



ESTUDO DE CASO:

**CONTROLE DE FREQUÊNCIA DE MICRORREDE
OPERANDO EM MODO ISOLADO COM SUPORTE
DE SISTEMA DE ARMAZENAMENTO EM BATERIAS**

Enga. MARIANA NAU, M.Sc.
Prof. ANTONIO SIMÕES COSTA

LABSPOT/UFSC



Universidade Federal
de Santa Catarina

Estudos de Caso

- O estudo de caso visa avaliar o **desempenho de estratégias de controle** de frequência de microrrede operando em modo isolado;
- Utiliza-se como sistema-teste uma microrrede em Corrente Alternada, trifásica.



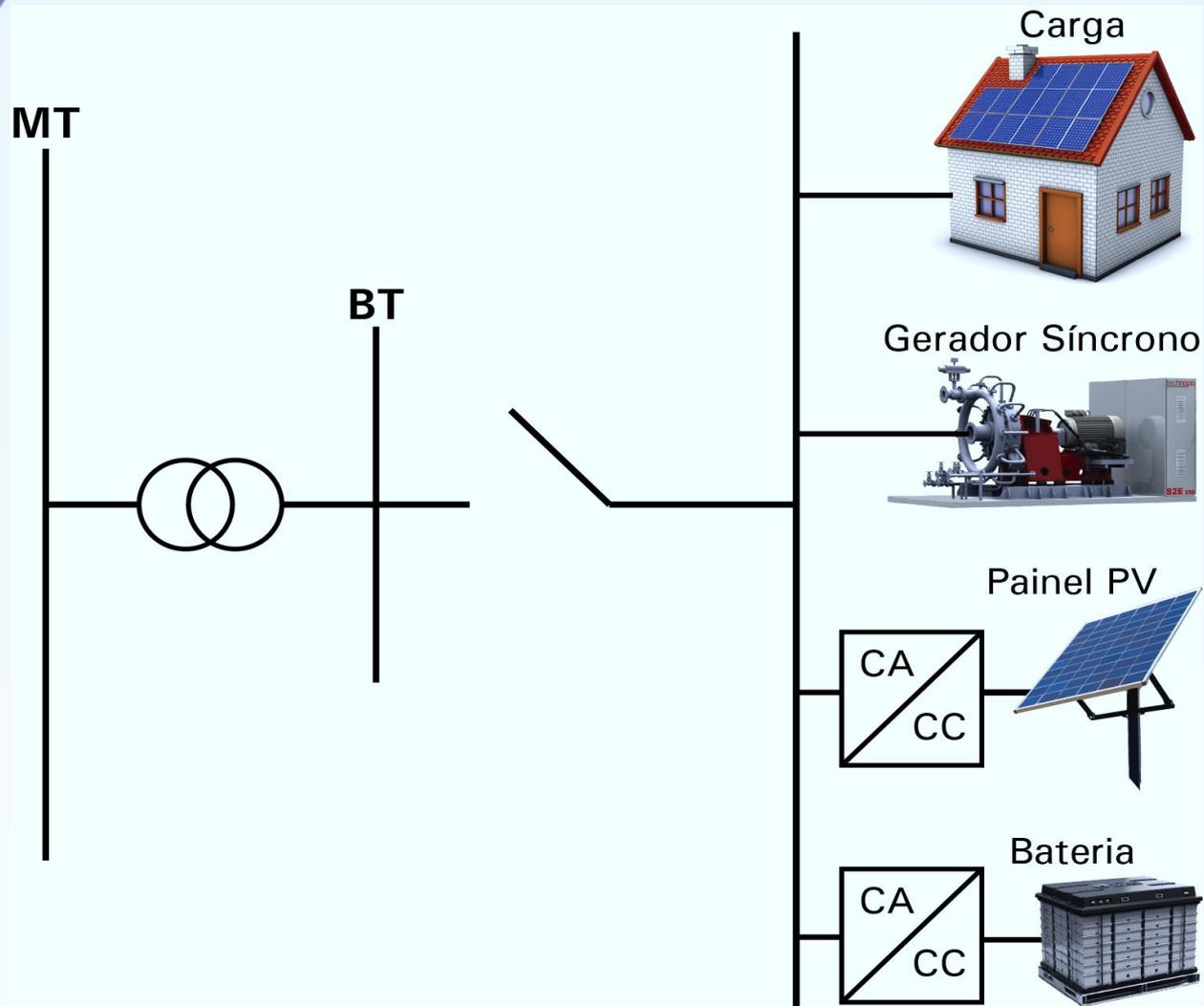
Composição da Microrrede

- A microrrede de CA utilizada como sistema-teste opera a 60 Hz e é composta por:
 - Uma **unidade geradora térmica convencional**, com gerador síncrono;
 - **Geração fotovoltaica** complementar;
 - Sistema de armazenamento em **baterias (BESS)**.



Universidade Federal
de Santa Catarina

Sistema-Teste





Condições de simulação

- Considera-se um período de operação de seis horas de um dia típico, desde as 16h até as 22h;
- Neste período, a geração fotovoltaica opera entre 16h e 18h;
- O BESS está sujeito a ciclos de carregamento e descarga ao longo do período de estudo.



Universidade Federal
de Santa Catarina

Geração Convencional (I)

- A geração convencional é composta por gerador síncrono acionado por turbina térmica;
 - Capacidade do gerador : 1000 kW;
 - Constante de inércia: $H = 2,0$ s
 - Estatismo: $R = 5\%$ (na base da máquina).



Geração Convencional (II)

- A turbina térmica é de ciclo simples, sem reaquecimento, cuja função de transferência é dada por:

$$F_T(s) = \frac{K_T}{1 + sT_T}$$

K_T Ganho da malha de controle de frequência

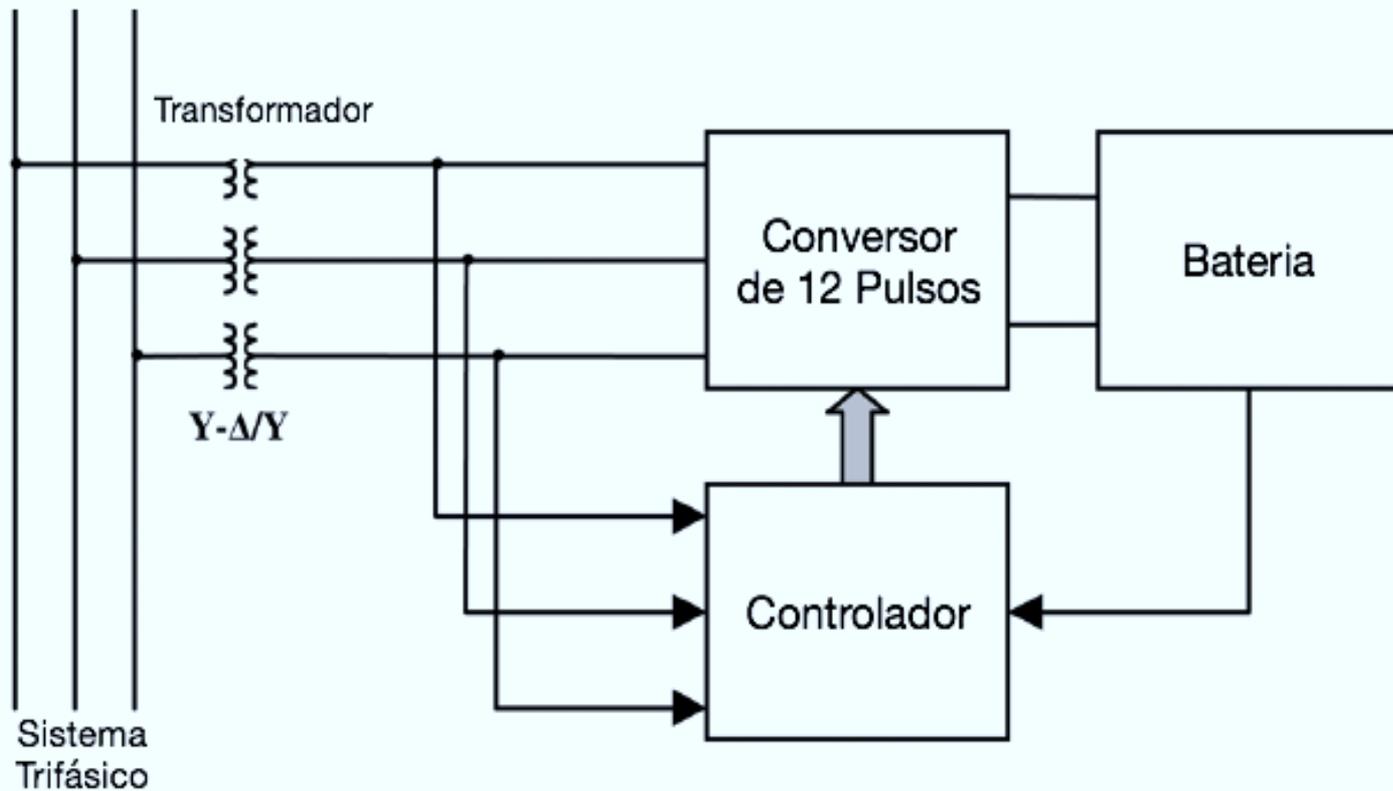
T_T Constante de tempo da turbina

- Valores dos parâmetros: $K_T = 1,0$ e $T_T = 10,0$ s.

Modelagem do BESS para Estudos de Controle de Frequência



Universidade Federal
de Santa Catarina



Modelagem do BESS para Estudos de Controle de Frequência



Universidade Federal
de Santa Catarina

- O controle de frequência não necessita do incremento de potência reativa, por isso é utilizada a Modulação P.

$$\Delta P_{bess} = \frac{K}{1 + sT_{bp}} \Delta Sinal$$

$$Q_{bess} = 0$$

T_{bp} Constante de tempo do medidor de frequência do BESS

$\Delta Sinal$ é proporcional ao desvio medido de frequência

K Ganho que depende de valores base de tensão e corrente e do ganho do transdutor

$$K = 1,0 \quad T_{bp} = 0,5 \text{ s}$$



Monitoração do Estado de Carga (SoC)

- O Estado de Carga do banco de baterias é monitorado a partir do nível de energia nela acumulada;
- Quando o BESS está **descarregando**:

$$SoC(t) = SoC(0) - \frac{1}{\eta_d E_B} E_B(t)$$

- Quando o BESS está **carregando**:

$$SoC(t) = SoC(0) + \frac{\eta_c}{E_B} E_B(t)$$

E_B Capacidade de Energia do BESS

η_d Rendimento da bateria no modo de descarregamento

η_c Rendimento da bateria no modo de carregamento



Universidade Federal
de Santa Catarina

Monitoração do Estado de Carga (SoC)

- A energia acumulada no banco de baterias é obtida mediante a integral da potência;
- Dados do banco de baterias:
 - *320 kW, 800kWh* (pode fornecer *320 kW* por *2,5* horas);
 - Rendimentos de carregamento e descarga:

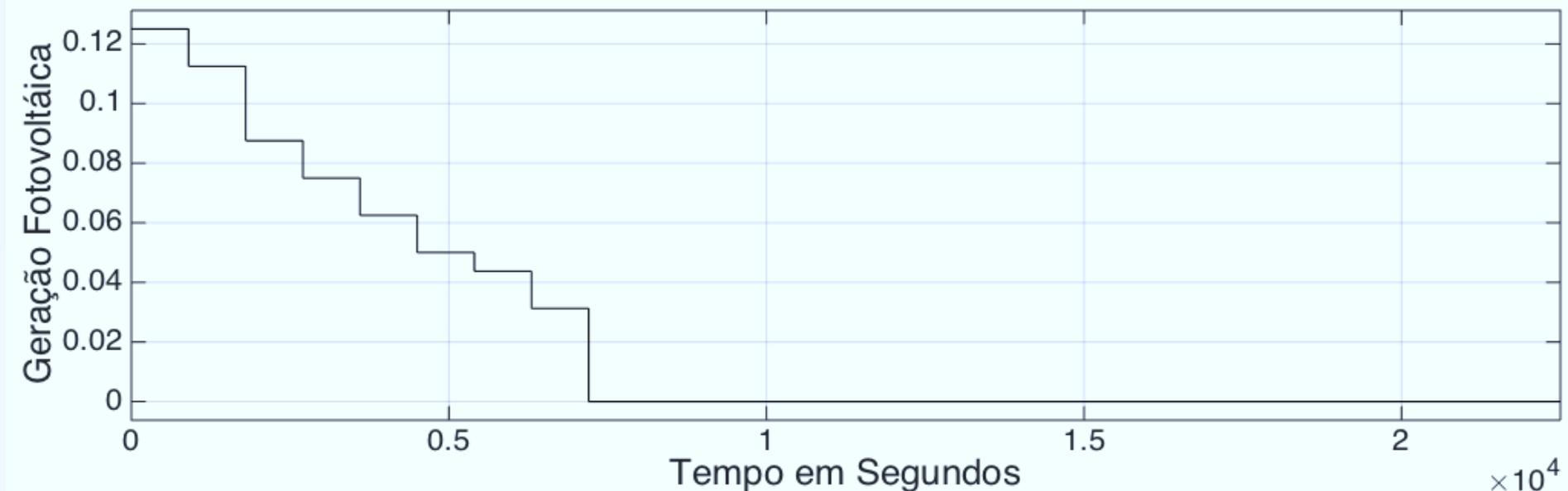
$$\eta_c = \eta_d = 0,90$$



Geração Fotovoltaica

Universidade Federal
de Santa Catarina

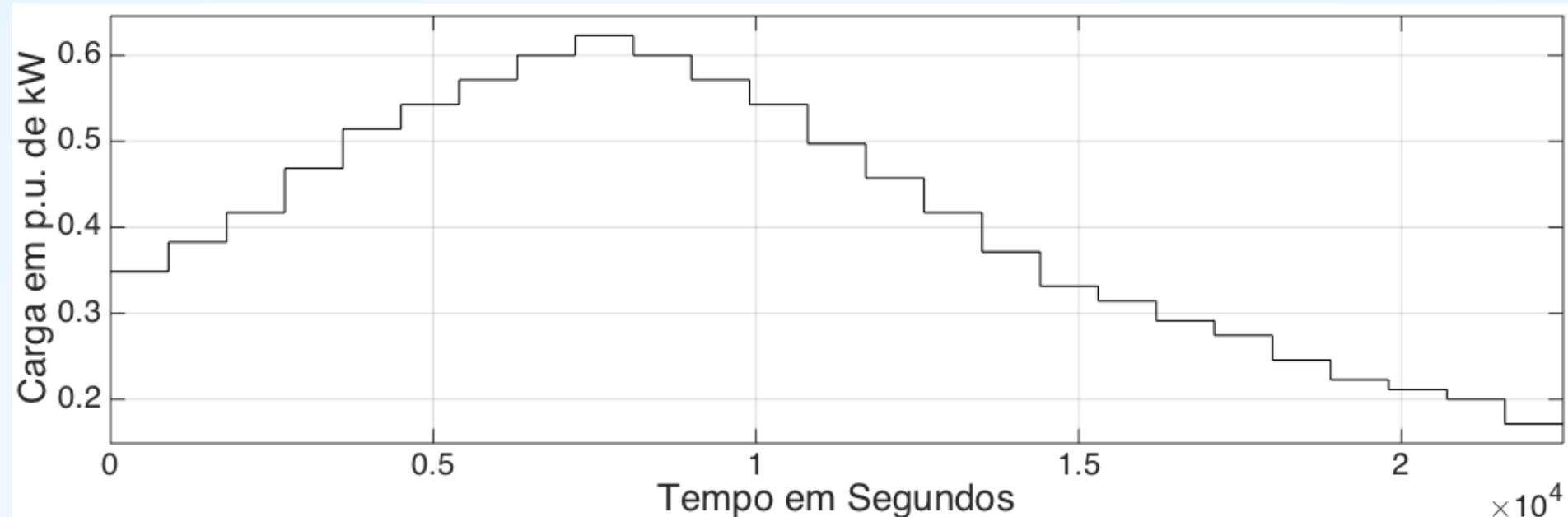
- Capacidade da geração PV = 280 kW;
- Considera-se que a geração PV opera sob o critério MPPT, e portanto é não controlável;
- Perfil da geração PV ($t=0$ s \Leftrightarrow 16h; $t=7200$ s \Leftrightarrow 18h):





Universidade Federal
de Santa Catarina

Perfil de Carga



Intervalo das 16h às 22h, engloba um pico de carga às 18h e um período de baixo consumo a partir das 20h30.

Controle Primário de Frequência em Modo Isolado



Universidade Federal
de Santa Catarina

- Visto que, variação de frequência é uma medida do balanço de potência ativa da microrrede, o propósito do controle primário é manter o equilíbrio entre a geração e a carga;

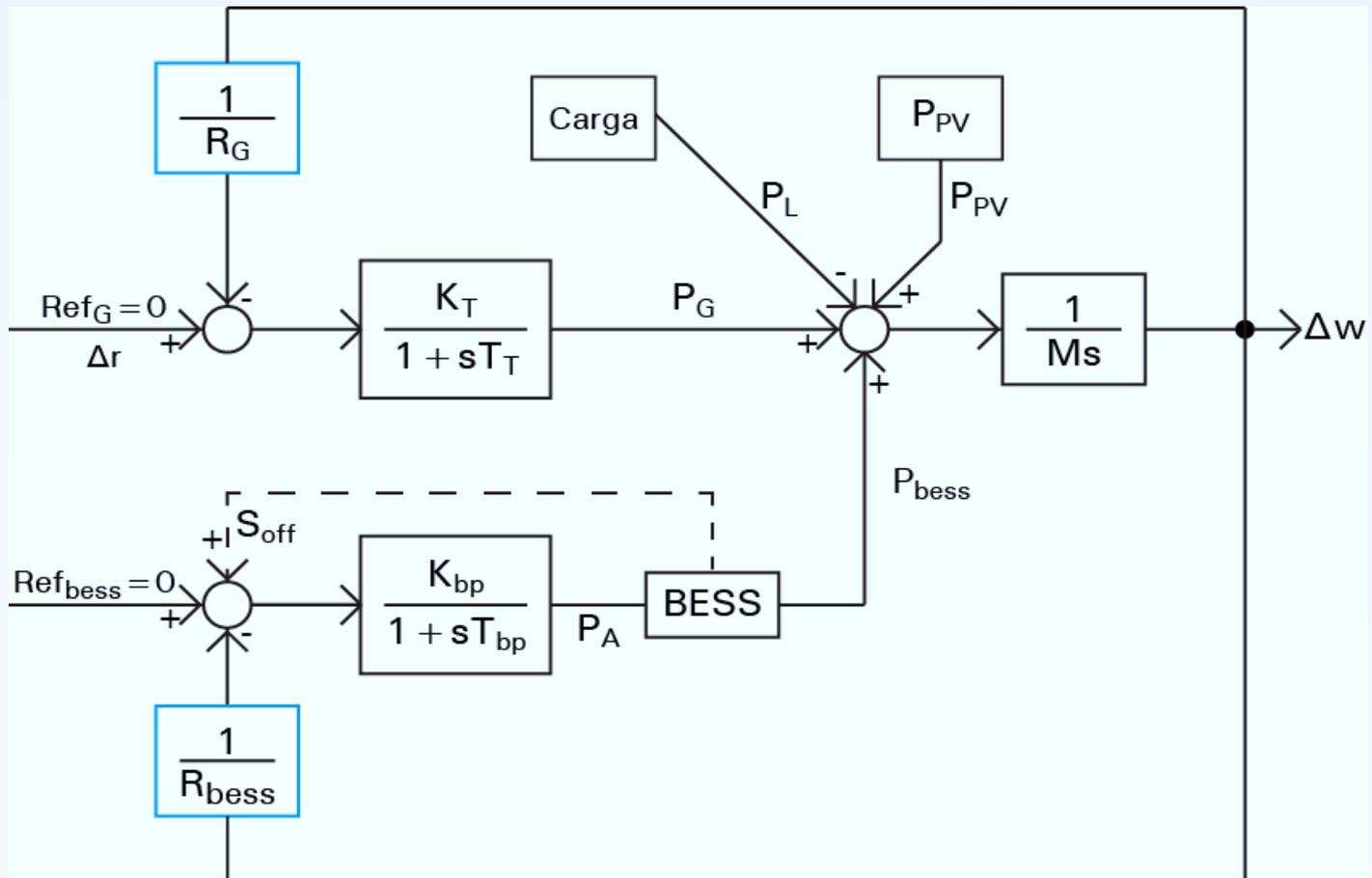
$$\Delta\omega = \frac{1}{Ms} (P_{G,pu} + P_{bess,pu} + P_{PV,pu} - P_{L,pu})$$

- Onde: $M = 2H$ (H é a constante de inércia);
- P_i são as potências da microrrede.

Controle Primário da Microrrede



Universidade Federal
de Santa Catarina

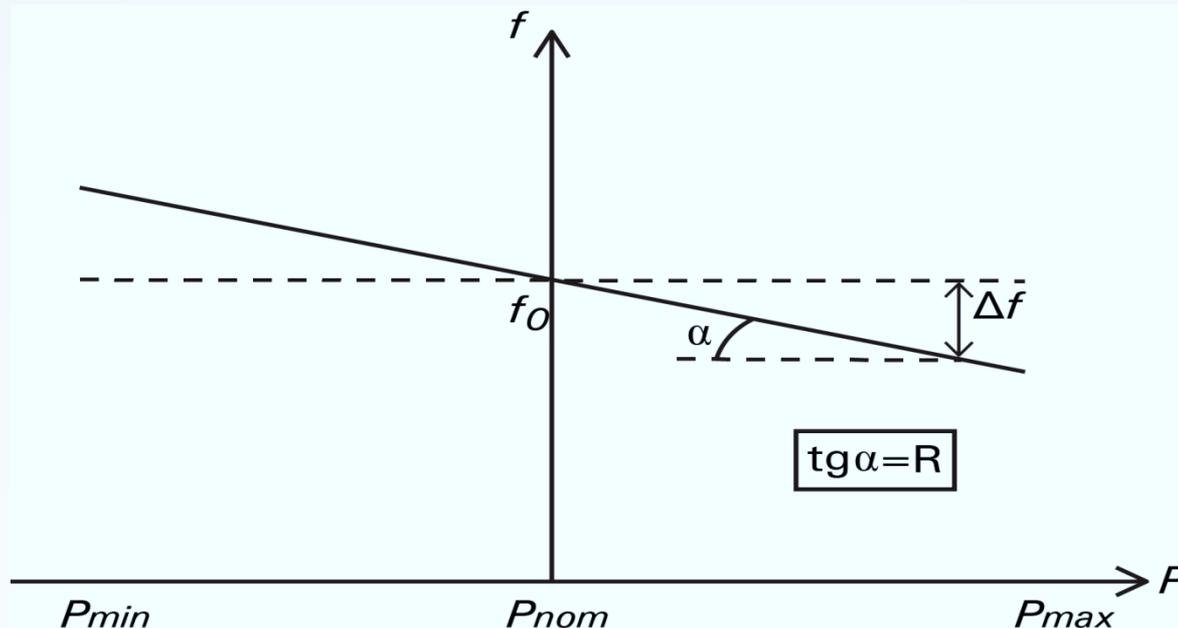




Universidade Federal
de Santa Catarina

Estatismo

Apenas o gerador convencional e o BESS exercem controle no sistema. A participação destes componentes no controle primário de frequência depende do ajuste dos respectivos estatismos.





Mudança de base dos Parâmetros

- A Potência base adotada para o sistema *p.u.* é dada por:

$$P_{sist} = P_G + P_{PV} + P_{Bess}$$

$$P_{sist} = 1600 \text{ kW}$$

- Consequentemente:

$$H_{sist} = H_{conv} \times \frac{P_{conv}}{P_{sist}}$$

$$H_{sist} = 2 \times \frac{1000}{1600} = 1,25$$



Universidade Federal
de Santa Catarina

Mudança de base dos Parâmetros

- Para os estatismos:

$$\frac{1}{R_{Bess}} = \frac{1}{0,05} \times \frac{320}{1600} = 4$$

$$\frac{1}{R_G} = \frac{1}{0,05} \times \frac{1000}{1600} = 12,5$$



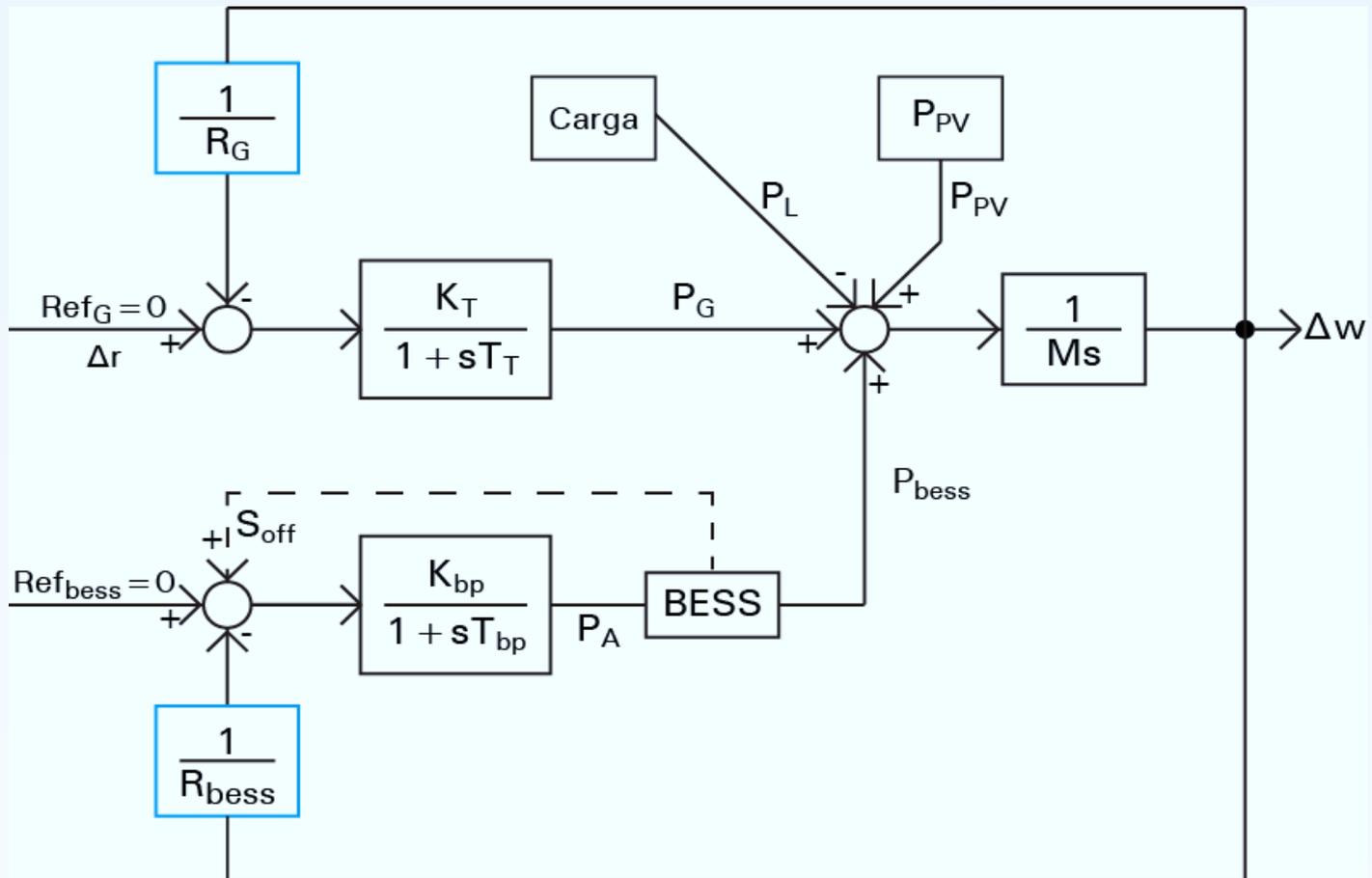
Universidade Federal
de Santa Catarina

Casos que Consideram Apenas a Atuação do Controle Primário

Controle Primário da Microrrede



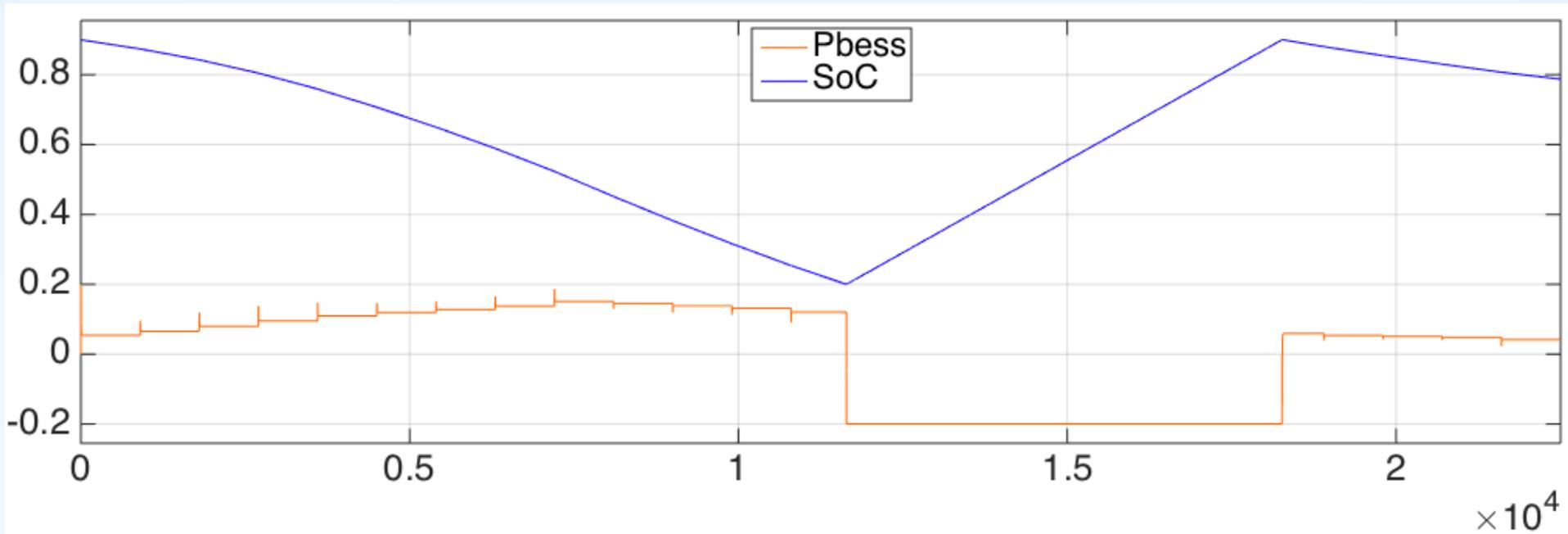
Universidade Federal
de Santa Catarina





Universidade Federal
de Santa Catarina

Caso com BESS

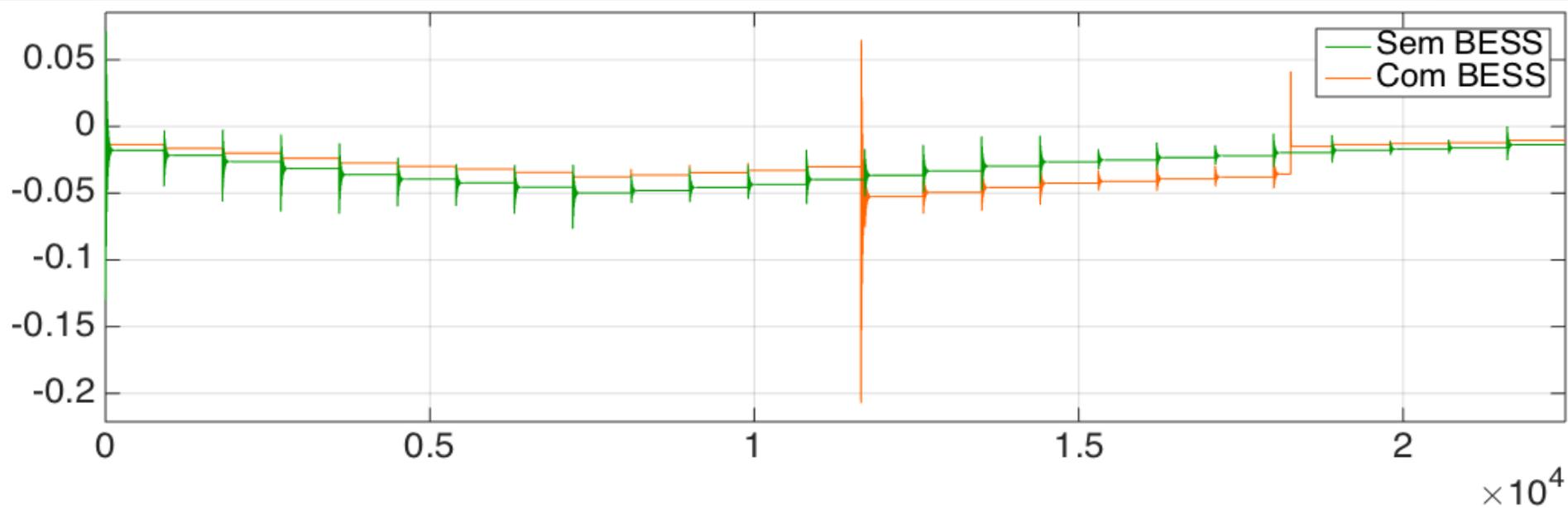


SoC em p.u. e Potência do BESS em p.u. de kW
x tempo em segundos



Com BESS x Sem BESS

Universidade Federal
de Santa Catarina

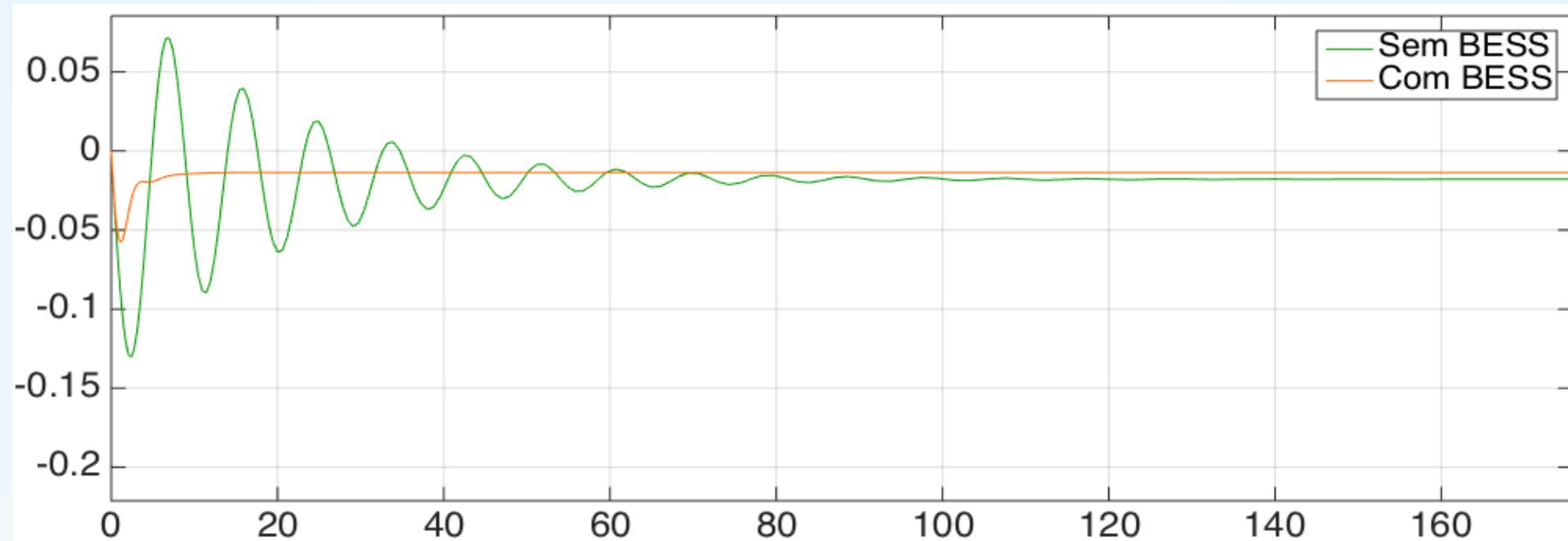


Desvio de frequência em p.u. de rad/s x tempo em segundos



Com BESS x Sem BESS

Universidade Federal
de Santa Catarina



Desvio de frequência em p.u. de rad/s x tempo em segundos

Controle Secundário de Frequência



Universidade Federal
de Santa Catarina

- A regulação primária estabelece o balanço de potência ativa, compensando um aumento (decremento) de carga com um aumento (decremento) de geração;
- Entretanto, o balanço de potência ocorre às custas de uma variação da frequência do sistema;
- Dessa forma, é necessário um controle adicional que restaure a frequência ao seu valor nominal.



Controle Secundário de Frequência

À semelhança de sistemas de potência de grande porte, o Controle Secundário é realizado através de um **controle integral**:

$$\Delta r = -\frac{K_{I,G}}{s} \Delta \omega$$

$$K_{I,G} = 0,04$$

$$\Delta r = -\frac{K_{I,bess}}{s} \Delta \omega$$

$$K_{I,bess} = 0,02$$

$K_{I,bess}$ Ganho do integrador do BESS

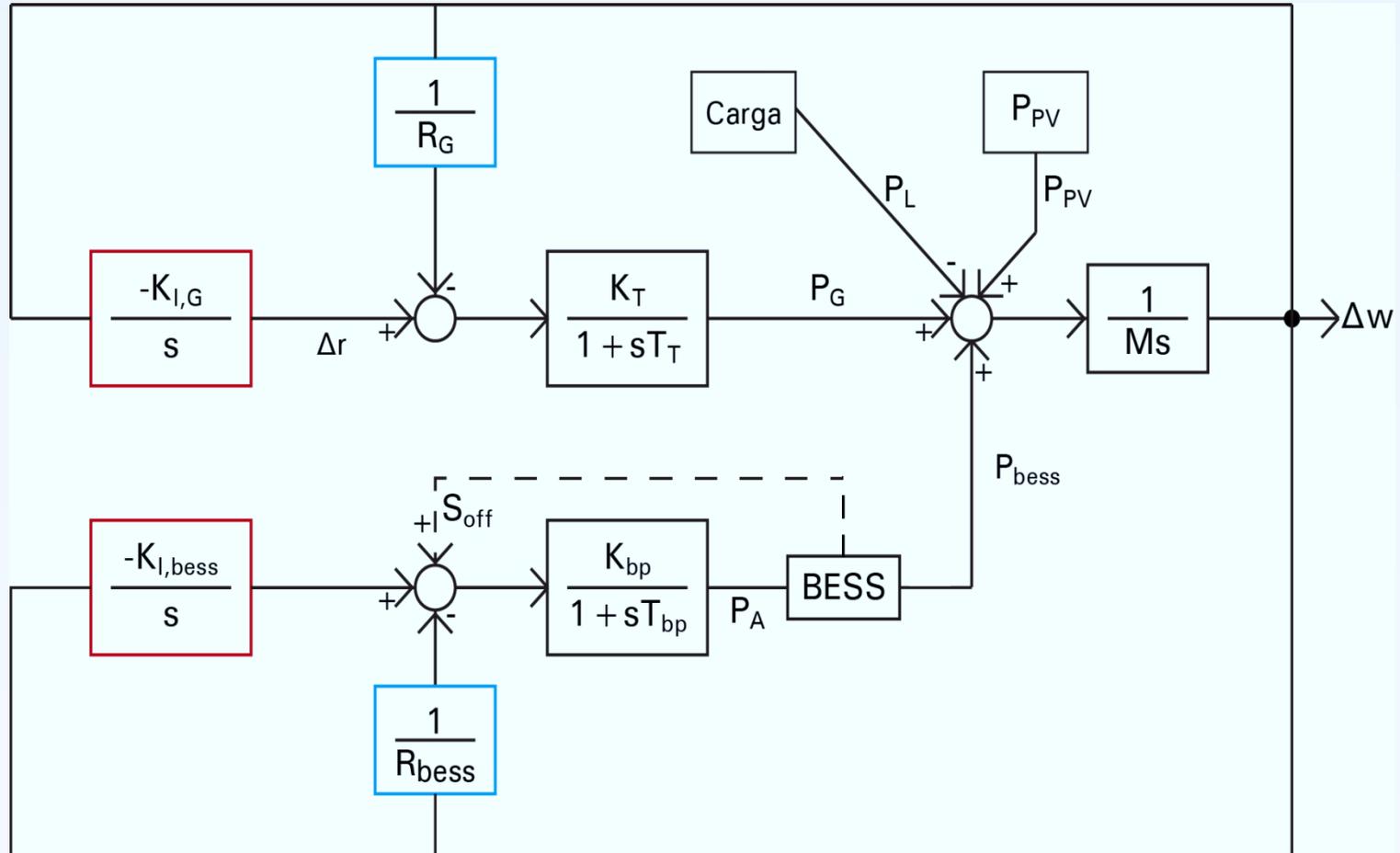
$K_{I,G}$ Ganho do integrador do gerador convencional

No caso particular de uma microrrede isolada, a entrada do controlador é o desvio de frequência resultante da atuação do controle primário.

Controle Secundário da Microrrede



Universidade Federal
de Santa Catarina





Universidade Federal
de Santa Catarina

Avaliação Quantitativa da Eficácia do Controle de Frequência

- Desvio de frequência momentâneo:

$$\Delta\omega$$

- Integral do valor absoluto do desvio de frequência, adotado nesta dissertação como uma métrica de eficácia do controle de frequência:

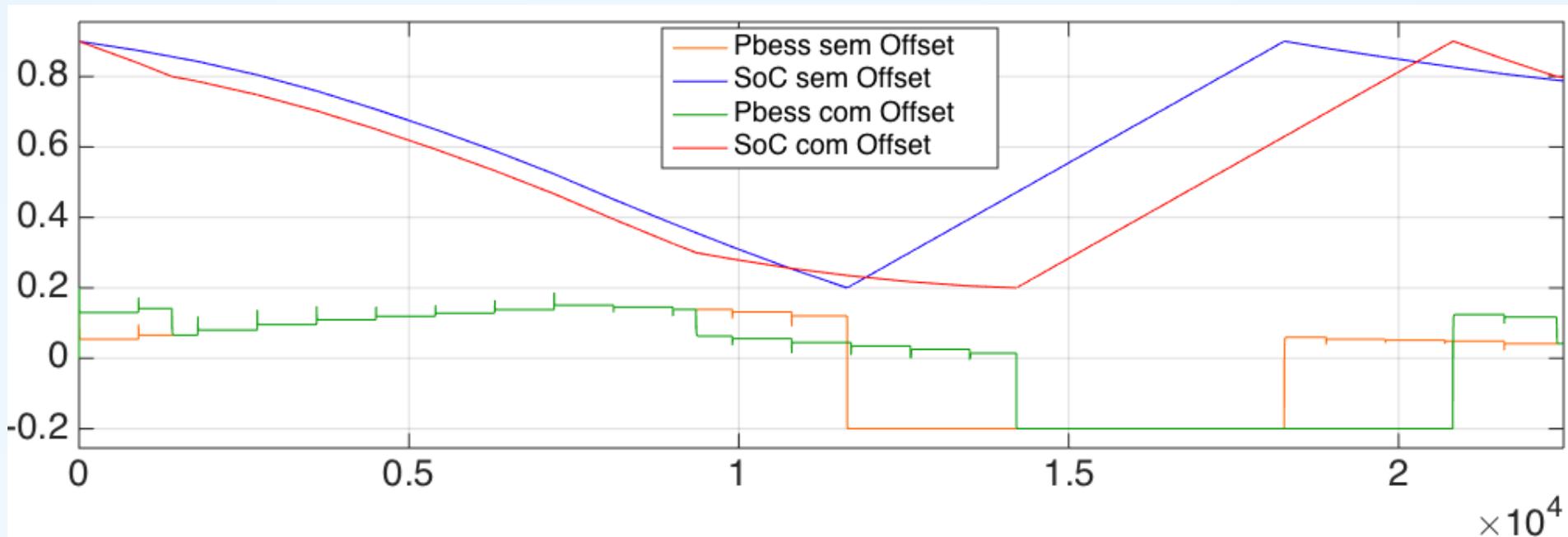
$$INT_{DF} = \int_0^T |\Delta\omega| dt$$

T é o tempo total da simulação



Com Offset x Sem Offset

Universidade Federal
de Santa Catarina



SoC em p.u. e Potência do BESS em p.u. de kW
x Tempo em Segundos



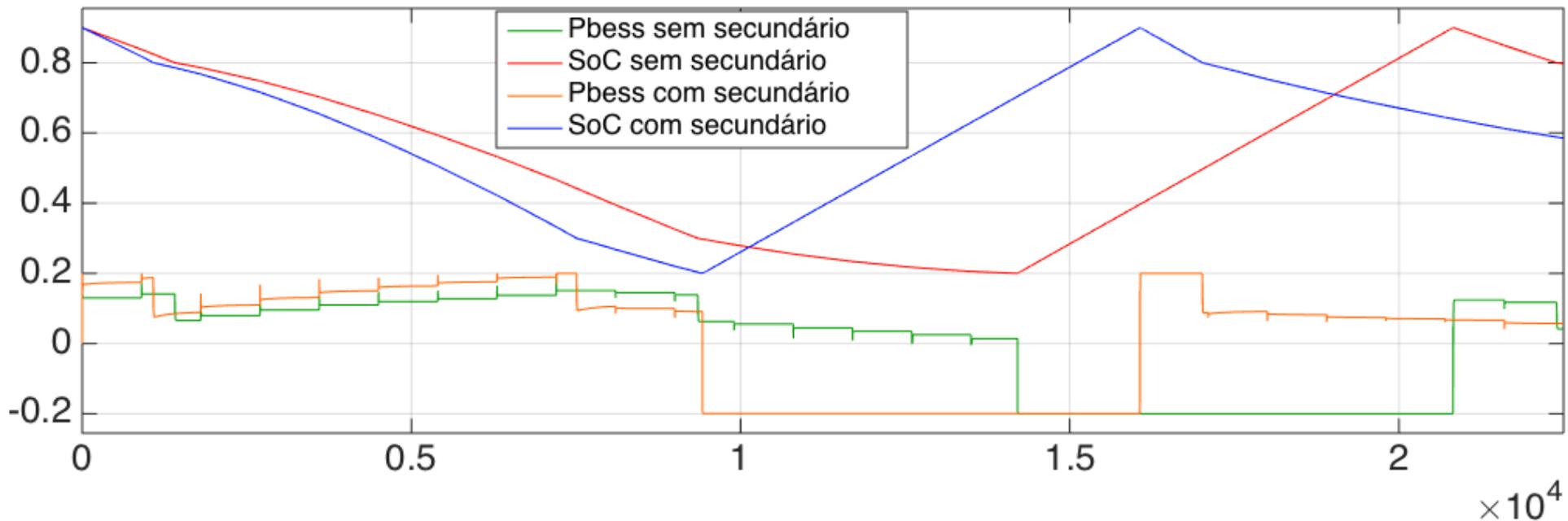
Universidade Federal
de Santa Catarina

Comparação entre os Casos que Consideram o Controle Primário e Secundário

Com Secundário x Sem Secundário



Universidade Federal
de Santa Catarina

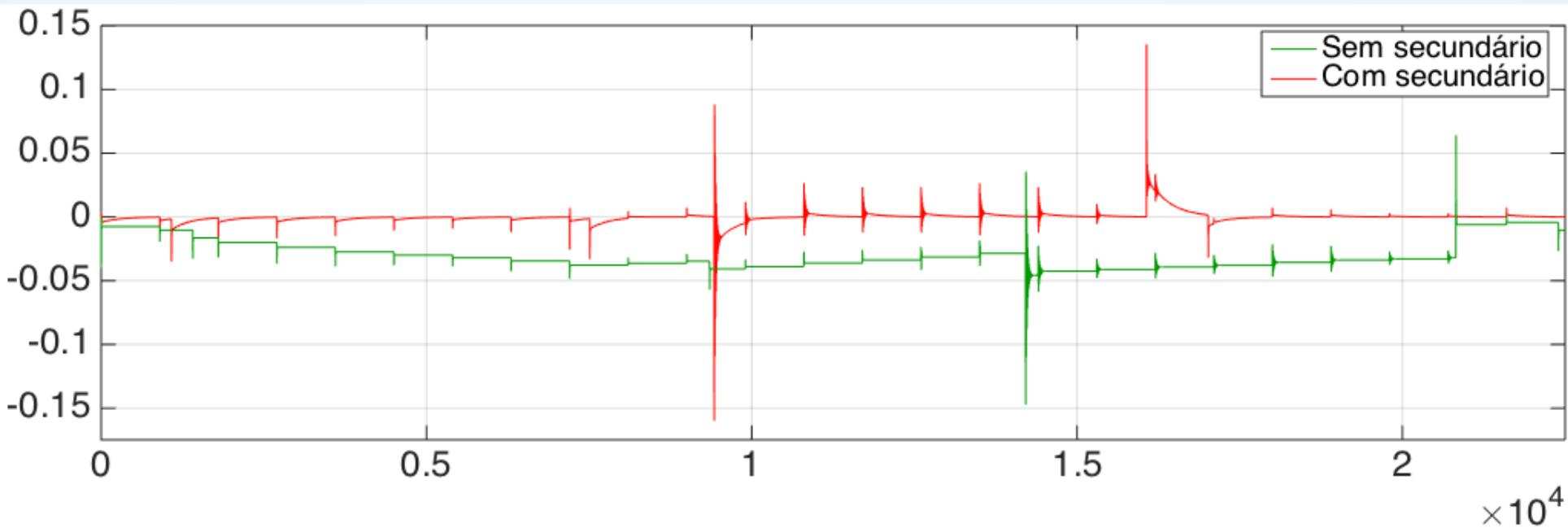


SoC em p.u. e Potência do BESS em p.u. de kW
x Tempo em Segundos

Com Secundário x Sem Secundário



Universidade Federal
de Santa Catarina

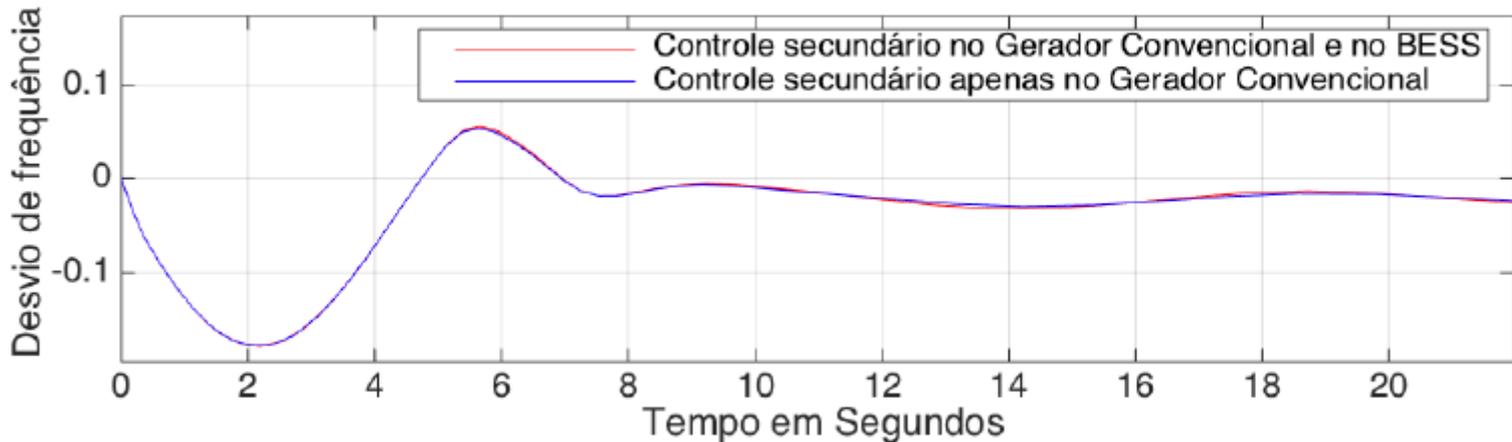


Desvio de frequência em p.u. de rad/s x tempo em segundos



Benefícios do Controle Secundário Aplicado na Geração Convencional e no BESS

- Resposta a simples degrau de carga de $0,5 pu$ com e sem a participação do BESS no Contr. Secundário:



- Observa-se que não ha melhorias significativas de comportamento da frequência propiciadas pela adição do sinal de controle secundário no BESS.

Eficácia do Controle de Frequência



Universidade Federal
de Santa Catarina

Caso	INT_{DF}
1 - Apenas Geração Convencional	734,7
2 - Adição de PV	692
3 - Adição do BESS	674,8
4 - Adição do BESS e PV	674,8
5 - Com Controle Secundário	40,2



Universidade Federal
de Santa Catarina

Desconexão Abrupta da Rede de Média Tensão



Desconexão Abrupta

Universidade Federal
de Santa Catarina

Somatório de potência da microrrede no modo interligado:

$$P_{MT,pu} + P_{G,pu} + P_{bess,pu} + P_{PV,pu} = P_{L,pu}$$

Somatório de potência da microrrede no modo isolado:

$$P_{G,pu} + P_{bess,pu} + P_{PV,pu} = P_{L,pu}$$

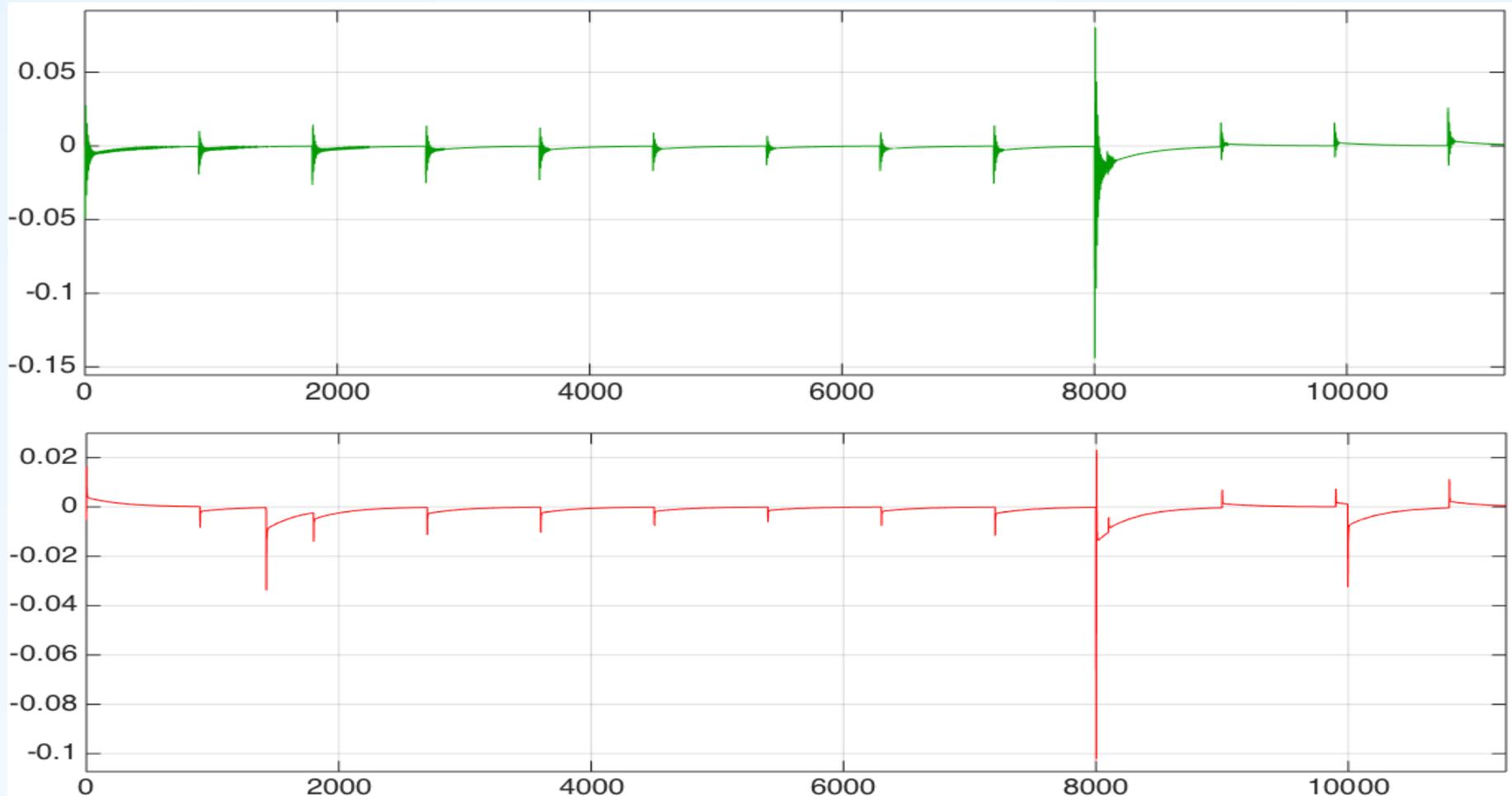
$P_{MT,pu}$ é a potência injetada pelo sistema de distribuição



Universidade Federal
de Santa Catarina

Desconexão Abrupta Sem BESS x Com BESS

- Desconexão abrupta da rede de média tensão aos 8 mil segundos.



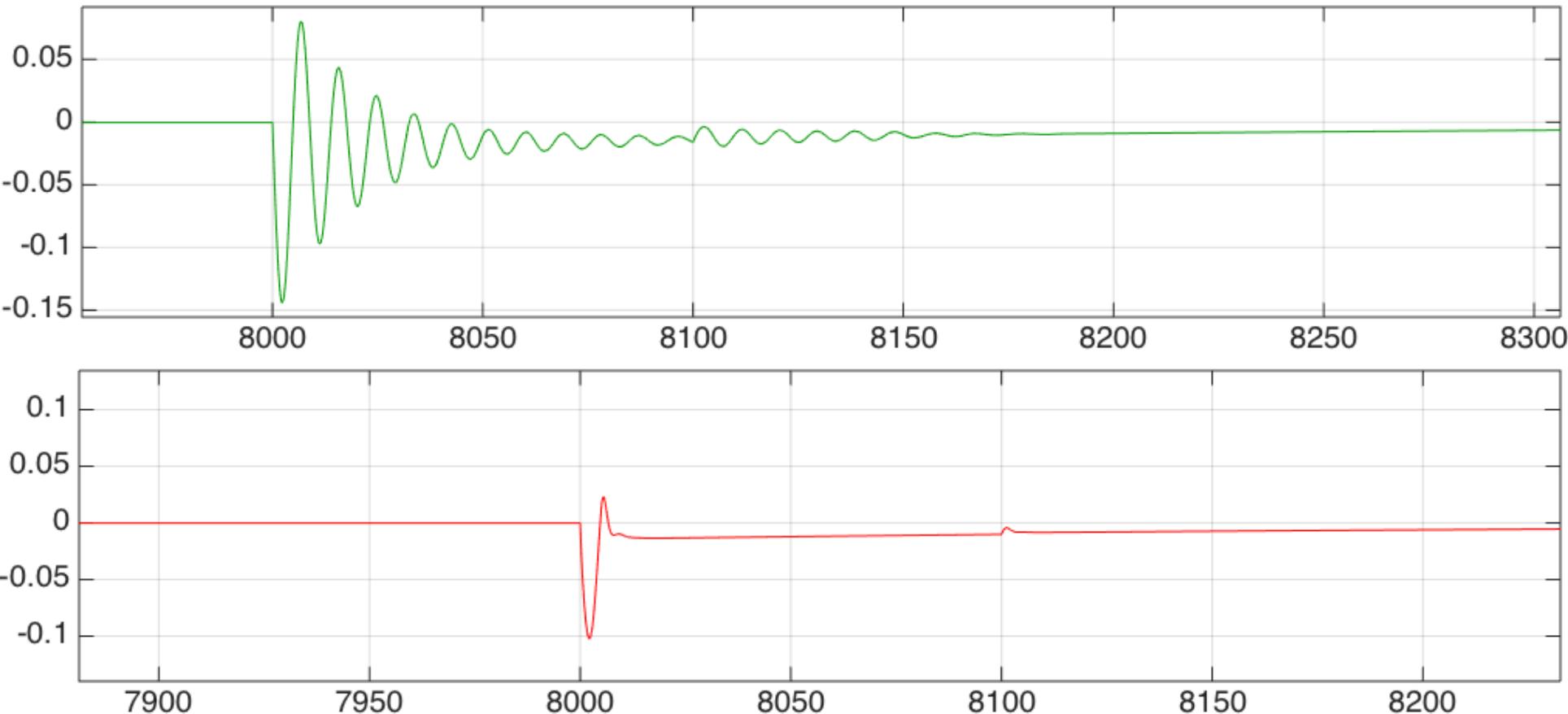
Desvio de frequência em p.u. de rad/s x tempo em segundos



Universidade Federal
de Santa Catarina

Desconexão Abrupta Sem BESS x Com BESS

- Desconexão abrupta da rede de média tensão aos 8 mil segundos.

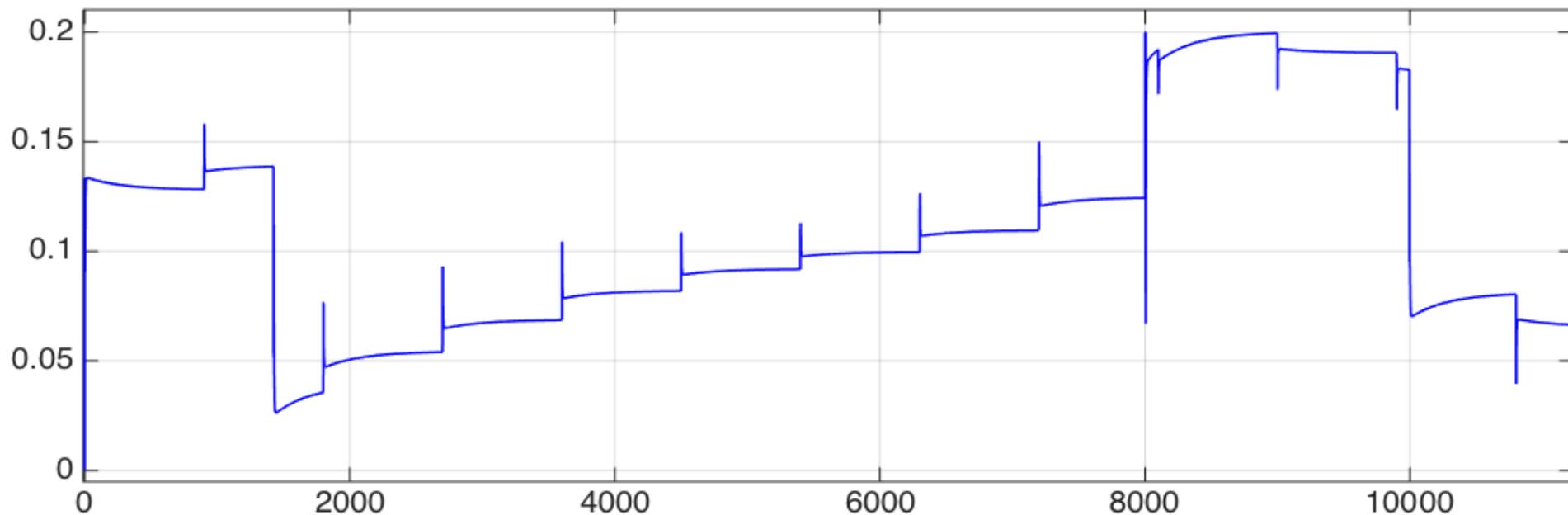


Desvio de frequência em p.u. de rad/s x tempo em segundos



Universidade Federal
de Santa Catarina

Com BESS x Sem BESS



Potência do BESS em p.u. de kW
x Tempo em Segundos



Conclusão

- Os resultados obtidos mostram que a incorporação do BESS à microrrede faz com que desvios de frequência resultantes de variações de carga sejam reduzidos consideravelmente, comprovando a eficiência desta forma de armazenamento de energia no cumprimento do objetivo proposto;
- O mecanismo de monitoração e controle do SoC do BESS mostrou-se eficaz, evitando que o estado de carga seja levado a níveis extremos, o que na prática poderia resultar em danos irreversíveis às baterias;



Universidade Federal
de Santa Catarina

Conclusão

- A resposta rápida do BESS se mostra eficaz quando grandes perturbações ocorrem. A presença do BESS é capaz de reduzir consideravelmente as excursões de frequência nos instantes imediatamente posteriores à perturbação, garantindo assim um comportamento mais estável da frequência da microrrede.