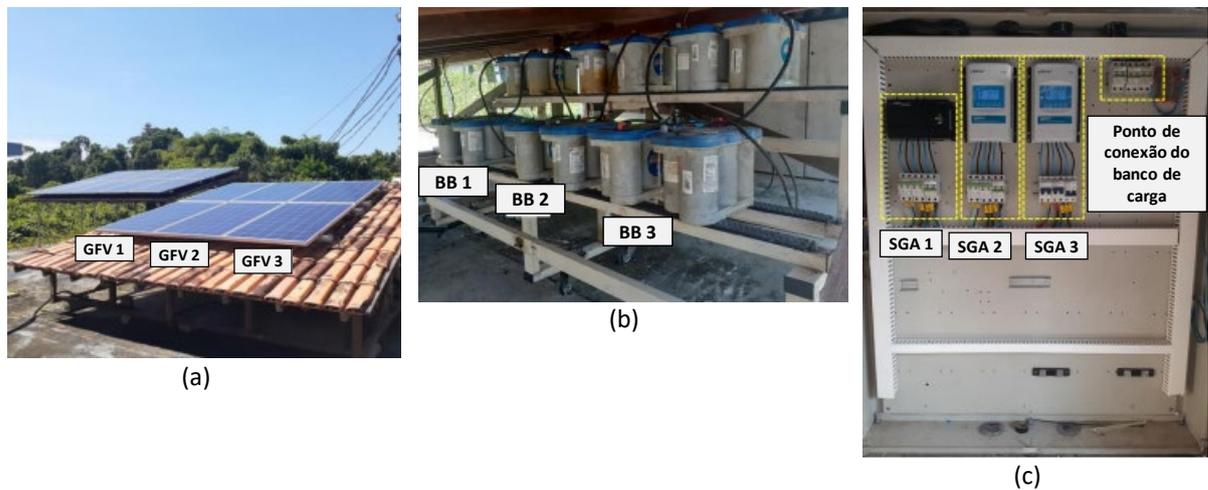
Esta seção é destinada a apresentar as nanorredes de distribuição em corrente contínua (NDCC) idealizadas e implantadas pelo Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas da Universidade Federal do Pará (GEDAE/UFPA), bem como abordar seus aspectos técnicos.

3.1 Nanorrede c.c. experimental do GEDAE

A edificação do GEDAE está localizada na cidade universitária Prof. José Silveira Neto – UFPA, na cidade de Belém, estado do Pará e conta com uma área total (interna e externa para testes) de 10.000 m². Na área externa de testes do Grupo foi implementada uma NDCC para fins de estudo e ensaios operacionais. A referida NDCC é composta por três sistemas de geração e armazenamento (SGA), os quais englobam, cada um, gerador fotovoltaico (GFV) com potência nominal de 490 Wp proveniente da associação em série de dois módulos fotovoltaicos de mesmo modelo; armazenamento por meio de banco de baterias (BB), formado por quatro baterias (mesmo modelo) seladas de chumbo ácido e tensão nominal de 12 V associadas em série-paralelo, sendo dois conjuntos de duas baterias em série conectadas em paralelo, totalizando 210 Ah e 24 V por banco. Por fim, para realizar a interface entre os sistemas, empregam-se conversores c.c.-c.c. (controladores de cargas) com corrente máxima de saída de 20 A.

Na Figura 8 são apresentadas fotografias dos componentes dos SGA empregados na NDCC implementada no GEDAE.

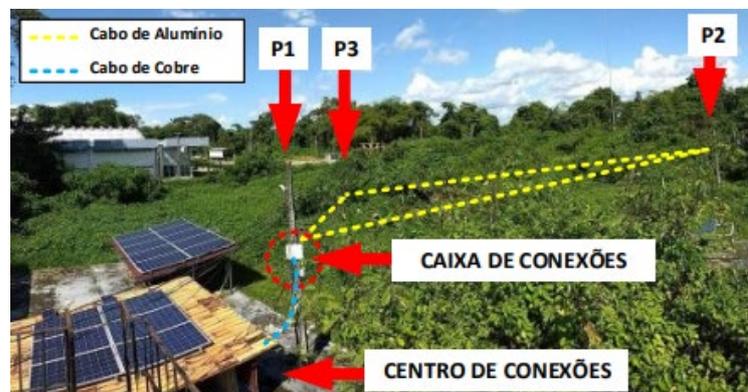
Figura 8. Sistemas de geração fotovoltaica (a), armazenamento (b) e condicionamento de potência (c) da NDCC presente na área de testes do GEDAE.



Fonte: Adaptado de Fonseca et al. (2022).

A rede de distribuição contém 69 metros de comprimento de cabos multiplexados manufaturados em alumínio, sendo as cargas e SGA conectados em diferentes pontos da NDCC formada. Vê-se na Figura 9 a estrutura física da rede de distribuição presente na área de testes do GEDAE, com a indicação dos postes de sustentação (P1, P2 e P3).

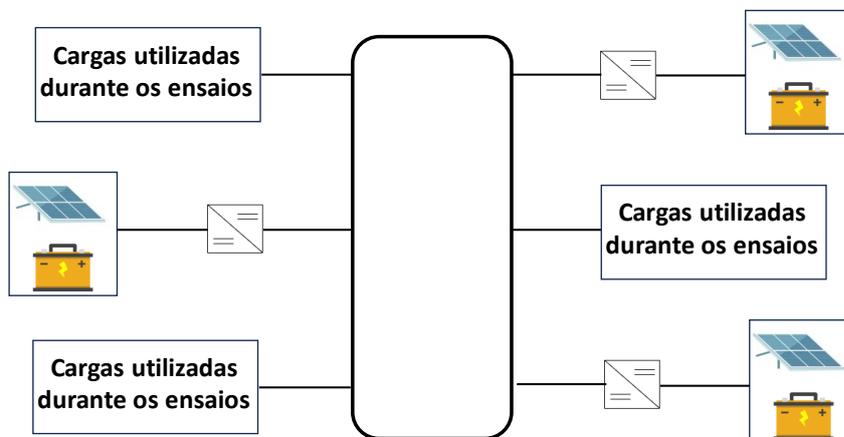
Figura 9. Estrutura física da rede de distribuição.



Fonte: Torres (2019).

A NDCC implementada possui tensão nominal de $24 V_{c.c.}$ e com base nas topologias apresentadas na seção 2 do presente artigo, a NDCC pode ser classificada como unipolar com estrutura em anel isolado, ou seja, não há conexão com uma rede em corrente alternada convencional. No centro de conexões (Figura 9) há pontos destinados para a conexão de diferentes tipos de carga, sendo estas selecionadas conforme o ensaio a ser desenvolvido. Na Figura 10 mostra-se um diagrama da estrutura radial da NDCC discutida, com possibilidade de conexão de cargas e SGA em diferentes pontos da rede.

Figura 10. Diagrama da estrutura radial da NDCC implementada na área de testes do GEDAE.



Fonte: Os autores.

A infraestrutura de NDCC anteriormente apresentada serviu, e ainda serve, para realização de pesquisas científicas considerando ensaios operacionais voltados à eficiência e qualidade de energia com o uso de diferentes componentes, como tipos de cargas conectadas, assim também para a formação de recursos humanos na área de redes elétricas em corrente contínua.

Alguns dos trabalhos produzidos pelo corpo técnico do GEDAE/UFPA e que envolvem a NDCC em questão são Torres et al. (2018), Torres (2019), Fonseca et al. (2022) e Machado et al. (2023).

Os resultados alcançados pelos trabalhos supracitados, bem como outros de cunho teórico e/ou práticos, utilizando a NDCC instalada na área de testes do GEDAE evidenciam a viabilidade de aplicação deste tipo de rede para o atendimento real de pessoas sem acesso à eletricidade. Dada sua concepção modular, foi possível replicá-la em campo para o suprimento energético de uma comunidade ribeirinha na Amazônia, aplicando algumas das configurações implementadas e testadas.

3.2 Nanorrede c.c. na Ilha das Onças

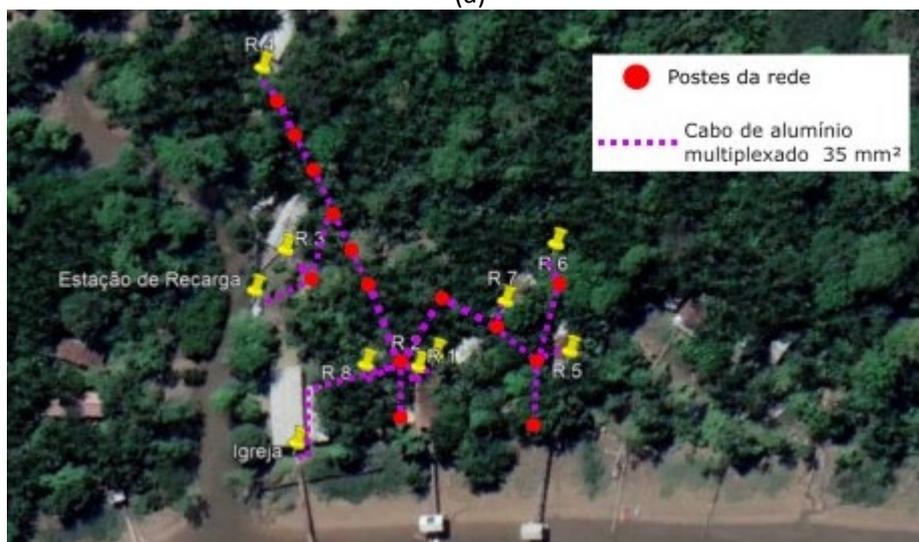
A Ilha das Onças está localizada no município de Barcarena, no estado do Pará. O acesso à localidade é realizado por meio fluvial no intervalo aproximado de uma hora, percorrendo cerca de 10 km até a comunidade às margens do Rio Piramanha, tendo a cidade de Belém como ponto de partida. Antes da implantação da NDCC a eletricidade na comunidade era proveniente de grupo gerador à diesel com o suprimento individual em algumas residências e com pouco tempo de operação diário. A implementação da referida NDCC se deu por meio de um projeto de pesquisa executado pelo GEDAE/UFPA e iniciado em 2017.

Em sua concepção inicial, a NDCC contemplava apenas quatro residências (R.1 a R.4, indicadas na Figura 11) e uma estação de recarga para uma embarcação elétrica, também desenvolvida pelos pesquisadores do GEDAE. Após expansões, na atual etapa a nanorrede está atendendo, além da estação de recarga, oito residências e uma igreja. Na Figura 11 tem-se uma vista de satélite com a demarcação da NDCC instalada na Ilha das Onças, às margens do rio Piramanha.

Figura 11. NDCC na Ilha das Onças (a) residências que foram atendidas durante a concepção inicial do projeto e (b) atual configuração.



(a)



(b)

Fonte: Google Earth.

Assim como a NDCC localizada nas dependências do GEDAE, esta possui tensão nominal de 24 V_{c.c.}, sendo classificada ainda como unipolar e isolada, porém, com estrutura radial. O dado nível de tensão foi adotado considerando alguns aspectos principais, sendo: segurança; disponibilidade no mercado de equipamentos que operam em 24 V_{c.c.}, como refrigeradores (geladeiras), *freezer* e bomba d'água; bem como compatibilidade do nível de tensão de entrada dos inversores presentes nas residências, visto que estas possuem cargas c.c. e c.a. O comprimento atual da rede é de aproximadamente 330 metros e a distribuição de energia é feita por meio de cabos multiplexados de alumínio com seção transversal de 35 mm². Todos os sistemas de geração e armazenamento contribuem energeticamente para injeção de potência elétrica na rede, ocasionando o intercâmbio de energia entre cada um.

Destaca-se que a NDCC, para além do atendimento energético da comunidade onde está implementada, serve também para a realização de estudos e pesquisas envolvendo diversos assuntos, como desenvolvimento socioeconômico, tecnologias de armazenamento de energia e qualidade da energia, por exemplo. Além disso na NDCC há a contínua aquisição de dados de parâmetros elétricos dos sistemas que acessam à rede, sendo possível o acompanhamento operacional da NDCC para a averiguação do seu comportamento e também avaliações acerca de possíveis maneiras para o aprimoramento do conjunto como um todo.

Na Figura 12 apresenta-se alguns registros fotográficos reunidos de parte dos SGA presentes na NDCC implementada na Ilha das Onças.

Figura 12. Registros fotográficos da NDCC implementada na Ilha das Onças.



Fonte: Os autores.

Verifica-se que A NDCC na Ilha das Onças impactou positivamente a vida das pessoas beneficiadas com o projeto. Um exemplo é o fato de que antes os moradores necessitavam adquirir gelo constantemente para o armazenamento de alimentos ou então para gelar a água para consumo, já atualmente, há refrigeradores em corrente contínua sendo supridos pela rede. Com a possibilidade de refrigeração, algumas famílias iniciaram atividades econômicas com a venda de sorvete e outras sobremesas geladas.

Considerando-se alguns aspectos ambientais, o efeito trazido pela NDCC foi a redução considerável no uso de combustíveis fósseis em função da diminuição do uso dos grupos geradores à diesel, reduzindo a poluição do ar e sonora no local.

Outrossim, com os geradores à diesel deixando de operar, os moradores relataram o reaparecimento de animais silvestres nas redondezas da comunidade, especialmente pássaros.

4 DISCUSSÃO

Os benefícios trazidos pela implementação da NDCC às margens do rio Piramanha atrai outros moradores da vizinhança que já manifestaram interesse em se integrarem à rede. Identifica-se que na Ilha das Onças há diversas comunidades que poderiam ser atendidas por meio de nanoredes em corrente contínua com configuração similar à que já está em operação. Além disso, outras localidades amazônicas que possuem características semelhantes também poderiam ser beneficiadas com projetos deste tipo.

Seguindo nos termos de replicabilidade das NDCC, pode-se citar, ainda, como possível região de implementação, a comunidade às margens do rio Urubuéua (Figura 13), no município de Abaetetuba, estado do Pará. A localidade é apresentada em Martins et al. (2023) e verifica-se a possibilidade de implementação de uma NDCC em anel para atendimento das edificações (residências e oficina mecânica) apresentadas no trabalho desenvolvido. Ou ainda, uma NDCC com estrutura radial para integrar mais facilmente outras residências ao sistema posteriormente.

Figura 13. Edificações apresentadas no trabalho mencionado.



Fonte: Martins et al. (2023).

Conforme levantamento realizado pela equipe do GEDAE, na comunidade Mocambo do Guajará (Figura 14), situada no município de Anajás, estado do Pará, há uma rede de distribuição c.a. formada por um grupo gerador à diesel para o suprimento de 75 famílias. Todavia, o fornecimento de energia para os moradores é limitado a aproximadamente quatro horas por dia devido a questões econômicas (aquisição do diesel) e técnicas.

Neste caso, seria possível aproveitar grande parte da infraestrutura física já existente para realizar a transição a uma microrrede em corrente contínua baseada na geração solar fotovoltaica e armazenamento de energia por baterias, a fim de atender as famílias que moram no local, aproveitando a característica modular deste tipo de rede. No cenário em questão, outras configurações precisariam ser adotadas, como por exemplo um nível de tensão mais elevado, dado o comprimento da rede (cerca de 800 metros); e na adequação de algumas das cargas a serem supridas.

Figura 14. Vista por satélite da comunidade Mocambo do Guajará.



Fonte: Google Earth.

Os exemplos citados nesta seção dão uma noção de que é possível replicar e escalar projetos como a NDCC implementada pelo GEDAE e na Ilha das Onças. É preciso haver uma visão mais ampla do poder público, em virtude de um número ainda elevado de pessoas vivendo sem acesso à energia elétrica. Neste aspecto, é interessante que a comunidade acadêmica continue e amplie as pesquisas na área, para que essas pessoas que vivem em comunidades remotas desabastecidas ou precariamente supridas, tenham uma ponte de acesso à informação e às tecnologias, experimentando alternativas exequíveis e satisfatórias que impactam positivamente na qualidade de vida, na eficiência energética e no meio ambiente.

5 CONCLUSÃO

Nanorredes em corrente contínua apresentam algumas vantagens técnicas em relação às nanorredes em corrente alternada, especialmente se em conjunto estiverem cargas nativamente em corrente contínua. Além disso, devido à capacidade de implementação em diversas configurações, bem como a expansão conforme a demanda e recursos, é possível a aplicabilidade de estruturas deste tipo em outras áreas da Amazônia Legal levando em consideração os aspectos particulares de cada localidade.

Outros fatores importantes abordados neste artigo foram os aspectos sociais e ambientais que estão ligados a este tipo de sistema, especialmente o aumento na qualidade de vida. Com a redução na compra dos combustíveis para o uso em grupos geradores à diesel, há um impacto positivo no que diz respeito à redução da poluição sonora e eliminação de gases poluentes e gases de efeito estufa; tal como há uma economia monetária para a família beneficiária, criando a perspectiva de aplicação deste recurso em outro fim.

Verifica-se ainda a necessidade de avanço nos estudos, divulgações e publicações científicas na área de nanorredes e microrredes em corrente contínua, voltados para atendimento de comunidades remotas, visto que este tipo de sistema pode proporcionar diversos benefícios após sua implementação. Neste aspecto, o GEDAE/UFPA segue desenvolvendo pesquisas sobre o tema, a fim de contribuir não somente com a academia, mas com a sociedade em geral.

REFERÊNCIAS

- FONSECA, A. C. et al. Qualidade de Energia em uma nanorrede de distribuição em corrente contínua. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR*, 9., 2022, Florianópolis.
- IEC. LVDC: electricity for the 21st century. International Electrotechnical Commission, 2017.
- IEMA. **Amazônia Legal: quem está sem energia elétrica**. 2021. Disponível em: <https://energiaeambiente.org.br/produto/amazonia-legal-quem-esta-sem-energia-eletrica>.
- KUMAR, D. et al. DC Microgrid Technology: System Architectures, AC Grid Interfaces, Grounding Schemes, Power Quality, Communication Networks, Applications and Standardizations Aspects. **IEEE Access**, v. 5, p. 12230-12256. 2017.
- LENG, M., et al. Impedance-Based Stability Evaluation for Multibus DC Microgrid Without Constraints on Subsystems. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 37, p. 932-943. 2022.
- MACHADO, J. P. A. et al. Simulation and Operational Evaluation of Distributed Storage Devices Connected to a Direct Current Distribution Nanogrid. *In: IEEE LATIN AMERICAN ELECTRON DEVICES CONFERENCE*, 2023, Puebla.
- MARTINS, D. et al. Estudo de sistema de eletrificação baseado na geração solar fotovoltaica para atendimento de edificações ribeirinhas. **Concilium**, v. 23, p. 797-821. 2023.
- MENG, J. et al. Design and implementation of hardware-in-the-loop simulation system for testing control and operation of DC microgrid with multipledistributed generation units. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 11, p. 3065-3072. 2017.
- MODU, B., et al. DC-based microgrid: Topologies, control schemes, and implementations. **Alexandria Engineering Journal**, v. 70, p. 61-92. 2023.
- MOHANTY, R., PRADHAN, K. DC Ring Bus Microgrid Protection Using the Oscillation Frequency and Transient Power. **IEEE System Journal**, v. 13, p. 875-884. 2019.
- MOHANTY, R., PRADHAN, K. DC Ring Bus Microgrid Protection Using the Oscillation Frequency and Transient Power. **IEEE System Journal**, v. 13, p. 875-884. 2019.
- MOUSSA, S. et al. DC voltage level choice in residential remote área. *In: INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY CONGRESS (IREC)*, 9., 2018, Hammamet.
- PRABHALA, V. A. et al. An Overview of Direct Current Distribution System Architectures & Benefits. **Energies**, v. 11. 2018.
- RAZMI, D., LU, T. A Literature Review of the Control Challenges of Distributed Energy Resources Based on Microgrids (MGs): Past, Present and Future. **Energies**, v. 15. 2022.
- TORRES, P. F. Desenvolvimento e modelagem de uma nanorrede de distribuição em corrente contínua em baixa tensão com sistemas de geração distribuída. Dissertação de Mestrado. Mestrado em Engenharia Elétrica. UFPA, Belém, Pará: 2019.

- TORRES, P. F. et al. Load flow simulation of a low-voltage PV-battery based dc microgrid to supply small isolated communities. *In: EUROPEAN PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CONFERENCE AND EXHIBITION*, 35., 2018, Brussels.
- WOULDSTRA, JB. et al. An Introduction to Direct Current Distribution Grids. *In: INDUSTRIAL AND COMMERCIAL USE OF ENERGY (ICUE)*, 10., 2013, Cape Town.
- ZHANG, Z., et al. A Protection System for Improved Ring-Bus DC Microgrids. *Energies*, v. 12. 2019.