

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE INVERSOR FOTOVOLTAICO PARA COMPENSAÇÃO DE POTÊNCIA REATIVA EM SISTEMAS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Bruno Furtado Albuquerque (Ideatek) - furtado.bfa@gmail.com

Luan Gabriel de Oliveira Tristão (USP) - lgotcfg@gmail.com

Resumo:

Esse artigo apresenta uma análise teórica e experimental sobre a capacidade de injeção de reativos por parte de inversores fotovoltaicos sendo utilizados como compensação de reativo em unidades consumidoras. No primeiro capítulo tem-se a introdução sobre o assunto seguido do segundo capítulo que aborda os modos de compensação de reativos. Brevemente no terceiro capítulo é explicado a teoria de funcionamento ao qual esses inversores se utilizam para gerar potência reativa e, após isso, no quarto capítulo há uma análise experimental utilizando um inversor de 15kW e uma fonte CC de 10kW. Por fim, no quinto capítulo são apresentadas conclusões sobre o experimento e idéias para estudos futuros.

Palavras-chave: *Fator de potência, controle de reativos, análise experimental.*

Área temática: *Conversão Fotovoltaica*

Subárea temática: *Tecnologias e ensaios de inversores e outros equipamentos de eletrônica de potência*

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE INVERSOR FOTOVOLTAICO PARA COMPENSAÇÃO DE POTÊNCIA REATIVA EM SISTEMAS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Bruno Furtado Albuquerque – furtado.bfa@gmail.com

Ideatek Service Solar - SMA Service Brasil

Luan Gabriel de Oliveira Tristão – lgotcfg@gmail.com

Growatt New Energy Technology CO.,LTD

Resumo. *Esse artigo apresenta uma análise teórica e experimental sobre a capacidade de injeção de reativos por parte de inversores fotovoltaicos sendo utilizados como compensação de reativo em unidades consumidoras. No primeiro capítulo tem-se a introdução sobre o assunto seguido do segundo capítulo que aborda os modos de compensação de reativos. Brevemente no terceiro capítulo é explicado a teoria de funcionamento ao qual esses inversores se utilizam para gerar potência reativa e, após isso, no quarto capítulo há uma análise experimental utilizando um inversor de 15kW e uma fonte CC de 10kW. Por fim, no quinto capítulo são apresentadas conclusões sobre o experimento e ideias para estudos futuros.*

Palavras-chave: *Fator de potência, controle de reativos, análise experimental.*

1. INTRODUÇÃO

Os incentivos para produção de energia elétrica permitiram a redução de custos na implantação de sistemas de geração alternativos, como o de energia solar fotovoltaica. Esses sistemas, por sua vez, quando utilizados como geração distribuída (GD) trazem benefícios tanto para a sociedade quanto para o meio ambiente, reduzindo a emissão de poluentes e trazendo maior competitividade ao preço da energia elétrica.

Considerando a crescente popularização da geração distribuída têm-se também o aumento do uso de inversores conectados à rede de distribuição. Por este motivo, os inversores fotovoltaicos vêm desempenhando cada vez mais funções que vão além do seu papel principal de transformação da energia dos módulos fotovoltaicos para injeção na rede elétrica de distribuição como, por exemplo, o controle de fator de potência e compensação de reativos (Agarwal, 2018).

2. MODOS DE COMPENSAÇÃO DE REATIVOS

Ao dimensionar um sistema de GD, deve-se avaliar a possibilidade da tarifação de excedentes reativos a unidade consumidora (UC). Mesmo que o sistema não altere a energia reativa fornecida pela rede de distribuição, é possível que a conta de energia da UC seja tributada, devido ao fato do sistema diminuir a potência ativa consumida da rede por conta da geração acarreta na diminuição o fator de potência da instalação (KIM, S.). Por exemplo, no cenário abaixo, a UC tem o seguinte perfil de consumo de energia, consumo de P_1 (W) de potência ativa e Q_1 (VAr) de potência reativa. Sendo as variáveis: S para a Potência Aparente medida em Volt-Ampere (VA); P para a Potência Ativa em Watts (W); Q para a Potência Reativa medida em Volt-Ampere Reativo (VAR); e fp sendo o Fator de Potência.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (1)$$

$$FP = \cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (2)$$

Após instalado o sistema de GD, haverá uma potência de geração representada na Fig. 1 como $P_{\text{GERAÇÃO}}$ que será compensada da potência P_1 do sistema. Como não houve compensação pela potência reativa Q_1 de acordo com as Equações (1) e (2), o $\cos(\varphi)$ da instalação aumenta, mesmo que nenhum reativo tenha sido gerado ou consumido da rede. Portanto, a UC que não era tributada por excedentes de reativos pode passar a ser tributada por conta da diminuição do fator de potência. Este efeito se acentua à medida que P_1 é maior em relação a P_2 .

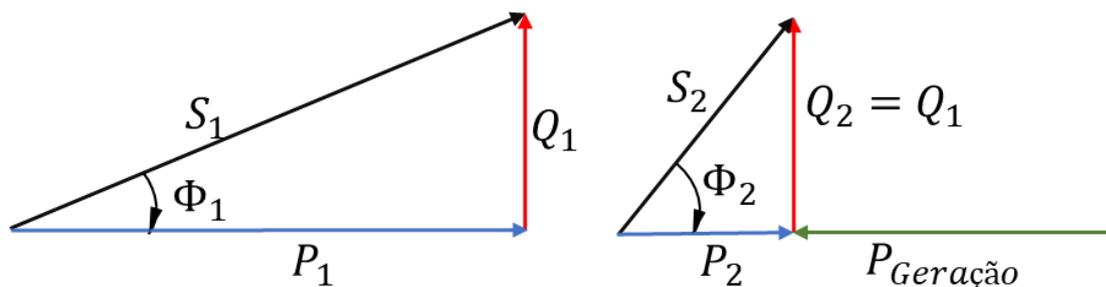


Figura 1: Potências da unidade consumidora antes e depois da instalação do sistema de geração distribuída.

Porém, em um cenário onde a UC está sendo tarifada por excedentes de reativos, se forem compensados através de inversores injetando potência reativa capacitiva na rede, segundo Pinto et al. (2012), esta configuração aumenta a probabilidade do inversor se desconectar da rede devido ao aumento da tensão causada pela potência capacitiva injetada, podendo reduzir a atratividade deste tipo de configuração. No caso do sistema de GD injetando potência reativa indutiva, o controle dos valores da tensão é mantido impedindo a desconexão, mas podem ocorrer tarifas a respeito do fator de potência. Conclui-se que todas as configurações apresentadas apresentam fatores limitantes técnicos ou econômicos. Neste trabalho, serão apresentados experimentalmente, os modos de controle de compensação de reativos de um inversor fotovoltaico conectado à rede elétrica.

3. PRINCÍPIOS DE OPERAÇÃO

Levando em consideração os inversores fotovoltaicos como sendo uma fonte de tensão, a análise de consumo e injeção de potência para esse equipamento conectado à rede de distribuição é análoga a uma máquina síncrona conectada a um barramento infinito, que no caso é a própria rede de distribuição, segundo Albuquerque F. L et al. (2009). Um fator importante que aumenta a dinâmica dos inversores é o fato desses não sofrerem por efeitos físicos como a inércia de um rotor; por outro lado, os inversores não possuem nenhum tipo de sincronização natural à rede que, no caso dos motores elétricos, é feita através da potência ativa, pela defasagem entre as fases, e pela potência reativa, com a diferença de amplitude das tensões de saída (Albuquerque, 2009). Assim sendo, é necessário a utilização de algum método de controle capaz de criar essa sincronização de forma artificial para que os inversores possam conectar-se à rede de distribuição (Yu, 2005).

Dado a similaridade que os inversores têm aos motores elétricos, o método de análise para a criação do elo artificial entre o inversor e a rede de distribuição pode basear-se na Eq. (3) e (4). Sendo as variáveis: V_i a tensão nos terminais do inversor; V_s para a tensão da rede de distribuição; L_c Indutância do indutor de acoplamento medida em Henry (H); δ sendo a defasagem entre os ângulos das tensões V_s e V_i ; e f como sendo a frequência do sistema medido em Hertz (Hz).

$$P = \frac{V_i V_s}{2\pi f L_c} \sin \delta \quad (3)$$

$$Q = \frac{V_i^2}{2\pi f L_c} - \frac{V_i V_s}{2\pi f L_c} \cos \delta \quad (4)$$

Para que transferência de potência ativa seja feita entre inversor e a rede é necessário que exista defasagem entre as tensões V_i e V_s , e para transferência de potência reativa é fundamental a diferença entre a amplitude das tensões V_i e V_s . É válido ressaltar que o inversor somente realizará transferência de potência ativa à rede caso exista fonte geradora de energia conectada a ele, no caso de um inversor solar essas fontes podem ser baterias ou módulos fotovoltaicos. As figuras (1), (2), (3) e (4) exemplificam estas condições através do diagrama fasorial do sistema (Tsengenes, G. Georgios, 2011) e (Albuquerque, 2009).

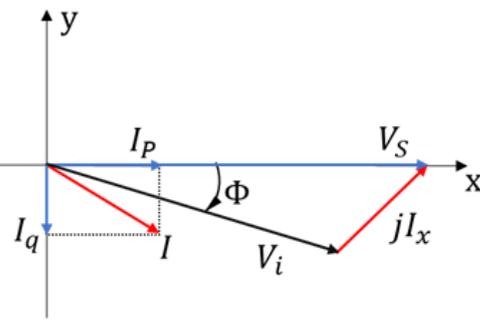
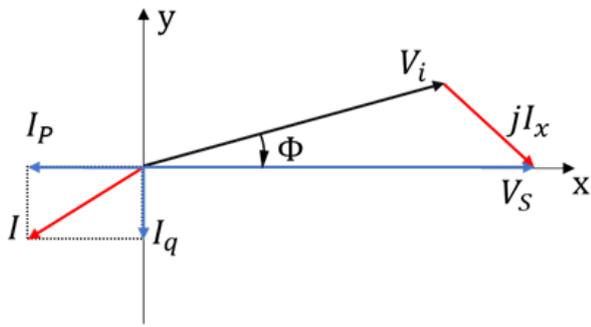


Figura 1: Injetando potência ativa e absorvendo reativa. Figura 2: Absorvendo potência ativa e absorvendo reativa.

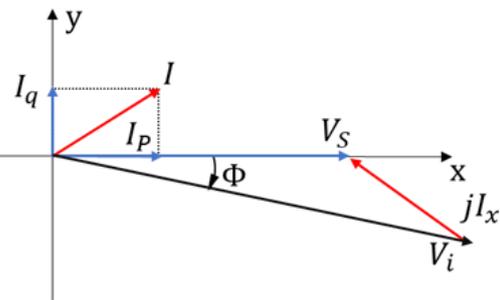
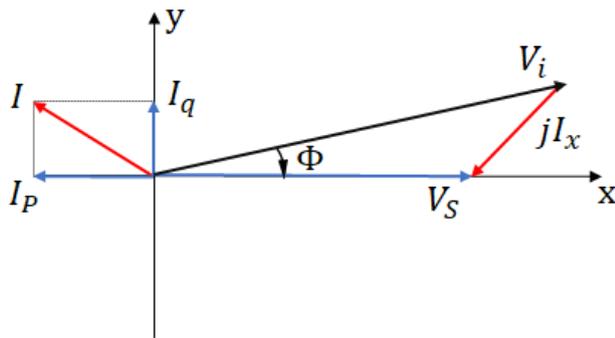


Figura 3: Injetando potência ativa e injetando reativa. Figura 4: Absorvendo potência ativa e injetando reativa.

Os diagramas fasoriais mostram que há possibilidade de gerar potência reativa sem que a potência ativa dos painéis fotovoltaicos seja afetada, desde que a Eq. 5 seja respeitada. Onde S é a potência aparente nominal do inversor, Q é a potência reativa requerida, que será definida manualmente, e P sendo a potência instantânea que os módulos fotovoltaicos estão entregando.

$$S^2 \geq Q^2 + P^2 \quad (5)$$

4. ANÁLISE EXPERIMENTAL

4.1 Materiais e métodos

Para verificação do que foi apresentado, foi proposto o ensaio a seguir utilizando os seguintes materiais:

1. Fonte CC com simulador de painéis fotovoltaicos de 10kW Supplier FCCT 1000-100.
2. Inversor trifásico SMA STP25000TL-30 de 25kW.
3. Analisador de energia Fluke 325-II.

Para a ligação elétrica foi utilizado o esquema ilustrado na Fig. 5, a fonte de corrente contínua foi ligada com a alimentação em corrente alternada independente da ligação à rede do inversor, para a entrada de corrente contínua do inversor foi utilizado os conectores apropriados e cabeamento em cobre. As pontas de prova utilizadas para a medição de corrente do analisador de energia são do tipo Fluke i3000 iFlex e as pinças de tensão são do tipo crocodilo, próprias para o uso com o analisador de energia Fluke 435-II. O aterramento é comum para todos os equipamentos do ensaio. Para a alimentação em corrente alternada do inversor foi utilizada a rede 380V_{3F+N} disponível.

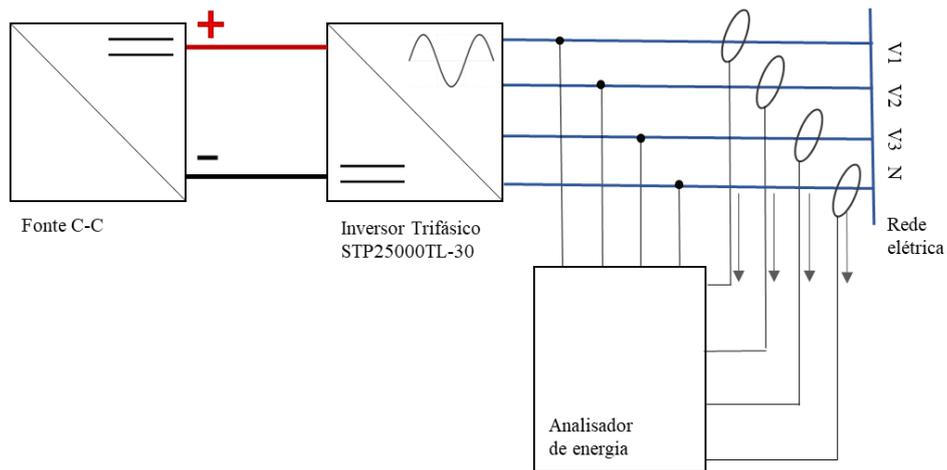


Figura 5: Esquema de ligação para o ensaio



Figura 6: Foto da ligação do ensaio

4.2. Ensaio de potência

Utilizada uma janela de análise de um minuto para a aquisição dos dados, e o intervalo da amostragem é de 250ms para os dados de potência coletados.

4.2.1. Potência ativa

Neste primeiro ensaio, a potência de MPP da fonte em modo simulador de painéis fotovoltaicos foi selecionada para 2500W com tensão em $600V_{MP}$ e o inversor foi configurado para trabalhar em modo MPPT e sem controle de potência reativa, o seu fator de potência deve ser $fp = 1,00$.

Na Fig. 7 é possível verificar que, ao longo do ensaio, a potência ativa e a aparente se mantiveram com valores semelhantes e a potência reativa se manteve próxima de zero, como esperado.

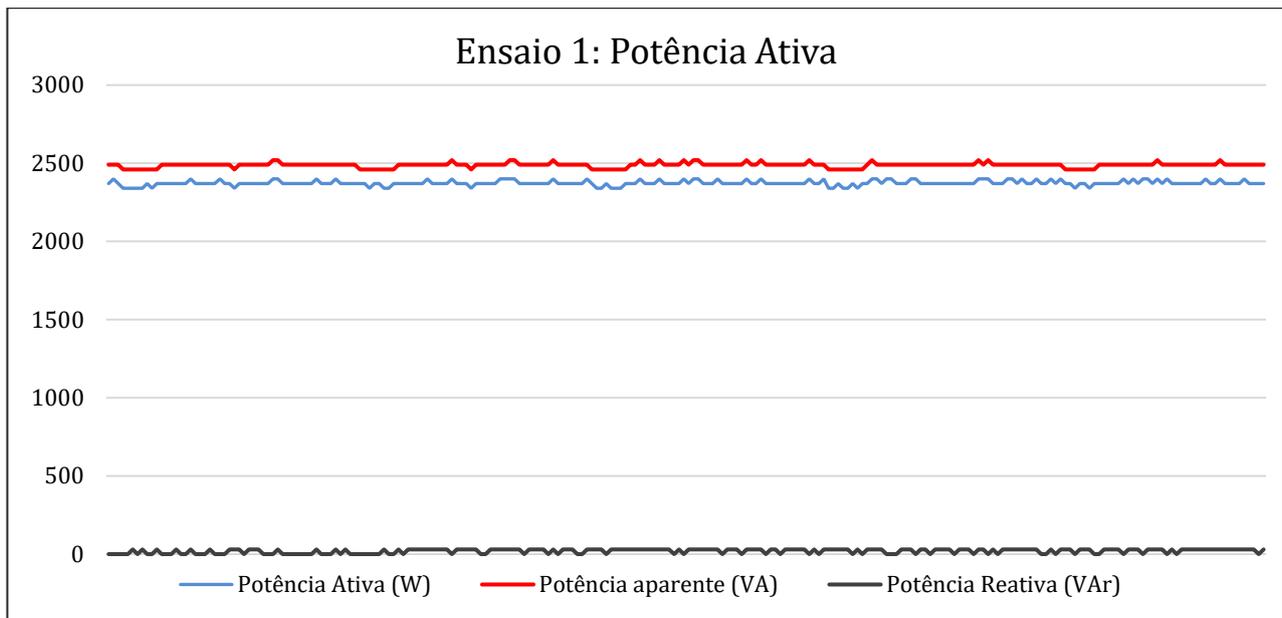


Figura 7: Ensaio 1 - Potência Ativa

4.2.2. Potência ativa e reativa indutiva

Neste ensaio, a potência de MPP da fonte foi mantida em modo simulador de painéis fotovoltaicos e sua potência para 2500W, a tensão em $600V_{MP}$ e o inversor foi configurado para trabalhar em modo MPPT. Para controle de potência reativa foi selecionado o valor de 3000VAr indutivo.

Na Fig. 8 a potência ativa foi mantida inalterada, como se toda a transferência de potência da fonte CC fosse mantida em potência ativa e a potência reativa configurada é somada a este montante, sem interferir na geração do inversor. Para este ensaio, o fator de potência (FP) medido foi de 0,629.

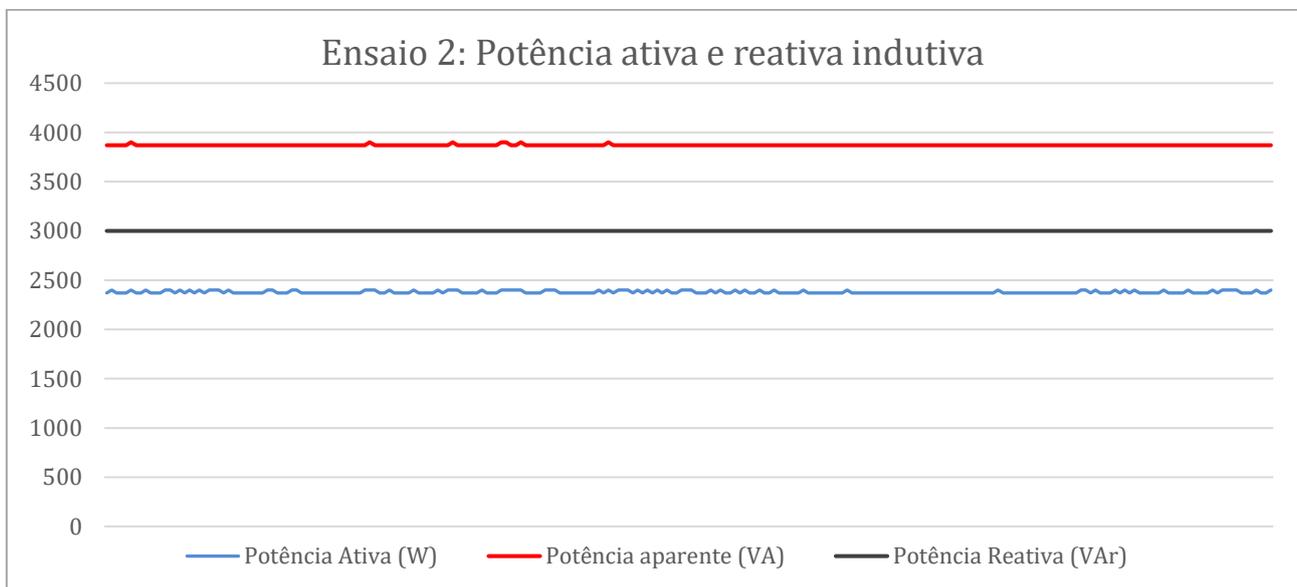


Figura 8: Ensaio 2 - Potência ativa e reativa indutiva

4.2.3. Potência ativa e reativa capacitiva

As configurações foram mantidas como no ensaio anterior, porém, para o controle de potência reativa foi selecionado o valor de 3000VAr capacitivo.

Na Fig. 7 verifica-se que, a potência ativa e a aparente foram mantidas, porém a potência reativa configurada tem o sinal contrário em relação ao ensaio anterior, onde ela era de característica indutiva. Para este ensaio, o fator de potência (FP) medido foi de 0,635.

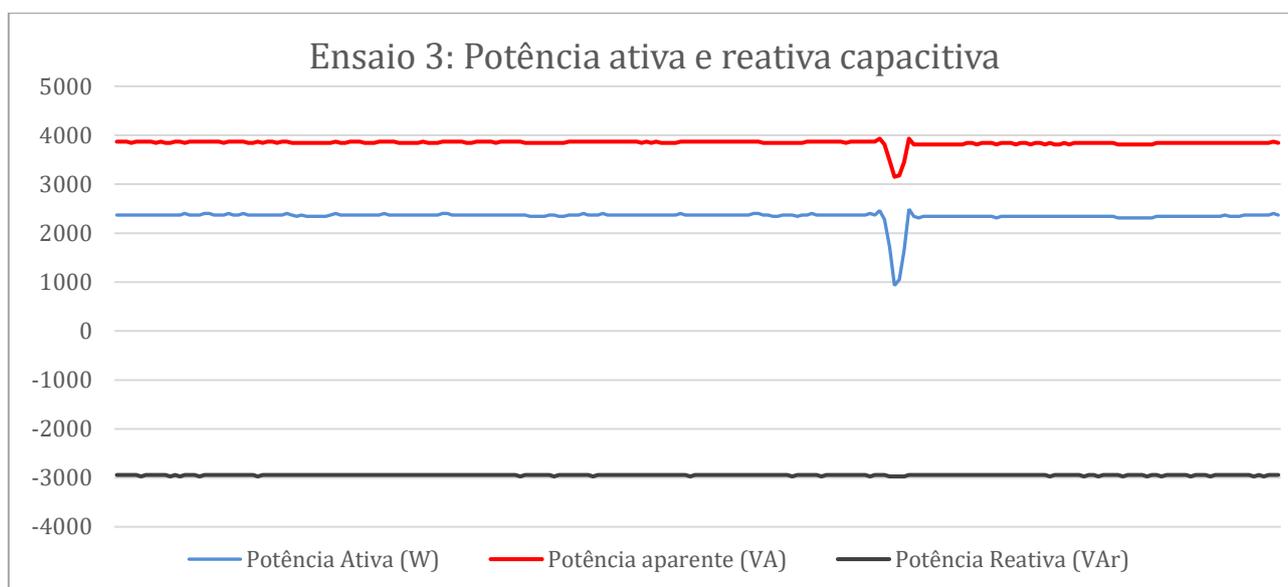


Figura 9: Ensaio 3 - Potência ativa e reativa capacitiva

4.2.4. Potência reativa indutiva

Para os próximos ensaios, o inversor foi colocado em modo noturno, no qual o inversor, após interrompido o fornecimento de potência ativa oriundas dos painéis solares, funciona apenas de modo a injetar potência reativa da rede elétrica, consumindo uma quantidade mínima de potência ativa para este fim. A capacidade desse inversor e de seus modelos semelhantes para este fim é muito próxima de seu valor nominal, podendo chegar, em valores próximos de 25kVAr.

Na avaliação, a fonte de corrente contínua foi desligada e desconectada do inversor para evitar interação entre eles. Para o controle de potência reativa foi selecionado o valor de 3000VAr indutivo.

Na Fig.10, é possível verificar que a potência ativa do inversor fica bem próxima de zero, as medições apresentam apenas potência reativa. A potência aparente é praticamente igual à potência ativa, por conta disso.

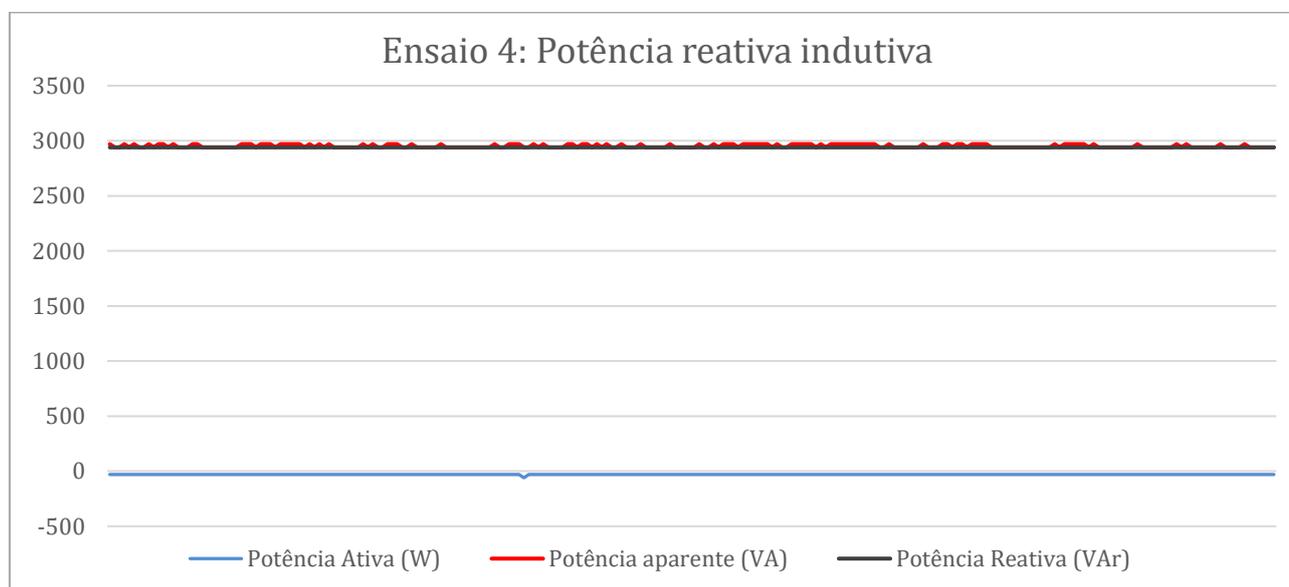


Figura 10: Ensaio 4 - Potência reativa indutiva

4.2.5. Potência reativa capacitiva

O controle de potência reativa foi configurado para 3000VAr capacitivo, as outras condições são as mesmas do ensaio anterior, com a fonte de corrente contínua completamente desligada. É possível observar apenas a potência reativa, dessa vez com valores negativos.

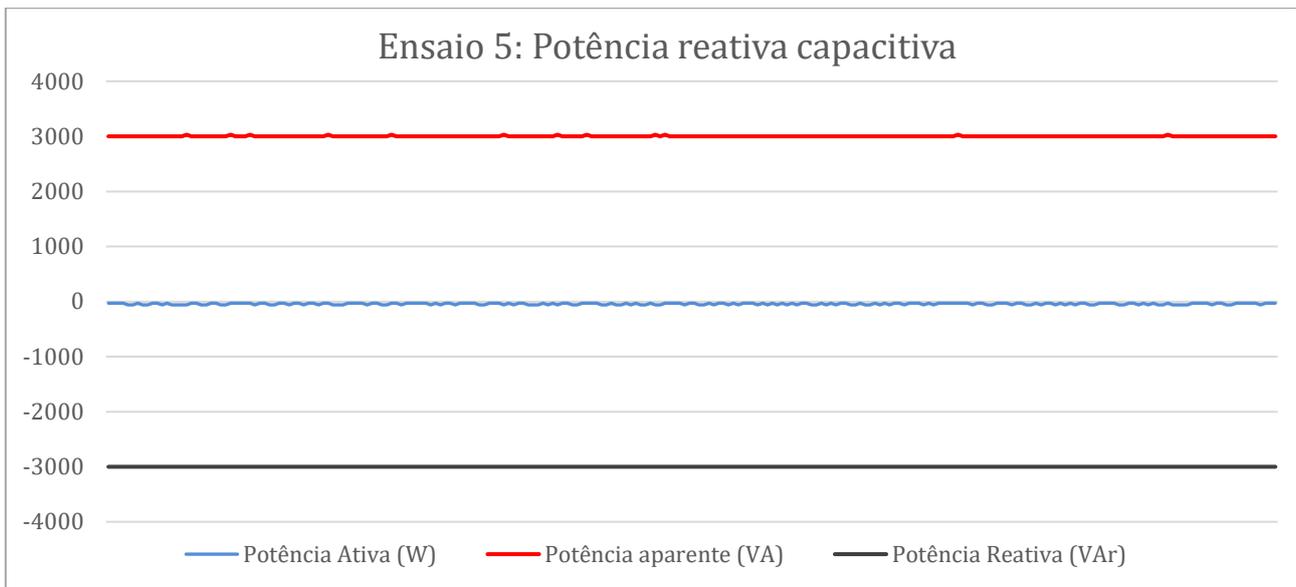


Figura 11: Ensaio 5 - Potência reativa capacitiva

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi possível investigar pelos ensaios que há a possibilidade de utilizar um inversor solar para injeção de reativos na rede, permitindo assim, a correção do fator de potência da unidade consumidora sem a necessidade de utilização de equipamentos adicionais, tendo em vista as especificações do inversor como fator limitante. É válido ressaltar que esta função, apesar de ser possível para a topologia de um inversor solar comercial, só é utilizável caso o fabricante disponibilize desta opção e isso justifica, portanto, a escolha do inversor para a aplicação.

De forma a ressaltar, também, a possibilidade da utilização do inversor para compensação de reativos apenas a noite, e através de diversas formas de controle, ficando para estudos futuros utilizando funções como $Q(P)$, geração de reativos em função da potência ativa, de forma a não prejudicar a produção energética da usina e a Volt/VAr, geração de reativos em relação a tensão, a fim de regulação do nível de tensão dentre outras.

Uma observação que pode ser retirada deste estudo é que a geração de reativos por parte do inversor não afeta diretamente a potência ativa extraída dos módulos fotovoltaicos ou baterias, desde que a soma dos quadrados das potências, tanto reativa quanto ativa, não ultrapassem a o quadrado da potência aparente nominal do inversor, assim como foi mostrado anteriormente. Ou seja, um estudo em relação ao sobredimensionamento de inversores para suprir demanda de reativo pode considerada como um projeto de pesquisa futuro.

REFERÊNCIAS

Agarwal, R. K.; Hussain, I.; Singh, B., 2018 – Dual-function PV-ECS integrated to 3P4W distribution grid using 3M-PLL control for active power transfer and power quality improvement. IET Renewable Power Generation, v. 12, n. 8, p. 920-927, 2018.

Albuquerque F. L., Moraes A. J., Guimarães G. C., Sanhueza S. M. R., Vaz A. R., 2009 – Photovoltaic solar system connected to the electric power grid operating as active power generator and reactive power compensator. – THE 8th LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION - CLAGTEE 2009.

KIM, S.; YOO, Gwonjong; SONG, Jinsoo. A bifunctional utility connected photovoltaic system with power factor correction and UPS facility. In: Conference Record of the Twenty Fifth IEEE Photovoltaic Specialists Conference-1996. IEEE, 1996. p. 1363-1368.

Pinto, A., Zilles, R., Bet, I., 2012 – EXCEDENTE DE REATIVOS EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE, São Paulo – SP, IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferência Latino-Americana da ISES – São Paulo.

Tsengenes, G., Adamidis, G., 2011 – Investigation of the behavior of a three phase grid-connected photovoltaic system to control active and reactive power - ELSEVIER, Electric Power Systems Research 81 (2011) 177-184

Yu, H., Pan, J., Xiang, A., 2005 – A multi-function grid-connected PV system with reactive power compensation for the grid, Department of Electric Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China

Abstract. *This paper shows a theoretical and experimental analysis on the capacity of injecting reactive power from solar inverter being used as a way to enhance the power factor of consumer units. In the first chapter it is given the introduction about the subject matter followed by the second chapter that discuss the ways of compensate reactive power. Briefly the third chapter explains the working theory behind it which these inverter make use to generate reactive power and after that there is a experimental analysis using a 15kW inverter and a 10kW DC source. Lastly, the fifth chapter brings some conclusions over the experiments and also ideas for futures studies.*

Key words: *Power factor, reactive power control, experimental analysis.*