

CÉLULA A COMBUSTÍVEL E BATERIA PARA A GARANTIA DE DESPACHO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA

1. PROBLEMA E MOTIVAÇÃO

- 

Busca pela descarbonização do setor energético.
- 

Integração crescente de fontes renováveis.
- 

Necessidade de armazenamento eficiente para garantir estabilidade da rede.
- 

Células a combustível apresentam resposta dinâmica lenta, não adaptando-se a variações rápidas de carga.
- 

OBJETIVO:
 Otimizar o compartilhamento de potência entre bateria e célula a combustível para garantir o atendimento da demanda elétrica com eficiência e confiabilidade.

2. ARQUITETURA DO SISTEMA HÍBRIDO



3. METODOLOGIA PROPOSTA



4. MODELAGEM DO SISTEMA

- BATERIA**
 - Modelo baseado no estado de carga (SOC)
 - Limites de SOC: 20% a 80%
 - Eficiência de carga: 95%
 - Eficiência de descarga: 94%
- CÉLULA A COMBUSTÍVEL (FC)**
 - Limite máximo de potência
 - Operação estável e proteção contra flutuações bruscas
 - Preservação da vida útil

FUNÇÃO CUSTO QUADRÁTICA (J)
 Minimiza esforço das fontes e mantém reserva de energia da bateria.

$$J = \omega_{fc} \sum \left(\frac{P_{fc}(t)}{P_{fc,max}} \right)^2 + \omega_{bat} \sum \left(\frac{P_{bat}(t)}{P_{bat,max}} \right)^2 + \omega_{soc} \sum (SOC(t) - SOC_{ref})^2$$

ω : pesos que equilibram as prioridades do sistema.

5. CENÁRIOS ANALISADOS

Análise do impacto da capacidade de armazenamento na operação do sistema híbrido.

CENÁRIO	CAPACIDADE DA BATERIA
Cenário 1	0,1 p.u.
Cenário 2	0,5 p.u.
Cenário 3	0,9 p.u.

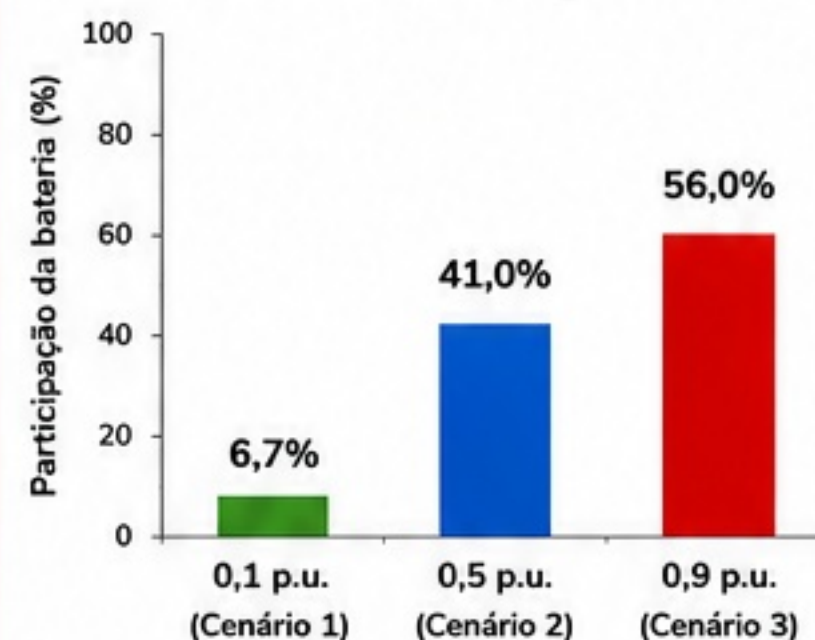
Objetivo: avaliar a influência da capacidade da bateria na suavização da carga e na redução do déficit de atendimento.

INDICADORES AVALIADOS

- Energia total demandada e atendida
- Déficit de potência
- Participação da bateria e da célula a combustível
- Estado de carga (SOC) da bateria
- Desvio padrão da potência da FC

6. PARTICIPAÇÃO DAS FONTES

Participação da bateria no atendimento da variabilidade da carga.



A participação da bateria aumenta conforme sua capacidade, tornando o sistema mais flexível e eficiente.

7. PRINCIPAIS RESULTADOS

- 

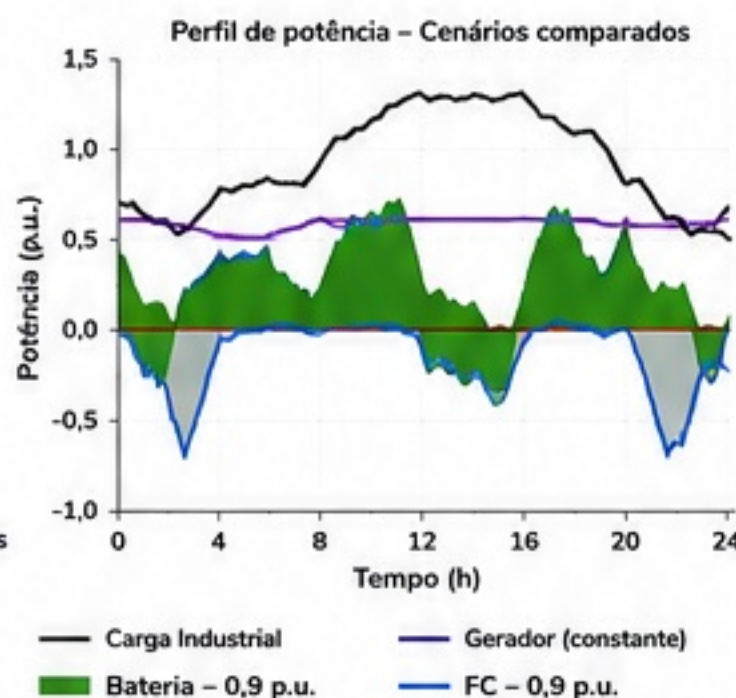
Atendimento da demanda:

 - 97,2% (0,1 p.u.)
 - 100% (0,5 p.u.)
 - 100% (0,9 p.u.)
- 

Aumento da capacidade da bateria permite maior absorção da variabilidade da carga.
- 

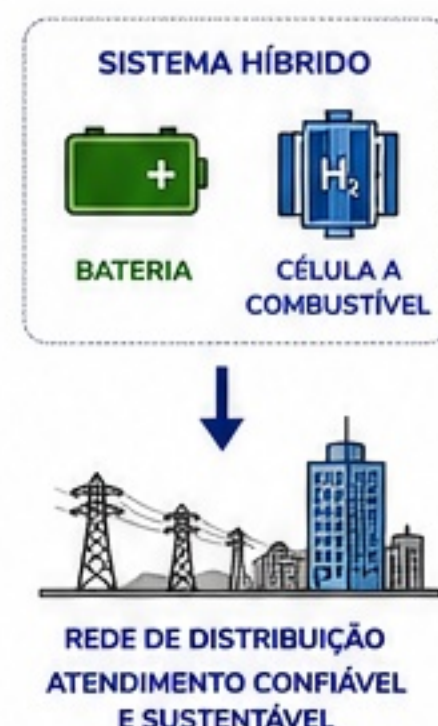
Menor solicitação da célula a combustível, reduzindo seu envelhecimento.
- 

Eliminação do déficit energético nos cenários 2 e 3.



8. CONCLUSÕES

- Estratégia baseada no fator α mostrou-se robusta e eficaz.
- Baterias de maior capacidade aumentam significativamente a flexibilidade operacional.
- Redução das flutuações de potência na célula a combustível, protegendo sua vida útil.
- Otimização prioriza a bateria por ser mais barata, madura e de resposta rápida.
- Atendimento integral da demanda elétrica em cenários com maior capacidade.
- Sistemas híbridos são elemento central para a garantia de despacho em cargas variáveis.



PREPRINTS
 O manuscrito não é um preprint.

FINANCIAMENTO
 CNPq processos nº 301810/2023-0, 405350/2022-8, 406662/2022-3 e 460014/2025-0 e CAPES.

CONFLITO DE INTERESSES
 Os autores declaram não haver conflito de interesses.

DISPONIBILIDADE DE DADOS
 Todos os dados que dão suporte aos resultados deste estudo estão incluídos no artigo.

LICENÇA
 Este trabalho está licenciado sob Creative Commons Attribution 4.0 (CC BY 4.0).

FUEL CELL AND BATTERY FOR GUARANTEED DISPATCH IN POWER DISTRIBUTION SYSTEMS

1. PROBLEM AND MOTIVATION



Decarbonization of the energy sector



Growing integration of renewable energy sources



Need for efficient energy storage systems



Fuel cells present slow dynamic response to rapid load variations



Objective: optimize power sharing between a battery and a fuel cell to guarantee reliable and efficient electricity demand supply.

2. HYBRID SYSTEM ARCHITECTURE

INPUTS



Industrial load profile



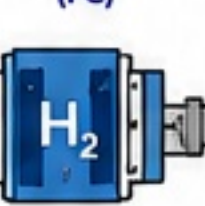
Constant-power generator (meets average load)

HYBRID SYSTEM

BATTERY



FUEL CELL (FC)



OUTPUT



Electricity demand supply



Strategy based on separating average power (generator) from variable power (hybrid system).

3. PROPOSED METHODOLOGY

1



Determine average load demand

2



Operate the generator at constant power

3



Compute residual net demand

4



Optimize power dispatch between battery and fuel cell

5



Use participation factor α ($0 \leq \alpha \leq 1$) as the decision variable



Optimization: minimizes operational cost while preserving equipment lifetime and meeting demand.

4. SYSTEM MODELING

BATTERY



- State of Charge (SOC) model
- SOC limits: 20% – 80%
- Charging efficiency: 95%
- Discharging efficiency: 94%

FUEL CELL (FC)



- Maximum power limit
- Stable operation and protection against abrupt fluctuations
- Lifetime preservation strategy

QUADRATIC COST FUNCTION (J)

$$J = \omega_{fc} \sum_i \left(\frac{P_{fc}(t)}{P_{fc,max}} \right)^2 + \omega_{bat} \sum_i \left(\frac{P_{bat}(t)}{P_{bat,max}} \right)^2 + \omega_{soc} \sum_i (SOC(t) - SOC_{ref})^2$$

- Minimizes source effort
- Maintains battery energy reserve

ω : weights that balance system priorities.

5. ANALYZED SCENARIOS

Analysis of the impact of storage capacity on the operation of the hybrid system.

SCENARIO	BATTERY CAPACITY
Scenario 1	0.1 p.u.
Scenario 2	0.5 p.u.
Scenario 3	0.9 p.u.



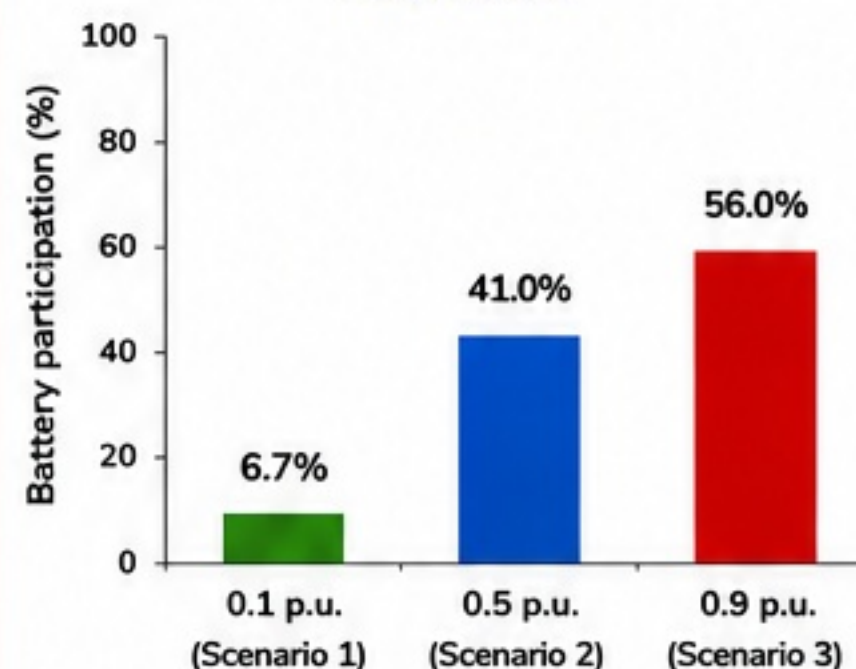
Goal: evaluate the influence of storage capacity on load smoothing and operational stability.

EVALUATED INDICATORS

- ✓ Total demanded and supplied energy
- ✓ Power deficit
- ✓ Battery and fuel cell participation
- ✓ Battery State of Charge (SOC)
- ✓ Standard deviation of fuel cell power

6. SOURCE PARTICIPATION

Battery participation in load variability compensation



Battery participation increases with storage capacity, making the system more flexible and efficient.

7. MAIN RESULTS



Demand supply:

- 97.2% (0.1 p.u.)
- 100% (0.5 p.u.)
- 100% (0.9 p.u.)



Larger batteries absorb more load variability.



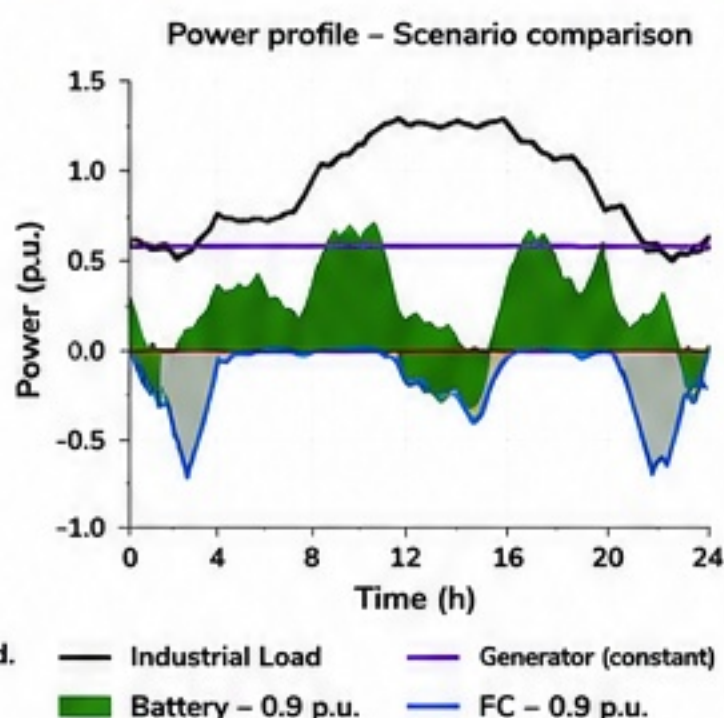
Reduced stress on the fuel cell, increasing its lifespan.



Elimination of energy deficit in scenarios 2 and 3.



Battery charging occurs during low-demand periods and discharging during peak demand.



8. CONCLUSIONS

- ✓ The α -based optimization strategy proved robust and effective.
- ✓ Higher battery capacities significantly improve operational flexibility.
- ✓ Fuel cell power fluctuations are reduced, protecting its durability.
- ✓ The optimization prioritizes the battery due to its lower cost and faster response.
- ✓ Full demand supply is achieved in scenarios with larger storage capacity.
- ✓ Hybrid energy storage systems become central elements for reliable dispatch in variable-load power systems.

HYBRID SYSTEM



BATTERY



FUEL CELL (FC)



DISTRIBUTION NETWORK
RELIABLE AND SUSTAINABLE
DEMAND SUPPLY



PREPRINTS
This manuscript is not a preprint.



FUNDING
This research was funded by CNPq and CAPES.



CONFLICT OF INTEREST
The authors declare no conflict of interest.



DATA AVAILABILITY
All data supporting the results of this study are included in the article.



LICENSE
This work is licensed under Creative Commons Attribution 4.0 (CC BY 4.0).