

# Inversores Monofásicos para Sistemas Fotovoltaicos

Prof. Dr. João Lucas de Souza Silva

Email: ProfJL@unicamp.br

Disciplina IT306-I



**LESF-MV**

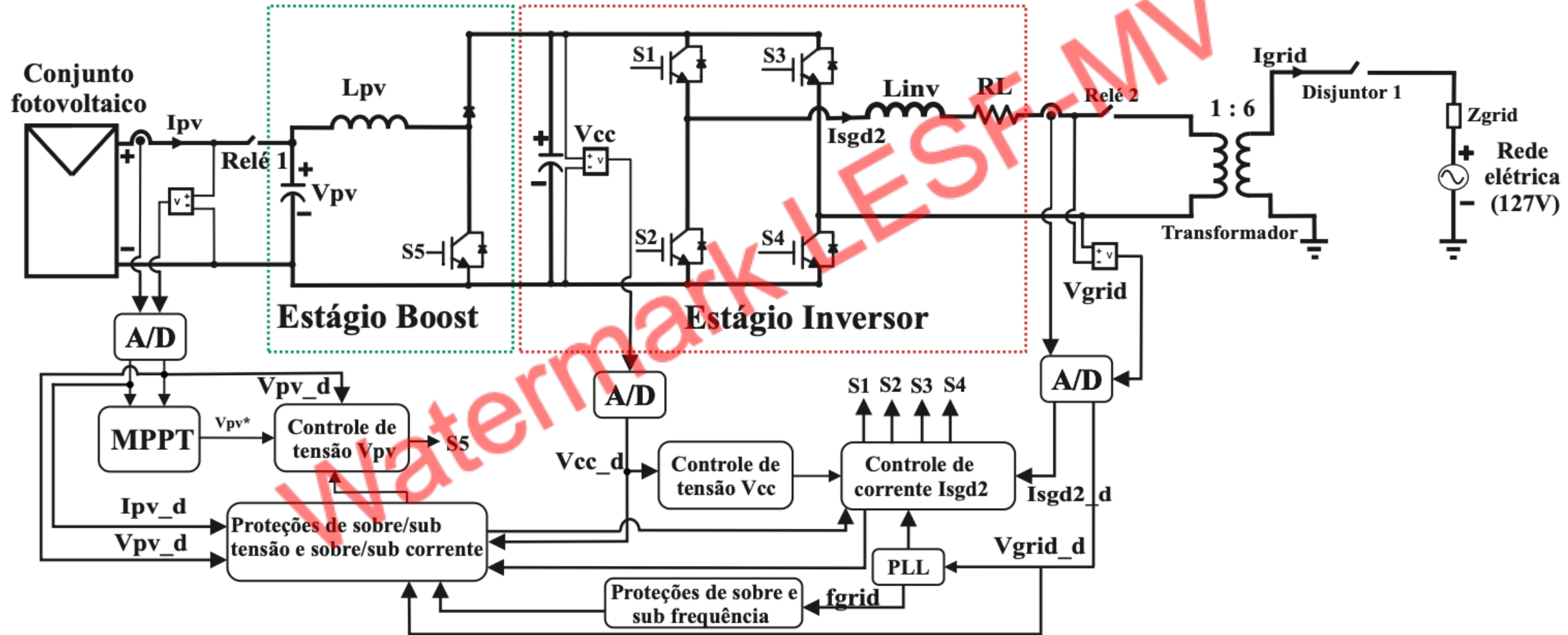
LABORATÓRIO DE ENERGIA E SISTEMAS  
FOTOVOLTAICOS - MARCELO VILLALVA  
UNICAMP

# Introdução

- Aula com conteúdo da Dissertação de Marcos Vinícios Gomes dos Reis. REIS, Marcos Vinícios Gomes dos. Estudo e implementação de estratégias de detecção de ilhamento em inversores para sistemas fotovoltaicos de geração distribuída. 2016. 1 recurso online ( 112 p.) Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, SP. Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12733/1628955>. Acesso em: 10 jun. 2025.
- O objetivo é apresentar o funcionamento básico do Inversor Monofásico.

Watermark LESF-MV

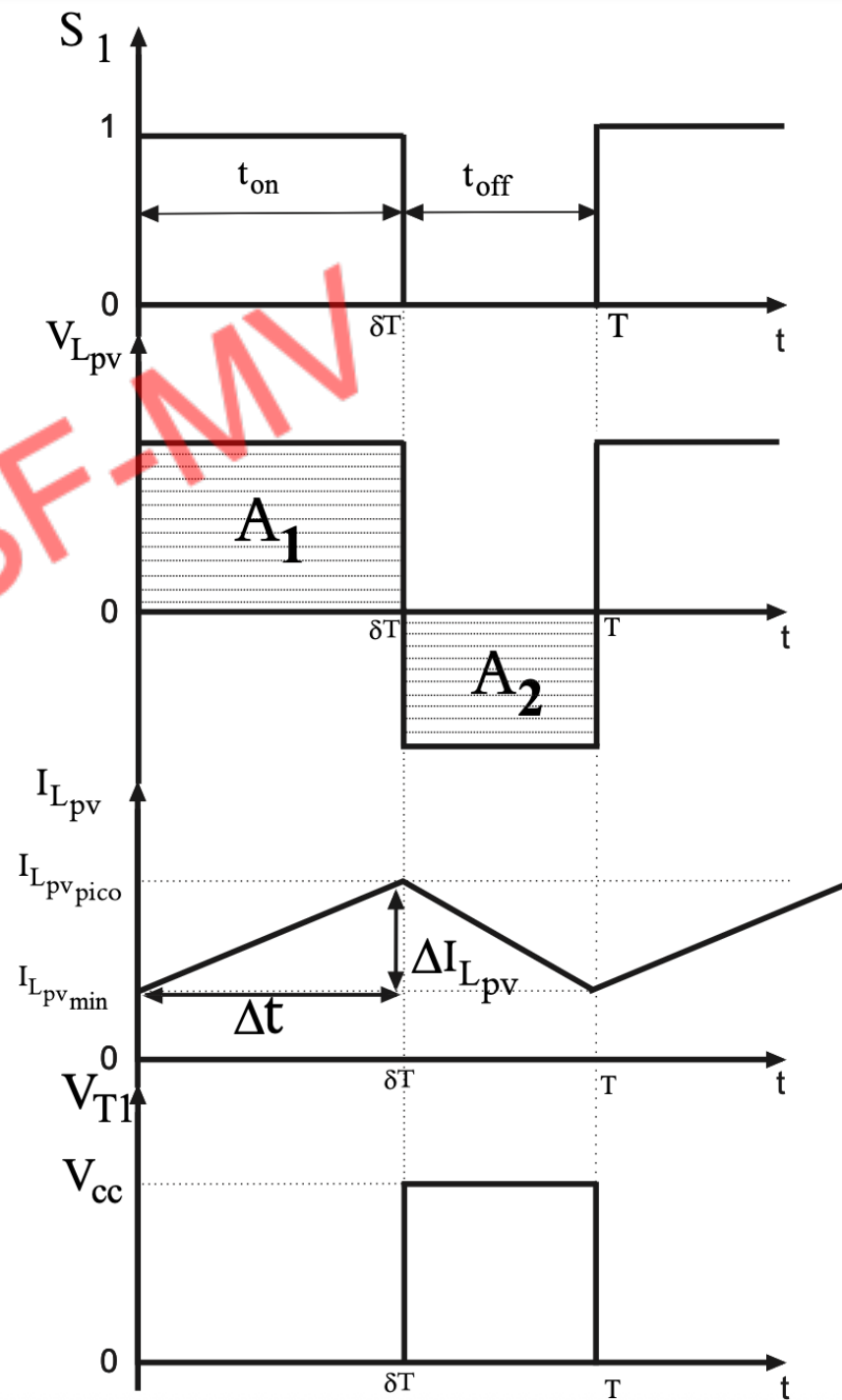
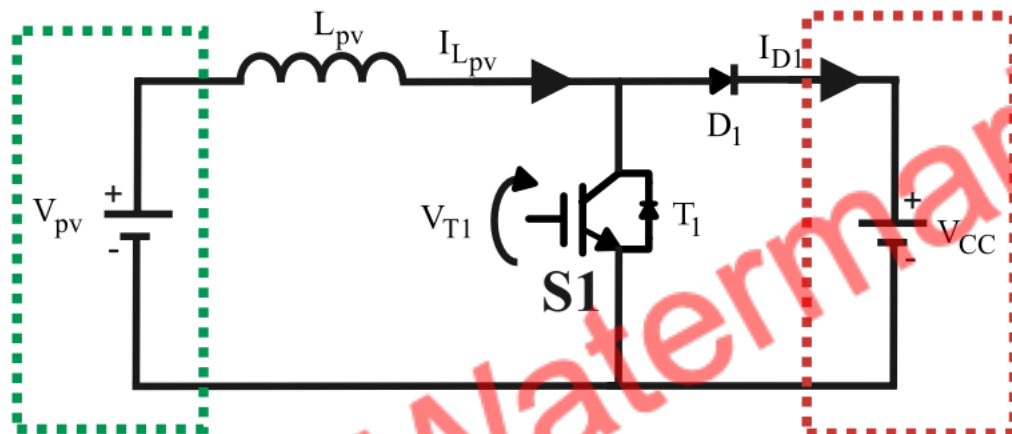
# Introdução



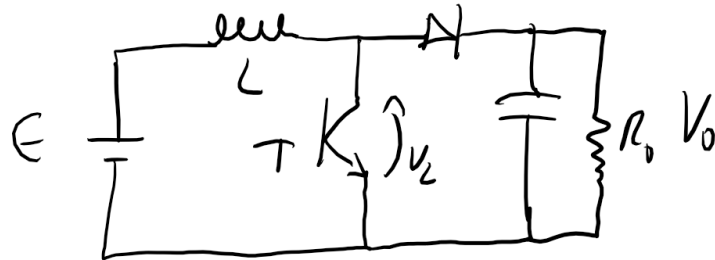
# Conversor CC-CC Boost

Conjunto  
fotovoltaico

Barramento  
CC



# Conversor CC-CC Boost



1- Se T **CONDUZ**:



2- Se T **NÃO CONDUZ**:



$$E = V_L + V_o$$

$$V_L = E - V_o$$

$$V_L = -(-E + V_o)$$

↳ PARA COMPENSAR  
A RÓTAS

Assim,

$$E \cdot t_{on} = (-E + V_o) \cdot t_{off}$$

$$E \cdot t_{on} = (-E + V_o) \cdot (T - t_{on})$$

$$E \cdot t_{on} = -ET + V_o T + E t_{on} - V_o t_{on}$$

$$ET = V_o T - V_o t_{on}$$

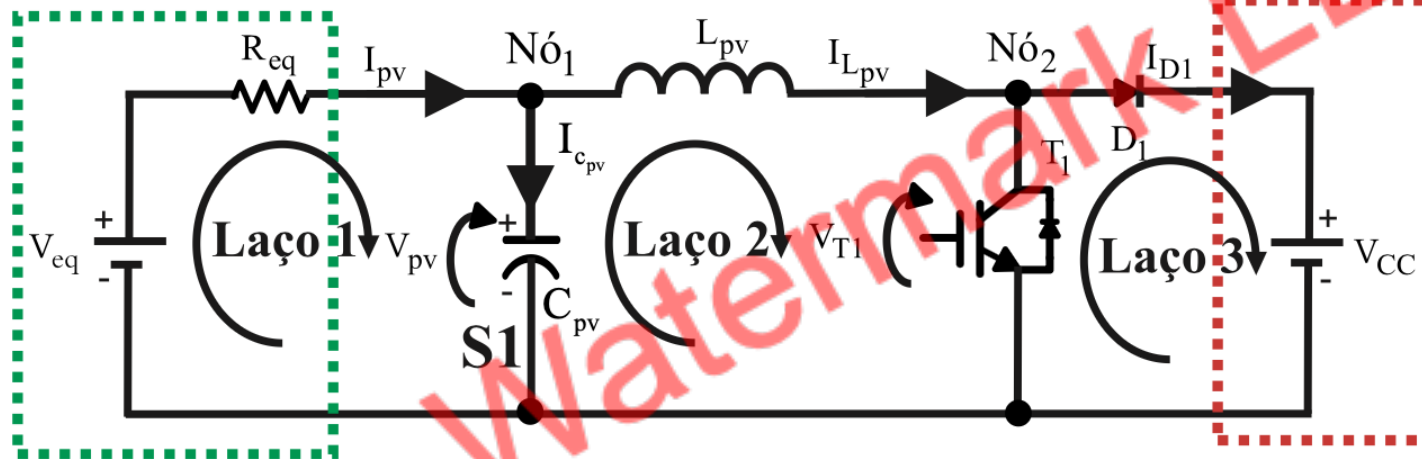
$$ET = V_o (T - t_{on})$$

$$\frac{V_o}{E} = \frac{T}{T - t_{on}} = \frac{1}{(1-d)}$$

# Modelagem dinâmica do conversor CC-CC

Conjunto fotovoltaico

Barramento CC



$$-V_{eq} + I_{pv}R_{eq} + V_{pv} = 0$$

$$I_{pv} = \frac{V_{eq} - V_{pv}}{R_{eq}}$$

$$-V_{pv} + V_{L_{pv}} + V_{T_1} = 0$$

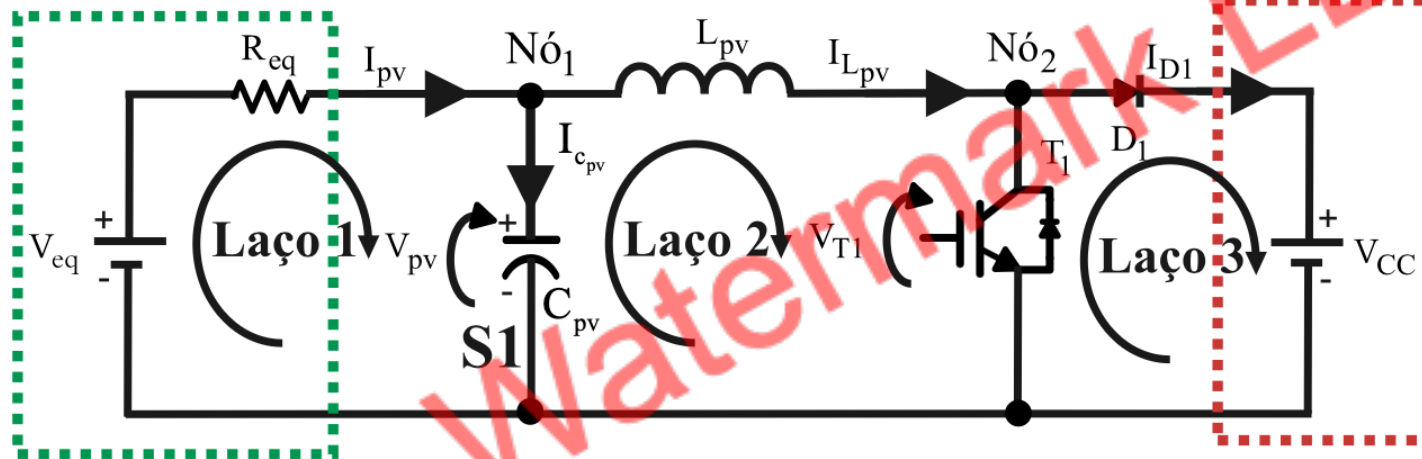
$$L_{pv} \frac{dI_{L_{pv}}(t)}{dt} + V_{cc}D - V_{pv} = 0$$



# Modelagem dinâmica do conversor CC-CC

Conjunto  
fotovoltaico

Barramento  
CC



$$I_{pv} = I_{L_{pv}} + I_{c_{pv}}$$

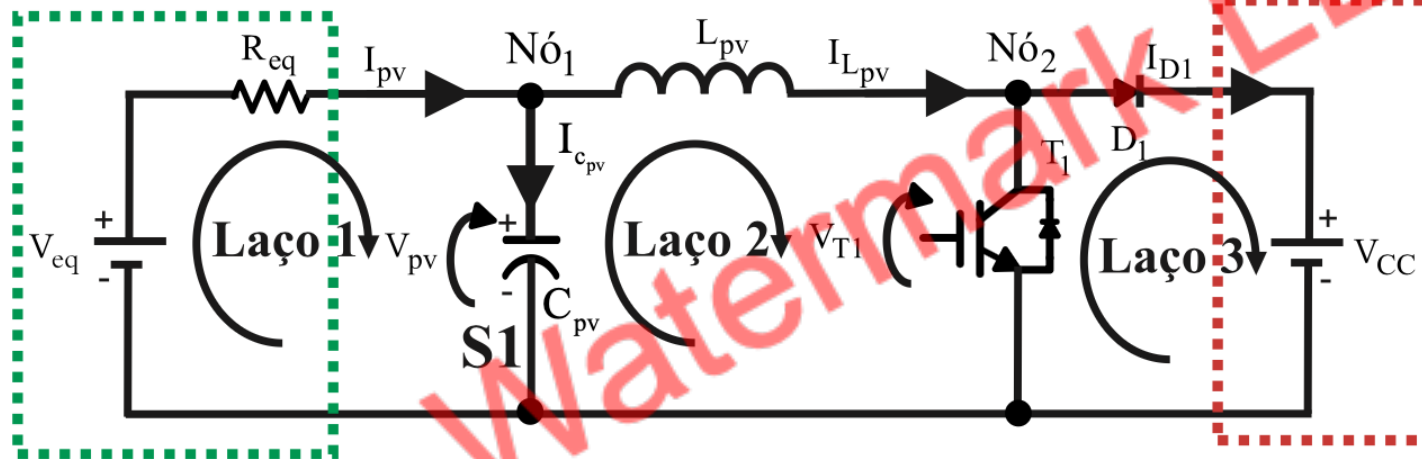
$$\dot{i}_{L_{pv}} = \frac{V_{eq} - V_{pv}}{R_{eq}} - C_{pv} \frac{dV_{pv}(t)}{dt}$$

$$L_{pv} \frac{d}{dt} \left( \frac{V_{eq} - V_{pv}}{R_{eq}} - C_{pv} \frac{dV_{pv}}{dt} \right) + V_{cc} D - V_{pv} = 0$$

# Modelagem dinâmica do conversor CC-CC

**Conjunto fotovoltaico**

**Barramento CC**



Em Sistemas FV,  
Veq é  
desprezado,  
pois é uma  
pequena  
perturbação

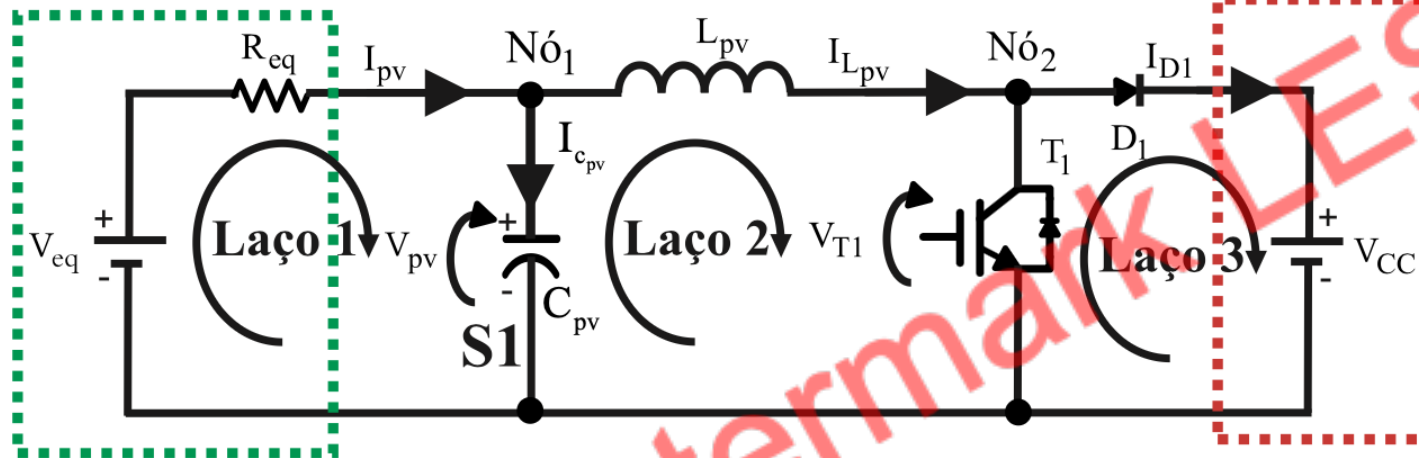
$$-\frac{L_{pv}}{R_{eq}} \frac{dV_{pv}}{dt} - L_{pv} C_{pv} \frac{d^2 V_{pv}}{dt^2} + V_{cc} D - V_{pv} = 0$$



# Modelagem dinâmica do conversor CC-CC

Conjunto  
fotovoltaico

Barramento  
CC



Em Sistemas FV,  
 $V_{eq}$  é  
desprezado,  
pois é uma  
pequena  
pertubação

Aplicando a transformada de Laplace, obtém-se:

$$-\frac{L_{pv}}{R_{eq}}sV_{pv}(s) - L_{pv}C_{pv}s^2V_{pv}(s) + V_{cc}D(s) - V_{pv}(s) = 0$$

# Modelagem dinâmica do conversor CC-CC

Tendo o ciclo de trabalho como entrada da função de transferência e a tensão fotovoltaica ( $V_{pv}$ ) do conversor *boost* como a saída, a função de transferência é dada por:

$$\frac{V_{pv}(s)}{D(s)} = \frac{V_{cc}}{s^2 + s \frac{1}{R_{eq}C_{pv}} + \frac{1}{L_{pv}C_{pv}}} \quad (2.16)$$

# Dimensionamento do conversor CC-CC

Quando o transistor está conduzindo ( $0 \leq t \leq t_{on}$ ), a equação (2.20) é encontrada. O parâmetro  $\Delta I_{L_{pv}}$  corresponde à diferença entre as correntes mínima e máxima no indutor que ocorrem no intervalo  $\Delta t = t_{on}$ .

$$V_{pv} = L_{pv} \frac{\Delta I_{L_{pv}}}{\Delta t} \quad (2.20)$$

Substituindo  $\Delta t$  por  $\delta T$ , tem-se:

$$\delta T = \frac{L_{pv} \Delta I_{L_{pv}}}{V_{pv}} \quad (2.21)$$

# Dimensionamento do conversor CC-CC

Quando o transistor deixa de conduzir em ( $\delta T \leq t \leq T$ ) e sabendo que nesse intervalo  $\Delta t = T - \delta T$ , obtém-se:

$$V_{cc} - V_{pv} = \frac{L_{pv} \Delta I_{L_{pv}}}{T(1 - \delta)} \quad (2.22)$$

Rearranjando a equação (2.22):

$$T(1 - \delta) = \frac{L_{pv} \Delta I_{L_{pv}}}{V_{cc} - V_{pv}} \quad (2.23)$$

Sabendo que o período de comutação do transistor é composto pela soma de  $t_{on}$  e  $t_{off}$  e é o inverso da frequência, tem-se:

$$T = \frac{1}{f_{chav}} = \delta T + T(1 - \delta) = \frac{L_{pv} \Delta I_{L_{pv}}}{V_{pv}} + \frac{L_{pv} \Delta I_{L_{pv}}}{V_{cc} - V_{pv}} \quad (2.24)$$

Isolando a variável de interesse  $L_{pv}$ :

$$L_{pv} = \frac{V_{pv} \delta}{f_s \Delta I_{L_{pv}}} \quad (2.25)$$

# Dimensionamento do conversor CC-CC

Quando o transistor deixa de conduzir em ( $\delta T \leq t \leq T$ ) e sabendo que nesse intervalo  $\Delta t = T - \delta T$ , obtém-se:

$$V_{cc} - V_{pv} = \frac{L_{pv} \Delta I_{L_{pv}}}{T(1 - \delta)} \quad (2.22)$$

Rearranjando a equação (2.22):

$$T(1 - \delta) = \frac{L_{pv} \Delta I_{L_{pv}}}{V_{cc} - V_{pv}} \quad (2.23)$$

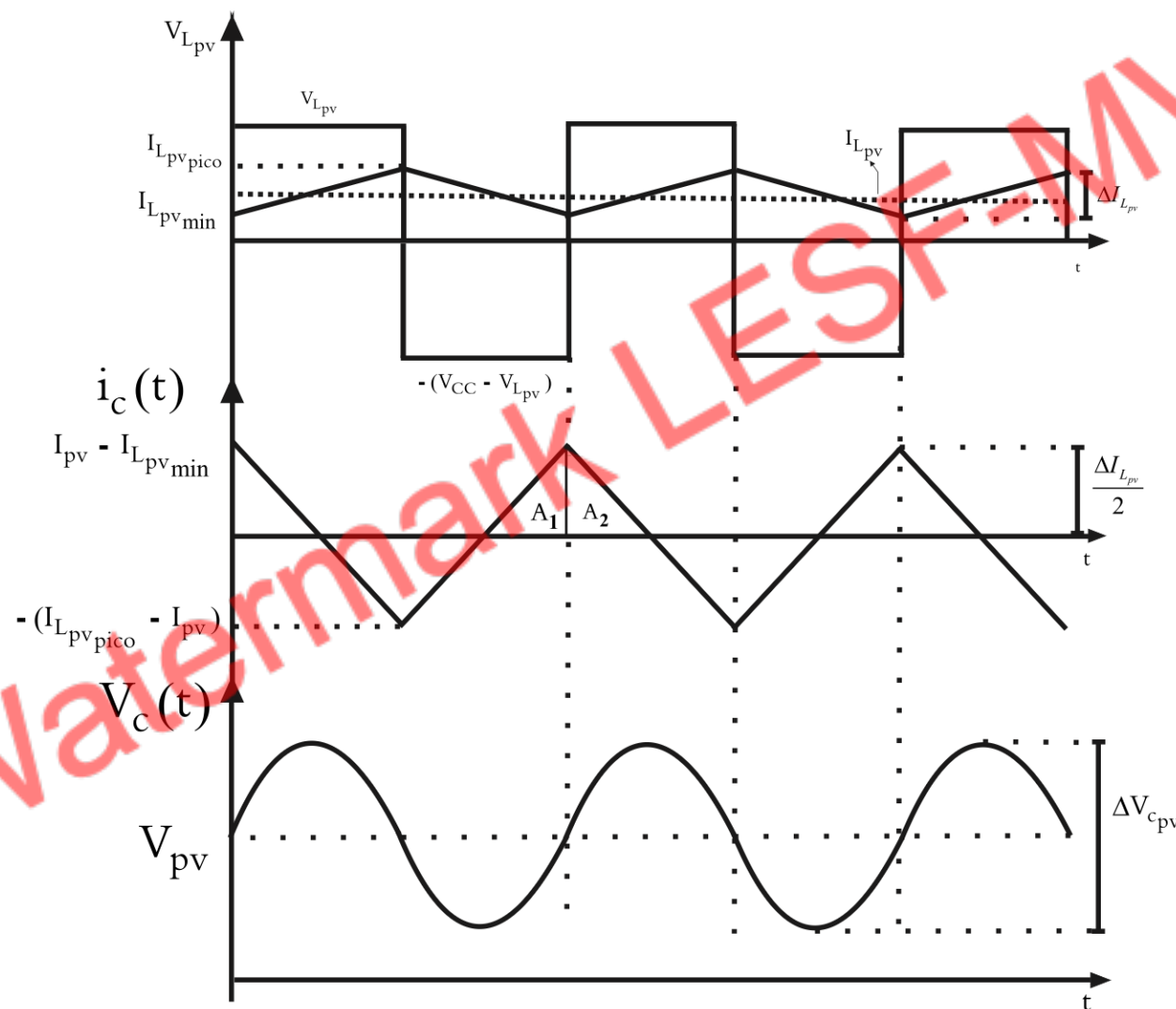
Sabendo que o período de comutação do transistor é composto pela soma de  $t_{on}$  e  $t_{off}$  e é o inverso da frequência, tem-se:

$$T = \frac{1}{f_{chav}} = \delta T + T(1 - \delta) = \frac{L_{pv} \Delta I_{L_{pv}}}{V_{pv}} + \frac{L_{pv} \Delta I_{L_{pv}}}{V_{cc} - V_{pv}} \quad (2.24)$$

Isolando a variável de interesse  $L_{pv}$ :

$$L_{pv} = \frac{V_{pv} \delta}{f_s \Delta I_{L_{pv}}} \quad (2.25)$$

# Dimensionamento do conversor CC-CC





# Dimensionamento do conversor CC-CC

A corrente no capacitor é a diferença entre a corrente fotovoltaica e a corrente que passa pelo indutor ( $i_c = I_{pv} - I_{L_{pv}}$ ). Para encontrar a variação da corrente no capacitor, basta calcular as áreas representadas por A1 e A2:

$$\Delta V_c = \frac{1}{C_{pv}} \int_{t1}^{t2} i_c dt = \frac{1}{C_{pv}} \frac{(I_{pv} - I_{L_{pv_{min}}})}{2} \frac{(t_{on} + t_{off})}{2} \quad (2.33)$$

Sabendo que  $\Delta I_{L_{pv}}/2 = I_{pv} - I_{L_{pv_{min}}}$  e  $t_{on} + t_{off} = 1/f_{chav}$ , e reorganizando a equação, encontra-se a variação da corrente no capacitor:

$$\Delta V_c = \frac{\Delta I_{L_{pv}}}{C_{pv} \cdot 8 \cdot f_{chav}} \quad (2.34)$$

# Projeto do controlador da tensão fotovoltaica

- **O controlador** calcula o erro entre a tensão medida  $V_{pv}$  e a referência  $V_{ref}$ .
- Ele gera um **sinal de controle contínuo (analógico ou digital)** proporcional ao erro (com ação proporcional e integradora);
- Esse sinal de controle é **normalizado** (geralmente entre 0 e 1) para ser interpretado como o duty cycle;
- Esse valor é enviado ao **PWM**, que gera o sinal de chaveamento do transistor do conversor Boost;
- O PWM ajusta o tempo em que a chave permanece ligada em cada ciclo, controlando assim a energia transferida e, por consequência, a tensão de entrada  $V_{pv}$ .

Watermark LESF-MV

# Projeto do controlador da tensão fotovoltaica

O primeiro passo consiste na escolha da frequência de corte desejada em malha fechada. Esta, por sua vez, para evitar qualquer perturbação gerada pelo chaveamento sobre o sinal de controle, deve ser inferior a  $1/5$  da frequência de chaveamento. Para o primeiro estágio a frequência de corte selecionada é de  $98,2 \text{ Hz}$ . A Figura 2.7 apresenta o diagrama de Bode da função de transferência do conversor *boost* que está representada pela equação (2.36). Os parâmetros usados para a função de transferência do conversor *boost* são: tensão de saída,  $V_{cc} = 30V$ , resistência equivalente,  $R_{eq} = 1\Omega$ , capacitor,  $C_{pv} = 1000\mu F$  e indutor,  $L_{pv} = 5mH$ . A margem de fase que corresponde a essa frequência de corte é  $23,5^\circ$  [13].

$$G_{boost} = \frac{1,2 \cdot 10^7}{s^2 + 1000s + 2 \cdot 10^5} \quad (2.36)$$

# Projeto do controlador da tensão fotovoltaica

$$C_{tipo2} = \frac{1 + sC_1R_2}{sR_1(C_1 + C_2 + sR_2C_1C_2)}$$

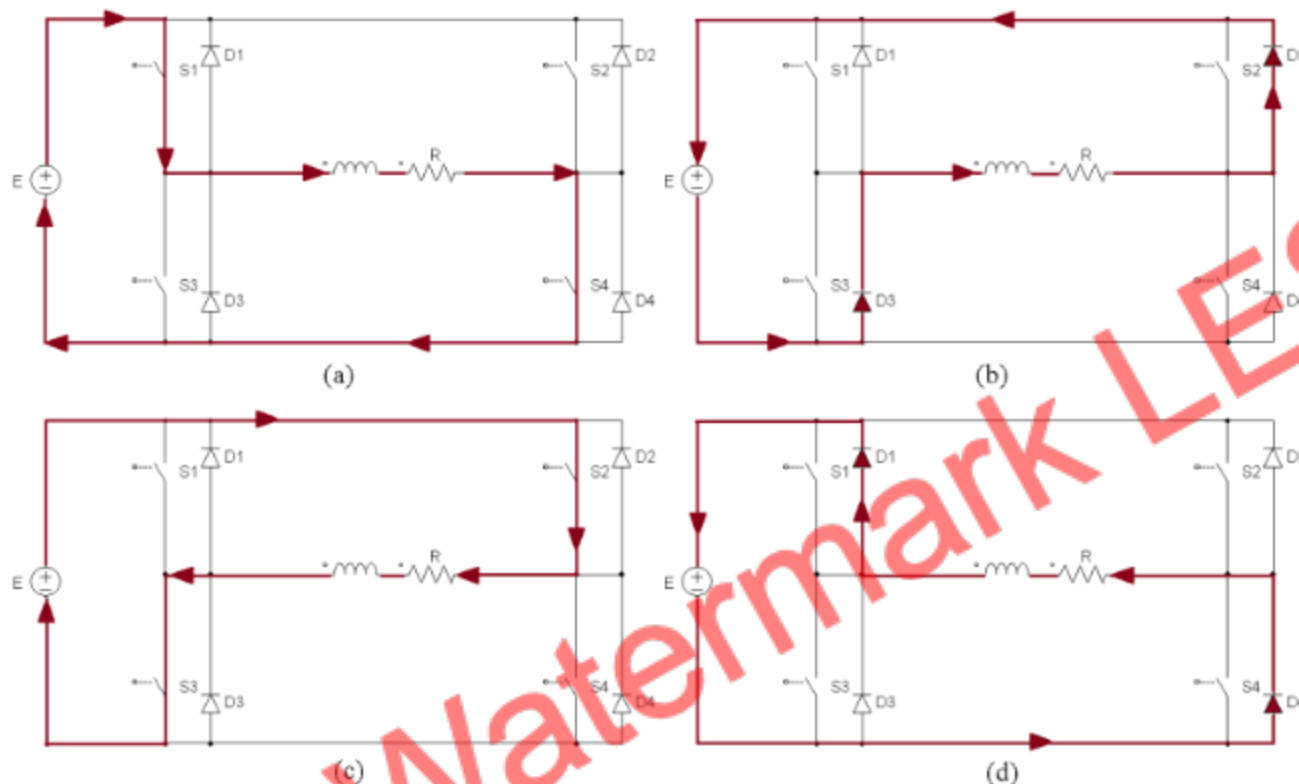
$$C_2 = \frac{1}{2\pi f_c G k_{ven} R_1}$$

$$k_{ven} = \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2} + \frac{\pi}{4}\right)$$

$$C_1 = C_2 \cdot (k_{ven}^2 - 1)$$

$$R_2 = \frac{k_{ven}}{2\pi f_c C_1}$$

# Inversor Monofásico



[https://www.researchgate.net/publication/303959613\\_DESENVOLVIMENTO\\_DE\\_UM\\_SISTEMA\\_DIDATICO\\_PARA\\_ENSINO\\_DE\\_CONVERTORES\\_CC-CA\\_COM\\_MONITORAMENTO\\_POR\\_MICROCONTROLADORES](https://www.researchgate.net/publication/303959613_DESENVOLVIMENTO_DE_UM_SISTEMA_DIDATICO_PARA_ENSINO_DE_CONVERTORES_CC-CA_COM_MONITORAMENTO_POR_MICROCONTROLADORES)

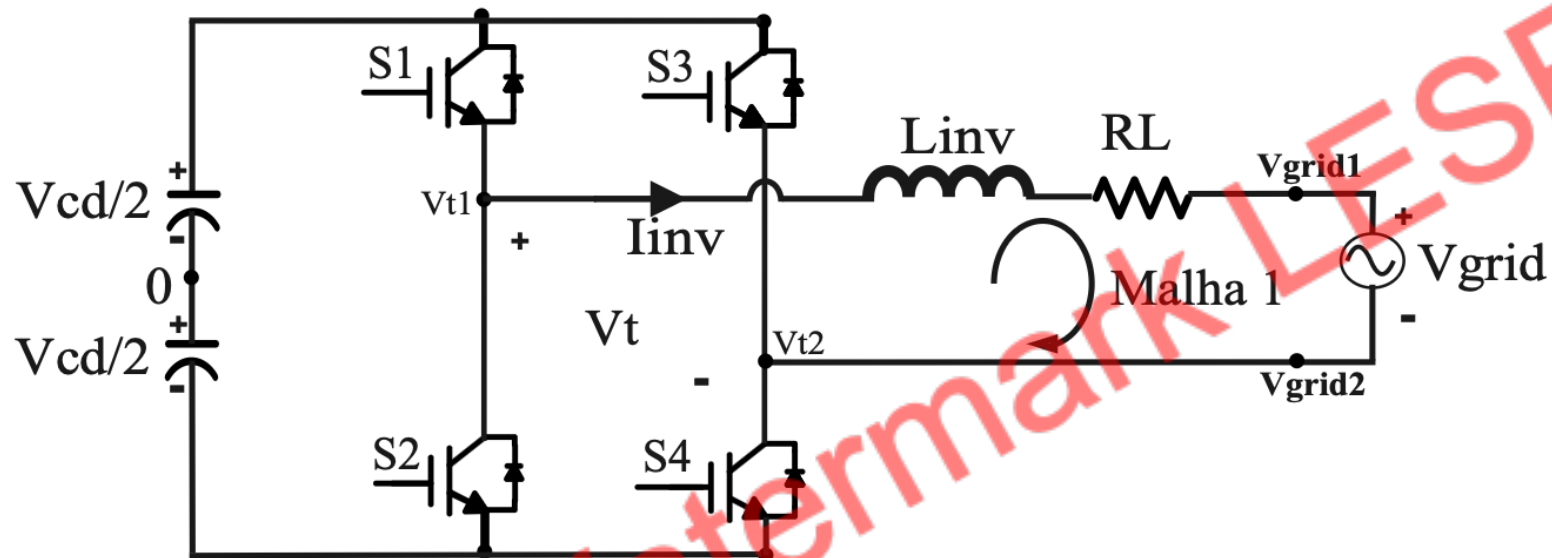
Obs.: A numeração das chaves é diferente da outra figura.

- (a) S1 e S4 conduzem, ciclo positivo, a tensão na carga é  $E+$ , corrente cresce;
- (b) S1 e S4 são bloqueadas, e os diodos conduzem (D2 e D3), denomina-se etapa de roda livre,  $E-$ , corrente decresce;
- (c) S2 e S3 conduzem, a tensão na carga é negativa ( $E-$ ), a corrente cresce no sentido contrário a (a).
- (d) S2 e S3 são bloqueadas, e os diodos conduzem (D1 e D4), denomina-se etapa de roda livre,  $E+$ , corrente decresce, ela finaliza quando a corrente vai a zero e começa (a);

Diodo de roda livre é importante em circuitos indutivos para manter a tensão média na carga, na hora da comutação. Mais em:

[https://www.youtube.com/watch?v=L1r64h\\_79vA&ab\\_channel=Electrolab](https://www.youtube.com/watch?v=L1r64h_79vA&ab_channel=Electrolab)

# Inversor Monofásico



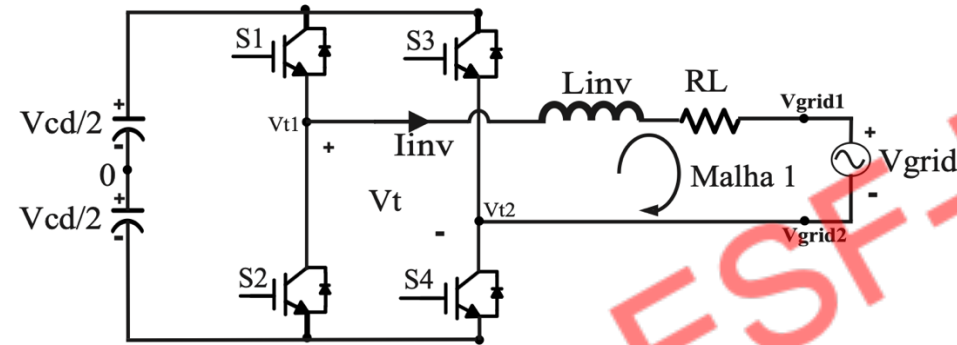
$$V_{t1} = -V_{t2}$$

$$V_{t2} = V_{grid2}$$

$$V_{grid} = V_{grid1} - V_{grid2}$$



# Inversor Monofásico



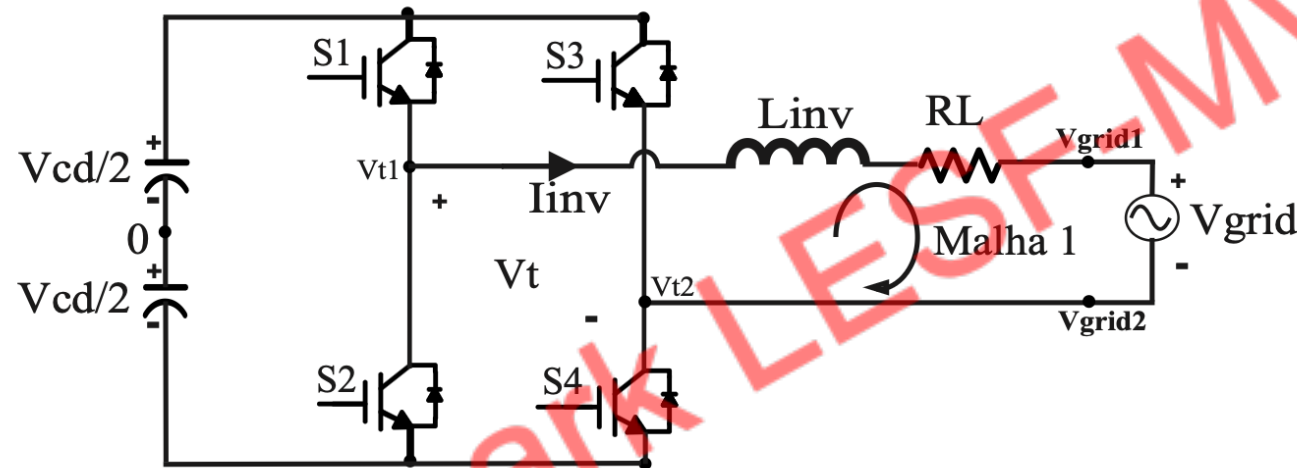
Para encontrar a função de transferência, basta aplicar a lei das tensões de Kirchhoff na malha do inversor que engloba o filtro, a tensão da rede e as tensões nos terminais de saída do conversor CC-CA. A equação encontrada está representada por (2.48) [25].

$$I_{inv}R_L + L \frac{dI_{inv}}{dt} + V_{grid1} - V_{grid2} + V_{t2} - V_{t1} = 0 \quad (2.48)$$

Substituindo (2.45) e (2.47) em (2.48), tem-se:

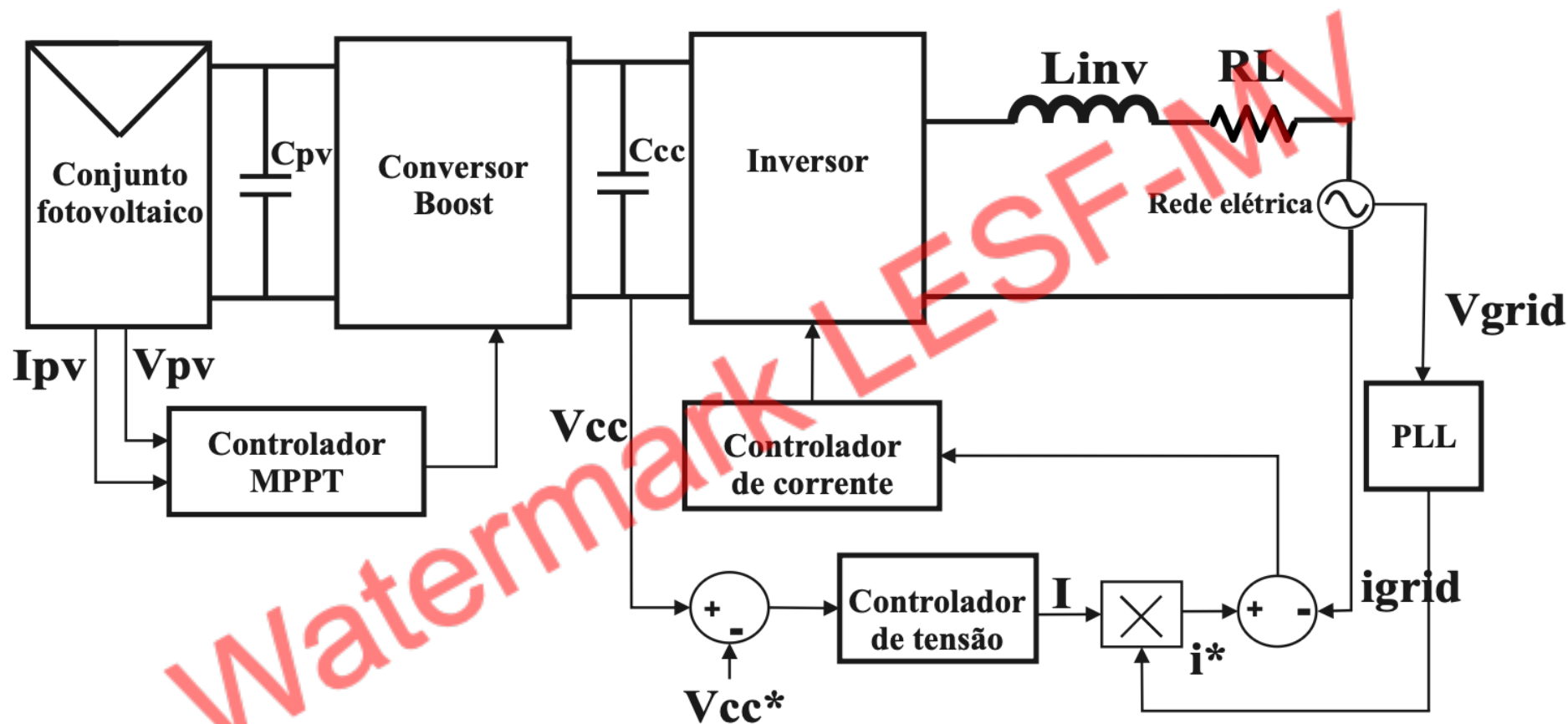
$$I_{inv}R_L + L \frac{dI_{inv}}{dt} + V_{grid} - 2V_{t1} = 0 \quad (2.49)$$

# Inversor Monofásico



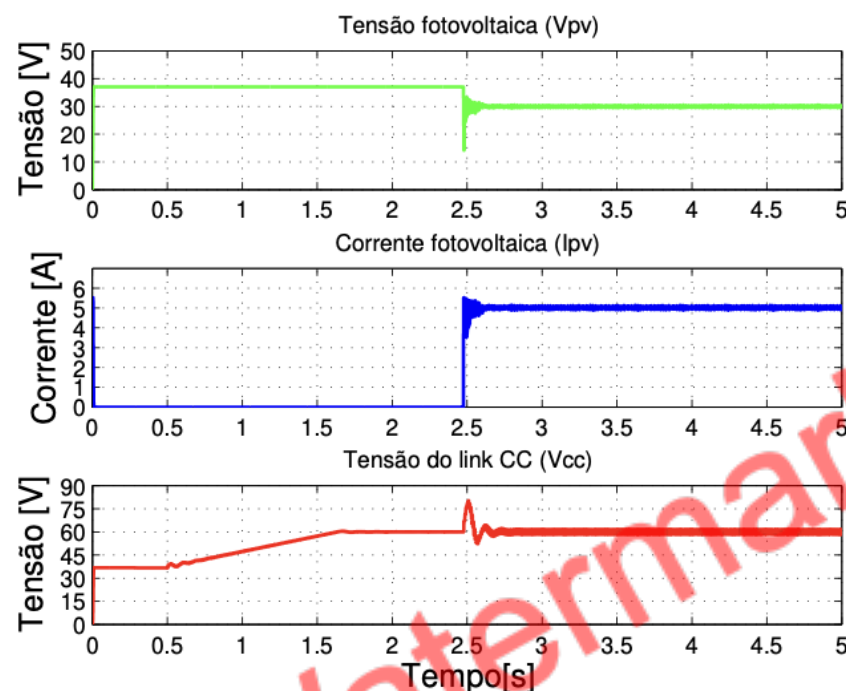
$$\frac{I_{inv}(s)}{V_{t1}(s)} = \frac{2}{L_{inv}s + R_L}$$

# Inversor Monofásico



PLL (Phase-Locked Loop), ou Malha de Travamento de Fase, é um sistema de controle usado para sincronizar a fase e a frequência de um sinal gerado com as de um sinal de referência.

# Inversor Monofásico

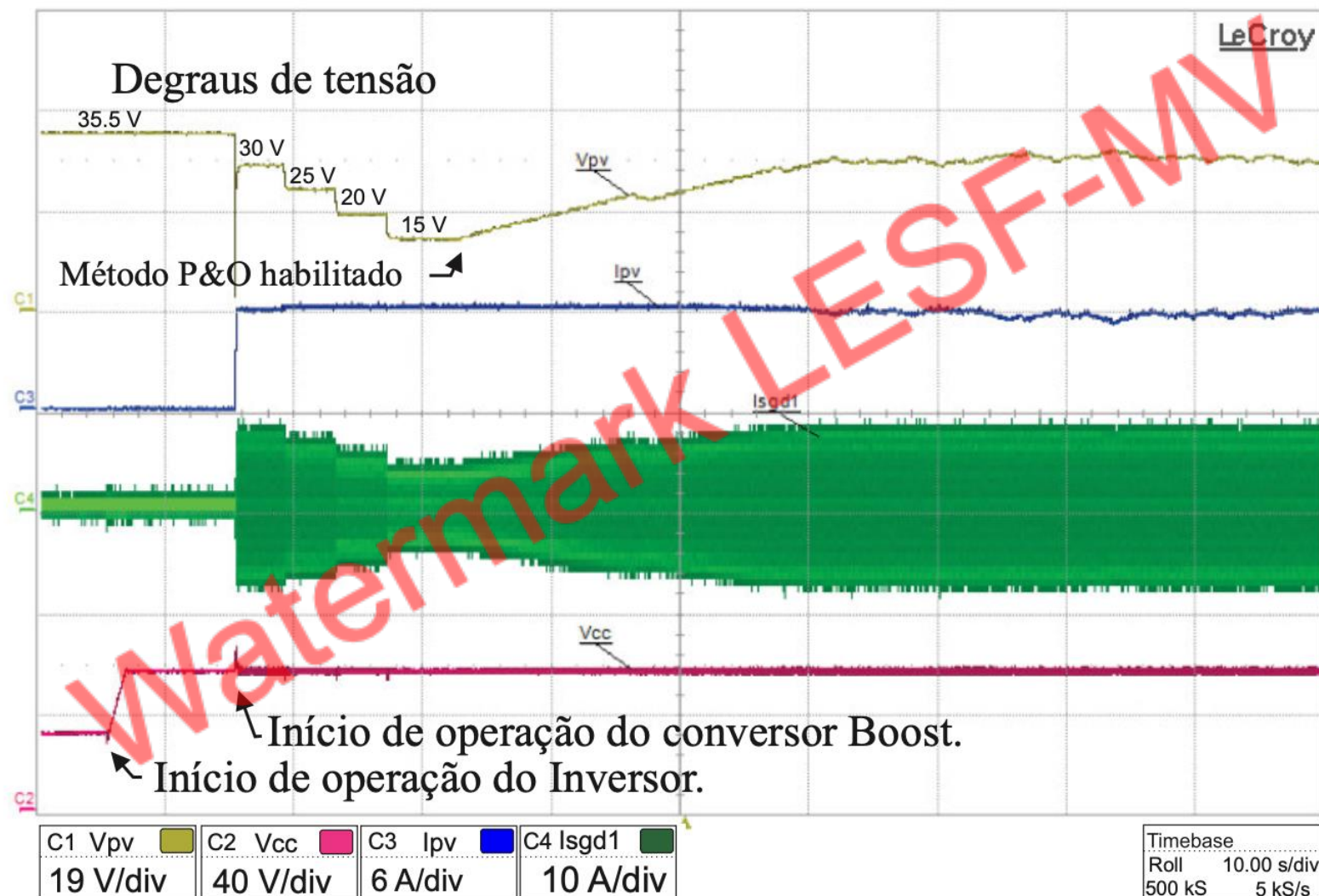


(a) Tensão fotovoltaica ( $V_{pv}$ ), corrente fotovoltaica ( $I_{pv}$ ) e tensão do link CC ( $V_{cc}$ ) - Simulação.



(b) C2: Tensão fotovoltaica ( $V_{pv}$ ), C3: Corrente fotovoltaica ( $I_{pv}$ ) e C4: Tensão do link CC ( $V_{cc}$ ) - Bancada Experimental.

# Inversor Monofásico





# Inversor Monofásico

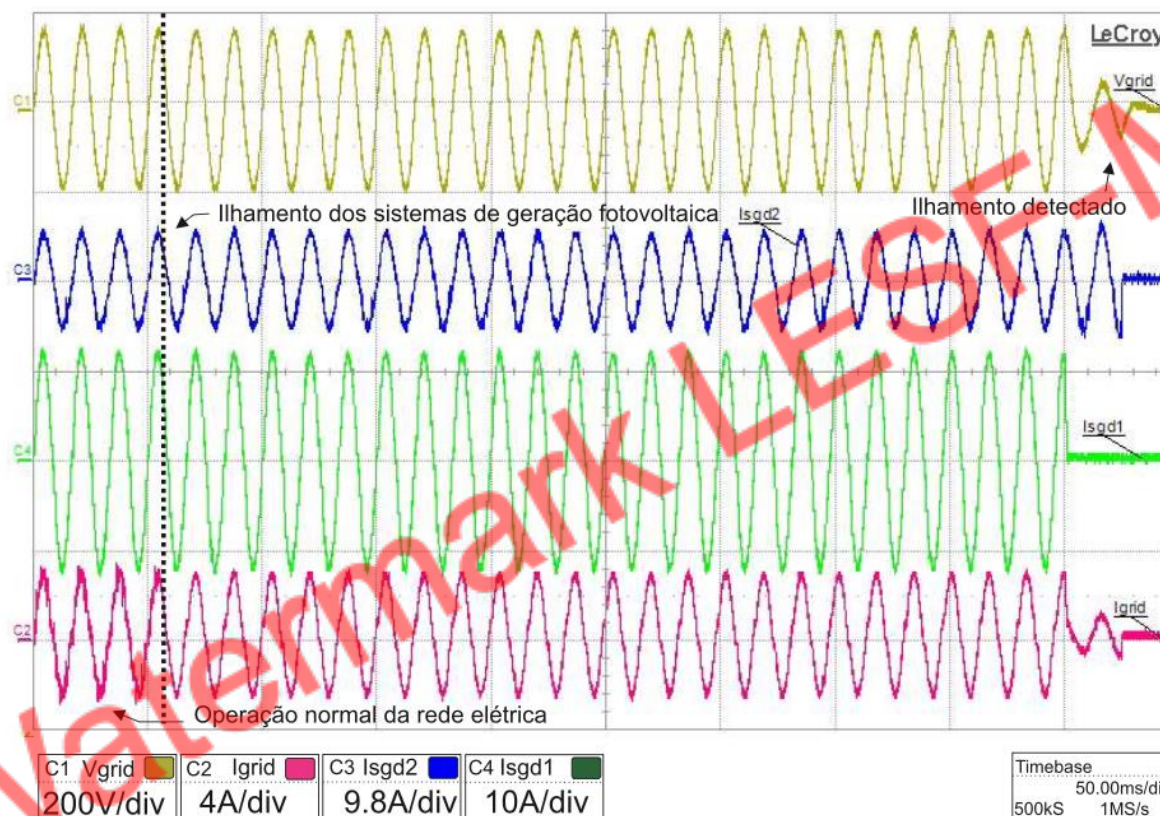


Figura 4.44: Detecção de Ilhamento com o método AFD. C1: Tensão da rede elétrica ( $V_{grid}$ ), C2: corrente da rede elétrica ( $I_{grid}$ ), C3: corrente de saída do SGD2 ( $I_{sgd2}$ ) e C4: corrente de saída do SGD1 ( $I_{sgd1}$ ).



# Controlador PI Boost

$$H_p(s) = \frac{\frac{V_{dc}}{L_{pv} \cdot C_{pv}}}{s^2 + \frac{1}{R_{eq} \cdot C_{pv}}s + \frac{1}{L_{pv} \cdot C_{pv}}}$$

$$H_p(j\omega_c) = \frac{V_{dc}/(L_{pv} \cdot C_{pv})}{-\omega_c^2 + j \cdot \omega_c/(R_{eq} \cdot C_{pv}) + 1/(L_{pv} \cdot C_{pv})}$$

$$\omega_c = 2\pi f_c$$

# Controlador PI Boost

Defasagem necessária (rad):

$$\phi = (-90^\circ - P_p + PM) \cdot \frac{\pi}{180}$$

Relação  $\frac{k_i}{k_p}$ :

$$\frac{k_i}{k_p} = \frac{\omega_c}{\tan(\phi)}$$

Função de transferência da malha aberta:

$$H_{aberta}(s) = H_{PI}(s) \cdot H_p(s)$$

Ganho proporcional:

$$k_p = \frac{1}{G_p} \cdot \sqrt{\frac{\tan^2(\phi)}{\tan^2(\phi) + 1}}$$

Malha fechada com realimentação unitária:

$$H_{fechada}(s) = \frac{H_{aberta}(s)}{1 + H_{aberta}(s)}$$

Controlador PI:

$$H_{PI}(s) = k_p \cdot \frac{s + \frac{k_i}{k_p}}{s}$$

## Exercício

- Um regulador boost tem a tensão de entrada de 5 V. A tensão de saída média são 15 V, e a corrente média de carga 0,5 A. A frequência de chaveamento utilizada é de 25 kHz. Para indutor de 150  $\mu\text{H}$  e Capacitor de 220  $\mu\text{F}$ . Calcule o ciclo de trabalho e a ondulação da corrente no indutor.

Watermark LESF-MV

# Exercício

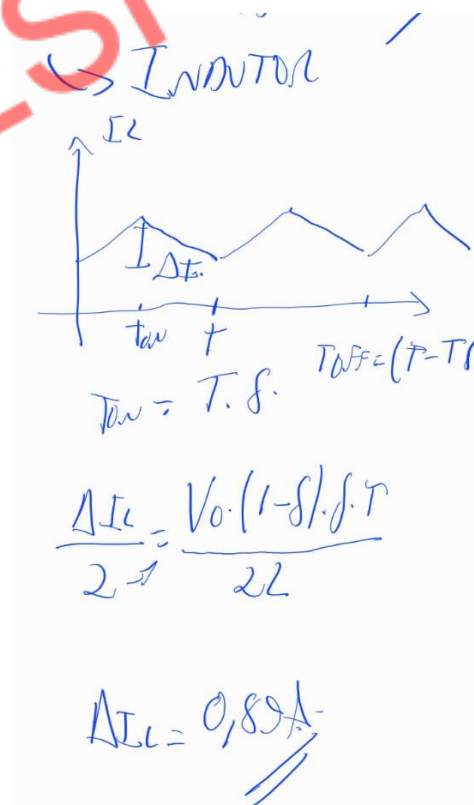
- Um regulador boost tem a tensão de entrada de 5 V. A tensão de saída média são 15 V, e a corrente média de carga 0,5 A. A frequência de chaveamento utilizada é de 25 kHz. Para indutor de 150  $\mu\text{H}$  e Capacitor de 220  $\mu\text{F}$ . Calcule o ciclo de trabalho e a ondulação da corrente no indutor.

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1-d}$$

$$\frac{15}{5} = \frac{1}{1-d}$$

$$15 - d \cdot 15 = 5$$

$$d = \frac{10}{15} = 0,667$$



# Referências

- REIS, Marcos Vinícios Gomes dos. Estudo e implementação de estratégias de detecção de ilhamento em inversores para sistemas fotovoltaicos de geração distribuída. 2016. 1 recurso online ( 112 p.) Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, SP. Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12733/1628955>. Acesso em: 10 jun. 2025.

Watermark LESF-MV





Meu Obrigado!



**LESF-MV**  
UNICAMP



**CURSO SOLAR**  
UNICAMP

Mais informações:  
[www.lesfmv.com](http://www.lesfmv.com)  
[www.cursosolarunicamp.com](http://www.cursosolarunicamp.com)