

# GERENCIAMENTO DE POTÊNCIA BASEADO EM VETORES DE RESPOSTA AO PREÇO PARA O CONTROLE DE NANORREDES

Edivan L. Carvalho<sup>1</sup>, Lucas V. Bellinaso<sup>1</sup>, Carla A. Felipe<sup>2</sup>, Rafael Cardoso<sup>2</sup>, Leandro Michels<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Santa Maria - RS, Brasil

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Pato Branco – PR, Brasil  
e-mail: e.carvalho@ieee.org, lucas@gepoc.ufsm.br, carlaf@alunos.utfpr.edu.br, rcardoso@utfpr.edu.br, michels@gepoc.ufsm.br

**Resumo** – Este artigo propõe uma estrutura de controle baseada em vetores de resposta ao preço para o gerenciamento de potência em nanorredes. A principal contribuição é aplicar a teoria de preços associada a controladores *droop*. Nesta proposta o preço trata-se de uma variável de controle utilizada para a automação do sistema. Isso permite definir exatamente quando um elemento deve ser ligado, ou desligado em resposta ao preço. Portanto, evita-se o uso de estratégias de compartilhamento de potência durante todo o tempo, melhorando a eficiência do gerenciador de potência. Para avaliar a proposta, o Typhoon-HIL 602+ foi utilizado para obter resultados de simulação em tempo real. Os resultados incluem testes de inicialização do sistema, e de variação de carga. Adicionalmente, resultados experimentais são obtidos de um setup construído em laboratório. A nanorrede avaliada inclui um gerador fotovoltaico, banco de baterias, cargas c.c. gerenciáveis, e um conversor c.c.-c.a. para a interface com a rede elétrica.

**Palavras-Chave** – Controle *droop*, Geração distribuída, Gerenciamento de potência, Nanorredes.

## PRICE-RESPONSE VECTORS BASED POWER MANAGEMENT FOR NANOGIDS CONTROL

**Abstract** – This paper proposes a control strategy based on price response vectors for nanogrids power management. The main contribution is to apply the price theory with droop controls. In this proposal, the internal price is a control variable used for the nanogrid automation. This allows defining exactly when a power element must be turned on or turned off, in response to the price. This avoids the usage of a power-sharing strategy all the time, improving the efficiency of the nanogrid power management. To evaluate this proposal are used experimental results and the Typhoon-HIL 602+ to carry out real-time domain simulations. The system initialization and power disturbances tests are presented. In addition, an experimental setup was built to carry out experimental results. The evaluated nanogrid includes a photovoltaic generator, a battery bank, managed dc loads, and a dc-ac converter for the utility grid interfaces.

**Keywords** – Distributed generation, Droop control, Power management, Nanogrids.

## I. INTRODUÇÃO

Recentemente, o conceito de nanorredes c.c. tem sido discutido na literatura devido a crescente aplicação de energias renováveis em escala de distribuição [1]-[4]. Isso é interessante porque permite gerenciar cargas e geração distribuída de maneira local, e muitas vezes com uma interface direta com o usuário/prosumidor [5]-[6].

Nanorredes são semelhantes a microrredes em pequena escala [7]. Entretanto, [4] e [7] trazem uma separação simples porém efetiva para os termos microrredes e nanorredes: enquanto microrredes abrangem várias instalações elétricas ou edificações [8]-[11], nanorredes são definidas como um único domínio de tensão, tarifação e controle [12]. Isso significa que, enquanto microrredes são desenvolvidas, principalmente, para a interação com a rede elétrica, nanorredes estão relacionadas a propriedade individual do cliente [12]-[14]. Apesar de que uma interface com a rede pública ainda é necessária – devido a questões de controle e suporte de potência [14] –, esta separação comumente relaciona as nanorredes ao conceito de edifícios autossuficientes em energia (*Net-Zero Energy Building*) [12], enquanto as microrredes estão relacionadas a organização do sistema de potência [8]-[11].

Adicionalmente, normas relacionadas a sistemas de distribuição em corrente contínua, tais quais a série IEC 60364, preveem um sistema de gerenciamento para a operação inteligente das nanorredes, incluindo [13]: *i*) gerenciamento de energia, relacionado à otimização do sistema a longo prazo; e *ii*) gerenciamento de potência, necessário para o balanceamento de potência instantâneo. Essa estrutura é ilustrada de maneira genérica na Figura 1.

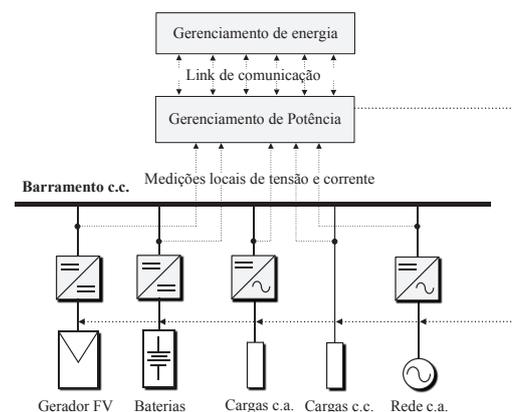


Fig. 1. Gerenciamento de energia elétrica para nanorredes residenciais (*net-zero energy buildings*).

O principal objetivo deste trabalho é o desenvolvimento do sistema de gerenciamento de potência, porque esta camada é necessária para garantir a estabilidade da rede e compartilhamento de potência.

Em relação às estratégias de controle para o gerenciamento de potência, diferentes trabalhos têm proposto máquinas de estados [5], [15]-[16], controladores *droop* [17] e controladores *droop* adaptativos [18]-[20].

Estas estratégias podem ser organizadas em sistemas de controle centralizados e descentralizados [8], [17]. Em controladores centralizados um *link* de comunicação é necessário para informar modos de operação, ou referências de potência para os conversores e suas malhas de controle [8]. Essa abordagem é comumente associada a máquinas de estados e sistemas supervisórios [5], [21].

Em abordagens de controle descentralizadas, uma estratégia de compartilhamento de potência é necessária – porque os conversores de potência não se comunicam entre si [17]. As estratégias de compartilhamento de potência mais comuns na literatura são os controladores *droop* [22]-[24]. Neste caso o gerenciamento de potência é baseado em uma estratégia de compartilhamento de potência, caracterizado por coeficientes de decaimento ( $m$ ) [25].

A Figura 2 mostra um exemplo de resposta transitória, considerando dois conversores iguais operando com controle *droop*. Primeiro, quando o coeficiente de decaimento é igual ( $m_1=m_2$ ), ambos os conversores processam o mesmo nível de potência [Figura 2.a]. Entretanto, quando  $m_1 \neq m_2$ , o compartilhamento de potência é proporcional ao coeficiente de decaimento de cada conversor [Figura 2.b] [25].

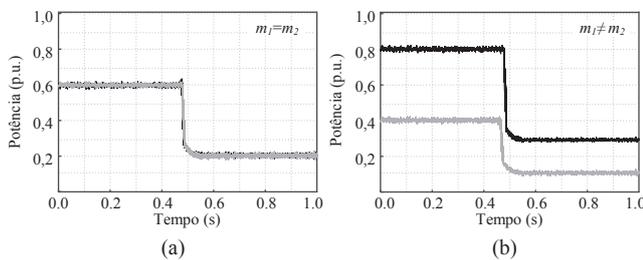


Fig. 2. Resposta dos controladores *droop* para dois elementos, considerando: (a) coeficientes  $m_1=m_2$ ; (b) coeficientes  $m_1 \neq m_2$

Aqui é possível notar uma desvantagem dos controladores *droop* em relação à automação do sistema: considerando coeficientes de decaimento fixos (sem *links* de comunicação), todos os elementos de potência devem contribuir para a regulação de tensão do barramento c.c. [25]-[29]. Isso significa que mesmo com energia excedente na nanorrede, fontes com alto custo de produção, como geradores a diesel, ou baterias com baixo estado de carga devem operar [5], [11]. Considerando o contexto de edifícios autossuficientes em energia, esse conceito reduz significativamente a eficiência da estratégia de gerenciamento de potência, não sendo ideal para a aplicação em nanorredes.

Por outro lado, em gerenciadores baseados em máquinas de estado, é possível definir exatamente quando uma fonte ou carga será ligada, ou desligada. Neste caso, um *link* de comunicação com maior largura de banda é necessário, porque um controlador centralizado define e informa aos conversores de potência, modos de operação pré-definidos [30]-[34].

Em [15] e [16] controladores *droop* foram associados com a sinalização de tensão do barramento c.c.. O problema é que esta abordagem apresenta maior desvio de tensão, não sendo ideal às cargas. Em [17] uma malha de controle externa é proposta para melhorar o controle de tensão. Entretanto, [15], [16] e [17] apresentam menor eficiência em relação ao gerenciamento, porque controladores *droop* são utilizados a nível primário.

Em [5] e [34] o gerenciamento de potência é baseado em máquinas de estados. O principal problema relacionado a [34] é que todo sistema deve ser remodelado para adicionar novos elementos, porque nenhuma metodologia é apresentada para a escolha dos estados de operação. Em [5], o gerenciamento de potência é baseado em teoria de preços. Isso permite simplificar o projeto de máquinas de estados. A principal desvantagem é que em [5], o desempenho do gerenciador depende de um sistema de medição rápido e preciso. Portanto, esta estratégia é sensível a falhas de comunicação, erros de medida, e quedas de tensão em cabos, o que não ocorre em controladores *droop*.

Como principal contribuição deste trabalho, são propostos vetores de resposta ao preço (VRPs). Esta proposta une características potenciais da máquina de estados de [5], e controladores *droop*. Considerando VRPs é possível garantir quando um conversor de potência opera em compartilhamento de potência, em potência nominal, ou mesmo desligado. Isso colabora para a eficiência do gerenciamento de potência no contexto de nanorredes e edifícios autossuficientes em energia. Adicionalmente são superadas desvantagens de [5], porque uma malha externa de controle baseada em *droop* é adicionada ao sistema de controle.

Para corroborar a proposta, o Typhoon-HIL 602+ é utilizado para obter resultados de simulação em tempo real. No Typhoon-HIL a nanorrede avaliada inclui um gerador fotovoltaico, um banco de baterias, três cargas c.c. gerenciadas e um conversor de tensão c.c.-c.a. para a conexão com a rede elétrica. Finalmente, um protótipo foi construído em laboratório para obtenção dos resultados experimentais.

## II. GERENCIAMENTO DE POTÊNCIA BASEADO EM VETORES DE RESPOSTA AO PREÇO

O gerenciamento de potência em resposta ao preço é baseado em uma estratégia de sinalização do barramento c.c.. A ideia principal é formar um preço interno para avaliar a energia disponível na nanorrede [4]:

- Quando a tensão do barramento c.c. sinaliza uma sobretensão, significa que há excesso de energia na nanorrede. Como resultado, o preço interno deve ser reduzindo, incentivando o consumo de energia de cargas com menor valor agregado (menor prioridade). Isso contribui para limitar a tensão do barramento c.c. porque o consumo de energia aumenta.
- Quando a tensão do barramento c.c. sinaliza um sub-tensão, significa que há falta de energia na nanorrede. Portanto, o preço interno deve ser aumentado, e cargas não-prioritárias devem ser desligadas.

Para a sinalização do barramento c.c., tensões de comparação são definidas para sinalizar a ocorrência de eventos transitórios. As tensões de comparação ( $v_{s1}$ ,  $v_{s2}$ , ...) representam limites superiores à tensão de referência  $v_{cc}$ ,

enquanto ( $v_{i1}$ ,  $v_{i2}$ , ...) representam as tensões de comparação inferiores à  $v_{cc}$ . Para o cálculo do preço interno, as seguintes condicionais são adotadas:

- O preço interno aumenta quando a tensão do barramento c.c. diminui durante um evento transitório, e cruza uma tensão de comparação, menor que a referência  $v_{cc}$ , na direção decrescente.
- O preço interno diminui quando a tensão do barramento c.c. aumenta durante um evento transitório, e cruza uma tensão de comparação, superior a referência, na direção crescente.

A Figura 3 ilustra a sinalização do barramento c.c. para o cálculo dos preços. Nesta proposta, o preço interno é uma variável inteira (\$0, \$1, \$2, ...) utilizada para sinalizar os modos de operação dos elementos de potência da nanorrede.

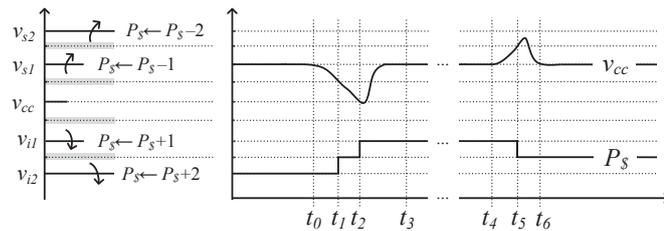


Fig. 3. Sinalização do barramento c.c. e cálculo do preço interno.

Neste exemplo, o preço aumenta em  $t_1$  e posteriormente em  $t_2$ , quando a tensão do barramento c.c. cruza tensões de comparação inferiores na direção decrescente ( $t_0-t_1$  e  $t_1-t_2$ ). Da mesma forma, o preço é reduzido em  $t_5$ , apenas quando a tensão do barramento cruza por uma tensão de comparação superior, na direção crescente. Observe que entre os limites de comparação há uma faixa de histerese onde o preço não muda.

Os modos de operação dos elementos de potência são definidos de acordo com as suas especificações de controle:

- **Cargas passivas:** compram energia da nanorrede, portanto, operam em dois modos de operação, (0) desligadas, ou (-2) comprando energia da nanorrede.
- **Fontes unidirecionais:** atuam vendendo energia para a nanorrede em três modos básicos de operação, (0) desligadas, (1) controle *droop* para regulação de tensão do barramento c.c., e (2) ligadas com potência nominal.
- **Elementos bidirecionais:** apresentam características de fontes e cargas, portanto, atuam em cinco modos de operação (-2, -1, 0, 1, 2). Nos modos (-1) e (1) atuam com controle *droop* para contribuir com a regulação de tensão do barramento c.c.. Exemplos de elementos bidirecionais são bancos de baterias, supercapacitores, e conversores de tensão c.c.-c.a. para conexão com a rede elétrica.

#### A. Vetores de Resposta ao Preço

Os modos de operação dos elementos de potência devem ser organizados de modo a garantir o equilíbrio de potência da nanorrede. Neste trabalho, vetores de resposta ao preço (VRPs) são propostos para esta organização. Para cada elemento de potência deve ser atribuído um vetor de resposta ao preço. De acordo com os VRPs, os elementos de potência atuam de maneira autônoma comprando ou vendendo energia de modo a manter o equilíbrio de potência.

Um VRP é um vetor que relaciona os preços com os modos de operação dos elementos de potência. Os preços são organizados em um vetor  $\mathbf{pvec}=[\$0, \$1, \$2, \dots]$ . Os vetores

VRPs devem ter o mesmo tamanho que o vetor  $\mathbf{pvec}$ . Os modos de operação são atribuídos em cada coluna em ordem crescente, de acordo com o vetor de preços ( $\mathbf{pvec}$ ).

Para o dimensionamento de um VRP devem ser parametrizados preços limites de compra e venda:

- Para as cargas é parametrizado o preço máximo de compra de energia ( $P_{\$-max}$ ).
- Para as fontes deve ser parametrizado o preço mínimo para vendas de energia ( $P_{\$-min}$ ).

Quando um elemento pode operar em modo compartilhamento de potência (*droop*), os modos (-1) ou (+1) são atribuídos na coluna relacionada aos preços limites  $P_{\$-max}$  e  $P_{\$-min}$ , respectivamente. Adicionalmente, o modo (11) pode ser utilizado quando um elemento apresenta  $P_{\$-max}=P_{\$-min}$ .

O modo de operação instantâneo de um elemento é obtido acessando o índice da coluna relacionada a um preço corrente. Por exemplo, considerando o conjunto de VRPs apresentado na Figura 4, o gerador fotovoltaico é desligado (0) quando o preço é igual a \$-1, atua em modo *droop* (1) em preço \$0, e em MPPT (2) para preços maiores.

$$\mathbf{pvec} (\$) = [-1 \ 0 \ 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8]$$

$$\text{Gerador FV (1)} = [0 \ 1 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2]$$

$$\text{Rede elétrica c.a. (2)} = [-2 \ -2 \ -1 \ 0 \ 1 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2]$$

$$\text{Carga de baixa prioridade (3)} = [-2 \ -2 \ -2 \ -2 \ -2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$\text{Carga de média prioridade (4)} = [-2 \ -2 \ -2 \ -2 \ -2 \ -2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$\text{Carga de alta prioridade (5)} = [-2 \ -2 \ -2 \ -2 \ -2 \ -2 \ -2 \ 0 \ 0 \ 0]$$

Fig. 4. Exemplo de vetores de resposta ao preço.

Para as cargas, o preço máximo de compra é definido de acordo com o seu nível de prioridade, por exemplo, a carga de alta prioridade é desligada apenas quando o preço for maior que \$6 porque apresenta maior valor do que uma carga de menor prioridade, desligada em \$4.

Além disso, é possível notar que os preços são utilizados para definir o controle de tensão do barramento. Neste exemplo, o conversor c.c.-c.a. controla o barramento c.c. em \$1 como inversor de tensão (-1), é desligado em \$2, e volta a controlar a tensão em modo retificador (1) com preço \$3.

#### B. Estrutura do Gerenciamento de Potência

A principal contribuição deste trabalho é a concepção de VRPs para associar controladores *droop* ao conceito de preços. Para isso os controladores *droop* são adicionados aos modos de operação (-1/1). O resultado é possível definir momentos exatos para ligar ou desligar determinado elemento de potência, assim como ilustrado na Figura 4.

A Figura 5 apresenta o diagrama de controle do gerenciamento de potência. Nesta proposta a Camada 3 é utilizada para definir o vetor de preços ( $\mathbf{pvec}$ ). O vetor de preços é utilizado para acessar os modos de operação dos conversores na Camada 3. Na Camada 2 a sinalização do barramento c.c. deve informar aos conversores de potência o preço e desvio de tensão. Como resultado, cada conversor atua de maneira autônoma, definindo seu modo de operação de acordo com seu respectivo VRP. A Camada 1 está relacionada às malhas de controle de tensão e corrente dos conversores de potência, incluindo algoritmos de MPPT, controladores *droop*, sincronização com a rede c.a., e outros.

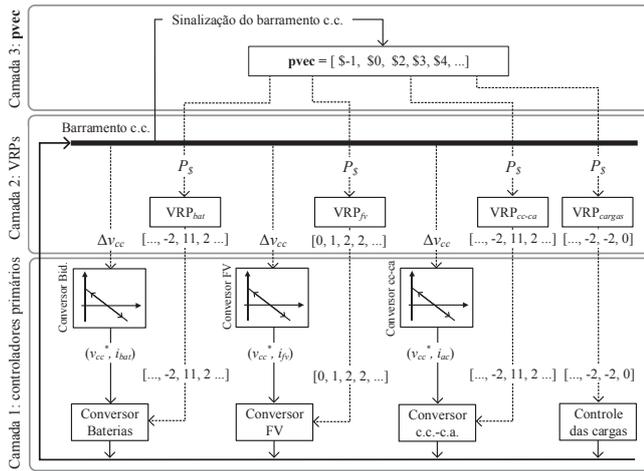


Fig. 5. Gerenciamento de potência baseado em VRPs.

Considerando o esquema de controle apresentado na Figura 5, esta proposta pode ser considerada uma estratégia de gerenciamento hierárquica.

### III. PARAMETRIZAÇÃO DOS VRPs

A parametrização do sistema inicia com a definição do vetor de preços **pvec**. O vetor de preços está relacionado com os limites de variação de tensão, permitidos ao barramento c.c.. Por exemplo, se é possível definir 9 tensões de comparação (positivas, e negativas) para o barramento c.c., o comprimento do vetor **pvec** deve ser (1x10). Além disso, o preço \$-1 pode ser adicionado, como fator de segurança, para desligar todas as fontes, se necessário. Desta forma, **pvec** é dado por:

$$\mathbf{pvec} = [-\$1 \ \$0 \ \$1 \ \$2 \ \$3 \ \$4 \ \$5 \ \$6 \ \$7 \ \$8]. \quad (1)$$

Após a definição do **pvec**, os vetores de resposta ao preço devem ser dimensionados para cada elemento de potência.

#### A. Cargas Passivas

Para definir o VRP de uma carga é necessário definir o seu preço máximo de compra. De acordo com conceitos simples de compra e venda é possível definir prioridade para cargas, simplesmente escolhendo de forma adequada o preço máximo de compra. Por exemplo, a energia é mais valorizada por cargas de maior prioridade, portanto, podem se manter ligadas com preços mais altos. Ao mesmo tempo, cargas de menor prioridade, devem ser desligadas caso o preço sinalizado aumente.

$$\mathbf{pvec} (\$) = [-1 \ 0 \ 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8]$$

$$\text{Carga de baixa prioridade (1)} = [-2 \ -2 \ -2 \ -2 \ -2 \ -2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$\text{Carga de média prioridade (2)} = [-2 \ -2 \ -2 \ -2 \ -2 \ -2 \ -2 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$\text{Carga de alta prioridade (3)} = [-2 \ -2 \ -2 \ -2 \ -2 \ -2 \ -2 \ -2 \ 0 \ 0]$$

Fig. 6. Vetores de resposta ao preço para as cargas.

Para as cargas, o modo (-2) é adicionado às colunas relacionadas aos preços inferiores ao preço máximo de compra ( $P_{\$-max}$ ), e o modo (0) é adicionado às colunas de maior preço. A Figura 6 mostra um exemplo, considerando três cargas gerenciáveis: *i*) carga de alta prioridade ( $P_{\$-max} = \$6$ ); *ii*) média prioridade ( $P_{\$-max} = \$5$ ); *iii*) baixa prioridade ( $P_{\$-max} = \$4$ ).

#### B. Fontes Unidirecionais

Para as fontes deve ser definido o preço mínimo ( $P_{\$-min}$ ) para venda de energia. Na coluna relacionada ao preço  $P_{\$-min}$  deve ser atribuído o modo de operação (1). Isso é coerente com a ideia de preços, porque em modo (1) fontes atuam em modo compartilhamento de potência, atuando com potência limitada para auxiliar na regulação de tensão do barramento c.c.. Para preços maiores são atribuídos o modo (2), permitindo vender o máximo de energia disponível.

Um exemplo de fonte unidirecional são os geradores fotovoltaicos. Neste caso, é interessante vender o máximo de energia, sempre que o preço for positivo. Portanto, \$0 pode ser definido como o preço mínimo de venda. A Figura 7 apresenta o VRP resultante desta parametrização.

$$\mathbf{pvec} = [-1 \ 0 \ 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8]$$

$$\text{Gerador FV (1)} = [0 \ 1 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2]$$

Fig. 7. Vetor de resposta ao preço do gerador fotovoltaico.

#### C. Elemento Bidirecional

Um elemento bidirecional pode operar como fonte ou carga, assim como bancos de baterias, e supercapacitores. Um conversor de tensão c.c.-c.a. por exemplo, pode atuar como inversor (-2, -1, 0) ou como retificador (0, +1, +2). Dois preços devem ser parametrizados para este caso, e os modos (-1) e (1) são atribuídos às colunas relacionadas ao preço máximo de compra e mínimo de venda, respectivamente. Além disso, os VRPs devem ser completados com os modos (-2, 0, 2), em ordem crescente. A Figura 8 apresenta dois exemplos de VRPs para elementos bidirecionais, considerando um banco de baterias e a rede elétrica c.a.. Os preços  $P_{\$-max} = \$2$  e  $P_{\$-min} = \$4$  são parametrizados para as baterias. Para a rede c.a. os preços limites de compra e de venda são parametrizados em \$1, ilustrando uma situação diferente. Neste caso o número (11) é atribuído a coluna relacionada ao preço \$1, sinalizando os modos de operação (-1/1).

$$\mathbf{pvec} = [-1 \ 0 \ 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8]$$

$$\text{Banco de baterias (1)} = [-2 \ -2 \ -2 \ -1 \ 0 \ 1 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2]$$

$$\text{Rede c.a. (2)} = [-2 \ -2 \ 11 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2]$$

Fig. 8. Vetores de resposta ao preço para elementos bidirecionais.

### IV. DESCRIÇÃO DA NANORREDE

Para validar a proposta, um protótipo da nanorrede foi construído em laboratório. O sistema avaliado inclui um conversor c.c.-c.c. bidirecional para a carga/descarga de baterias, um conversor c.c.-c.c. para geração fotovoltaica, três cargas gerenciáveis (alta, média e baixa prioridade) e um conversor c.c.-c.a. para a conexão com a rede pública de distribuição. Os vetores de resposta ao preço de cada elemento são apresentados na Figura 9.

A taxa da sinalização do barramento c.c. é igual à aquisição de tensão do barramento. As tensões de comparação são atualizadas a passo de 8 V. Esse valor foi definido de acordo com a metodologia apresentada em [33]. Como critério de projeto, o vetor **pvec** é definido de \$-1-\$8. Isso garante que a

máxima variação de tensão seja inferior a 500 V. Portanto, há uma margem de segurança para a operação da nanorrede, considerando que tensão máxima do capacitor de barramento é igual a 500 V.

$$\begin{aligned}
 p_{vec} &= [-1 \ 0 \ 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8] \\
 \text{Banco de baterias (1)} &= [-2 \ -2 \ -2 \ -1 \ 0 \ 1 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2] \\
 \text{Rede elétrica c.a. (2)} &= [-2 \ -2 \ 11 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2] \\
 \text{Gerador FV (3)} &= [0 \ 1 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2] \\
 \text{Carga de baixa prioridade (4)} &= [-2 \ -2 \ -2 \ -2 \ -2 \ -2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \\
 \text{Carga de média prioridade (5)} &= [-2 \ -2 \ -2 \ -2 \ -2 \ -2 \ -2 \ 0 \ 0 \ 0] \\
 \text{Carga de alta prioridade (6)} &= [-2 \ -2 \ -2 \ -2 \ -2 \ -2 \ -2 \ -2 \ 0 \ 0]
 \end{aligned}$$

Fig. 9. Vetores de resposta ao preço da nanorrede analisada

Os principais parâmetros dos elementos da nanorrede são apresentados na Tabela I. A Figura 10 apresenta os circuitos de potência e diagramas de controle. Neste artigo não são apresentados os projetos de controle, porque o foco é a camada de gerenciamento. Entretanto, os principais parâmetros dos controladores são apresentados na Tabela II. Adicionalmente, é considerado que as ações de controle funcionam em níveis independentes, ou seja, os níveis de controle superiores não interferem na estabilidade dos controladores inferiores.

## V. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO EM TEMPO REAL

Considerando o circuito de potência, e estruturas de controle apresentadas na Figura 10, a nanorrede foi simulada através do Typhoon-HIL 602+. As malhas de controle foram implementadas no processador digital de sinais TMS320F28379D do fabricante Texas Instruments.

TABELA I

| Componente                      | Parâmetro   |
|---------------------------------|---|
| Barramento c.c.                 | Capacitância ( $C_B$ ): 2.7 mF (500 V)            |
|                                 | Tensão nominal ( $v_{cc}$ ): 380 V                |
|                                 | Tensões de comparação: [..., 372, 380, 388,...] V |
| Banco de baterias               | Capacidade de carga: 17 Ah                        |
|                                 | Tensão nominal: 166 V-192 V                       |
|                                 | Corrente de carga: 5,00 A                         |
|                                 | Corrente de descarga: 5,00 A                      |
| Gerador fotovoltaico (emulador) | Potência nominal: 1 kW                            |
|                                 | $i_{sc}$ (1000 W/m <sup>2</sup> ): 9,79 A         |
|                                 | $i_{mppt}$ (1000 W/m <sup>2</sup> ): 9,21 A       |
|                                 | Tensão de circuito aberto: 138,60 V               |
|                                 | Tensão em MPPT: 114,30 V                          |
| Conversor c.c.-c.a.             | Potência nominal: 1,00 kW                         |
|                                 | Tensão nominal ( $v_{ca}$ ): 127 $V_{rms}$        |
|                                 | Frequência ( $f_{ca}$ ): 60 Hz                    |
| Cargas gerenciadas              | Alta prioridade (AP): 300 W                       |
|                                 | Média prioridade (MP): 200 W                      |
|                                 | Baixa prioridade (BP): 100 W                      |

TABELA II  
Parâmetros de Controle

| Parâmetro  | Descrição                                       | Valor                  |
|------------|---|------------------------|
| $f_{sv}$   | Freq. de amostragem das malhas de tensão        | 2.4 kHz                |
| $f_{si}$   | Freq. de amostragem das malhas de corrente      | 24 kHz                 |
| $f_{mppt}$ | Freq. de amostragem do MPPT                     | 2.4 Hz                 |
| $f_{cv}$   | Freq. de corte das malhas de tensão ( $C_v$ )   | 24 Hz                  |
| $f_{ci}$   | Freq. de corte das malhas de corrente ( $C_i$ ) | 240 Hz                 |
| $P_M$      | Margem de fase mínima                           | 80°                    |
| $m_{fv}$   | $m$ conversor fotovoltaico                      | 7 ( $\Delta v$ : 19 V) |
| $m_{bat}$  | $m$ carregador de baterias bidirecional         | 7 ( $\Delta v$ : 19 V) |
| $m_{ca}$   | $m$ conversor c.c.-c.a.                         | 7 ( $\Delta v$ : 19 V) |

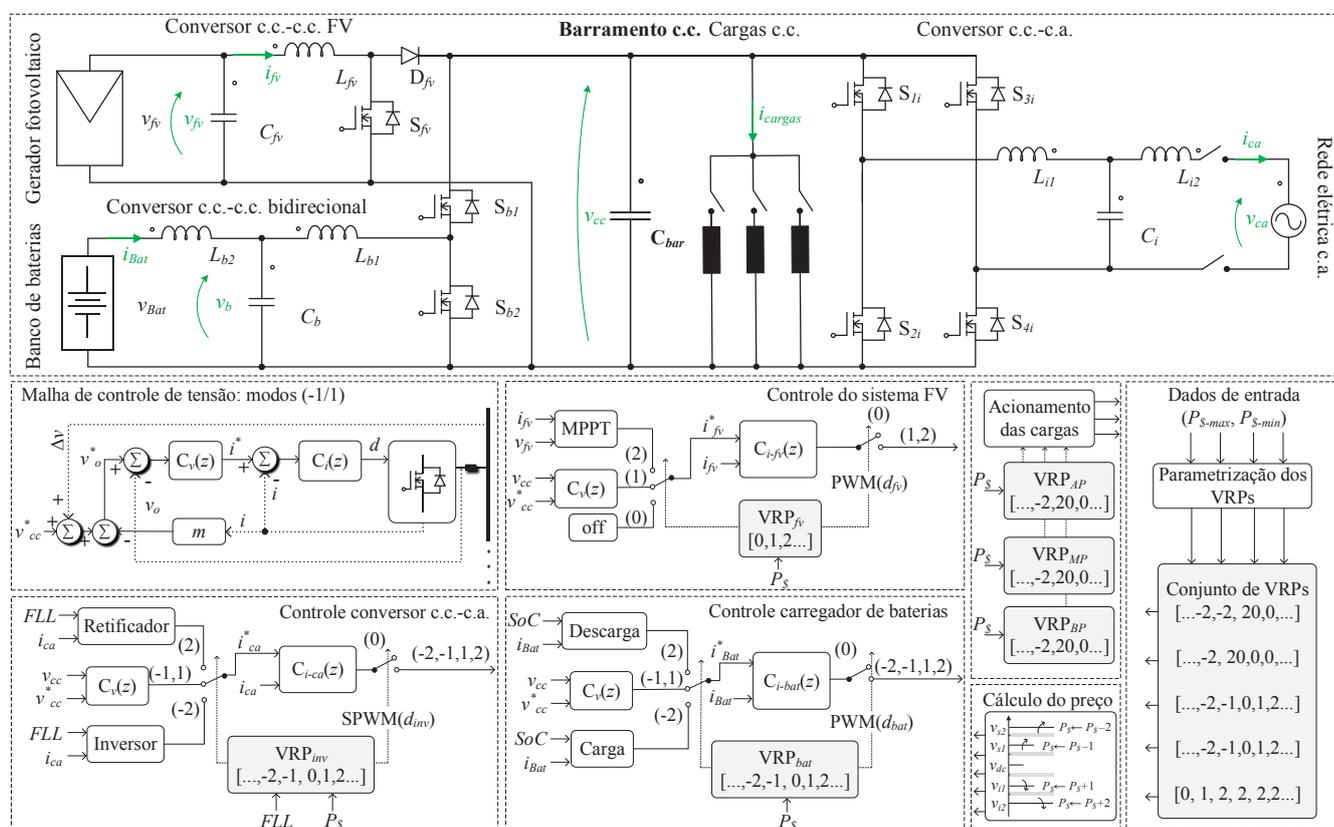


Fig. 10. Diagrama de potência e estrutura de controle da nanorrede.

Na Figura 10, o bloco FLL (*frequency-locked loop*) é relacionado à malha de sincronismo com a rede c.a., e os blocos  $C_v$  e  $C_i$  estão relacionados com as malhas de controle de tensão e corrente, respectivamente.

#### A. Resultados de Simulação para a Inicialização do Sistema

Para verificar a resposta do gerenciador de potência durante a inicialização do sistema, inicialmente o preço interno é definido como \$8 (máximo valor de  $p_{vec}$ ). Isso permite manter desligadas todas as cargas, enquanto as fontes atuam com potência nominal (2) para aumentar a tensão do barramento c.c.. De acordo com o conjunto de VRPs apresentado na Figura 9, nenhum conversor de potência atua com controle de tensão (1) nesta faixa de preços. Isso é coerente com o conceito de preços, porque nos maiores valores, é interessante para as fontes vender o máximo de energia disponível. O resultado de simulação com *hardware-in-the-loop* é apresentado na Figura 11.

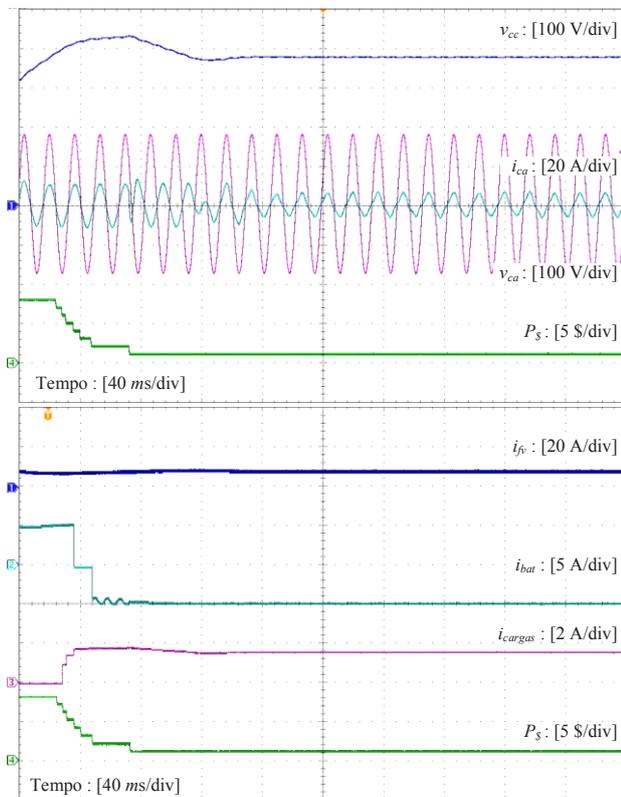


Fig. 11. Resultados de simulação para a inicialização do sistema com VRPs.

Quando as fontes são ligadas, instantaneamente a tensão do barramento c.c. cresce gradativamente. Como resultado, o preço interno é reduzido quando a tensão do barramento ultrapassa um limite de comparação positivo (388 V, 396 V,...). Isso permite ligar a carga de maior prioridade quando o preço é igual a \$6. A carga de média prioridade é ligada com preço igual a \$5, e a carga de menor prioridade é ligada em \$4.

Em regime permanente, o preço estável é igual a \$1. Isso significa que o conversor c.c.-c.a. deve operar com controle *droop* (-1/1) para contribuir com a regulação de tensão do barramento c.c.. Adicionalmente, o conversor FV atua em MPPT (2), enquanto o banco de baterias é carregado com potência nominal (-2).

O resultado da Figura 11 mostra que, em regime permanente, o conversor c.c.-c.a. controla a corrente de saída em fase com a tensão da rede. Isso significa que o conversor está operando em modo retificador, fornecendo potência positiva para a nanorrede.

De acordo com os resultados, em resposta ao preço, os elementos de potência podem ser ligados ou desligados, para contribuir com a regulação de tensão, mesmo em condições transitórias de redução ou sobre-elevações de tensão.

#### B. Resultados de Simulação para a Conexão de Cargas

No segundo teste, uma carga não controlada (500 W) é conectada a nanorrede. A Figura 12 mostra os resultados deste ensaio. Quando a carga é ligada, ocorre uma variação negativa de tensão no barramento c.c., sinalizando um aumento de preço.

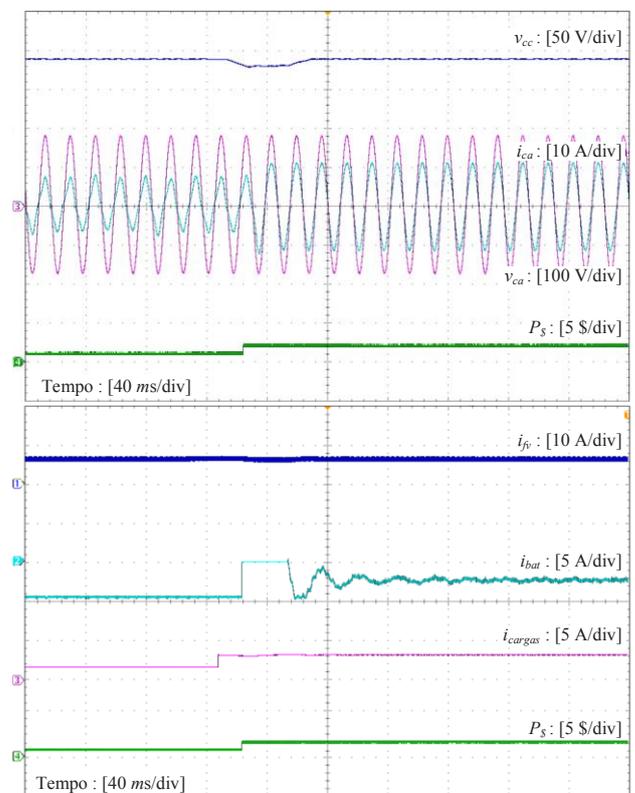


Fig. 12. Resultados de simulação para a conexão de uma carga não controlada.

Quando o preço é igual a \$2, o conversor bidirecional controla a corrente das baterias em modo (-1). Nesta situação a corrente de carga das baterias é reduzida para contribuir com o controle de tensão do barramento. Isso é coerente com o conceito de preços porque a energia disponível na nanorrede foi reduzida com a demanda das cargas.

Aqui é possível verificar uma característica importante da estratégia de gerenciamento de potência baseada em preços: na ocorrência de um evento transitório, os controladores de tensão tendem a se opor as possíveis variações de tensão. Se a variação de tensão no barramento c.c. não for suficiente para sinalizar uma mudança de preços, significa que nenhuma alteração de modos de operação é necessária.

Por exemplo, suponha que o vetor de resposta ao preço das baterias é igual ao conversor c.c.-c.a.. Nesta situação, ambos os conversores atuam em modo de compartilhamento de potência (-1/1) quando o preço é igual a \$1. A Figura 13 mostra o resultado de simulação para a conexão da carga de 500 W.

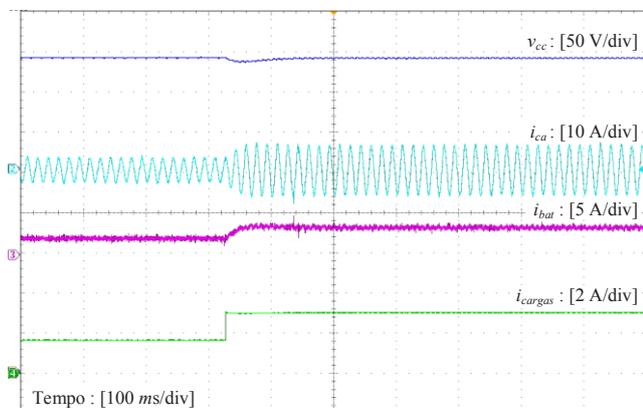


Fig. 13. Resultados de simulação para a conexão de uma carga não controlada, considerando o compartilhamento de potência entre conversor c.c.-c.a. e carregador de baterias.

Nesta situação, ambos os conversores estão regulando a tensão do barramento c.c., e a redução de tensão não é suficiente para sinalizar uma mudança de preços. Isso significa que ainda há equilíbrio de potência, sem que nenhum modo de operação tenha de ser alterado.

## VI. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para validar experimentalmente os resultados de simulação em tempo real, um protótipo da nanorrede descrita na Figura 10 foi construído em laboratório. O gerenciamento de potência foi implementado no mesmo processador digital de sinais TMS320F28379D.

No setup experimental o teste de inicialização do sistema considera as mesmas condições utilizadas no Typhoon-HIL 602+. Este teste foi escolhido para validação dos resultados porque apresenta o maior número de eventos transitórios, relacionados a mudança de preços. O resultado experimental é apresentado na Figura 14.

Inicialmente, o preço é definido como \$8 e todas as cargas são desligadas. Neste cenário as fontes iniciam com potência nominal para aumentar a tensão do barramento c.c.. Semelhante ao resultado de simulação, quando a tensão do barramento c.c. cruza as tensões de comparação, superiores a tensão nominal (380 V), o preço interno é reduzido, permitindo ligar as cargas gerenciadas. Adicionalmente, em regime permanente o preço estável é igual a \$1. O resultado é que o conversor c.c.-c.a. controla a tensão do barramento em modo (1).

A partir dos resultados experimentais é possível verificar que tanto na simulação com o Typhoon-HIL, quanto nos testes realizados em laboratório, foi possível obter resultados semelhantes, considerando os vetores de resposta ao preço (VRPs) para o gerenciamento da nanorrede.

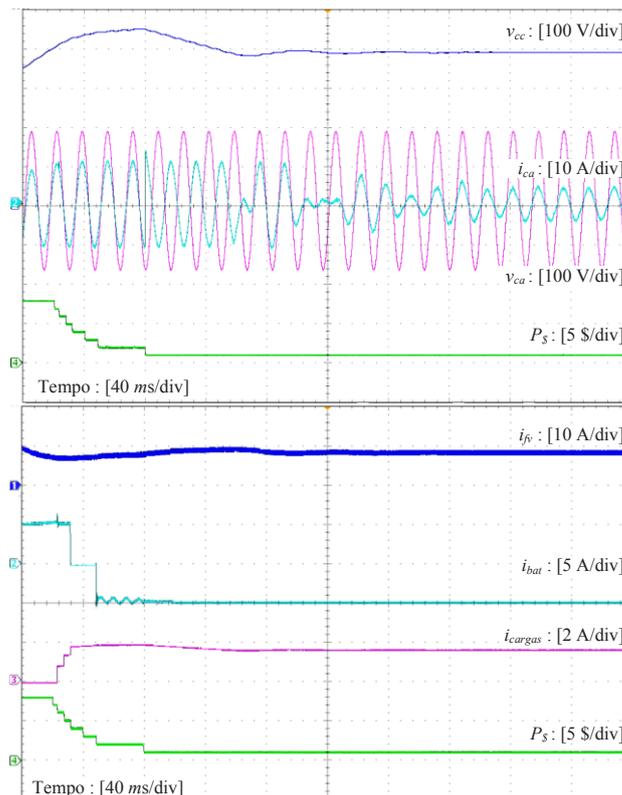


Fig. 14. Resultados de experimentais para a inicialização do sistema com VRPs.

## VII. CONCLUSÕES

Neste artigo vetores de resposta ao preço foram propostos para superar limitações de estratégias de gerenciamento de potência usuais, como máquinas de estados e controladores *droop*. Nesta proposta o gerenciamento de potência relaciona o conceito de preços com modos de operação dos conversores. O preço interno é uma variável de controle utilizada para avaliar a energia disponível na nanorrede. Portanto, é possível definir com precisão quando um elemento de potência deve ser ligado ou desligado, em resposta ao preço. Devido a isso é possível evitar que elementos atuem em modo de compartilhamento de potência (*droop*) durante toda a operação da nanorrede. Isso permite melhorar a estratégia de gerenciamento porque é possível gerenciar cargas, e desligar fontes, quando necessário.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao INCTGD, CAPES, CNPq e FAPERGS pelo apoio financeiro recebido para o desenvolvimento deste trabalho. L. Michels foi apoiado por uma bolsa de pesquisa do CNPq - Brasil. O presente trabalho foi realizado com o apoio do INCTGD e das agências financiadoras (processo CNPq 465.640 / 2014-1, processo CAPES nº 23038.000776 / 2017-54 e FAPERGS 17 / 2551-0000517-1) e CAPES-PROEX. Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Código Financeiro 001.

## REFERÊNCIAS

- [1] B. Liu; S. Duan, T. Cai "Photovoltaic dc-building-module-based bipv system – concept and design considerations," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, n. 5, pp. 1418–1429, Maio 2011, doi: 10.1109/TPEL.2010.2085087.
- [2] L. H. Meneghetti, E. L. Carvalho, E. G. Carati, J. P. da Costa, C. M. de Oliveira Stein, R. Cardoso, "Energy Storage System for Programmable Dispatch of Photovoltaic Generation," 21st European Conference on Power Electronics and Applications (EPE '19 ECCE Europe), 2019, 1-10, doi: 10.23919/EPE.2019.8914918.
- [3] A. Werth, N. Kitamura, K. Tanaka, "Conceptual Study for Open Energy Systems: Distributed Energy Network Using Interconnected DC Nanogrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 4, pp. 1621-1630, Julho 2015, doi: 10.1109/TSG.2015.2408603.
- [4] B. Nordman, K. Christensen "DC Local Power Distribution with microgrids and nanogrids," IEEE First International Conference on DC Microgrids, pp. 199-204, Jun. 2015, doi: 10.1109/ICDCM.2015.7152038.
- [5] L. V. Bellinaso, E. L. Carvalho, R. Cardoso, L. Michels, "Price-Response Matrices Design Methodology for Electrical Energy Management Systems Based on DC Bus Signaling," *Energies*, vol. 14, pp. 1-9, Março 2021, doi: 10.3390/en14061787S.
- [6] J. Hu, J. Wu, X. Ai, N. Liu, "Coordinated Energy Management of Prosumers in a Distribution System Considering Network Congestion," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 12, no. 1, pp. 468-478, Janeiro 2021, doi: 10.1109/TSG.2020.3010260.
- [7] D. Boroyevich, I. Cvetkovic, R. Burgos, D. Dong, "Intergrid: A Future Electronic Energy Network?," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 1, no. 3, pp. 127-138, Set. 2013, doi: 10.1109/JESTPE.2013.2276937.
- [8] D. I. Brandão, J. A. Pomilio, F. P. Marafão, A. M. S. Alonso "Validação experimental de uma microrrede com controle centralizado e despachável," *Revista Eletrônica de Potência*, vol. 23, no. 3, pp. 281-291, Set. 2018, doi: 10.18618/REP.2018.3.2779.
- [9] N. L. Díaz, A. C. Luna, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero "Centralized Control Architecture for Coordination of Distributed Renewable Generation and Energy Storage in Islanded AC Microgrids," *IEEE Trans. on Power Electron.*, vol. 32, no. 7, pp. 5202-5213, Julho 2017, doi: 10.1109/TPEL.2016.2606653.
- [10] M. Mokhtar, M. I. Marei, A. A. El-Sattar "An Adaptive Droop Control Scheme for DC Microgrids Integrating Sliding Mode Voltage and Current Controlled Boost Converters," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 10, no. 2, pp. 1685-1693, Março 2019, doi: 10.1109/TSG.2017.2776281.
- [11] Z. Zhang, H. Tang, J. Ren, Q. Huang, W. Lee "Strategic Prosumers based Peer-to-Peer Energy Market Design for Community Microgrids," *IEEE Trans. on Ind. Applications*, vol. 57, no. 3, pp. 2048-2057, Março 2021 doi: 10.1109/TIA.2021.3064523.
- [12] D. Burmester, R. Rayudu, W. Seah, D. Akinyele, "A review of nanogrid topologies and technologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.67, pp. 760-775, Janeiro 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.09.073.
- [13] IEC Low-voltage electrical installations – Part 8-2: Prosumer’s low-voltage electrical installations, IEC Standard 60364-8-2, 2018.
- [14] E. L. Carvalho, L. H. Meneghetti, L. Bellinaso, R. Cardoso, L. Michels, "Bidirectional Interlink Converter for Bipolar DC Microgrids," IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America), 2019, pp. 1-6, Set. 2019, doi: 10.1109/ISGT-LA.2019.8895334
- [15] J. Schonberger, R. Duke, S. D. Round, "DC-Bus Signaling: A Distributed Control Strategy for a Hybrid Renewable Nanogrid," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 5, pp. 1453-1460, Out. 2006, doi: 10.1109/TIE.2006.882012.
- [16] K. Sun, L. Zhang, Y. Xing, J. M. Guerrero "A Distributed Control Strategy Based on DC Bus Signaling for Modular Photovoltaic Generation Systems With Battery Energy Storage," *IEEE Trans. on Power Electron.*, vol. 26, no. 10, pp. 3032-3045, Out. 2011, doi: 10.1109/TPEL.2011.2127488.
- [17] R. Buerger, F. C. dos Santos, M. S. Sintonio, D. C. Martins, R. F. Coelho, "Controle e análise de estabilidade de conversores CC-CC em modo de compartilhamento de potência," *Revista Eletrônica de Potência*, vol. 24, no. 1, pp. 56-65, Março 2019, doi: 10.18618/REP.2019.1.0039.
- [18] G. Ma, J. Lyu, Y. Wang, J. Zhang, J. Xu "The Prosumer Energy Management Method Based on Smart Load," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 117086-117095, Jun. 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3004557.
- [19] Z. Li, K. W. Chan, J. Hu, J. Guerrero "Adaptive Droop Control Using Adaptive Virtual Impedance for Microgrids with Variable PV Outputs and Load Demands," *IEEE Trans. on Industrial Electron.*, vol. 68, no. 18, pp. 9630-9640, Out. 2021, doi: 10.1109/TIE.2020.3022524.
- [20] S. Huang, Q. Wu, W. Liao, G. Wu, X. Li, J. Wei "Adaptive Droop-based Hierarchical Optimal Voltage Control Scheme for VSC-HVDC Connected Offshore Wind Farm," *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, vol. 17, no. 12, pp. 8165-8176, Março 2021, doi: 10.1109/TII.2021.3065375.
- [21] M. Mehdi, C. Kim, M. Saad, "Robust Centralized Control for DC Islanded Microgrid Considering Communication Network Delay," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 77765-77778, Abril 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2989777.
- [22] R. F. Coelho, L. Schmitz, L. T. Macedo, D. C. Martins, "Estratégia para controle do fluxo de potência em uma microrrede híbrida destinada a alimentação de cargas CC críticas" *Revista Eletrônica de Potência*, vol. 20, no. 2, pp. 205-214, Junho 2015, doi: 10.18618/REP.2015.2.205214.
- [23] M. Nasir, Z. Jin, H. A. Khan, N. A. Zaffar, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, "A Decentralized Control Architecture Applied to DC Nanogrid Clusters for Rural Electrification in Developing Regions," *IEEE Trans. on*

- Power Electron.*, vol. 34, no. 2, pp. 1773-1785, Fev. 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2828538.
- [24] V. F. Gruner, L. Schmitz, D. M. Coelho, R. F. Coelho "Conversor CC-CC de alto ganho com compartilhamento da corrente de entrada, modulação phase-shift e compactação do filtro de saída," *Revista Eletrônica de Potência*, vol. 23, no. 2, pp. 141-150, Jun. 2018, doi: 10.18618/REP.2018.2.2747.
- [25] U. B. Tayab, M. A. B. Roslan, L. J. Hwai, M. Kashif "A review of droop control techniques for microgrid," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 76, pp. 717-727, Set. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.03.028.
- [26] D. Wu, F. Tang, T. Dragicevic, J. M. Guerrero, J. C. Vasquez "Coordinated Control Based on Bus-Signaling and Virtual Inertia for Islanded DC Microgrids," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 6, no. 6, pp. 2627-2638, Nov. 2015, doi: 10.1109/TSG.2014.2387357.
- [27] J. Lee, Y. Kim, T. Kim, S. Moon "Novel Droop Control of Battery Energy Storage Systems Based on Battery Degradation Cost in Islanded DC Microgrids," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 119337-119345, Jun. 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3005158.
- [28] B. W. França, E. L. van Emmerik, J. F. Caldeira, M. Aredes "Sliding droop control for distributed generation in microgrids," *Revista Eletrônica de Potência*, vol. 22, no. 4, pp. 429-439, Dez. 2017, doi: 10.18618/REP.2017.4.2726.
- [29] L. Schmitz, R. F. Coelho, D. C. Martins "Conversor CC-CC de alto ganho e com compartilhamento da corrente de entrada empregado em células a combustível," *Revista Eletrônica de Potência*, vol. 21, no. 4, pp. 285-295, Dez. 2016, doi: 10.18618/REP.2016.4.2630.
- [30] L. H. Meneghetti, E. L. Carvalho, G. B. K. Schmidt, E. Carati, J. P. Costa, C. M. O. Stein, Z. L. Nadal, R. Cardoso "Control Strategy and Power Management for Multifunctional Inverters with BESS and Reactive Power Compensation," *IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*, Dez. 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/COBEP/SPEC44138.2019.9065726.
- [31] E. L. Carvalho, L. V. Bellinaso, R. Cardoso, L. Michels "Price-Based DC Bus Signaling for Nanogrids Power Management" *IEEE 16th Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*, pp. 1-6, Nov. 2021, doi: 10.1109/COBEP/SPEC44138.2019.9065726.
- [32] A. Ghasaei, Z. J. Zhang, W. M. Wonham, R. Irvani, "A Discrete-Event Supervisory Control for the AC Microgrid," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 36, no. 2, pp. 663-675, Abril 2021, doi: 10.1109/TPWRD.2020.2988687.
- [33] L. V. Bellinaso "Inversores Fotovoltaicos Conectados à Rede com Armazenamento de Energia – Classificação, Recomendações Técnicas e Gerenciamento," Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Maria, 2017.
- [34] L. V. Bellinaso, C. D. Schwertner, L. Michels "Price-based power management of off-grid photovoltaic systems with centralised dc bus," *IET Renewable Power Generation*, vol. 10, pp. 1132-1139, Out. 2016, doi: 10.1049/iet-rpg.2015.0472.

**Edivan Laercio Carvalho**, recebeu os títulos de Engenheiro Eletricista (2015) e mestre em Engenharia Elétrica (2018) pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Pato Branco – PR. Atualmente é aluno de doutorado do programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Atua como engenheiro de pesquisa e desenvolvimento na WEG Controle & Automação. Suas áreas de interesse são: eletrônica de potência e sistemas de controle, aplicados à microrredes, nanorredes e geração distribuída.

**Lucas Vizzotto Bellinaso**, recebeu os títulos de Engenheiro Eletricista (2012), mestre (2014) e Doutor em Engenharia Elétrica (2017), pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria – RS. Foi sócio fundador da empresa Sonnen Energia em 2012, e desde 2015 atua como professor na UFSM. Suas principais linhas de pesquisa são sistemas de controle e eletrônica de potência aplicados à sistemas fotovoltaicos.

**Carla Aparecida Felipe**, recebeu os títulos de Engenheira Eletricista (2016), e mestre em Engenharia Elétrica (2021) pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Pato Branco – PR. Suas áreas de interesse são: eletrônica de potência, e técnicas de modulação para conversores estáticos.

**Rafael Cardoso**, recebeu o título de Engenheiro Eletricista (2001) pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria - RS, de Mestre em Ciência em Engenharia Eletrônica e Computação (2003) pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos – SP e de Doutor em Engenharia Elétrica (2008) pela UFSM. Desde 2006 atua como professor nos cursos de Graduação e Pós-Graduação em Engenharia Elétrica na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Pato Branco - PR. Seus interesses de pesquisa incluem aplicações de sistemas de controle, controle de conversores, eletrônica de potência, qualidade de energia e *smart grids*.

**Leandro Michels**, possui graduação (2002) e doutorado em Engenharia Elétrica (2006), ambos pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria - RS. Desde 2009 atua como professor e pesquisador na UFSM, onde atua como membro permanente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. É diretor do Instituto de Redes Inteligentes (INRI/UFSM) e da Unidade EMBRAPPI em Recursos Energéticos Distribuídos. É Bolsista de Produtividade DT1 do CNP e já publicou mais de 100 artigos científicos. A sua principal linha de pesquisa está relacionada a sistemas fotovoltaicos, incluindo a análise sistêmica, os sistemas de monitoramento, o desenvolvimento de topologias para conversores estáticos, e o controle digital destes conversores.