



**XXIV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GET/30

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO -XIV

**GRUPO DE ESTUDO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E GESTÃO
DA TECNOLOGIA, DA INOVAÇÃO E DA EDUCAÇÃO - GET**

REVISITANDO EDISON - NANOGIDS DC RESIDENCIAIS

**Alexandre Pinhel Soares(*)
FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A.**

RESUMO

A demonstração do primeiro transistor, em 23 de dezembro de 1948, inaugurou a Era dos Semicondutores e permitiu o aparecimento de equipamentos que hoje permeiam toda atividade humana como computadores, sistemas de áudio e vídeo, telecomunicações e iluminação, por exemplo.

Por mais distintas que sejam suas finalidades, todos esses equipamentos possuem uma característica em comum: necessitam de corrente contínua (*Direct Current* – DC) para funcionarem. Como a energia elétrica é fornecida em corrente alternada, circuitos conversores são sempre necessários.

Por sua vez os sistemas fotovoltaicos permitem a produção de corrente contínua na casa do usuário sugerindo a existência de alternativas disruptivas na infraestrutura elétrica residencial. Mas a falta de formas economicamente viáveis de armazenar essa energia sempre comprometeram esse salto.

A bateria estacionária lítio-íon frequentemente tem sido citada como forte candidata a preencher essa lacuna e, de fato, já há diversos fornecedores com foco nesse mercado. Porém devido à alta densidade de energia característica dessas tecnologias os aspectos de segurança são críticos, impactando o custo e aumentando o desafio para adoção em massa para uso residencial.

Esse contexto fez surgir baterias alternativas que, caso venham a obter aceitação do mercado, viabilizarão em grande escala um dos projetos mais ambiciosos e radicais de Thomas Edison: a residência autossuficiente em energia elétrica ou, em terminologia moderna, os *nanogrids* DC residenciais.

Diante da enormidade do consumo global de eletricidade, o armazenamento de energia elétrica em grande escala ainda é um mero desejo aguardando um milagre. Apesar disso, avanços em baterias e em sistemas de corrente contínua em baixa tensão poderão causar efeito importante no ritmo de popularização da geração de energia elétrica em residências, em alinhamento com o viés da Sustentabilidade.

Esse trabalho conjugará todos esses aspectos na tentativa de mostrar quão próximo de um grande avanço as residências de todos nós podem estar.

PALAVRAS-CHAVE

Geração Distribuída, *nanogrids*, corrente contínua, armazenamento de energia, energia solar.

(*) Rua Real Grandeza 219, Bloco E, Sala 109 – Botafogo – Rio de Janeiro – 22281-900
Tel: (+55 21) 2528-4049 – Fax: (+55 21) 2528-5656 – Email: pinhel@ieee.org

1. INTRODUÇÃO

A energia elétrica tipicamente é gerada em corrente alternada (*Alternating Current* – AC) longe da carga consumidora e é transmitida e distribuída a partir de redes de fios elétricos. Esse modelo é intensivo em capital e apresenta muitas perdas (mecânicas, térmicas e elétricas) nas formas como a energia é convertida e transmitida. Mas devido a contínuas inovações incrementais essa forma de entregar energia ao usuário tem constantemente evoluído em qualidade e consegue cumprir bem o seu papel apesar da Matriz Elétrica Global não estar alinhada às demandas ambientais por se basear em combustíveis fósseis.

Esse cenário deverá perdurar por décadas (1) uma vez que não há tecnologias de armazenamento com capacidade de atuar na escala necessária para compensar os efeitos da intermitência de produção das fontes eólica e solar tornando-as firmes. Sem isso não há como estabelecer um programa realista de redução das fontes fósseis, portanto até que apareçam formas de armazenamento mais efetivas em grande escala, qualquer iniciativa que procure amenizar um pouco essa dura realidade é bem vinda.

Esse é o caso da Geração Distribuída, i.e., da geração de energia elétrica junto à carga consumidora, especialmente se contemplar alguma forma de armazenamento local, como pode ser o caso do *nanogrid*. Nesse arranjo um sistema de captura e conversão de energia, normalmente fotovoltaico, alimenta um espaço bem pequeno e delimitado, tipicamente uma residência, sendo o excedente armazenado em baterias para uso posterior. As pequenas dimensões de uma instalação como essa pode tornar viável a autossuficiência elétrica.

Considerando que praticamente toda a carga AC residencial pode ser substituída por equivalentes em corrente contínua (*Direct Current* – DC) e que tanto a fonte local de eletricidade (painéis fotovoltaicos) quanto o sistema de armazenamento (baterias) também operam em DC, essa se mostra a melhor opção técnica, pois evita as perdas devidas às conversões AC-DC.

Esse contexto sugere o aparecimento e avanço de um setor econômico novo (2) que contemplará o projeto, instalação e manutenção de pequenas redes elétricas residenciais, eventualmente autossuficientes e operando em corrente contínua: os *Nanogrids* DC Residenciais. Esse cenário já tem sido percebido pelo Mercado conforme pesquisa da empresa de consultoria *Navigant Research* que estima que a receita anual dessas redes alcance US\$25B em 2024 (3).

2. DC VS. AC

A provisão de infraestrutura para o fornecimento de eletricidade é usualmente denominada por “Eletrificação”. Ela teve início em Nova York com a estação de distribuição *Pearl Street*, inaugurada em quatro de setembro de 1882, pela *Edison Electric Illuminating Company*, uma das empresas seminais de Thomas Edison. Esse empreendimento pioneiro tinha por objetivo a popularização da lâmpada com filamento com alta resistência elétrica, inventada por Edison em 1878. No início de sua operação comercial *Pearl Street* alimentava, em DC, 400 lâmpadas incandescentes de 82 usuários. Expandiu-se rapidamente e, em 1884, já atendia mais de 500 usuários com carga total superior a 10 mil lâmpadas, sugerindo que o fornecimento de eletricidade seria um negócio promissor.

Também atento ao potencial do mercado de eletricidade George Westinghouse investigava possibilidades que contornassem as restrições impostas por Edison. Encontrou um caminho ao adquirir controle sobre o transformador de Lucien Gaulard e John Gibbs, conhecido à época como gerador secundário. Convencido da viabilidade técnica da abordagem AC fundou a *Westinghouse Electric Company* e, em 1896 inaugurou, com projeto de William Stanley, a primeira linha de corrente alternada na cidade de Buffalo, nos EUA.

Nesse mesmo ano Edison já contava com mais de 50 instalações em vários países e parecia que se tornaria o controlador de um novo monopólio, especialmente devido ao rigoroso controle que mantinha sobre as suas patentes. Mas diante da percepção de que tinha rival, Edison deflagrou uma série de ações agressivas de mídia contra Westinghouse. Esses episódios são conhecidos como a “Guerra das Correntes”, disputa industrial e técnica entre os paradigmas DC e AC.

Westinghouse se saiu vitorioso por poder contar com o transformador, equipamento básico para o transporte de energia elétrica a grandes distâncias. Em 1891 reforçou ainda mais a sua posição ao adquirir o controle das patentes do motor de indução e do sistema de transmissão de Nikola Tesla. Edison por sua vez se afastou da Eletrificação ao ser preterido por J. P. Morgan quando este criou a *General Electric* (GE) em 1892.

Em 1893 a *Westinghouse Electric* e a GE uniram esforços para a construção da usina Niagara Falls. Esta foi inaugurada em 1895 e é o marco zero do *grid* AC norte-americano em detrimento da abordagem DC de Edison. Um resumo desses eventos pode ser visto na tabela 1. Maiores detalhes podem ser encontrados em (4) e (5).

O começo do século XX viu o Setor Elétrico se configurar em torno de grandes empresas e monopólios naturais, o que permitiu o início da pesquisa industrial aplicada e o rápido avanço técnico demandado pela enormidade da tarefa de fornecer energia elétrica a todos.

Tabela 1 – Eventos mais relevantes do início da Eletrificação

ANO	EVENTO	TIPO
1878	Edison inventa a lâmpada com filamento com alta resistência elétrica	DC
1880	Criação da Edison <i>Electric Illuminating Company</i>	DC
1882	Inauguração da estação de distribuição <i>Pearl Street</i>	DC
1881	Gaulard e Gibbs criam o gerador secundário	AC
1882	Tesla cria o motor de indução	AC
1884	Westinghouse contrata William Stanley	AC
1885	Westinghouse adquire as patentes de Gaulard e Gibbs e produz transformador	AC
1886	Westinghouse funda <i>Westinghouse Electric Company</i>	AC
1886	Westinghouse inaugura linha AC comercial em Buffalo	AC
1891	Westinghouse adquire as patentes de Tesla	AC
1892	Morgan funda GE e Edison se afasta da Eletrificação	AC
1893	Westinghouse ganha contrato da usina <i>Niagara Falls</i>	AC
1895	Usina <i>Niagara Falls</i> entra em operação	AC

Aparentemente não satisfeito com o rumo da eletricidade Edison gastou sete anos de pesquisa e mais de 50 mil experimentos para, em 1912, retornar à cena elétrica com uma proposta visionária: a “Residência do Século XX” (6). A casa possuía um gerador a gasolina para carregar um banco de baterias níquel-ferro (NiFe) que alimentava todo tipo de eletrodomésticos, desde cafeteiras até máquinas de lavar roupa. Em um segundo momento as baterias seriam carregadas por geradores eólicos ao invés de motores à combustão. Esse empreendimento mostrava-se como uma tentativa de desenvolver residências autossuficientes em eletricidade como alternativa à Eletrificação que estava em rápido avanço pelos monopólios que o próprio Edison ajudara a criar.

O projeto era apoiado por Henry Ford que se comprometeu a financiar as baterias, desde que estas pudessem ser utilizadas também em carros elétricos, o que acabou não ocorrendo por questões de desempenho. Assim o motor à combustão predominou sobre o elétrico, a bateria de níquel-ferro de Edison não pôde ser produzida em uma escala que viabilizasse a residência autossuficiente e a abordagem DC acabou sendo novamente esquecida.

Décadas se passaram até o advento do semicondutor e, com ele, todo tipo de equipamento demandando corrente contínua: computador, áudio, vídeo, telecomunicações, iluminação, controladores eletrônicos de motores. Mais do que nunca fez sentido alimentar residências com corrente contínua. A conversão fotovoltaica reforçou esse cenário ao proporcionar fonte local de energia. No início do século XXI só faltava uma forma viável de armazenamento.

Para preencher essa lacuna, o Mercado tem apostado fortemente nas rotas tecnológicas baseadas em baterias lítio-íon. Porém a busca por produtos com alta densidade de energia tem tornado os aspectos de segurança muito críticos, impactando o custo e dificultando a adoção em massa. Quebrando esse paradigma Jay Whitacre com sua bateria aquosa iônica híbrida (*Aqueous Hybrid Ion* - AHI) demonstrou que há alternativas sustentáveis, seguras e baratas com chance de fazer o sonho de Edison finalmente se tornar realidade.

3. NANOGIDS

Na conceituação atual as iniciativas de Edison poderiam ser chamadas de *microgrids*, pois eram caracterizadas por uma estação de geração com distribuição radial de curta distância até seus clientes. Curiosamente o conceito de *microgrid* retornou recentemente como tema importante do Setor Elétrico, especialmente pelas possibilidades que os sistemas fotovoltaicos oferecem. Esse conceito foi simplificado em termos técnicos e de tamanho, dando origem ao termo *nanogrid*, remetendo à Nanotecnologia, apesar de não haver relação entre os dois conceitos.

As pequenas dimensões envolvidas, a natureza inerentemente DC das fontes locais (painéis fotovoltaicos) e dos sistemas de armazenamento (baterias) e o fato da carga poder ser baseada em semicondutores fazem da corrente contínua a opção natural em um *nanogrid*. Essa é a percepção de algumas organizações que têm procurado estabelecer as normas técnicas necessárias para alavancar o mercado de corrente contínua em baixa tensão (*Low Voltage Direct Current* – LVDC) no curto prazo¹.

3.1 Definição

De acordo com o Cigré², *microgrids* são:

“sistemas de distribuição de eletricidade contendo cargas e fontes distribuídas de energia que podem ser operados de forma controlada e coordenada tanto conectados na rede principal quanto ilhados”

¹ *Emerge Alliance* (emergealliance.org) e DCBV (directcurrent.eu), dentre outras.

² Working Group C6.22, Microgrid Evolution Roadmap: “Microgrids are electricity distribution systems containing loads and distributed energy resources, (such as distributed generators, storage devices, or controllable loads) that can be operated in a controlled, coordinated way either while connected to the main power network or while is landed”.

Do ponto de vista semântico, um *nanogrid* poderia ser entendido meramente como bloco constituinte de um *microgrid*. Alguns autores vão além e estabelecem limites numéricos exatos em termos de capacidade e tamanho físico. Mas como se trata de assunto novo, ainda não há definição formal amplamente aceita. A literatura indica Nordman (7) como o pesquisador mais envolvido atualmente com o tema. Segundo ele:

“Um *nanogrid* é um domínio simples de tensão, confiabilidade e administração. Deve possuir ao menos uma carga e um ponto de conexão para o exterior e pode possuir ou não armazenamento. Fontes de energia não fazem parte do *nanogrid*, porém frequentemente o *nanogrid* terá uma fonte conectada”.

Para efeito desse trabalho e procurando contribuir com o estabelecimento de uma definição apropriada a partir das ideias atualmente em debate, será considerado que um *nanogrid* DC é:

“Sistema de distribuição de eletricidade contendo cargas e fontes distribuídas de energia operando em um domínio simples de tensão contínua operando de forma ilhada, mas com possibilidade de conexão a outros domínios simples adjacentes”.

3.2 Geração

A casa do século XX, conforme idealizada e apresentada por Edison, apesar de ser alimentada por um gerador DC movido à gasolina, tinha pretensões de evoluir para uma versão eólica, indicando um desejo de autonomia plena e sustentável. Edison não contava com tecnologias fotovoltaicas senão provavelmente teria optado por essa linha³ (8). Atualmente a farta disponibilidade de equipamentos, o fato destes operarem nativamente em DC e a alta receptividade pela Sociedade fazem dos sistemas fotovoltaicos a melhor opção para residências⁴.

Nos casos onde não houver insolação suficiente que justifique o investimento em um sistema fotovoltaico, pode-se cogitar alternativas eólicas (9), especialmente geradores apropriados a ventos de baixa velocidade, notadamente os com eixo vertical (figura 1).

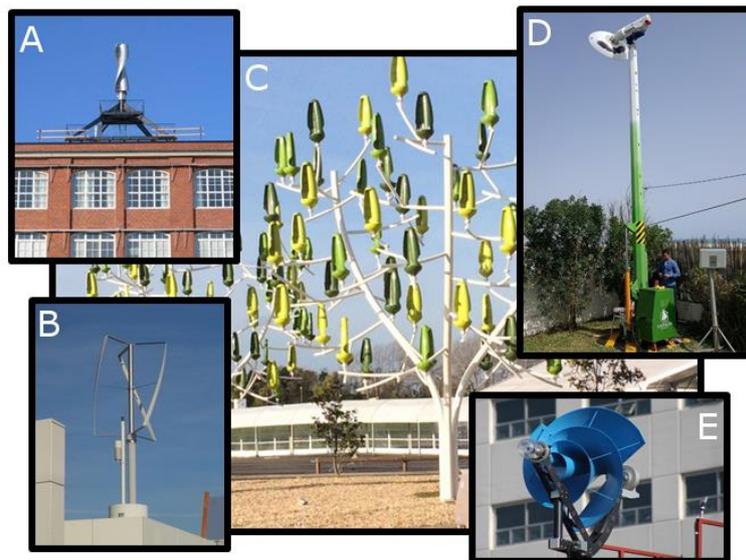


Figura 1: Exemplos de turbinas eólicas urbanas.
A e B: Turbinas VAWT (*Verticas Axis Wind Turbine*). C: Árvore eólica. D: Turbina Saphonian. E: Turbina Archimedes.
(Fonte: Desenvolvimento próprio).

3.3 Cargas

Os mercados naval e de casas móveis demandam equipamentos DC. De fato, barcos e trailers podem ser considerados *nanogrids* DC móveis. Mas mesmo que já não houvesse essa produção, a adaptação dos equipamentos AC para operação em DC não envolve dificuldade técnica. Ao contrário, as fontes de alimentação seriam bastante simplificadas com a eliminação dos conversores AC/DC, com a vantagem de eliminação do ruído eletromagnético inerentemente produzido no processo de conversão.

³ Há uma crença de que, em 1931, Edison teria dito a Henry Ford e Harvey Firestone que poria seu dinheiro na energia solar - “I’d put my money on the sun and solar energy. What a source of power. I hope we don’t have to wait until oil and coal run out before we tackle that”.

⁴ Por ser um assunto já exaurido na literatura, não será aprofundado aqui. Qualquer configuração que atenda aos requisitos da carga e do armazenamento é aceitável.

3.3.1 Iluminação

A iluminação a partir de sistemas baseados em diodos emissores de luz (*Light Emitting Diode* – LEDs) já está consolidada. Essa tecnologia também é eletrônica e opera nativamente em corrente contínua. Padrões para alimentação DC de sistemas de iluminação LED já estão sendo sugeridos pelo mercado, notadamente pela *Emerge Alliance*. Um caminho é a utilização do padrão PoE (*Power over Ethernet*)⁵ comum nas redes de dados. Nesse esquema a alimentação é entregue pelo cabo de dados e há inteligência embarcada para controle da luminosidade a partir de sensores, aumentando a eficiência energética e o potencial arquitetônico do local.

3.3.2 Equipamentos eletrônicos

Os equipamentos residenciais eletrônicos, especialmente os relacionados com dados, e conteúdo de entretenimento poderão ser alimentados em DC a partir de distribuidores padrão USB-PD (*USB Power Delivery*). Esse padrão, além de permitir comunicação entre os equipamentos consegue fornecer potência suficiente para alimentá-los. Por exemplo, um distribuidor (*hub*) específico ou um aparelho comum (TV) poderá alimentar todo o entorno de equipamentos de áudio, vídeo, acesso de internet e *videogames*⁶. Além disso, poderá haver cabeamento USB-PD em toda a residência, proporcionando capilaridade.

3.3.3 Motores e compressores

O emprego de variadores de frequência (VFD -*Variable Frequency Drives*) no controle de motores de corrente contínua sem escovas (BLDC – *Brushless DC*) são tendência de mercado para todos os eletrodomésticos que empregam motores e compressores como condicionadores de ar, refrigeradores e máquinas de lavar roupa. Essa preferência se deve às diversas vantagens que essa tecnologia apresenta frente aos motores AC. Há grande economia de energia, redução de ruído eletromagnético e acústico e maior vida útil do motor (10). Como o VFD converte a energia AC em DC (retificação) para depois aplicar pulsos variáveis no motor (inversão), essa tecnologia é conhecida como “*inverter*”. Se o fornecimento primário de energia for DC o sistema ficará simplificado e mais barato pois não necessitará da etapa de retificação.

3.4 Distribuição

A distribuição residencial acontecerá em baixa tensão, trazendo ganho em segurança. Na prática ainda não há padrão definido, mas a eletrônica de controle tem capacidade para operar com grande diversidade de valores, fazendo com que a escolha da tensão não seja um ponto crítico. Mas como as baterias estão disponíveis em valores específicos, tipicamente 12, 24 e 48V⁷, por simplicidade essas tensões deverão predominar⁸.

3.5 Armazenamento

As descobertas mais relevantes em Eletricidade só ocorreram a partir do momento em que os pesquisadores, passaram a dispor de sistemas de armazenamento de energia elétrica para realizarem seus experimentos. Esses avanços se iniciaram com a bateria zinco-cobre, desenvolvida por Alessandro Volta em 1800, seguida da bateria chumbo-ácida de Gaston Planté, em 1859. Porém foi somente após os aperfeiçoamentos de Camille Faure sobre o trabalho de Planté que, em 1881, os sistemas de armazenamento de energia elétrica começaram a ser comercializados de forma mais ampla, iniciando sua trajetória no cotidiano da Sociedade.

Desde então uma diversidade enorme de alternativas foi aparecendo, mas somente umas poucas foram se mostrando economicamente viáveis para uma escala comercial relevante. As tecnologias que resultaram em produtos já comercializados e promissores para uso residencial no curto prazo serão mencionadas a seguir. Detalhes sobre essas e outras iniciativas podem ser vistos em (11)⁹.

3.5.1 Baterias chumbo-ácidas (Pb)

Por questões econômicas, a bateria chumbo-ácida é a de uso mais comum, mas o fato de usar um elemento tóxico e poluente, sugere que sua utilização só será tolerada até o momento em que alternativas mais sustentáveis apareçam para substituí-la. Atualmente esse segmento vem tentando inovações, como as baterias PbA (chumbo avançado), especialmente para suprir as novas demandas da Indústria Automobilística por conta dos veículos elétricos híbridos e do regime de operação *start-stop*, no qual a bateria é muito exigida e deve operar em regime

⁵ Por exemplo genisyslighting.com, nuleds.com, platformatics.com.

⁶ Universal Serial Bus Power Delivery - usb.org/developers/powerdelivery. Dependendo do dispositivo, as tensões poderão ser 5, 12 ou 20V.

⁷ Adotar 48V pode ser vantajoso pois essa é a tensão usual em Telecomunicações, já havendo, portanto, maturidade do mercado.

⁸ No caso de sistemas de maior porte como edifícios e datacenters, por questões de perda na distribuição devido ao longo comprimento dos cabos de distribuição são sugeridas tensões maiores. Por exemplo 380V (emergealliance.org) e 350V (directcurrent.eu).

⁹ Como o escopo aqui estudado é residencial, não serão analisadas outras formas de armazenamento, como ar-comprimido, volantes de inércia etc.

de carga parcial. Naturalmente esses avanços serão empregados também em sistemas estacionários, porém isso não altera o fato de utilizarem chumbo, o que não é desejável em uma Sociedade cada vez mais intolerante com agressões sócio-ambientais. Sendo assim, mesmo que as baterias PbA se mostrem tecnicamente interessantes, provavelmente elas não conseguirão competir no longo prazo com alternativas mais sustentáveis. Por enquanto são utilizadas em cenários residenciais pelo mero motivo da falta de opções economicamente interessantes.

3.5.2 Baterias alcalinas de níquel-ferro (NiFe), níquel-cádmio (NiCd) e níquel-hidreto metálico (NiMH)

Apesar da grande durabilidade em condições extremas de temperatura e vibração como as encontradas em minas o fato de operar somente com carga e descarga lentas fez com que a bateria NiFe de Edison fosse perdendo mercado ao longo do tempo até ser descontinuada em 1975. Essa característica porém tem sido contornada com avanços em nanotecnologia dando esperança que essa rota tecnológica venha a ter relevância nos mercados de armazenamento residencial de energia elétrica, especialmente pelo fato de utilizar materiais abundantes.

A bateria NiCd foi inventada pelo sueco Waldemar Jungner em 1899¹⁰ e foi comercializada até a década de 1990 quando foi superada pelas tecnologias NiMH e Lítio. O fato de haver dependência do cádmio, metal pesado tóxico, bioacumulativo e escasso, é motivo suficiente para desconsiderar essa rota tecnológica como alternativa promissora para armazenamento residencial de energia elétrica em grande escala.

A tecnologia NiMH foi desenvolvida em 1967 mas só alcançou grande sucesso na década de 1990 com os avanços promovidos por Stanford Ovshinsky, prolífico inventor frequentemente comparado ao próprio Edison. O avanço das baterias de lítio tem reduzido sua participação no mercado, cenário que talvez venha a ser revertido com os novos desenvolvimentos da empresa alemã BASF¹¹.

3.5.3 Baterias Lítio-íon (Li-íon)

A bateria de lítio remonta a 1912 com os trabalhos de Gilbert Lewis mas somente na década de 1970 é que elas se tornaram comerciais. Diversos avanços motivados pelo potencial percebido resultaram, em 1985, na primeira bateria lítio-íon. Em 1991 a Sony iniciou a comercialização que, desde então, tem se mostrado muito bem sucedida. Diversas variantes foram surgindo e, atualmente, praticamente todo mercado de dispositivos móveis e veículos elétricos se baseia em baterias dessas rotas tecnológicas.

Além do sucesso nos mercados de mobilidade, essas baterias têm se mostrado como boas alternativas para diversas situações estacionárias (12). Porém sua alta densidade de energia e sua dependência de um sistema de gerenciamento altamente confiável fazem com que as entidades reguladoras e até os próprios fabricantes sejam cautelosos quanto ao uso residencial, especialmente diante de um cenário de incêndio urbano. Por exemplo, a Austrália já está limitando esse mercado e algumas grandes cidades dos EUA estão pensando em fazer o mesmo. Essa demanda por segurança tem feito surgir novas tecnologias, notadamente baterias com eletrólito seco como as fabricadas pela SEEO¹². Porém os altos custos associados aos processos e materiais, especialmente quando há nanotecnologia, sugerem que essas rotas tecnológicas terão mais importância na mobilidade elétrica.

3.5.4 Baterias de fluxo

Em 1839, William Robert Grove apresentou, na Academia de Ciências de Paris, uma nova célula elétrica com anodo de zinco imerso em ácido sulfúrico diluído e catodo de platina imerso em ácido nítrico concentrado, separados por cerâmica¹³. Essa pilha foi utilizada nos primórdios do Sistema Telegráfico Norte-Americano mas foi descontinuada na década de 1860 devido a exalação de dióxido de nitrogênio, gás muito tóxico.

Provavelmente para contornar esse problema, em 1884 Charles Renard utilizou ácidos crômico e clorídrico em uma célula similar à de Grove para alimentar o motor desenvolvido por Arthur Krebs para a realização do primeiro vôo circular tripulado no mundo a bordo do dirigível *La France*. Esse tipo de bateria não era recarregável e os fluidos tinham que ser trocados ao término da carga, ocasionando dificuldades técnicas e encarecendo o produto. Com isso acabaram perdendo espaço para as baterias chumbo-ácidas e alcalinas.

As modernas baterias de fluxo baseiam-se em componentes químicos dissolvidos e separados por uma membrana. Esse tipo de abordagem surgiu na década de 1970 e proporciona longevidade ao sistema, porém com a necessidade de partes móveis para bombeamento dos fluidos e controles eletrônicos sofisticados para manter a eficiência das reações. Apesar de utilizarem o mesmo princípio de funcionamento, há diversas rotas tecnológicas quanto aos fluidos utilizados. As dimensões e capacidades são usualmente grandes, mais voltadas para armazenamento de grande porte em plantas de fontes renováveis, onde o espaço normalmente não é crítico.

¹⁰ Jungner também desenvolveu uma bateria níquel-ferro e teve sérios problemas financeiros devido à disputa com Edison, o que afetou o progresso de suas pesquisas.

¹¹ catalysts.basf.com.

¹² seeo.com.

¹³ As pesquisas de Grove sobre novas células elétricas resultaram no invento, em 1842, da primeira célula combustível. Além disso ele desenvolveu, em 1840, uma lâmpada incandescente que foi aperfeiçoada por Edison.

A única exceção é a empresa australiana RedFlow que desenvolveu a menor bateria de fluxo do mundo (figura 2), podendo ser utilizada também em residências. O equipamento emprega brometo de zinco. A existência de partes móveis e tecnologia embarcada para o correto controle do processo, talvez demande esquemas bem planejados de manutenção, algo não muito atraente no uso residencial comum. Outra questão é que o brometo de zinco é tóxico, requerendo cuidados especiais em caso de vazamento nos dutos, conexões ou devido a furo nos tanques.

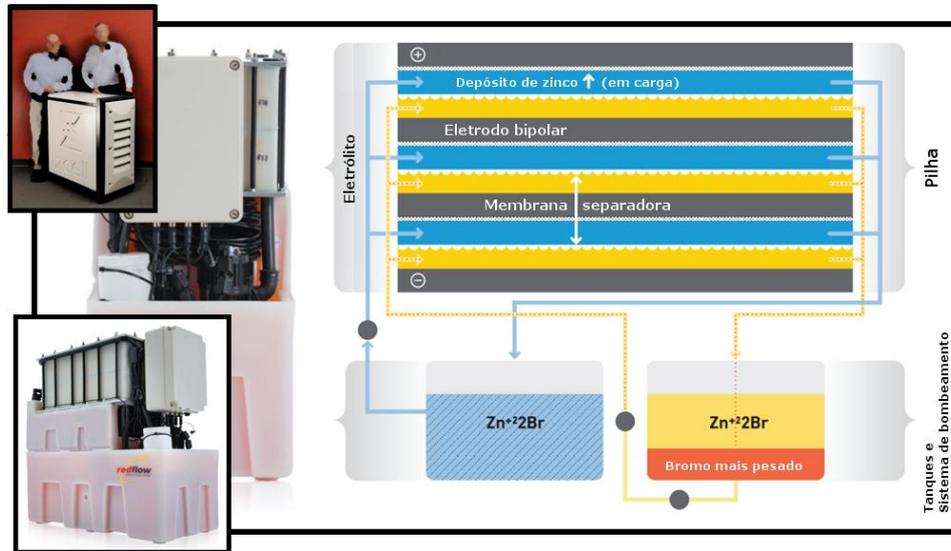


Figura 2: Bateria de fluxo para uso residencial.
Fonte: Desenvolvimento próprio baseado em redflow.com.

3.5.5 Bateria aquosa iônica híbrida (Aqueous Hybrid Ion – AHI)

As tecnologias mencionadas anteriormente são antigas, muitas com origem no século XIX, mostrando quão difícil tem sido a evolução dos sistemas de armazenamento de energia elétrica. A bateria AHI é um raro caso de nova eletroquímica. A escolha dos materiais procurou contornar os obstáculos já citados, i.e., são abundantes e não agressivos ambientalmente. Além disso o produto final é intrinsecamente seguro pelo fato de utilizar água como eletrólito, característica que o torna muito eficiente em altas temperaturas devido ao alto coeficiente térmico da água. Ensaios com fogo demonstram que esse produto é inerte em caso de incêndio, o que o torna muito apropriado para uso em residências, especialmente em centros urbanos densamente povoados.

Na tabela 2 podem ser vistas as características construtivas com suas vantagens e desvantagens. Como consequência do paradigma de desenvolvimento adotado, chegou-se à uma configuração que não proporciona grande densidade de energia, tornando o produto da mesma ordem de tamanho que as baterias chumbo-ácidas. Naturalmente essa pode ser uma desvantagem em algumas situações, porém se os projetos forem pensados desde a origem com essa visão, poderiam ser desenvolvidos edifícios com “cisternas elétricas” no subsolo, por exemplo. Essas estruturas armazenariam eletricidade nos mesmo moldes que hoje se armazena água, i.e., em espaços que não comprometem as habitações propriamente ditas.

Tabela 2 – Características construtivas da bateria AHI.

Partes	Prós	Contras
Condutores: aço inox	- Baixo custo - Múltiplos fornecedores	- Baixa condutividade*
Catodo: LiMn₂O₄	- Baixo custo - Múltiplos fornecedores	- Baixa capacidade*
Separadores: algodão sintético	- Baixo custo	- Nenhum
Anodo: NaTi₂(PO₄)₃ (em estrutura de carbono)	- Suporta estado parcial de carga	- Baixa densidade de energia*
Eletrólito: Na₂SO₄ (em meio aquoso)	- Baixo custo - Não inflamável - Não tóxico - Imune à sobrecarga - Alta condutividade*	- Baixa densidade de energia*

*Em comparação com as alternativas

Fonte: aquionenergy.com

4. EXEMPLO

Uma configuração simplificada de *nanogrid* DC residencial pode ser vista na figura 3, demonstrando a facilidade de implantação. Esse sistema funciona em 12V com painel solar de 30W (A) fixado na fachada e conectado a um controlador de carga (B) que carrega baterias (C) ocultas no mobiliário. As cargas são um roteador *wifi-4G* (D) e um sistema de som (E,F). Nesse caso dados e áudio estão *off-grid*, com previsão de inclusão de câmera de segurança e iluminação *led*.

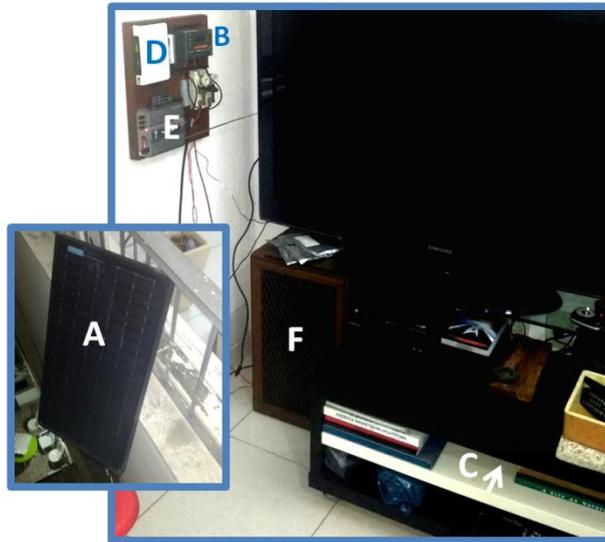


Figura 3: Exemplo de implementação de *Nanogrid* DC na residência do autor.

Uma configuração mais completa pode ser vista na figura 4, contemplando os conceitos originais de Edison, mas com as características modernas elencadas abaixo.

- Sistemas fotovoltaicos e/ou eólicos carregam as baterias e alimentam um barramento DC (por exemplo, em 48V). Pode haver conexão ao Grid e/ou a um Grupo Motor Gerador (GMG).
- Equipamentos eletrônicos em geral são alimentados por tomadas USB-PD.
- A iluminação é alimentada por sistema PoE com controle automático através de sensores.
- Equipamentos como condicionadores de ar, máquinas de lavar roupa e refrigeradores usam variadores de frequência (VFD) conectados ao barramento DC para controle de motores e compressores.
- Demais eletrodomésticos são nativamente DC (por exemplo, em 12V como os utilizados em veículos) e conectados ao barramento principal através de conversores. Futuramente esses aparelhos terão fontes versáteis para conexão em diferentes tensões, dispensando os conversores externos.

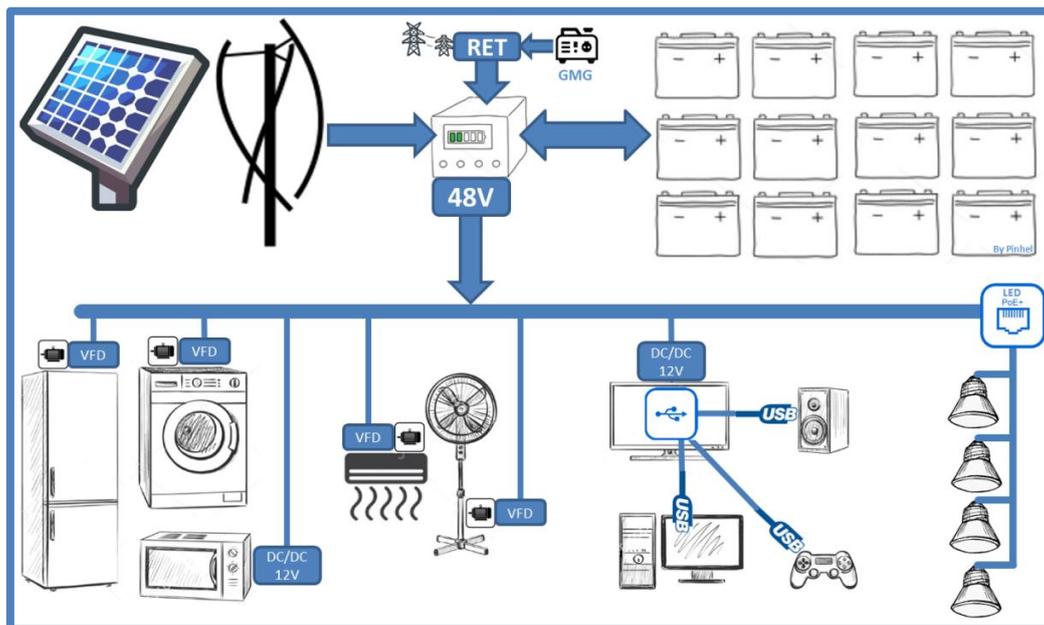


Figura 4: Casa do Século XXI - *Nanogrid* DC Residencial. Fonte: desenvolvimento próprio.

5. CONCLUSÕES

A intermitência de produção de energia inerente aos sistemas solares e eólicos limita sua participação na Matriz Elétrica. Esse cenário poderia ser diferente se houvesse formas de armazenamento eficazes e baratas. Até que isso aconteça, a produção global de eletricidade continuará sendo baseada em combustíveis fósseis, fazendo com que toda iniciativa sustentável seja importante, como é o caso dos temas aqui abordados.

As tecnologias para produção local de energia já alcançaram maturidade suficiente para utilização em larga escala em sistemas residenciais. Mas para que haja versões DC de baixo custo dos diversos tipos de equipamentos comumente utilizados em residências a demanda terá que crescer. Para distribuição os padrões USB-PD e PoE deverão ser utilizados em conjunto com outros ainda em fase de definição.

A história mostra como é difícil armazenar energia elétrica. As baterias chumbo-ácidas, apesar dos esforços atuais para desenvolvimento de versões avançadas, não possuem as virtudes desejadas para armazenamento residencial em larga escala, especialmente quanto ao viés ambiental. Por sua vez o uso de baterias lítio-íon em residências dependerá de questões de segurança, sendo um caminho ainda incerto, especialmente nos grandes centros urbanos, logo onde seriam mais demandadas. Caso as baterias lítio-íon sofram restrições por conta de quesitos de segurança, talvez as baterias NiMH consigam espaço no mercado residencial.

Caso apresentem confiabilidade, durabilidade e baixo custo as baterias de fluxo de pequeno porte poderão vir a ser um produto de sucesso no mercado residencial, porém será com soluções simples, baratas e seguras como a bateria AHL que o armazenamento terá mais chance de alcançar escala mais expressiva.

Além de prestar homenagem a Thomas Edison, esse trabalho procurou demonstrar que não há impedimento técnico para adoção em larga escala da corrente contínua em residências, inclusive com armazenamento local. A prospecção realizada sugere que, em breve, surgirá um Mercado relevante para esse tipo de configuração, mas nada impede que versões simplificadas já sejam feitas hoje em dia. A compreensão dessa perspectiva por parte dos atores do Setor Elétrico, da Construção Civil e da Arquitetura terá efeitos importantes na infraestrutura, fazendo com que as concessionárias de energia elétrica repensem suas estratégias comerciais e contribuam realística e efetivamente no aumento da participação das fontes sustentáveis na Matriz Elétrica mundial.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) M. Mills et al, "Unleashing Opportunity: A Project of National Affairs - Volume I: Policy Reforms to Advance Innovation", nationalaffairs.com, EUA, 2016.
- (2) C. Weinschenk, "Nanogrids and Microgrids are Keys to Decentralizing the Energy Infrastructure", energymanagertoday.com, EUA, 2016.
- (3) P. Asmus et al, "Market Data: Remote Microgrids and Nanogrids", navigantresearch.com, EUA, 2015.
- (4) A. Pinhel, "Nanotecnologia no Setor Elétrico: Um estudo prospectivo", INPI, 2014.
- (5) T. P. Hughes, "Networks of Power: Electrification in Western Society 1880-1930," Johns Hopkins Press, 1983.
- (6) "Edison's latest marvel – The electric country house", The New York Times, EUA, 15 de setembro de 1912, pg 87.
- (7) N. Nordman., "Nanogrids - Evolving our electricity systems from the bottom up", Darnell Green Building Power Forum, San Jose, CA, USA, 2011.
- (8) J. D. Newton, "Uncommon Friends: Life with Thomas Edison, Henry Ford, Harvey Firestone, Alexis Carrel, & Charles Lindbergh", Harcourt Brace Jovanovich, San Diego, California, 1987.
- (9) J. Cace et al., "Urban wind turbines guidelines for small wind turbines in the built environment", urbanwind.net, UK, 2007.
- (10) N. Sridhar, "Power electronics in motor drives: Where is it?", Texas Instruments, 2015.
- (11) K. Desmond, "Innovators in Battery Technology", Ed. McFarland, 2016.
- (12) A. Pinhel et al., "Avaliação do uso de bateria lítio-íon em aplicação estacionária em Telecomunicações", XXI SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Florianópolis, Brasil, 2011.

7. DADOS BIOGRÁFICOS



Alexandre Pinhel é graduado em Engenharia Eletrônica (UFRJ 1994), tem MBA em Gestão da Inovação (UNICAMP 2011) e mestrado em Propriedade Intelectual & Inovação (INPI 2014). É membro sênior do IEEE e recebeu premiações técnicas da ABRAMAN, CIGRÉ e MMA. Desde 1994 é engenheiro de Furnas Centrais Elétricas e, em 2003, publicou livro sobre Descargas Eletrostáticas. Atualmente tem interesse na captação e armazenamento local de energia elétrica com distribuição DC de baixa tensão e no uso da nanotecnologia no Setor Elétrico. É também artista plástico (AlexandrePinhel.com).