

# SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTÔNOMO PARA CLARIFICAÇÃO DE ÁGUA BASEADO EM CONVERSORES BUCK

**William Caires Silva Amorim** – andwilliam14@hotmail.com

**Heverton Augusto Pereira** – heverton.pereira@ufv.br

**Erick Matheus da Silveira Brito** – erickk.brito@gmail.com

**Flávio de Matos Menezes** - flaviommenezes@hotmail.com

Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Elétrica

**Regina Célia Santos Mendonça** - rmendonc@ufv.br

**Maria Paulina Mendoza Combatt** - maripauli18@hotmail.com

Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia de Alimentos

**Allan Fagner Cupertino** – afcupertino@ieee.org

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Materiais

**Resumo.** *O processo de coagulação e floculação são duas etapas fundamentais no processo de potabilização da água. Neste processo é feito a neutralização de partículas coloidais (impurezas), que normalmente não se sedimentam. Nas estações de tratamento convencionais, com a adição de sulfato de alumínio,  $Al_2(SO_4)_3$ , é possível aumentar o grau de tratamento da água. Devido às dificuldades políticas e estruturais, no Brasil, as estações de tratamento de água (ETAs) não estão disponíveis para atender toda a população. A partir desta premissa desenvolveu-se um sistema autônomo de clarificação de água, que tornasse possível a realização dos processos de coagulação e floculação da água através de um eletrocoagulador, sendo alimentado por um sistema fotovoltaico integrado a um banco de baterias. Com este sistema será possível a instalação deste processo de tratamento em qualquer localidade que tenha índices satisfatórios de irradiância. Para a viabilidade elétrica e estrutural do projeto, foi feita a simulação do sistema integrado: módulo solar fotovoltaico, banco de baterias e eletrocoagulador, visando realizar os ajustes de controladores e algoritmos de extração de máxima potência. A integração do sistema foi feita mediante a utilização de dois conversores bucks, sendo que o primeiro estágio realiza a interconexão entre painel e bateria, e o segundo estágio entre bateria e eletrocoagulador. Em função da dinâmica da irradiância solar durante o dia, foram feitos testes com variações de irradiância no módulo solar fotovoltaico. O controle do primeiro estágio foi feito com duas malhas, interna e externa, correspondendo as variáveis de corrente no indutor e tensão de saída do módulo fotovoltaico, respectivamente, enquanto para o segundo estágio foi feito o controle da corrente no indutor, e conseqüentemente da corrente no eletrocoagulador. Resultados da simulação validam o controle implementado para ambos estágios e viabilizaram a operação conjunta entre o sistema integrado proposto.*

**Palavras chave:** Sistema fotovoltaico, Eletrocoagulador, Coagulação de água.

## 1. INTRODUÇÃO

A água bruta usada para potabilização no Brasil são captadas de corpos de água superficiais e subterrâneos, que devem cumprir com características específicas. Dependendo do grau de concentração de poluentes e componentes indesejáveis para o consumo humano, estes devem ser removidos por meio de diferentes etapas de tratamento. Nas estações de tratamento de água (ETAs) do Brasil, convencionalmente é utilizado o tratamento de ciclo completo que geralmente é constituído por seis etapas principais: captação, coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção da água.

Apesar da disponibilidade dos tratamentos de efluentes de águas superficiais, alternativas que tragam vantagens comparativas em quanto à automatização dos processos e ao custo vêm sendo estudadas (VALENTE, MENDONÇA, & PEREIRA, 2015). Entre as diversas tecnologias destaca-se a eletrocoagulação (EC) com o uso de eletrodos de alumínio. Este equipamento possui diversas vantagens em relação ao método convencional de adição química para coagulação e floculação, uma vez que o mesmo é de fácil operação e manutenção, além de evitar contaminação química por quantidades elevadas de neutralizantes químicos, rápida filtração dos resíduos, além do processo ser controlado eletricamente (M. Yousuf A. Mollah, 2001).

Os reatores eletroquímicos existentes são do tipo monopolar, bipolar, entre outros, sendo o monopolar o mais utilizado (M. Yousuf A. Mollah, 2001). Os reatores são formados por pares de placas metálicas usando conexão elétrica em paralelo e ligados a uma fonte de corrente elétrica contínua. Os eletrodos podem ser construídos de um mesmo material ou podem ser de materiais diferentes. Um reator monopolar de eletrocoagulação pode ser composto por uma célula eletrolítica com um ânodo e um cátodo. As placas dos metais são conhecidas como eletrodos de sacrifício. Quando conectado a uma fonte de potencial externa, o ânodo sofre corrosão em decorrência da oxidação, enquanto o cátodo é

sujeito a reações de redução. Neste caso, é requerido o uso de eletrodos de grande área, ou a utilização de eletrodos conectados em paralelo (Balbinot, 2015). Na Fig. 1 é apresentado as partes constituintes do reator monopolar.

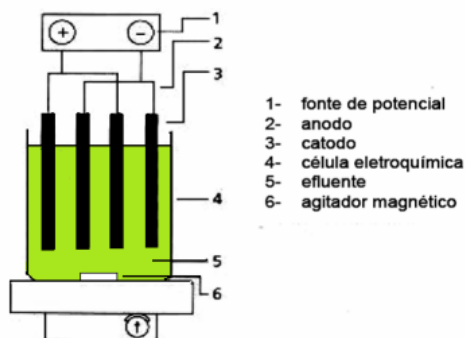


Figura 1 - Reator monopolar de eletrocoagulação (M. Yousuf A. Mollah, 2001).

No processo de eletrocoagulação, um reator eletroquímico permite a realização de três dos passos da coagulação convencional disponibilizando o coagulante “in situ”. O reator eletrolítico possui eletrodos de sacrifício, que liberam espécies químicas hidrolisadas que atuarão como coagulante (Mohammad Y.A.Mollaha, 2004). No momento em que é aplicado um potencial elétrico, o anodo sofre corrosão em decorrência da oxidação e ocorre a solvatação do cátion formado. Ao mesmo tempo, no processo de eletrocoagulação, em decorrência do potencial aplicado, microbolhas de hidrogênio podem ser formadas no cátodo do reator, por meio de reações de redução. Essas microbolhas promovem a separação das partículas residuais por meio de flotação (Chen, 2004).

Baseado nessas premissas, o presente trabalho propõe a construção de um equipamento inovador baseado num reator eletrolítico como alternativa para tratamento de água. Entre as contribuições deste trabalho, destacam-se:

- Adaptar o reator eletrolítico a um módulo fotovoltaico e determinar metodologias para que o sistema fotovoltaico forneça energia necessária para o funcionamento do sistema;
- Modelar os dois conversores *bucks* utilizados na integração do sistema e implementar controladores para o controle de variáveis pertinentes, como tensão e corrente;
- Avaliar a viabilidade técnica do uso do sistema proposto para o tratamento de água bruta superficial.

## 2. INTEGRAÇÃO MÓDULO FOTOVOLTAICO, BATERIA E ELETROCOAGULADOR

O sistema fotovoltaico empregado possui componentes fundamentais para que ele opere com uma elevada eficiência energética e garantia de autonomia, como os controladores, algoritmos de otimização, além da própria bateria. O equipamento de clarificação proposto pode ser identificado com os elementos constituintes, indicados na Fig. 2. As estratégias de controle de carga serão implementadas em ambos conversores *bucks* e o armazenamento de energia será feito pelo banco de baterias.

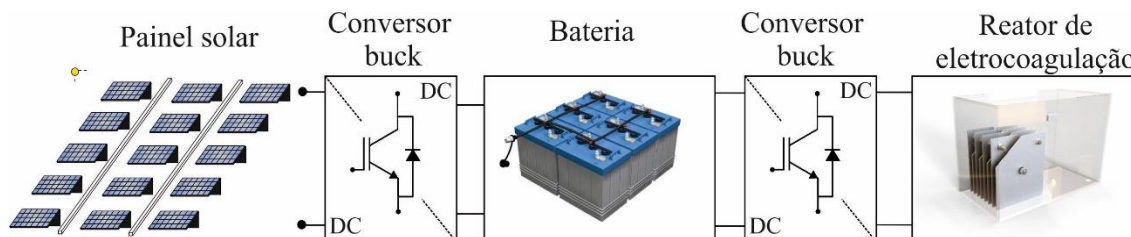


Figura 2 - Esquema de construção do sistema de clarificação.

O modelo do painel solar utilizado é o proposto por (Villalva, Gazoli, & Filho, 2009), representado na Fig. 3, e os parâmetros utilizados para a simulação deste se encontram na Tab. 1. O estágio cc/cc baseado no conversor *buck* é utilizado para abaixar a tensão para permitir a integração do banco de baterias e garantir a estabilidade na extração da máxima potência da planta solar ao aplicar o algoritmo do MPPT (Villalva M. G., 2010).

A conexão do painel solar é feita em cascata com um banco de baterias, por intermédio de um conversor c.c./c.c. da topologia *buck* (identificado como *buck 1*). O banco de bateria, por sua vez, é ligado em cascata com o eletrocoagulador, através de outro conversor *buck* (identificado como *buck 2*). Para efeitos representativos o eletrocoagulador será indicado como uma resistência variável (Mohammad Y.A.Mollaha, 2004).

A conexão do painel solar é feita em cascata com um banco de baterias, por intermédio de um conversor c.c./c.c. da topologia *buck* (identificado como *buck 1*). O banco de bateria, por sua vez, é ligado em cascata com o eletrocoagulador,

através de outro conversor *buck* (identificado como *buck 2*). Para efeitos representativos o eletrocoagulador será indicado como uma resistência variável (Mohammad Y.A.Mollaha, 2004).

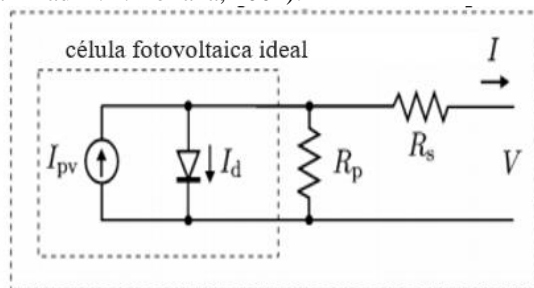


Figura 3 - Modelo do painel solar simulado (Villalva, Gazoli, & Filho, 2009).

Tabela 1 - Parâmetros do modelo do painel solar.

PARÂMETRO (POR PAINEL)	SÍMBOLO	VALOR
Potência máxima (W)	$P_{max}$	$3,20 \cdot 10^2$
Tensão de máxima potência (V)	$V_{mp}$	$3,77 \cdot 10^1$
Corrente de máxima potência (A)	$I_{mp}$	8,49
Tensão de circuito aberto (V)	$V_{ocn}$	$4,60 \cdot 10^1$
Corrente de curto circuito (A)	$I_{scn}$	8,89
Coefficiente de temperatura de $V_{ocn}$ (V/K)	$K_v$	$-1,61 \cdot 10^{-1}$
Coefficiente de temperatura de $I_{scn}$ (A/K)	$K_i$	$4,49 \cdot 10^{-4}$

A implementação do algoritmo de MPPT ocorre no estágio do conversor *buck 1*, sendo que sua saída serve de referência para a malha de controle do conversor *buck 1*. Os controladores de malha interna e externa atuam conjuntamente ao MPPT, e são responsáveis por manter a referência indicada pelo algoritmo (Sera, Mathe, Kerekes, Spataru, & Teodorescu, 2013).

### 3. CONVERSOR BUCK 1 – CONEXÃO PAINEL E BANCO DE BATERIAS

O conversor *buck 1* representado no estágio de controle de carga, deve realizar a conexão entre o painel e o banco de baterias e reduzir a tensão de máxima potência do painel para uma tensão de 12V presente na bateria. Considerando uma tensão de máxima potência de 37,7 V, e uma tensão de saída de 12V, foi possível obter os valores críticos de indutância ( $L$ ) e capacitância ( $C$ ) para que o conversor opere em modo contínuo, conforme em (Rashid, 2015). O modelo do conversor utilizado é construído conforme a Fig. 4. A operação do circuito do conversor pode ser dividida em dois modos, a depender da condição de condução da chave.

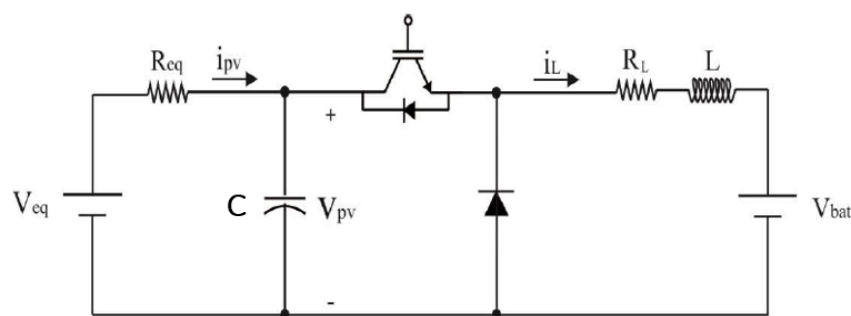


Figura 4 - Modelo conversor Buck 1.

A partir desta montagem obteve-se o valor do *duty cycle* ( $d$ ) do circuito através dos valores desejados de tensão de entrada ( $V_{eq} = 37,7$  V), de tensão de saída ( $V_{bat} = 12$  V). O cálculo do *duty cycle* resultou em  $d = 0,3183$ . Os valores de  $L$  e  $C$  são encontrados especificando o valor de variação de corrente no indutor ( $\Delta I$ ) e de variação de tensão no capacitor ( $\Delta V_{pv}$ ) e respeitando os valores críticos encontrados.

Para realizar o controle da corrente no indutor e da tensão no barramento c.c., utilizou-se duas malhas de controle, caracterizando um controle em cascata. Na Fig. 5 é representado a configuração de controle do sistema, com os controladores  $G_{C1}(s)$  e  $G_{C2}(s)$ . A malha de controle em cascata resultou nas funções de transferências (4) e (5), para o

sistema sem os controladores. Observa-se que estas relacionam corrente e tensão com a razão cíclica aplicada na chave, respectivamente; através das equações (1) e (2) é possível obter a relação entre a tensão de saída do painel com a corrente no indutor, conforme em (3).

$$\frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{(CV_{bat}DR_{eq}^2 + CR_LV_{eq}R_{eq})s + 2V_{bat}DR_{eq} - V_{eq}D^2R_{eq} + R_LV_{eq}}{[CLR_{eq}s^2 + (CR_LR_{eq} + L)s + D^2R_{eq} + R_L](D^2R_{eq} + R_L)} = \frac{as + b}{c[ds^2 + es + c]} \quad (1)$$

$$\frac{\hat{V}_{pv}(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{-R_{eq}[(DLV_{eq} - LV_{bat})s + (D^2R_{eq}V_{bat} - R_LV_{bat} + 2DR_LV_{eq})]}{[CLR_{eq}s^2 + (CR_LR_{eq} + L)s + D^2R_{eq} + R_L](D^2R_{eq} + R_L)} = \frac{a's + b'}{c[ds^2 + es + c]} \quad (2)$$

$$\frac{\hat{V}_{pv}(s)}{\hat{i}_L(s)} = \frac{-R_{eq}[(DLV_{eq} - LV_{bat})s + (D^2R_{eq}V_{bat} - R_LV_{bat} + 2DR_LV_{eq})]}{(CV_{bat}DR_{eq}^2 + CR_LV_{eq}R_{eq})s + 2V_{bat}DR_{eq} - V_{eq}D^2R_{eq} + R_LV_{eq}} = \frac{a's + b'}{as + b} \quad (3)$$

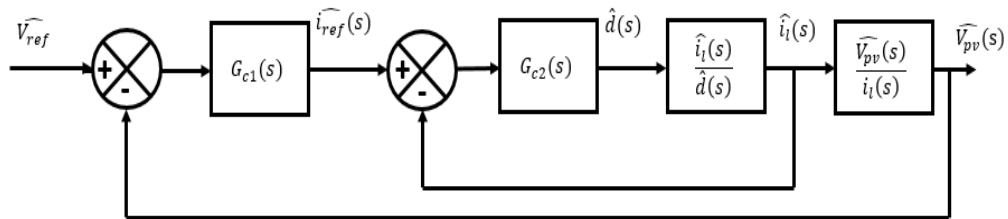


Figura 5 - Malha de controle interna e externa para tensão no painel.

As constantes expressas nas Eq. (1), (2) e (3) estão em função dos parâmetros de resistência, indutância e capacitância do conversor, além do valor da tensão de bateria e de saída do módulo fotovoltaico e *duty cycle*, conforme em (FERNANDES, 2016) e são utilizadas para especificar os ganhos dos controladores.

#### 4. CONVERSOR BUCK 2 - CONEXÃO BANCO DE BATERIAS E ELETROCOAGULADOR

O conversor *buck* 2 representado na Fig.6 é responsável por intermediar a conexão do banco de baterias com o eletrocoagulador, reduzindo a tensão para alimentar a carga c.c..

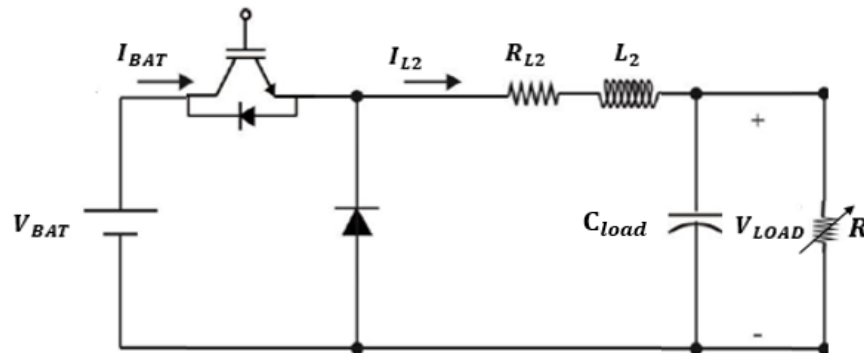


Figura 6 - Modelo conversor Buck 2.

Para o conversor *buck* 2, foi feito o controle da corrente no indutor, e consequentemente, da corrente no eletrocoagulador (carga R). A malha de controle implementada é apresentada na Fig. 7, que resultou na função de transferência da Eq. (4), para o sistema sem o controlador  $G_{C1}(s)$ . Nesta etapa foi realizada uma simplificação, que considera o capacitor de saída (C) suficientemente grande e portanto, em pequenos sinais, a variação no *duty cycle* resulta em variação da corrente.

Observa-se que esta função relaciona corrente no indutor com a razão cíclica aplicada na chave, em decorrência do controle de corrente na carga (ou eletrocoagulador). Sabe-se que a corrente utilizada na eletrocoagulação vai determinar a quantidade de metal que será oxidada no ânodo (M. Yousuf A. Mollah, 2001). Deve-se tomar cuidado ao escolher o valor

da corrente de referência, uma vez que ela pode significar perda de potência por efeito Joule, e também uma maior frequência da manutenção dos eletrodos (CRESPILHO, SANTANA, & REZENDE, 2004). Desta forma a corrente elétrica é identificada como sendo o principal parâmetro operacional do processo de eletrocoagulação, afetando não só o tempo de resposta do sistema, mas também influenciando fortemente o modo dominante de separação e remoção de poluentes (M. Yousuf A. Mollah, 2001).

$$\frac{\hat{i}_{L_2}(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{V_{bat}}{L_2s + R_{L_2}} \quad (4)$$

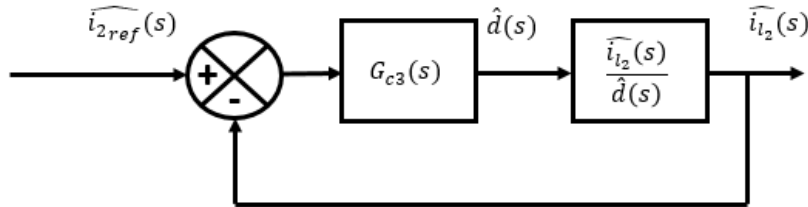


Figura 7 - Malha de controle para corrente no eletrocoagulador.

As constantes expressas nas Eq. (4) estão em função dos parâmetros de resistência, indutância e capacitância do conversor, além do valor da resistência do eletrocoagulador e da capacitância de saída do conversor e *duty cycle*, conforme em (SILVEIRA, 2012), (Barbi, 2015) e são utilizadas para especificar os ganhos dos controladores.

## 5. SINTONIA DOS CONTROLADORES

Na Fig. 5 está representada a malha de controle do conversor *buck 1*, composta por uma malha externa, sintonizada para o controle da tensão no barramento c.c. dos módulos solares,  $\widehat{V}_{pv}$ , e por uma malha externa, sintonizada para o controle de corrente,  $\widehat{I}_L$ , do indutor do *buck 1*. Este estágio é condicionado para fazer com que ocorra a operação no ponto de máxima extração de potência dos módulos solares, através da utilização do tradicional método de rastreamento de máxima potência (MPPT), utilizando o algoritmo perturba e observa (P&O) (Sera, Mathe, Kerekes, Spataru, & Teodorescu, 2013).

Como a tensão de entrada do conversor *buck 1* é um valor que depende da tensão de saída do módulo fotovoltaico, e esta tensão depende do nível de irradiância incidente, é possível obter do painel o melhor rendimento para um perfil de irradiância distinto, variando diretamente a razão cíclica do conversor.

Com a finalidade de realizar o controle da corrente no indutor e da tensão no barramento c.c., foram projetados dois controladores do tipo PI, que utilizam a referência de saída do MPPT.

Na Fig. 5, temos que  $\widehat{V}_{ref}$  é a tensão de saída do MPPT,  $\widehat{V}_{pv}$  é a tensão de saída do painel,  $G_{c1}(s)$  é o controlador PI da malha externa,  $G_{c2}(s)$  é o controlador PI da malha interna, e  $\widehat{I}_L(s)$  é a corrente no indutor. Ao se projetar estratégias de controle em cascata, a consideração mais importante é que a malha interna (variável secundária) deve responder mais rapidamente às variações no distúrbio e na variável manipulada do que a malha externa (variável primária) (Carlos S. Smith, 2008).

Com a utilização de um controlador na malha interna, obteve-se que a função de transferência resultante para malha fechada terá equação característica de 3ª ordem; para facilitar o projeto do controlador, é possível reduzir a equação para uma de 2ª ordem, a partir do seu polo dominante.

Com intuito de obter-se os ganhos do controlador  $G_c(s)$ ,  $K_p$  e  $K_i$ , utilizou-se o método de alocação de polos. O método consiste em alocar dois polos reais para o sistema controlado, posicionando um deles próximo ao polo da planta sem o controlador ( $p_{MA}$ ) e o outro polo “ $n$ ” vezes maior que o primeiro ( $np_{MA}$ ). Para o caso de uma função de transferência de segunda ordem é escolhido o polo mais significativo. Para este método, após ter definidos os polos de malha fechada do sistema controlado, é possível melhorar e acelerar a resposta, variando ambos os polos por um fator multiplicativo “ $n'$ ”, deslocando ambos sobre o eixo do semiplano esquerdo.

O novo sistema é modelado tomando os novos polos de segunda ordem, dados pela equação característica de malha fechada na Eq. 8, onde  $G_c$  e  $H$  representam as funções de transferência do controlador e do sistema, respectivamente, enquanto  $H'$  corresponde ao numerador da função de transferência aproximada. Os valores de  $K_p$  e  $K_i$  são derivados da igualdade entre os denominadores da Eq. 5.

$$\frac{H'}{(s - n'p_{MA})(s - n'np_{MA})} = \frac{G_c H}{1 + G_c H} \quad (5)$$

De forma análoga, para a malha externa escolheu-se um polo vezes “ $n$ ” menor do polo significativo da malha externa, sem variar significativamente sua posição sobre o eixo para que a malha interna continue sendo mais rápida. Os

valores foram ajustados de acordo com a necessidade do projeto. Visando simplificar a análise da malha externa, considerou-se que a malha interna já estava controlada, ou seja, que a entrada é igual a saída.

Os valores de  $K_{p1}$  e  $K_{i1}$  da malha interna do conversor *buck* 1 podem ser encontrados conforme as Eq. (6) e (7).

$$K_{p1} = \left( \frac{mcd}{b} - \frac{e}{b} + \frac{n'(1+n)}{b} (e - mcd) - \frac{acd}{b^2} \left( \frac{e}{cd} - m \right)^2 n'^2 n \right) \quad (6)$$

$$K_{i1} = \frac{cd}{b^2} \left( \frac{e}{cd} - m \right)^2 n'^2 n \quad (7)$$

onde  $m$  é definido pela Eq. (8),

$$m = \sqrt{\frac{e^2}{(cd)^2} - \frac{4}{d}} \quad (8)$$

caso  $m$  contenha uma parte imaginária, adotasse  $m = 0$ , para fins de cálculo dos ganhos.

Os valores de  $K_{p2}$  e  $K_{i2}$  da malha externa do conversor *buck* 1 podem ser encontrados conforme as Eq. (9) e (10).

$$K_{p2} = \left( bn'(1+n) - b - \frac{b^2 n'^2 na'}{b'a} \right) \quad (9)$$

$$K_{i2} = \frac{b^2 n'^2 n}{b'^2 a} \quad (10)$$

Os valores de  $K_{p3}$  e  $K_{i3}$  da malha do conversor *buck* 2 podem ser encontrados conforme as Eq. (11) e (12).

$$K_{p3} = \frac{R_{L2}(n'(1+n) - 1)}{V_{BAT}} \quad (11)$$

$$K_{i3} = \frac{n'^2 n R_{L2}^2}{V_{BAT} L^2} \quad (12)$$

Para analisar a eficácia do algoritmo MPPT implementado foi analisado as eficiências deste, que podem ser definidas de duas formas: a eficiência estática, associada a situações em que a irradiância solar permanece constante durante o intervalo de teste considerado, e a eficiência dinâmica de um MPPT, que considera os momentos de variação na intensidade da irradiância resultante, por exemplo, da passagem de nuvens, entre outros. As Eq. (13) e (14) indicam a definição matemática das eficiências (Prieb, 2011), (D. Sera, 2006).

$$\eta_{MPPTdin} [\%] = 100 \int_0^{T_{mm}} \frac{P_{Pv_{meas}}}{P_{Pv_{ideals}}} \quad (13)$$

$$\eta_{MPPTins} [\%] = 100 \frac{P_{Pv_{meas}}}{P_{Pv_{ideals}}} \quad (14)$$

onde  $P_{Pv_{meas}}$  é o valor médio da potência desenvolvida pelo painel durante o período de teste e  $P_{Pv_{ideals}}$  é o valor médio da potência máxima desenvolvida pelo modelo ideal de painel durante o período de teste.

## 6. SIMULAÇÃO E RESULTADOS

O sistema descrito neste trabalho foi simulado no ambiente PLECs. O arranjo fotovoltaico consiste de 72 células solares em série em uma única fileira, resultando na potência máxima requerida de 320 W. Os parâmetros da simulação se encontram na Tab. 2 e Tab. 3, para ambos conversores.

Tabela 2 – Parâmetros da simulação conversor buck 1.

PARÂMETROS DO SISTEMA	VALOR
Frequência de chaveamento	20 kHz
Frequência de amostragem	1 MHz
Capacitor e indutor <i>buck</i>	3,9 mF / 1 mH
Tensão banco de baterias	12 V
Resistência <i>buck</i>	0,1 $\Omega$
PARÂMETROS DOS CONTROLADORES	VALOR
Ganhos do controlador de malha interna	$K_{p1} = -2,4313 \cdot 10^2$ $K_{i1} = -3,5296 \cdot 10^5$
Ganhos do controlador de malha externa	$K_{p2} = -9,6921$ $K_{i2} = -2,7502 \cdot 10^2$
Ganhos ( $n, n'$ ) dos polos malha interna	$n_1 = 10$ $n_1' = 1,2$
Ganhos ( $n, n'$ ) dos polos malha externa	$n_2 = 0,1$ $n_2' = -4$

Tabela 3 – Parâmetros da simulação conversor buck 2.

PARÂMETROS DO SISTEMA	VALOR
Frequência de chaveamento	20 kHz
Frequência de amostragem	1 MHz
Indutor <i>buck</i>	1 mH
Resistência <i>buck</i>	0,1 $\Omega$
Resistência eletrocoagulador	1,74 $\Omega$
Tensão banco de baterias	12 V
PARÂMETROS DO CONTROLADOR	VALOR
Ganhos do controlador	$K_{p3} = -0,1433$ $K_{i3} = -2,7 \cdot 10^4$
Ganhos ( $n, n'$ ) dos polos	$n_3 = 10$ $n_3' = 1,8$

A Fig. 8 (a) apresenta a dinâmica do perfil de irradiância escolhido para o teste do painel, controlador e MPPT. A Fig. 8 (b) apresenta a potência desenvolvida pelo painel, de acordo com suas características terminais de tensão e corrente; observa-se que o painel obteve um rendimento considerável, ao comparar-se a potência ideal a ser desenvolvida com a simulada. Para validade do algoritmo MPPT conjuntamente ao controlador, analisou-se a curva de tensão de referência da saída do bloco do algoritmo com a tensão do barramento c.c. do painel, conforme a Fig. 8 (c). Percebeu-se que apenas no regime transitório o sistema sofreu poucas oscilações até de fato o algoritmo trabalhar no ponto ideal e atuar sobre pequenas perturbações para seguir a referência; para um tempo maior que 0,4s, o sistema operou estável com baixo pico durante os transitórios. A Fig. 9 (a) e (b) esboça as eficiências instantâneas e dinâmicas para o algoritmo MPPT implementado, e revelam índices satisfatórios para a operação do módulo fotovoltaico utilizado, acima de 90% para ambos.

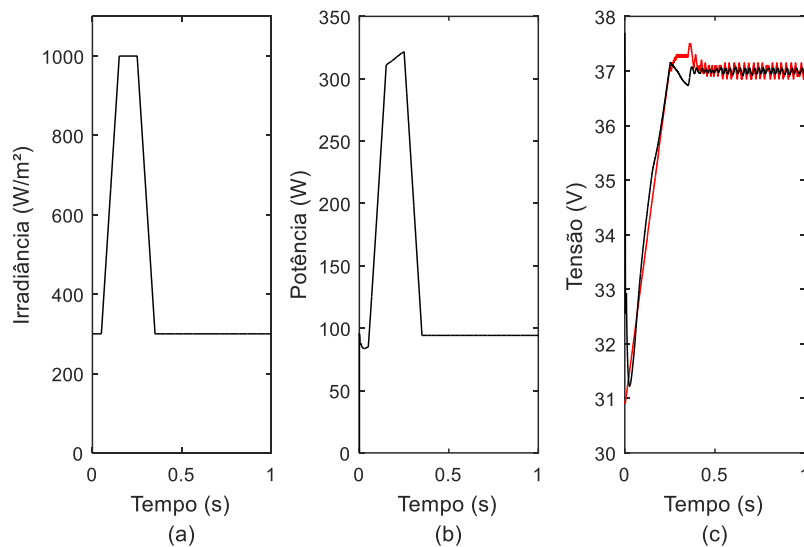


Figura 8 – Características de irradiância, tensão e potência do módulo fotovoltaico. (a) Perfil de irradiância utilizado no painel. (b) Potência desenvolvida pelo painel. (c) Tensão no barramento c.c. comparada com a tensão de referência do MPPT.

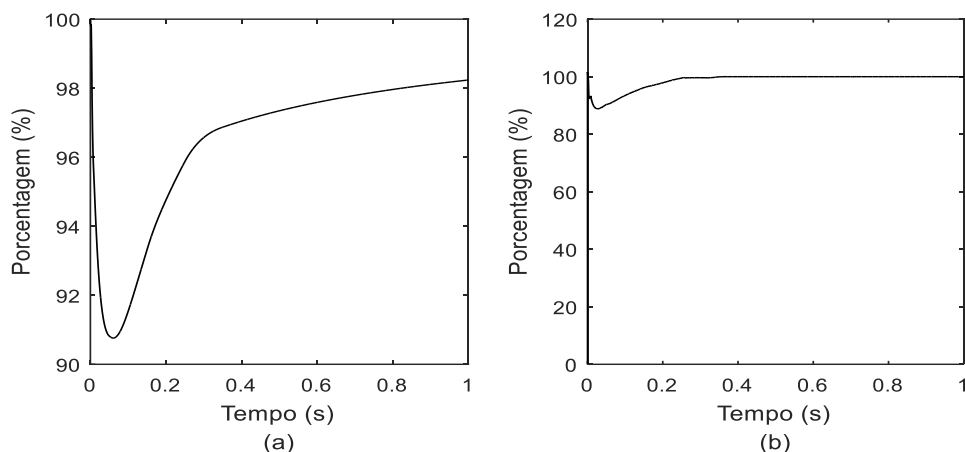


Figura 9 – Eficiências do algoritmo MPPT implementado, medido pela potência desenvolvida pelo módulo fotovoltaico.

(a) Eficiência dinâmica. (b) Eficiência instantânea.

Conforme a Fig. 10 é possível observar a dinâmica do algoritmo MPPT aplicado, o qual resulta na migração do ponto de operação sobre curvas distintas de potência em função do perfil de irradiância aplicado. Nessa figura observa-se o ponto de operação, potência do painel *versus* tensão do barramento c.c., sobre as curvas de potência x tensão características do painel ideal.

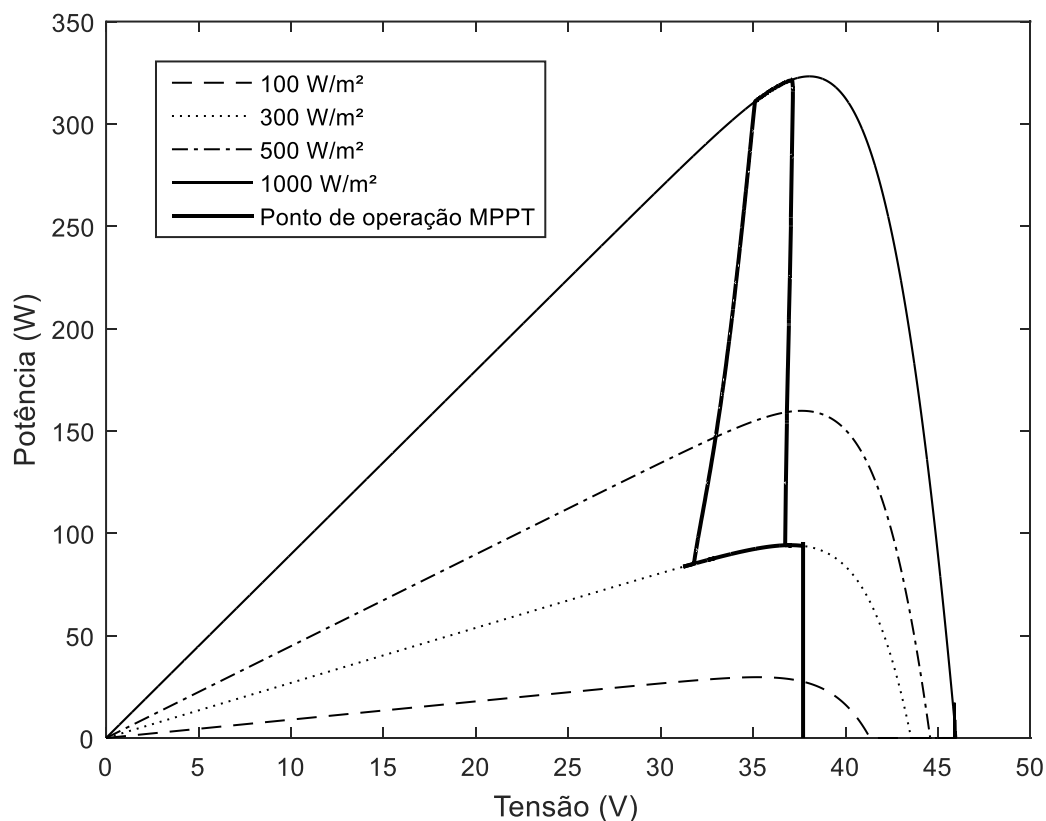


Figura 10 – Curvas de potência versus tensão com indicação do ponto de operação do módulo fotovoltaico (atuação do MPPT).

As Fig. 11 (a) e (b) apresentam as correntes nos indutores dos conversores *buck 1 e 2*, respectivamente. As correntes para ambos controladores seguem a referência, tanto em regime permanente quanto em regime transitório. Para a Fig. 11 (b) foi utilizado dois valores de correntes de referência desejados para a corrente no indutor, 1,95 A e 3 A, representando o ajuste para a operação do eletrocoagulador, sobre uma maior ou menor taxa separação e remoção de poluentes. Na Fig. 11 (c) obteve-se a tensão na carga R, que relaciona diretamente com a corrente no eletrocoagulador, o qual evidenciou uma boa resposta e acomodação dos valores de referências, sem oscilações e extrapolações indesejáveis.



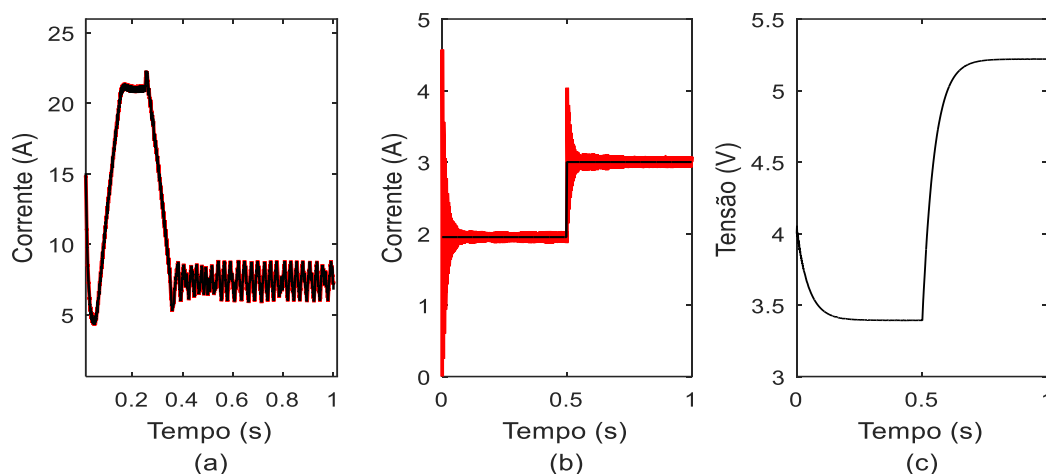


Figura 11 - Características de correntes nos indutores dos conversores bucks e tensão no eletrocoagulador. (a) Corrente no indutor do conversor buck 1. (b) Corrente no indutor do conversor buck 2. (c) Tensão no eletrocoagulador.

## 7. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposto a integração entre um módulo fotovoltaico com um banco de baterias e um eletrocoagulador, através do intermédio de conversores *bucks*, visando construir um sistema de clarificação de água. Para tanto foi implementado um algoritmo do tipo MPPT e feito o projeto de controladores de tensão e corrente para viabilizar a operação do módulo fotovoltaico no ponto de máxima extração de potência, além de proporcionar a regulação da corrente no eletrocoagulador.

O método utilizado para projeto dos controladores PI foi o de alocação de polos, o qual foi ajustado para obter a melhor resposta em regime permanente e transitório; com boa capacidade de seguir a referência e boas faixas de acomodação do sinal, pode ser verificado nas simulações ao comparar-se tensões e correntes de referências. Em especial para o controle da corrente no eletrocoagulador obteve-se uma boa resposta para as referências utilizadas, evidenciando a aplicabilidade do método de controle para o funcionamento do eletrocoagulador.

Com os resultados obtidos, pode-se concluir que o projeto de utilização de um sistema fotovoltaico autônomo para tornar a clarificação da água, sob intermédio de um eletrocoagulador é viável, e com os processos de controle e de extração de máxima potência é possível obter índices satisfatórios de rendimentos e de referências impostas que refletem na aplicabilidade e vida útil do conjunto.

### Agradecimentos

Este trabalho está sendo desenvolvido com auxílio financeiro das agências de fomento FAPEMIG, CAPES e CNPQ.

## REFERÊNCIAS

- Balbinot, E. (2015). *ELETROCOAGULAÇÃO NO TRATAMENTO DE EFLUENTES DA FILETAGEM DE PESCADO*. Florianópolis.
- Barbi, I. (2015). *Modelagem de conversores c.c.-c.c. empregando modelo médio em espaços de estados*. Florianópolis.
- Carlos S. Smith, A. B. (2008). *Princípios e Prática do Controle Automático de Processo*.
- Chen, G. (2004). Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 38(1), 11 - 41.
- CRISPILHO, F. N., SANTANA, C., & REZENDE, M. O. (2004). Tratamento de efluente de indústria de processamento de coco utilizando eletroflotação. *Química Nova.*, v. 27, p. 387-392.
- D. Sera, T. K. (2006). Improved MPPT method for rapidly changing environmental conditions. *IEEE ISIE*, 1420-1425.
- FERNANDES, N. A. (2016). *ANÁLISE DE RASTREADORES FOTOVOLTAICOS APLICADOS A SISTEMAS DE CARREGAMENTO DE BATERIAS BASEADO NO CONVERSOR BUCK*. Viçosa.
- HOLT, P., GEOFFREY, W., BARTON, M. W., & CYNTHIA, A. M. (2002). A quantitative comparison between chemical dosing and electrocoagulation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical*, 233-248.

- HOLT, P., GEOFFREY, W., BARTON, M. W., & CYNTHIA, A. M. (2002). A quantitative comparison between chemical dosing and electrocoagulation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects*, v. 211, p. 233 -/248,.
- M. Yousuf A. Mollah, R. S. (2001). Electrocoagulation (EC) — science and applications. *Journal of Hazardous Materials* .
- Mohammad Y.A.Mollaha, P. A. (2004). Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, 199-210.
- Ogata, K. (2003). *Engenharia de Controle Moderno*.
- Prieb, C. W. (2011). Determinação da eficiência de seguimento de máxima potência de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição. Porto Alegre.
- Rashid, M. H. (2015). *ELETRÔNICA DE POTÊNCIA*. Pearson Brasil.
- Sera, D., Mathe, L., Kerekes, T., Spataru, S., & Teodorescu, R. (Jul de 2013). On the Perturb-and-Observe and Incremental Conductance MPPT Methods for PV Systems. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 3(3), 1070-1078.
- SILVEIRA, B. M. (2012). DESIGN AND ASSEMBLING OF A BUCK CONVERTER. Viçosa.
- Teodorescu, R., Liserre, M., & Rodríguez, P. (2011). Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems. *Wiley-IEEE Press*.
- VALENTE, G. d., MENDONÇA, R. C., & PEREIRA, J. A. (2015). The efficiency of electrocoagulation using aluminum electrodes in treating wastewater from a dairy industry. *Cienc. Rural*, 45(9), 1713-1719.
- VALENTE, G. F. (2012). The efficiency of electrocoagulation in treating wastewater from a dairy industry. *Journal Hazardous Materials, Part I: Iron electrodes*, v. 47, p. 355-361.
- Villalva, M. G. (2010). Conversor eletrônico de potência trifásico para sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica. UNICAMP.
- Villalva, M., Gazoli, J., & Filho, E. (Mai de 2009). Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(5), 1198-1208.

## AUTONOMOUS PHOTOVOLTAIC SYSTEM FOR WATER CLARIFICATION BASED ON BUCK CONVERTERS

**Abstract.** *The process of coagulation and flocculation are two fundamental steps in the process of water purification. In this process the neutralization of colloidal particles (impurities), which normally do not sediment, in this way with the addition of aluminum sulfate ( $Al_2(SO_4)_3$ ), in the conventional treatment plants, it is possible to increase the degree of treatment of the water. Due to the political and structural difficulties, in Brazil in particular, the known water treatment plants (ETAs) are not available to serve the entire population. From this premise was developed an autonomous system of water purification, which made it possible to perform the coagulation and flocculation processes of the water through an electrocoagulator, being fed by a photovoltaic system integrated to a bank of batteries. With this system it will be possible to install this treatment process in any location that has satisfactory irradiance rates, which is a reality for almost all Brazilian territory, in addition to obtaining a better cost benefit in relation to the installation of an ETA. The system was designed to serve 100 people, considering an average consumption per capita: 200 liters per inhabitant per day, running time of 8 hours per day. For the electrical and structural feasibility of the project, the integrated system was simulated: photovoltaic solar module, battery bank and electrocoagulator, aiming to realize the adjustments of controllers and algorithms of extraction of maximum power. The integration of the system was made using two buck converters, the first stage performing the interconnection between panel and battery, and the second stage between battery and electrocoagulator. Due to the dynamics of solar irradiance during the day, tests were performed with irradiance variations in the photovoltaic solar module. The control of the first stage was done with two meshes, internal and external, corresponding to the variables of current in the battery and output voltage of the photovoltaic module, respectively, while for the second stage the control of the current in the inductor, and consequently of the current in the electrocoagulator. Simulation results validate the control implemented for both stages and enabled the joint operation between the proposed integrated system.*

**Key words:** *Photovoltaic system, Electrocoagulator, Water coagulation.*