Gestão:

Reunião de Acompanhamento e Avaliação - RAA 2026

# OPERAÇÃO E CONTROLE DE SISTEMAS HÍBRIDOS COMO PLANTAS DE GERAÇÃO VIRTUAIS

Antero, G. S.[1]; Dias, R. F. S.[2]; Glória, R. V.; Rotunno, R. E.; van Emmerik, E. L.; Tuxi, T. M.
[1]Bolsista do PRH 17/UFRJ, Doutorado em Engenharia Elétrica, Rio de Janeiro – RJ. E-mail: antero@lafae.ufrj.br
[2]Docente do Programa de Engenharia Elétrica da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro – RJ. E-mail: dias@lafae.ufrj.br

## Introdução

A **descarbonização** do setor de óleo e gás passa pela **integração de renováveis** às instalações que geram a própria energia com turbinas a gás ou óleo, que causam emissão de $CO_2$. A integração reduz emissões, mas insere variabilidade. Sem coordenação, obriga a manter geradores síncronos adicionais, limitando a mitigação de $CO_2$. Plantas híbridas, coordenadas como plantas de geração virtuais (VPPs), reúnem recursos um mesmo ponto de coneção (POI) e respondem à rede como agente despachável, , apto a seguir referências e prestar serviços ancilares.

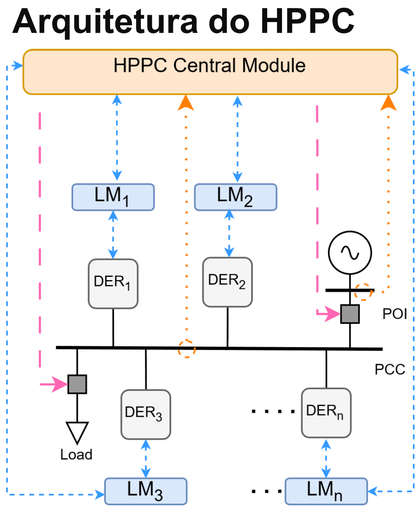
## Objetivo

Desenvolver um **controlador de planta híbrida** (HPPC) capaz de **coordenar os recursos internos** da planta para garantir a operação contínua e, ao mesmo tempo, fornecer serviços ou seguir as referências solicitadas pelo operador:

- Seguir a referência de potência ativa no POI (0 MW);
- Preservar o estado de carga (SOC) da bateria;
- Prover suporte de tensão como serviço ancilar.

## Métodos

### Arquitetura do HPPC



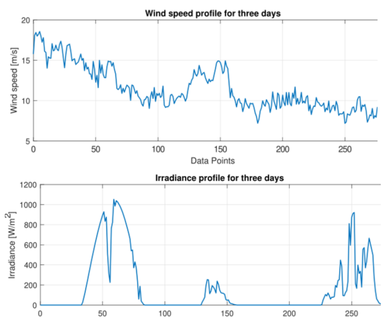

Módulo central: controle da potência no POI, controle secundário de frequência e tensão e coordenação dos geradores pelo SOC.

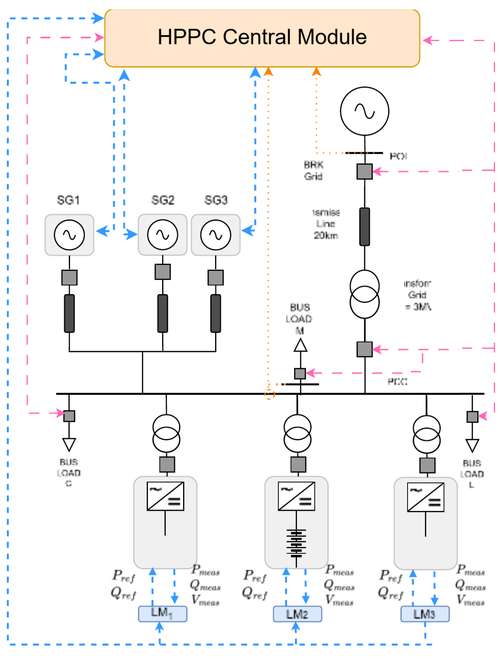
Módulos locais (LM): droop e referências de P e Q para cada recurso. Cada recurso apenas rastreia referências, sendo a lógica agnóstica ao controle interno das fontes.

### Estudo de caso:

### Planta híbrida

| Fonte | S (MVA) | FP |
|---|---|---|
| SG1 | 11,96 | 0,85 |
| SG2 | 5,90 | 0,85 |
| SG3 | 5,90 | 0,85 |
| BESS | 8,80 | 1,00 |
| Eólica | 11,40 | 0,95 |
| Fotovoltaica | 9,62 | 1,00 |




Planta: refinaria com introdução de renováveis e baterias.

Rede: 50 Hz, 6,6 kV; ao menos 1 SG em operação como referência de tensão e frequência. Os recursos com inversor são modelados como VSC médio com filtro LC.

Perfis: 650 s simul. equivale a ≈2,5 d de vento e irradiância

### Validação em tempo real (CHIL)

O módulo central roda embarcado e troca medições e referências com a planta simulada a cada 1 ms:

**Simul. tempo real planta EMT e LMs** ⟷ **Ethernet Modbus TCP/IP** ⟷ **Raspberry Pi módulo central**

## Base teórica

### Potência ativa no POI

$$P_{\mathrm{BESS,ref}} = \frac{\Delta\omega}{\mathrm{Droop}_f} + \mathrm{Sec}_{\mathrm{ref},f} + \delta_{\mathrm{POI}}$$

$$\mathrm{Sec}_{\mathrm{ref},f} = \frac{\Delta\omega}{\tau_i\, s}$$

$$\delta_{\mathrm{POI}} = \frac{P_{\mathrm{POI,ref}} - P_{\mathrm{POI,meas}}}{\tau_{\mathrm{POI}}\, s}$$

### Potência reativa de cada recurso

$$Q_{\mathrm{ref},i} = \frac{V_{\mathrm{ref},i} - V_i}{\mathrm{Droop}_v} + \mathrm{Sec}_{\mathrm{ref},v}$$

$$\mathrm{Sec}_{\mathrm{ref},v} = \frac{V_{\mathrm{ref},j} - V_{\mathrm{meas},j}}{\tau_v\, s}$$

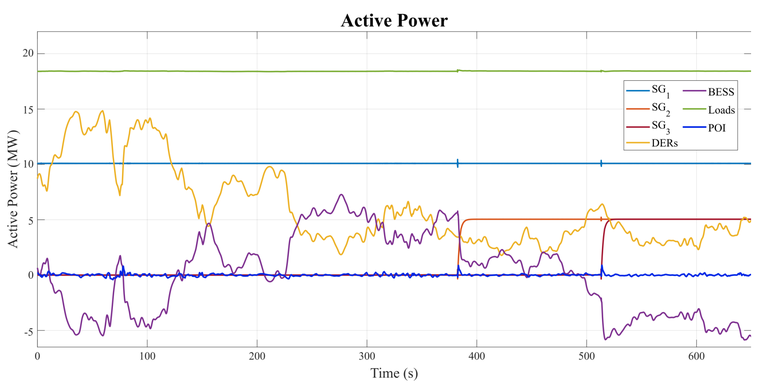
Cada recurso ajusta Q pelo desvio local de tensão, de modo que o esforço reativo é repartido segundo a margem disponível em cada unidade, sem coordenação explícita. O termo secundário elimina o erro de regime na barra controlada, que é o POI quando a planta opera conectada.

onde:

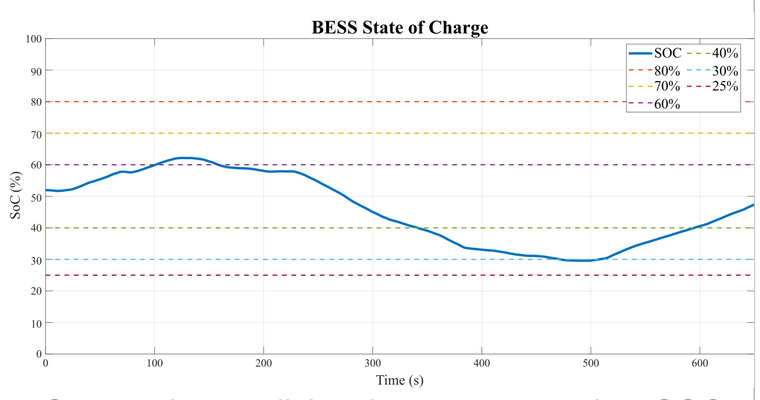
$\Delta\omega$ é o desvio de frequência; $\mathrm{Droop}_f$ e $\mathrm{Droop}_v$, os ganhos de droop de frequência e tensão; $\tau_i$, $\tau_{POI}$ e $\tau_v$, as ctes de tempo dos laços secundários e da malha do POI; $P_{POI,ref}$ e $P_{POI,meas}$, referência e medida de potência ativa no POI; $V_{ref,i}$ e $V_i$, referência e medida de tensão no recurso i; $V_{ref,j}$ e $V_{meas,j}$, idem na barra controlada j.

## Resultados

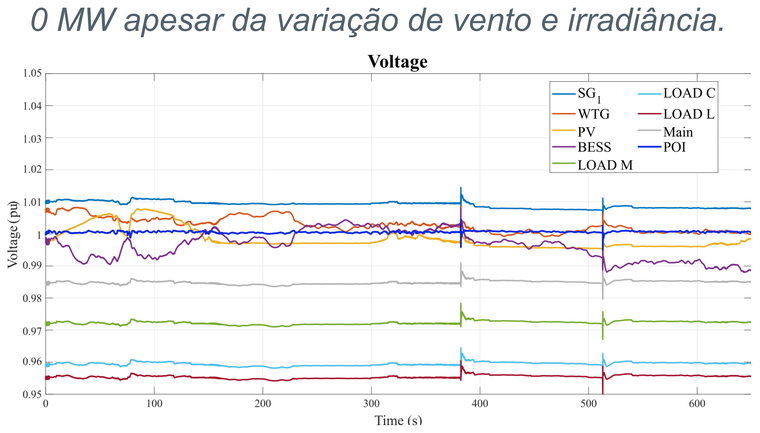
### Coordenação de recursos baseado em SOC e controle do despacho de potência




*O intercâmbio ativo no POI permanece próximo de 0 MW apesar da variação de vento e irradiância.*




*Os geradores adicionais partem quando o SOC cruza 40% e 30%, reduzindo a descarga do BESS.*



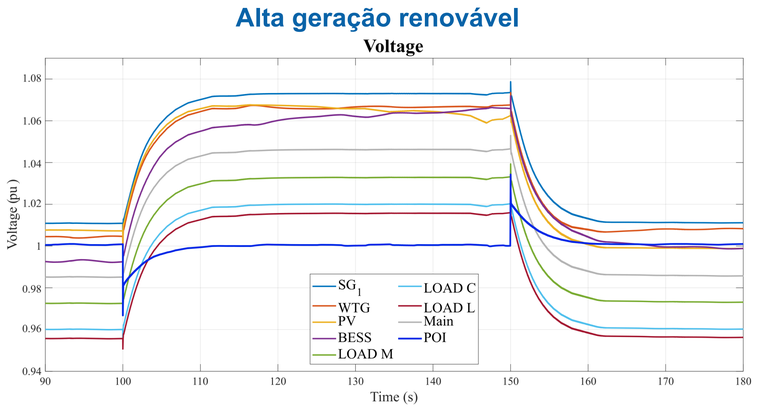

*As tensões ficam entre 0,95 e 1,05 p.u., inclusive na sincronização dos geradores.*

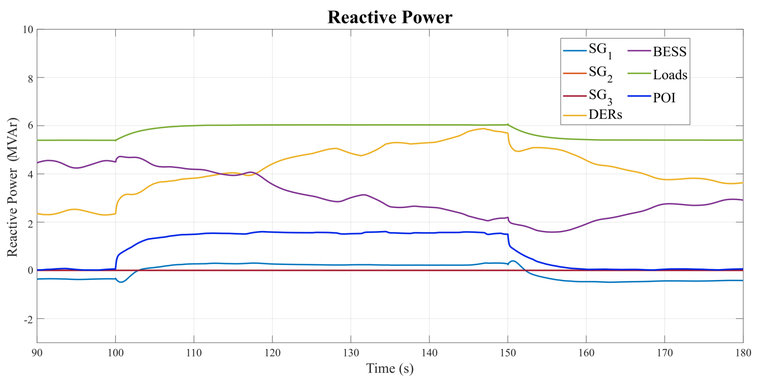
| SOC do BESS | Ação do controlador |
|---|---|
| < 40% | Parte o 1º gerador adicional |
| < 30% | Parte o 2º gerador adicional |
| > 60% | Desliga o 1º gerador adicional |
| > 70% | Desliga o 2º gerador adicional |

Renováveis em MPPT; geradores na potência nominal. BESS absorve desequilíbrio e aciona fonte antes do SOC crítico.

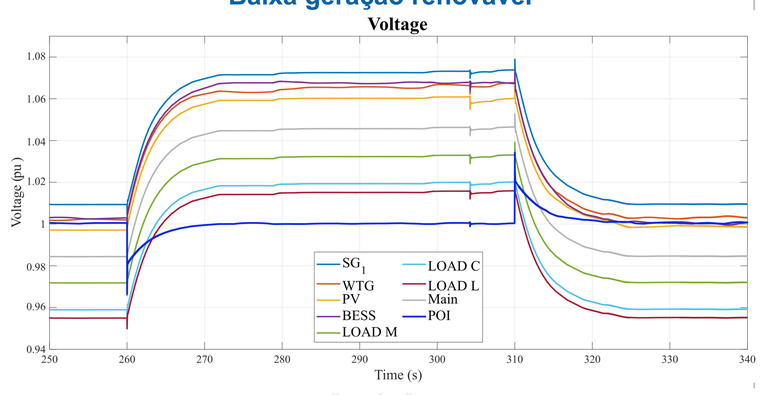
### Suporte de tensão para a rede

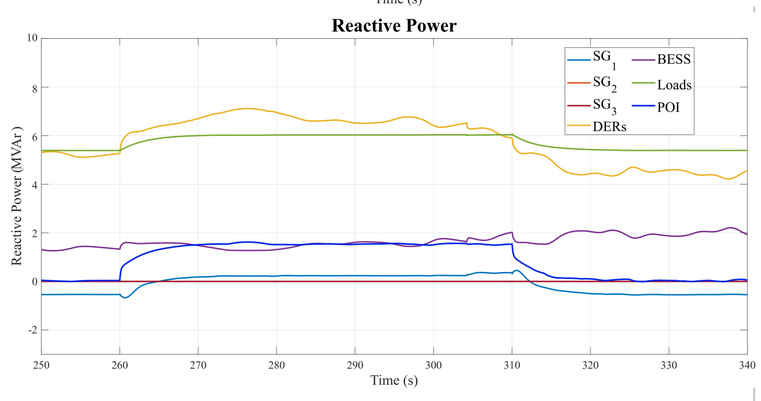
#### Alta geração renovável




#### Baixa geração renovável




Indutor de 1,5 MVAr reduz a tensão no POI em 3%, controle secundário restaura a 1 p.u. em <10 s. Renováveis dão resposta inicial de potência reativa e o balanço é completado pelo BESS.

Com menor geração renovável, o BESS fornece mais potência ativa e os demais recursos dispõem de maior margem para Q, sendo a resposta de tensão equivalente.

## Conclusões

- O controlador manteve o intercâmbio de potência ativa no POI próximo de 0 MW ao longo de todo o perfil de vento e irradiância
- A coordenação pelo SOC acionou e desligou os geradores adicionais nos limiares definidos, mantendo o BESS dentro da faixa operacional.
- Após a conexão do indutor, a tensão no POI voltou a 1 p.u. em menos de 10 s nos dois cenários, sem afetar o despacho ativo.
- Os ensaios em CHIL indicam que o módulo central pode ser executado em tempo real em hardware embarcado de baixo custo.

## Agradecimentos

Os autores agradecem pelo apoio financeiro do Programa de Formação de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - PRH-ANP, gerido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil. Processo nº 2025/02818-8.