

# Sintonia de Controlador PI para Sistema Fotovoltaico Autônomo Através de Alocação de Polos com Conversor Buck

Daniel Fragata\*. Cleonor C das Neves.\*\*

\*FT, Universidade Federal do Amazonas-UFAM

BR (Tel: (92)3305-1480; e-mail: daniel.fragata7@gmail.com).

\*\*CMDI, Instituto Federal Amazonas-IFAM

BR (Tel: (92)3621-6700; e-mail: cleonor.neves@ifam.edu.br)

---

**Abstract:** This work aims to design an PI controller applied to the Buck converter to improve photovoltaic power generation in off-grid system facing more isolated area of the northern region. Experimental and simulation tests were performed to perform this study. In addition, the operating principles of photovoltaic modules, the dynamics of the characteristic curves and the modelling of a photovoltaic system aided by the software PSIM and MATLAB were studied and simulated. A Buck converter was then designed to meet the needs of the voltage and current levels to be supplied for the load. After the tests of the Buck converter with the photovoltaic system was designed an PI controller, aiming to correct the input voltage variation errors. And to finish the work were carried out simulation and experimental analyses obtaining the satisfactory behaviour as proposed by the controller design.

**Resumo:** Este trabalho tem o objetivo de projetar um controlador PI aplicado ao conversor buck para melhoria da geração de energia fotovoltaica em sistema off-grid voltado para área mais isolada da região norte. Para a realização desse trabalho foram realizados testes experimentais e de simulação. Além disso, foram estudados e simulados os princípios de funcionamento de módulos fotovoltaicos, a dinâmica das curvas características e a modelagem de um sistema fotovoltaicos auxiliado pelos softwares PSIM e MATLAB. Em seguida foi dimensionado um conversor buck para atender as necessidades dos níveis de tensão e corrente a serem fornecidos para a carga. Após os testes do conversor buck com o sistema fotovoltaico foi projetado um controlador PI, objetivando corrigir os erros de variação de tensão de entrada. E para finalizar o trabalho foram realizadas análises de simulação e de experimentais obtendo o comportamento satisfatório conforme proposto pelo projeto do controlador.

**Keywords:** Photovoltaic System, Convert Buck, PI Controller, Simulation.

**Palavras-chaves:** Sistema Fotovoltaico, Conversor Buck, Controlador PI, Simulação

---

## 1. INTRODUÇÃO

Novas fontes de geração de energia se fazem necessária, pois o consumo de energia nas diversas atividades desenvolvidas pelo o homem, fez com que ocorresse um aumento na demanda por energia elétrica nas últimas décadas. Em contraste com esse aumento de consumo, os investimentos feitos no setor de energia elétrica não têm atendido a demanda solicitada, o que provocou que muitos países ao pelo mundo tivessem passado por problemas no seu sistema energético [6]. Atualmente, a matriz energética no contexto mundial está composta em sua maioria por combustíveis fósseis: carvão, petróleo e gás natural, responsáveis por aproximadamente 80% da geração mundial de energia [9]. Essa grande parcela de produção de energia proveniente desse tipo, ocasionou problemas nos últimos anos, mudanças climáticas a nível global, emissão de gases poluentes na atmosfera, chuva ácida, perda da biodiversidade, bem como o esgotamento das fontes [8]. Estes problemas chamam atenção da sociedade e consequentemente dos governos de diversos

países que por sua vez começaram a desenvolver medidas e soluções para reduzir a dependência de energias não renováveis e incentivar o uso de fontes alternativas renováveis. Dentre essas alternativas de fonte de energia renováveis se encontra a energia fotovoltaica. Usualmente a energia solar pode ser implementada de duas formas, conhecidas comumente como *on-grid* e *off-grid* [7]. O método *on-grid* é conectado diretamente a rede. Isso significa que a energia produzida é enviada para barra infinita e que por um sistema de crédito subtrai parte da conta final de energia do consumidor. O método *off-grid* não é conectado à rede elétrica, desta forma a energia é armazenada diretamente em baterias que irão alimentar as cargas [7]. Diante dessas questões apresentadas, este trabalho propõem o desenvolvimento de um sistema fotovoltaico *off-grid* aplicado dentro da região norte do Brasil, estado do Amazonas, visando aplicar um controlador proporcional integral PI, para diminuir os erros e manter o nível de tensão projetado controlado. No Brasil utiliza-se as hidrelétricas como fonte principal de energia elétrica devido à grande

quantidade de rios e volume de água nos mesmos, embora o modelo nacional de geração de energia seja do tipo renovável, o mesmo necessita de um altíssimo investimento e grande área geográfica para implementação, causando mudanças ao ambiente. No território nacional existem regiões onde os ambientes locais não são beneficiados com o uso de energia elétrica, devido a localização ser de difícil acesso, isso levaria um custo altíssimo para levar a rede elétrica até os mesmos, sem contar com políticas ambientais que protegem regiões como a Amazônia, logo dificulta ainda mais implementar energia elétrica nessas regiões nos modelos urbanos. Dessa forma, a região norte necessita de alternativas de fontes de energias renováveis, como a fotovoltaica, para garantir a melhoria de vida. E a segurança mínima na variação de tensão é um dos desafios na implantação dessa fonte de energia. Neste sentido, este trabalho propõe mostrar um projeto de controlador PI para estabilizar a variação de tensão [5].

## 2. DISPOSITIVOS FOTOVOLTAICOS

Um módulo fotovoltaico é composto de um conjunto de células montadas sobre uma estrutura rígida e conectadas eletricamente. Normalmente as células são conectadas em série para produção de maior tensão [11]. Para que seja possível entender o comportamento eletrônico de uma célula fotovoltaica é recomendado que se use o modelo eletricamente equivalente, o circuito mais simples equivalente da célula ideal é uma fonte de corrente em paralelo a um diodo, no entanto uma célula real apresenta perdas [9,10]. As perdas mencionadas são representadas por resistências inseridas ao modelo elétrico da célula ideal resistência em série e resistência em paralelo [9].

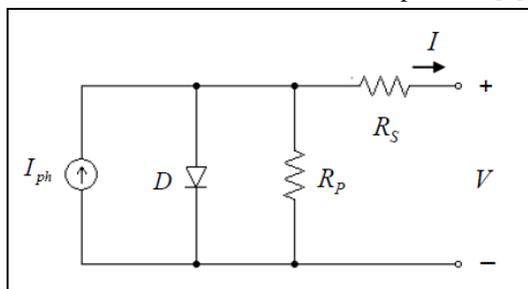


Fig. 1 Modelo de célula fotovoltaica de silício.

Usando como referência o modelo apresentado na figura 1 logo pode-se definir a equação característica para a corrente de saída da célula fotovoltaica descrita como;

$$I = I_{pv} - I_d - I_{sh} \quad (1)$$

$$I = I_{pv} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V + R_s I}{V_t \alpha}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (2)$$

### 2.1 Regulação de Tensão do Sistema Fotovoltaico

Como regulador de tensão do sistema fotovoltaico o conversor buck foi escolhido para o desenvolvimento desse estudo pela sua funcionalidade de abaixador de tensão [5,11] Muitos sistemas fotovoltaicos com conversores CC-CC relatados na literatura empregam o controle direto do ciclo de trabalho do conversor [9], nesse tipo de sistema não é

realizada a regulação apropriada da tensão ou da corrente nos terminais do dispositivo fotovoltaico e o conversor fica sujeito a estresse excessivo. No lugar da conexão direta de ciclo de trabalho é mais adequado utilizar um controlador de malha fechada com um compensador linear. Além de reduzir as perdas e o estresse do conversor, a presença de um controlador de malha fechada reduz o tempo de acomodação do conversor e evita oscilações e sob elevações, tornando mais fácil o funcionamento [1,9].

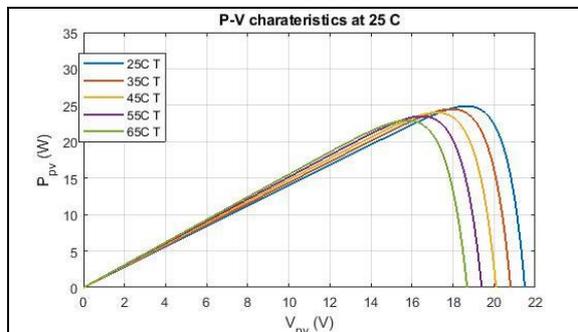


Fig. 2 Curvas de potência e corrente para diversas condições de temperatura.

### 2.2 Linearização do Sistema Fotovoltaico Off-grid

O modelo linear é descrito pela reta tangente no ponto (V, I) da curva  $i_{pv}$  e  $v_{pv}$  é:

$$i_{pv} = (-gV + I) + gv_{pv} \quad (3)$$

e pode ser representando por um circuito equivalente como, dados as variáveis  $R_{eq}$  e  $V_{eq}$  que são [11]:

$$R_{eq} = -1/g \quad (4)$$

$$V_{eq} = V - I/g \quad (5)$$

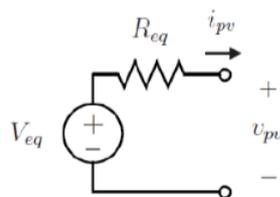


Fig. 3 Circuito linear equivalente

As variáveis de pequenos sinais são definidas como as equações a seguir:

$$\bar{v}_c = V_c + \hat{v}_c \quad (6)$$

$$\bar{v}_{pv} = V_{pv} + \hat{v}_{pv} \quad (7)$$

$$\bar{i}_L = I_L + \hat{i}_L \quad (8)$$

Desprezando o produto não linear e aplicando a transformada de Laplace pode-se obter o seguinte resultado para equação de pequenos sinais

$$G_{vd} = \frac{\hat{v}_{pv}(s)}{\hat{d}'(s)} = \frac{1 + sCR_c \left( I_L + \frac{VD(1 + sCR_c)}{R_L + sL} \right)}{sC + (1 + sCR_c) \left( \frac{1}{R_{eq}} + \frac{D^2}{R_L + sL} \right)} \quad (9)$$

### 3. PROJETO DE CONTROLADORES PARA O SF OFF-GRID

#### 3.1 Medição de parâmetros.

Para o desenvolvimento do conversor buck inicialmente foi necessário fazer a medição de tensão (OCV) e corrente (ISC) e Temperatura do módulo fotovoltaico no local ilustrado na figura 4. Para boas práticas de dimensionamento de painéis fotovoltaicos em Manaus se deve adotar o ângulo de 10°, durante o mês de maio no período das 10h às 14h foram coletadas amostras dos parâmetros, período também conhecido como HSP (Hora de pico solar).



Fig. 4 Modulo fotovoltaico.

Para as medições dos parâmetros ao longo dos dias do mês de maio no ano de 2020, utilizou-se um multímetro de marca Minipa. A tabela 1 mostra uma média dos valores mensurados. A média dos parâmetros foi utilizada para analisar e definir os valores de tensão e corrente do conversor buck com o módulo fotovoltaico como fonte de tensão, de tal forma que possa atender aplicações off-grid, como a utilização desse sistema em carga de baterias de equipamentos eletrônicos de baixo consumo de tensão e corrente, como carregar um celular, uma caixa de som de computador entre outras aplicações.

Tabela 1. Coleta de dados do mês de maio.

Hora	Tensão (OCV)	Corrente (ISC)	Temperatura (°C)	Potência (W)
10:00	20,15	0,905	41	18,43
10:30	19,45	0,77	43	14,98
11:00	19,2	0,56	47	10,892
11:30	19,4	0,23	41	4,349
12:00	19,75	1,125	48	22,47375
12:30	19,64	0,945	41	19,3275
13:30	19,425	0,86	50	16,74825
14:00	19,33	0,77	49	15,1075

#### 3.2 Dimensionamento do conversor Buck.

Utilizou-se o conversor buck para reduzir a tensão de entrada [4], conforme mostra o circuito elétrico proposto na figura 6. O conversor buck possui apenas uma chave que opera em alta

frequência, que quando ligada permite que a corrente passe pelo indutor. Quando a chave está desligada não há fluxo de potência entre a fonte e a carga e o diodo é utilizado como caminho alternativo para a descarga da energia armazenada no indutor [2,4,9]. Analisando a média modal dos parâmetros na tabela 1, definiu-se o valor de tensão de entrada, saída e corrente do conversor respectivamente como 19 V, 9 V, 1 A. Utilizando as equações descritas a seguir, obtém-se o valor dos parâmetros necessários para usar no dimensionamento do conversor buck, dessa forma pode-se descrever como:

$$\begin{cases} V_i = 19V \\ V_o = 9V \\ I_o = 1A \end{cases}$$

Sendo  $V_i$  a tensão de entrada,  $V_o$  a tensão de saída e  $I_o$  a corrente de saída. A partir dos parâmetros de tensão, possibilitando calcular a taxa de trabalho  $D$  do circuito, que consiste na razão entre a tensão de saída e a tensão de entrada [4].

$$D = \frac{V_o}{V_i} = \frac{9}{19} = 0,47$$

O valor médio de corrente no indutor é o mesmo da corrente de saída [4].

$$I_L = I_o$$

Como regra de projeto, determinamos que a variação de pico a pico na corrente não ultrapasse 40% do valor médio [2,4,11].

$$\Delta I_L = (40\%)I_L = 0,4 \cdot 1 = 0,4$$

Frequências mais altas de sinal PWM tem como vantagem a redução do valor do indutor para produzir o modo de condução contínua e do valor do capacitor para limitar o *ripple* na saída. Isso resulta em miniaturização destes componentes e redução de custos. Como desvantagem há o aumento nas perdas de potência das chaves, que produzirão calor e necessitarão de dissipadores de calor maiores. Tipicamente utilizam-se frequências acima dos 20kHz para evitar ruídos de áudio. As mesmas podem estender-se até a faixa de MHz. Para o presente projeto, arbitraremos uma frequência inicial de 25Khz.

$$f_{ARB} = 25kHz$$

Conhecendo-se a frequência e demais parâmetros, pode-se determinar o valor do indutor

$$L = 394\mu H$$

Para esse projeto será adotado para o indutor um valor comercial próximo ao calculado na tabela 2. A partir do valor do indutor prático, recalculamos a frequência necessária.

$$f = 24,8kHz$$

O valor nominal de corrente *rms* no indutor é calculado como:

$$I_{L,rms} \cong 1A$$

A capacitância mínima (arbitrando-se um *ripple* de 2%) é calculada como [23]:

$$C_{MIN} = 13,1\mu F$$

Baseado nos cálculos acima, utilizou-se os valores citados na tabela a seguir relacionando aos componentes comerciais disponíveis no mercado de valores mais aproximados aos componentes ideais calculados e parâmetros também adotados conforme mencionado pela literatura [11].

**Tabela 2. Componentes para o conversor.**

Componentes	Valor calculado	Valor Comercial	Valor adotado
Indutor	394uH	390uH	-
Capacitor	13,1uF	47uF	-
Resistor	-	-	10Ω
Frequência	24,8kHz	-	25kHz

### 3.3 Sistema FV em malha fechada.

Para se conhecer o comportamento do sistema FV inicialmente foi necessário observar as características da função de transferência em malha fechada e encontrar informações como constante de tempo de acomodação, coeficiente de amortecimento, frequência natural não amortecida, estes parâmetros são obtidos pela função de transferência:

$$G(s) = \frac{1036552100}{s^2 + 2127,6665s + 1091107474} \quad (11)$$

Dada a função de transferência em malha fechada em 11, obtém-se as informações mostradas, frequência natural não amortecida, coeficiente de amortecimento e constante de tempo de acomodação. A figura 5 mostra a resposta ao degrau para a função de transferência gerada no MATLAB, demonstrando um comportamento oscilatório da planta ao longo do tempo, até entrar em tempo de acomodação e os resultados que foram calculados. O coeficiente de amortecimento calculado caracteriza um caso subamortecido para uma excitação degrau unitário. Os polos da função de transferência em malha fechada encontram-se no semiplano esquerdo, logo caracterizando o sistema assintoticamente estável.

$$\begin{aligned} \omega_n &\cong 33031,915599 \text{ rad/s} \\ \zeta &\cong 0,032 \\ ts(2\%) &\cong 0,0037 \end{aligned}$$

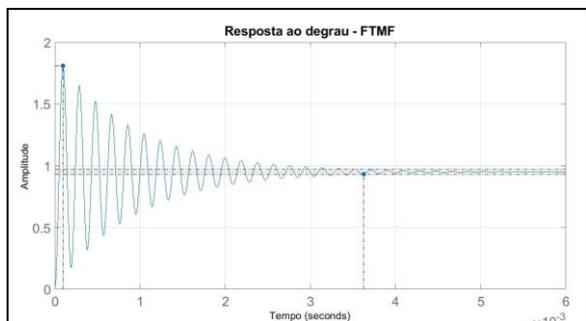


Fig. 5 Resposta ao degrau.

### 3.4 Controlador PI para o sistema off-grid.

Após a definição de tensão de trabalho do painel fotovoltaico através de uma média modal das medições ao longo do mês de maio e o dimensionamento do conversor CC-CC do tipo buck, foi definida a função de transferência equivalente a esse sistema *off-grid* onde se encontrou as características da planta em malha fechada. Afim de melhorar a resposta dessa planta este trabalho sugere a implementação de um controlador proporcional integral (PI). Utilizou o método de alocação de polos para encontrar o valor dos ganhos Kp e Ki. Para esse projeto adotou-se um coeficiente de amortecimento igual a 0,5, coeficiente de amortecimento de 0,5, tempo de acomodação a 2% e  $t_s \leq 3,7$ , já que a planta apresentou um coeficiente de amortecimento 0,03 e tempo de acomodação  $t_s = 3,7 \text{ ms}$ . Logo como resultado encontrou-se.

$$\omega_n = 2162,162162 \text{ rad/s}$$

Dessa forma obteve o valor do coeficiente de amortecimento que foi arbitrado e o valor da frequência natural não amortecida, sendo o coeficiente de proporcionalidade igual a 10,  $\beta = 10$ , com o resultando:

$$p = 2,16 \cdot 10^4$$

Fazendo a substituição obtém os ganhos para o compensador PI. A figura 8 ilustra o digrama de blocos com controlador PI e a função de transferência do sistema *off-grid*.

### 3.5 Sistema em malha fechada com controlador PI.

O sistema sem o controlador PI, apresentou um overshoot de 94,4% e a constante de tempo em 3,7ms, em comparação com o sistema com o controlador PI o sistema apresentou uma resposta significativa, com uma diminuição de overshoot e tempo de acomodação para 20% e 3ms. Conforme os resultados demonstrados, a planta com o controlador PI apresenta um resultado mais eficiente e estável conforme é possível perceber na figura 6.

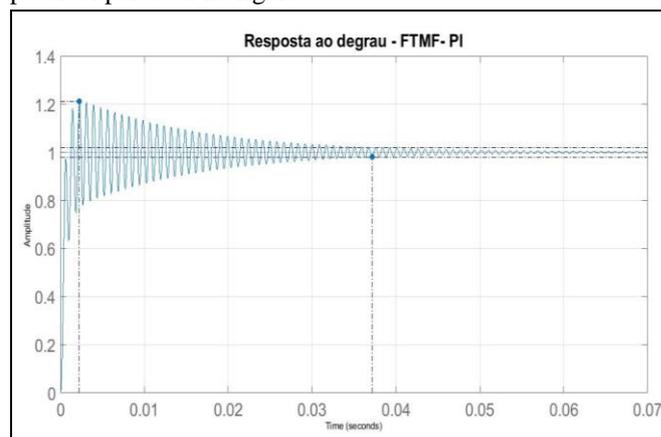


Fig. 6 Resposta ao degrau com PI

Utilizou-se a ferramenta do SIMULINK disponível no MATLAB para fazer uma análise comparativa simultânea das respostas ao degrau para cada função de transferência. Em malha aberta, em malha fechada e função de transferência com o controlador proporcional e integral (PI) adicionadas em um único *scope*, conforme as figuras 7 e 8.

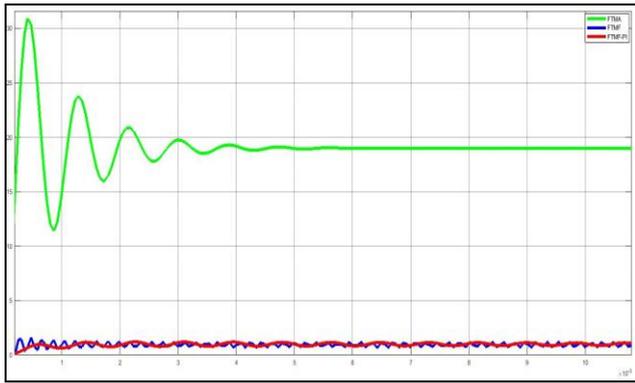


Fig. 7 Resposta ao degrau com PI

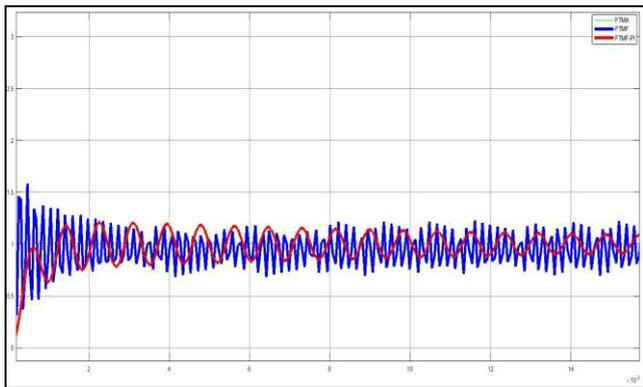


Fig. 8 Resposta ao degrau com PI

As figuras 7 e 8 mostram claramente a diferença dos sinais das funções de transferência, na figura 9 o sinal em malha aberta demonstra um *overshoot* e tempo de acomodação maior comparados aos demais, na figura 10 foi feita uma ampliação dos sinais sendo um apenas com malha fechada e outro sinal em malha fechada com o controlador PI. O sinal com o controlador PI demonstra uma resposta mais eficiente, sendo o mesmo com *overshoot* e tempo de acomodação menor.

#### 4. RESULTADOS

Utilizando o *software* PSIM, foi simulado a construção do conversor CC-CC de topologia buck, o PSIM oferece recursos para uma análise do ponto de vista teórico, o *layout* do gráfico possibilita uma melhor visualização dos resultados de tensão e corrente de saída. O painel fotovoltaico foi acoplado ao conversor CC-CC buck, para implementar o mesmo como fonte de tensão, alterando a estrutura física do projeto, porém com a mesma proposta de tensão de entrada de 19V, ( $V_i = 19V$ ). A simulação e análise dos resultados para essa modificação foram feitas utilizando a biblioteca solar module no *software* PSIM. Nessa proposta de configuração com o painel fotovoltaico acoplado ao conversor foi feita a configuração dos parâmetros do dispositivo com base nos dados listados na tabela 2 das características nominais extraídas na folha de dados do painel, parâmetros calculados pelo código no MATLAB e coleta de dados feitas no mês de maio de 2020. A biblioteca permite fazer a configuração desses dados e gerar um arquivo de extensão *.txt*, para eventuais análises e ou experiências

com o modelo desejado. Analisou-se os parâmetros elétricos na saída dos terminais do painel fotovoltaico, para garantir que as especificações do projeto do conversor buck fosse satisfatórias e o resultado como tensão e corrente de saída mantivessem os valores especificados inicialmente na proposta do projeto, logo o valor de tensão  $V_{pv}$ , deve ser igual a tensão  $V_i$  especificado anteriormente, portanto o valor deve ser igual a 19V, o sinal de tensão na saída do painel foi de aproximadamente 21V, o que para a especificação do projeto não é aceitável, pois a tensão de saída do conversor buck tem um aumento, aproximadamente 10.5V.

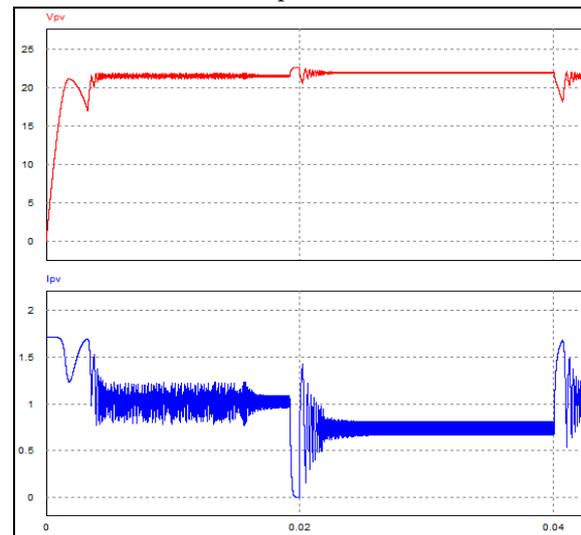


Fig. 9  $V_{pv} = 21V/ I_{pv} 1.2A$

#### 4.1 Implementação do controlador PI.

Na análise dos resultados da implementação do painel fotovoltaico observou-se uma variação de tensão na saída do painel de valor diferente a entrada do conversor estimada, devido a simulação intencional da variação de temperatura e irradiação semelhante ao que acontece ao longo de um dia comum, logo é necessário a implementação de um controle de tensão, de tal forma que na tensão saída do conversor buck tenha o valor igual a 9V, portanto foi adicionado ao modelo proposto o controlador PI e um sensor de tensão. O resultado do sistema fotovoltaico *off-grid* com a implementação do controlador PI foi satisfatório, pois a atuação do mesmo garantiu o controle de tensão na saída do sistema. Conforme percebe-se na figura 10 em aproximadamente 3ms, o sinal de resposta de tensão de saída tem o *overshoot* de aproximadamente 9.8V, entrando em regime permanente e estável em aproximadamente 4.5ms, logo nota-se que o sistema fotovoltaico *off-grid* projetado em regime permanente se mantém em 9V, mantendo as especificações propostas inicialmente para esse sistema. Para verificar a eficiência do controlador, considerou-se para o *offset* desse projeto, uma fonte de tensão variando em 1.5V, dessa forma a figura 10 demonstra o resultado dessa simulação, percebe-se que no instante inicial o *offset* se mantém em 10.5V, a tensão de saída do sistema apresenta um *overshoot* de 10.9V em aproximadamente 3ms, entrando em regime permanente e estável em aproximadamente 4.5ms com 10.5V, em 18ms o *offset* sofre uma queda de tensão de 1.5V, logo o sinal de

resposta de tensão de saída faz a correção baseado no cálculo de erro, resultando em um *overshoot* de aproximadamente 9.2V em 22ms, em seguida entrando em regime permanente e estável com 9V.

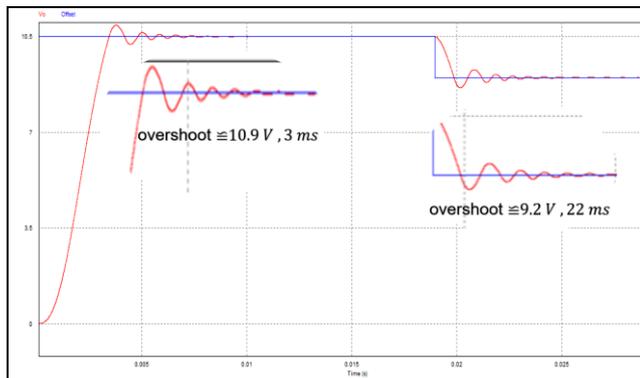


Fig. 10 Tensão de saída controlada

Considerando o sinal PWM, conforme a figura 11, inicialmente este se mantém com nível alto, em apenas instantes acontecem bordas de descida, chegando a ser desprezível o efeito no *gate* do MOSFET, onde permanece com a característica de chave fechada, a taxa de trabalho nessa ocasião como resposta do bloco do controlador PI mantém o valor igual a 1.

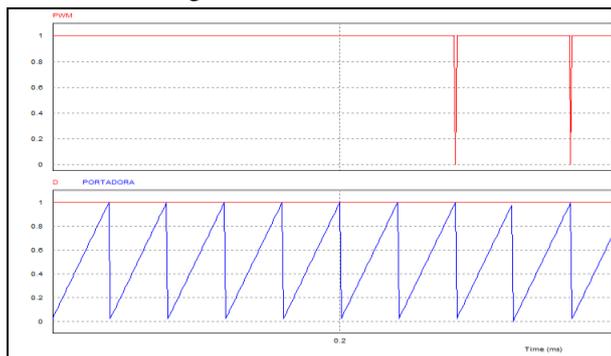


Fig. 11 Sinal de PWM inicialmente.

Em aproximadamente 3ms momento o qual a tensão de saída do sistema apresenta seu *overshoot*, o sinal da taxa de trabalho começa decair, chegando no valor 0 em 3.2ms, desta forma corrigindo o sinal da taxa de trabalho para um valor necessário, devido a essa correção feita pelo cálculo de erro e efeito do controlador PI no sistema fotovoltaico e consequentemente corrigindo o sinal PWM, logo este acompanha a taxa de trabalho mantendo a borda de descida em nível baixo conforme a figura 12.

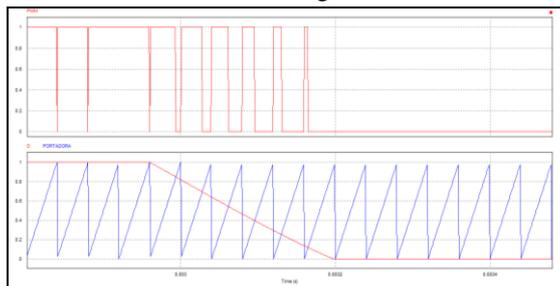


Fig. 12 Sinal de PWM estabilizando.

O sinal PWM permanece com borda de descida em até aproximadamente 4ms, quando este começa a ficar em nível alto em conjunto ao efeito da taxa de trabalho onde começa a elevar até 1, este período de tempo a tensão de saída do sistema fotovoltaico começa a entrar em regime permanente, através da correção feita pelo cálculo de erro e efeito dos ganhos do controlador PI, o sinal da taxa de trabalho se mantém estável em valor próximo ao calculado em 0.48, logo este valor permanece ao longo do tempo, controlando o sinal PWM para garantir a tensão de saída em 9V proposta para este projeto demonstra o sinal PWM controlado para a necessidade do projeto.

## 5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram abordados conceitos para projetar um controlador PI para um sistema fotovoltaico *off-grid* com conversor buck. Para os dados elétricos obtidos experimentalmente pode-se concluir que o comportamento das curvas característica P-V do painel fotovoltaico de modelo SA30-36P em condições reais ao longo do mês de maio de 2020 em Manaus conforme as informações da tabela 1 apresentam uma variação comparado com os dados e informações disponibilizados no *datasheet* do fabricante. Nesse sentido, para as condições mencionadas sobre dispositivo fotovoltaico, foi verificado que a conexão direta do painel fotovoltaico ao conversor buck não funcionava como esperado, conforme mencionado e apresentado no gráfico, a resposta da tensão saída foi de aproximadamente 10.5V, resultando em 1.5V de variação da tensão desejada, logo conclui-se que a tensão de saída do sistema fotovoltaico precisava de um controlador. Para a solução da problemática mencionada, foi implementado um controlador PI ao sistema fotovoltaico, sobre a atuação dos ganhos  $K_p$  e  $K_i$  calculados pelo método da alocação de polos, nos quais trouxe excelentes resultados para o sistema, conforme ilustra a figura 10 onde a resposta da tensão de saída apresentou valor 9V, valor desejado pela proposta do projeto. Dado a análise feita ao comportamento da planta do sistema. A resposta ao degrau unitário para a função de transferência em malha fechada apresentou um tempo de acomodação em aproximadamente 3.7ms, com um overshoot em aproximadamente de 90.4% e uma característica oscilatória pequena em regime permanente, obtendo uma melhoria significativa na resposta do sistema em malha fechada agregando o controlador PI, com uma diminuição de overshoot e tempo de acomodação para 20% e 3ms e estabilidade no regime permanente. Estes resultados do sistema *off-grid* com controlador PI foram verificados através da simulação no software PSIM e MATLAB para validar o funcionamento do projeto com todos os dispositivos: painel fotovoltaico, conversor buck, sensor de tensão e controlador PI. Portanto, a maior contribuição deste trabalho é sintonizar um controlador PI em um sistema fotovoltaico com o conversor buck.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família e meu orientador pela ajuda até o presente momento.

## REFERÊNCIAS

- [1] Santos de Carvalho, M.R.; Bradaschia, F.; Rodrigues Limongi, L.; de Souza Azevedo, G.M. Modeling and Control Design of the Symmetrical Interleaved Coupled-Inductor-Based Boost DC-DC Converter with Clamp Circuits. *Energies* 2019, 12, 3432.
- [2] Marcillo, K.E.L.; Guingla, D.A.P.; Barra, W.; De Medeiros, R.L.P.; Rocha, E.M.; Benavides, D.A.V.; Nogueira, F.G. Interval Robust Controller to Minimize Oscillations Effects Caused by Constant Power Load in a DC Multi-Converter Buck-Buck System. *IEEE Access* 2019, 7, 26324–26342.
- [3] Zhang, C.; Wang, J.; Li, S.; Wu, B.; Qian, C. Robust Control for PWM-Based DC–DC Buck Power Converters With Uncertainty Via Sampled-Data Output Feedback. *IEEE Trans. Power Electron.* 2015, 30, 504–515.
- [4] Pandey, S.K.; Patil, S.L.; Ginoya, D.; Chaskar, U.M.; Phadke, S.B. Robust control of mismatched buck DC–DC converters by PWM-based sliding mode control schemes. *Control Eng. Pract.* 2019, 84, 183–193.
- [5] Cuoghi, S.; Ntogramatzidis, L.; Padula, F.; Grandi, G. Direct digital design of PIDF controllers with Complex zeros for DC-DC buck converters. *Energies* 2018, 12, 36.
- [6] Wang, Z.; Liu, F.; Chen, Y.; Low, S.H.; Mei, S. Unified Distributed Control of Stand-Alone DC Microgrids. *IEEE Trans. Smart Grid* 2019, 10, 1013–1024.
- [7] Concettina Buccella, Carlo Cecati, Hamed Latafat, Kaveh Razi. A Grid-Connected PV System with LLC Resonant DC-DC Converter. 978-1-4673-4430-1 ©2013 IEEE777.
- [8] Maxx Patterson, Narciso F. Macia, and Arunachala M. Kannan. Hybrid Microgrid Model Based on Solar Photovoltaic Battery Fuel Cell System for Intermittent Load Applications. *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, VOL. 30, No. 1, MARCH 2015, pag. 359
- [9] NEVES, Cleonor C. das, JUNIOR, Walter B., MEDEIROS, Renan L. P. de, AYRES JUNIOR, Florindo A. C., BESSA, Iury V., V.BESSA, Isaias, VERONEZE, Gabriela de M., SILVA, Luiz E. S. e , FARIAS, Nei J. S. Direct Form Digital Robust RST Control Based on Chebyshev Sphere Optimization Applied in a DC-DC Power Converter. *Energies*. 2020
- [10] GHOSH, Arun, MALLA, Siva Ganesh, BHENDE, Chandrasekhar Narayan. Small-signal modelling and control of photovoltaic based water pumping system. *ISA Transactions* 57 (2015) 382–389.
- [11] VILLALVA, M.G., SIQUEIRA, T.G. de , RUPPERT, E.. Voltage regulation of photovoltaic arrays: small-signal analysis and control design. Published in *IET Power Electronics*. 2010