

# Bifurcações de Equilíbrio de Fronteira no Controle de um Conversor Bidirecional Conectado a uma Microrede CC

Daniel J. Pagano, Rony Cristiano

Depto de Automação e Sistemas, DAS, UFSC

Campus Trindade

88040-900, Florianópolis, SC

E-mail: daniel.pagano@ufsc.br, rony.cristiano@ufsc.br

**Resumo:** As microrredes cc são uma opção para novas demandas por qualidade de energia e integração de fontes renováveis no sistema elétrico. Numa microrrede em modo ilhado, o conversor bidirecional cc-cc (DBC) tem o papel de controlar o balanço de potência entre geração e demanda de carga, utilizando a bateria para drenar ou injetar potência na rede. O conversor bidirecional com controle por modos deslizantes (SMC) é modelado como um sistema dinâmico DPWS. Esta classe de sistemas exibe bifurcações típicas, denominadas bifurcações induzidas pela descontinuidade (DIBs), como por exemplo a Bifurcação do Equilíbrio de Fronteira (BEBs), que é foco de estudo deste trabalho.

**Palavras-chave:** Microrrede CC, conversor bidirecional, sistemas dinâmicos DPWS, controle por modos deslizantes, bifurcações do equilíbrio de fronteira.

## 1 Introdução

Microrredes (MRs) são sistemas de distribuição de energia de corrente alternada (ca) ou corrente contínua (cc) compostos por células solares fotovoltaicas (PV), geradores eólicos, células de combustível e baterias. Em destaque, as MRs cc são uma opção para novas demandas por qualidade de energia e integração de fontes renováveis no sistema elétrico [6].

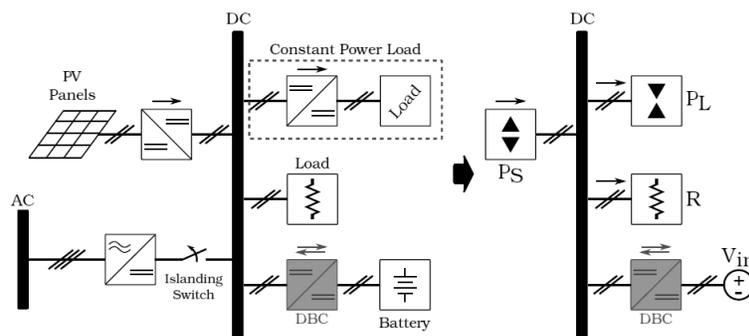


Figura 1: Modelo de uma Microrrede CC operando em modo ilhado.

Na dinâmica da MR cc, conversores no ponto de carga são modelados como *Constant Power Loads-CPLs* ( $P_L$ ) e cargas diretamente conectadas ao barramento como cargas resistivas ( $R$ ). As fontes (solar, eólica, etc.) conectadas ao barramento cc, são modeladas como fontes de potência ( $P_S$ ) e a bateria é considerada uma fonte de tensão cc ideal ( $V_{in}$ ). A MR no modo ilhado e o seu modelo equivalente estão ilustrados na Figura 1.

A potência gerada e a consumida pela CPL podem ser modeladas como  $P = P_S + P_L$ , resultando no modelo simplificado ilustrado na Figura 2. Assim, o conversor bidirecional (DBC) tem o papel de controlar o balanço de potência entre geração e demanda de carga, utilizando a bateria para drenar ou injetar potência na rede.

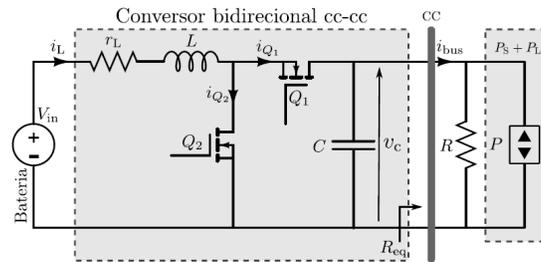


Figura 2: Modelo simplificado de uma Microrrede CC operando em modo ilhado.

Os conversores de potência são modelados matematicamente por sistemas dinâmicos DPWS (*Discontinuous Piece-Wise Smooth*), na literatura conhecidos como Sistemas de Filippov [4]. O correspondente modelo matemático é um conjunto de equações diferenciais ordinárias, caracterizado por algumas descontinuidades no próprio campo vetorial. Estas descontinuidades aparecem apenas em um pequeno subconjunto do espaço de estados e geralmente tal subconjunto é uma variedade suave genericamente transversal ao campo vetorial. Esta classe de sistemas pode apresentar órbitas deslizantes que são confinadas à superfície de comutação.

Sistemas dinâmicos DPWS exibem uma nova classe de bifurcações, denominadas bifurcações induzidas pela descontinuidade (DIBs, *Discontinuity Induced Bifurcations*), pois são sistemas de natureza descontínua [2]. Um exemplo é a Bifurcação do Equilíbrio de Fronteira (BEBs, *Boundary Equilibrium Bifurcations*) onde, sob variação de parâmetros, é observado uma colisão de um ponto de equilíbrio com a superfície de comutação [3].

Neste trabalho, aplica-se o controle por modos deslizantes (SMC) com filtro Washout ao conversor boost bidirecional conectado numa bateria para regular a tensão em uma Microrrede cc em modo ilhado, com o objetivo de identificar a ocorrência das BEBs. Do ponto de vista de controle, o estudo das BEBs se faz necessário pois, mesmo garantindo estabilidade do ponto de equilíbrio, uma perturbação de carga pode levar este ponto a desaparecer, transformando-o num equilíbrio virtual. Na seção (2) é apresentada algumas das propriedades dos sistemas dinâmicos DPWS, defini-se os tipos de equilíbrios, as características e classificação das BEBs. Na seção (3), a partir do sistema normalizado do conversor boost bidirecional, defini-se a estratégia de controle e faz-se um estudo dos equilíbrios para identificar e comprovar a ocorrência das BEBs.

## 2 Sistemas dinâmicos DPWS e as BEBs

Suponha que são dados dois campos vetoriais suaves  $\mathbf{F}^\pm : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$  e a função escalar  $h : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ , tal que a variedade de comutação  $\Sigma = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n, h(\mathbf{x}) = 0\}$  é uma superfície suave, com gradiente de  $h$  diferente de zero. Em seguida, define-se as duas regiões abertas  $R^- = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n : h(\mathbf{x}) < 0\}$  e  $R^+ = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n : h(\mathbf{x}) > 0\}$ , e o sistema dinâmico DPWS

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{cases} \mathbf{F}^-(\mathbf{x}, \mu), & \text{se } \mathbf{x} \in R^- \\ \mathbf{F}^+(\mathbf{x}, \mu), & \text{se } \mathbf{x} \in R^+. \end{cases} \quad (1)$$

dependente do parâmetro  $\mu \in \mathbb{R}$ .

A superfície de comutação  $\Sigma$  pode ser particionada em três diferentes regiões: uma onde  $\mathbf{F}^\pm$  apontam para superfície em ambos os lados, chamada região de deslizamento atrativo  $\Sigma_{as}$ ; outra

onde  $\mathbf{F}^\pm$  apontam para fora da superfície em ambos os lados, chamada região de deslizamento repulsivo  $\Sigma_{rs}$ ; e outra onde um dos campos vetoriais aponta para superfície e o outro aponta para fora, chamada região de cruzamento  $\Sigma_c$ .

No conjunto deslizante, dado pela união  $\Sigma_{as} \cup \Sigma_{rs}$ , a dinâmica é descrita pelo campo vetorial deslizante calculado a partir de uma combinação dos campos vetoriais originais [4], da forma,

$$\mathbf{F}_s(\mathbf{x}, \mu) = (1 - \lambda)\mathbf{F}^-(\mathbf{x}, \mu) + \lambda\mathbf{F}^+(\mathbf{x}, \mu). \quad (2)$$

Para cada  $\mathbf{x} \in \Sigma_{as} \cup \Sigma_{rs}$ , o valor de  $\lambda$  é selecionado tal que  $h_{\mathbf{x}} \cdot \mathbf{F}_s = 0$  ( $h_{\mathbf{x}}$  é o gradiente de  $h$ ), ou seja,

$$\lambda = \lambda(\mathbf{x}, \mu) = \frac{h_{\mathbf{x}} \cdot \mathbf{F}^-(\mathbf{x}, \mu)}{h_{\mathbf{x}} \cdot (\mathbf{F}^-(\mathbf{x}, \mu) - \mathbf{F}^+(\mathbf{x}, \mu))}, \quad (3)$$

desde que o denominador acima seja diferente de zero. Então,  $\lambda \in (0, 1) \quad \forall \mathbf{x} \in \Sigma_{as} \cup \Sigma_{rs}$ .

O sistema dinâmico DPWS (1) possui os equilíbrios de cada campo vetorial  $\mathbf{F}^\pm$  e também os equilíbrios do campo vetorial deslizante  $\mathbf{F}_s$ , mas é importante distinguir entre equilíbrios reais ou virtuais. Segue as definições:

**Definição 2.1** *Seja  $\bar{\mathbf{x}} \in \mathbb{R}^n$ , dependente ou não do parâmetro  $\mu$ , um ponto de equilíbrio do campo vetorial  $\mathbf{F}^-$  ( $\mathbf{F}^+$ ), isto é,  $\mathbf{F}^-(\bar{\mathbf{x}}, \mu) = \mathbf{0}$  ( $\mathbf{F}^+(\bar{\mathbf{x}}, \mu) = \mathbf{0}$ ). Este ponto é um **equilíbrio real** de  $\mathbf{F}^-$  se  $h(\bar{\mathbf{x}}) < 0$  ( $h(\bar{\mathbf{x}}) > 0$ ); ou um **equilíbrio virtual** se  $h(\bar{\mathbf{x}}) > 0$  ( $h(\bar{\mathbf{x}}) < 0$ ); ou um **equilíbrio de fronteira** se  $h(\bar{\mathbf{x}}) = 0$ .*

**Definição 2.2** *Um ponto  $\tilde{\mathbf{x}} \in \mathbb{R}^n$ , dependente ou não do parâmetro  $\mu$ , é um **pseudo-equilíbrio** do sistema dinâmico DPWS (1) se  $\tilde{\mathbf{x}} \in \Sigma$  e é um ponto de equilíbrio do campo vetorial deslizante  $\mathbf{F}_s$  dado em (2), ou seja,*

$$(1 - \lambda)\mathbf{F}^-(\tilde{\mathbf{x}}, \mu) + \lambda\mathbf{F}^+(\tilde{\mathbf{x}}, \mu) = \mathbf{0} \quad (4)$$

$$h(\tilde{\mathbf{x}}) = 0 \quad (5)$$

Além disso,  $\tilde{\mathbf{x}}$  é um pseudo-equilíbrio **real** quando  $\lambda \in (0, 1)$ , e **virtual** quando  $\lambda < 0$  ou  $\lambda > 1$ .

O equilíbrio de fronteira é um ponto crítico de mudança entre equilíbrio real e virtual. Esta mudança topológica de equilíbrio real para virtual (ou vice-versa) é influenciada pela variação do parâmetro  $\mu$ , e caracteriza uma **Bifurcação do Equilíbrio de Fronteira** (BEB).

Suponha que no valor crítico  $\mu = 0$ , o campo vetorial  $\mathbf{F}^-$  possui um ponto de equilíbrio de fronteira. A BEB ocorre de duas formas: uma denominada **Persistência**, ocorre quando em  $\mu < 0$  o equilíbrio de  $\mathbf{F}^-$  é real e o pseudo-equilíbrio é virtual, para  $\mu = 0$  eles colidem formando o equilíbrio de fronteira, e para  $\mu > 0$  o equilíbrio torna-se virtual e o pseudo-equilíbrio torna-se real. A outra, denominada **Dobra não Suave**, ocorre quando em  $\mu < 0$  o equilíbrio e o pseudo-equilíbrio são reais, para  $\mu = 0$  eles colidem, e para  $\mu > 0$  ambos tornam-se virtuais [3]. Note que, no caso da Persistência o equilíbrio do campo  $\mathbf{F}^-$  e o equilíbrio do campo deslizante  $\mathbf{F}_s$  (pseudo-equilíbrio) não coexistem para  $\mu \neq 0$ , e no caso da Dobra não suave eles podem coexistir para  $\mu < 0$  (ou  $\mu > 0$ ).

### 3 Estudo das BEBs no Controle do Conversor Bidirecional

Para o estudo das BEBs, considera-se o modelo do conversor boost bidirecional, mostrado na Figura 2, na forma normalizada como em [6], dada por

$$\dot{x} = 1 - bx - uy \quad (6)$$

$$\dot{y} = ux - ay - \frac{d}{y}, \quad (7)$$

em que  $u \in \{0, 1\}$  é a ação de controle,  $a \in \mathbb{R}_+$ ,  $b \in \mathbb{R}_+$  e  $d \in \mathbb{R}$  são parâmetros, e  $x \in \mathbb{R}$  e  $y \in \mathbb{R}^+ - \{0\}$  as variáveis de estados do sistema.

Os parâmetros  $a$  e  $d$  representam as cargas resistiva e de potência normalizadas do conversor. Estes parâmetros variam com a demanda de potência e com a disponibilidade de fontes da MR, gerando conseqüentemente mudanças na dinâmica do sistema. Para superar este problema, adota-se uma estratégia de controle SMC com filtro *high-pass* denominado Washout. Este filtro, juntamente com uma escolha apropriada da superfície de comutação, eliminam a dependência do ponto de operação de interesse em relação aos parâmetros  $a$  e  $d$  [1].

O filtro Washout introduz uma nova variável ao sistema, com equação dinâmica  $\dot{z} = \omega(x - z)$ , e  $\omega > 0$ . No equilíbrio,  $x$  e  $z$  são iguais, assim  $(x - z)$  trabalha como uma medida do erro que alimenta o controlador SMC apenas durante o transitório. Em seguida, define-se uma estratégia de controle por modos deslizantes baseada na ação de controle  $u = \frac{1}{2}(1 + \text{sign}[h(\mathbf{x})])$  com  $\mathbf{x} = (x, y, z) \in \mathbb{R}^3$ , onde  $h : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$  é uma função escalar da forma

$$h(\mathbf{x}) = y - y_r + k(x - z), \tag{8}$$

com  $k > 0$  (parâmetro real de controle) e  $y_r > 1$  (tensão normalizada de referência). Assim, representa-se a superfície de comutação pelo conjunto  $\Sigma = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^3 : h(\mathbf{x}) = 0\}$ .

O sistema de controle em questão pode ser representado como um sistema dinâmico DPWS

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{cases} \mathbf{F}^-(\mathbf{x}, d), & \text{se } h(\mathbf{x}) < 0 \\ \mathbf{F}^+(\mathbf{x}, d), & \text{se } h(\mathbf{x}) > 0 \end{cases}, \tag{9}$$

com os campos vetoriais

$$\mathbf{F}^-(\mathbf{x}, d) = \begin{bmatrix} 1 - bx \\ -ay - \frac{d}{y} \\ \omega(x - z) \end{bmatrix} \text{ e } \mathbf{F}^+(\mathbf{x}, d) = \begin{bmatrix} 1 - bx - y \\ x - ay - \frac{d}{y} \\ \omega(x - z) \end{bmatrix},$$

dependentes do parâmetro  $d \in \mathbb{R}$ . Como  $y > 0$ ,  $\mathbf{F}^-$  possui apenas um ponto de equilíbrio:  $\bar{\mathbf{x}}^-(d) = \left(\frac{1}{b}, \sqrt{\frac{-d}{a}}, \frac{1}{b}\right)$ , definido para  $d \leq 0$ . O campo  $\mathbf{F}^+$  possui dois pontos de equilíbrio:  $\bar{\mathbf{x}}_1^+(d) = (\bar{x}_1, \bar{y}_1, \bar{x}_1)$  definido para  $0 < d \leq d_{SN}$ , e  $\bar{\mathbf{x}}_2^+(d) = (\bar{x}_2, \bar{y}_2, \bar{x}_2)$  para  $d \leq d_{SN}$ ; com

$$\bar{x}_{1,2} = \frac{2(a + d)}{1 + 2ab \mp \sqrt{1 - d/d_{SN}}}, \quad \bar{y}_{1,2} = \frac{1 \mp \sqrt{1 - d/d_{SN}}}{2(1 + ab)} \tag{10}$$

e

$$d_{SN} = \frac{1}{4b(1 + ab)}. \tag{11}$$

Seguindo a definição (2.2), para determinar os pontos de pseudo-equilíbrio resolve-se o sistema de equações (4)-(5), em termos de  $(\mathbf{x}, \lambda)$ , obtendo  $(\tilde{\mathbf{x}}_+(d), \tilde{\lambda}_-(d))$  e  $(\tilde{\mathbf{x}}_-(d), \tilde{\lambda}_+(d))$  com

$$\tilde{\mathbf{x}}_{\pm}(d) = (\tilde{x}_{\pm}, y_r, \tilde{x}_{\pm}), \text{ em que } \tilde{x}_{\pm} = \frac{1 \pm \sqrt{1 - 4b(d + ay_r^2)}}{2b} \tag{12}$$

$$\tilde{\lambda}_{\mp}(d) = \frac{1 \mp \sqrt{1 - 4b(d + ay_r^2)}}{2y_r}, \tag{13}$$

para  $d < d_{SN}^s$  com

$$d_{SN}^s = \frac{1 - 4aby_r^2}{4b}. \tag{14}$$

Para identificar a ocorrência da BEB, considere primeiro uma análise no campo vetorial  $\mathbf{F}^-$  e depois no campo vetorial  $\mathbf{F}^+$ . O equilíbrio do campo vetorial  $\mathbf{F}^-$  é o ponto  $\bar{\mathbf{x}}^-(d)$ , cuja posição no espaço de estados depende do parâmetro  $d$ . A trajetória descrita por este ponto é uma curva

suave do  $\mathbb{R}^3$  definida para  $d \in \mathbb{R}^+$ , que cruza transversalmente a superfície de comutação  $\Sigma$  no ponto  $\bar{\mathbf{x}}^-(d_{BEB-}) = (1/b, y_r, 1/b)$  quando  $d$  assume o valor crítico

$$d = d_{BEB-} = -ay_r^2, \tag{15}$$

pois,  $h(\bar{\mathbf{x}}^-(d_{BEB-})) = 0$  e  $h'(\bar{\mathbf{x}}^-(d_{BEB-})) = -\frac{1}{2ay_r} < 0$ . A derivada negativa indica que  $\bar{\mathbf{x}}^-(d)$  é um equilíbrio virtual para  $d < d_{BEB-}$ , e real para  $d > d_{BEB-}$  ( $d$  suficientemente próximo à  $d_{BEB-}$ ). No valor crítico  $d = d_{BEB-}$ , o equilíbrio  $\bar{\mathbf{x}}^-(d)$  colide com o pseudo-equilíbrio  $\tilde{\mathbf{x}}_+(d)$ , formando o equilíbrio de fronteira. Este é um ponto sobre a linha limite das regiões de deslizamento atrativo/repulsivo e cruzamento, pois,  $\tilde{\lambda}_-(d_{BEB-}) = 0$ . O pseudo-equilíbrio  $\tilde{\mathbf{x}}_+(d)$  cruza esta linha limite de forma transversal, pois  $\tilde{\lambda}'_-(d_{BEB-}) = b/y_r > 0$ . A derivada positiva indica que  $\tilde{\mathbf{x}}_+(d)$  é um pseudo-equilíbrio virtual para  $d < d_{BEB-}$ , e real para  $d > d_{BEB-}$ . Então, quando  $d = d_{BEB-}$  ocorre uma **BEB** do tipo **Dobra não Suave** (*Nonsmooth fold*). Na figura 3(a) a curva de cor roxa, com equação dada em (15), indica esta bifurcação no plano  $(y_r, d)$ .

No campo vetorial  $\mathbf{F}^+$  o equilíbrio  $\bar{\mathbf{x}}_1^+(d)$  é sempre virtual, pois  $y_r > 1$ . O outro equilíbrio,  $\bar{\mathbf{x}}_2^+(d)$ , descreve uma curva suave no  $\mathbb{R}^3$  que cruza transversalmente a superfície de comutação  $\Sigma$  no ponto  $\bar{\mathbf{x}}_2^+(d_{BEB+}) = \left(\frac{1-y_r}{b}, y_r, \frac{1-y_r}{b}\right)$  quando  $d$  assume o valor crítico

$$d = d_{BEB+} = \frac{y_r - (1 + ab)y_r^2}{b}, \tag{16}$$

pois,  $h(\bar{\mathbf{x}}_2^+(d_{BEB+})) = 0$  e  $h'(\bar{\mathbf{x}}_2^+(d_{BEB+})) = -\frac{b}{|2y_r(1+ab)-1|} < 0$ . A derivada negativa indica que  $\bar{\mathbf{x}}_2^+(d)$  é um equilíbrio real para  $d < d_{BEB+}$  e virtual para  $d > d_{BEB+}$  ( $d$  suficientemente próximo à  $d_{BEB+}$ ). No valor crítico  $d = d_{BEB+}$ ,  $\bar{\mathbf{x}}_2^+(d)$  colide com o pseudo-equilíbrio  $\tilde{\mathbf{x}}_-(d)$  formando o equilíbrio de fronteira. Este é um ponto sobre a linha limite das regiões de deslizamento atrativo/repulsivo e cruzamento, pois,  $\tilde{\lambda}_+(d_{BEB+}) = 1$ . O pseudo-equilíbrio  $\tilde{\mathbf{x}}_-(d)$  cruza esta linha limite de forma transversal, pois,  $\tilde{\lambda}'_+(d_{BEB+}) = -\frac{b}{y_r|2y_r-1|} < 0$ . A derivada negativa indica que  $\tilde{\mathbf{x}}_-(d)$  é um pseudo-equilíbrio virtual para  $d < d_{BEB+}$  e real para  $d > d_{BEB+}$ . Então, no valor crítico  $d = d_{BEB+}$  ocorre uma **BEB** do tipo **Persistência** (*Persistence*). Na figura 3(a) a curva de cor azul, com equação dada em (16), indica esta bifurcação no plano  $(y_r, d)$ .

As conclusões obtidas sobre as BEBs são válidas apenas para  $y_r > 1$ , característica do conversor boost. No entanto, supondo  $y_r = 1/2$ , quando  $d = d_{BEB+}$  no ponto de equilíbrio de fronteira ocorre uma tripla colisão, envolvendo os equilíbrios  $\bar{\mathbf{x}}_2^+$  e  $\tilde{\mathbf{x}}_{\pm}$ . Neste caso, o equilíbrio de fronteira é um ponto GBE [5], *Generalized Boundary Equilibrium*. Esta situação degenerada é uma bifurcação de codimensão 2, que separa os dois cenários: Persistência e Dobra não suave.

Na Figura 3 é mostrado um plano de bifurcações das BEBs, e bifurcações Sela-Nó ( $SN_1$  em  $\mathbf{F}^+$ , linha verde; e  $SN_2$  em  $\mathbf{F}_s$ , linha vermelha; de equações dadas em (11) e (14)). Também, resultados de simulação do sistema dinâmico (9), considerando  $b = 0.06$ ,  $\omega = 0.6$ ,  $y_r = 1.2$ ,  $k = 1$ ,  $a = 0.3$  e  $d \in \{-5, -4.432, -4\}$ ; onde é visualizada a ocorrência da BEB do tipo Persistência.

## 4 Conclusões

Neste trabalho foram abordadas algumas das propriedades de sistemas dinâmicos DPWS como, o movimento deslizante, pseudo-equilíbrio, equilíbrio de fronteira, além da caracterização das BEBs e da definição dos dois tipos: Persistência e Dobra não Suave. Com o objetivo de identificar e comprovar a ocorrência das BEBs em sistemas reais, foi considerado uma aplicação ligada ao controle de um conversor Boost Bidirecional conectado a uma bateria em uma Micro-rede cc quando em modo ilhado. Para o processo de controle foi utilizado um SMC introduzindo o filtro Washout, responsável por manter o ponto de operação de interesse após uma perturbação de carga. Os resultados obtidos neste trabalho comprovam a ocorrência das BEBs no sistema de controle proposto. Este fato é de extrema importância, pois uma perturbação de carga pode instabilizar o sistema ou mudar o ponto de operação, sendo que neste caso o filtro Washout é ineficiente para colocar o sistema de volta ao ponto de operação de interesse.

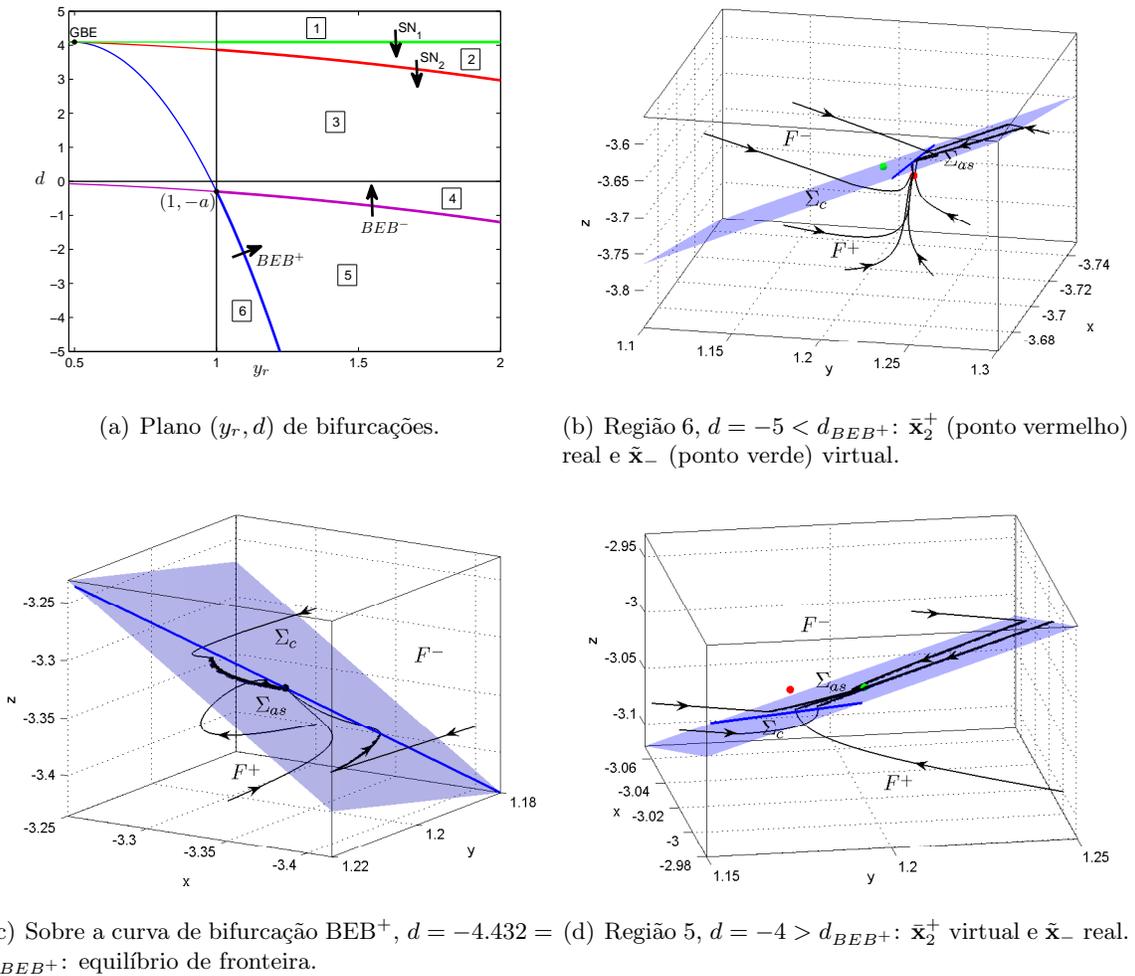


Figura 3: Conjunto de bifurcações e resultados de simulação.

## Referências

- [1] R. Cristiano. Bifurcações em Sistemas Dinâmicos DPWS com Aplicações em Eletrônica de Potência. Dissertação de mestrado. PGEAS, UFSC. Em andamento, previsão, Outubro de 2013. Orientador: Daniel J. Pagano.
- [2] M. di Bernardo, A. Nordmark and G. Olivar, (2008b). Discontinuity-induced bifurcations of equilibria in piecewise-smooth dynamical systems; *Physica D* 237, 119-136.
- [3] M. di Bernardo, D. J. Pagano and E. Ponce. Nonhyperbolic boundary equilibrium bifurcations in planar Filippov systems: A case study approach. *Int. J. Bifurcat. Chaos*, vol. 18, pp. 1377-1392, 2008.
- [4] A. F. Filippov. *Differential Equations with Discontinuous Righthand Sides*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic, 1988.
- [5] F. D. Rossa and F. Dercole. Generic and generalized boundary operating points in piecewise-linear (discontinuous) control systems; in 51st IEEE Conference on Decision and Control (accepted), 2012.
- [6] A. P. N. Tahim, D. J. Pagano e E. Ponce. Nonlinear Control of Boost Bidirectional Converters in Stand-alone dc Microgrids. 51st IEEE Conference on Decision and Control - CDC. Maui, Hawaii, USA; 2012.