



# ANÁLISE DA COMPENSAÇÃO DINÂMICA DA TENSÃO DE MODULAÇÃO NA OTIMIZAÇÃO DA TAXA DE DISTORÇÃO HARMÔNICA DA CORRENTE INJETADA NA REDE

Joaquim H. Reis<sup>\*1</sup>, Ernane A. A. Coelho<sup>1</sup>, Luiz C. G. de Freitas<sup>1</sup> e Gustavo B. de Lima<sup>1</sup>

<sup>1</sup>FEELT - Universidade Federal de Uberlândia

**Resumo** - O objetivo da proposta trata de um aspecto particular do controle de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Mais especificamente, o efeito que o fator de modulação tem sobre a qualidade da forma de onda da corrente injetada na rede, fator esse que pode ser um ganho estático, dado pela referência da tensão CC, ou ajustado de forma dinâmica, pela tensão medida. Paralelamente, analisou-se o efeito da inclusão de um filtro rejeita-faixa ou *notch*, empregado para ajustar a referência da magnitude de corrente, com os respectivos impactos sobre o controle. Ao final, comparou-se as várias possibilidades de inclusão ou não dessas estratégias e o desempenho de cada uma delas.

**Palavras-Chave**- Compensação dinâmica, Controle, Filtro *notch*, Sistemas Conectados

## ANALYSIS OF MODULATION FACTOR REAL TIME COMPENSATION AS OPTIMIZATION OF GRID CURRENT HARMONIC DISTORTION

**Abstract** - The objective of this scope refers to control of grid-connected PV systems. More specifically, the modulation factor effect to power quality injected on grid. Then, this factor can be just a static gain, which it is usually defined by DC voltage reference value, or it can be adjusted in real time, by means of measured voltage. In addition, it was analyzed the notch filter effect, included to mitigate ripple frequency in control. At last, it was compared all these strategies combinations and their performance.

**Keywords** - Control, Grid connected systems, Notch filter, Real-time compensation

### I. INTRODUÇÃO

Recentemente, a conjuntura da matriz energética global converge para a ascensão das fontes renováveis, sobretudo a solar fotovoltaica. Em suas aplicações, tradicionalmente estrutura-se em sistemas isolados, para localidades remotas.

Contudo, a necessidade de baterias é um agravante no custo. Alternativamente, onde se dispõe de conexão com a rede elétrica, a instalação fotovoltaica compensa o excedente de geração pelo de demanda. Nesse caso, a rede emula uma bateria, reduzindo custos [1],[2].

Entretanto, a conexão à rede envolve vários cuidados afim de proteger as instalações e os usuários. Nesse aspecto, é comum agregar um transformador isolador no processo de conversão fotovoltaica. Em baixa frequência, os transformadores representam alto peso e volume, além de custos e perdas, cenário que é parcialmente minimizado nas isolações em alta frequência, apesar da maior complexidade [3], [4].

Consequentemente, vários trabalhos exploram aplicações sem transformador (*transformerless*), visando contornar os inconvenientes mencionados. Contudo, a remoção da isolação galvânica exige cautela, pois acentua as características de modo comum, relativas ao circuito que enlaça o terra da rede elétrica ao arranjo fotovoltaico, devido às expressivas capacidades parasitas inerentes aos módulos [3]-[6].

Além disso, a corrente de fuga também surge da magnitude e frequência da tensão de modo comum, o que torna a aplicação *transformerless* condicionada à modulação e topologia do conversor CC/CA [3], [4], [6].

Em geral, destacam-se os conversores em ponte completa (FB - *Full Bridge*) e (NPC - *Neutral Point Clamped*), bem como suas variações multiníveis. Além disso, cada caso também é observado em prós e contras no que se refere à distorção harmônica na saída, complexidade do filtro e número de interruptores [4],[7].

A partir da problemática apresentada relativa à conexão de sistemas fotovoltaicos à rede elétrica, o desenvolvimento deste escopo será orientado pelos procedimentos clássicos apresentados na literatura [3]-[8].

Inicialmente, ocorre o controle da tensão no barramento CC, situado na entrada do conversor CC/CA, relacionado à magnitude da corrente a ser injetada e aos níveis de geração local.

Em relação à fase, a corrente injetada deve ser senoidal, na frequência da rede, com baixo conteúdo harmônico e fator

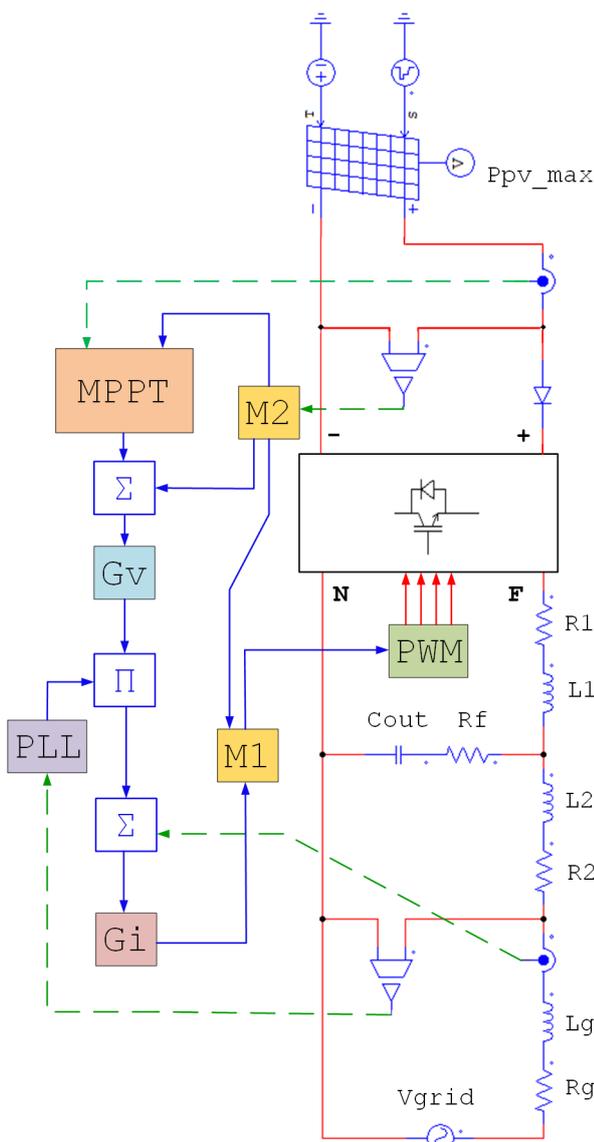
\*joaquim.eng.el@gmail.com

de potência definido em projeto. Nesse contexto, incluem-se os algoritmos de sincronismo (PLL – *Phase Locked Loop*). Os compensadores são projetados conforme a resposta em frequência do sistema, a estabilidade e o desempenho dinâmico. O controle encerra com a correção do fator de compensação para modulação por largura de pulso (PWM).

O filtro passivo é projetado para atenuar os efeitos indesejados do chaveamento eletrônico – observando a qualidade da corrente injetada na rede e os critérios normativos.

Dessa forma, a presente proposta pondera as variáveis de projeto na conversão CC/CA aplicada aos sistemas fotovoltaicos *transformerless* conectados à rede, resumindo-se no estudo e aprimoramento da estrutura NPC, conforme apresentado nas Figuras 1 e 2.

Figura 1: Diagrama do sistema fotovoltaico conectado à rede



Mais especificamente, o trabalho contribui na investigação das técnicas de aprimoramento da qualidade da forma de onda da corrente por meio dos modos controladores *M1* e *M2* destacados. No caso, *M1* é o ajuste dinâmico do fator de modulação que é inserido no PWM como uma função inversa da tensão

CC, porém pode ser inserida tanto na forma estática, a partir da referência da tensão, como por outro lado pode vir da tensão medida, com a pulsação no dobro da frequência da rede.

Alternativamente, a pulsação da tensão CC no dobro da frequência da rede distorce a referência de corrente e pode prejudicar o desempenho do controle. Nesse caso, insere-se um filtro rejeita-faixa ou *notch*, ilustrado por *M2*, para atenuar em específico a frequência de ondulação na medição da tensão e realimentação do controle, evitando a propagação do sinal distorcido.

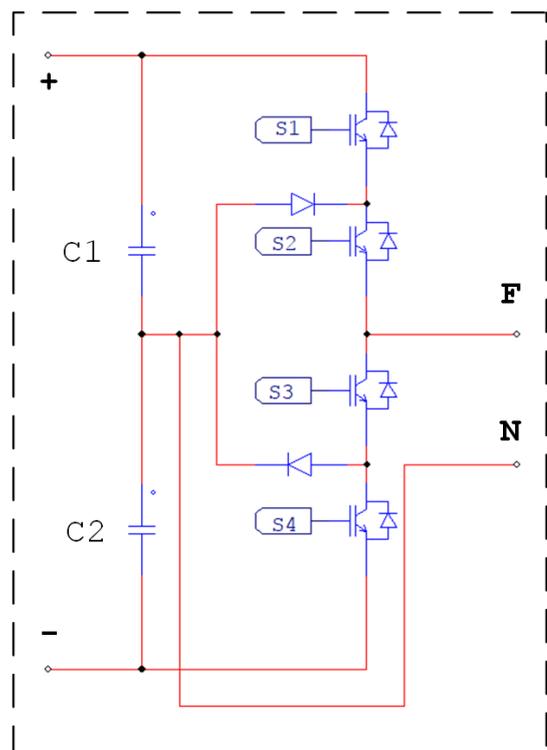
## II. METODOLOGIA DE PROJETO

Como já salientado, o inversor utilizado é do tipo NPC, por aliar baixa corrente de fuga e modulação a 3 níveis por disposição de fase (PD-PWM), o que se conjuga como fatores de otimização dos elementos passivos, tanto por permitir a operação sem transformador na conexão à rede pelas características inerentes ao circuito de modo comum, como também por possibilitar a minimização dos parâmetros de filtro devido aos níveis de modulação.

Em contrapartida, a referida topologia requer uma maior tensão nos terminais do lado CC, no mínimo o dobro da tensão de pico da rede, e o respectivo acesso ao ponto médio da tensão CC. Além disso, exige um maior número de semicondutores em relação à configuração monofásica em ponte, no caso dois diodos adicionais.

Mais detalhadamente, o NPC é ilustrado na Figura 2, fazendo menção à Figura 1, nas quais "+" e "-" são os terminais de entrada positivo e negativo, assim como *F* e *N* representam a conexão com a saída CA para fase e neutro, respectivamente.

Figura 2: Diagrama do inversor NPC



No sistema analisado, a Tabela I mostra a descrição e os valores dos principais parâmetros da rede ilustrada nas Figuras 1 e 2. A partir desses parâmetros, foram sintonizados os compensadores.

Tabela I – Parâmetros do sistema

PARÂMETRO	SÍMBOLO	VALOR
CAPACITÂNCIAS DO BARRAMENTO CC	$C1, C2$	$2800\mu F$
INDUTÂNCIA DO LADO DO INVERSOR	$L1$	$3mH$
RESISTÊNCIA PARASITA DE $L1$	$R1$	$0,2\Omega$
INDUTÂNCIA DO LADO DA REDE	$L2$	$150\mu H$
RESISTÊNCIA PARASITA DE $L2$	$R2$	$15m\Omega$
CAPACITÂNCIA DE FILTRO	$Cout$	$15\mu F$
RESISTOR DE AMORTECIMENTO	$Rf$	$0,85\Omega$
INDUTÂNCIA DA REDE	$Lg$	$500\mu H$
RESISTÊNCIA DA REDE	$Rg$	$0,1\Omega$
TENSÃO CA NOMINAL (RMS)	$V_{grid}$	$127V$
FREQUÊNCIA DA REDE	$f_g$	$60Hz$
TENSÃO CC TÍPICA	$V_{cc}$	$200 - 500V$
FREQUÊNCIA DE CHAVEAMENTO	$f_{sw}$	$16kHz$

### A. Controle de tensão CC

O controle de tensão, efetuado pelo compensador  $G_V$ , é do tipo proporcional integral (PI), com ganho proporcional  $K_P = 0,2$  e constante de integração  $T_I = 0,8$ . No caso, tais parâmetros seguem a estrutura canônica apresentada em (1). A saída do compensador de corrente representa a magnitude da corrente de referência.

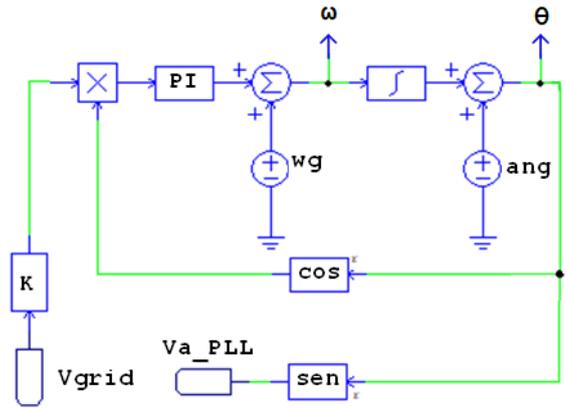
$$G_V(s) = K_P + \frac{1}{sT_I} \quad (1)$$

Em termos de controle, o compensador de tensão possui uma correlação negativa, sendo o erro expresso como uma diferença entre a tensão medida e a referência, isso ocorre pois o sentido de compensação da tensão é inverso ao da corrente, sendo por um lado a energia acumulada no barramento pela diminuição da corrente injetada na rede, e drenada pelo aumento da injeção de corrente, caso contrário.

### B. Geração de Referência em Fase - PLL

Normalmente, a fase da rede ( $\theta$ ) está sujeita a variações dinâmicas, e isso pode comprometer o controle como um todo. Nesse aspecto, a injeção de corrente na rede requer uma referência em sincronia com a tensão, o que pode ser obtido pelos algoritmos de PLL (*Phase Locked Loop*). A partir de uma entrada, no caso a tensão da rede, geram-se na saída os respectivos sinais em quadratura, que realimenta a dinâmica do próprio PLL, e em fase, para compor o controle de corrente. Nesse caso, foi utilizada a estrutura convencional, para sistemas monofásicos, apresentada na Figura 3.

Figura 3: Diagrama do PLL convencional



### C. Controle de corrente

Após a composição da referência de corrente, esta é subtraída da corrente medida. Como os sinais envolvidos são senoidais, a estrutura do compensador utilizado é do tipo proporcional ressonante ( $P + Res$ ), cuja resposta em frequência possui um pico no ganho para uma frequência de centro definida em projeto. No caso, essa ressonância trata da frequência da rede.

Além disso, o modelo também possui um termo de atenuação  $B$ , que representa o amortecimento - ou a robustez diante do desvio de frequência - porém atenuando o ganho da frequência de centro. Neste caso,  $B = 6\pi$ . Matematicamente, a estrutura do  $P + Res$  é apresentada em (2), sendo  $K_{PR} = 2$  o ganho proporcional e  $K_{IR} = 150$ , o ganho ressonante.

$$G_I(s) = K_{PR} + K_{IR} \frac{Bs}{s^2 + Bs + \omega_c^2} \quad (2)$$

### D. Filtro Rejeita-Faixa

O filtro Rejeita-Faixa (*notch*) foi sintonizado segundo a forma apresentada em (3), sendo  $\omega_{NT}$  a frequência angular de pico atenuador, no caso cerca de  $754rad/s$ . Além disso, foram ajustados os coeficientes do filtro sendo  $\epsilon_0 = 0,008$  e  $\epsilon_1 = 1$ .

$$G_{NT}(s) = \frac{s^2 + 2\epsilon_0\omega_{NT}s + \omega_{NT}^2}{s^2 + 2\epsilon_1\omega_{NT}s + \omega_{NT}^2} \quad (3)$$

### E. Ganho da modulação

O ganho de modulação aplicado entre a saída dos compensadores e a entrada do bloco PWM representa a medida de variação da razão cíclica unitária para obtenção da tensão CC nominal na saída. No caso, esse ganho pode ser dado pelo valor de referência em uma compensação estática.

Por outro lado, a compensação dinâmica habilita a leitura da tensão medida e transfere esse valor para o ajuste contínuo do ganho, exceto quando a tensão atinge um limiar crítico.

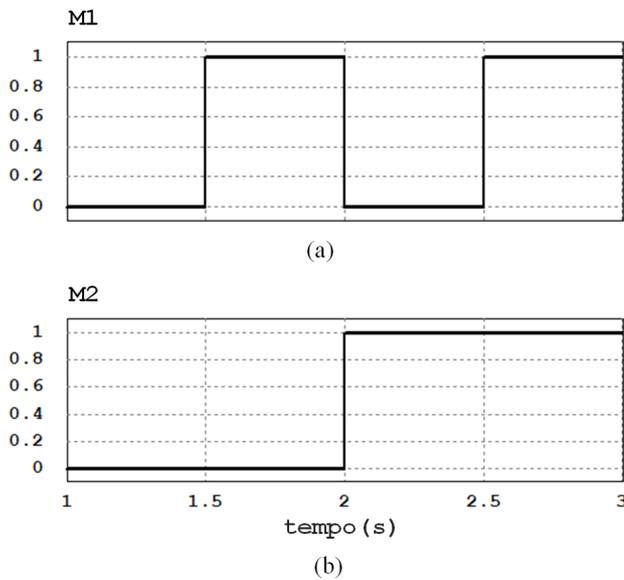
No caso, o limiar mínimo é  $200V$ , pouco maior que a tensão de pico da rede, e é inserido pois como a tensão CC é uma função inversa do ganho - seu valor pode extrapolar a ação de controle nos instantes transitórios, quando  $V_{CC}$  é muito baixo.

### III. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

A partir da sistemática apresentada em relação ao projeto dos compensadores, os resultados seguem conforme os eventos apresentados na Figura 4.

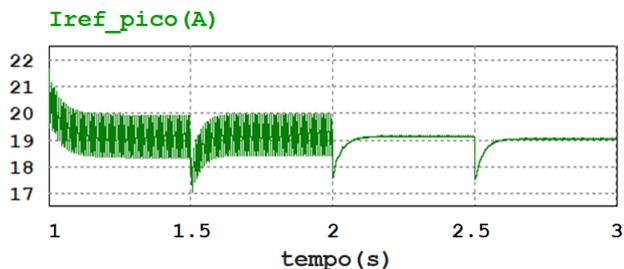
Na Figura 4.a,  $M1 = 1$  representa a habilitação da compensação dinâmica, e  $M1 = 0$  o controle por meio da referência de tensão. Por outro lado, na Figura 4.b,  $M2 = 1$  representa a entrada do filtro *notch* sob a tensão CC medida, e  $M2 = 0$  a aplicação direta da tensão no controle, incluindo a ondulação em 120Hz.

Figura 4: Eventos de rede dos modos de controle (a)  $M1$  e (b)  $M2$



Nesse aspecto, o primeiro resultado é apresentado na Figura 5 e mostra o impacto do filtro *notch* na amplitude da corrente de referência, em que se torna visível a mitigação das componentes pulsantes e a estabilização da amplitude da corrente.

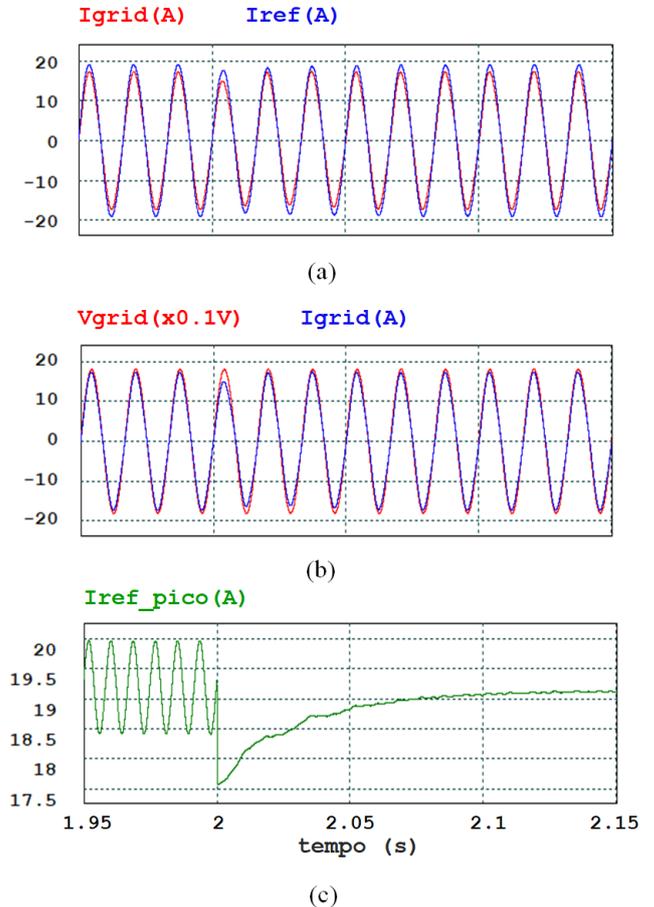
Figura 5: Amplitude da corrente de referência



Mais detalhadamente, a Figura 6 resume o desempenho do controle. Na Figura 6.a, verifica-se a proximidade da corrente injetada com a referência - aspecto que valida o compensador de corrente, já a Figura 6.b é destaca o alinhamento de fase com a tensão da rede, resultando em um alto fator de potência ( $> 0,99$ ), característica atribuída, dentre outros fatores, ao

PLL, que impôs uma referência senoidal em frequência e fase com a tensão da rede. Ao final, a Figura 6.c remete à Figura 5 como um detalhe transitório que marca a entrada do filtro *notch* e o seu efeito sob a amplitude da corrente de referência, conforme mencionado.

Figura 6: Resposta do controle de corrente em relação à (a) medida, (b) fase e (c) amplitude da referência

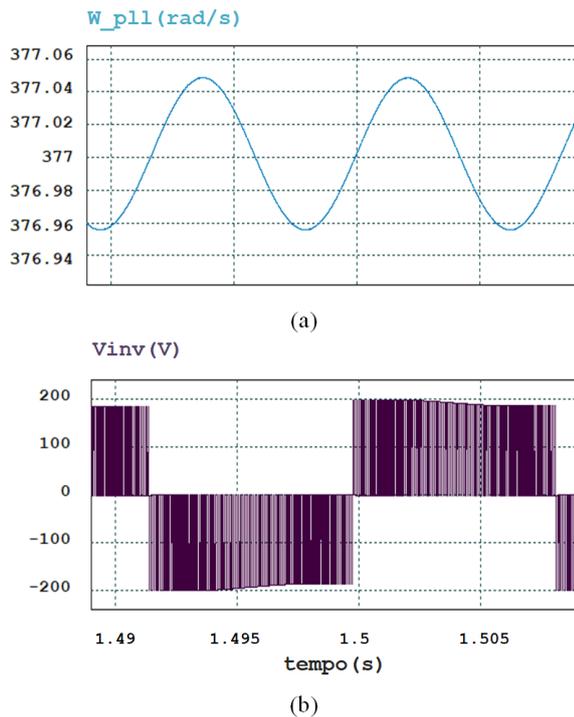


Sobre os índices de DHT da corrente, a forma de onda de referência passou de cerca de 2% sem o *notch* na medição da tensão CC para cerca de 0,34% após a entrada do filtro. Por outro lado, a DHT da corrente injetada na rede passou de cerca de 7% sem nenhum ajuste para 4,5% apenas com a compensação dinâmica da tensão de modulação.

No segundo transitório, que retratou apenas o filtro *notch*, o resultado foi de 5,3%, e quase não sofreu alteração juntamente à compensação dinâmica, quando juntos resultaram em uma DHT de 5,1% para a corrente injetada na rede.

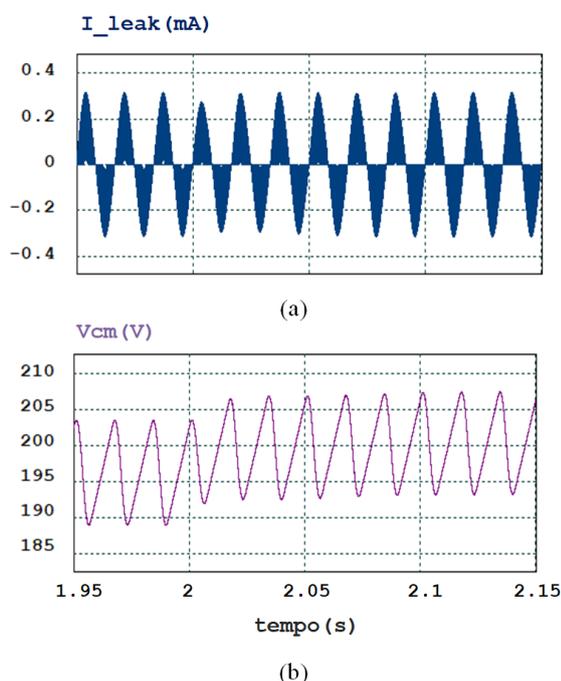
Além disso, resultados complementares são apresentados nas Figuras 7 e 8, e destacam outros aspectos da dinâmica. Na Figura 7.a, é destacado a frequência resultante do PLL, situada em torno de  $377\text{rad/s}$  com oscilação inferior a 0,1% em torno da referência. Na Figura 7.b, destaca-se a tensão modulada antes da passagem pelo filtro passivo. No caso, verifica-se a modulação em três níveis, característica dessa configuração do NPC, assim como a ondulação em baixa frequência da tensão CC, impressa na variação do pico de tensão.

Figura 7: Resultados complementares: (a) frequência do PLL e (b) tensão modulada do inversor



Na Figura 8, o resultado trata das variáveis do circuito de modo comum: Em 8.a, observa-se a reduzida corrente de fuga ( $< 1mA$ ), e em 8.b, a variação mínima da tensão de modo comum na frequência da rede ( $\pm 14V$ ,  $60Hz$ ). No caso, foram estimados os parâmetros de capacitância e resistência série parasitas do arranjo fotovoltaico ( $C_{PV} = 100nF/kW$ ,  $R_{SPV} = 1\Omega/kW$ ).

Figura 8: Resultados do circuito de modo comum: (a) corrente de fuga e (b) tensão



## IV. CONCLUSÕES

Este artigo foi direcionado ao projeto sistemático de conexão à rede utilizando o inversor NPC 3 níveis em aplicações sem transformador. Mais especificamente, foram comparadas estratégias de melhoria da qualidade da DHT na corrente injetada na rede, sendo esta limitada por normas. Nesse aspecto, verificou-se que a compensação dinâmica da tensão CC no ajuste da modulação isoladamente obteve melhor resultado. Apesar disso, o filtro *notch*, utilizado para melhorar o sinal da referência de corrente, também gerou resultados próximos. Na superposição das duas estratégias, o resultado fica num patamar médio, ainda que implique a maior complexidade do controle.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fapemig pelo suporte financeiro (processo APQ-03554-16).

## REFERÊNCIAS

- [1] J.T. Pinho, M.A. Galdino, "Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos", Rio de Janeiro : CEPEL - CRESESSEB, março de 2014.
- [2] R.A. Messenger, J. Ventre, "Photovoltaic Systems Engineering", ISBN 0-203-58847-9, 2a Edição, 2004. Editora CRC Press.
- [3] I. Patrao, G. Garcerá, E. Figueres, R.G. Medina, "Grid-tie inverter topology with MPPT from two photovoltaic arrays", *IET Renew. Power Gener.*, vol.8, iss.6, pp.638-648, 2014.
- [4] O. López, R. Teodorescu, J.D. Gandoy, "Multilevel transformerless topologies for single-phase grid-connected converters", *IEEE Industrial Electronics, IECON - 32nd Annual Conference on*, 2006.
- [5] J.J.M. Mendoza, P.R.M. Rodriguez, G. Escobar, J.M. Sosa, *et al.*, "A modulation NPC scheme for a 3L-NPC converter in transformerless applications", *Power Electronics and Computing (ROPEC), IEEE International Autumn Meeting on.*, 2016.
- [6] W. Chen, X. Yang, W. Zhang, X. Song, "Leakage Current Calculation for PV System Based on a Parasitic Capacitor Model", *Power Electronics, IEEE Trans on.*, vol. 31, no. 12, pp. 8205-8217, 2016.
- [7] S.I. Medina, C.A. Pozos, P.R.M. Rodriguez, G. Escobar, *et al.*, "A Comparative Analysis of Grid-Tied Single-Phase Transformerless Five-Level NPC-Based Inverters for Photovoltaic Applications", *Power Electronics, 13th International Conference on. (CIEP)*, 2016.
- [8] R. Teodorescu, M. Liserre, P. Rodriguez, "Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems", John Wiley Sons, 2011.