

Controle ótimo de sistemas de produção de hidrogênio verde assistidos por rede

Gustavo A. de Andrade

Universidade Federal de Santa Catarina
Departamento de Automação e Sistemas, Brasil

I Workshop INCT CAPE
Florianópolis, 21 de Setembro de 2023

Trabalhos anteriores

Barbosa, M. F. da S.; Garcia-Clúa, de Andrade, G. A, Normey-Rico, J. E. Control óptimo multifase de sistema fotovoltaico-hidrógeno asistido por red. (submetido ao RPIC2023).

de Andrade, G. A.; Mendes, P. R. C.; Garcia-Clúa, J. G.; Normey-Rico, J. E. Control of a grid assisted PV- production system: A comparative study between optimal control and hybrid MPC. JOURNAL OF PROCESS CONTROL. , v.92, p.220 - 233, 2020.

de Andrade, G.A.; Garcia-Clua, J. G.; Mendes, P. R. da C.; Normey-Rico, J. E. Optimal control of a grid assisted photovoltaic-hydrogen production system In: 12th IFAC Symposium on Dynamics and Control of Process Systems, including Biosystems, 2019, Florianópolis. Proceedings of the 12th IFAC Symposium on Dynamics and Control of Process Systems, including Biosystems. , 2019. v.1. p.1012 - 1017

Sumário

- ▶ **Introdução**
- ▶ Eletrolizadores alcalinos
- ▶ O problema de controle
- ▶ Aplicação em um sistema PV-H₂ auxiliado pela rede
- ▶ Resultados de simulação
- ▶ Comentários finais

Classificação do Hidrogênio através de cores

HIDROGÊNIO CINZA

- Extraído a partir de **fontes não renováveis**, como o gás natural e carvão;
- Produção **com emissão** de carbono;
- **Vilão do aquecimento global.**



HIDROGÊNIO AZUL

- Extraído a partir de **fontes não renováveis**, como o gás natural e carvão;
- Produção com **captura e armazenamento** de carbono;
- **Energia limpa com ressalvas.**

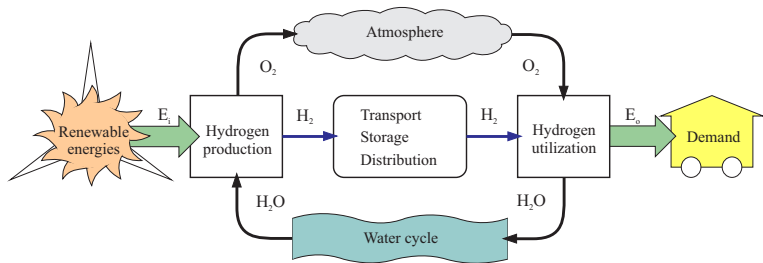


HIDROGÊNIO VERDE







- Extraído a partir de **fontes renováveis**, como energia eólica e solar fotovoltaica;
- Produção por **eletrólise, sem emissão** de carbono;
- **Alternativa mais limpa atualmente.**



O ciclo de produção do hidrogênio verde



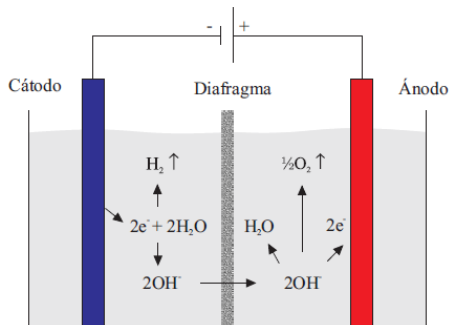
Principais tecnologias de eletrolizadores

	Low Temperature Electrolysis			High Temperature Electrolysis		
	Alkaline (OH ⁻) electrolysis		Proton Exchange (H ⁺) electrolysis	Oxygen ion(O ²⁻) electrolysis		
	Liquid	Polymer Electrolyte Membrane		Solid Oxide Electrolysis (SOE)		
	Conventional	Solid alkaline	H ⁺ - PEM	H ⁺ - SOE	O ²⁻ - SOE	Co-electrolysis
Operation principles						
Charge carrier	OH ⁻	OH ⁻	H ⁺	H ⁺	O ²⁻	O ²⁻
Temperature	20-80°C	20-200°C	20-200°C	500-1000°C	500-1000°C	750-900°C
Electrolyte	liquid	solid (polymeric)		solid (ceramic)		
Anodic Reaction (OER)	4OH ⁻ → 2H ₂ O + O ₂ + 4e ⁻	4OH ⁻ → 2H ₂ O + O ₂ + 4e ⁻	2H ₂ O → 4H ⁺ + O ₂ + 4e ⁻	2H ₂ O → 4H ⁺ + 4e ⁻ + O ₂	O ²⁻ → 1/2 O ₂ + 2e ⁻	O ²⁻ → 1/2 O ₂ + 2e ⁻
Anodes	Ni > Co > Fe (oxides) Perovskites: Ba _{0.5} Sr _{0.5} Co _{0.8} Fe _{0.2} O _{3-δ} , LaCoO ₃	Ni-based	IrO ₂ , RuO ₂ , Ir,Ru _{1-x} O ₂ Supports: TiO ₂ , ITO, TiC	Perovskites with protonic-electronic conductivity	La,Sr _{1-x} MnO ₃ + Y-Stabilized ZrO ₂ (LSM-YSZ)	La,Sr _{1-x} MnO ₃ + Y-Stabilized ZrO ₂ (LSM-YSZ)
Cathodic Reaction (HER)	2H ₂ O + 4e ⁻ → 4OH ⁻ + 2H ₂	2H ₂ O + 4e ⁻ → 4OH ⁻ + 2H ₂	4H ⁺ + 4e ⁻ → 2H ₂	4H ⁺ + 4e ⁻ → 2H ₂	H ₂ O + 2e ⁻ → H ₂ + O ²⁻	H ₂ O + 2e ⁻ → H ₂ + O ²⁻ CO ₂ + 2e ⁻ → CO + O ²⁻
Cathodes	Ni alloys	Ni, Ni-Fe, NiFe ₂ O ₄	Pt/C MoS ₂	Ni-cermets	Ni-YSZ Subst. LaCrO ₃	Ni-YSZ perovskites
Efficiency	59-70%		65-82%	up to 100%	up to 100%	-
Applicability	commercial	laboratory scale	near-term commercialization	laboratory scale	demonstration	laboratory scale
Advantages	low capital cost, relatively stable, mature technology	combination of alkaline and H ⁺ -PEM electrolysis	compact design, fast response/start-up, high-purity H ₂	enhanced kinetics, thermodynamics: lower energy demands, low capital cost		+ direct production of syngas
Disadvantages	corrosive electrolyte, gas permeation, slow dynamics	low OH ⁻ conductivity in polymeric membranes	high cost polymeric membranes; acidic: noble metals	mechanically unstable electrodes (cracking), safety issues: improper sealing		
Challenges	Improve durability/reliability; and Oxygen Evolution	Improve electrolyte	Reduce noble-metal utilization	microstructural changes in the electrodes: delamination, blocking of TPBs, passivation	C deposition, microstructural change electrodes	

Sumário

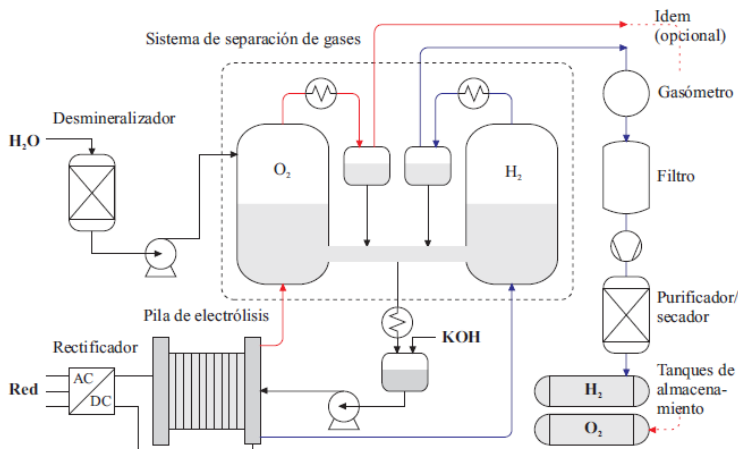
- ▶ Introdução
- ▶ **Eletrolizadores alcalinos**
- ▶ O problema de controle
- ▶ Aplicação em um sistema PV-H2 auxiliado pela rede
- ▶ Resultados de simulação
- ▶ Comentários finais

Eletrólizadores alcalinos



- ▶ Células de eletrólise.
- ▶ Eletrodos (ânodo e cátodo).
- ▶ Eletrólito com boa condutividade iônica (tipicamente hidróxido de potássio).

Eletrolizador alcalino: Equipamentos auxiliares



Modos de operação de um eletrolizador alcalino

1. Arranque:

- ▶ Corrente elétrica é fornecida ao eletrolizador para que sua temperatura e pressão atinjam os valores nominais de trabalho.
- ▶ O hidrogênio gerado tem níveis de impureza acima dos limites de segurança.

2. Perdas mínimas e taxa máxima de produção:

- ▶ A energia mínima requerida para gerar 1 Nm^3 de H_2 é 3.54 kWh .
- ▶ A eficiência determina o consumo excedido devido às perdas no eletrolizador:

$$\eta_E (i_E) = \eta_F (i_E) \frac{N_{SE} U_{tn}}{v_E (i_E)},$$

3. Emissões mínimas:

- ▶ Quando a fonte de energia é dada exclusivamente pelo painel solar, a corrente do eletrolizador pode variar entre zero e I_E^N .
- ▶ A eficiência e pureza do H_2 produzido aumenta com a corrente. Portanto, os eletrolizadores devem operar acima de uma corrente mínima I_E^{min} , tipicamente entre 25% a 40% de I_E^{min} .

Modos de operação de um eletrolizador

4. Parada:

- ▶ Quando a geração renovável é nula ou muito baixa para obter H₂ de qualidade aceitável, o eletrolizador é colocado em parada.
- ▶ Os elétrodos convencionais ficam expostos a corrosão

5. Assistência mínima:

- ▶ A aplicação de uma corrente mínima I_E^m é crítica para evitar ciclos liga-desliga.
- ▶ Neste modo, o eletrolizador mantém a pressão e temperatura nominal e a produção de hidrogênio pode ser reiniciada rapidamente quando o fornecimento renovável é restaurado.
- ▶ O H₂ produzido nesse modo é ventilado.

Sumário

- ▶ Introdução
- ▶ Eletrolizadores alcalinos
- ▶ **O problema de controle**
- ▶ Aplicação em um sistema PV-H2 auxiliado pela rede
- ▶ Resultados de simulação
- ▶ Comentários finais

O Problema de controle

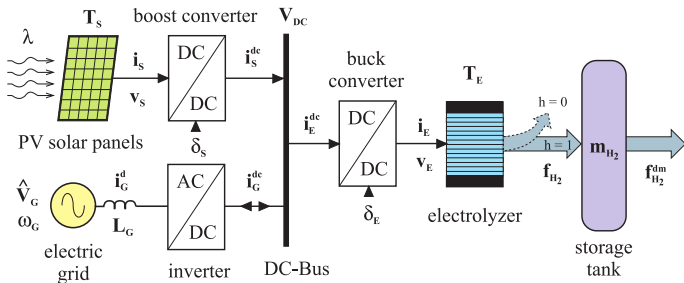
O objetivo de controle de eletrolizadores é supervisionar a transição entre os modos de operação para adaptar o sistema à variabilidade de energia extraída das fontes naturais.

- ▶ A variável manipulada (variável de controle) é dada pela corrente do eletrolizador, i_E .
- ▶ A ação de controle deve ser restrita ao conjunto $i_E \in \{0\} \cup \{I_E^m\} \cup [I_E^{\min}, I_E^N]$.

Sumário

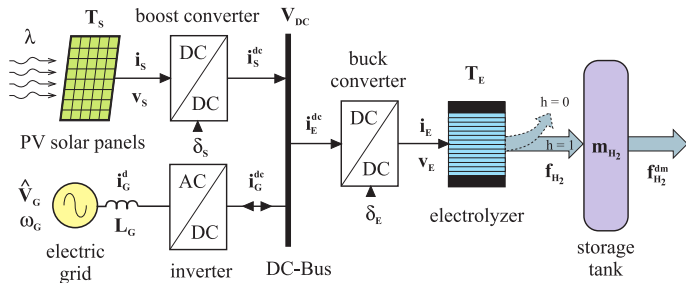
- ▶ Introdução
- ▶ Eletrolizadores alcalinos
- ▶ O problema de controle
- ▶ **Aplicação em um sistema PV-H2 auxiliado pela rede**
- ▶ Resultados de simulação
- ▶ Comentários finais

Estudo de caso: Sistema PV-H2 auxiliado pela rede



- ▶ Conversão solar fotovoltaica + sistema de produção de H_2 .
- ▶ Tanque de armazenamento para a demanda de hidrogênio.
- ▶ A rede elétrica é conectada através de um inversor.
- ▶ O sistema possui duas escalas de tempo diferentes:
 - ▶ Dinâmica rápida: Dispositivos do barramento CC.
 - ▶ Dinâmica lenta: Balanços de massa e energia devido à evolução da radiação solar e demanda de hidrogênio.

Estudo de caso: Sistema PV-H2 auxiliado pela rede



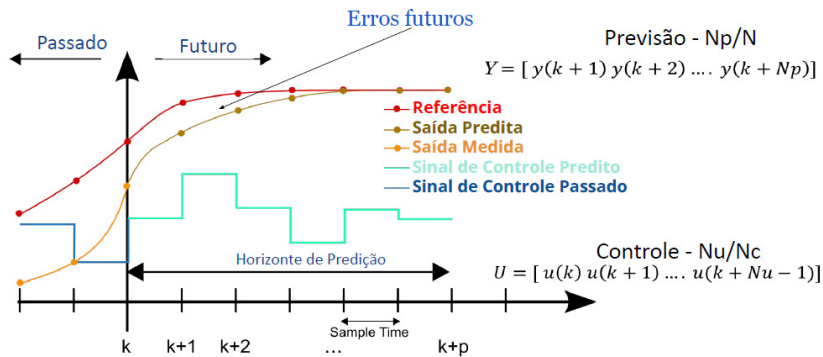
- ▶ Conversão solar fotovoltaica + sistema de produção de H_2 .
- ▶ Tanque de armazenamento para a demanda de hidrogênio.
- ▶ A rede elétrica é conectada através de um inversor.
- ▶ O sistema possui **duas escalas de tempo diferentes**:
 - ▶ Dinâmica rápida: Dispositivos do barramento CC.
 - ▶ Dinâmica lenta: Balanços de massa e energia devido à evolução da radiação solar e demanda de hidrogênio.

Controlador Ótimo

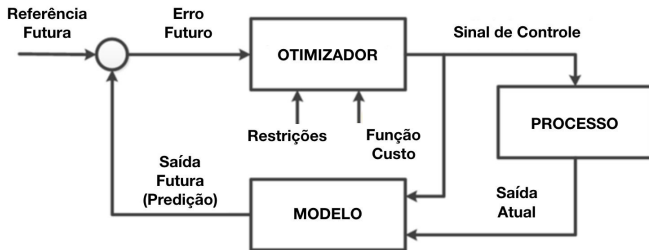
- ▶ Determinar o sinal de controle que fará com que o sistema satisfaça as restrições ao mesmo tempo que minimiza um critério de desempenho.



Controlador Preditivo baseado em modelo



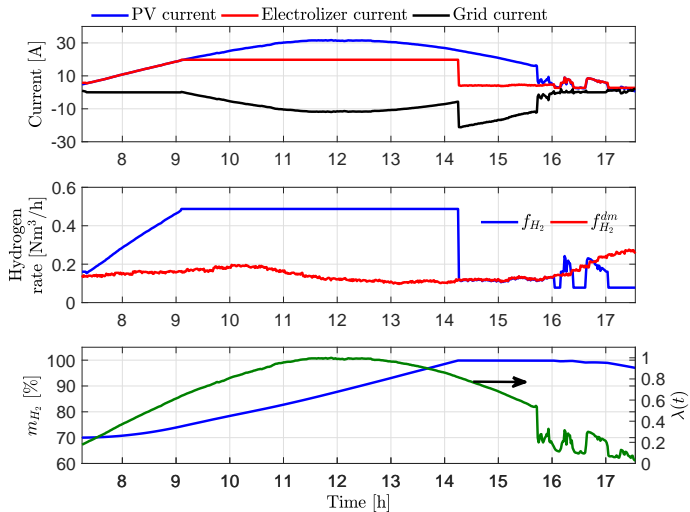
Controlador Preditivo baseado em modelo



Sumário

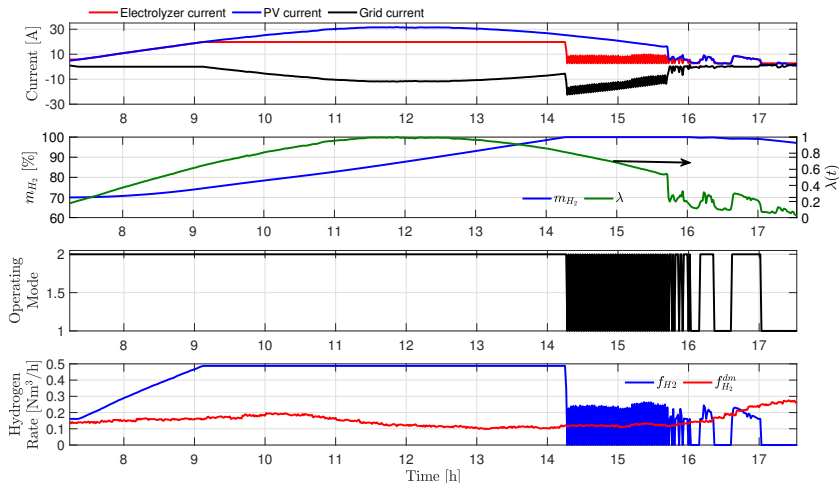
- ▶ Introdução
- ▶ Eletrolizadores alcalinos
- ▶ O problema de controle
- ▶ Aplicação em um sistema PV-H2 auxiliado pela rede
- ▶ **Resultados de simulação**
- ▶ Comentários finais

Resultados de simulação: Controle ótimo



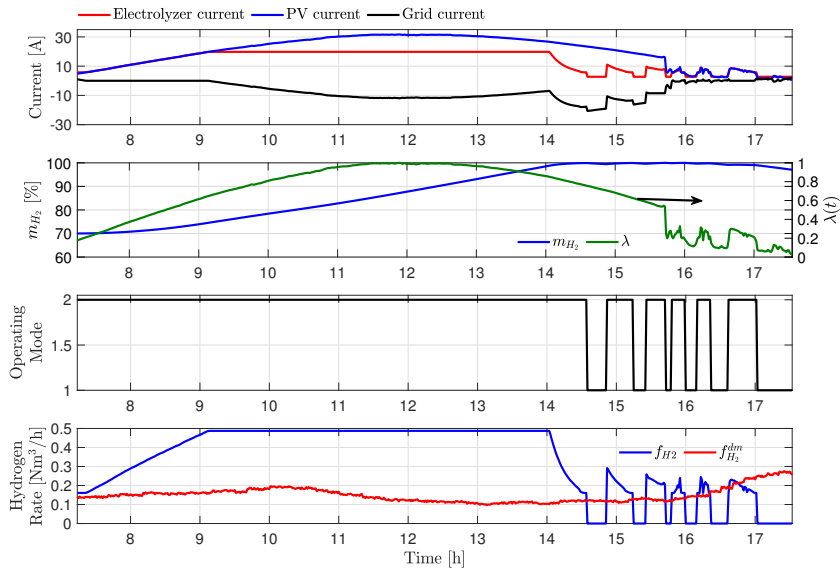
Resultados de simulação: Controle Preditivo (caso 1)

Horizonte de previsão $N_p = 1$.



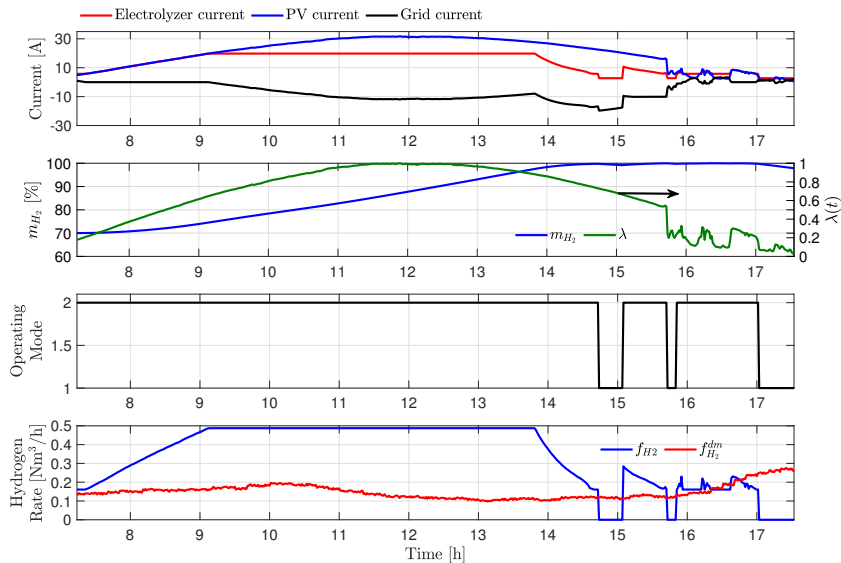
Resultados de simulação: Controle Preditivo (caso 2)

Horizonte de predição $N_p = 15$.



Resultados de simulação: Controle Preditivo (caso 2)

Horizonte de previsão $N_p = 30$.



Resultados de simulação: Índices de desempenho

η_E^{mean} : eficiência energética média.

E_{GE} : energia extraída da rede.

E_{GD} : Energia entregue para a rede.

Table 1: Índices de desempenho calculados a partir das simulações.

Horizonte	η_E^{mean}	Produção	E_{GE}	E_{GD}
Optimal Controller				
-	0.77	210.21 Nm ³	8.34 kWh	751.63 kWh
MPC				
$N_p = 1$	0.63	206.54 Nm ³	39.03 kWh	1644.56 kWh
$N_p = 15$	0.65	206.36 Nm ³	8.67 kWh	730.37 kWh
$N_p = 30$	0.68	209.70 Nm ³	19.55 kWh	737.31 kWh

Sumário

- ▶ Introdução
- ▶ Eletrolizadores alcalinos
- ▶ O problema de controle
- ▶ Aplicação em um sistema PV-H₂ auxiliado pela rede
- ▶ Resultados de simulação
- ▶ **Comentários finais**

Comentários finais

A estratégia de controle ótimo define uma política de controle para o caso ideal.

A estratégia de controle preditivo possui propriedades de robustez, necessária em casos reais.

Trabalhos futuros incluem a extensão das metodologias de controle para sistemas de geração de H_2 em paralelo, assim como a inclusão de outras fontes renováveis.

Obrigado pela atenção!