

# Conexão de inversor fotovoltaico monofásico à rede via filtro LCL

Arthur. C. Souza, José Rubens Macedo Jr., Daniel Tobias S. Borges, Fernando Cardoso Melo, e Luiz Carlos G. Freitas  
Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Elétrica

Para que o inversor fotovoltaico opere conectado à rede de distribuição, é necessário um elemento de acoplamento. Um único indutor (Filtro L) na saída do inversor é capaz de realizar essa ligação, conforme ilustra a figura 1, porém o filtro L não consegue atender satisfatoriamente a requisitos de conformidade nos casos em que a rede apresenta características de desequilíbrios e correntes harmônicas, caso em que a tensão no ponto de acoplamento torna-se bastante distorcida [1].

O filtro LCL, ilustrado na figura 2, proporciona uma melhor atenuação harmônica sem aumentar significativamente o consumo de potência reativa, o que permite um tamanho menor de filtro e a não degradação do fator de potência. A grande desvantagem do filtro LCL é sua impedância, que é caracterizada por um pico de ressonância próximo da frequência de corte do filtro, a qual deve ser amortecida

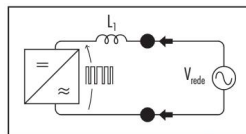


Fig. 1 - Inversor conectado na rede por meio do filtro L.

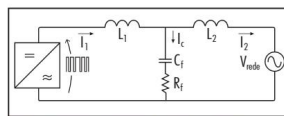


Fig. 2 - Inversor conectado na rede por meio do filtro LCL.

Para atender às exigências das operadoras do sistema de distribuição, projetou-se a conexão de um sistema fotovoltaico à rede por meio de filtro LCL, o qual, no entanto, demanda estratégias para manter a estabilidade no ponto de acoplamento. Aqui se analisam duas delas: compensadores harmônicos no controle da malha de corrente do inversor, e amortecimento passivo, com um resistor em série com o capacitor do filtro.

Para evitar instabilidade [2]. Para amortecer a ressonância, técnicas passivas e ativas podem ser utilizadas.

O controle do inversor é dividido em duas malhas de controle: a malha de tensão e a malha de corrente, conforme ilustra a figura 3. A corrente  $I_2$  refere-se à potência de entrada do conversor boost dividido pela tensão rms da rede, e, em seguida, multiplicado por um ganho de 1,4142.

O controle da tensão do barramento CC, por sua vez, fica a cargo da malha de tensão do inversor com compensador proporcional integral (PI), o qual define a referência de corrente a ser injetada na rede elétrica. Como a função da malha de tensão é regular a tensão do barramento CC, sua dinâmica deve ser muito mais lenta que a da malha de corrente, de modo a garantir o desacoplamento dinâmico entre ambas e,

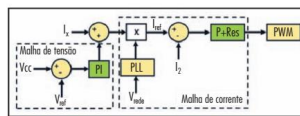


Fig. 3 - Diagrama de bloco do controle do inversor

consequentemente, a estabilidade do sistema [3]. A função de transferência da planta da malha da tensão para o levantamento do compensador PI é dada por (1) [3]:

$$F_{t(p)} = \frac{R_o}{1 + s \cdot C_o \cdot R_o} \quad (1)$$

em que:

$R_o$  é a resistência equivalente do inversor; e

$C_o$  é a capacitância de saída do conversor boost.

A tabela 1 e a figura 4 exibem os parâmetros utilizados do conversor boost. Nelas,  $F_{sw}$  é a frequência de chaveamento, e  $\eta$  e  $P_o$  são o rendimento e a potência de saída do conversor,

Parâmetros	Valor
$V_i$	216,6 V
$V_o$	500 V
L	855 $\mu$ H
$C_o$	700 $\mu$ F
$R_o$	86,44 $\Omega$
$\eta_{boost}$	93%
$P_o$	2892,3 W
$F_{sw}$	20 kHz

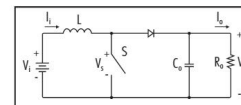


Fig. 4 - Circuito equivalente do conversor boost

respectivamente. Mais informação a respeito dos equacionamentos da parametrização do conversor boost consta da referência [4].

A figura 5 esquematiza um arranjo típico empregado na geração fotovoltaica, detalhando cada etapa do sistema.

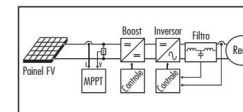


Fig. 5 - Diagrama de blocos da geração fotovoltaica

Com a função de transferência da malha de tensão obtida em (1), juntamente com o auxílio da ferramenta Sisotool do software Matlab, obtém-se o seguinte compensador PI:

$$C_v = 0,09041 \cdot \left( \frac{s + 93,2}{s} \right) \quad (2)$$

Vale ressaltar que no projeto do compensador PI foi admitida uma frequência de corte de 150,79 rad/s, visto que este parâmetro deve ser baixo para garantir o desacoplamento com o controle da malha de corrente, ao passo que a margem de fase foi estabelecida em 65°, devido a que sua resposta a um degrau unitário estabilizou-se em curto intervalo de tempo. Um maior detalhamento do projeto do compensador PI é dado na referência [5].

Pela análise da figura 3, verifica-se que o controle da malha de corrente não trabalha com os compensadores tradicionais (PI ou PID), mas sim com o compensador P+Res (Proporcional-Ressonante). Isto porque os compensadores tradicionais não são capazes de seguir uma referência senoidal sem erro em regime permanente, ou seja, o ganho tende a infinito apenas para sinais contínuos (que é o caso da malha de tensão). Além disso, tais controladores possuem baixa capacidade de rejeição de distúrbio devido ao baixo desempenho da ação integral quando a perturbação é um sinal periódico [6]. Portanto, para controlar a corrente em inversores conectados à rede eficientemente, é necessário um compensador que forneça um ganho para o sinal de referência ( $I_{ref}$ ) onde a forma de onda é periódica senoidal.

Os controladores do tipo P+Res, utilizados na malha de corrente para controle de inversores do tipo fonte de tensão, são tipicamente filtros passa-faixa, cuja frequência está sintonizada na frequência nominal da rede elétrica (60 Hz) e que têm como principal característica um alto ganho nessa frequência, devido à soma da ação proporcional com uma ação ressonante.

Vale ressaltar que a malha de corrente controla a injeção de potência à

O CONTADOR BIDIRECIONAL PARA DETECÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA NA SUA RESIDÊNCIA



## Ribeiro SOLAR

Venda de geradores em todo o Brasil

Fronius

POSSIBILITA UM CONTROLE DINÂMICO MAIS RÁPIDO E PRECISO DA ALIMENTAÇÃO DO QUE NOS CONTADORES SO. JUNTO COM O FRONIUS SOLAR WEB, O FRONIUS SMART METER POSSIBILITA UMA REPRESENTAÇÃO CLARA DO CONSUMO DE ENERGIA PRÓPRIA.

Ribeiro  
Desde 1974

CURITIBA - PR  
Tel: 41 3014-1800  
Rua Gabriel F. Miranda, 1033

MARINGÁ - PR  
Tel: 44 3028-1800  
Rua São Lourenço, 396

PORTO ALEGRE - RS  
Tel: 51 3239-2778  
Avenida Assis Brasil, 3535 51 1213

RECIFE - PE  
Tel: 41 3014-1800  
Rua Tijuca, 32 - Boa Viagem



**FIXADORES PARA PAINÉIS FOTOVOLTAICOS**  
Fabricação de parafusos, porcas e arruelas para o segmento de Energia Solar.

ACABAMENTO COM PROTEÇÃO ACIMA DE 1.000 HRS CONTRA CORROSÃO (ORGANOMETÁLICO).



(11) 4092-7712 | (11) 4092-7713  
(11) 4092-7714 | (11) 97135-3946  
comercial@mtctools.com.br  
www.mtctools.com.br



Especialista em *energia com tecnologia fotovoltaica*, a Techmel fornece projetos, instalação e manutenção de usinas fotovoltaicas nas regiões Norte e Nordeste do Brasil.

**techmel**  
ENGENHARIA

techmel@techmel.com.br  
Fone: (091) 9 9118-2030  
3119-2030

rede elétrica por meio da referência de corrente imposta pela malha de tensão. A função de transferência do controlador P+Res é apresentada em (3) [7].

$$F_{H(P+Res)} = K_p + \frac{2 \cdot K_i \cdot s}{s^2 + \omega^2} \quad (3)$$

em que:

$K_p$  = ganho proporcional;

$K_i$  = ganho Integral; e

$\omega$  = frequência de ressonância a ser trabalhada.

A equação (3) corresponde ao controlador P+Res ideal, o qual produz um ganho infinito em  $\omega$ , porém não é suficiente para manter a estabilidade do sistema. Portanto, é necessário a implementação do P+Res amortecido [8, 9], conforme abaixo.

$$F_{H(P+Res)amort.} = K_p + \frac{2 \cdot K_i \cdot \omega_c \cdot s}{s^2 + 2 \cdot \omega_c \cdot s + \omega^2} \quad (4)$$

em que  $\omega_c$  é a frequência de corte.

A adição deste parâmetro resulta em uma pequena ampliação da faixa passante e na redução do ganho na frequência de ressonância, tornando-o estável.

Os compensadores P+Res foram bastante difundidos para o controle da malha de corrente do inversor. Porém, para a compensação de correntes harmônicas, é fundamental a aplicação de compensadores harmônicos (CH) no controle da malha de corrente. Basicamente, devem-se adicionar, em paralelo com o compensador P+Res, outros compensadores iguais sintonizados nas frequências que irão ser compensadas. A adição de novos CHs teoricamente não afeta a dinâmica do compensador P+Res da fundamental [9]. Ressalte-se que pequenos desvios na frequência da rede comprometem a atuação do P+Res, aumentando o erro em regime permanente e diminuindo o desempenho em relação à rejeição harmônica.

O diagrama da aplicação do compensador harmônico juntamente com

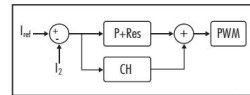


Fig. 6 - Implementação do CH no controle da malha de corrente

o compensador P+Res é mostrado na figura 6.

A equação (5) descreve a função transferência do compensador harmônico.

$$F_{H(CH)} = \sum_{n=5}^{h=7} \left( \frac{2 \cdot K_i \cdot n \cdot \omega_c \cdot s}{s^2 + 2 \cdot n \cdot \omega_c \cdot s + \omega^2} \right) \quad (5)$$

Também observa-se que  $h$  indica a quantidade de harmônicas que estão sendo compensadas, tal que se  $h=7$ , significa que foram compensadas a terceira, quinta e sétima ordens harmônicas [9].

## Regulamentação

A Resolução Normativa REN nº 687/2015 da Aneel - Agência Nacional de Energia Elétrica, atualizou a REN nº 482/2012, esclarecendo os deveres do consumidor quando da conexão de uma geração distribuída (GD) à rede de distribuição, determinando ainda que, após a conexão, o mesmo deve estar em consonância com os limites estabelecidos no Módulo 8 "Qualidade da Energia Elétrica" do Prodist - Procedimentos de Distribuição.

A Norma de Distribuição ND.5.30, que estabelece requisitos para conexão de acessantes ao sistema de distribuição da Cemig - Cia. Energética de Minas Gerais, exige que a energia fornecida pelos sistemas de geração distribuída às cargas locais e à rede elétrica atenda normas de qualidade referentes à tensão, cintilação, frequência, distorção harmônica e fator de potência. O desvio em relação aos padrões estabelecidos caracteriza condição anormal de operação, e os sistemas devem ser capazes de identificar esse desvio e cessar o fornecimento de energia à rede da distribuidora [11]. Para este estudo, destaca-se a avaliação do fator de potência e a distorção harmônica no ponto de acoplamento da GD fotovoltaica.

## Fator de potência

O sistema de geração distribuída (GD) deve ser capaz de operar dentro das seguintes faixas de fator de potência, quando a potência ativa injetada na rede for superior a 20% da potência nominal do gerador [11]:

- Sistemas de GD com potência nominal  $\leq 3$  kW: FP igual a 1 com tolerância na faixa de 0,98 indutivo a 0,98 capacitivo;
- Sistemas de GD  $> 3$  kW e  $\leq 6$  kW: FP ajustável de 0,95 indutivo até 0,95 capacitivo;
- Sistemas de GD  $> 6$  kW: FP ajustável de 0,92 indutivo até 0,92 capacitivo.

## Harmônicas e distorção da forma de onda

A distorção harmônica total de corrente deve ser inferior a 5%, no potência nominal do sistema de geração distribuída. Cada harmônica individual deve estar limitada aos valores apresentados na Tabela II [11].

Tab. II - Limites de distorção harmônica de corrente	
Harmônicas ímpares	Limite de distorção
3ª a 9ª	<4,0%
11ª a 15ª	<2,0%
17ª a 21ª	<1,5%
23ª a 33ª	<0,6%
Harmônicas pares	Limite de distorção
2ª a 8ª	<1,0%
10ª a 32ª	<0,5%

## Projeto do filtro LCL com amortecimento passivo

Os seguintes parâmetros são necessários para a configuração do filtro:  $V_L$  (tensão de linha),  $P_g$  (potência ativa de saída do inversor),  $\omega_g$  (frequência

angular da rede),  $V_{CC}$  (tensão do barramento CC) e  $F_{inv}$  (frequência de chaveamento do inversor) [12]. A impedância de base ( $Z_b$ ) e a capacitância de base ( $C_b$ ) são definidas por (6) e (7). Assim, os valores de filtro serão referidos numa percentagem dos valores de base.

$$Z_b = \frac{V_L^2}{P_g} \quad (6) \quad C_b = \frac{1}{\omega_g \cdot Z_b} \quad (7)$$

Para a parametrização da capacitância do filtro, considera-se que a variação máxima do fator de potência observada pela rede seja de 5%, indicando que a capacitância base do sistema é ajustada conforme indica (8).

$$C_f = 0,05 \cdot C_b \quad (8)$$

Um fator de projeto maior que 5% pode ser usado, quando for necessário compensar a reatância indutiva do filtro, porém o fator de potência será comprometido. Se um valor muito baixo de capacitância for selecionado, um valor de indutância muito alto pode ser necessário ( $L_f$ ). Portanto, é aconselhável atribuir um valor em torno da metade do limite obtido na equação (8), no caso de alguma das restrições não ser respeitada, assim aumenta-se a capacitância até o valor limite [13]. A corrente máxima de saída do inversor monofásico é obtida por (9).

$$I_{max} = \frac{P_g \cdot \sqrt{2}}{V_L} \quad (9)$$

A ondulação de corrente máxima na saída do inversor normalmente admi-

tida em projeto é de 10%, conforme (10):

$$\Delta I_{max} = 0,1 \cdot I_{max} \quad (10)$$

Dessa forma, o valor do indutor do lado do inversor é expressado em (11):

$$L_f = \frac{V_{CC}}{6 \cdot F_{inv} \cdot \Delta I_{max}} \quad (11)$$

O filtro LCL deve reduzir a ondulação da corrente a 20% [12, 13]. Os autores propõem um fator  $k_f$  de atenuação de corrente harmônica, sugerindo um valor de 20% em seus exemplos. Dessa forma, a indutância do lado da rede ( $L_r$ ) é dada por (12):

$$L_r = \frac{\left(\frac{1}{k_f} + 1\right)}{C_f \cdot \omega_{sv}} \quad (12)$$

A frequência de ressonância ( $F_{res}$ ) em (13) deve estar dentro dos limites estabelecidos em (14); caso contrário, deve trabalhar com outro valor de capacitância obtido em (8).

$$F_{res} = \sqrt{\frac{L_f + L_r}{L_f L_r C_f}} \quad (13)$$

$$10 \cdot F_{rede} < F_{res} < 0,5 \cdot F_{sv} \quad (14)$$

Um resistor em série ( $R_f$ ) com o capacitor atenua parte da ondulação na frequência de comutação para evitar a ressonância. O valor dessa resistência deve ser um terço da impedância do capacitor de filtro na frequência de ressonância [12]. Logo, a resistência em série com a capacitância do filtro (amortecimento passivo) é dada por (15):



**PROJETOS INOVADORES COMEÇAM COM A NOSSA ESTRUTURA**

ESTRUTURAS METÁLICAS SOLAR

41 - 3037-3750 | /ssmestruurasmetalicassolar | ssmmetalicas.com.br



**ALUMAX**  
**O ALUMÍNIO QUE DÁ LUZ AO SEU NEGÓCIO.**  
 ALUMAX, SEU CLIENTE MERECE A MELHOR SOLUÇÃO. ENTRE EM CONTATO CONOSCO!  
 11 2436-8486  
 HTTP://ALUMAX.IND.BR/  
 ALUMAX@ALUMAX.IND.BR

**O DPS que você usa tem CÂMARA BLINDADA?**  
 CONHEÇA A LINHA DE DPS EMBRASETEC.

**DPS FOTOVOLTAICO**  
 o único com Câmara Blindada para proteção fotovoltaica

EMBRASTEC  
 Fone: (16) 3193-2021  
 www.embraстec.com.br  
 Rua Tamboré, 2255 - Vila Eldor - Ribeirão Preto - SP - CEP 14075-010

$$R_f = \frac{1}{3 \cdot (2 \cdot \pi \cdot f_{res}) \cdot C_f} \quad (15)$$

A principal desvantagem de inserir o resistor em série com o capacitor do filtro são as perdas adicionais, porém essas perdas não são significativas, mesmo porque o resistor ajuda na redução da ondulação da corrente em

Tab. III - Parâmetros necessários para o cálculo do filtro LCL

Parâmetros	Valor
VCC	500 V
VL	220 V
Psaída_inv.	2776,6 W
Zb	17,43 Ω
ωg	377 rad/s
Cb	152,2 µF
Cf	7,6086 µF
Fsw	20 kHz
Imax	17,85 A
η_inversor	96%
ka	0,2

Tab. IV - Parametrização do filtro LCL

Parâmetros	Valor
L1	2,3344 mH
Cf	7,6086 µF
L2	0,04994 mH
Rf	0,8449 Ω
Fres	8251,83 Hz

20% [13]. Assim, utilizando os valores da tabela III, obtêm-se os valores dos componentes do filtro LCL apresentados na tabela IV.

Vale ressaltar que foi considerada a resistência de  $L_1$  e  $L_2$  em 0,5 Ω.

O gerador fotovoltaico é composto por duas fileiras (*strings*)

Tab. V - Dados do módulo e do gerador fotovoltaico

Módulo*	Gerador
Vmp	36,1 V
Voc	43,42 V
Imp	7,18 A
Isc	7,98 A
Pmáx	260 W
Rs	0,4 Ω
α	0,05 %/°C
β	-0,35 %/°C
*American Solar ASW-260M	

em paralelo, com seis módulos em série cada, ou seja, 12 módulos no total. A tabela V traz os dados de um módulo American Solar ASW-260M e do gerador.

Nessa tabela,  $V_{mp}$  é a tensão de máxima potência,  $V_{oc}$  é a tensão de circuito aberto,  $I_{mp}$  é a corrente de máxima potência,  $I_{sc}$  é a corrente de curto-circuito,  $\alpha$  é o coeficiente de temperatura para a corrente de curto-circuito,  $\beta$  é o coeficiente de temperatura para a tensão de circuito aberto,  $R_s$  é a resistência série da célula e  $P_{max}$  é a potência máxima fornecida pelo módulo ou pelo gerador fotovoltaico.

Vale ressaltar que os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  informados pela *datasheet* do módulo estão na unidade de (%/°C), porém, na modelagem dos painéis solares, essa informação é preenchida em (A/°C e V/°C) para  $\alpha$  e  $\beta$ , respectivamente. As conversões são dadas pelas equações (16) e (17):

$$\alpha[A/^{\circ}C] = \frac{\alpha[V/^{\circ}C]}{100} \cdot I_{sc} \quad (16)$$

$$\beta[V/^{\circ}C] = \frac{\beta[V/^{\circ}C]}{100} \cdot V_{oc} \quad (17)$$

Mais informação sobre a modelagem da célula solar utilizada constam da referência [4]. A figura 7 exibe o sistema fotovoltaico completo implementado no MATLAB/Simulink.

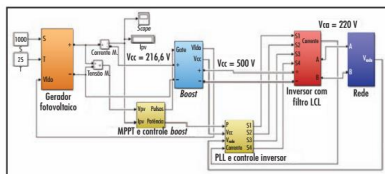


Fig. 7 - Sistema fotovoltaico implementado no Simulink

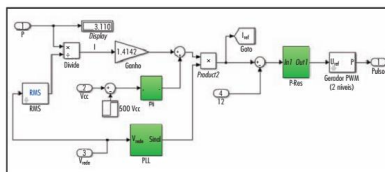


Fig. 8 - Unidade de controle do inversor monofásico implementado no Simulink

**Estudo de caso**

Analisa-se a seguir o comportamento do filtro LCL com e sem o amortecimento passivo, ora com os compensadores harmônicos, ora sem. A figura 8 apresenta o controle do inversor implementado no MATLAB/Simulink, o qual é constituído pela malha de tensão juntamente com seu compensador PI, e a malha de corrente com o compensador P+Res.

**Filtro LCL sem amortecimento passivo (Rp) e sem compensadores harmônicos**

A figura 9 representa a tensão e corrente no ponto de acoplamento na rede e apenas uma fonte de tensão), além de exibir a tensão no barramento CC.

Percebe-se nessa figura que a tensão do barramento CC mantém o seu valor em torno dos 500 V; logo, a malha de controle da tensão está conforme e a malha de corrente também cumpre a

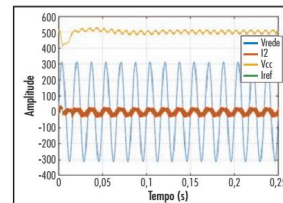


Fig. 9 - Tensão e corrente no ponto de acoplamento e tensão no elo CC

Ordem	Amplitude	Fase
1	0,614	270,0°
2	0,000	0,0°
3	0,000	0,0°
4	0,000	0,0°
5	0,000	0,0°
6	0,000	0,0°
7	0,000	0,0°
8	0,000	0,0°
9	0,000	0,0°
10	0,000	0,0°
11	0,000	0,0°
12	0,000	0,0°
13	0,000	0,0°
14	0,000	0,0°
15	0,000	0,0°
16	0,000	0,0°
17	0,000	0,0°
18	0,000	0,0°
19	0,000	0,0°
20	0,000	0,0°
21	0,000	0,0°
22	0,000	0,0°
23	0,000	0,0°
24	0,000	0,0°
25	0,000	0,0°
26	0,000	0,0°
27	0,000	0,0°
28	0,000	0,0°
29	0,000	0,0°
30	0,000	0,0°

Fig. 10 - Conteúdo harmônico da corrente de saída

**Filtro LCL com amortecimento passivo (Rp) e sem compensadores harmônicos**

A figura 11 mostra tensão e corrente no ponto de acoplamento na

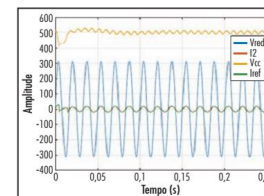


Fig. 11 - Tensão e corrente no ponto de acoplamento e tensão no elo CC

função de injetar corrente senoidal na rede e, com auxílio do PLL (*phase locked loop*), manteve-se em sincronismo com a tensão. Outro aspecto a observar é que a corrente  $I_z$  acompanha a corrente de referência, confirmando, assim, a eficiência do controle.

A figura 10 mostra as componentes harmônicas que compõem a corrente sendo injetada na rede. Observa-se que, com 5,15%, a harmônica de terceira ordem viola o limite de distorção estipulado na tabela II, que é 3,99%.

**POLITEC**  
 +26MWp de estruturas comercializadas  
 Desenvolvemos soluções em estruturas de suporte de painéis fotovoltaicos em solo:  
 > Fixa  
 > Carport  
 > Seguidor solar de 1 eixo  
 Os produtos são customizados de acordo com as características do local e com as normativas NBR, de forma a otimizar custos globais da solução fotovoltaica.  
 (11) 4204-1302  
 vendas@politec.eng.br / www.politec.eng.br

**ELETROCENTRO PARA USINAS FOTOVOLTAICAS**  
 A integração perfeita  
 Diversas configurações de conexão, medição e proteção em média tensão para atender as normas das concessionárias de distribuição de energia.  
 POTÊNCIA NOMINAL ATÉ 2500 KVA  
 TENSÕES DE CONEXÃO 13,8 E 34,5 KV  
 A NOVEMP conta com Sistema de Gestão Integrado SGI certificado nas normas: ISO 9001 | ISO 14001 | OHSAS 18001  
 NOVEMP  
 Tel: 011-4093-8300  
 vendas@novemp.com.br  
 www.novemp.com.br

rede com amortecimento passivo, ou seja, com uma resistência série com o capacitor do filtro LCL.

Verifica-se aqui um comportamento menos ruidoso da corrente de saída ( $I_s$ ) em relação à figura 9 (tanto que sua curva quase não se distingue da de  $I_{ref}$ ), o que permite concluir que o amortecimento passivo melhora a estabilidade da corrente. Além disso, o amortecimento colaborou na redução da distorção harmônica total de corrente (DHTI) de 6,67% (figura 10) para 3,08% (figura 12).

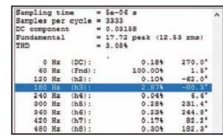


Fig. 12 - Conteúdo harmônico da corrente de saída

**Filtro LCL com amortecimento passivo ( $R_s$ ) e com compensadores harmônicos**

A figura 13 apresenta tensão e corrente no ponto de acoplamento na rede com o amortecimento passivo e os compensadores harmônicos de 3<sup>o</sup>, 5<sup>o</sup> e 7<sup>o</sup> ordens.

Apesar de a corrente de saída ( $I_s$ ) ter apresentado uma pequena taxa de ruído, os compensadores harmônicos não interferiram na dinâmica do controle, o qual continua a acompanhar a corrente de referência ( $I_{sref}$ ). A figura 14 mostra o conteúdo harmônico com a inserção dos compensadores.

Verifica-se na figura 14 que os compensadores harmônicos atuaram eficientemente, pois houve redução de correntes harmônicas de ordens 3<sup>o</sup>, 5<sup>o</sup> e 7<sup>o</sup>. A tabela VI apresenta a parametrização do P+Res e dos respectivos compensadores.

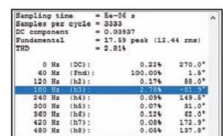


Fig. 14 - Conteúdo harmônico da corrente de saída

**Conclusão**

O sistema de controle baseado em controlador P+Res com amortecimento passivo e compensadores harmônicos apresenta vantagens sobre as estratégias tradicionais de controle (Filtros L com compensadores PI), dado que desacopla a dinâmica do sistema das tensões da rede e permite a geração de correntes de saída com baixa distorção harmônica.

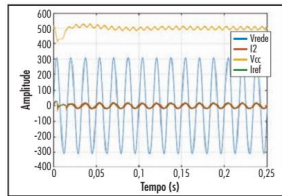


Fig. 13 - Tensão e corrente no ponto de acoplamento e tensão no elo CC

O ganho do controlador P+Res torna-se infinito numa banda estreita centrada na frequência de ressonância, e é quase nulo fora da banda. Isso faz com que o controlador rastreie uma referência senoidal de alta frequência sem ter que aumentar a frequência de comutação. Uma característica interessante do compensador harmônico é que não afeta a dinâmica do controlador P+Res. Assim, a técnica P+Res pode ser usada com sucesso no controle de corrente para aplicações de conversores de rede.

**Referências**

[1] Souza, A.C.; Silva, L. R. C.; Oliveira, T. L.; Macedo Jr, J. R.; Santos, I.N: *Análise da microgeração fotovoltaica monofásica na rede de distribuição de baixa tensão*. XIV CEEL-UFU, Uberlândia, G, outubro de 2016.  
 [2] Paukner, Filipe Lucchin: *Comparação do controle do inversor trifásico conectado à rede com*

**Tab. VI - Parametrização dos controladores**

Parâmetros	P+Res	C3	C5	C7
Kp	0,1	-	-	-
Ki	50	25	30	15
$\omega_c$	10	20	7,5	20
$\omega$	377	1130,97	1884,95	2638,94

*filtro LCL considerando o amortecimento passivo e ativo*. Dissertação de Mestrado, UTFPR, Pato Branco, PR, 2016.

[3] Barbi, I.; Mota, V.; Pini, S.H: *Análise e controle do retificador trifásico boost PWM em base 0eB*. UFSC, INEP - Instituto de Eletrônica de Potência, Florianópolis, SC, agosto de 2010.  
 [4] Souza, A. C.; Melo, F. C.; Oliveira, T. L.; Tavares, C. E.: *Performance analysis of the computational implementation of a simplified PV model and MPPT algorithm*. IEEE Latin America Transactions, Vol. 14, nº 2, pp. 792-798, 2016.  
 [5] Souza, A.C.: *Análise dos impactos da geração distribuída por fonte solar fotovoltaica na qualidade da energia elétrica*. Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia, MG, 2016.  
 [6] Zmood, D.N.; Holmes, D.G.: *Stationary frame current regulation of PWM inverters with zero steady-state error*. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 18, nº 3, pp. 814-822, maio, 2003.  
 [7] Teodorescu, R.; Blaabjerg, F.: *A new control structure for grid-connected LCL PV Inverters with zero steady-state error and selective harmonic compensation*. Applied Power Electronics Conference and Exposition. [S.l.]: s.n., 2004. v. 1, p. 580-586.  
 [8] Teodorescu, R.; Blaabjerg, F.: *Proportional-resonant controllers. A new breed of controllers suitable for grid-connected voltage-source converters*. The 9th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipments. Brasov: [s.n.], 2004. p. 9-14.  
 [9] Machado, S. J. M.: *Uma proposta de controle com alta capacidade de rejeição harmônica para inversores monofásicos conectados à rede elétrica através de filtro LCL amortecido para sistemas de energia renovável*. Dissertação de Mestrado, UEL, Londrina, PR, 2016.  
 [10] Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015. Agência Nacional De Energia Elétrica.  
 [11] *Manual de Distribuição Requisitos para a Conexão de Acessos ao Sistema de Distribuição Centig D - Conexão em Baixa Tensão*.  
 [12] Reznick, A.; Simões, M. G.; Al-Dutra, A.; Muyeen, S. M.: *LCL filter design and performance analysis for grid-interconnected systems*. IEEE transactions on Industry Applications, Vol. 50, nº 2, março/abril, 2014.  
 [13] Liserre, M.; Blaabjerg, F.; Hansen, S.: *Design and control of an LCL filter-based three-phase active rectifier*. IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 41, nº 5, pp. 1281-1291, set./out., 2005.

# Guia dos fornecedores de medidores bidirecionais de energia

Da Redação de **FotoVolt**

*Equipamentos dos quais se exigem alta precisão e capacidade, os medidores bidirecionais são componentes de grande relevância para o desenvolvimento da pequena geração fotovoltaica conectada no País, viabilizando o sistema de compensação de energia.*

Medidores bidirecionais são exigidos pela Aneel para a conexão à rede da pequena geração distribuída das instalações consumidoras. Eles viabilizam a implantação do sistema de *net metering*, instituído pelo órgão regulador por meio da Resolução Normativa 482/2012. Nos Procedimentos de Distribuição (Prodist) a medição das instalações com mini e microgeração conectada é contemplada

no módulo 3 ("Acesso aos Sistema de Distribuição"), especificamente no item 7 da seção 3.7.

Com sugere o nome, medidores bidirecionais possibilitam o cômputo da energia gerada e consumida em um mesmo equipamento. Determinam-se a instalação consumiu mais do que gerou, devendo, portanto, ser faturada, ou gerou além de seu consumo, fazendo a medição junto à distribuidora.

Este levantamento de **FotoVolt** descreve a oferta de três renomados fabricantes de medidores. Os equipamentos são descritos segundo suas características principais; todos têm certificação Inmetro, exigência da regulamentação; a maioria realiza medição em quatro quadrantes e mede energia ativa e reativa; e boa parte possibilita o controle *online* do consumo e/ou oferece recurso para corte e religamento remotos.

Empresa / telefone	Fabricante Importador exclusivo	Fabricante / País	Tensão nominal (V)	Corrente nominal (A)	Corrente máxima (A)	Frequência (Hz)	Número de elementos	Número de fios	Número de fases	Dimensões (mm): (A x L x P)	Massa (kg)	Certificação Inmetro	Medição em 4 quadrantes	Medição de energia ativo/ reativa	Controle online do consumo	Corte / religação remotos
Landis+Gyr (41) 3341-1519	•		120 ou 240	15	60	60	1	2	1	161 x 128 x 38	0,3	•	•	•	•	•
			240	15	60	1	3	1	161 x 128 x 47	0,46	•	•	•	•	•	•
			120 e 240	15	60	2/3	3/4	2 ou 3	180 x 142 x 80	0,82	•	•	•	•	•	•
			120 e 240	15	60	1/1	2/3	1	188 x 140 x 116	1	•	•	•	•	•	•
			120 e 240	15	60	2/3	3/4	2 ou 3	211 x 166 x 117	1,5	•	•	•	•	•	•
			120 e 240	2,5	60	3	3 ou 4	4	239 x 176 x 85	1,6	•	•	•	•	•	•
Nansen (31) 3514-3100	•		120 ou 240	15	100	50 ou 60	1	2	1	13 x 98 x 51	0,4	•	•	•	•	•
			120 ou 240	15	120	50 ou 60	2 ou 3	3 ou 4	2 ou 3	235 x 168 x 73	1,5	•	•	•	•	•
			120 ou 240	2,5	20	50 ou 60	1, 2 ou 3	2, 3 ou 4	1, 2 ou 3	241 x 176 x 105,8	1,3	•	•	•	•	•
WEG (47) 3276-4000	•		120, 240, 120/240	15	100	60	1	2	1	195,1 x 138,8 x 99,3	1,3	•	•	•	•	•
			120, 240, 120/240	15	120	60	2 e 3	3 e 4	2 e 3	284,9 x 138,8 x 99,3	2,3 e 2,45	•	•	•	•	•
			120, 240, 120/240	2,5	10	60	2 e 3	3 e 4	2 e 3	284,9 x 138,8 x 99,3	1,8 e 1,9	•	•	•	•	•

Obs.: Os dados constantes deste guia foram fornecidos pelas próprias empresas que dele participam, de um total de 13 empresas pesquisadas. Fonte: Revista **FotoVolt**, maio e junho de 2018. Este e outros 13 Guias FV estão disponíveis on-line, para consulta. Acesse [www.arandnet.com.br/revista/fotovolt](http://www.arandnet.com.br/revista/fotovolt) e confira. Também é possível incluir o seu empresa na versão on-line de todos estes guias.