

UTILIZAÇÃO DE ALGORITMOS E SISTEMAS INTELIGENTES PARA MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM PAINEL FOTOVOLTAICO E ILUMINAÇÃO EM GERAL

Guilherme Alves Escudeiro

Universidade Estadual Paulista – UNESP/Guaratinguetá
gaescudeiro@gmail.com

Teófilo Miguel de Souza

Universidade Estadual Paulista – UNESP/Guaratinguetá
teofilo_miguel@yahoo.com.br

Resumo. Diante do atual cenário energético surge a necessidade de pensar e buscar tanto fontes alternativas de energia quanto métodos para utilizarmos esta de modo mais eficaz. Tendo em vista a redução de custos para as empresas e usuários finais, a diminuição da geração e fornecimento energético necessário para funcionalidade de sistemas elétricos em geral e a diminuição de impactos ambientais referentes à utilização e produção de energia elétrica. O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo referente a diversas aplicações de algoritmos inteligentes para buscar uma melhor eficiência energética nas mais diversas aplicações em geral relacionadas à utilização de energia. Tal análise torna-se necessária à medida que a maioria dos sistemas já estão limitados em ganhos efetivos de eficiência energética devido à parte mecânica e/ou construtiva de seus diversos componentes; restando deste modo, a implantação de soluções inteligentes de análise, controle e utilização destes; de modo a obter um resultado mais eficaz de rendimento energético. Para tanto foi adotada uma revisão sobre os trabalhos que estão sendo estudados e desenvolvidos com este propósito.

Palavras chave: Algoritmos, Eficiência energética, Fontes alternativas de energia

Abstract. In the face of the current energy scenario, there is a need to think about and seek alternative sources of energy as well as methods for using it more effectively. Considering the reduction of costs for companies and end users, the reduction of generation and energy supply necessary for the functioning of electric systems in general and the reduction of environmental impacts related to the use and production of electric energy. The objective of this work is to present a study about several applications of intelligent algorithms to seek a better energy efficiency in the most diverse applications in general related to the use of energy. Such analysis becomes necessary, as most systems are already limited in effective energy efficiency gains due to the mechanical and / or constructive part of their various components; thus leaving the deployment of intelligent solutions for analysis, control and use of these; in order to obtain a more efficient energy efficiency result. For this, a Review will be adopted on the works that are being studied and developed for this purpose.

Keywords: Algorithms, Energy efficiency, Alternative energy sources

1. INTRODUÇÃO

Um rápido crescimento das indústrias e da população gera a necessidade de se gerar energia para manter o desenvolvimento econômico. A combustão de combustíveis fósseis para gerar eletricidade é uma das maiores fontes de CO₂; o que causa o risco crescente de aquecimento global e mudanças climáticas [1]. E como essas fontes de energia não são renováveis, as reservas destas estão ficando cada vez mais esgotadas. Portanto, estas energias estão sendo substituídas gradualmente por energias limpas, como por exemplo, a solar. Em comparação com os combustíveis fósseis, a energia solar é uma das mais ideais, uma vez que é amplamente distribuída e não produzirá poluição em sua operação [2].

Os painéis fotovoltaicos têm capacidade de fornecimento de energia variável durante o dia, em função da insolação média diária, que é diferente de uma região para outra. No Brasil, por exemplo, excluindo-se a região Norte, o período médio anual de insolação está entre 5 a 8 horas por dia [3]. Apenas para exemplificar este potencial, a Alemanha, que é um dos países que mais utilizam energia solar, apresenta índices de radiação solar bem inferiores aos do Brasil, onde na região mais favorecida da Alemanha tem-se aproximadamente 1,4 vezes menos radiação solar do que na região menos favorecida do Brasil [4]. Por outro lado, apesar de seu potencial, certos fatores como a existência de não linearidade nas características do painel, a baixa eficiência deste (9 - 17%) e o elevado custo de instalação; tem surgido como uma questão de preocupação em relação a aproveitar a potência máxima fornecida por este [5]. Outro importante ponto que vale ressaltar consiste em que os painéis fotovoltaicos são transdutores que geram, a partir da energia solar, energia elétrica com corrente direta.

Devido ao nível de tensão nominal e da variação do mesmo com a radiação solar, é comum se utilizar conversores DC/DC, que trabalham em regime de chaveamento, puxando corrente intermitente do painel. Assim, no período em que o painel não está fornecendo corrente, devido ao desligamento do elemento de chaveamento, a potência gerada é dissipada no próprio painel, diminuindo o rendimento do sistema além da vida útil do mesmo [3].

Deste modo, estudos nesta área estão sendo realizados com o intuito de elevar o rendimento na utilização desta energia através da busca do ponto ótimo para o MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), atuando-se tanto no desenvolvimento de novos hardwares quanto no de softwares de controle mais inteligentes, tendo-se como objetivo principal a eficiência energética do sistema. Como exemplos de aplicação deste tipo de energia, podem ser citados, entre outros, a iluminação pública e de pedestres em geral, a geração de energia em locais remotos, a utilização em dispositivos autônomos, a microgeração urbana e as usinas solares.

Este trabalho consiste em uma *Review*, a qual analisa algumas destas propostas de implementação de melhorias que estão sendo desenvolvidas e apresentadas pelos mais diversos pesquisadores.

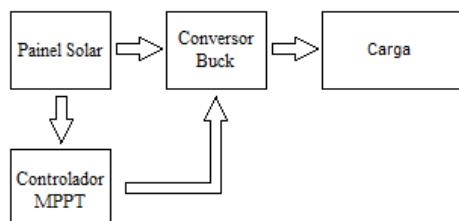
2. OBJETIVOS

Avaliar alguns dos trabalhos que estão sendo desenvolvidos no âmbito da utilização de técnicas, métodos e algoritmos inteligentes com o intuito de se obter um maior rendimento na utilização da energia fotovoltaica nas mais diversas aplicações.

3. SISTEMA BÁSICO

O sistema básico consiste em um hardware que engloba o painel fotovoltaico, o controlador MPPT responsável pela determinação do ponto ótimo de utilização deste e o conversor DC/DC, o qual tem por finalidade regular a tensão de saída do painel fotovoltaico para a respectiva necessidade da carga do sistema. A Fig. (1) apresenta o diagrama em blocos do sistema básico.

Figura 1. Sistema básico

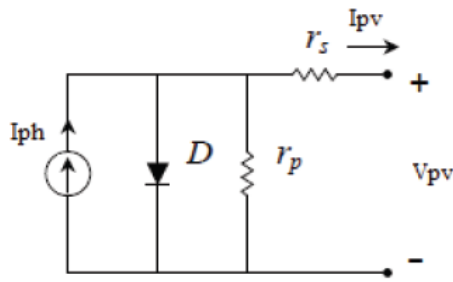


Fonte: AUTOR

3.1. Pannel Fotovoltaico

As células fotovoltaicas são compostas de materiais semicondutores, e o silício é o elemento mais utilizado para esta aplicação [3]. A união de várias células fotovoltaicas com combinações série e paralelo consiste na configuração denominada módulo ou painel fotovoltaico (PV); estes são transdutores que geram, a partir da energia solar, energia elétrica com corrente contínua. Devido ao nível de tensão nominal e da variação do mesmo com a radiação solar, é comum se utilizar conversores DC/DC, que trabalham em regime de chaveamento, drenando corrente intermitente do painel. No período em que o painel não está fornecendo corrente, devido ao desligamento do elemento de chaveamento, a potência gerada é dissipada no próprio painel, diminuindo o rendimento do sistema além da vida útil do mesmo. A Fig. (2) apresenta o modelo equivalente de um painel fotovoltaico. A fonte de corrente representa a corrente gerada para um dado nível de insolação, o diodo representa a junção PN que se forma com as duas placas semicondutoras, a resistência em paralelo, r_p , representa as perdas que ocorrem em perturbações entre as duas placas semicondutoras e a resistência em série, r_s , representa as perdas ôhmicas que ocorrem no material semicondutor, nos contatos metálicos e no contato do metal com o semicondutor [3]. Tem-se a corrente e tensão geradas pela célula, representadas respectivamente, por I_{pv} e V_{pv} .

Figura 2. Modelo equivalente painel fotovoltaico



Fonte: Carvalho (2012)

Ressaltando que os fatores meteorológicos influenciam nas características elétricas de um painel fotovoltaico. Tanto a temperatura quanto a irradiação podem modificar o ponto de operação do mesmo [3].

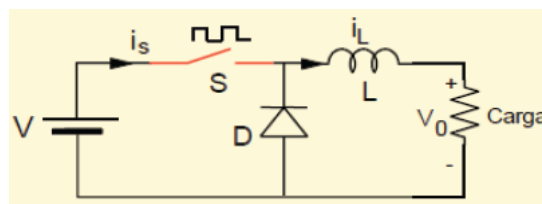
3.2. Controlador MPPT

Os controladores do ponto de máxima potência (MPPT) começaram a ser desenvolvidos em 1968, com o intuito de melhorar o desempenho de sistemas constituídos por uma fonte não linear e uma carga arbitrária [3]. A tensão de saída do PV é da ordem de 70% a 80% da tensão em circuito aberto (VOC) para o valor padrão de irradiação solar. Pode-se então considerar que nos diversos pontos de MPPT, a tensão nos terminais do módulo varia muito pouco com as mudanças atmosféricas, mesmo quando a intensidade da irradiação solar se altera. Deste modo, a proposta deste controlador consiste em garantir que a tensão de saída do painel fotovoltaico permaneça constante e próxima ao seu valor de MPPT, ponto no qual utiliza-se da máxima energia fornecida pelo painel fotovoltaico.

3.3. Conversor Buck

O conversor Buck é um conversor de tensão DC/DC que tem como objetivo abaixar o nível de tensão na saída em relação à entrada, através do controle PWM de uma chave eletrônica, proporcionalmente ao ciclo de trabalho. Na Eq. (1) tem-se a representação da tensão média de saída do conversor, na Eq. (2), da corrente média e, na Eq. (3), da potência média fornecida à carga [3]. A Fig. (3) apresenta o conversor Buck.

Figura 3. Conversor Buck



Fonte: Carvalho (2012)

$$V_0 = \frac{1}{T} \int_0^T v_0(t) dt = \frac{t_1}{T} V = t_1 f V = kV \tag{1}$$

$$I_0 = \frac{V_0}{R} = \frac{kV}{R} = k \frac{V}{R} \tag{2}$$

$$P_0 = \frac{1}{T} \int_0^T V_0 i_0 dt = \frac{1}{T} \int_0^{t_1} \frac{V_0^2}{R} dt = k \frac{V^2}{R} \tag{3}$$

Onde:

V_o : Tensão de saída média [V];
 I_o : Corrente média [A];
 P_o : Potência média [W];
 k : Ciclo de serviço = t_1/T , $0 < k < 1$ [adimensional];
 t_1 : Tempo em que a chave está ON [s];
 T : Período do sinal de chaveamento [s];
 f : Frequência do sinal de chaveamento [Hz];
 V : Tensão de entrada [V].

4. SISTEMAS DE TRACKING MPPT

Os sistemas de busca do ponto ótimo para a utilização dos painéis fotovoltaicos (MPPT) podem ser divididos em dois grandes grupos, sendo os sistemas ativos e os sistemas passivos. Os sistemas ativos dispõem de motores para efetuar a movimentação do conjunto em busca da melhor posição com relação ao Sol; enquanto que os passivos se mantêm em uma mesma posição durante todo o período de insolação. Para ambos foram desenvolvidas diversas técnicas tanto de hardware quanto de software para se obter o melhor custo benefício de implementação.

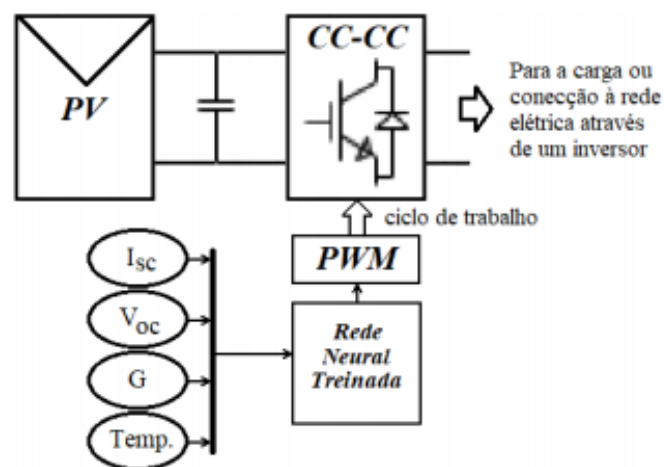
5. DEFINIÇÕES DE CONCEITOS RELACIONADOS AOS ALGORITMOS ANALISADOS

Este tópico tem como finalidade descrever brevemente alguns dos algoritmos avaliados nesta Review.

5.1. RNA

O desenvolvimento de algoritmos de inteligência artificial (IA), com o uso de redes neurais artificiais (RNA) é uma aplicação que vem se tornando muito utilizada para MPPT. A RNA é um conjunto constituído de três camadas, camada interna, camada oculta e camada de saída (do inglês: input layer, hidden layer e output layer), cada uma destas camadas são interligadas por diversos nós e a resposta a uma entrada é dependente do treinamento no qual a RNA é submetida. No caso de um sistema fotovoltaico é necessário utilizar como entrada os parâmetros do módulo fotovoltaico, como a tensão de circuito aberto, a corrente de curto-circuito e os valores de irradiância e temperatura atuais. Como resposta é fornecido o valor do ciclo de trabalho do controlador PWM. A Fig. (4) mostra em blocos como é a implementação de uma RNA no sistema fotovoltaico [8].

Figura 4. RNA



Fonte: Cardoso et. Al (2018)

5.2. Algoritmo de Newton

Neste algoritmo implementa-se uma expressão matemática de acordo com a Eq. (04) para efetuar os cálculos [9].

$$X(n + 1) = x(n) - \frac{f(xn)}{f'(xn)} \quad (4)$$

No qual:

n indica a n-ésima iteração do algoritmo;

f' (xn) derivada da função de f em xn.

A Fig. (5) apresenta a sequência de implementação do algoritmo de Newton.

Figura 5. Algoritmo de Newton

- 1) **Dados iniciais:**
 - a) x_0 : aproximação inicial;
 - b) ε_1 e ε_2 : precisões
- 2) Se $|f(x_0)| < \varepsilon_1$, faça $\bar{x} = x_0$. FIM.
- 3) $k = 1$
- 4) $x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)}$
- 5) Se $|f(x_1)| < \varepsilon_1$
ou se $|x_1 - x_0| < \varepsilon_2$ } faça $\bar{x} = x_1$. FIM.
- 6) $x_0 = x_1$
- 7) $k = k + 1$
Volte ao passo 4.

Fonte: AUTOR

5.3. FPGA

De acordo com [10], FPGA (*Field-Programmable Gate Arrays*) são circuitos integrados (ICs) que podem ser programados para implementar qualquer circuito digital. A principal diferença entre FPGAs e a lógica fixa convencional implementada com ASICs (*Application Integrated Integrated Circuits*), trata-se de que o projetista pode programar o FPGA no local. Além disso, usando um FPGA em vez de uma implementação de lógica fixa, tem-se a eliminação da não recorrência de custos de engenharia, o que reduz significativamente o tempo de comercialização. Assim, os FPGAs são altamente desejáveis para implementação de sistemas digitais devido à sua flexibilidade, programabilidade e baixo ciclo de vida do produto final. Essas características os tornam ideais para prototipagem, depuração e para aplicações de pequeno a médio volume. FPGAs são mais lentos e menos eficientes que as implementações fixas, devido a circuitos adicionais que são necessários para torná-los mais flexíveis. No FPGA, os comutadores programáveis ocupam uma área grande e isto adiciona uma quantidade significativa tanto de capacitância parasita quanto de resistência aos recursos lógicos e de roteamento. Como resultado, os FPGAs são aproximadamente 3 vezes mais lento, 20 vezes maior e 12 vezes menos eficiente em comparação com ASICs.

5.4. GWO

De acordo com [11], GWO (*Grey Wolf Optimization*) trata-se de um algoritmo que se baseia no conceito de otimização dos lobos cinzentos, ou seja, dentre o resultado, ordena-se esse de modo a melhor opção estar no topo da cadeia.

5.5. JAYA

De acordo com [12], JAYA pode ser definido como uma modificação de PSO em que elimina a atração pelos melhores lugares, substituindo-a por uma repulsa para a pior partícula da população. Por outro lado, o peso inercial as partículas: isso obtém o valor de 1 e não é modificado a qualquer momento durante a execução do algoritmo. Além disso, a memória das partículas é eliminada: eles param de manter um registro com a melhor solução encontrada, tanto global como localmente, que as partículas não se movem da sua posição se não encontrarem uma solução melhor na próxima iteração. A interação com a melhor posição encontrada é eliminada da própria partícula, e uma nova relação é adicionada: um movimento de voo de a pior posição dentro do enxame na iteração atual. Conserva-se, por outro lado, o movimento em direção à melhor partícula da população. A intensidade de ambos os movimentos, de atração e repulsão, repousa unicamente a distância que existe entre a partícula que faz o movimento e aqueles que afetam: ou seja, não há parâmetros de ajuste como havia em PSO, que definiu o comportamento das partículas como individuais ou sociais no momento da explore o espaço de busca (parâmetros c_1 e c_2).

5.6. ABC

Artificial Bee Colony (ABC) [13] [14] trata-se de um algoritmo inspirado pelo comportamento das abelhas. Em colmeias de abelhas, as abelhas se espalham para encontrar fontes de comida. Mais tarde essas abelhas retornam a colméia para recrutar mais abelhas, se eles encontraram uma fonte de exploração através de uma dança característica. De acordo com a intensidade dessa dança, as abelhas que permaneceram na colméia são distribuídas para explorar as melhores fontes primeiro. Uma vez esgotada a fonte de alimento, as abelhas se dispersam novamente e o processo se reinicia. No ABC, definimos um número N de indivíduos que são inicializados aleatoriamente, dos quais o melhor $N/2$ terá um papel chamado abelhas empregadas, sendo o restante designado como coleta de abelhas. As abelhas empregadas contêm informações sobre a posição das melhores soluções encontradas pelo algoritmo. Quando uma fonte de comida (solução) foi explorada várias vezes sem melhorar seu valor, conclui que a fonte de alimento foi esgotada; e deste modo, posiciona aleatoriamente a referida fonte de alimento, tornando a abelha, uma abelha exploradora novamente.

5.7. PSO

De acordo com [15], o *Particle Swarm Optimization* (PSO) surgiu de experiências com algoritmos modelados a partir da observação do comportamento social de determinadas espécies de pássaros. As partículas consideradas pelo algoritmo se comportam como os pássaros à procura de alimento ou do local de seus ninhos, utilizando o aprendizado próprio e o aprendizado do bando (ou enxame). O PSO é composto de partículas representadas por vetores que definem a velocidade atual de cada partícula e de vetores de localização, atualizados segundo sua velocidade atual, seu aprendizado pessoal e o aprendizado adquirido pelo bando. O algoritmo de PSO engloba conceituações simples e pode ser implementado em poucas linhas de programação, requerendo apenas operadores matemáticos simples. Apesar de classificado como evolucionário, o PSO não apresenta a característica de sobrevivência do mais apto ou a utilização de operadores genéticos como o cruzamento e a mutação.

5.8. P&O

De acordo com [16], o algoritmo de P&O é um método de MPPT de simples compreensão, de fácil implementação e boa eficiência nos sistemas de geração solar fotovoltaico. O algoritmo trata-se de um método de perturbação e observação em que é aplicado um pequeno aumento na tensão, ou na corrente, e verificado a variação da potência. Caso ocorra aumento da potência fornecida pelo painel, o algoritmo segue com perturbações no mesmo sentido. No entanto, caso ocorra decréscimo de potência, na próxima iteração a perturbação irá acontecer no sentido contrário. Dessa forma, o algoritmo de P&O faz com que a referência fique variando em valores próximos ao MPPT.

6. SISTEMAS INTELIGENTES

Em busca de se obter o ponto de MPPT o mais breve possível, vários algoritmos trabalham e contabilizam o tempo necessário para se estabilizar o sistema próximo a este ponto; assim sendo, uma proposta de RNA (Rede Neural Artificial) aplicada a um controlador MPPT pode rastrear a potência máxima com menos oscilação em relação a uma mudança súbita na irradiação e temperatura; o que pode trabalhar eficientemente durante a mudança rápida em condições atmosféricas e também durante variações da carga [1]. E ressaltando que, quanto mais rápido convergimos ao MPPT, melhor será o aproveitamento energético do sistema. A proposta de se utilizar o método do algoritmo de pesquisa gravitacional apresenta uma melhoria no tempo de rastreamento, deste modo, melhorando o desempenho do método de busca do MPPT, otimizando a eficiência de saída e seu processo de instalação [2].

Um método de controle de busca multivariada com algoritmo de Newton foi desenvolvido para minimizar o consumo de energia luminosa, manipulando separadamente o brilho das várias fontes de iluminação. O regime proposto pode aumentar a velocidade de convergência do sistema para um consumo mínimo de energia. Os resultados experimentais ilustram que o consumo de energia luminosa através do método proposto pode chegar mais rapidamente a uma menor utilização; e portanto um aumento na eficiência energética [17]. Outra aplicação utilizou-se de um algoritmo inteligente otimizado em um controlador para processar o feedback de sensores e empregar o escurecimento do brilho de luminárias através da modulação por largura de pulso [18]. A economia no controle geral de iluminação pode atingir valores na ordem 50% ou mais. Com o controle de iluminação de tarefas combinado com iluminação geral regulável, a taxa de economia de energia pode ser aumentada para valores próximos a 59% [19].

A utilização de celulares com Android também se mostra uma ferramenta de grande utilidade; pois podem ser utilizados como sensor de luz ambiente integrado e executar um novo algoritmo de feedback de ciclo fechado. Uma análise de custo mostra que toda a configuração do sistema é um pouco mais barata do que os produtos comerciais e, devido às suas capacidades de verificação da iluminação, tem potencial para economizar dinheiro a longo prazo, superando os atuais produtos comerciais [20]. Porém para se obter um bom resultado, tem-se que determinar as variáveis do ambiente que afetam o sistema [21].

Estudos envolvendo o algoritmo ELM (*Extreme Learning Machine*) apresentou uma boa generalização, apresentando um aprendizado mais rápido quando comparado com outros métodos convencionais de algoritmos de aprendizagem. Deste modo, esta técnica consiste em uma ferramenta bem ajustada para se prever uma eficiência térmica e elétrica com uma maior precisão [22]. O sombreamento parcial é um dos problemas mais críticos frente às técnicas para o MPPT em sistemas fotovoltaicos. Estudos envolvendo a utilização de técnicas utilizando um algoritmo de dois estágios para realizar o processo de rastreamento estão se mostrando uma forma eficiente de se obter melhores resultados [23].

O método proposto por Belarbi et al [24] baseia-se na reconfiguração de painéis solares fotovoltaicos; e é particularmente adequado para recuperação em tempo real de perdas de potência do conversor Buck durante a variação do valor da carga resistiva. O algoritmo desenvolvido altera a disposição dos painéis em série e em paralelo de acordo com as necessidades. Sendo que os resultados de simulação mostram a confiabilidade do método desenvolvido.

Um conceito interessante consiste no fato de se utilizar os painéis fotovoltaicos dispostos como uma árvore, deste modo resolvendo problemas de geração de energia de modo eficaz e elegante [25]. A Fig. (6) ilustra um exemplo.

Danandeh e Mousavi [26] analisaram mais de quarenta e um métodos MPPT expressando suas vantagens e desvantagens. Embora ainda existam mais métodos que não foram listados, o trabalho apresenta os métodos mais comuns. O interessante no estudo é a indicação da utilização do melhor método levando em consideração as condições onde o sistema será aplicado.

Figura 6. PV em formato de árvore



Fonte: Hyder et. Al (2018)

O artigo apresentado por Gopi e Sreejith [27] apresenta uma revisão detalhada de várias topologias de conversores CC-CC, tais como o boost, buck-boost e flyback; os quais são usados para alcançar a tensão desejada nível na saída da rede. Os prós e contras desses conversores são discutidos. E chega-se à conclusão de que a intercalação de topologias baseadas em indutores acoplados pode oferecer vantagens como alta eficiência e perda de comutação reduzida na busca do ponto de MPPT.

Um algoritmo de rastreamento de ponto de máxima potência utilizando LPSO é proposto para ser utilizado em sistemas com painel fotovoltaico. Os resultados do método são comparados com os métodos PSO e P&O. O método proposto tem vantagens sobre o PSO como rápida convergência, melhor desempenho dinâmico, fácil implementação e alta eficiência [5]. Enquanto que Mohanty et al. [28] apresentou um rastreamento de ponto de potência máxima (MPPT) para um sistema fotovoltaico (PV) usando a técnica de otimização GWO. Chegando-se a conclusão de que este método supera as limitações como menor eficiência de rastreamento, oscilações de estado estacionário e transientes como encontrado em P&O e técnicas aprimoradas de PSO (IPSO).

Os autores [29] apresentaram um algoritmo MPPT para sombreamento parcial de células/módulos fotovoltaicos conectados em série. O algoritmo executa *bypassing* ativo das células sombreadas que diminuem a potência total de saída do sistema fotovoltaico.

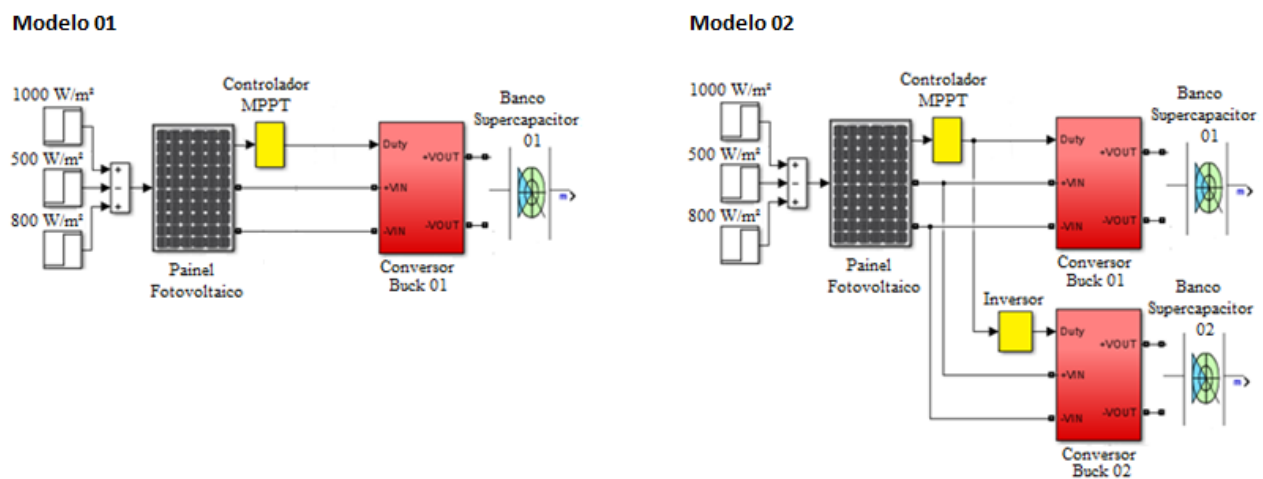
Os autores [30] apresentaram uma FPGA (*Field Programmable Gate Array*) precisas do PSO para rastreamento de pico global e sua superioridade sobre o P&B. A arquitetura desenvolvida é testada em tempo real em uma aplicação com um conversor buck-boost. Os resultados experimentais confirmam a eficiência do esquema proposto e sua alta precisão para lidar com o sombreamento parcial.

Em [28], a técnica MPPT baseada em ABC foi implementada para controlar *duty cycle* do conversor de energia; para extrair e controlar a potência máxima do painel fotovoltaico. A capacidade do algoritmo proposto foi justificada sob várias condições de sombreamento. Este foi comparado ao algoritmo PSO. Os resultados da simulação demonstram que o algoritmo ABC se executa de modo melhor sob quaisquer situações dinâmicas do painel para extrair o MPPT real do que o algoritmo PSO.

Em [31], o algoritmo Jaya genérico foi estendido para o algoritmo S-Jaya; integrando um modelo de spline cúbico natural que oferece precisão de previsões para orientar as atualizações iterativas de soluções. No algoritmo S-Jaya, o modelo de spline cúbico natural previu a eficácia das soluções atualizadas e atualizações negativas foram descartadas. Para validar a viabilidade e eficácia do MPPT proposto; estudos abrangentes de simulação e experimentos foram realizados. O desempenho do MPPT baseado no algoritmo S-Jaya foi comparado com o MPPT baseado no algoritmo Jaya genérico e o algoritmo PSO bem ajustado. Os resultados dos estudos de simulação e experimentos demonstraram que o algoritmo S-Jaya superou os algoritmos de benchmarking em termos da velocidade de convergência, as oscilações na convergência e a eficiência global de rastreamento.

O estudo apresentado por [3] propõe a utilização de um segundo conversor CC-CC Buck (Modelo 02) para atuar em paralelo ao conversor mestre (Modelo 01), conforme Fig. (7). Sendo que este, escravo, opera em oposição ao mestre. Deste modo, enquanto um conversor está ativo o outro está desativado, e vice-versa. Em paralelo, utiliza-se um algoritmo de tensão constante. O qual tem por finalidade manter a tensão gerada pelo painel próximo a tensão do MPPT. Os resultados obtidos demonstram que o método é extremamente eficiente, aumentando de modo considerável a eficiência energética do sistema.

Figura 7. Modelos 01 e 02

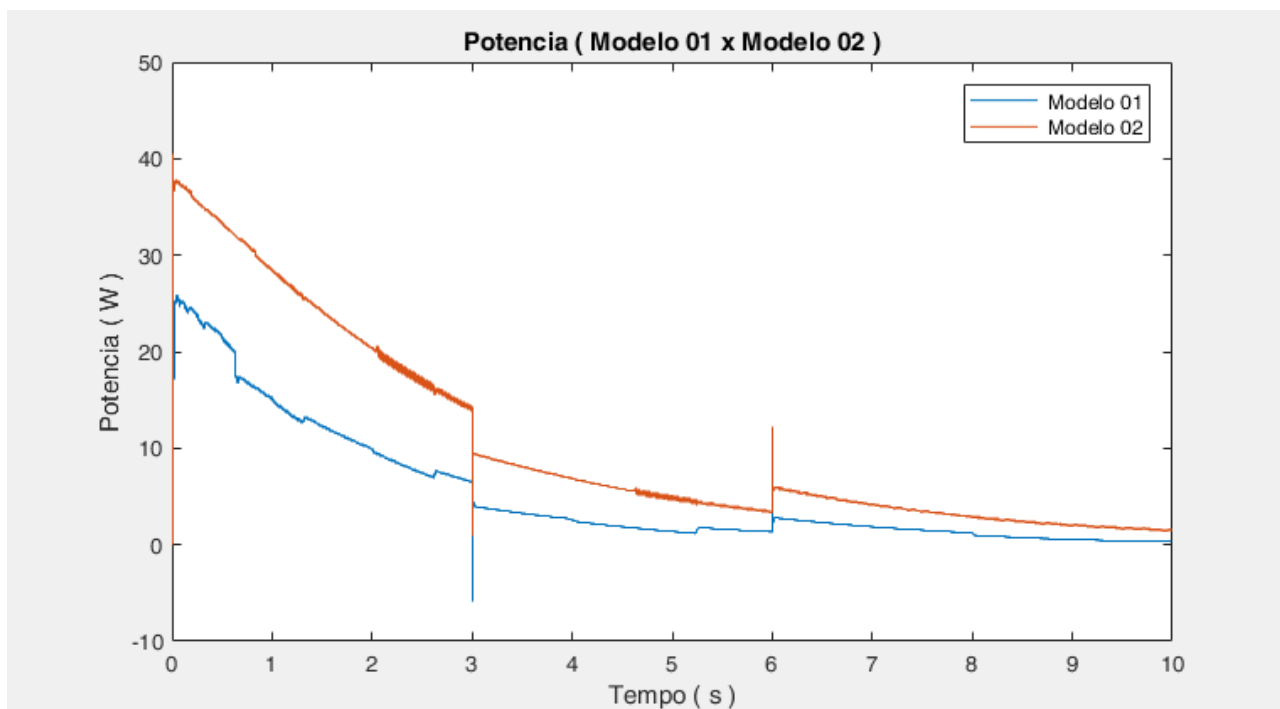


Fonte: Escudeiro at. Al (2018)

De acordo com o autor, as simulações realizadas permitiram comprovar que o controlador MPPT de tensão constante atua de modo eficaz no controle dos conversores complementares, obtendo sempre a máxima energia gerada pelo painel fotovoltaico, nas mais variadas condições. A carga computacional necessária para o controlador não exigiu um hardware avançado, e pode ser realizado em microcontrolador de baixo custo, tornando viável a utilização prática e a custo compatível com a aplicação. Ressaltando-se que a utilização de um segundo conversor Buck deve ser considerada no desenvolvimento de novos projetos que utilizam energia de painel fotovoltaico.

A Fig. (8) apresenta o resultado da utilização em dois modelos diferentes de proposta, sendo o Modelo01 utilizando-se somente um conversor Buck e o Modelo02 utilizando-se dos dois conversores em paralelo.

Figura 8. Utilização da energia do painel fotovoltaico



Fonte: Escudeiro at. Al (2018)

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O intuito desta revisão consiste em apresentar várias técnicas para a otimização da utilização do painel fotovoltaico em seu ponto de MPPT. Observa-se que cada técnica possui características específicas, as quais podem exigir um tempo de estabilidade e/ou capacidade de processamento maior ou menor quando comparadas entre si. Deste modo, a aplicação destas estará diretamente relacionada a aplicação em si e a conseqüente capacidade de hardware disponível para tal. Porém, este trabalho demonstrou que a utilização de algoritmos inteligentes no controle do MPPT apresenta grandes vantagens, pois podemos em um mesmo hardware, modificar parâmetros e técnicas tornando o sistema mais eficiente.

Um exemplo interessante consiste no sistema que efetua a duplicação do sistema de chaveamento (conversor Buck) e utiliza um hardware de baixo custo implementado com um algoritmo de tensão constante para a busca do MPPT. Os resultados obtidos, aumento aproximado de 30 a 40% no aproveitamento da energia gerada pelo sistema, demonstra o principal objetivo deste trabalho; o qual consiste em apresentar técnicas que resultam em grande impacto no processo de eficiência energética nos sistemas fotovoltaicos. Com relação a este exemplo, o qual engloba tanto a implementação de software quanto de hardware, conclui-se que com um baixo investimento na duplicação do hardware, tem-se um considerável ganho energético para o sistema.

8. CONCLUSÃO

Diante dos vários cenários apresentados, conclui-se que são vários os métodos/técnicas que podem ser utilizadas para a busca da operação do painel fotovoltaico em seu ponto de MPPT; e isso se deve ao fato de se objetivar ao máximo a energia fornecida por este, ou seja, trata-se de uma busca constante de aumentar cada vez mais o rendimento do sistema

como um todo; visto que já não se tem um rendimento elevado com relação à própria conversão de energia do pannel fotovoltaico. Apesar de os custos de implantação dos sistemas estarem diminuindo ao longo dos últimos anos, a média de retorno de investimento, no Brasil, ainda está em torno de 8 a 10 anos. Deste modo, a utilização de técnicas para elevar o rendimento gera automaticamente uma redução no custo do kWh fornecido pelo sistema; e conseqüentemente, uma diminuição no tempo de retorno do investimento. Em sistemas onde se injeta essa energia diretamente na rede elétrica, um aumento de rendimento significa uma menor necessidade de geração/transmissão de energia aos consumidores finais, o que pode auxiliar na diminuição dos custos e impactos ambientais referentes à produção de energia elétrica.

Porém para tal feito, precisamos observar alguns fenômenos, como por exemplo, o recente avanço no interesse em técnicas como *Machine Learning* e *Deep Learning*; os quais demonstram a importância de se buscar novas soluções para auxiliar, como ferramentas, a resolução dos mais diversos problemas. Ou seja, precisamos estar sempre em constante processo de avanço. Portanto torna-se de extrema importância a formação de programadores. Plataformas como a do Arduino tornam o acesso e o aprendizado mais intuitivo e veloz. Deste modo observa-se que temos a tendência de, cada vez mais cedo, esses conceitos sejam apresentados aos estudantes; inclusive com grandes centros de tecnologia já inserindo este em sua grade curricular para crianças.

Concluindo, constatando-se a necessidade da busca frequente de inovações, devemos cada vez mais investir na busca do conhecimento de técnicas de programação, o que ao longo do tempo irá auxiliar em grande escala na utilização cada vez mais eficiente de nossas fontes de energia.

REFERÊNCIAS

- [1] C. Vimalarani, N. Kamaraj, and C. B. B., "Improved method of maximum power point tracking of photovoltaic (PV) array using hybrid intelligent controller," *Optik (Stuttg.)*, vol. 168, pp. 403–415, 2018.
- [2] L. L. Li, G. Q. Lin, M. L. Tseng, K. Tan, and M. K. Lim, "A maximum power point tracking method for PV system with improved gravitational search algorithm," *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 65, pp. 333–348, 2018.
- [3] Guilherme Alves Escudeiro; Francisco Antônio Lotufo; Marcio; Abud Marcelino, "Technical Reports SIZING AND SIMULATING OF AN AUTONOMOUS PUBLIC LIGHTING SYSTEM," *Eng. Res.*, vol. 9, no. 1, pp. 1–24, 2018.
- [4] I. T. Salamoni and R. Rüter, "O Potencial Brasileiro da Geração Solar Fotovoltaica Conectada à Rede Elétrica: Análise de Paridade de Rede," *IX Encontro Nac. e V Lat. Am. Conforto no Ambient. Construído - Port.*, vol. 2, no. 1, pp. 1658–1667, 2007.
- [5] J. Prasanth Ram and N. Rajasekar, "A new robust, mutated and fast tracking LPSO method for solar PV maximum power point tracking under partial shaded conditions," *Appl. Energy*, vol. 201, pp. 45–59, 2017.
- [6] E. D. P. Carvalho, "Uma nova abordagem de rastreamento do ponto de máxima potência em painéis fotovoltaicos," pp. 1–135, 2012.
- [7] E. D. P. Carvalho, "Controle do Ponto de Máxima Potência em Painéis Fotovoltaicos com Microcontrolador."
- [8] E. A. Cardoso, F. Bernardino, M. Trigo, S. Benedito, J. Luis, and A. Puma, "PROPOSTA DE ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO BASEADO EM REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS," 2018.
- [9] W. Teixeira and D. A. Costa, "Modelagem , Estimacão De Parâmetros E Método Vitória – Es," 2010.
- [10] N. Grover and M. K. Soni, "Reduction of Power Consumption in FPGAs - An Overview," *Int. J. Inf. Eng. Electron. Bus.*, vol. 4, no. 5, pp. 50–69, 2012.
- [11] "Universidade Federal Do Paraná," vol. 55, no. 41, p. 5701, 2018.
- [12] S. I. D. E. Planificaci and E. N. C. Computing, "Escuela Politécnica Superior de Jaén," no. April, p. 260, 2016.
- [13] D. Karaboga and B. Basturk, "A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: Artificial bee colony (ABC) algorithm," *J. Glob. Optim.*, vol. 39, no. 3, pp. 459–471, 2007.

- [14] A. L. Bolaji, A. T. Khader, M. A. Al-Betar, and M. A. Awadallah, "Artificial bee colony algorithm, its variants and applications: A survey," *J. Theor. Appl. Inf. Technol.*, vol. 47, no. 2, pp. 434–459, 2013.
- [15] A. Siciliano, "Algoritmos Genéticos e Particle Swarm Optimization e suas aplicações problemas de Guerra Eletrônica," *Sige*, pp. 0–4, 2007.
- [16] S. De Castro Lobato, "Análise comparativa entre as principais técnicas de MPPT com foco experimental," p. 53, 2015.
- [17] C. Yin, S. Dadras, X. Huang, J. Mei, H. Malek, and Y. Cheng, "Energy-saving control strategy for lighting system based on multivariate extremum seeking with Newton algorithm," *Energy Convers. Manag.*, vol. 142, pp. 504–522, 2017.
- [18] I. Chew, V. Kalavally, N. W. Oo, and J. Parkkinen, "Design of an energy-saving controller for an intelligent LED lighting system," *Energy Build.*, vol. 120, pp. 1–9, 2016.
- [19] L. Xu, Y. Pan, Y. Yao, D. Cai, Z. Huang, and N. Linder, "Lighting energy efficiency in offices under different control strategies," *Energy Build.*, vol. 138, pp. 127–139, 2017.
- [20] S. Tang, V. Kalavally, K. Y. Ng, and J. Parkkinen, "Development of a prototype smart home intelligent lighting control architecture using sensors onboard a mobile computing system," *Energy Build.*, vol. 138, pp. 368–376, 2017.
- [21] C. Deb and S. E. Lee, "Determining key variables influencing energy consumption in office buildings through cluster analysis of pre- and post-retrofit building data," *Energy Build.*, vol. 159, pp. 228–245, 2018.
- [22] J. C. Mojumder, H. C. Ong, W. T. Chong, N. Izadyar, and S. Shamshirband, "The intelligent forecasting of the performances in PV/T collectors based on soft computing method," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 72, no. August 2015, pp. 1366–1378, 2017.
- [23] Y. E. Abu Eldahab, N. H. Saad, and A. Zekry, "Enhancing the tracking techniques for the global maximum power point under partial shading conditions," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 73, no. February, pp. 1173–1183, 2017.
- [24] M. Belarbi, K. Haddouche, B. Sahli, E. H. Belarbi, A. Boudghene-Stambouli, and B. Khiali, "Self-reconfiguring MPPT to avoid buck-converter limits in solar photovoltaic systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, no. July 2017, pp. 187–193, 2018.
- [25] F. Hyder, K. Sudhakar, and R. Mamat, "Solar PV tree design: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, no. July 2017, pp. 1079–1096, 2018.
- [26] M. A. Danandeh and S. M. Mousavi G., "Comparative and comprehensive review of maximum power point tracking methods for PV cells," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, no. July 2017, pp. 2743–2767, 2018.
- [27] R. Reshma Gopi and S. Sreejith, "Converter topologies in photovoltaic applications – A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 94, no. May, pp. 1–14, 2018.
- [28] S. Mohanty, B. Subudhi, and P. K. Ray, "A new MPPT design using grey Wolf optimization technique for photovoltaic system under partial shading conditions," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 7, no. 1, pp. 181–188, 2016.
- [29] D. Baimel, S. Tapuchi, and N. Baimel, "New Improved Maximum Power Point Tracking Algorithm for Partially Shaded PV Systems," pp. 55–63, 2017.
- [30] I. Conference, K. Kaced, C. Larbes, S. M. Ait-chikh, M. Bounabi, and Z. E. Dahmane, "FPGA implementation of PSO based MPPT for PV systems under partial shading conditions," pp. 150–155, 2017.
- [31] C. Huang, L. Wang, R. S. Yeung, Z. Zhang, H. S. H. Chung, and A. Bensoussan, "A Prediction Model Guided Jaya Algorithm for the PV System Maximum Power Point Tracking," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 9, no. 1, pp. 1–1, 2017.