

## Estratégia de controle SMC + PI aplicada a um inversor monofásico conectado à rede elétrica

Richelly D. F. Pontes\* Lucas D. Augusto\* José A. T. Altuna\*  
Alfeu J. S. Filho\*

\* *CECS, Universidade Federal do ABC, Santo André - SP, Brasil.*  
(e-mails: richelly.dayenne@ufabc.edu.br, lucas.demetrius@ufabc.edu.br,  
jose.torrico@ufabc.edu.br, alfeu.sguarezi@ufabc.edu.br).

---

**Abstract:** This work presents a proposal for current control using sliding mode controller plus PI (SMC+PI), applied to a single-phase inverter on H bridge connected to the grid using the LC filter at the output. For this purpose, the mathematical modeling of the single-phase inverter was done with the LC filter, the controller was designed by sliding mode plus PI, then the results of the simulations obtained for the proposal validation were shown, and finally, the conclusion itself. This control technique is used to control the current to be injected into the grid and was applied to a single-phase inverter model with LC filter developed in the Matlab/Simulink® simulation tool, results obtained experimentally validate the proposal.

**Resumo:** Este trabalho apresenta uma proposta de controle de corrente por meio do controlador de modos deslizantes mais PI (SMC+PI), aplicado a um inversor monofásico em ponte H conectado à rede elétrica com a utilização de filtro LC na saída como interface. Para tal objetivo, fez-se a modelagem matemática do inversor monofásico com o filtro LC, projetou-se o controlador por modos deslizantes mais PI, em seguida, mostrou-se os resultados das simulações obtidas para a validação da proposta, e por fim fez-se a conclusão. Esta técnica de controle é empregada na realização do controle da corrente a ser injetada na rede e foi aplicada a um modelo de inversor monofásico com filtro LC desenvolvido no software Matlab/Simulink®, resultados obtidos em bancada experimental validam a proposta.

**Keywords:** Sliding mode controller; connected System grid; Inverter with LC filter; Single-phase voltage inverter.

**Palavras-chave:** Controlador por modos deslizantes; Sistema conectado à rede; Inversor com filtro LC; Inversor de tensão monofásico.

---

### 1. INTRODUÇÃO

As fontes de energia renováveis são cada vez mais consideradas essenciais para atender às necessidades de energia atuais e futuras, neste contexto, nas últimas décadas, os inversores conectados à rede elétrica têm evoluído significativamente com grande diversidade, sendo considerados uma das tecnologias de desenvolvimento mais rápida na área de eletrônica e sistemas de potência em termos de eficiência, tamanho, peso, confiabilidade, custo, etc., Jana et al. (2017).

Para alcançar um bom desempenho desses conversores se faz necessário a aplicação de controladores de corrente e de tensão. O controle de corrente em inversores do tipo fonte de tensão (VSI - *Voltage Source Inverter*), tem sido empregado em diversas aplicações, tais como: fontes de energias renováveis (sistemas fotovoltaicos e turbinas eólicas), filtros ativos de potência (FAP), controle de máquinas elétricas, compensadores estáticos (STATCOM), sistemas de energia ininterrupta (UPS), entre outros Lima et al. (2015).

Dito isto, percebe-se que os controladores de corrente tem grande relevância, tendo em vista que controlam o fluxo de energia fornecida à rede elétrica ou a uma carga. Devido a malha de corrente ser responsável por executar funções associadas ao controle da energia a ser injetada na rede elétrica, proteção e sincronismo, as técnicas de controle de corrente têm de dispor de características como robustez, rapidez na resposta e precisão, além de ter a possibilidade de corrigir os distúrbios.

Para realizar a conexão do inversor monofásico em ponte H, utiliza-se filtros passivos. A escolha do filtro utilizado na saída do inversor ocorre em conformidade com a estratégia de modulação a ser utilizada. Desta forma, o filtro LC foi aplicado na topologia proposta deste trabalho, o qual utiliza modulação por largura de pulso unipolar a fim de calcular os pulsos para o controle do conversor e por possuir características passa-baixas proporcionando uma redução no conteúdo harmônico, de forma que apenas a componente fundamental e uma pequena parcela de harmônicos estejam presentes na saída do inversor, respeitando os limites exigidos para distorção harmônica total (THD) Gerent et al. (2005). Vale ressaltar que a frequência de chaveamento é constante, assim, as perdas causadas pela frequência de chaveamento são suprimidas.

---

\* Agradecemos ao suporte institucional e financeiro disponibilizado pela UFABC para a pesquisa aqui apresentada.

Existem várias técnicas de controle que são utilizadas para realizar o controle de corrente, dentre essas técnicas podemos citar o controle PI Prado et al. (2017), o controlador proporcional ressonante Mossmann et al. (2019) que precisam de um ajuste adequado, o controle por histerese Galelli et al. (2005), controle por lógica difusa/Fuzzy Simões and Shaw (2007) que depende de um conhecimento do projetista em detalhes do projeto, controle adaptativo da Mata et al. (2016), controle por redes neurais Balasubramonian and Rajamani (2014) que conta com a escolha adequada das redes para treinamento, controlador discreto repetitivo Silva (2017) e o controle preditivo Ramírez et al. (2014) dependente de uma modelagem matemática adequada, sendo que as características citadas se não levadas em consideração podem degradar o comportamento do sistema.

O controlador PI (Proporcional Integral) é uma técnica de controle clássico e muito popular, sendo uma das estratégias mais utilizadas em sistemas de controle industriais, devido a simplicidade e facilidade em implementação. Esse método de controle possui banda passante fixa Rocha (2015) e consiste basicamente no ajuste adequado de seus ganhos, porém tem como desvantagem a possibilidade de degenerar o desempenho do sistema pelo fato de seus ganhos serem ajustados para somente um ponto fixo de operação. Além de não conseguir garantir erro nulo em sinais com frequência diferente de zero, admitindo erros de regime permanente tanto em amplitude como fase Lima et al. (2015).

O Controle de modos deslizantes é uma técnica crescente de controle não linear regida pelo chaveamento. Este controle manifesta característica robusta contra distúrbios externos e baixa complexidade de implementação Romdhane et al. (2014). Consiste basicamente em criar uma superfície que divide o espaço de estados em duas regiões, onde o controlador visa que os estados do sistema atinjam e permaneçam nesta superfície Omine and de Brito (2019b).

Em Omine and de Brito (2019b) é exposta uma análise comparativa entre um controlador PI+Ressonante e um controlador por modo deslizante, aplicados para controlar a corrente a ser injetada na rede por meio de um inversor monofásico com filtro LCL, o qual apresenta como adversidade a alta ressonância entre os componentes, o que pode causar instabilidade.

Em outro trabalho de Omine and de Brito (2019a), foi feito um estudo comparativo de alguns controles lineares e não lineares para um inversor fotovoltaico monofásico com filtro LCL, e este filtro é usado como substituto do filtro L por ser menor e mais barato para inversores conectados a rede elétrica. Entre as técnicas estudadas está o controle por modo deslizante, que insere um controle de termo não linear no circuito de controle de feedback.

Afshar et al. (2019) aplicaram o controle de modo deslizante para realizar o comando de comutação de forma que a corrente de saída do inversor acompanhe a corrente de carga, ou seja, realize o controle da corrente de saída do inversor. A referência de corrente é determinada de acordo com a corrente de carga para que a corrente de saída possa rastrear-la.

Na proposta de Gil (2019a) é aplicado o controle de modo deslizante mais proporcional-integral (SMC+PI) para um

conversor boost em um sistema fotovoltaico, no trabalho citado os parâmetros são calculados usando a técnica de otimização por enxame de partículas modificada (*Weighted-DOCHM-PSO*), já na proposta atual, os ajustes do controlador PI são realizados de acordo com Silva et al. (2013).

Dito isto, este trabalho apresenta a técnica de controle por modos deslizantes mais PI (SMC+PI) aplicada ao inversor monofásico em ponte H conectado à rede com a aplicação do filtro LC, que visa controlar a corrente de saída do inversor sendo que sua corrente de referência é determinada pelo projetista.

## 2. TOPOLOGIA E MODELO MATEMÁTICO DO INVERSOR MONOFÁSICO

O inversor monofásico em ponte H utilizado nesse trabalho funciona como uma fonte de tensão do tipo VSI (*Voltage Source Inverter*), sendo a tensão de saída estabelecida de acordo com a estratégia de acionamento adotada para as chaves eletrônicas, a topologia aqui empregada é representada pela diagrama da Figura 1.

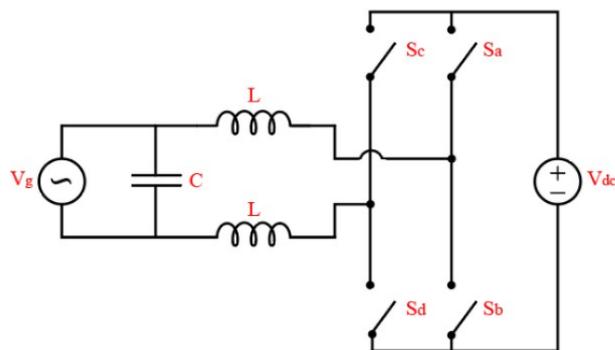


Figura 1. Topologia do inversor monofásico em ponte H com filtro LC.

Conforme a modelagem matemática do inversor monofásico com filtro LC exposta em Augusto et al. (2020), a topologia adotada do inversor monofásico com filtro LC conforme apresentado na Figura 2, apresenta como equações principais aquelas derivadas da corrente do indutor e da tensão do capacitor, apresentadas, respectivamente, em (1) e (2).

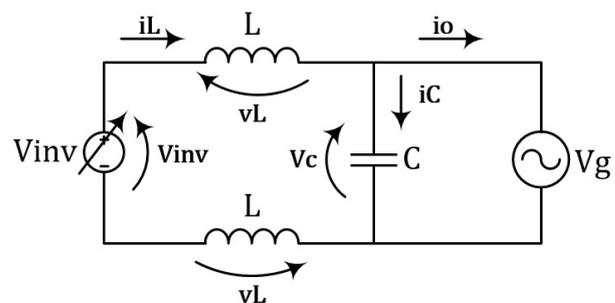


Figura 2. Circuito simplificado do inversor com filtro LC.

$$\frac{di}{dt} = \frac{v_{inv} - v_c}{2L} \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{i - i_o}{C} \quad (2)$$

Onde  $v_{inv}$  e  $v_C$  correspondem as tensões da fonte e do capacitor, respectivamente,  $i$  é a corrente sobre o indutor e  $i_o$  é a corrente da rede elétrica em que o inversor será conectado.  $L$  e  $C$  são os indutores e o capacitor do filtro LC entre o inversor e a rede, respectivamente.

Com base no rearranjo das equações o modelo matemático pode ser descrito no formato de espaço de estados, conforme apresentado em (3) e (4):

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_c \\ i_L \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} v_c \\ i_L \end{bmatrix} + \mathbf{B} \begin{bmatrix} v_{inv} \\ i_o \end{bmatrix} \quad (3)$$

Onde:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{C} \\ -\frac{1}{2L} & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{C} \\ \frac{1}{2L} & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

### 3. CONTROLE POR MODO DESLIZANTE (*SLIDE MODE CONTROL - SMC*)

O controlador por modo deslizante possui características de controle robustas, estabilidade, invariância a perturbações e incertezas Tan et al. (2008), bem como fácil integração com os acionamentos elétricos tendo em vista a natureza descontínua das chaves semicondutoras, sendo esses pontos positivos naturalmente oferecidos pelo método Lazarini (2008).

Este método consiste em duas etapas, onde a primeira tende a determinar uma superfície de deslizamento que torna o sistema dinâmico estável, conforme apresentado na Figura 3 e a segunda consiste em determinar uma lei de controle que faz com que todas as trajetórias tendam para a superfície de deslizamento apresentado na Figura 4 Agostinho (2009).

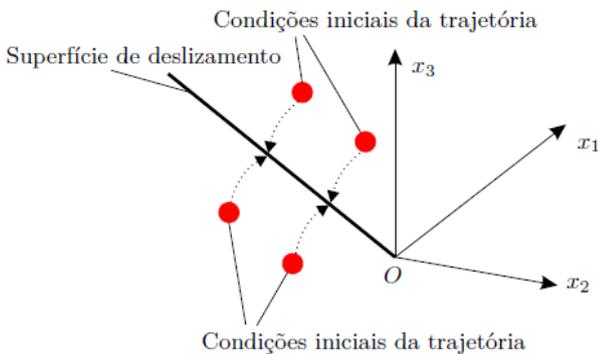


Figura 3. Fase I do processo de controle por modos deslizantes.

Fonte: Gil (2019a)

Os controladores que usam o modo deslizante tradicional funcionam com uma frequência de chaveamento alta e oscilante, de modo que podem aumentar as perdas de chaveamento e a interferência de ruído Vargas Gil et al. (2019).

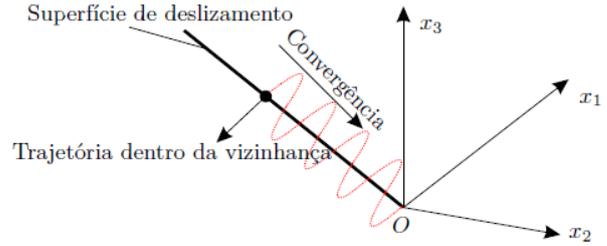


Figura 4. Fase II do processo de controle por modos deslizantes.

Fonte: Gil (2019a)

### 4. CONTROLE DE MODO DESLIZANTE MAIS PI (*SMC + PI*)

Este trabalho apresenta a proposta de controle por modo deslizante mais PI, pois essa estratégia trabalha com frequência de chaveamento regular e tem implementação de baixa complexidade.

#### 4.1 Definição da Superfície Deslizante

A definição da superfície de deslizamento começa com a determinação do erro, pois o controle em estudo está atrelado ao erro entre a variável medida e a referência. Desta forma, o erro é obtido por 5:

$$i_{erro} = i - i_{ref} \quad (5)$$

Onde  $i$  é a corrente obtida do indutor do filtro e  $i_{ref}$  é o sinal de referência de corrente. A partir disso, a superfície deslizante  $S$  é definida por 6:

$$S = [i_{erro} + k_c \frac{d_{ec}}{dt}] \quad (6)$$

Onde a constante  $k_c$  é definido de acordo com a resposta dinâmica pretendida do sistema e  $\frac{d_{ec}}{dt}$  é a derivada em função do tempo de  $i_{erro}$ .

#### 4.2 Lei de controle

Após definir a superfície de deslizamento, é determinada a lei de controle que faz com que as trajetórias sejam direcionadas para esta superfície, bem como permaneçam nela.

Na malha de controle de corrente, o erro obtido por 5 é processado de forma a se obter um valor de tensão proporcional ao ciclo de trabalho a ser convertido por um modulador PWM do tipo unipolar, garantindo a sequência correta de chaveamento da ponte H. Este processamento é executado pelo controlador não linear SMC + PI. Desta forma, o controle visa trazer o estado do sistema para o ponto de equilíbrio definido na superfície de deslizamento ( $S = 0$ ) e que permanece neste ponto de equilíbrio.

Dito isso, a lei de controle que rege o comportamento do controlador é representado por 7, onde  $k_{pv}$  e  $k_{iv}$  são ganhos de PI.

$$v_{modulador} = (k_{pv} + \frac{k_{iv}}{s})eval(S) \quad (7)$$

A função de comutação determinada como avaliação, é responsável por definir a reação do sistema de acordo com a colocação do estado no espaço de estados. Neste estudo, utilizamos a função linear com saturação, que utiliza valores máximos ou mínimos para limitar a superfície.

A função de chaveamento determinada como *eval* mostrada em 7, é encarregada por definir qual será a resposta do sistema em função da posição do estado no espaço de estados Gil (2019b). Podendo ser uma função sinal, função histerese ou função linear com saturação, conforme apresentado na Figura 5.

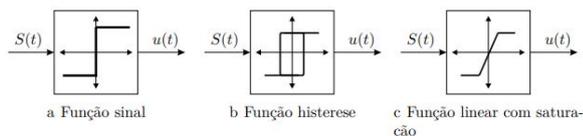


Figura 5. Representações das funções *eval*.  
 Fonte: Gil (2019b)

O projeto do controlador apresentado requer ajustes nos limites inferior e superior da função linear com saturação, no ganho do controlador PI, bem como no ganho da derivada do erro. A Figura 6 indica como SMC + PI foi implementado no inversor monofásico e especifica o avaliação função, superfície deslizante e controlador PI.

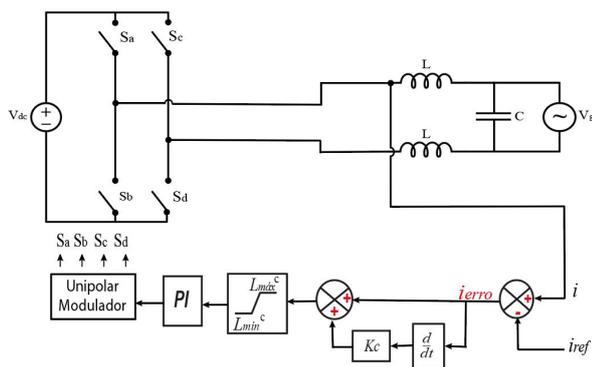


Figura 6. Diagrama em blocos do controlador SMC + PI implementado.

## 5. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Para a análise do comportamento do controlador SMC+PI aqui proposto e a comparação com um outro método de controle clássico usando controladores, foi utilizado o ambiente de simulação Matlab/Simulink® onde foi possível realizar a análise do controle da corrente a ser injetada na rede elétrica, assim como a resposta em degrau e a análise do THD (*Total Harmonic Distortion*).

Foram usados os seguintes parâmetros de simulação:

Entrada de tensão do barramento  $V_{dc} = 30V$ , da rede elétrica  $V_g = 24V$ , indutância  $L = 100\mu H$ , capacitância  $C = 3\mu F$  e frequência de modulação de  $f = 20kHz$ , já o controle SMC está associado a um controlador PI, que opera com ganhos  $kp = 40$  e  $ki = 1,5$ .

Os valores adotados estão de acordo com as especificações encontradas no manual do kit TMDSSOLARPEXPKIT

Bhardwaj and Subharmanya (2013), com o objetivo de realizar a comparação dos resultados obtidos tanto em simulação computacional como na implementação experimental.

### 5.1 Resultados do controle SMC + PI.

Para constatar o pleno funcionamento do controle proposto foi utilizado um degrau como sinal de referência de controle, variando de 2A até 6A conforme mostrado na Figura 7. Observa-se que a transição em degrau do sinal de referência senoidal foi atendida pelo controlador SMC + PI.

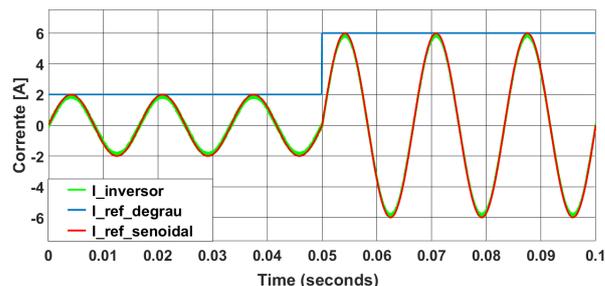


Figura 7. Sinal de referência em degrau e a respectiva resposta do controle SMC + PI.

Na Figura 8 é possível ver o resultado da simulação para uma corrente constante de 5A, onde a corrente medida na rede elétrica está sobreposta a referência de corrente. Novamente, o controlador atende a referência. A THD desta corrente ficou em torno de 2,43% conforme mostrado na Figura 9.

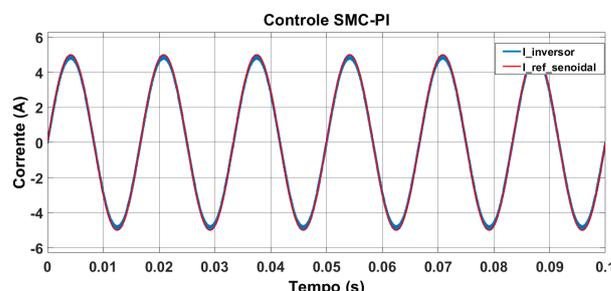


Figura 8. Operação em regime permanente do controle SMC + PI.

A potência injetada na rede elétrica com emprego do controle SMC+PI proposto para a simulação da corrente de referência em 5A é de aproximadamente 60W conforme pode ser observado na Figura 10.

### 5.2 Resultados do controle PI

Foram realizados testes de simulação com emprego de um controlador PI no laço da corrente para comparação com o controlador SMC + PI. Os parâmetros empregados para esta simulação são os mesmos do início desta seção. Adicionalmente, a frequência da modulação unipolar é de  $f_{PWM} = 20kHz$ . Os ganhos do controlador PI foram ajustados em  $kp = 2,52$  e  $ki = 0,00035$ , projetados conforme o método de diagrama de bode apresentado no trabalho de Silva et al. (2013).

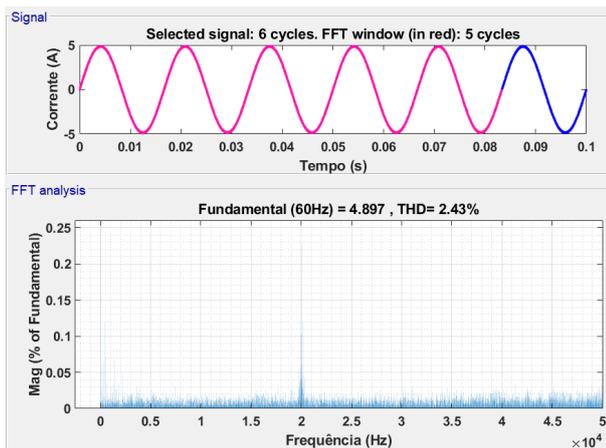


Figura 9. Distorção harmônica apresentada pela corrente a ser injetada na rede elétrica pelo controle SMC + PI.

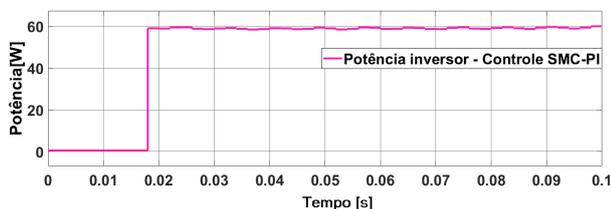


Figura 10. Potência obtida pelo inversor com o controle SMC + PI.

Na Figura 11 é possível ver o resultado da simulação com emprego do controlador PI para uma corrente constante de 5A. Observa-se que o controlador segue a referência da corrente entretanto observa-se um erro de 5,68%, sendo esse valor obtido pela diferença percentual dos valores RMS medidos de ambas as correntes. O valor da THD da corrente injetada na rede elétrica é de 3,90% como apresentado na Figura 12. Este valor é maior quando comparado com o valor de THD quando o controlador PI+SMC é empregado. Neste caso, o valor é 2,43% (Figura 9).

A potência injetada na rede elétrica pode ser observada na Figura 13 e seu valor é de aproximadamente 55W. Este valor é menor que o valor da potência injetada pela proposta desta trabalho que é de aproximadamente 60W (Figura 10), isso ocorre devido ao erro entre a referência de corrente e a corrente injetada na rede elétrica ser de 0,19%. Já o controlador PI por não conseguir acompanhar o sinal de referência senoidal devido a sua banda passante, Ogata (2011).

Tabela 1. Comparação do comportamento dos controladores em estudo

Controladores	Potência	THD (%)	Erro (%)
SMC+PI	60W	2,43	2,06
PI	55W	3,89	5,68

## 6. IMPLEMENTAÇÃO EXPERIMENTAL

A implementação experimental foi realizada utilizando o kit TMDSSOLARPEXPKIT, Bhardwaj and Subharmanya (2013) sendo os controladores aqui propostos im-

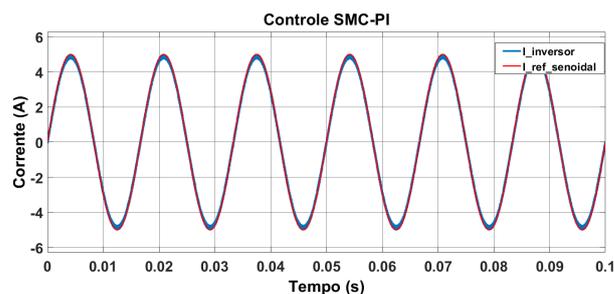


Figura 11. Sinal de referência em degrau e a respectiva resposta do controle SMC+PI.

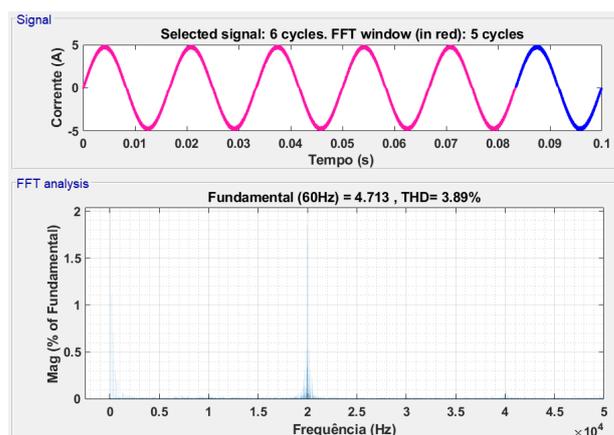


Figura 12. Distorção harmônica apresentada pela corrente a ser injetada na rede elétrica pelo controle PI.

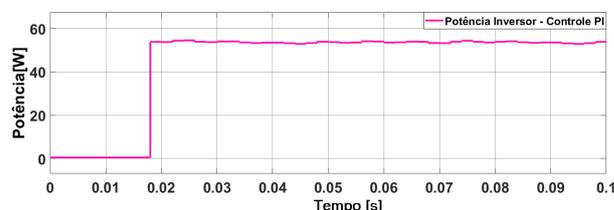


Figura 13. Potência obtida pelo inversor com o controle PI.

plementados em um processador digital de sinais (*DSP*) da Texas Instruments modelo TMS320F28035. Já a conexão com a rede elétrica foi realizada utilizando um transformador com uma relação 1:10 em série com uma variac e com resistência de carga  $R=15\Omega$  com a finalidade de adequar os níveis tensão da rede elétrica conforme as especificações técnica do kit.

Os sinais de corrente de referência e da corrente de saída são externalizados via *DAC* disponibilizados pelo *DSP* sendo estes sinais sobrepostos para mostrar o correto funcionamento do controlador onde a corrente de saída segue a referência solicitada. Já a corrente de saída é obtida por uma probe de corrente posicionada na saída do inversor, onde é possível observar a resposta ao degrau do controlador aqui proposto, todos esses sinais foram monitoradas por um osciloscópio com banda de passante de 200MHz.

Uma visão geral da bancada montada no laboratório de eletrônica de potência da UFABC para a implementação experimental é mostrada na Figura 14.



Figura 14. Bancada experimental montada no LEPS da UFABC.

### 6.1 Resultados do controle SMC + PI

Da mesma forma que foi realizado na simulação computacional para analisar o comportamento do controle SMC + PI, igualmente na implementação experimental foi utilizado um degrau como sinal de referência de controle, variando de aproximadamente  $300\text{mA}$  até  $1,4\text{A}$  conforme mostrado na Figura 15.

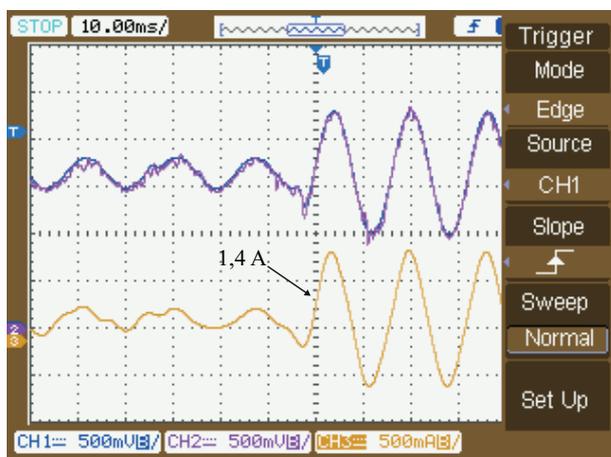


Figura 15. SMC + PI Experimental.

Na Figura 17 é possível ver a transição ao degrau do sinal de referência senoidal no controle do laço de corrente em detalhes, observa-se que a resposta do controlador SMC + PI, foi plenamente satisfatória.

O valor da THD da corrente injetada na rede elétrica do experimento é de 10,31% como apresentado na Figura 16. Este valor é pouco menor quando comparado com o valor de THD quando o controlador PI é empregado. Neste caso, o valor é 10,62% conforme mostrado na Figura 20

### 6.2 Resultados experimentais do controle PI

Foi realizada implementação experimental com emprego de um controlador PI para comparação na mesma planta

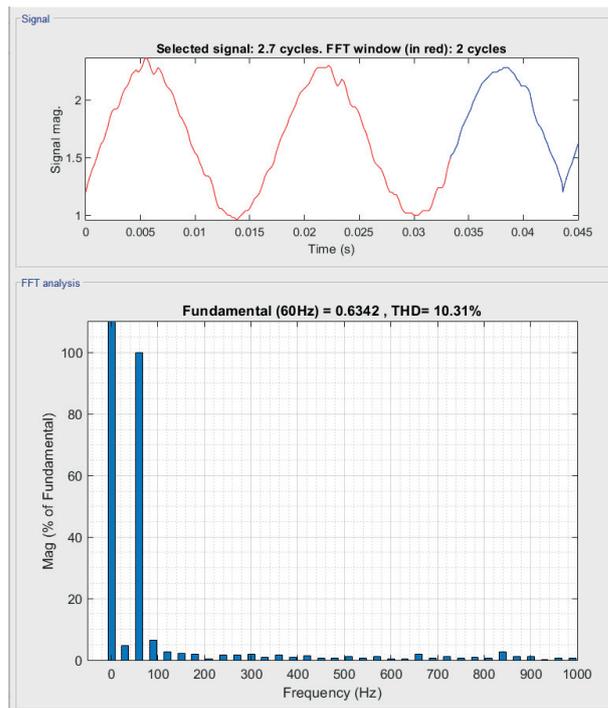


Figura 16. Distorção harmônica apresentada pela corrente a ser injetada na rede elétrica utilizando controlador SMC + PI experimental.

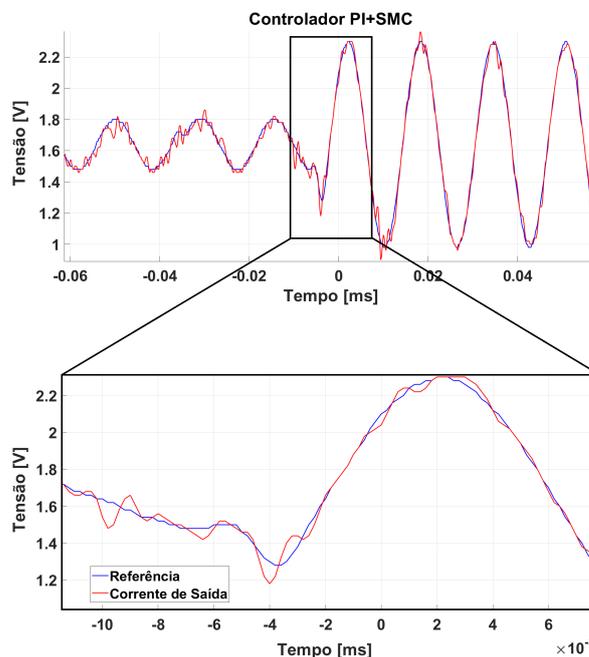


Figura 17. Resposta ao degrau do controlador SMC + PI experimental.

adotada para o controle do laço de corrente do controlador SMC + PI, conforme mostrado na Figura 18. Vale ressaltar que foram adotados os mesmo parâmetros para a realização de uma análise comparativa dos controladores aqui apresentados.

Observa-se na Figura 18 que foi utilizado o mesmo degrau como sinal de referência de controle, variando de aproximadamente 300mA até 1,4A.

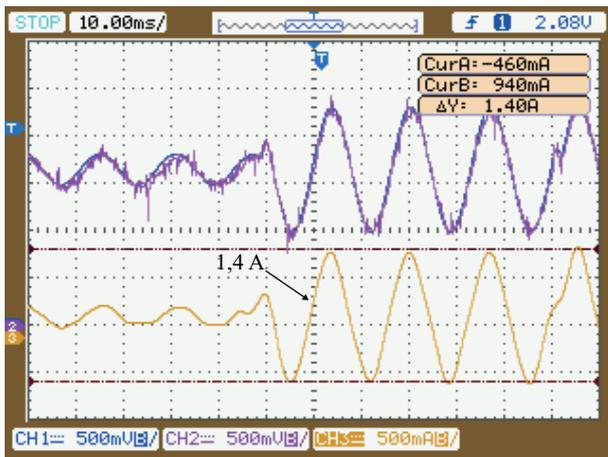


Figura 18. PI Experimental.

Na Figura 19 é possível ver a transição ao degrau do sinal de referência senoidal no controle do laço de corrente em detalhes, observa-se que a resposta do controlador PI foi satisfatória, porém o sinal obtido da corrente do indutor é muito mais ruidoso em comparação quando é utilizado o controlador SMC + PI.

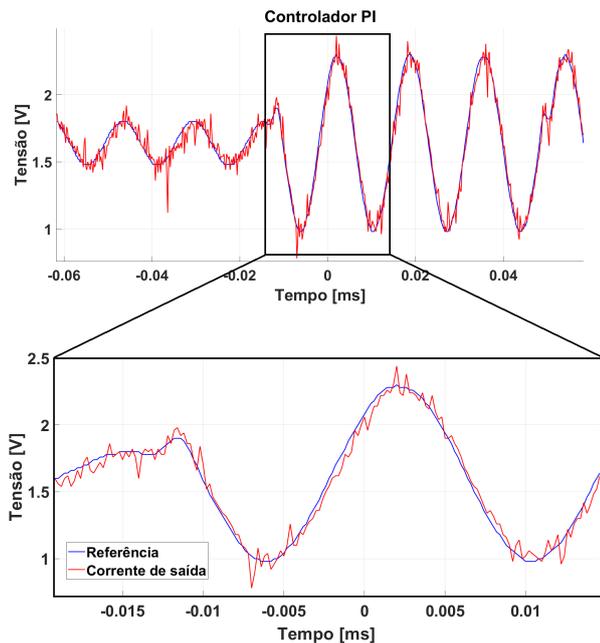


Figura 19. Resposta ao degrau do controlador PI experimental.

## 7. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi proposto a técnica de controle SMC + PI aplicado ao controle de corrente injetada na rede elétrica por meio de um inversor monofásico em ponte H com aplicação do filtro LC interligado à rede elétrica. A junção de duas técnicas de controle busca encontrar melhores resultados no controle da corrente.

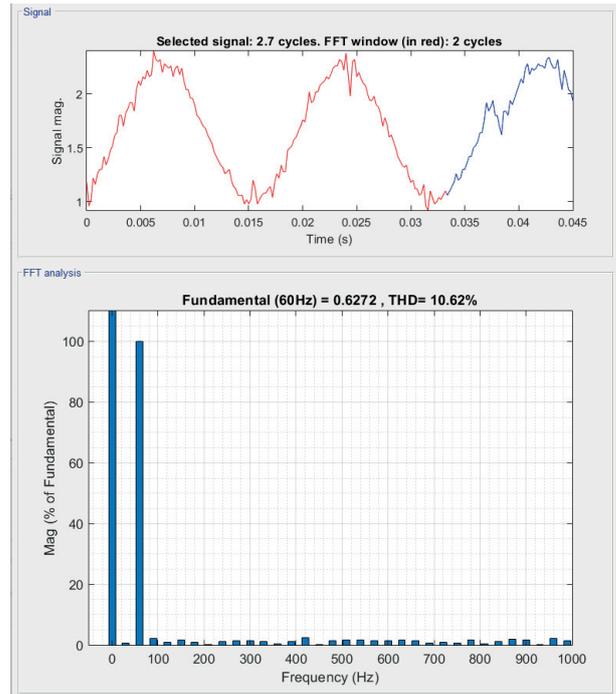


Figura 20. Distorção harmônica apresentada pela corrente a ser injetada na rede elétrica utilizando controlador PI experimental.

O controlador proposto calcula a tensão que deve ser modulada de forma que as referências de corrente sejam atendidas com a aplicação da lei que controle que empregue a função *eval* da superfície deslizante projetada a partir do erro das correntes.

Constatou-se pelas características apresentadas junto do controle por modos deslizantes mais PI, que esta estratégia é robusta, possui baixa complexidade de implementação e se mostra eficiente comparada aos controles tradicionais utilizados em inversores.

Os valores de distorção harmônica obtidos na implementação experimental apresentam discrepâncias em relação aos valores obtidos em simulação, dentre as possíveis causas podemos citar o fato de o DSP não realizar o controle dedicado do inversor, sendo que se as interrupções de controle de boost (50KHz) e do Inversor (20KHz) forem acionadas de forma simultânea, apenas uma será executada devido ambas ter o mesmo nível de prioridade, outro ponto é o fato de o sinal de baixa amplitude das correntes, devido às limitações elétricas do kit, não foi possível realizar testes funcionais nos mesmos níveis adotados nas simulações, porém podemos concluir que os resultados experimentais apresentaram um desempenho satisfatório comprovando a eficácia da proposta sendo que as referências foram prontamente atendidas.

Dito isto, tem-se como trabalho futuro analisar seu desempenho frente ao controlador Proporcional mais Ressonante (P+RES), realizando uma análise comparativa, entre os sinais das grandezas elétricas e os sinais de controle da corrente assim como, verificar o THD (*Total Harmonic Distortion*) e a potência a ser injetada na rede. Tanto em software de simulação como na implementação experimental.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aqui o apoio institucional e financeiro da UFABC e do seu respectivo programa de pós-graduação em engenharia elétrica.

## REFERÊNCIAS

- Afshar, Z., Zadeh, M.M., and Bathaee, S.T. (2019). Sliding mode control of grid-connected inverters using inverter output current. In *2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*, 1–5. IEEE.
- Agostinho, A.C. (2009). *Controle por modos deslizantes aplicado a sistema de posicionamento dinâmico*. Ph.D. thesis, Universidade de São Paulo.
- Augusto, L.D., Pontes, R.D., Altuna, J.A., and Alfeu Filho, J. (2020). Controle preditivo do tipo por estados finitos aplicado a um inversor monofásico conectado à rede elétrica. *Anais da Sociedade Brasileira de Automática*, 2(1).
- Balasubramonian, M. and Rajamani, V. (2014). Design and real-time implementation of shepwm in single-phase inverter using generalized hopfield neural network. *IEEE transactions on Industrial Electronics*, 61(11), 6327–6336.
- Bhardwaj, M. and Subharmanya, B. (2013). *Application Report - PV Inverter Design Using Solar Explorer Kit*. Texas Instruments.
- da Mata, G.L.E., Xavier, L.S., Pereira, H.A., Stopa, M.M., and Cupertino, A.F. (2016). Controle adaptativo com saturação dinâmica para inversores fotovoltaicos monofásicos. *VI Congresso Brasileiro de Energia Solar*.
- Galelli, M.T. et al. (2005). *Controle por histerese com frequência quase constante de um pré-regulador Boost*. Master's thesis, Universidade Federal de Uberlândia.
- Gerent, F.H. et al. (2005). *Metodologia de Projeto de Inversores monofásicos de tensão para cargas não-lineares*. Master's thesis, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Gil, G.M.V. (2019a). *Estudo, simulação e implementação de um sistema fotovoltaico de baixa potência usando controle por modos deslizantes*. Ph.D. thesis, Universidade de São Paulo.
- Gil, G.M.V. (2019b). *Estudo, Simulação e Implementação de um Sistema Fotovoltaico de Baixa Potência usando Controle por Modos Deslizantes*. Ph.D. thesis, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Jana, J., Saha, H., and Bhattacharya, K.D. (2017). A review of inverter topologies for single-phase grid-connected photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 1256–1270.
- Lazarini, M.V. (2008). *Controle direto de torque de motores de indução trifásicos sem sensores de velocidade usando a estratégia de controle por modos deslizantes*. Master's thesis, Universidade Estadual de Campinas.
- Lima, M.S. et al. (2015). *Controle de Corrente aplicado em inversor monofásico de tensão*. Master's thesis, Universidade Federal do Maranhão.
- Mossmann, B.H., Pereira, L.F.A., and da Silva Jr, J.M.G. (2019). Síntese de parâmetros de controladores proporcionais-ressonantes através do método da resposta em frequência. *SBAI 2019*.
- Ogata, K. (2011). *Engenharia de controle moderno*. PRENTICE HALL BRASIL. URL <https://books.google.com.br/books?id=iL3FYgEACAAJ>.
- Omine, L.T. and de Brito, M.A. (2019a). Comparative study of control systems for a photovoltaic inverter with lcl filter. In *2019 IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*, 1–6. IEEE.
- Omine, L.T. and de Brito, M.A. (2019b). Técnicas de controle moderno e aplicação em um sistema de gd monofásico. *71ª Reunião Anual - Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência - UFMS*.
- Prado, J.W.S., Bastos, E.d.P., and Bombardieri, A.J. (2017). Projeto de controlador pi discreto aplicado em conversor buck. *Anais do Salão de Ensino e de Extensão*, 370.
- Ramírez, R.O., Espinoza, J.R., Melin, P.E., Reyes, M.E., Espinosa, E.E., Silva, C., and Maurelia, E. (2014). Predictive controller for a three-phase/single-phase voltage source converter cell. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(3), 1878–1889.
- Rocha, T.d.O.A. (2015). *Contribuições para estratégia de controle aplicada à geração fotovoltaica interconectada à rede elétrica*. Ph.D. thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- Romdhane, H., Dehri, K., and Nouri, A.S. (2014). Stability analysis of discrete input output second order sliding mode control. *International Journal of Modelling, Identification and Control*, 22(2), 159–169.
- Silva, A.F.B.O., Silva, S.M., Santos, C.H.G.d., and Cardoso Filho, B.d.J. (2013). Aplicação do controle repetitivo a inversor pwm monofásico com filtro lc de saída utilizado em fonte programável ca. *Revista Eletrônica de Potência - Sobraep*.
- Silva, J.N.d. (2017). *Controle repetitivo discreto aplicado a um inversor monofásico conectado à rede elétrica*. Master's thesis, Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia.
- Simões, M.G. and Shaw, I.S. (2007). *Controle e modelagem fuzzy*. Editora Blucher.
- Tan, S.C., Lai, Y.M., and Chi, K.T. (2008). General design issues of sliding-mode controllers in dc-dc converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(3), 1160–1174.
- Vargas Gil, G.M., Lima Rodrigues, L., Inomoto, R.S., Sguarezi, A.J., and Machado Monaro, R. (2019). Weighted-pso applied to tune sliding mode plus pi controller applied to a boost converter in a pv system. *Energies*, 12(5), 864.