



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
FACULDADE DE ARQUITETURA, ENGENHARIA E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

LUCAS RODRIGO SANTANA MEDEIROS

**FPGA APLICADO NO CONTROLE DE UM CONVERSOR BOOST COM TÉCNICA DE
RASTREAMENTO DE MÁXIMA POTÊNCIA PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

CUIABÁ – MT
DEZEMBRO, 2022

LUCAS RODRIGO SANTANA MEDEIROS

**FPGA APLICADO NO CONTROLE DE UM CONVERSOR BOOST COM TÉCNICA DE
RASTREAMENTO DE MÁXIMA POTÊNCIA PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

Trabalho Final de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Mato Grosso, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador:
Prof. Dr. Antônio de Pádua Finazzi.

CUIABÁ – MT
DEZEMBRO, 2022

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

M488f Medeiros, Lucas Rodrigo Santana.

FPGA aplicado no controle de um conversor boost com técnica de rastreamento de máxima potência para sistemas fotovoltaicos [recurso eletrônico] / Lucas Rodrigo Santana Medeiros. -- Dados eletrônicos (1 arquivo : 18 f., il. color., pdf). -- 2022.

Orientador: Antônio de Pádua Finazzi.

TCC (graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, Cuiabá, 2022.

Modo de acesso: World Wide Web: <https://bdm.ufmt.br>.

Inclui bibliografia.

1. Conversor boost. Fotovoltaico. FPGA. MPPT. Simulação. I. Finazzi, Antônio de Pádua, *orientador*. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

DESPACHO

Processo nº 23108.105601/2022-29

Interessado: LUCAS RODRIGO SANTANA MEDEIROS, ANTONIO DE PADUA FINAZZI, SAULO ROBERTO SODRE DOS REIS, JAKSON PAULO BONALDO

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA MONOGRAFIA: FPGA APLICADO NO CONTROLE DE UM CONVERTOR BOOST COM TÉCNICA DE RASTREAMENTO DE MÁXIMA POTÊNCIA PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.

ALUNO: LUCAS RODRIGO SANTANA MEDEIROS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia da Universidade Federal de Mato Grosso, como requisito para a obtenção de grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 19 de dezembro de 2022.

Nota final: 7,63

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. ANTONIO DE PADUA FINAZZI

Orientador

Prof. Dr. SAULO ROBERTO SODRE DOS REIS

Examinador

Examinador



Documento assinado eletronicamente por **SAULO ROBERTO SODRE DOS REIS, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 19/12/2022, às 18:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **JAKSON PAULO BONALDO, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 19/12/2022, às 18:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **ANTONIO DE PADUA FINAZZI, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 21/12/2022, às 18:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5393892** e o código CRC **7E0748BF**.

Dedico este trabalho aos meus pais, familiares e amigos que sempre me apoiaram e me incentivaram em todos os desafios enfrentados, com muita compreensão e carinho.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Antônio de Pádua Finazzi pelos ensinamentos e empenho dedicados a este trabalho e em toda a minha jornada na graduação.

Ao servidor técnico Túlio Sérgio José da Silva, pelo apoio na elaboração deste trabalho.

Aos meus colegas de turma, por todo o companheirismo e assistência ao longo deste percurso.

RESUMO

MEDEIROS, L.R.S. FPGA APLICADO NO CONTROLE DE UM CONVERSOR BOOST COM TÉCNICA DE RASTREAMENTO DE MÁXIMA POTÊNCIA PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS. 2022. 18f. Trabalho Final de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá, 2022.

Diante da tendência mundial de transição energética para fontes renováveis, como a energia solar, este trabalho busca contribuir com melhorias para a tecnologia de sistemas fotovoltaicos que vem ganhando popularidade ao longo dos anos. Nesse sentido, utilizando o simulador MODELSIM, este trabalho tem por objetivo validar uma modelagem para rastreamento de máxima potência de um sistema fotovoltaico, contemplando as características do painel solar, do conversor boost e da carga elétrica. O dispositivo utilizado para o controle foi o FPGA e, através de uma lógica escrita na linguagem VHDL, foi produzido os sinais que comandam o ADC. Foi realizado também, o rastreamento da máxima potência, através do método P&O.

Palavras-chave: Conversor boost. Fotovoltaico. FPGA. MPPT. Simulação.

ABSTRACT

Faced with the global trend of energy transition to renewable sources, such as solar energy, this work seeks to contribute with improvements to the technology of photovoltaic systems that has been gaining popularity over the years. In this sense, using the MODELSIM simulator, this work aims to validate a modeling for tracking the maximum power of a photovoltaic system, contemplating the characteristics of the solar panel, the boost converter and the electrical load. The device used for the control was the FPGA and, through a logic written in the VHDL language, the signals that command the ADC were produced. It was also carried out, the tracking of the maximum potency, through the P&O method.

Keywords: boost converter. FPGA. MPPT. Photovoltaic. Simulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

Figura 1. Diagrama de bloco simplificado do sistema proposto	14
Figura 2. Esquemático do sistema fotovoltaico no software PSIM.....	14
Figura 3. Curvas característica do comportamento da tensão (V_p) e corrente (I_p) do sistema simulado no MODELSIM.	14
Figura 4. Fluxograma de comando da conversão AD da tensão do painel (VP).....	15
Figura 5. Fluxograma de comando da leitura AD da tensão do painel (VP).....	15
Figura 6. Diagrama de interligação FPGA-Convertor ADC.....	15
Figura 7. Fluxograma do método P&O.	16
Figura 8. Fluxograma do estado de máquina respondendo.	16
Figura 9. Diagrama da simulação MODELSIM.....	16
Figura 10. Diagrama de estado do arquivo PO.vhd.....	17
Figura 11. Diagrama do tempo da simulação com os panoramas 1 e 2.	17
Figura 12. Resultados da simulação com o comportamento MPPT do modelo proposto.....	17

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FPGA	<i>Field Programmable Gate Array</i>
MPPT	<i>Maximum power point tracking</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
P&O	Perturba e Observa

SUMÁRIO

I. INTRODUÇÃO	13
II. METODOLOGIA	14
<i>A. Modelagem do sistema fotovoltaico.....</i>	14
<i>B. Leitura de tensão e corrente do painel (FPGA – conversor ADC).....</i>	14
<i>C. Rastreamento da Máxima Potência (MPPT) através do método P&O.....</i>	15
<i>D. Simulação da modelagem proposta.....</i>	16
III. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO.....	16
IV. CONCLUSÕES.....	17
V. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	18

FPGA APLICADO NO CONTROLE DE UM CONVERSOR BOOST COM TÉCNICA DE RASTREAMENTO DE MÁXIMA POTÊNCIA PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Lucas Rodrigo Santana Medeiros

Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia/Departamento de Engenharia Elétrica, Cuiabá-MT, E-mail: lucas.rodriigo.sm@hotmail.com

Resumo – Diante da tendência mundial de transição energética para fontes renováveis, como a energia solar, este trabalho busca contribuir com melhorias para a tecnologia de sistemas fotovoltaicos que vem ganhando popularidade ao longo dos anos. Nesse sentido, utilizando o simulador MODELSIM, este trabalho tem por objetivo validar uma modelagem para rastreamento de máxima potência de um sistema fotovoltaico, contemplando as características do painel solar, do conversor boost e da carga elétrica. O dispositivo utilizado para o controle foi o FPGA e, através de uma lógica escrita na linguagem VHDL, foi produzido os sinais que comandam o ADC. Foi realizado também, o rastreamento da máxima potência, através do método P&O.

Palavras-Chave - Conversor boost. Fotovoltaico. FPGA. MPPT. Simulação.

FPGA APLICADO NO CONTROLE DE UM CONVERSOR BOOST COM TÉCNICA DE RASTREAMENTO DE MÁXIMA POTÊNCIA PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Abstract - Faced with the global trend of energy transition to renewable sources, such as solar energy, this work seeks to contribute with improvements to the technology of photovoltaic systems that has been gaining popularity over the years. In this sense, using the MODELSIM simulator, this work aims to validate a modeling for tracking the maximum power of a photovoltaic system, contemplating the characteristics of the solar panel, the boost converter and the electrical load. The device used for the control was the FPGA and, through a logic written in the VHDL language, the signals that command the ADC were produced. It was also carried out, the tracking of the maximum potency, through the P&O method.

Keywords - boost converter. FPGA. MPPT. Photovoltaic. Simulation.

NOMENCLATURA

D	Razão cíclica de chaveamento.
I_O	Corrente de saída do boost.
I_P	Corrente do painel.
G	Relação entre a corrente e a tensão do painel.
R_O	Carga elétrica.

V_O	Tensão de saída do boost.
V_P	Tensão do painel.

I. INTRODUÇÃO

As discussões sobre os métodos de produção de energia vêm se intensificando ao longo do século XXI com preocupações pertinentes para uma transição energética menos intensiva em emissão de carbono e mais sustentável. Os sistemas fotovoltaicos são bem populares para atender a essa demanda [1]. Em 2021, a Alemanha já ultrapassava 45 GW de potência instalada de sistemas fotovoltaicos. Já no Brasil, a capacidade de geração fotovoltaica em 2022 chegou a 13 GW [2]-[3].

O funcionamento dos módulos fotovoltaicos se dá através da incidência da luz solar nas células fotovoltaicas, fazendo com que os fótons transfiram energia para os elétrons presentes nos átomos do material semicondutor e provoquem o movimento desses elétrons ao longo da célula, estabelecendo uma diferença de potencial elétrico (tensão).

Esta tensão deve ser convertida através de um conversor boost DC-DC, elevador de tensão, para alimentar o inversor DC-AC. Contudo, nesse estágio de conversão DC-DC, a potência de geração fornecida pelo módulo fotovoltaico é condicionada a variações tais como, as diferentes irradiações solares e temperatura ao longo do dia. Sendo assim, em busca do melhor desempenho, aplicase técnicas de *Maximum power point tracking* (MPPT), garantindo uma melhor eficiência dos módulos fotovoltaicos [4].

Com o intuito de disponibilizar opções de aplicação desses sistemas, o *Field Programmable Gate Array* (FPGA) é uma ferramenta muito eficaz por oferecer uma capacidade de processamento em tempo real e de forma paralela. Possui ainda, a possibilidade de implementação de circuitos lógicos sob demanda, conferindo a ele um leque de aplicações, sendo muito eficiente para promover o aumento da projeção da energia solar nas matrizes energéticas [5].

Dessa forma, o presente trabalho propõe uma modelagem para rastreamento de máxima potência de um sistema fotovoltaico. Para isso, foi desenvolvido um algoritmo para ser utilizado em FPGA, aplicando a técnica Perturba e Observa (P&O), com sensoriamento multiplexado [6]. Foi simulado no MODELSIM um sistema que contempla o módulo fotovoltaico, o conversor boost e a carga elétrica [7]-[8].

Com a inserção do FPGA, faz-se necessário a utilização de um conversor Analógico-Digital como apresentado na figura 1. Então, no sentido de validar a modelagem

proposta, os sinais do ADC foram produzidos por uma lógica escrita na linguagem VHDL.

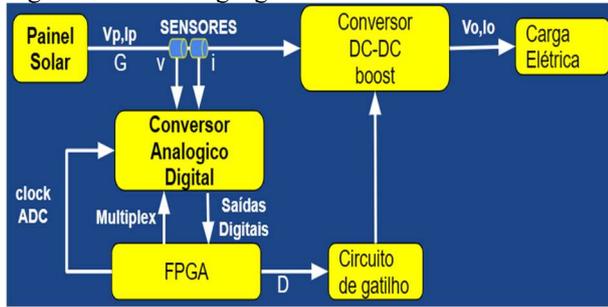


Figura 1. Diagrama de bloco simplificado do sistema proposto

II. METODOLOGIA

A. Modelagem do sistema fotovoltaico

Na simulação do sistema, considerou-se que; para curtos intervalos de tempo de perturbação e observação, a tensão (V_P) e a corrente (I_P) do módulo fotovoltaico são funções da razão cíclica de fechamento da chave principal, do projeto do conversor boost e da carga elétrica terminal (considerada resistiva). Além disso, desconsidera-se as perdas no conversor boost (rendimento de 97%). Uma única expressão (6) relaciona V_P e I_P em regime permanente, após a aplicação de uma determinada razão cíclica de chaveamento. Segue a sua demonstração [9].

Para uma carga elétrica constante (R_O), a corrente de saída do boost (I_O) é função da tensão de saída do boost (V_O):

$$I_O = \frac{V_O}{R_O} \quad (1)$$

Da teoria do conversor boost, a tensão de saída é em função da tensão do painel (V_P) e da razão cíclica (D) do *Pulse Width Modulation* (PWM) que aciona a chave principal do boost (S_{boost}).

$$\frac{V_O}{V_P} = \frac{1}{1-D} \quad (2)$$

$$D = \frac{T_{\text{on}}}{T} \quad (3)$$

Onde:

- T_{on} - Tempo de fechamento da chave S.
- T - Período do sinal de acionamento.

Desconsiderando as perdas no conversor Boost, tem-se que:

$$V_P * I_P = V_O * I_O \quad (4)$$

Assim, de (1), (2), (3) e (4) se tem que:

$$I_P = \frac{V_O}{V_P} * I_O = \frac{1}{1-D} * I_O = \frac{1}{1-D} * \frac{V_O}{R_O} = \frac{1}{(1-D)^2} * \frac{V_P}{R_O} \quad (5)$$

$$I_P = \frac{1}{R_O * (1-D)^2} * V_P \quad (6)$$

Define-se então uma relação G entre I_P e V_P , dada por:

$$G = \frac{1}{R_O * (1-D)^2} \quad (7)$$

Mais uma relação entre I_P e V_P deve ser estabelecida, atendendo a característica do módulo fotovoltaico. Nessa simulação, considerou-se uma tabela múltipla desse valor extraído do aplicativo PSim, em que são disponibilizados dados de fabricantes. As figuras 2 e 3, apresentam telas de simulação para a coleta de dados e características corrente x tensão resultantes.

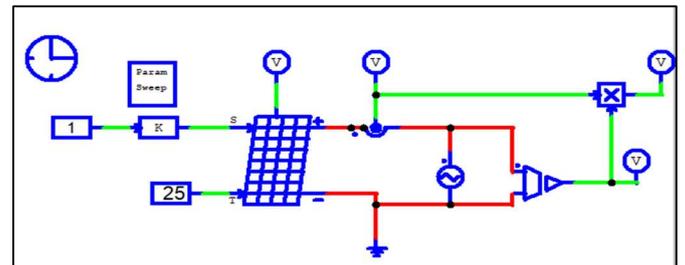


Figura 2. Esquemático do sistema fotovoltaico no software PSIM.

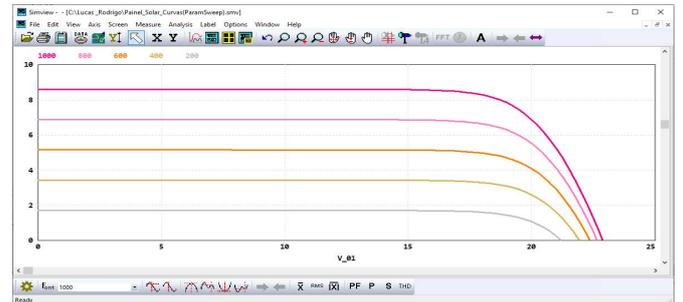


Figura 3. Curvas característica do comportamento da tensão (V_P) e corrente (I_P) do sistema simulado no MODELSIM.

Para captar uma tabela baseada no banco de dados exportado pelo PSim, contendo mais ou menos 10.000 (dez mil) pontos, foi aplicado o método de interpolação polinomial. Devido ao fato de que o ADC 0808 possui 8 bits, foram extraídos 256 pontos presentes no polinômio obtido. Os valores da tabela são normalizados de tal maneira que, o maior valor de tensão e o maior valor de corrente do painel correspondam ao maior valor binário de 8 bits, ou seja 255. Estes dados são disponibilizados em arquivo texto (bloco de notas), tabela com linhas e colunas, permitindo a sua leitura pelo aplicativo MODELSIM.

B. Leitura de tensão e corrente do painel (FPGA – conversor ADC)

Para que o conversor ADC realize as devidas leituras analógicas e as converta em valores digitais, vários sinais de comando devem ser fornecidos, de maneira sincronizada, conforme indicado pelo fabricante.

Logo após a conversão, o ADC0808 emite uma subida do sinal EOC, indicando que os valores digitais estão disponíveis nas devidas saídas.

A multiplexação das leituras de tensão e corrente do painel solar é possibilitada pelo fato de que o conversor ADC0808 possui até 8 canais multiplexados, sendo assim, deve-se combinar o valor binário em um seletor de 3 bits. Nesta aplicação são selecionados apenas 2 canais e, portanto, somente um dos bits do seletor se alterna entre 0 e 1.

Nesta proposta, os sinais de comando do ADC são produzidos pelo FPGA, obedecendo uma lógica escrita na linguagem VHDL, posteriormente convertida em “jic”, apropriada para gravação definitiva no FPGA. As figuras 4 e 5 apresentam fluxogramas com parte desta programação.

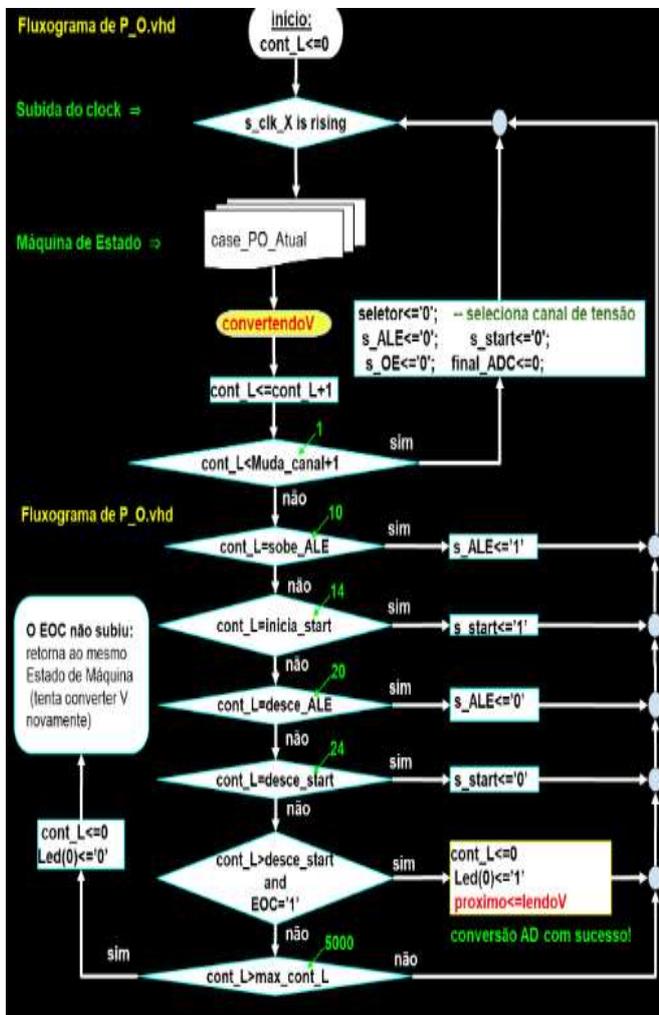


Figura 4. Fluxograma de comando da conversão AD da tensão do painel (VP).

A corrente do painel (I_p), é comanda e lida de maneira análoga a figura 4 e 5. Caso haja necessidade de implementar a conversão analógica digital de mais grandezas, basta aumentar dois estados de máquina na programação VHDL. Por exemplo, “convertendoX”, “lendoX”, para cada grandeza.

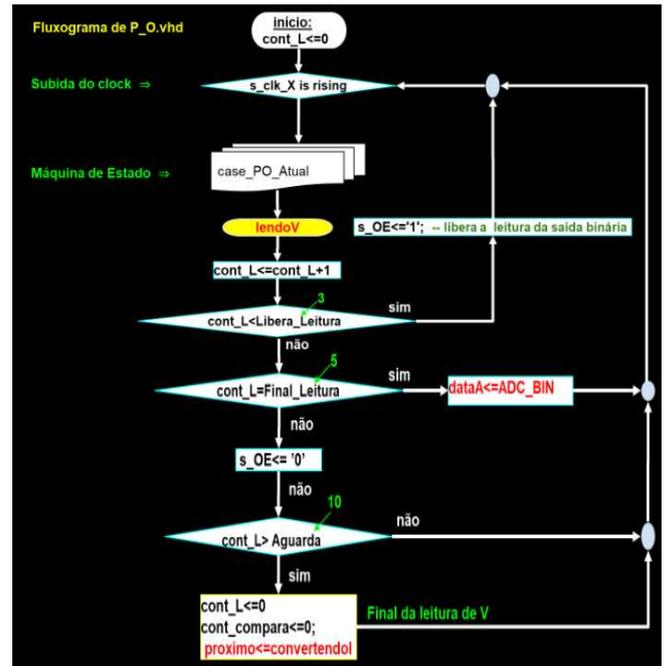


Figura 5. Fluxograma de comando da leitura AD da tensão do painel (VP).

A figura 6 apresenta um diagrama de interligação entre o FPGA e o conversor ADC.

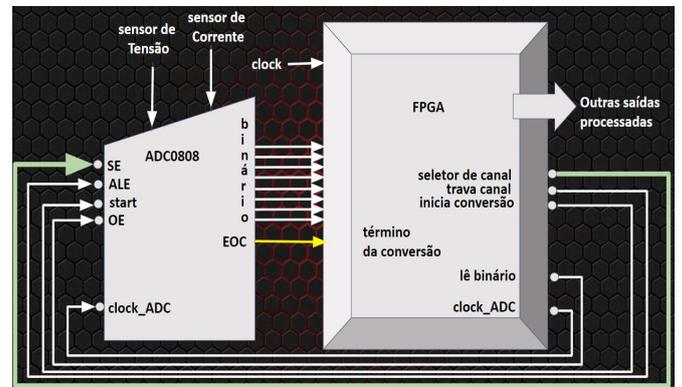


Figura 6. Diagrama de interligação FPGA-Convertor ADC.

C. Rastreamento da Máxima Potência (MPPT) através do método P&O.

Para realizar o rastreamento da máxima potência, através do método P&O, o circuito lógico do FPGA compara os valores de tensão e potência atuais com os valores anteriores à última perturbação. Em seguida toma a decisão de incrementar ou decrementar a razão cíclica de fechamento da chave principal do conversor boost, procurando sempre aumentar a potência fornecida pelo painel solar. Após um intervalo de resposta do sistema, o FPGA realiza novas leituras, dando início a outro ciclo. A figura 7 apresenta o fluxograma do sistema MPPT onde

uma nova razão cíclica é definida, buscando um ponto de maior potência do painel solar.

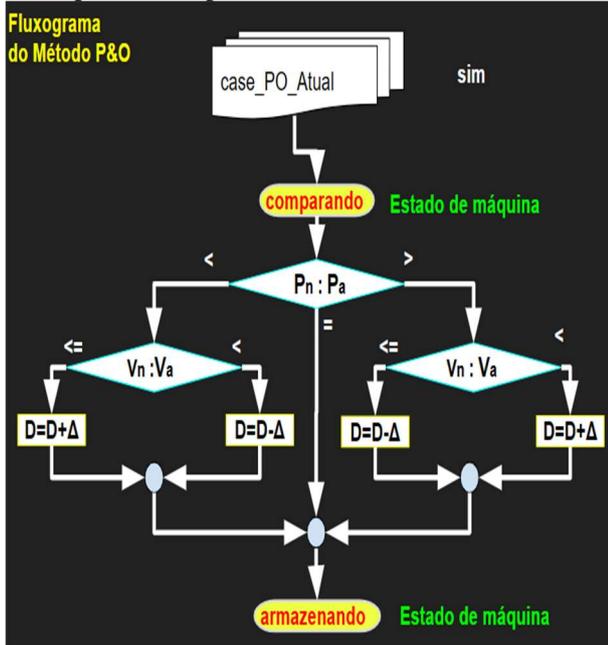


Figura 7. Fluxograma do método P&O.

Para simular o sistema painel solar, conversor boost e carga elétrica, respondendo a nova razão cíclica (perturbação), a programação do MODELSIM procura a linha da tabela que possui um valor de “D” superior ao valor corrente, e então, interpola valores, definindo os novos valores de tensão, corrente e potência, fornecidos pelo painel solar. A figura 8 apresenta um fluxograma para o estado de máquina “respondendo”.

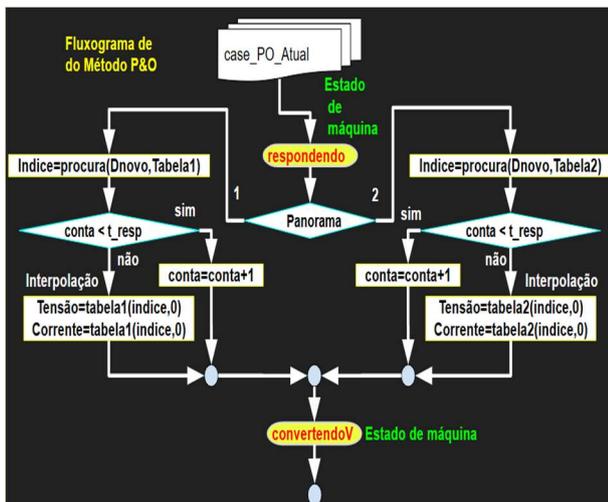


Figura 8. Fluxograma do estado de máquina respondendo.

D. Simulação da modelagem proposta

A simulação, através do aplicativo MODELSIM, considera como sistema real a composição de um módulo fotovoltaico alimentando um conversor DC-DC boost com rastreamento do ponto de máxima potência.

O comportamento do painel solar, do conversor boost e da carga elétrica é simulado, utilizando para cada razão

cíclica D, os valores correspondentes na tabela do arquivo texto “PainelSolarTabela.txt”, retornando então a tensão, a corrente e a potência do módulo fotovoltaico, em resposta a nova perturbação.

Um arquivo criador de estímulos, “testb ench”, chamado “tb_PO.vhd” cria sinais de entrada para estimular o arquivo “PO.vhd”. Este arquivo é apropriado para ser gravado no FPGA em situação real. Componentes do arquivo “PO.vhd” simulam os comportamentos dos demais dispositivos que integram o sistema. O componente “ADC.vhd” simula o tempo de conversão do ADC, produzindo a subida do sinal EOC e repassando valores digitais de 8 bits de tensão e de corrente, de maneira multiplexada. A figura 9 apresenta um diagrama esquemático da simulação, este componente será substituído pelo componente físico ADC0808 quando da aplicação real.

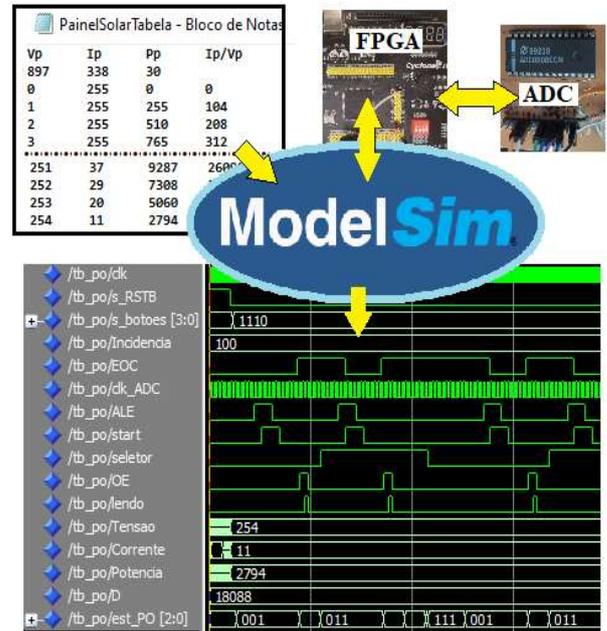


Figura 9. Diagrama da simulação MODELSIM

III. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Com o intuito de comprovar que a modelagem proposta realiza a ação de MPPT através do método P&O, foram estabelecidos ponto de operação inicial e os estímulos para que o modelo instituído no MODELSIM responda conforme regência do simulador.

Durante a simulação, o primeiro estágio da máquina de estado é o de “espera”. Nos primeiros 300 clocks do sistema (50 Mhz), cada linha do arquivo texto é carregada na memória do simulador, em forma de matriz tabela. Isto é percebido no início da linha de Tensão, Corrente, Potência e razão G, do diagrama da simulação apresentado na figura 9.

Após 6 us é simulado um apertar de botão que altera para o estado “convertendoV”. Daí em diante, os estados da máquina de estado se alternam entre “lendoV”, “convertendoI”, “lendoI”, “comparando”, “armazenando” e “respondendo”, retornando ao estado “convertendoV”,

reiniciando um novo ciclo. A figura 10 apresenta o diagrama da máquina de estado deste comportamento.

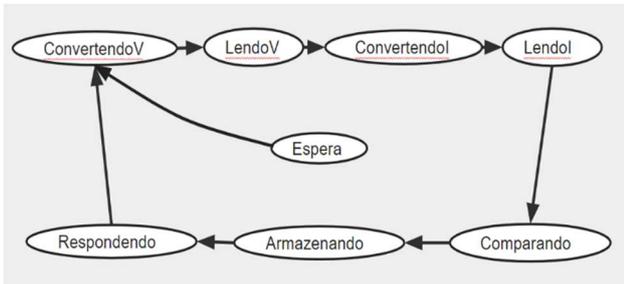


Figura 10. Diagrama de estado do arquivo PO.vhd.

À medida que se estabelece cada estado de máquina, o FPGA produz os devidos sinais de saída e capta os de entrada para tomar decisões de variações internas, assim como produzir os sinais de comando para o ADC e para o circuito de engatilhamento da chave principal do conversor boost.

Para facilitar a apresentação dos resultados, inicialmente o sistema foi posicionado com valores de tensão, corrente, potência e razão cíclica de 10.5V, 8.6A, 90 W e 0.714, respectivamente. O comportamento descrito a seguir está graficamente apresentado nas figuras 11 e 12.

A partir do instante de 6 us é simulado um acionamento de botão dando início ao loop da máquina de estado em um panorama de incidência solar chamado de panorama 1.

Na busca do MPPT, o sistema se estabiliza com a tensão de 18V, enquanto que a corrente diminui levemente de 8,6A para 8,2A. Neste ponto, tem-se uma potência máxima de 150 W, fornecida pelo painel solar.

No instante de 3,5 ms é simulada uma alteração do panorama de incidência solar sobre as placas solares, de panorama 1 para panorama 2. O simulador muda então para uma outra tabela de dados, na busca de valores de tensão e corrente, conforme a razão cíclica D, proposta pela rotina MPPT.

Na busca do novo MPPT, o sistema se estabiliza com a tensão de 16V, enquanto que a corrente diminui levemente de 5,7A para 5,5A. Neste último ponto tem-se uma potência máxima de 88W, fornecida pelo painel solar nas condições do panorama 2.

O passo de incremento/decremento da razão cíclica, utilizado nesta simulação, foi fixo e com valor de 0,05. Outros métodos de variação da razão cíclica podem ser implementados neste simulador, bastando para isso, alterar tão somente o código VHDL do MPPT, que está no estado de máquina “comparando”.

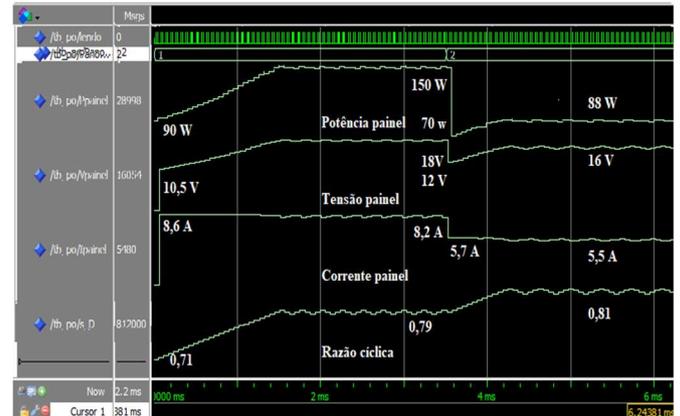


Figura 11. Diagrama do tempo da simulação com os panoramas 1 e 2.

Potência[W] x Tensão[V] do Painel Solar

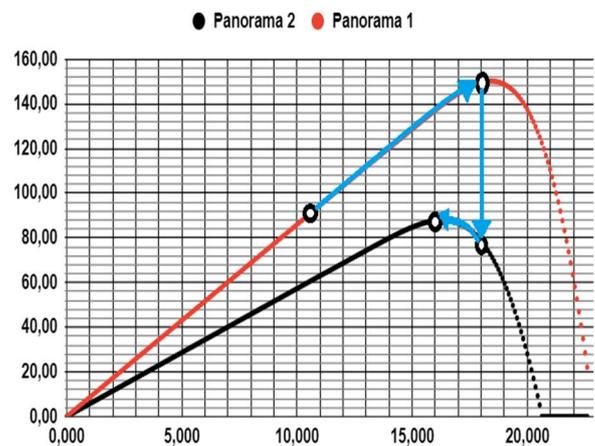


Figura 12. Resultados da simulação com o comportamento MPPT do modelo proposto.

IV. CONCLUSÕES

A equação 6, utilizada no estado de máquina “respondendo”, permitiu simplificar a modelagem do sistema composto pelo painel solar, conversor boost e carga elétrica.

O código VHDL implementado, para que o FPGA controle o conversor ADC utilizando máquina de estado, funciona como o esperado, o que é confirmado nas figuras 11 e 12.

A utilização de arquivo texto no simulador MODELSIM, para a busca da tabela com a característica tensão, corrente e potência, funciona como o esperado. Vale ressaltar aqui que o MODELSIM permite que se grave qualquer tipo de resultado (relatório de resultados) em um arquivo texto, facilitando a análise dos resultados.

Na análise dos resultados conclui-se que a modelagem proposta cumpre a sua função de buscar automaticamente a máxima potência fornecida pelo painel solar. A simulação proposta contribui para o entendimento didático do processo, permitindo futuras alterações no modelo, se adequando a outras aplicações que se fizerem necessárias.

V. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A aplicação do FPGA no estágio de conversão DC-DC permite utilizar, ao mesmo tempo, vários dispositivos de controle dos demais estágios, até o ponto de acoplamento com a carga elétrica. Permite ainda, armazenar valores de tensão, de corrente, de potência, de energia gerada, interligando esses dados a uma central e finalmente, viabilizando o envio online desses resultados, sendo assim, este modelo deve ser empregado para confecção de um protótipo de rastreamento de máxima potência de sistema fotovoltaico, explorando ainda mais a versatilidade e capacidade do FPGA.

Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014. DOI <https://doi.org/10.14393/ufu.di.2014.207>. Acesso em: 15 de dezembro de 2022.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEA (2022), Eletricidade Renovável, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/renewable-electricity>, Licença: CC BY 4.0. Acesso em: 13 de dezembro de 2022
- [2] GERAÇÃO DE ELETRICIDADE SOLAR FOTOVOLTAICA, ALEMANHA 1990-2021. IEA (2022), Eletricidade Renovável, IEA, <https://www.iea.org/countries/germany>, Licença: CC BY 4.0. Acesso em: 13 de dezembro de 2022
- [3] ENERGIA FOTOVOLTAICA SEGUE EM PLENA EXPANSÃO NO BRASIL. ABSOLAR, São Paulo, 2022. <https://www.absolar.org.br/noticia/energia-fotovoltaica-segue-em-plena-expansao-no-brasil/>. Acesso em: 05 de dezembro de 2022.
- [4] BABY, Justin; VARGHESE, Jibin M. Implementation of Variable Step Size MPPT Controller for Photovoltaic System on FPGA Circuit. *dynamics*, v. 3, n. 6, 2014.
- [5] MANSUR, RODOLFO LABIAPARI. FPGA - A FLEXIBILIDADE NO PROJETO DE HARDWARE. 2016. Disponível em: <http://www2.decom.ufop.br/imobilis/fpga-o-prodigio-de-flexibilidade/>. Acesso em: 15 de dezembro de 2022.
- [6] MELLIT, A. et al. FPGA-based real time implementation of MPPT-controller for photovoltaic systems. *Renewable energy*, v. 36, n. 5, p. 1652-1661, 2011. Acesso em: 15 de dezembro de 2022.
- [7] ALDAIR, Ammar A.; OBED, Adel A.; HALIHAL, Ali F. Design and Implementation of Neuro-Fuzzy Controller Using FPGA for Sun Tracking System. *Iraqi Journal for Electrical & Electronic Engineering*, v. 12, n. 2, 2016.
- [8] SINGH, Santosh V.; SHUBHANGA, K. N. Software-in-the-loop based MPPT enabled realtime solar photovoltaics simulator in FPGA platform for academic appreciation. In: **2017 IEEE International Conference on Signal Processing, Informatics, Communication and Energy Systems (SPICES)**. IEEE, 2017. p. 1-7.
- [9] GOMES, Adjeferson Custódio. ANÁLISE, PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM CONVERSOR BOOST COM TÉCNICA DE RASTREAMENTO DE MÁXIMA POTÊNCIA PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS. 2014. 142 f.