

# MICRO-CONVERSOR BOOST OPERANDO COMO CARREGADOR DE BATERIAS COM GERADOR FOTOVOLTAICO

**AUTOR: ANDRÉ PACHECO MEURER**  
**CO-AUTORES: EVERSON MATTOS E ANTONIO SPENCER**  
**ORIENTADOR: MÁRIO LÚCIO DA SILVA MARTINS, Dr.**

**Resumo** – Este trabalho apresenta o estudo teórico do conversor Boost para a aplicação de carregador de baterias alimentado por um micro-gerador fotovoltaico. Neste trabalho, é apresentado o princípio de operação do conversor nos modos de condução CCM e DCM. É realizada a análise das características estáticas e dinâmicas do conversor para a operação em modo de regulação de tensão, regulação de corrente e para o modo de busca da máxima potência do gerador MPPT (*maximum power point tracking*).

## I. INTRODUÇÃO

Em muitas aplicações, onde se emprega fontes renováveis, tais como fontes fotovoltaicas, é necessário que o conversor opere com níveis de tensão de entrada muito baixos e que este também seja capaz de extrair a maior quantidade possível de energia das células fotovoltaicas. Por esta razão, o conversor em estudo é o conversor boost ou conversor elevador de tensão.

As fontes renováveis têm como uma das principais características, sua produção de energia intermitente que é função de fatores climáticos. No caso das fontes solares, depende fortemente da

irradiação solar e da temperatura. Assim, quando as cargas, que são alimentadas pelo sistema, necessitam de energia continuamente, e não há possibilidade do mesmo estar conectado na rede elétrica, é imprescindível o uso de um sistema auxiliar de energia. Um sistema auxiliar formado por um conjunto de baterias recarregáveis é chamado de sistema auxiliar ou secundário de energia.

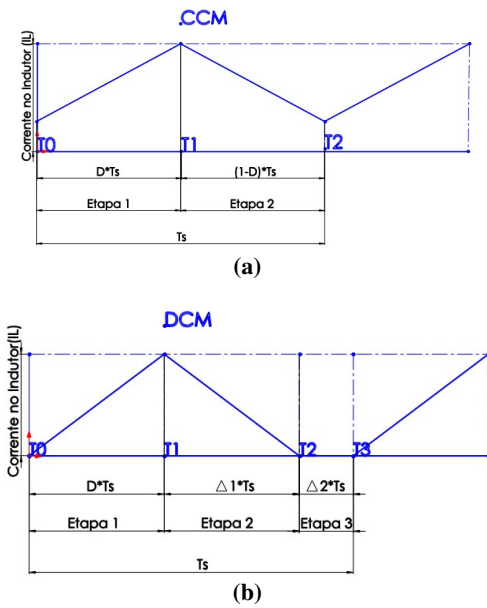
Neste trabalho considera-se que o gerador fotovoltaico encontra-se conectado diretamente a um conversor boost que mantém um barramento CC disponível para as cargas, no qual também se encontra o sistema de energia auxiliar.

## II. MODOS DE OPERAÇÃO

Para a determinação do funcionamento deste conversor é necessário identificar os modos de operação do mesmo. O modo de operação consiste nos estados em que a energia no indutor se encontra durante um período de operação do conversor. Ou seja, se a energia possui um valor sempre positivo, a corrente no indutor é sempre positiva e maior que zero. Nestas condições diz-se que o conversor opera em modo CCM. Por outro lado, se a energia do indutor alcança zero, a corrente será nula por um determinado intervalo de tempo, neste caso diz-se que o conversor opera em

---

Nota de rodapé na página inicial será utilizada apenas pelo editor para indicar o andamento do processo de revisão. Não suprima esta nota de rodapé quando editar seu artigo.



**Figura 1- Modos de operação. a) CCM; b) DCM.** modo DCM. Além da corrente no indutor, o modo DCM distingue-se do modo CCM por apresentar três estágios, ou configurações de circuito, enquanto que o modo CCM apresenta apenas dois estágios. Um resumo dos estados ligados e desligados da chave (interruptor) e do diodo é mostrado nas Tabelas 1 e 2, para o modo CCM e DCM, respectivamente.

### III. CONVERTOR BOOST

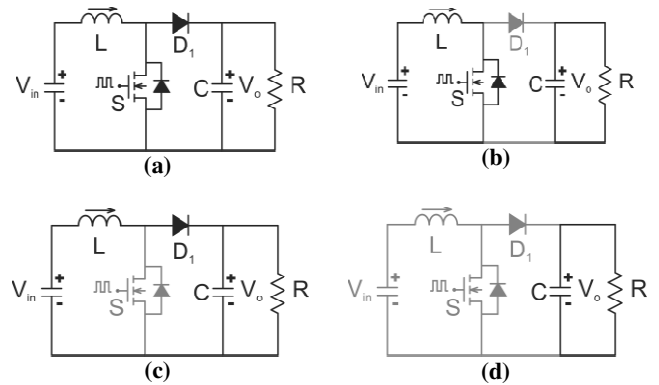
O conversor Boost apresenta a característica de elevador de tensão, isto é, a tensão de saída deste conversor é sempre maior que sua tensão de entrada ( $V_{in} < V_o$ ). A Figura 2(a), apresenta o

**Tabela 1-Estado da chave e do diodo no modo CCM**

Etapa 1 ( $t_0 - t_1$ )	Etapa 2 ( $t_1 - t_2$ )
S (on)	S (off)
$D_1$ (off)	$D_1$ (on)

**Tabela 2-Estado da chave e do diodo no modo DCM**

Etapa 1 ( $t_0 - t_1$ )	Etapa 2 ( $t_1 - t_2$ )	Etapa 3 ( $t_2 - t_3$ )
S (on)	$D_1$ (on)	S (off)
$D_1$ (off)	S (off)	$D_1$ (off)



**Figura 2 - Conversor boost. a) Diagrama do conversor; b) Boost 1ª etapa; c) Boost 2ª etapa; d) Boost 3ª etapa (somente em DCM)**

conversor Boost, enquanto que as Figuras 2(b), 2(c) e 2(d) apresentam as etapas de operação deste conversor.

Para simplificar a análise sem perder a veracidade pode-se considerar que o valor do capacitor grande o suficiente para fornecer energia para carga enquanto o circuito estiver em modo CCM.

#### Modo CCM

1ª Etapa ( $t_0 < t < t_1$ ): Nesta etapa a chave (S) está ligada e o diodo  $D_1$  encontra-se reversamente polarizado. A tensão sobre o indutor é positiva ( $V_i$ ) e ocorre armazenamento de energia no campo magnético do indutor. A corrente no indutor (L) cresce linearmente com inclinação. Nesta etapa a carga é alimentada somente pelo capacitor (C).

2ª Etapa ( $t_1 < t < t_2$ ): Nesta etapa a chave está bloqueada. O diodo ( $D_1$ ) é diretamente polarizado e passa a conduzir de forma a fornecer um caminho para a corrente no indutor. A energia armazenada no campo magnético do indutor é então entregue a carga. A corrente no indutor decresce linearmente até que a chave seja acionada novamente, iniciando um novo período de operação.

### Modo DCM

Neste modo de operação, a segunda etapa finda quando a corrente no indutor alcança zero.

3ª Etapa ( $t_2 < t < t_3$ ): Esta etapa começa quando toda a energia armazenada no indutor foi entregue a carga e, portanto a corrente no mesmo é nula. Nesta etapa a carga é alimentada pelo capacitor (C). Esta etapa esta apenas presente quando o conversor funciona em modo DCM e acabada quando a chave passa a conduzir, retornando a 1ª etapa.

#### Características Estáticas

No modo de operação CCM, o ganho estático de tensão do conversor Boost pode ser encontrado através do balanço energético do indutor. Para tanto, considera-se que em regime permanente, a energia armazenada na etapa de magnetização (Etapa 1) é igual a energia entregue pelo indutor em sua desmagnetização (Etapa 2), assim,

$$(1) \quad \int_0^{T_s} v_L dt = 0$$

O ganho estático de tensão do conversor Boost, em CCM, é apresentado na equação (2).

$$(2) \quad \frac{V_c}{V_{in}} = \frac{1}{1-D}$$

Seguindo uma análise similar, no modo de operação DCM, o ganho estático de tensão do conversor Boost pode ser encontrado como segue.

Do balanço energético do indutor tem-se que,

$$(3) \quad \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{D + \Delta_1}{\Delta_1}$$

Onde  $\Delta_1$  é definido como  $\Delta_1 = (T_2 - T_1)/T$

Para definir  $\Delta_1$  em função dos parâmetros do conversor deve-se utilizar a equação da corrente no indutor na etapa 2, fazendo-se  $i_L((D + \Delta_1)T_s) = 0$  como segue.

$$(4) \quad \frac{(V_{in} - V_o)}{L}(D + \Delta_1)T_s + I_{Lpk} = 0$$

Assim,

$$(5) \quad \Delta_1 = \frac{I_{Lpk}L}{(V_{in} - V_o)} - D$$

Considerando-se que  $I_{Lpk} = I_{in}$  e que a tensão de entrada  $V_{in}$  é constante, a equação (5) passa a ser,

$$(6) \quad \Delta_1 = \frac{I_{Lpk}L}{V_{in}T_s} \left( \frac{1-D}{D} \right) - D$$

Substituindo-se (6) em (3), tem-se o ganho estático em DCM como sendo,

$$(7) \quad \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1 - \frac{V_{in}T_s}{I_{ipk}L}(1-D)}$$

#### Fronteiras entre CCM e DCM

O limite da fronteira entre os modos CCM e DCM pode ser definido por meio da forma de onda de corrente no indutor, quando esta chega até zero no final do período, conforme pode ser visto através da Figura 3 Assim para a corrente média no indutor  $I_{LB}$  como sendo o valor desta para o caso limite entre os modos CCM e DCM, pode-se escrever:

$$(8) \quad I_{LB} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} i_L dt = \frac{1}{2} I_{Lpk}$$

A corrente de pico  $I_{Lpk}$  pode ser definida por meio da corrente no indutor na etapa 1, como segue.

$$(9) \quad I_{Lpk} = \frac{(V_{in})}{L} DT_s$$

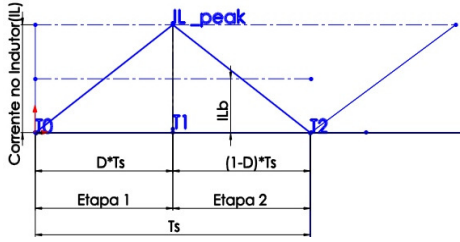


Figura 3- Limite CCM x DCM.

Portanto, substituindo-se (9) em (8),

$$(10) \quad I_{LB} = \frac{1}{2} \frac{(V_{in})}{L} DT_S$$

A equação (10) é mostrada na Figura 4.

Observa-se que o valor máximo em (10) ocorre para  $D = 1$  de onde encontra-se  $I_{LB(max)} = V_{in}T_S/2L$ .

Portanto, o ganho estático da equação (7) pode ser reescrito como sendo,

$$(11) \quad \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1 - \frac{2I_{iB(max)}}{I_{ipk}}(1-D)}$$

A equação (11) é mostrada na Figura 5, para diferentes valores de  $D$ .

### Características Dinâmicas

Como o conversor é um circuito não linear por natureza, para que se possa avaliar suas características dinâmicas deve-se representar o mesmo por meio de um modelo linear. Uma técnica utilizada para linearização do estágio de potência de conversores chaveados operando com controle PWM é a Média no Espaço de Estados. Essa técnica consiste em tirar a média ponderada dos estados do circuito em relação à razão-cíclica de operação sobre um período de chaveamento.

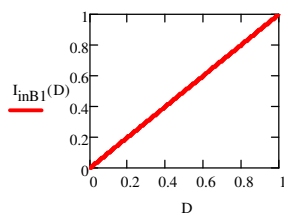


Figura 4- Corrente de entrada x razão cíclica ( $V_{in}$  constante).

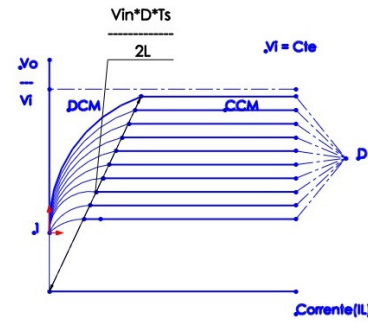


Figura 5- Característica estática do conversor boost para  $V_o/V_{in}$  pela corrente de entrada.

Para desenvolver o modelo linearizado são utilizados os circuitos das etapas de operação do conversor boost conforme Figura 2. Além disso, deve-se considerar que o conversor opera desenvolvendo três papéis ou funções, um por vez, de forma não concomitante. São eles regulador de tensão, regulador de corrente ou rastreador de máxima potência. A Figura 6 mostra o fluxograma de operação do conversor boost.

### Regulador de corrente

Por definição pode-se considerar que neste modo, a corrente de saída alcançou o máximo valor para carga das baterias e, portanto, deve permanecer neste valor, sendo regulada pelo conversor boost. Neste caso, o projeto do conversor boost deve assegurar que o modo de

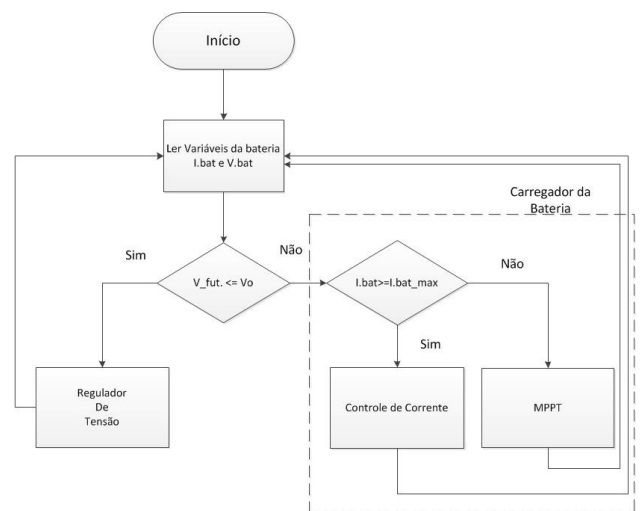


Figura 6- Fluxograma do funcionamento do carregador de baterias.

funcionamento regulação de corrente ocorre sempre com o conversor operando em CCM.

Aplicando a 1ª e 2ª lei de Kirchhoff nas etapas de operação, o modo CCM pode ser representado pela equação (12), onde o sub-índice i representa a etapa de operação do conversor que assume os valores 1 e 2 para o modo CCM.

$$(12) \begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} = A_i x(t) + B_i u(t) \\ y(t) = C_i x(t) + E_i u(t) \end{cases}$$

O vetor de estados  $x(t)$  é composto pelas variáveis  $I_L$  (corrente no indutor) e  $V_c$  (tensão no capacitor). O parâmetro  $U=u$  (que no caso do conversor é a razão cíclica  $D$ ) e  $Y$  é  $V_o$  ou  $I_o$ .

O comportamento médio do conversor durante um período de chaveamento é dado pela equação (13), e o sinal “^”, indica a inclusão dos estados com pequenos sinais lineares AC, e para o modo CCM, temos:

$$(13) \begin{cases} \frac{d\hat{x}(t)}{dt} = A \hat{x}(t) + B \hat{u}(t) \\ \hat{y}(t) = C \hat{x}(t) + E \hat{u}(t) \end{cases}$$

#### Regulador de tensão

Por definição pode-se considerar que neste modo, a tensão da bateria alcançou o máximo valor para carga das baterias e, portanto, sua corrente decai a valores muito pequenos. Neste caso, o projeto do conversor boost deve assegurar que o modo de funcionamento regulação de tensão ocorre sempre com o conversor operando em DCM.

Analogamente no modo DCM, o comportamento médio do conversor durante um período de chaveamento é dado por (14), e o sub-

**Tabela 3-Definição das Matrizes para equação (13)**

Matriz	Descrição	Matriz	Descrição
A	$A_1 T_1 + A_2 T_2$	B	$B_1 T_1 + B_2 T_2 (A_1 - A_2) X + (B_1 + B_2) U$
C	C	E	$E_1 T_1 + E_2 T_2 (A_1 - A_2) X + (E_1 - E_2) U$

**Tabela 4-Definição das Matrizes para equação (14)**

Matriz	Descrição	Matriz	Descrição
A	$A_1 T_1 + A_2 T_2 + A_3 T_s$	B <sub>d2</sub>	$(A_2 - A_3) X + (B_2 - B_3) U$
B	$B_1 T_1 + B_2 T_2 + B_3 T_3$	E <sub>d1</sub>	$(C_1 - C_3) X + (C_1 - C_3) U$
C	$C_1 T_1 + C_2 T_2 + C_3 T_3$	E <sub>d2</sub>	$(C_2 - C_3) X + (E_2 - E_3) U$
B <sub>d1</sub>	$(A_1 - A_3) X + (B_1 - B_3) U$		

índice i assume os valores 1, 2 e 3 para o modo DCM.

$$(14) \begin{cases} \frac{d\hat{x}}{dt} = A \hat{x} + B \hat{u} + B_{d1} \hat{d}_1 + B_{d2} \hat{d}_2 \\ \hat{y} = C \hat{x} + E \hat{u} + E_{d1} \hat{d}_1 + E_{d2} \hat{d}_2 \end{cases}$$

As matrizes da equação (13) são mostradas na Tabela 3 e da equação (14) na Tabela 4.

#### IV. CONCLUSÕES

Foi demonstrada a teoria para implementação de um micro-conversor elevador de tensão aplicado em fontes de geração fotovoltaicas com carregador de baterias. O sistema opera em modo MPPT, regulador de corrente ou regulador de tensão. Foi abordada a análise estática do conversor com relação aos seus parâmetros de entrada e a análise dinâmica para cada um dos modos de operação do carregador por meio de espaço de estado. Em trabalhos futuros serão realizadas simulações e a implementação do sistema analisado neste artigo.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. W. Erickson, D. Maksimovic, “*Fundamentals of Power Electronics*”, Second Edition.
- [2] M. Martins, “Transparências de aula”.  
Mohan, “*Power Electronics*”, Third Edition.