



# ANÁLISE DE DESEMPENHO DE CONVERSORES CC-CC COMO PRÉ-REGULADORES DO FATOR DE POTÊNCIA EM RETIFICADORES INDUSTRIAIS

Karen Andrade\*<sup>1</sup>, Dean Carlos <sup>2</sup> e Wanderson Rainer<sup>3</sup>

<sup>1</sup>PUC Goiás - Pontifícia Universidade Católica de Goiás

<sup>2</sup>PUC Goiás - Pontifícia Universidade Católica de Goiás

<sup>3</sup>PUC Goiás - Pontifícia Universidade Católica de Goiás

**Resumo** - O objetivo desse estudo é verificar como o chaveamento do conversor *boost* pode proporcionar melhoria no fator de potência de uma instalação contendo um retificador monofásico não controlado, juntamente com o controle da tensão de saída dentro de valores predefinidos. Resultados de simulação são apresentados para justificar o desenvolvimento da integração do *boost* com o retificador bem como resultados experimentais preliminares.

**Palavras-Chave** - Controle em malha fechada - Conversor *boost* - Fator de potência - Pré-regulador.

## PERFORMANCE ANALYSIS OF DC-DC CONVERTERS AS PRE-REGULATORS OF THE POWER FACTOR IN INDUSTRIAL RECTIFIERS

**Abstract** - The objective of this study is to verify how the switching of the *boost* converter can improve both the power factor of an installation containing an uncontrolled single phase rectifier, as well as the control of its output voltage, within predefined values. Simulation results presented justify the development of the *boost* integration with the rectifier as well as preliminary experimental results.

**Keywords** - *Boost* converter - Closed loop control - Pre-regulator - Power factor.

### I. INTRODUÇÃO

Circuitos conversores de corrente alternada para corrente contínua (CA/CC), ou retificadores, são comumente empregados em aplicações industriais como acionamento e controle de motores de corrente contínua, acionamento de locomotivas, estações retificadoras que fazem alimentação em redes de corrente contínua (HVDC), ou em qualquer outro equipamento ou aplicação onde a corrente contínua seja utilizada. Contudo, estes conversores normalmente trazem consequências negativas para o lado de corrente alternada (CA), especialmente no que diz respeito ao conteúdo harmônico da corrente de entrada.

Este fator é prejudicado ainda mais quando se deseja tensões de saída com menores valores de oscilação (*ripple*), ocasião na qual são empregados filtros, normalmente capacitivos, para reduzir o fator de *ripple* da tensão de saída. Este cenário contribui negativamente para o fator de potência da instalação na qual o retificador é inserido.

O fator de potência é um parâmetro que é afetado pela qualidade da energia elétrica e possui influência direta na utilização, quantificação e tarifação da energia. Para amenizar um baixo fator de potência é necessária a sua correção, evitando assim gastos com o excedente de potência reativa e perdas causadas pelo conteúdo harmônico. Mesmo normas internacionais apontam de forma substancial preocupações com baixo fator de potência, distorções harmônicas e baixa qualidade da energia elétrica em geral [4].

### II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Como o presente trabalho tem como objeto a integração entre o retificador monofásico e o conversor *boost* (CC/CC) para a elevação do fator de potência na fonte CA e controle da tensão de saída, serão apresentados para um melhor entendimento, os principais aspectos teóricos referentes.

#### A. Distorções Harmônicas na Corrente e Fator de Potência

As correntes harmônicas são sinais senoidais com frequências múltiplas da frequência fundamental que aparecem na rede devido a inserção de cargas não lineares. A soma da senoide de frequência fundamental com as componentes harmônicas da origem a uma corrente distorcida que circula no sistema elétrico [1]. As componentes harmônicas contribuem significativamente para a diminuição do fator de potência da instalação.

Quando a corrente e a tensão são puramente senoidais, o fator de potência pode ser calculado pela equação (1).

$$FP = \frac{P}{V_{rms} \cdot I_{rms}} \quad (1)$$

\*karenlorrane12@gmail.com

Onde:

- $FP$  - Fator de potência.
- $V_{rms}$  - Tensão eficaz.
- $I_{rms}$  - Corrente eficaz.
- $P$  - Potência ativa.

O  $FP$  quando apenas a corrente apresenta distorções harmônicas, pode ser calculado em função dos parâmetros da equação (2) [2].

$$FP = \frac{\cos(\phi_1)}{\sqrt{1 + THD^2}} \quad (2)$$

Onde:

- $THD$  - *Total Harmonic Distortion*.
- $\phi_1$  - Ângulo de deslocamento entre tensão e corrente fundamental

### B. Retificador monofásico de onda completa

Na maioria das aplicações, as cargas com componentes eletrônicos são sensíveis e necessitam de uma tensão o mais constante possível, por isso a necessidade de utilização do filtro. Neste caso, em paralelo com essa carga é inserido um capacitor utilizado como filtro junto ao retificador. Portanto, só é exigida corrente elétrica da fonte CA durante a carga do capacitor.

Na equação (3) é expressa a relação entre o *ripple* da tensão na carga e a capacitância do filtro [3]:

$$\Delta V_o = \frac{V_p}{2 \cdot f \cdot R \cdot C} \quad (3)$$

Onde:

- $\Delta V_o$  - *Ripple* de tensão.
- $V_p$  - Tensão de pico da rede.
- $f$  - Frequência da rede.
- $R$  - Resistência da carga.
- $C$  - Capacitância do filtro.

Logo, percebe-se na equação (3) que quanto maior a capacitância do filtro, menor será o *ripple* da tensão sobre a carga, por outro lado, a corrente no lado CA apresenta grande distorção.

### C. Conversor boost

O conversor *boost* (elevador) é um conversor chaveado periodicamente por um semicondutor e que produz em sua saída uma tensão contínua maior ou igual à tensão contínua de entrada.

As análises no conversor *boost* são feitas em função da tensão e corrente no indutor. Para o funcionamento no estado estável, a variação líquida na corrente do indutor é zero. Portanto é possível obter a expressão que relaciona a tensão na saída do *boost* com a razão cíclica [3].

$$V_o = \frac{V_s}{(1 - D)} \quad (4)$$

Onde:

- $V_o$  - Tensão na saída do conversor *boost*.
- $V_s$  - Tensão na fonte CC.
- $D$  - Razão cíclica.

A razão cíclica ( $D$ ) é dada pela razão entre o período que a chave permanece fechada pelo período total de chaveamento.

De forma geral, o conversor *boost* pode ser empregado com diferentes tipos de controle, seja para proporcionar a regulação da tensão de saída, para elevar o fator de potência quando associado a conversores CA/CC ou em ambos os casos. Como exemplos: Um controlador Fuzzy é aplicado ao conversor *boost* de forma a regular o fator de potência no lado CA do sistema [6]; Uma nova proposta de controle é apresentada com um conversor *boost* intercalado [7]; O sistema é mantido com o filtro capacitivo e o conversor *boost* é conectado em paralelo com a instalação, visando apenas a correção do fator de potência [8].

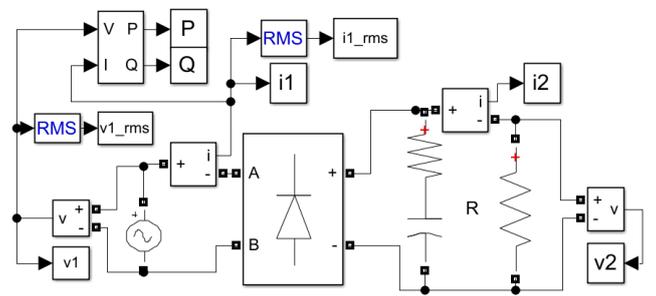
## III. METODOLOGIA

Para fazer a análise do conversor CC-CC como pré-regulador do fator de potência de uma instalação contendo um retificador monofásico não controlado, foi feito um estudo das simulações do circuito do conversor CC-CC e a integração do conversor com o retificador monofásico não controlado, onde foi empregado o *software* MATLAB.

### A. Retificador monofásico de onda completa

Inserindo o filtro capacitivo, como ilustrado na Figura 1, foram feitas simulações com diversos valores de capacitância para averiguar sua influência na diminuição do fator de *ripple* de acordo com a equação (3). Este procedimento permite também verificar a distorção da corrente no lado CA e a consequente diminuição do fator de potência da estrutura com o aumento da capacitância do filtro.

Figura 1: Diagrama de simulação: retificador monofásico não controlado com filtro capacitivo.



### B. Conversor boost

No diagrama do conversor *boost* em malha fechada, um *setpoint* de 120 (V) é aplicado ao controle, conforme ilustra a Figura 2. A geração do sinal de erro, proveniente da comparação entre o *setpoint* e a tensão medida na carga é aplicado a um controlador PI, indicado como CONT\_PI na Figura 2. A saída do controlador é aplicada a um saturador com valores de 0 a 1,

uma vez que este sinal é aplicado à entrada do gerador de sinal por Modulação de Largura de Pulso (PWM) para ajuste da razão cíclica de chaveamento da chave semicondutora (MOSFET). Além disso, uma métrica de avaliação do controlador foi aplicada de forma a estabelecer um indicador de desempenho para o controlador proporcional-integral (PI). O bloco IAE representa a integral absoluta do erro. Esta métrica foi utilizada devido ao fato de que os parâmetros de ajuste do controlador ( $k_p$  e  $k_i$ ) foram obtidos via processo de otimização.

O diagrama de simulação do conversor *boost* em malha fechada é ilustrado na Figura 2.

A Figura 3 ilustra o conteúdo do bloco CONT\_PI.

Figura 2: Diagrama de simulação: conversor elevador (*boost*) em malha fechada.

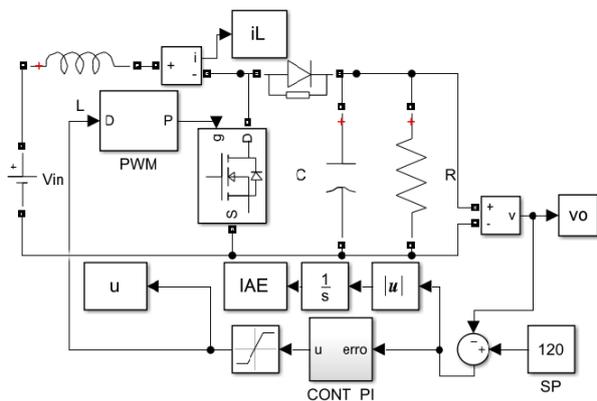
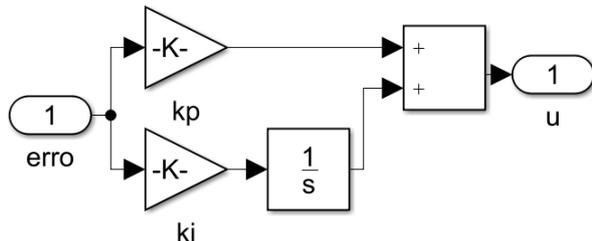


Figura 3: Diagrama de simulação: malha de controle de tensão.



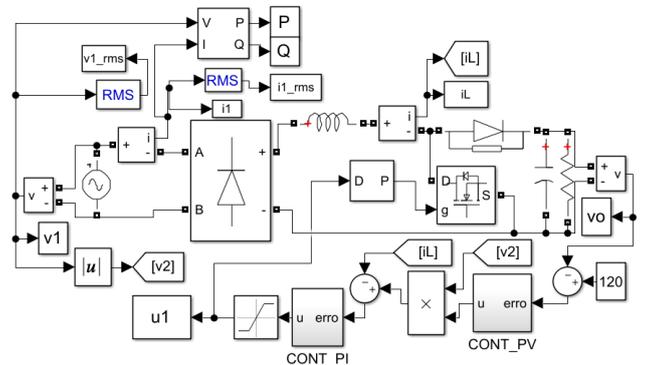
Conforme exposto anteriormente, os ganhos  $k_p$  e  $k_i$  do controlador de tensão do conversor *boost* foram obtidos via processo de otimização. A técnica determinística baseada no método de Newton foi empregada de forma que os valores dos ganhos do controlador pudessem proporcionar desempenho satisfatório para o controle da tensão de saída [11].

### C. Integração do retificador com o conversor em malha fechada

O sistema de controle aplicado à integração do conversor *boost* com o retificador possui duas malhas de controle: i) uma malha de tensão para controlar a tensão na carga e ii) uma malha de corrente para fazer com que a corrente do *boost* (corrente no indutor  $i_L$ ) se aproxime da forma de onda da tensão na saída do retificador. Desta forma, espera-se que, com a similaridade entre a tensão de saída do retificador e a corrente do *boost* devido ao controlador ocorra uma diminuição na distorção harmônica da corrente de entrada do retificador, maximizando, portanto, o fator de potência da estrutura. A Figura 4 ilustra o diagrama de simulação para a integração entre o retificador e o conversor *boost* com controle de malha

fechada.

Figura 4: Diagrama de simulação: integração do retificador com o conversor *boost* em malha fechada.



O procedimento de testes desta estrutura envolve inicialmente o ajuste dos ganhos do controlador de tensão, indicado na Figura 4 como CONT\_PI\_V. Uma vez sintonizados os parâmetros  $k_p$  e  $k_i$  deste controlador de forma a manter na carga valores de tensão desejados via *setpoint*, foram ajustados os ganhos do controlador de corrente, indicado na Figura 4 como CONT\_PI\_I.

Os controladores são conectados em cascata, de forma que a saída do controlador de tensão fornece referência para o controlador de corrente. Desta forma, além de possibilitar o controle da tensão de saída, a estrutura da Figura 4 permite aproximar a corrente do indutor à forma de onda da tensão de saída do retificador, evitando correntes distorcidas no lado CA.

## IV. RESULTADOS

Os tópicos seguintes apresentam os resultados de ambas as etapas da metodologia.

### A. Retificador monofásico de onda completa

A Tabela I mostra os diferentes valores de *FP* e *ripple* para diferentes valores de  $C$  de filtro. A Figura 5 obtida com os valores da Tabela I mostra graficamente o benefício proporcionado pelo filtro capacitivo em relação à carga, pois com maiores valores de  $C$ , menores os percentuais de *ripple*. Porém, o lado CA possui consequências negativas, pois o *FP* diminui com o aumento de  $C$  devido às distorções harmônicas na corrente.

A distorção da corrente apresentada na Figura 6 faz com que o *FP* da estrutura seja de 0,4806.

Tabela 1: Fator de potência e tensão de *Ripple* para diferentes valores de capacitância de filtro

Capacitância( $\mu F$ )	Ripple(V)	Fator de Potência
220	22.32	0.5500
330	14.88	0.5131
470	10.45	0.4806
560	8.77	0.4643
680	7.22	0.4460
820	5.99	0.4293
1000	4.91	0.4121
1200	4.09	0.3966
2200	2.23	0.3502

Figura 5: Resultado de simulação: fator de potência e tensão de *ripple* em função da capacitância do filtro.

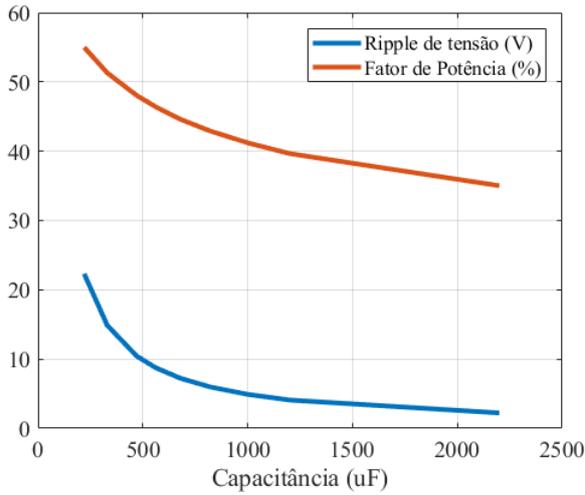
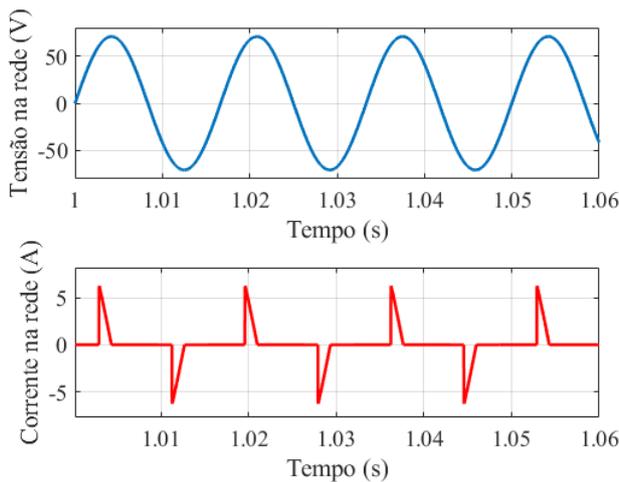


Figura 6: Resultado de simulação: formas de onda da tensão e da corrente no lado CA do retificador com a presença do filtro capacitivo de  $470 \mu\text{F}$ .



## B. Simulação: Conversor boost

As simulações com o conversor *boost* tem como objetivo indicar o funcionamento da estrutura frente às equações do conversor. O conversor *boost* possui as características da Tabela II.

Tabela 2: Características do conversor *boost* simulado em malha aberta.

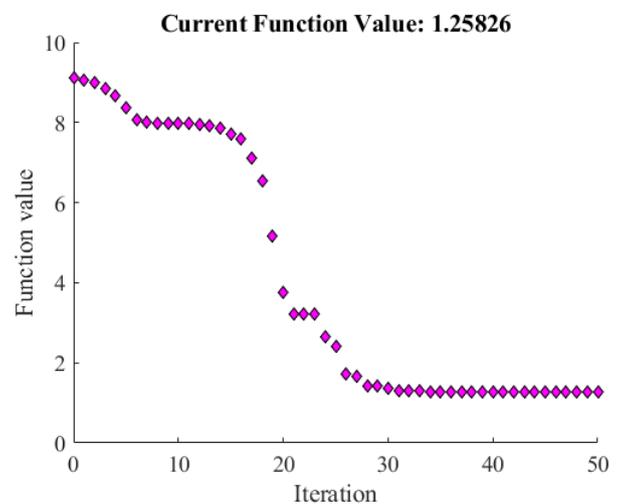
Tensão de Entrada	$V_{in}$	70.71(V)
Frequência de Chaveamento	$f$	5(kHz)
Resistência da Carga	$R$	120( $\Omega$ )
Indutância do <i>boost</i>	$L$	2.3(mH)
Razão Cíclica	$D$	50%
Capacitância	$C$	470( $\mu\text{F}$ )

Com o *boost* alimentado por uma fonte CC foi realizado o controle em malha fechada para a tensão de saída. Com o *setpoint* de 120(V), o erro máximo presumido é de 120(V) quando a saída do conversor é nula. Desta forma, assume-se o valor máximo para a saída do controlador ( $u(t)$ ) como

sendo  $1/120$ . Tendo em vista que o controlador proporcional-integral (PI) para esta aplicação possui valores maiores para  $k_i$  do que para  $k_p$ , o método determinístico foi empregado tendo como ponto de partida os valores  $k_p = 1/360$  e  $k_i = 2/360$ , como sendo respectivamente  $1/3$  e  $2/3$  do erro máximo [12]. A função objetivo para o otimizador foi construída visando minimizar a integral absoluta do erro (IAE), fazendo com que a cada iteração o otimizador encontre valores de  $k_p$  e  $k_i$  que minimizem a diferença entre o *setpoint* e a saída do conversor *boost*.

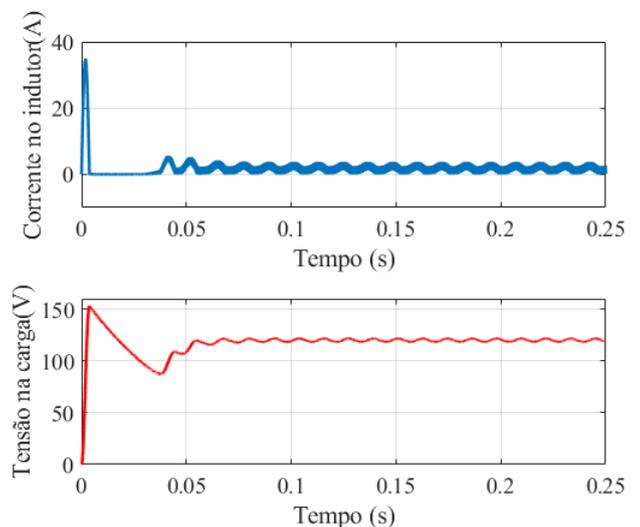
A Figura 7 mostra a evolução do otimizador ao minimizar o IAE para controle da tensão de saída. Após 30 iterações o otimizador estagnou fornecendo os valores  $k_p = 5.464e - 07$  e  $k_i = 0.70814$ .

Figura 7: Resultado de simulação: gráfico dos valores de otimização.



Com estes valores, o conversor em malha fechada possui o comportamento ilustrado na Figura 8.

Figura 8: Resultado de simulação: valores de corrente e tensão do conversor *boost* em malha fechada.

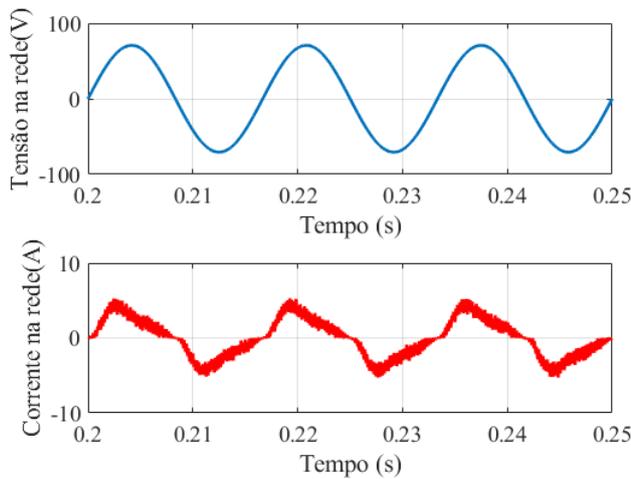


### C. Simulação: Integração do retificador com o conversor em malha fechada - controlador digital

Para um estudo preliminar desenvolvido, optou-se por controladores digitais PI para a tensão na carga e a corrente no indutor. Para ambos os controladores, os parâmetros  $k_p$  e  $k_I$  foram ajustados empiricamente nesta etapa inicial. Para esta condição, o fator de potência aumenta para 0,94 para  $T_S = 1ms$ .

Porém, a taxa de amostragem é um parâmetro de grande relevância para o desempenho do controlador [12]. Portanto, simulações foram realizadas para  $T_S = 25\mu s$ , resultando nas formas de onda de tensão e corrente de entrada ilustradas na Figura 9 com o fator de potência de 0,96.

Figura 9: Resultado de simulação: formas de onda da tensão na carga e corrente no lado CA para a integração do retificador com o *boost* em malha fechada ( $T_S = 25\mu s$ ).



Ou seja, o período de amostragem  $T_S$  dos controladores possui grande influência no desempenho dos controladores PI de tensão e de corrente do *boost*. Optou-se por controladores digitais em um primeiro momento com objetivo de empregar experimentos em bancada para o controle em malha fechada. No entanto, devido a impossibilidade de computar o real valor eficaz dos sinais, foram utilizados controladores analógicos nas simulações, com os parâmetros otimizados  $k_p$  e  $k_I$ .

### D. Simulação: Integração do retificador com o conversor em malha fechada

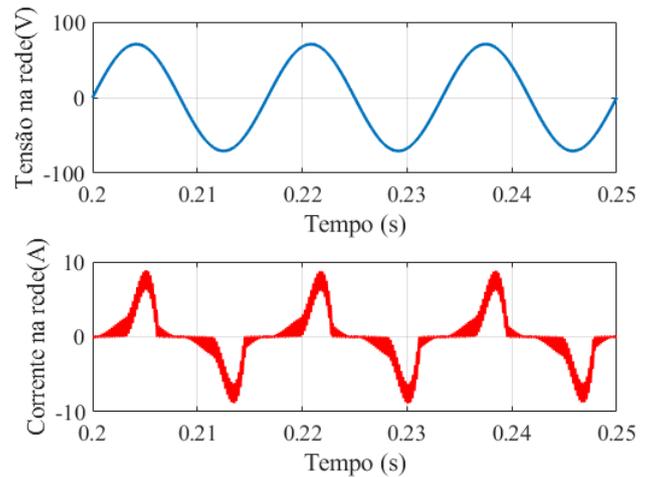
Com o controlador analógico foi realizado primeiramente o controle PI de tensão na saída do conversor *boost*. No qual as constantes  $k_p = 5.464e - 07$  e  $k_i = 0.70814$  foram obtidas através do método determinístico tendo como função objetivo a IAE (Integral Absoluta do Erro), a Figura 7 mostra a evolução do otimizador ao minimizar o IAE para controle da tensão de saída.

A integração do *boost* com o retificador com o controle PI de tensão, apresenta um controle estável da tensão na carga e um aumento significativo no fator de potência, considerando que a corrente no lado CA tende a se aproximar de um modelo senoidal, como ilustrado na Figura 10.

O fator de potência obtido foi de 0.7721, o que é compreen-

sível, pois, somente a tensão na carga está sendo controlada. Observado o desempenho satisfatório no controle da tensão, foi integrado a malha de controle do sistema o controlador PI analógico para o controle também da corrente no indutor.

Figura 10: Resultado de simulação: formas de onda da tensão e corrente no lado CA para a integração do retificador com o *boost* em malha fechada com controle de tensão.



Para obter as constantes com os valores otimizados  $k_p = 79.3809$  e  $k_i = 20.1051$  do controlador de corrente, foi utilizada como função objetivo no método determinístico a expressão:

$$FF = (1 - FP) \quad (5)$$

Onde:

- $FF$  - Função de avaliação (ou função objetivo).
- $FP$  - Fator de potência.

O gráfico da  $FF$  em função das iterações é expressa na Figura 11.

Figura 11: Gráfico das iterações no método determinístico para as constantes  $k_p$  e  $k_i$  do controlador PI de corrente.

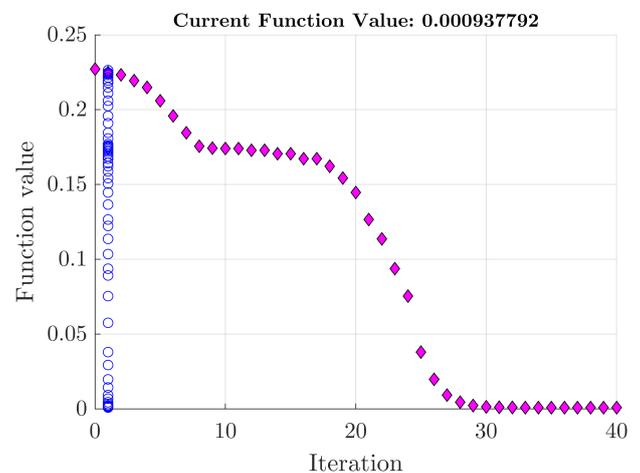
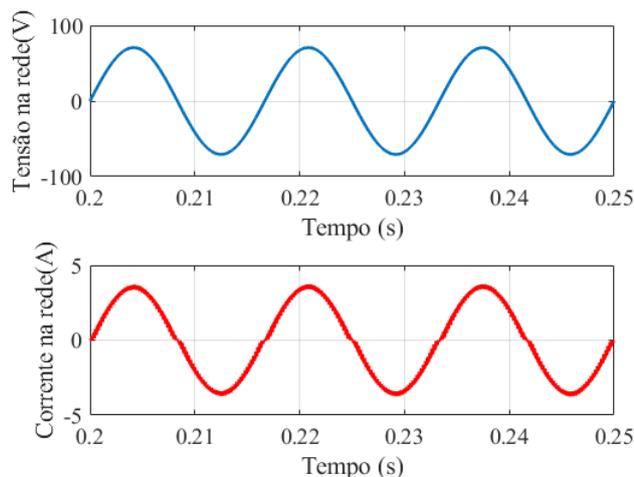


Figura 12: Formas de onda da tensão e corrente na fonte CA com controle PI analógico em malha fechada.



Como esperado, é possível constatar na Figura 12 o controle da corrente no indutor *boost* que garante uma forma de onda da corrente na fonte CA quase idêntica a forma de onda da tensão da rede. Para esta situação o fator de potência foi elevado a 0.9994.

## V. CONCLUSÕES

Neste estudo foi empregado o conversor CC-CC elevador (*boost*) na saída de um retificador monofásico não controlado de onda completa em substituição ao filtro capacitivo da estrutura. A proposta desta substituição é a possibilidade de se obter valores de tensão de saída com baixos níveis de oscilação associados à possibilidade de controle de tensão na carga. Além disto, o conversor *boost* faz com que o fator de potência da estrutura seja potencializado, uma vez que a implementação de malhas de controle, sobretudo de corrente, minimiza as distorções harmônicas no lado CA do retificador. Neste estudo foram realizados procedimentos de simulação computacional que permitiram concluir que: com o aumento da capacitância do filtro capacitivo na saída do retificador ocorre uma diminuição do *ripple* da tensão de saída e conseqüentemente uma diminuição do fator de potência da estrutura; as malhas de controle de tensão e de corrente do conversor *boost* proporcionam melhores resultados para controladores PI com elevada frequência de amostragem.

## REFERÊNCIAS

[1] B. Gandhi and M. Ezhilmaran, "Achieving high input power factor for DCM boost PFC converters by controlling variable duty cycle," *2013 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC), Chennai*, pp. 18-20, 2013.

[2] A. Vadde, S. Sachin and V. V. S. N. SitaramGupta, "Real implementation of synchronous boost converter with con-

troller for power factor correction," *2017 IEEE Region 10 Symposium (TENSYMP), Cochin*, pp. 1-4, 2017.

[3] K. S. H. Babu, R. Holde, B. K. Singh and V. S. Chippalkatti, "Power factor correction using Boost converter operating in CCM for front-end AC to DC conversion," *2018 Technologies for Smart-City Energy Security and Power (ICSESP), Bhubaneswar*, pp. 1-6, 2018.

[4] A. Ullah, S. Khan and S. Zhaoyun, "Power Factor Control Using Boost Type Converter," *2018 IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), Chongqing*, pp. 54-60, 2018.

[5] F. Zhang, J. Xu, H. Yu and G. Zhou, "Inductive idling boost converter with low inductor current-ripple and improved dynamic response for power factor correction," *2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Atlanta, GA*, pp. 3210-3215, 2010.

[6] S. A. Krishna and L. Abraham, "Boost converter based power factor correction for single phase rectifier using fuzzy logic control," *2014 First International Conference on Computational Systems and Communications (ICCSC), Trivandrum*, pp. 122-126, 2014.

[7] E. V. Sreevidya and V. Jegathesan, "A modified control approach for power factor correction in AC/DC boost converter," *2015 International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS), Coimbatore*, pp. 1-6, 2015.

[8] S. K. Sahoo and H. R. Jariwala, "A new power factor correction technique using PFC boost converter," *2012 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Venice*, pp. 819-823, 2012.

[9] M. H. Granza and C. H. Illa Font, R. Gules, "Single-phase non-isolated high power factor rectifier based on an interleaved DCM boost converter in a three-level configuration," *2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC), Fortaleza*, pp. 1-6, 2015.

[10] S. Daying, S. Weifeng, W. Qing, X. Shen and L. Shengli, "A novel digital controller for boost PFC converter with high power factor and fast dynamic response," *2013 IEEE 10th International Conference on ASIC, Shenzhen*, pp. 1-4, 2013.

[11] J. L. Botelho et al., "Parametric regression methodology and optimized control for DC motor," *2017 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Kouty nad Desnou*, pp. 1-5, 2017.

[12] V. Skanda, Power Factor Correction in Power Conversion Applications Using the dsPIC DSC. *Microchip Application Note AN1106*, 2007.