



ANÁLISE DA CONEXÃO DE PRODUTOS ELETRÔNICOS ATUAIS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO/MICRORREDES EM CORRENTE CONTÍNUA

Joabel Moia¹

Resumo: Nos últimos anos vem crescendo significativamente a demanda por energia elétrica e a expectativa é que tal crescimento tende a subir, tendo em vista que cada vez mais novos produtos eletrônicos são criados e consumidos, assim como a sociedade está mais energointensiva, devido às melhorias no padrão de vida das pessoas. Neste contexto, o sistema de distribuição e as microrredes em corrente contínua se enquadram, buscando a melhoria na eficiência energética. Este trabalho tem como foco a análise do comportamento de alguns produtos eletrônicos atuais de uso residencial, alimentados em corrente contínua, por meio de testes em bancada.

Palavras-chave: Geração Distribuída, Distribuição e Microrredes em CC, Produtos eletrônicos.

Abstract: During recent years, the electric energy demand have been growing significantly with a projection of an even greater increment, given that more electronic products are created and consumed every day, resulting in a more energy-intensive society, thanks to major improvements in people's lifestyle. In this context, the DC distribution system and microgrids fit perfectly, promoting some improvements in energy efficiency. This paper brings a series of analysis and bench tests over some common electronic products' behavior when connected to a DC source.

Keywords: Distributed Generation, Distribution and DC Microgrids. Electronic Products.

¹ Professor do Departamento Acadêmico de Eletrônica, IFSC/Florianópolis <joabel.moia@ifsc.edu.br>

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento da demanda por energia elétrica, há a necessidade melhorias nos atuais sistemas de distribuição, busca por fontes de energia renováveis, inserção de microgerações locais e distribuídas, etc. As microrredes, além de aumentar a eficiência energética, trazem grandes vantagens em relação ao atual sistema unidirecional em corrente alternada (CA) de distribuição. Ressalta-se, também, que se a microrrede for implementada em corrente contínua (CC), é ainda mais vantajosa, tendo em vista que acarretará na diminuição de perdas provenientes da tecnologia em CA (HELDWEIN, 2009).

Este artigo tem por objetivo apresentar as vantagens, desvantagens e desafios da implementação de microrredes CC. Ainda, apresentar a análise da conexão de alguns equipamentos eletrônicos atuais em rede CC, produtos estes que foram projetados para alimentação em CA.

2 DESAFIOS NA PRODUÇÃO ENERGÉTICA

2.1 Demanda energética

A demanda energética vem crescendo ao longo do tempo, em um ritmo acelerado. Cada vez mais novos produtos eletrônicos são utilizados em diferentes áreas, desde usos residenciais até aplicações em grandes indústrias, e a expectativa é que se tenha um crescimento ainda mais elevado com o passar dos anos (EIA, 2016).

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2017), um órgão público que tem por objetivo prestar serviços na área de estudos e pesquisas com foco no planejamento do setor energético, elaborou uma projeção da demanda de energia elétrica em território brasileiro, tendo como base, diferentes classes e regiões do país, para que seja feito o planejamento da oferta de energia.

Na Tabela 1 é apresentado um estudo probabilístico do consumo total de energia do ano

de 2021 e 2026, apresentando também o percentual de aumento do consumo ano a ano ($\Delta\%$ a.a.).

Tabela 1 – Consumo estimado de energia elétrica.

Ano	Consumo (TWh)
2021	613
2026	744
Período	Consumo ($\Delta\%$ a.a.)
2016-2021	3,5
2021-2026	3,9
2016-2026	3,7

Fonte: EPE (2017, p. 51, adaptado).

Para esta pesquisa, a Empresa de Pesquisa Energética considerou ganhos de eficiência energética:

A projeção da demanda de energia elétrica elaborada neste estudo contemplou ganhos de eficiência energética, ao longo do período 2017-2026, que montam a 4,1% do consumo total de eletricidade no ano horizonte. Esse ganho adicional de eficiência no consumo final eletricidade representa uma redução no requisito de geração (carga de energia) em torno de 4 GW médio, isto é, equivalente a metade da capacidade da usina hidroelétrica de Itaipu. (EPE, 2017, p. 45).

No entanto, além da grande demanda de energia, cresce a necessidade por fontes de energias renováveis e limpas, com cada vez mais incentivos governamentais para a redução de emissão de poluentes (EPE, 2017). Segundo a International Energy Outlook (2016), as fontes de energia renováveis vêm apresentando um crescimento anual em média de 2,9% entre 2012 e 2040.

Esse interesse por fontes de energia renováveis é devido, em sua maioria, à grande emissão de poluentes advindos da produção de energia pela queima de combustíveis fósseis.

Contudo, deve-se ter o cuidado com essas fontes de energia, uma vez que podem não ser totalmente benéficas para o meio ambiente. Exemplos disso são as hidrelétricas que, apesar de produzirem energia renováveis, alagam grandes áreas, causando grande impacto na fauna e na flora do local. Por esse motivo, procura-se optar por energias limpas que, embora ainda gerem impactos, são menores se comparados aos demais.

Outro fator que se deve levar em consideração para reduzir os impactos ambientais, mesmo de forma indireta, é o melhor aproveitamento da energia gerada, evitando as perdas no processo de transmissão e distribuição, ou seja, promover o aumento da eficiência energética.

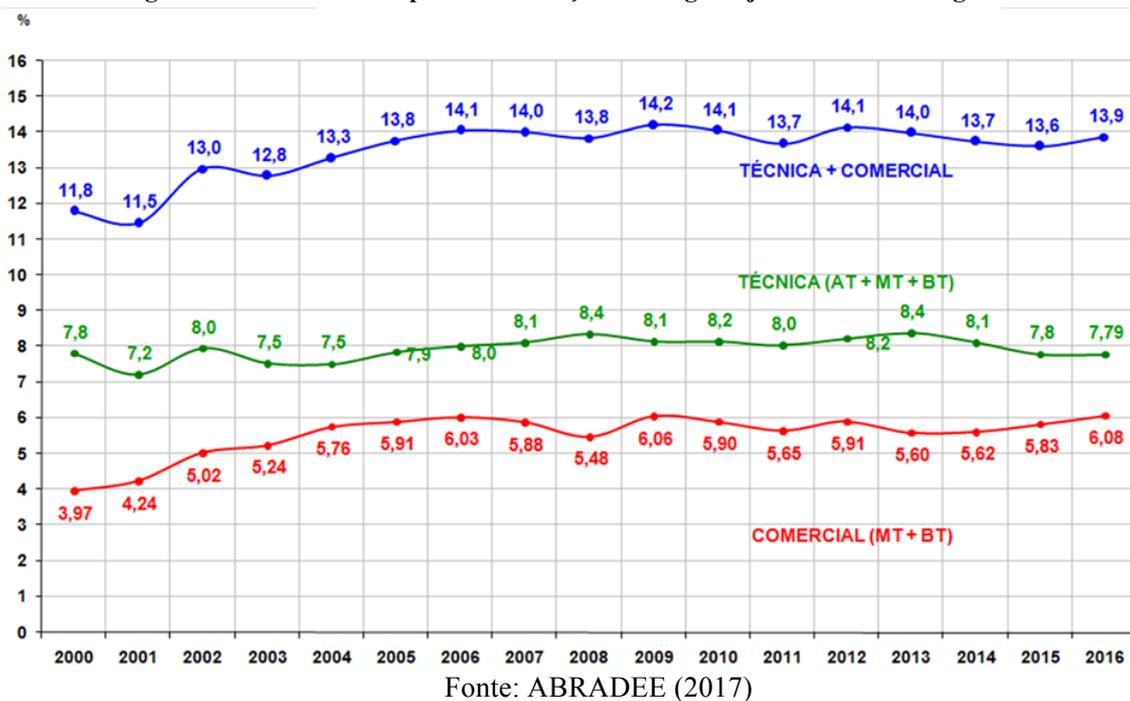
Essas perdas na transmissão e distribuição de energia podem ser definidas como perdas técnicas ou não técnicas. De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), as perdas técnicas podem ser definidas como inerentes ao transporte da energia elétrica na rede, relacionadas à transformação de energia elétrica em energia térmica nos condutores (efeito joule), perdas nos núcleos dos transformadores, perdas dielétricas, etc. E, ainda, define as perdas não técnicas, ou perdas comerciais, como provenientes de furtos de energia, erros de medição, erros no processo de faturamento, unidades consumidoras sem equipamento de medição, etc (ANEEL, 2015). A figura 1 apresenta, em termos percentuais, as perdas técnicas, perdas comerciais e a perda total em relação total produzido. As informações tomam conta do sistema global que envolve 63 distribuidoras vinculadas à ABRADDEE (Associação Brasileira de Distribuidoras de Energia Elétrica).

2.2 Geração distribuída

Uma solução, que atualmente vem sendo discutida, é o emprego de geração distribuída, que implica na redução das perdas no processo de transmissão da energia. No atual modelo nacional de fornecimento de energia elétrica, a distribuição da energia tem sentido unidirecional, das grandes geradoras hidrelétricas, termelétricas e outros, para o consumidor. Esse caminho até o consumidor geralmente é muito longo e implica em perdas por efeito joule.

O conceito de geração distribuída propõe que os consumidores, também possam se tornar produtores, resultando em um novo termo, o prosumer (producer + consumer), que em uma tradução livre para o português, poderia ser entendido como “prossumidor” (produtor + consumidor). O prosumer possui sua própria geração de energia e, havendo excedente, pode abastecer a rede local. Nesse processo, deixa-se de consumir a energia proveniente de locais distantes, que ocasiona perdas energéticas pelo efeito joule, passando a consumir energia de geradores próximos (MOIA, 2016).

Figura 1 – Percentual de perda em relação à energia injetada no sistema global



2.3 Microrredes e redes inteligentes

Atualmente, há tendências que convergem para um promissor mercado de microrredes (do inglês, microgrids). O conceito de uma microrrede consiste, basicamente, em uma rede com geração distribuída, com cargas operando em conjunto e de forma autônoma da atual rede elétrica, podendo, em caso de necessidade, operar de forma paralela ou isolada da rede, conhecido como ilha. Nesse processo de ilha, as microrredes operam sem a necessidade da energia elétrica proveniente das empresas de abastecimento local, passando a trabalhar apenas com sua própria energia gerada (ALCÂNTARA, 2011).

Ainda, segundo Alcântara (2011), essa característica de geração em paralelo com outras empresas de energia faz surgir diferentes possibilidades como, por exemplo, a redução do valor pago nos horários de pico a essas empresas fornecedoras, cujo valor é elevado devido à grande demanda energética; nessas ocasiões, pode-se trabalhar com a própria carga produzida e armazenada. Já em casos em que se tenha o desligamento da rede ou blecautes, as microrredes podem permanecer ilhadas, suprindo toda a sua demanda energética e, assim, continuar operando normalmente.

Com o avanço da tecnologia, tem-se o conceito de redes inteligentes (do inglês, Smart Grid), que são similares ao atual sistema elétrico centralizado, mas em menor escala e modernos, podendo, por serem centralizadas, gerar, distribuir e controlar o

fluxo de eletricidade aos consumidores. Também procuram integrar as microrredes com a rede local de fornecimento de energia elétrica, aumentando a capacidade, confiabilidade e eficiência da rede (ALCÂNTARA, 2011).

A utilização das redes inteligentes possibilita o uso de elementos digitais e de comunicação nas redes que transportam a energia, podendo enviar muitos dados e informações aos centros de controle, onde serão tratados, ajudando no controle e manutenção do sistema. Para tal conceito ser posto em prática, haverá a necessidade de investimentos, como a modernização da infraestrutura, desenvolvimento de softwares específicos, melhorias nos sistemas de controle e capacidades de processamento dos dados, que são a base para uma rede inteligente (BRASIL, 2011).

2.3.1 Vantagens e desafios

As microrredes, com o uso da geração distribuída, levam a geração para perto do consumidor, diminuindo as perdas provenientes do efeito joule na transmissão e distribuição. Com o aumento na quantidade de geradoras/microgeradoras fornecendo energia, diminui-se o pico de demanda energética nas grandes geradoras em horários críticos, reduzindo, assim, o custo do sistema de transmissão, que não precisará ser superdimensionado para poder suportar esses picos. Consequentemente, com o aumento do número de geradores, tem-se o crescimento da capacidade energética como um todo, podendo, dessa forma, caso tenham capacidade de armazenamento, aumentar as

reservas de energia, para os casos em que tenha baixa ou nenhuma produção, aumentando a confiabilidade e disponibilidade do sistema (MOIA, 2016).

Por serem pequenas, as gerações das microrredes, causam impactos ambientais menores, se comparadas a grandes geradoras. Por exemplo, não alagam grandes áreas, como no caso das hidrelétricas, não são grandes campos abertos de geradores eólicos, que podem causar alterações climáticas e a morte de muitos pássaros, entre outros. Nas microgerações, podem-se ter pequenas turbinas eólicas, painéis fotovoltaicos, microturbinas a gás, entre outras formas de geração de energia renováveis e limpas, com pouco impacto ambiental.

As microrredes também podem fornecer serviços ancilares, como correção de frequência, melhoria no nível de tensão, correção de fator de potência, melhorando a qualidade da energia entregue ao consumidor e modernizando o sistema (INEE, 2016).

Segundo (MOIA, 2016), apesar das vantagens, para se elaborar uma microrrede, ainda, devem-se superar alguns desafios como, por exemplo, os elevados custos das tecnologias de microgeração que, por serem relativamente novas, possuem um alto valor de aquisição e instalação. Também há a necessidade, em muitos países, de uma padronização das microrredes, tendo, ainda, uma ausência de legislações e regulamentos, além da falta de estudos confiáveis de implementação dessas microrredes. Com relação às limitações técnicas, não se tem conhecimento de como será feito o controle do grande número de microgerações e veículos elétricos plug-and-play conectados às redes de distribuição.

Para a implementação das smart grids, tem-se, também, desafios com relação à comunicação de dados. De acordo com Rivera, Esposito e Teixeira (2013), há a necessidade do uso intensivo de tecnologia da informação e comunicação (TIC) com rápido tempo de resposta, para o controle da rede elétrica como um todo.

2.4 Rede em corrente contínua

Existem muitas formas de implementar uma microrrede, quando se refere à arquitetura e tecnologia, dependendo apenas da forma que a mesma será aplicada, podendo ser comunitária, comercial/industrial/residencial, hospitalar/campus universitário, um sistema isolado, entre outros. Mas uma das principais diferenças na topologia está na forma de sinal dessa energia que será distribuída, podendo ser em corrente alternada (CA), corrente contínua (CC), ou híbrida (MOIA, 2016).

A topologia CA é um sistema parecido com o atual sistema elétrico brasileiro, porém, com fluxo bidirecional de corrente elétrica, como um sistema de geração distribuída, apresentando as devidas características de microrredes comentadas anteriormente. Este artigo terá como foco a aplicação de microrredes em CC, devido às vantagens desta com relação à CA.

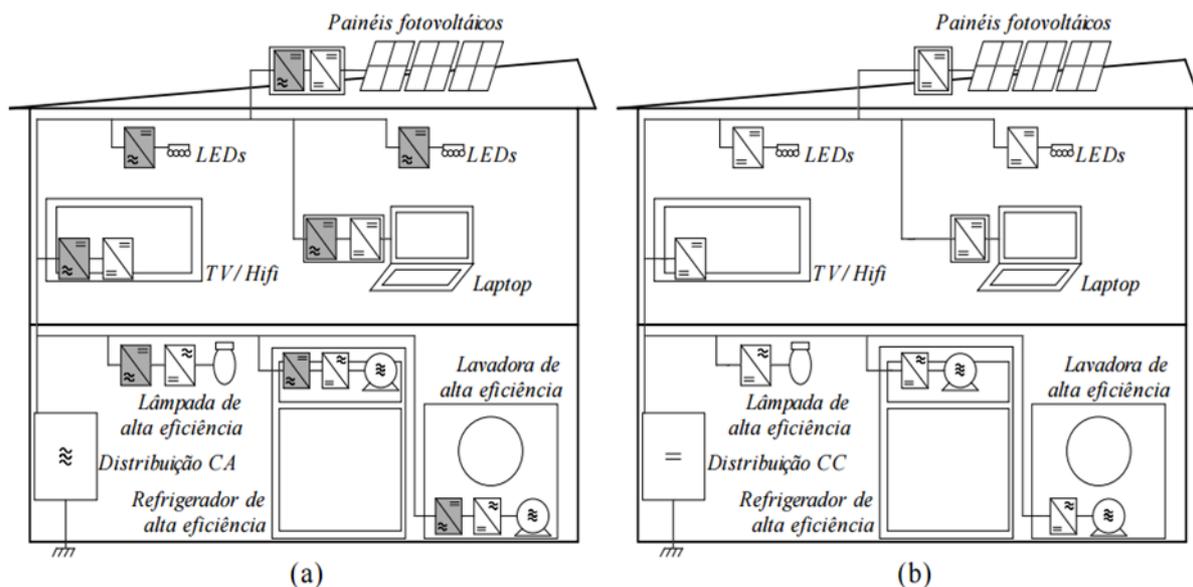
2.4.1 Vantagens

A distribuição em corrente contínua traz algumas vantagens, uma dessas é a eliminação da potência reativa. Além disso, de acordo com Sannino, Postiglione e Bollen (2003), cada vez mais se tem produtos, geralmente eletrônicos, operando em corrente contínua, mas alimentados em corrente alternada, pois a atual distribuição de energia é em CA. O primeiro tratamento dessa alimentação é a conversão desse sinal para CC, utilizando um retificador e, em seguida, é feita uma conversão do nível de tensão em CC. Essa conversão de CA-CC e CC-CC (níveis de tensão diferentes) têm suas respectivas perdas; as perdas do conversor CA-CC podem ser eliminadas, caso a distribuição seja feita em CC, aumentando o rendimento do sistema como um todo.

A Figura 2(a) mostra uma residência comum com seus equipamentos alimentados CA e a Figura 2(b) uma residência alimentada em CC.

Na Figura 2 pode-se observar uma diferença considerável no número de conversores, mostrando que em uma distribuição CC se tem menos perdas por redução do número de conversões. Atualmente existem bastantes cargas operando em corrente alternada, principalmente motores, porém, está sendo cada vez mais utilizados dois estágios de conversores, CA-CC e CC-CA, para elevar a eficiência dos motores e dos sistemas que empregam os motores, como apresentado na Figura 2, convergindo para avantejar a distribuição em CC por meio da redução do número de conversores. Alguns exemplos desses produtos compostos por motores, construídos com essa tecnologia, são os aparelhos de condicionadores de ar, máquinas de lavar roupas e geladeiras.

Já Starke, Tolbert e Ozpineci (2008) apresentaram um estudo em que fazem comparação entre as perdas de conversores ligados a sistemas CA e CC. Comparando uma rede CA com uma CC e considerando o rendimento médio dos conversores CC-CC (interface carga-rede) de 95%, as perdas na rede CA se tornam maiores quando há mais de 60% de cargas CC sendo alimentadas por esta rede. Esta taxa apresenta variação inversamente proporcional ao rendimento dos conversores CC-CC.

Figura 2 – Configurações de uma microrrede (a) Corrente alternada (b) Corrente Contínua.

Fonte: HELDWEIN (2010, p. 6).

A Figura 3 (HELDWEIN, 2009) mostra de maneira gráfica a comparação das perdas dos conversores. Em azul, estão as perdas dos conversores operando em CA, e nas outras curvas, três conversores operando em CC, com diferentes rendimentos.

Estudos realizados por Dalziel (1961) relacionaram os níveis de corrente elétrica e as reações humanas, onde os valores obtidos para CC, se comparados a CA, obtiveram melhores resultados, pois necessitavam de uma corrente mais elevada para produzir o mesmo efeito no corpo que a CA produzia, indicando que uma distribuição em CC possui maior segurança em relação aos riscos de choque. Sendo a tensão diretamente proporcional à corrente, elevar a tensão de uma distribuição em CC, não necessariamente indica que será mais perigosa que os atuais níveis de tensão usados na rede CA.

Outra vantagem que uma distribuição CC possui, em relação à CA, é o fato de não ter a necessidade de um controle de sincronismo e frequência (serviços ancilares), necessitando apenas fazer o controle do nível de tensão (MOIA, 2016).

2.4.2 Desvantagens

Tendo em vista as muitas vantagens da distribuição em CC, questiona-se sobre o porquê de atualmente não se ter essa distribuição como padrão. Um dos motivos para que se fizesse a distribuição em CA, segundo Heldwein (2009), teve início com a “Guerra das Correntes”, onde George Westinghouse e Nikola Tesla, defensores do uso da CA, se sobressaíram sobre o sistema defendido por Thomas Edison, do uso da distribuição da energia

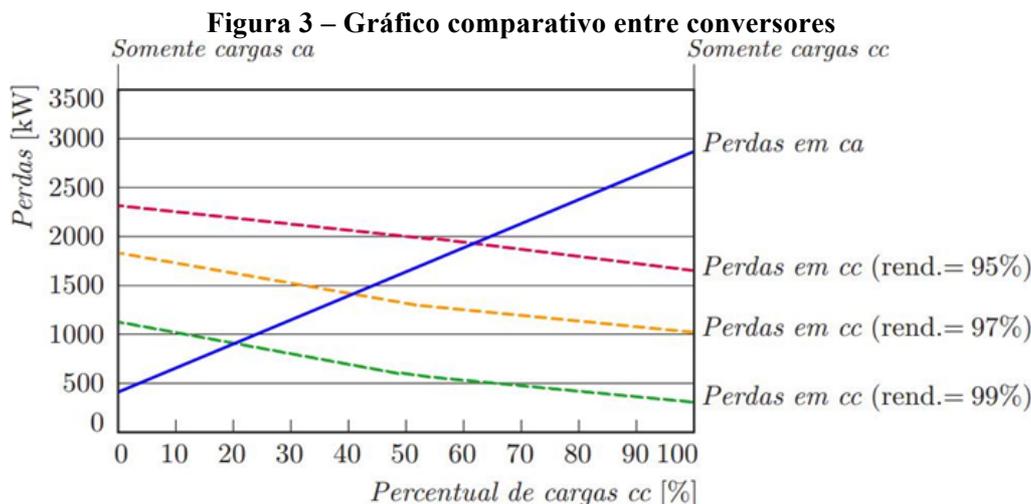
elétrica em CC, por conseguir fazer uso de transformadores para elevar e baixar a tensão.

Assim, Westinghouse e Tesla, podiam elevar a tensão e transmitir energia com cabos mais finos, tendo menores perdas e depois rebaixar a tensão, para fazer a alimentação das residências, enquanto Edison tinha que usar cabos mais grossos para a transmissão, já que não possuía tecnologia para a conversão dos níveis de tensão em CC, aumentando drasticamente o custo de implementação. Porém, atualmente, houve um grande avanço tecnológico na área de eletrônica de potência, desenvolvendo muito conhecimento em relação à conversão de níveis de tensão em CC, tendo sido apresentado por Starke, Tolbert e Ozpineci (2008), em suas pesquisas, um desempenho melhor dos conversores CC-CC em relação aos conversores CA-CA.

Hoje, existem muitos estudos para a implementação de distribuição em CC, porém, apesar de esses estudos terem comprovado maior eficiência, as tecnologias são relativamente novas e possuem um custo elevado, inviabilizando a implementação em grandes regiões. Por esse motivo, há implementações sendo feitas em microrredes, para consolidar o conhecimento e a confiabilidade.

Porém, a distribuição CC tem algumas desvantagens, uma delas, é ausência de passagem do nível de tensão por zero. Sendo em CC, não haverá a passagem da corrente e tensão por zero, como na tensão em CA, dificultando o desligamento de cargas, interrupção da tensão e corrente, podendo ocorrer arcos elétricos. Outro desafio é o aterramento, pois não se tem certeza de qual linha

aterrar, mas, se sabe que por segurança, deve-se aterrar



Um dos desafios da implementação da rede CC, também, é a falta de legislação, assim como nas microrredes mencionadas anteriormente. Com isso, têm-se estudos para definir qual nível de tensão será mais apropriado para a implementação.

2.4.3 Níveis de tensão

Rodriguez-diaz et al. (2016) separaram algumas faixas de tensões para diferentes cenários. As cargas de baixa potência, menores de 0,4 kW, entre 24 VCC e 48 VCC, correspondem à maioria dos dispositivos em quartos, salas e áreas ao ar livre de uma residência, por exemplo, lâmpadas e alguns equipamentos eletrônicos, portanto, tornando essa tensão a mais adequada para esse cenário, maximizando a segurança.

Aparelhos localizados em cozinhas e lavanderias, normalmente, representam elementos de média potência, entre 0,4 kW e 10 kW, sendo a faixa de tensão adequada entre 230 VCC e 400 VCC. Já elementos de alta potência, acima de 10 kW, com a tensão adequada de 538 VCC ou maior, são elementos comuns em instalações de edifícios, por exemplo, painéis fotovoltaicos, turbinas eólicas, células de combustível, sistemas de armazenamento de energia, os sistemas de ar-condicionado, elevadores e postos de carga de veículos elétricos.

Nestes casos de tensão mais elevada, o uso da implementação de microrredes com barramentos bipolares de tensão é indicado. A Figura 4 apresenta alguns padrões, códigos e aplicações utilizados em baixa tensão de corrente contínua.

2.4.4 Topologia unipolar e bipolar

Existe, em uma microrrede CC, basicamente, duas formas de implementação em baixa tensão,

unipolar e bipolar. Uma rede unipolar possui um único barramento de dois fios, para alimentar as cargas ou receber energia proveniente da geração das microrredes. Em sua maioria, a rede unipolar é a mais empregada até o momento, sendo utilizada há algum tempo em data centers e em sistema de telecomunicações. No caso das redes bipolares, têm-se dois barramentos, com três fios disponíveis; tais cargas podem ser conectadas a um ou a dois desses barramentos, como no caso das cargas de potência elevada. A utilização da rede bipolar evita as perdas de transmissão, pois conduzem uma mesma carga com metade da corrente que seria necessária em uma rede unipolar, tendo como consequência direta, a redução da área de cabo, e assim, a diminuição do custo de construção de uma microrrede (MOIA, 2016).

As redes bipolares, segundo Salonen et al. (2008) e Kakigano, Momose e Hayakawa (2008), possuem alguns benefícios, se comparadas às redes unipolares, como um menor custo de manutenção e reparo, menor investimento inicial, entre outros fatores que a tornam economicamente mais vantajosas.

2.4.5 Implementação de microrredes em CC

Ainda, segundo Moia (2016), muitos estudos e pesquisas vêm sendo feitos atualmente. Um exemplo de implementação prática, em nível nacional, é a pesquisa feita pela Fundação Certi (Centro de Referência em Tecnologias Inovadoras) em parceria com a Universidade Federal de Santa Catarina, com apoio financeiro da empresa Engie, que trabalha com uma rede híbrida (CC + CA). Ainda podem ser citados alguns projetos internacionais, como o consórcio de empresas

intitulado Emerge Alliance; Sendai Project, no Japão; The Residential Microgrid of Am Steinweg, na Alemanha; The CERTS Testbed, nos Estados Unidos.

Para a implementação dessas microrredes em CC, há a necessidade de conversores estáticos CA-CC (retificadores), já que o atual sistema elétrico nacional e da maioria dos países, tem por padrão a distribuição em CA. Segundo Moia (2016), algumas características relevantes desses conversores são:

- Função de conversão de energia básica, ou seja, um retificador deve gerar CC a partir de CA.
- Bidirecionalidade em fluxo de potência.
- Eficiência na conversão (baixas perdas).
- Capacidade de incorporar diferentes funções para o sistema. Capacidade de impor correntes de alta qualidade.
- Volume total e peso.
- O volume e peso dos componentes passivos, incluindo filtros de EMC (*Electromagnetic Compatibility*).
- O custo do sistema completo.
- Confiabilidade.
- Segurança elétrica e aterramento.
- Complexidade.

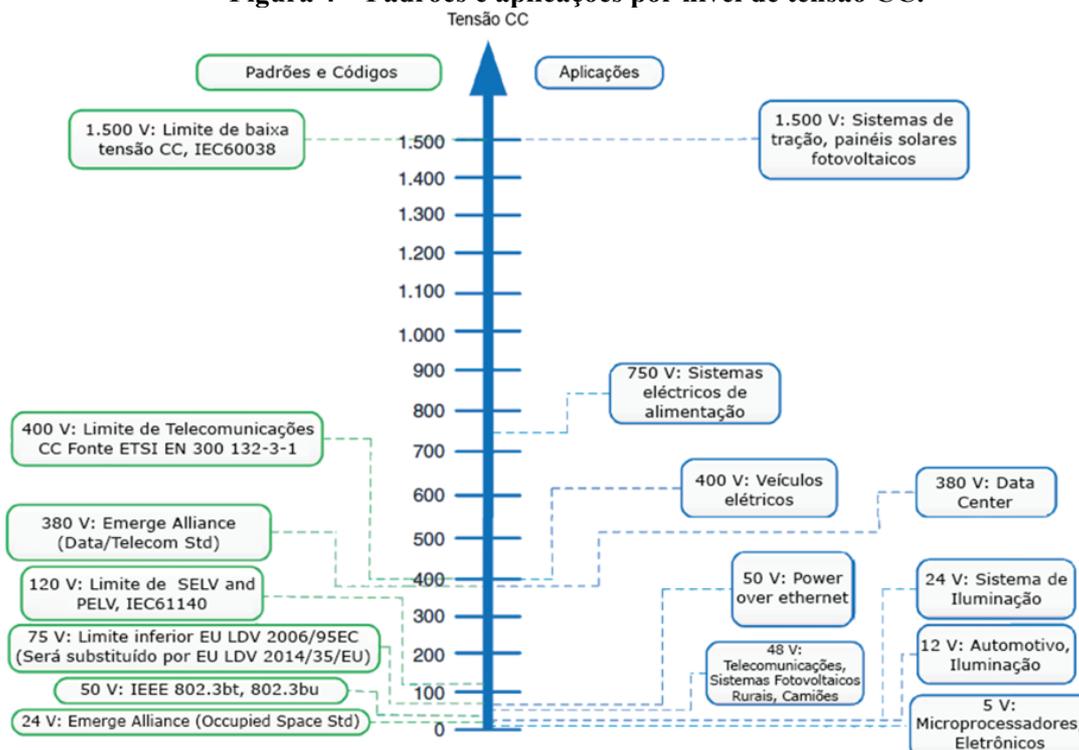
Moia (2016) ainda afirma que as principais funções dos conversores na rede de distribuição CC podem ser:

- Controlar o fluxo de potência.
- Regular a tensão de barramento total.
- Criar o balanço parcial das tensões de barramento.
- Garantir correntes senoidais no lado CA.
- Promover o equilíbrio de correntes nos três condutores no lado CC.
- Fornecer potência reativa para a rede do lado CA, se necessário.
- Operar como filtro ativo, se necessário.

Além do retificador, para o funcionamento a implementação das microrredes, podem ser empregados balanceadores de tensão (VB – do inglês Voltage Balancer) e/ou redistribuidores de corrente (CR – do inglês Current Redistributor). Existem diferentes topologias para a implementação desses conversores, mas apenas algumas são muito utilizadas em sistemas de potência, devido à comprovada eficiência, custo e confiabilidade (MOIA, 2016).

Segundo Rodriguez et al. (2005) e Teichmann e Bernet (2005), atualmente os conversores CA-CC mais utilizados são o VSR (Voltage Source Rectifier) a dois níveis, e o conversor NPC (Neutral Point Clamped), a três níveis. Esses conversores funcionam por modulação de largura de pulsos (PWM - do inglês Pulse-Width Modulation) bidirecionais.

Figura 4 – Padrões e aplicações por nível de tensão CC.



Fonte: RODRIGUEZ-DIAZ *et al.* (2016, p. 23, tradução livre).

Como mencionado anteriormente, atualmente, existem algumas poucas cargas que foram projetadas para operarem diretamente em uma rede CC, entre elas, podem ser citados os data centers, equipamentos de redes de telecomunicações e nobreaks.

Apesar de não haver muitos equipamentos que operam diretamente em rede CC, tem-se a possibilidade de desenvolvimento de novos produtos para operar em tal tipo de rede. Grande parte dos equipamentos utilizados no cotidiano opera em CC e, para funcionar, fazem uso de um conversor CA-CC na entrada do circuito. Para permitir a alimentação destes mesmos produtos em CC, há a possibilidade de uma adaptação, eliminando apenas o conversor CA-CC do produto. A remoção deste estágio de conversão traz consigo uma redução das perdas provenientes da retificação da tensão de entrada.

Entretanto, existem ainda alguns equipamentos que têm seu funcionamento dependente de uma alimentação CA, como, por exemplo, condicionadores de ar e geladeiras. Nesses casos, há a possibilidade de usar conversores CC-CA que, inclusive, são atualmente utilizados como maneira de aumentar o rendimento de motores. A mudança para uma rede de alimentação CC tornaria dispensável a conversão CA-CC na entrada do circuito, posicionada antes da conversão CC-CA que permite o aumento do rendimento. Fica evidente que, desse modo, pode-se evitar as perdas decorrentes desse estágio de condicionamento do valor da tensão de entrada.

Por fim, ressalta-se que existe a possibilidade de se criar produtos para fazer a conversão, nos

casos mais específicos, enquanto a indústria se adapta a esse provável novo cenário de distribuição de energia.

3 COMPORTAMENTO DE PRODUTOS ELETRÔNICOS EM ALIMENTAÇÃO CC

3.1 Medidas das tensões de barramento CA e CC

Embora alimentados em corrente alternada (CA), grande parte dos produtos eletrônicos mantêm seu funcionamento baseado em tensão contínua, ou seja, o sinal de entrada passa por um processo de retificação para que a tensão fornecida seja adequada ao circuito conectado. Desse modo, seguindo com a possibilidade de distribuição e/ou implementação de microrredes em corrente contínua (CC), é interessante a avaliação do comportamento destes equipamentos eletrônicos de uso residenciais e comerciais quando submetidos a CC, uma vez que tipicamente foram projetados para CA. Para isto, foram levantados os parâmetros elétricos em laboratório de alguns produtos eletrônicos de uso comercial e residencial, tanto com alimentação em CA quanto CC.

Primeiramente os equipamentos foram testados com alimentação em CA, 220 V eficaz (nível de tensão nominal do estado de Santa Catarina), adquiridos os principais parâmetros elétricos, como a potência, a corrente de entrada, o fator de potência, a THD (taxa de distorção harmônica) e, em tendo um retificador, o valor da tensão de barramento CC, após a retificação.

Tabela 4 – Tensões de entrada e de barramento – alimentações CC e CA.

Produto	220 VCA		320 VCC	
	Entrada RMS ¹	Barramento VCC ²	Entrada ¹	Barramento VCC ²
Fonte de computador com alto fator de potência	230,3 V	376 V	320,4V	375 V
Fonte de computador genérica com baixo fator de potência	226,4 V	295 V	320,5V	318 V
Reator Eletrônico com alto fator de potência para lâmpadas fluorescentes tubulares T5 – Fabricante A	222,6 V	409 V	321,1V	409 V
Reator Eletrônico com alto fator de potência para lâmpadas fluorescentes tubulares T5 – Fabricante B (2x14 W)	223,3 V	395 V	320,3V	396 V
Reator Eletrônico com alto fator de potência para lâmpadas fluorescentes tubulares T5 – Fabricante B (2x28 W)	223,3 V	395 V	320,0V	395 V
Fonte (Driver) para LEDs	227,5 V	307 V	321,0V	318 V
Lâmpada Fluorescente Compacta (CFL) 7 W	226,3 V	289 V	320,8V	319 V
Lâmpada Fluorescente Compacta (CFL) 15 W	225,4 V	278 V	320,9V	318 V

Lâmpada LED 7 W	223,1 V	227 V	320,2V	319 V
Fonte para notebook	228,0 V	308 V	320,9V	317 V
Reator Eletrônico com alto fator de potência para lâmpadas fluorescentes tubulares T8/T10 – fabricante A (2x32 W)	227,6 V	342 V	320,4V	510 V
Reator Eletrônico com alto fator de potência para lâmpadas fluorescentes tubulares T8/T10 – fabricante B (2x40 W)	222,0 V	339 V	321,9V	498 V
Reator Eletrônico com alto fator de potência para lâmpadas fluorescentes tubulares T8/T10 – fabricante C (2x40 W)	225,2 V	340 V	321,4V	504 V

1 Medida obtida por meio de um analisador de potência modelo PA1000 do fabricante Tektronix.

2 Medida obtida por meio de um multímetro modelo TDS3054B do fabricante Tektronix.

Em seguida, tais equipamentos foram ensaiados em CC, sendo que o valor da tensão de entrada foi de 320 V, próximo do valor de pico da tensão CA comercial disponível. A tabela 4 apresenta os produtos avaliados e os valores das tensões elétricas obtidas.

A análise da tabela 4 mostra a diferença da tensão de barramento medida em cada equipamento, mostrando crescimento desse parâmetro na troca de alimentação CA para CC, especialmente para os produtos que empregam um retificador com filtro capacitivo sem correção do fator de potência. Esse resultado deriva da existência da ondulação de tensão nos capacitores do barramento CC (variação decorrente do tempo de carga e descarga dos capacitores de filtro quando alimentados tipicamente por tensões alternadas), não existente para a alimentação CC já que, praticamente, não há oscilação que cause a descarga desses capacitores, devido a uma fonte de tensão CC imposta na entrada.

No caso dos equipamentos que empregam correção de fator de potência (PFC, do inglês *Power Factor Correction*), destaca-se que a tensão de barramento medida em CA apresenta o mesmo valor médio encontrado para a alimentação em CC, para onde se aplica um circuito de correção ativa,

caso da fonte de computador e os reatores eletrônicos para lâmpadas fluorescentes do tipo T5. Além disso, percebeu-se que o circuito empregado nestes produtos é um conversor clássico *boost pfc*, capaz de elevar a tensão fornecida a níveis superiores ao da própria entrada, justificando os valores obtidos nos testes.

Para os equipamentos que empregam correção do fator de potência de modo passivo, caso dos reatores aplicados às lâmpadas T8/T10, percebeu-se uma elevação excessiva na tensão do barramento. Tal comportamento pode ser entendido ao notar que esse ajuste é feito por meio do uso de um circuito do tipo *charge pump*, composto por filtro que emprega indutores e capacitores, suscetíveis aos efeitos de altas frequências, e que ao entrar em ressonância com a frequência de comutação dos transistores, têm suas tensões elevadas a níveis que podem levar o produto a falha.

Um caso que também se mostrou interessante é a fonte de computador com PFC, onde a tensão de barramento é mais alta do que o valor de pico da tensão fornecida. A figura 5 mostra as formas de onda para essa fonte, que faz uso de um conversor elevador típico para realizar tal correção, elevando o nível de tensão do barramento para valores próximos a 380 VCC.

Figura 5 – Formas de onda das tensões de entrada e barramento: A)CA; B)CC: A) Tensão do barramento para alimentação CA; B) Tensão de entrada e do barramento para alimentação CC – Fonte de Computador com PFC

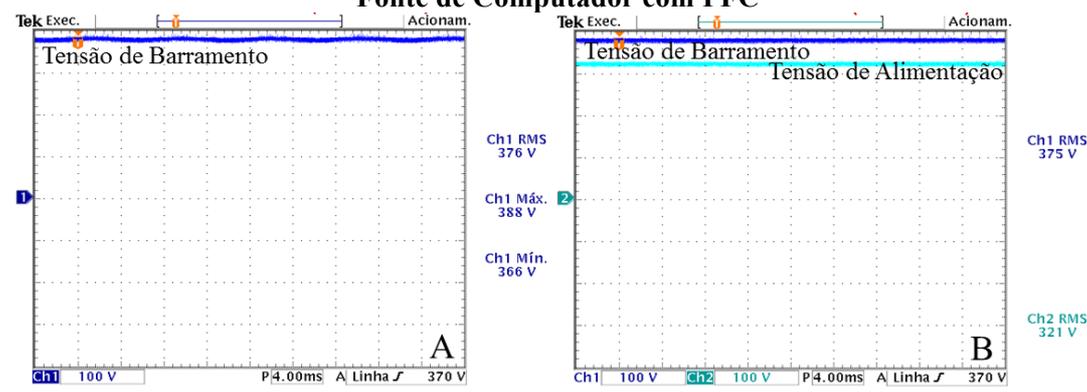
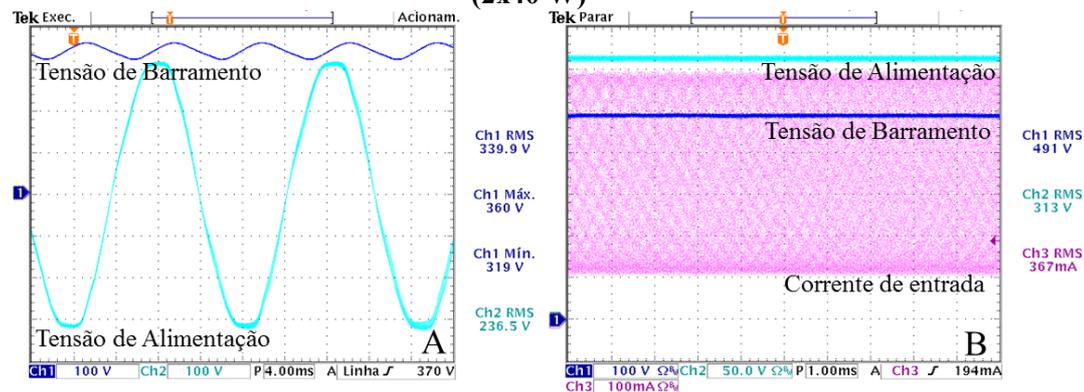


Figura 6 – Formas de onda das tensões de entrada e barramento: A) CA; B)CC – Reator Eletrônico com alto fator de potência para lâmpadas fluorescentes tubulares T8/T10 – fabricante B (2x40 W)



Outro detalhe notável nos testes para tensão contínua deste mesmo equipamento foi a dificuldade apresentada pela fonte em iniciar seu funcionamento, possivelmente graças ao circuito que tem a função de corrigir o fator de potência, tentando fazer de alguma forma um sincronismo com a tensão alternada da rede elétrica. Para a inicialização da fonte, a conexão e desconexão do plugue da tomada foram necessárias algumas vezes, até que a fonte entre em operação.

De maneira geral, os produtos apresentaram um bom funcionamento na mudança de CA para CC, funcionando de maneira adequada, sem oscilações e mantendo a potência nominal semelhante ao valor apresentado em CA.

Entretanto, como visto na comparação entre as tensões, os reatores com filtros passivos na entrada, que empregam a topologia típica *charge pump*, apresentaram um valor de tensão de barramento muito maior para a tensão em CC do que o apresentado em alimentação CA. Ao atingir um valor próximo a 500 V no barramento, a potência

consumida por estas lâmpadas aumentou a um valor bastante significativo, acima da potência nominal indicada pelo fabricante, podendo levar à redução da vida útil do produto ou ainda, a falha deste. A figura 6 mostra as formas de onda para as tensões desse reator.

3.2 Medidas de corrente e potência CA e CC

Além dos parâmetros de tensão medidos nos produtos testados, outros dois parâmetros de análise necessários são o comportamento apresentado pela corrente de entrada de cada um dos circuitos e a potência consumida por estes. A tabela 5 evidencia os valores obtidos por meio de um analisador de potência para os produtos em questão.

Observa-se que a potência de saída se manteve na maioria dos equipamentos testados, tanto em CA como em CC, e por consequência, graças à tensão de entrada ser maior na alimentação em CC, a corrente de entrada diminuiu, comparativamente com a CA.

Tabela 5 – Medidas de corrente e potência de entrada – alimentações CC e CA.

Produto	220 VCA		320 VCC	
	Corrente Arms (entrada)	Potência	Corrente (entrada)	Potência
Fonte de computador com alto fator de potência	428,25 mA	79,45 W	246,48 mA	78,93 W
Fonte de computador genérica com baixo fator de potência	771,68 mA	85,19 W	251,51 mA	80,41 W
Reator Eletrônico com alto fator de potência para lâmpadas fluorescentes tubulares T5 – Fabricante A (1x14 W)	91,44 mA	17,64 W	60,81 mA	17,51 W
Reator Eletrônico com alto fator de potência para lâmpadas fluorescentes tubulares T5 – Fabricante A (2x14 W)	149,78 mA	31,80 W	98,53 mA	31,64 W
Reator Eletrônico com alto fator de potência para lâmpadas fluorescentes tubulares T5 –	148,83 mA	31,88 W	99,61 mA	31,84 W

Fabricante A (1x28 W)				
Reator Eletrônico com alto fator de potência para lâmpadas fluorescentes tubulares T5 – Fabricante A (2x28 W)	268,62 mA	59,46 W	187,48 mA	59,94 W
Reator Eletrônico com alto fator de potência para lâmpadas fluorescentes tubulares T5 – Fabricante B (2x14 W)	149,16 mA	32,93 W	108,66 mA	34,79 W
Reator Eletrônico com alto fator de potência para lâmpadas fluorescentes tubulares T5 – Fabricante B (2x28 W)	267,45 mA	59,29 W	184,55 mA	59,06 W
Fonte (Driver) para LEDs	103,38 mA	8,49 W	28,51 mA	7,72 W
Lâmpada Fluorescente Compacta (CFL) 7 W	58,68 mA	6,56 W	39,82 mA	7,20 W
Lâmpada Fluorescente Compacta (CFL) 15 W	112,18 mA	14,52 W	55,64 mA	16,32 W
Lâmpada LED 7 W	42,55 mA	7,12 W	23,24 mA	7,40 W
Fonte para notebook	131,77 mA	14,63 W	45,57 mA	14,53 W
Reator Eletrônico com alto fator de potência para lâmpadas fluorescentes tubulares T8/T10 – fabricante A (2x32 W)	296,29 mA	62,97 W	368,02 mA	104,85 W
Reator Eletrônico com alto fator de potência para lâmpadas fluorescentes tubulares T8/T10 – fabricante B (2x40 W)	318,81 mA	66,32 W	374,55 mA	108,47 W
Reator Eletrônico com alto fator de potência para lâmpadas fluorescentes tubulares T8/T10 – fabricante C (2x40 W)	367,71 mA	79,19 W	416,60 mA	123,01 W
Ferro de Passar *	4,58 A	1,01 kW	4,54 A	991,87 W

* Tensão aplicada de 220 V na alimentação em CC, por se tratar de uma carga totalmente resistiva.

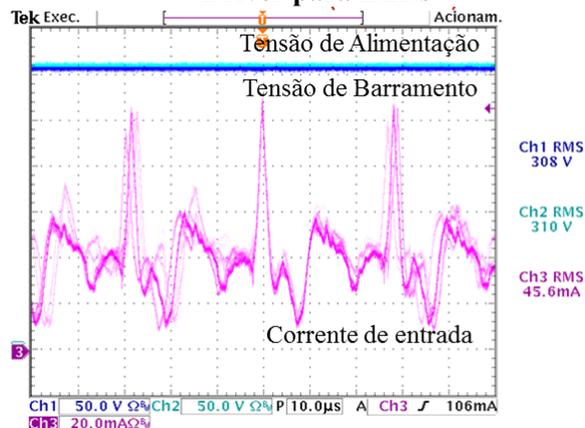
Entretanto, um conjunto de produtos se apresentou como contra-argumento à ideia da plena operação desses eletrônicos: acompanhando o aumento expressivo da tensão observado anteriormente, a corrente de entrada dos reatores eletrônicos com filtros passivos trouxe um salto significativo nas medidas de potência na entrada dos circuitos.

A diferença entre os resultados obtidos para as entradas em CA e CC mostraram uma razão cerca de 60% maior para a alimentação com tensão contínua. Essa alteração representa risco ao pleno funcionamento dos equipamentos e potenciais danos se percebidos por um período prolongado. Nos testes realizados para esse estudo, ao perceber a alteração nas medidas, o tempo de observação sobre estes produtos foi reduzido a espaços curtos, evitando os danos possíveis aos elementos pertencentes a cada um dos sistemas.

Outro ponto interessante a se destacar, embora não perceptível de maneira visual e mantendo a potência constante na saída, a visualização das formas de onda da corrente de entrada apresentou oscilações inesperadas em relação à natureza da alimentação CC, como é o caso da fonte de LEDs, mostrada na figura 7. Aplicando um valor contínuo de tensão na entrada, o esperado para a corrente seria de um formato contínuo, com o mínimo possível de variação. Contrariamente, o resultado visualizado foi a presença de picos de corrente,

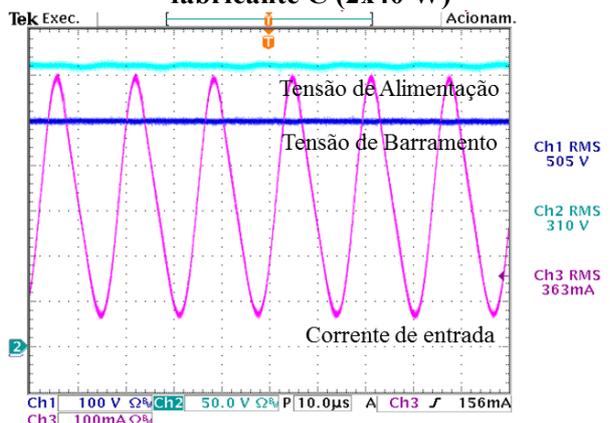
podendo levar a instabilidade no funcionamento pleno do circuito, podendo causar uma possível redução na vida útil do produto.

Figura 7 – Formas de onda para alimentação CC – Driver para LEDs



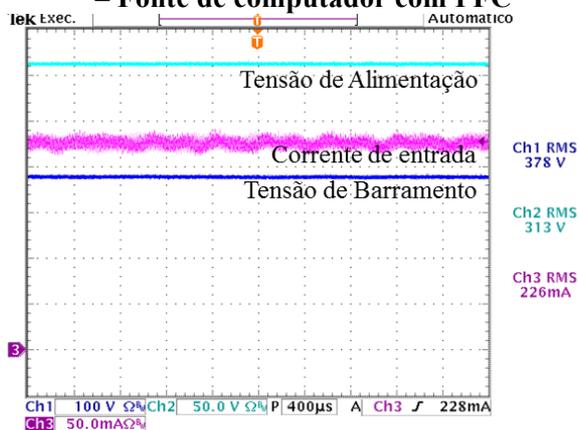
Comprovando a divergência vista nos valores de potência analisados para os reatores munidos de filtro passivo, apresentada na figura 8, evidencia uma corrente de aparência senoidal, mesmo com uma alimentação puramente contínua.

Figura 8 – Formas de onda para alimentação CC – Reator Eletrônico com alto fator de potência para lâmpadas fluorescentes tubulares T8/T10 – fabricante C (2x40 W)



Alguns dos produtos demonstraram comportamento adequado com as formas de ondas da corrente de entrada praticamente contínua, sem ou com poucas oscilações, o que em tese, teriam menos efeito sobre o funcionamento dos circuitos. A figura 9 mostra o formato de onda para a corrente de entrada de uma fonte de computador com PFC, que não apresenta picos expressivos nos valores medidos.

Figura 9 – Formas de onda para alimentação CC – Fonte de computador com PFC

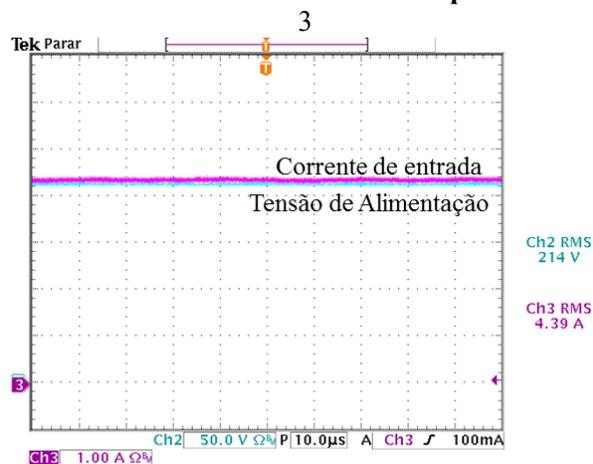


Dentre todos os experimentos, um dos que apresenta situação diferenciada em comparação aos casos já visualizados é composto exclusivamente por carga resistiva, mais especificamente, um ferro de passar roupas. Retomando conceitos básicos de circuitos em corrente alternada, percebe-se a comprovação da equivalência entre o parâmetro de tensão eficaz (RMS) de uma onda alternada, com um nível CC de mesmo valor numérico, quando aplicado a uma carga puramente resistiva.

Desse modo, para evitar danos ao produto, ultrapassando suas características de resistência a efeitos térmicos, o ferro de passar roupas foi ligado

a uma tensão CC de 220 V ao invés da usada em todos os outros testes (320 V). A análise da tabela 5 mostra que o funcionamento do ferro de passar foi equivalente tanto em CA como em CC, mesmo na tensão 220 VCC. O resultado das medições de tensão e corrente de entrada em alimentação CC pode ser visto na figura 10.

Figura 10 – Formas de onda para alimentação CC – Ferro de Passar Roupas



Em suma, dos resultados experimentais obtidos, percebe-se que os produtos eletrônicos que fazem uso de retificador a filtro capacitivo com baixo fator de potência, assim como os produtos eletrônicos que fazem a correção do fator de potência de maneira ativa, obtiveram, do ponto de vista da potência elétrica, resultados semelhantes. Desta forma, tais produtos poderiam ser conectados diretamente em uma rede elétrica em corrente contínua com nível de 320 V. No entanto, equipamentos que são cargas puramente resistivas ou que empregam motores CA, a conexão direta não seria possível em CC. Ainda, outros equipamentos se mostraram que apesar de funcionarem, os valores obtidos nos parâmetros elétricos quando alimentados em CC não estão condizentes aos valores nominais projetados em CA.

4 CONCLUSÃO

As microrredes em CC possuem várias vantagens apresentadas no decorrer deste trabalho, como: redução de perdas de transmissão e distribuição; redução de custos do sistema de transmissão; redução de impactos ambientais; melhoria da qualidade de energia elétrica da rede; aumento da confiabilidade e capacidade do sistema como um todo. Mas, também apresentam alguns desafios, que atualmente são: custos elevados, limitações técnicas, legislação e necessidade de comunicação de dados de alto desempenho.

Foram realizados alguns testes em alguns produtos eletrônicos de uso residencial com alimentação em corrente contínua, onde foi visto que a maioria dos circuitos comercializados atualmente não apresentam problemas sob esse novo sistema de alimentação proposto. Esses resultados não encorajam a conexão de todo e qualquer produto projetado para a operação em CA em uma rede de alimentação puramente CC (verificando que uma parcela desses produtos não apresentou comportamento esperado), mas reforça que muitos deles não necessitam de modificações para um funcionamento aceitável.

Outro ponto reforçado pelos resultados dos testes é o uso de 320 VCC como padrão compatível com a maioria dos produtos, já que esses apresentaram funcionamento adequado sob esse nível de tensão, uma vez tais equipamentos testados foram projetados para operarem com tensão eficaz CA de 220 V ou multi-tensão. No entanto, a alimentação de cargas puramente resistivas, caso do ferro de passar roupa, seriam adequadamente alimentadas se fornecido um nível de tensão CC numericamente igual ao valor eficaz da tensão de rede CA, o qual o produto foi projetado. Esses ajustes poderiam ser permitidos com o auxílio de conversores que permitam a adequação dos produtos que se encontrem fora do padrão estabelecido.

Levando em consideração essas características apresentadas das microrredes em CC, conclui-se que a implementação da mesma traz uma série de vantagens, tornando sua implementação plausível, apesar de possuir alguns pontos negativos; porém, desses pontos, apenas os técnicos são mais problemáticos. Ainda, as legislações nesta área devem ser discutidas para se determinarem os parâmetros a serem normatizados. E o custo elevado se dá pelo fato de ser uma tecnologia nova de pouca produção. Das limitações técnicas, estão o aterramento e ausência da passagem por zero, mas, pode-se fazer desses, o propósito de novas pesquisas e tornar as microrredes em CC totalmente viável.

Como forma de extensão dos estudos, surge a ideia do desenvolvimento de um adaptador que permite adequar os produtos comercializados atualmente ao novo sistema de distribuição em corrente contínua. Partindo do pressuposto levantado pelos testes realizados e verificando-se a viabilidade do uso de um nível de tensão de 380 VCC como padrão à rede de distribuição, o circuito proposto serviria para ajustar a tensão fornecida pela rede, reduzindo a um nível mais baixo de 320 VCC.

Vale lembrar que esses pressupostos dependem da ideia de que os produtos atuais já tenham um

bom comportamento e não tenham problemas com o funcionamento de seus circuitos em uma rede de distribuição que forneça 320 VCC, devendo apresentar resultados similares aos observados nos produtos que obtiveram respostas adequadas sob o regime contínuo de fornecimento de energia.

5 REFERÊNCIAS

ALCÂNTARA, Márcio Venício Pilar. Smart grids – Redes Inteligentes: Microrredes inteligentes: um novo modelo de negócio para a distribuição de energia elétrica. **O Setor Elétrico**, São Paulo, p.36-45, dez. 2011. Disponível em: <<http://www.oseletrico.com.br/web/revista/revista-eletronica/book/32-dezembro-2011/4-2011.html>>. Acesso em: 19 out. 2016.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Perdas de energia**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/metodologia-distribuicao/-/asset_publisher/e2INtBH4EC4e/content/perdas/654800>. Acesso em: 19 out. 2016.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Smart Grid**. Brasília: MME, 2011. 229 p. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/1256641/Relatxrio_GT_Smart_Grid_Portaria_440-2010.pdf/3661c46c-5f86-4274-b8d7-72d72e7e1157>. Acesso em: 19 out. 2016.

DALZIEL, Charles F. **The effects of electric shock on man**. Geneva: International Labour Office, 1961. Disponível em <http://www.electriciancalculators.com/dalziel/dalziel_study.pdf>. Acesso em: 20 out. 2016

EIA - Energy Information Administration. **International Energy Outlook 2016**. 11 Mai. 2016. Disponível em: <<http://www.eia.gov/forecasts/ieo/electricity.cfm>>. Acesso em: 23 set. 2016.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2017**: versão Workbook – dados preliminares. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaaEletrica/Forms/Anurio.aspx>>. Acesso em: 23 nov. 2017. EPE - Empresa de Pesquisa Energética.

Projeção da demanda de energia elétrica: para os próximos 10 anos (2017-2026). Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisas Energéticas, jan. 2017. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/DEA%20001_2017%20-%20Proje%C3%A7%C3%B5es%20da%20Demanda%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202017-2026_VF.pdf>. Acesso em: 23 nov. 2017.

- HELDWEIN, Marcelo Lobo. **Especulando sobre o futuro**: Distribuição em CC para a Integração de Fontes Distribuídas. Santa Maria, 2010. 52 slides, color. Disponível em: <http://coral.ufsm.br/gepoc/sepoc/sepoc2010/progpara_arquivos/Distribuicao_CC_SEPOC_2010.pdf>. Acesso em: 20 Out. 2016.
- HELDWEIN, Marcelo Lobo. **Microredes em Corrente Contínua**: Qualidade de Fornecimento e Eficiência em Futuras Redes de Distribuição. 32 p. Disponível em: <http://marceloheldwein.paginas.ufsc.br/files/2012/09/Heldwein_UFSC_2009.pdf>. Acesso em: 3 nov. 2016.
- INEE - Instituto Nacional de Eficiência Energética. **Contribuição do Instituto Nacional de Eficiência Energética INEE à Audiência Pública Nº 010/2006 para alterar a Resolução Normativa nº 265/03 da ANEEL sobre os serviços ancilares**. Rio de Janeiro: Instituto Nacional de Eficiência Energética. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2006/010/contribuicao/inee_-_instituto_nacional_de_efici%C3%Aancia_energetica.pdf>. Acesso em: 02 Nov. 2016.
- KAKIGANO, H. et al. Fundamental characteristics of DC microgrid for residential houses with cogeneration system in each house. **2008 Ieee Power And Energy Society General Meeting - Conversion And Delivery Of Electrical Energy In The 21st Century**, v. 1, jul. 2008. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- MOIA, Joabel. **Sistema de conversão estática CA-CC bidirecional aplicado à microrredes CC bipolares**. 2016. 288 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2016. Disponível em: <<http://www.bu.ufsc.br/teses/PEEL1679-T.pdf>> Acesso em: 19 out. 2016.
- RESENDE, Tatiana. **Perdas na distribuição**: baixa tensão, altos prejuízos -- Reportagem Especial Canal Energia. 2013. Disponível em: <<http://www.abradee.com.br/imprensa/artigos-e-releases/1018-perdas-na-distribuicao-baixa-tensao-altos-prejuizos-reportagem-especial-canal-energia>>. Acesso em: 19 out. 2016.
- RIVERA, Ricardo; ESPOSITO, Alexandre Siciliano; TEIXEIRA, Ingrid. **Redes elétricas inteligentes (smart grid)**: oportunidade para adensamento produtivo e tecnológico local. 2013. Disponível em: <<http://bndes.gov.br/bibliotecadigital>>. Acesso em: 19 out. 2016.
- RODRIGUEZ-DIAZ, Enrique et al. Voltage-Level Selection of Future Two-Level LVdc Distribution Grids: A Compromise Between Grid Compatibility, Safety, and Efficiency. **Ieee Electrification Magazine**, v. 4, n. 2, p.20-28, jun. 2016. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- RODRIGUEZ, J.r. et al. PWM regenerative rectifiers: state of the art. **Ieee Transactions On Industrial Electronics**, [s.l.], v. 52, n. 1, p.5-22, fev. 2005. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- SALONEN, Pasi; KAIPIA, Tero; PELTONIEMI, Pasi; PARTANEN, Jarmo. **An lvdc distribution system concept**. 7 p. jun. 2008. Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics (NORPIE).
- SANNINO, A.; POSTIGLIONE, G.; BOLLEN, M.h.j.. Feasibility of a DC network for commercial facilities. **Ieee Transactions On Industry Applications**, v. 39, n. 5, p.1499-1507, set. 2003. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- STARKE, Michael; TOLBERT, Leon M.; OZPINECI, Burak. **AC vs. DC Distribution: A Loss Comparison**. 2008. 7 p. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?rep=rep1&doi=10.1.1.718.8874&type=pdf>>. Acesso em: 19 out. 2016.
- TEICHMANN, R.; BERNET, S.. A Comparison of Three-Level Converters Versus Two-Level Converters for Low-Voltage Drives, Traction, and Utility Applications. **Ieee Transactions On Industry Applications**, [s.l.], v. 41, n. 3, p.855-865, maio 2005. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).