

# A Model Predictive Control Energy Management for Hybrid Energy Storage System considering supercapacitor degradation

Isaías Moral    Héctor Chiacchiarini    Cristian De Angelo



27 de agosto de 2025

# Introducción

## Los sistemas híbridos de almacenamiento de energía (HESS)

|                       |      |
|-----------------------|------|
| Baterías              | (B)  |
| Supercapacitores      | (SC) |
| Celdas de combustible | (FC) |

### ⚡ Desafío:

La distribución óptima de potencia entre componentes priorizando la menor tasa de degradación

### ⚡ Objetivo: Maximizar vida útil y la eficiencia energética

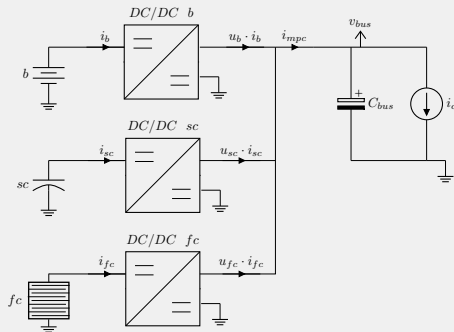
## Nuestra Solución:

Aplicación de MPC en HESS con enfoque en minimizar degradación

|                                        |         |
|----------------------------------------|---------|
| Control Predictivo por Modelo          | (MPC)   |
| Optimización en Función de Degradación | (OPT)   |
| Convertidores DC/DC                    | (DC/DC) |

# Arquitectura del Sistema HESS

- ⚡ Barra DC alimentando carga variable  $i_o(t)$
- ⚡ Múltiples fuentes interconectadas mediante convertidores
- ⚡ Objetivo: Mantener  $V_{min} \leq V_{bus} \leq V_{max}$
- ⚡ Minimizar función de costo  $J$  que considera degradación



# Opciones de Implementación

- ⚡ **Opción 1:** Optimización en dos etapas
  - MPC calcula corriente total requerida
  - Optimizador distribuye corriente entre fuentes
- ⚡ **Opción 2:** Optimización conjunta en MPC
  - MPC incluye todas las restricciones y costos
  - Optimización simultánea

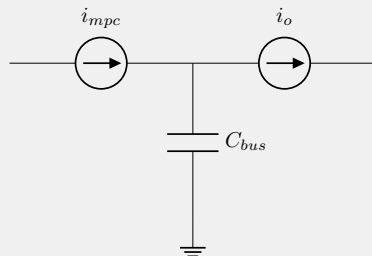
Este trabajo utiliza Opción 1 por simplicidad inicial

# Resumen del esquema de control propuesto

- (MPC) Predice la evolución del bus
- (MPC) Mantiene la tensión aplicando una corriente
- (MPC) Considera las restricciones operativas
- (OPT) Distribuye la corriente  $\bar{I}_{mpc}[k] = \sum \bar{I}_n[k]$
- (OPT) Las corrientes  $I_n[k]$  se asignan a partir de un costo definido  $J = \sum J_n$
- (DC/DC) Los convertidores reciben la referencia  $I_n[1]$  y entregan la corriente  $i_{mpc} = \sum u_n i_n$

# Arquitectura del Sistema HESS

- ⚡ Barra DC alimentando carga variable  $i_o(t)$
- ⚡ Múltiples fuentes interconectadas mediante convertidores
- ⚡ Objetivo: Mantener  $V_{min} \leq V_{bus} \leq V_{max}$
- ⚡ Minimizar función de costo  $J$  que considera degradación



# Arquitectura del Sistema HESS

## Modelo evaluado en MPC:

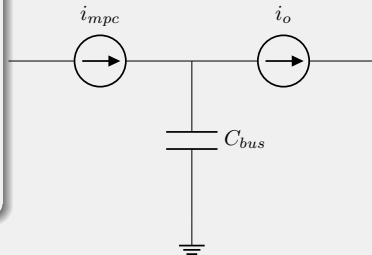
$$C_{bus} \frac{dv_{bus}}{dt} = i_{mpc}(t) - i_o(t)$$

$$x[k+1] = A_d x[k] + B_d u[k]$$

$$y[k] = C_d x[k] + D_d u[k]$$

$$A_d = [1.], \quad B_d = \left[ \frac{T_s}{C_{bus}} \right]$$

$$C_d = [1.], \quad D_d = [0.]$$



La estrategia MPC esta basada en la descrita por B. A. Ogunnaike.<sup>a</sup>

<sup>a</sup>B. A. Ogunnaike y W. H. Ray, *Process dynamics, modeling, and control*. Oxford University Press, 1994.

# Modelo de Degradación de Supercapacitores

## Modelos de degradación desarrollado<sup>ab</sup>

<sup>a</sup>P. Kreczanik, P. Venet, A. Hijazi et al., «Study of Supercapacitor Aging and Lifetime Estimation According to Voltage, Temperature, and RMS Current,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, n.º 9, págs. 4895-4902, 2014. DOI: 10.1109/TIE.2013.2293695.

<sup>b</sup>T. Kovaltchouk, B. Multon, H. Ben Ahmed et al., «Enhanced Aging Model for Supercapacitors Taking Into Account Power Cycling: Application to the Sizing of an Energy Storage System in a Direct Wave Energy Converter,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, n.º 3, págs. 2405-2414, 2015. DOI: 10.1109/TIA.2014.2369817.

$$T_{life}(V, \theta_c) = T_{life}^{ref} \times 2^{\left(\frac{\theta_c^{ref} - \theta_c}{\theta_0}\right)} \times \left[ 2^{\left(\frac{V_{ref} - V}{V_0}\right)} \right]$$

## Agregamos un termino de corriente

$$\frac{dSoA}{dt} = \frac{1}{T_{life}^{ref}} \times 2^{\left(\frac{\theta_c - \theta_c^{ref}}{\theta_0}\right)} \times \left[ 2^{\left(\frac{V - V_{ref}}{V_0}\right)} + K \right] \times 2^{\left(\frac{I - I_R}{I_0}\right)}$$

Modelo empírico que considera tensión, temperatura y corriente.

# Función de Costo Total

Tasa de degradación como costo a optimizar:

$$J_{di} = \frac{dSoA}{dt} = \frac{1}{T_{life}^{ref}} \times 2^{\left(\frac{\theta_c - \theta_c^{ref}}{\theta_0}\right)} \times \left[ 2^{\left(\frac{V - V_{ref}}{V_0}\right)} + K \right] \times 2^{\left(\frac{I - I_R}{I_0}\right)} = k_{di} 2^{\left(\frac{|I_j[j]|}{k_{li}}\right)}$$

**Costo por degradación ( $J_d$ ):**

$$J_d = W_1 \cdot \sum_{j=1}^{N_p} k_{d1} \cdot 2^{\left(\frac{|I_1[j]|}{k_{f1}}\right)} + W_2 \cdot \sum_{j=1}^{N_p} k_{d2} \cdot 2^{\left(\frac{|I_2[j]|}{k_{f2}}\right)} + W_3 \cdot \sum_{j=1}^{N_p} k_{d3} \cdot 2^{\left(\frac{|I_{mpc} - I_1[j]| - I_2[j]|}{k_{f3}}\right)}$$

**Costo por suavidad ( $J_s$ ):**

$$J_s = W_{\Delta 1} \left( \frac{I_1[1] - I_1[0]}{\Delta I_{SC1}} \right)^{N_s} + W_{\Delta 2} \left( \frac{I_2[1] - I_2[0]}{\Delta I_{SC2}} \right)^{N_s} + W_{\Delta 3} \left( \frac{I_3[1] - I_3[0]}{\Delta I_{SC3}} \right)^{N_s}$$

**Optimización busca minimizar  $J_T = J_d + J_s$  sujeto a restricciones**

# Escenarios de Simulación

## Parámetros de Degradación de los SC:

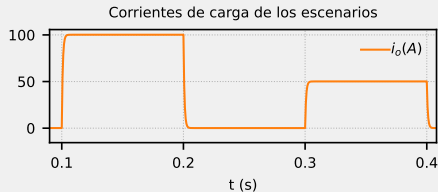
| Valor            |       | $SC_1$ | $SC_2$ | $SC_3$ |
|------------------|-------|--------|--------|--------|
| $T_{life}^{ref}$ | [s]   | 5,4e6  | 5,4e6  | 5,4e6  |
| $\theta_c$       | [° C] | 25     | 25     | 25     |
| $\theta_c^{ref}$ | [° C] | 25     | 25     | 25     |
| $\theta_0$       | [° C] | 10     | 10     | 10     |
| $V^{ref}$        | [V]   | 2,0    | 2,0    | 2,0    |
| $V_0$            | [V]   | 5,0    | 5,0    | 5,0    |
| $K$              |       | 0,029  | 0,029  | 0,029  |
| $I_R$            | [A]   | 50     | 50     | 50     |

- ⚡ Distintos escenarios con diferentes ponderaciones de los costos
- ⚡ Carga variable con inductancia serie de 400 mHy
- ⚡ Tensión de bus referencia: 70V

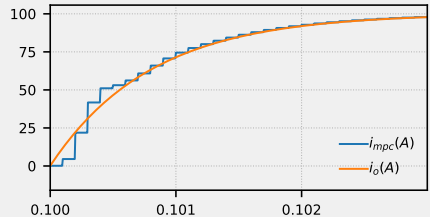
# Simulación

## Simulación y análisis del seguimiento de corriente del algoritmo MPC

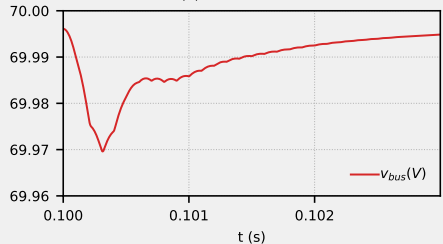
### Forma de corriente de carga $i_o$ simulada



(a) Corrientes de carga y seguidor MPC



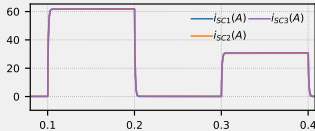
(b) Tensiones de bus



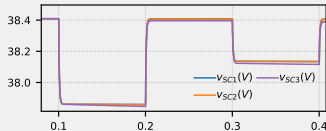
# Resultados de simulación a diferentes pesos

| Valor        |     | $SC_1$ | $SC_2$ | $SC_3$ |
|--------------|-----|--------|--------|--------|
| $C$          | [F] | 3000   | 2000   | 500    |
| $I_0$        | [A] | 50     | 50     | 50     |
| $W$          | [ ] | 5,4e6  | 5,4e6  | 5,4e6  |
| $W_{\Delta}$ | [ ] | 0      | 0      | 0      |

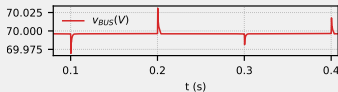
(a) Corrientes cada almacenador



(b) Tensiones de cada almacenador

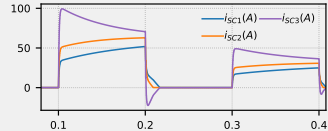


(c) Tensión bus

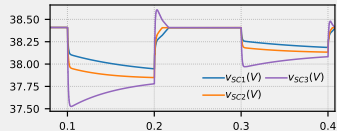


| Valor        |     | $SC_1$ | $SC_2$ | $SC_3$ |
|--------------|-----|--------|--------|--------|
| $C$          | [F] | 3000   | 3000   | 3000   |
| $I_0$        | [A] | 50     | 50     | 50     |
| $W$          | [ ] | 5,4e6  | 5,4e6  | 5,4e6  |
| $W_{\Delta}$ | [ ] | 3      | 2      | 1      |

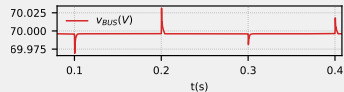
(a) Corrientes cada almacenador



(b) Tensiones de cada almacenador



(c) Tensión bus

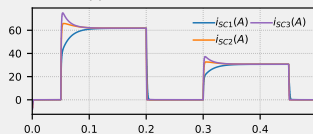


# Resultados de simulación a diferentes pesos

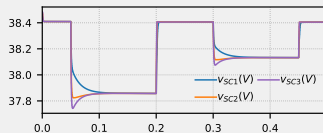
| Valor          |     | SC <sub>1</sub> | SC <sub>2</sub> | SC <sub>3</sub> |
|----------------|-----|-----------------|-----------------|-----------------|
| C              | [F] | 3000            | 3000            | 3000            |
| I <sub>0</sub> | [A] | 50.00           | 50.00           | 50.00           |
| W              | [ ] | 5.40e+06        | 5.40e+06        | 5.40e+06        |
| W <sub>Δ</sub> | [ ] | 1.00e-01        | 6.00e-02        | 5.00e-02        |

| Valor          |     | SC <sub>1</sub> | SC <sub>2</sub> | SC <sub>3</sub> |
|----------------|-----|-----------------|-----------------|-----------------|
| C              | [F] | 3000            | 3000            | 3000            |
| I <sub>0</sub> | [A] | 50.00           | 50.00           | 50.00           |
| W              | [ ] | 1.62e+06        | 1.51e+06        | 1.73e+06        |
| W <sub>Δ</sub> | [ ] | 1.00e-01        | 6.00e-02        | 5.00e-02        |

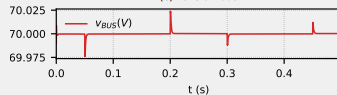
(a) Corrientes cada almacenador



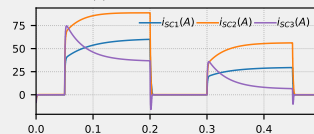
(b) Tensiones de cada almacenador



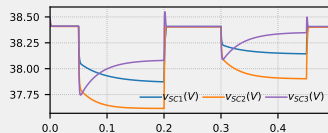
(c) Tensión bus



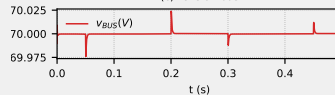
(a) Corrientes cada almacenador



(b) Tensiones de cada almacenador



(c) Tensión bus



# Análisis de Horizonte de Predicción

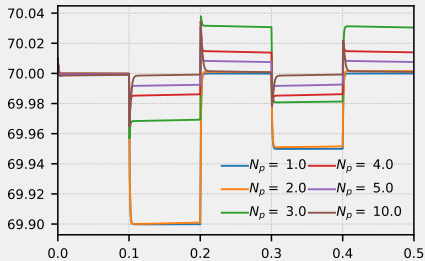
Impacto del horizonte de predicción:

| $N_p$ | Tiempo Sim. [s] | Error $V_{bus}$ |
|-------|-----------------|-----------------|
| 1     | 16.00           | 1.00e-01        |
| 5     | 69.00           | 7.69e-03        |
| 10    | 84.00           | 1.05e-03        |
| 20    | 105.00          | 9.44e-05        |
| 30    | 242.00          | 1.97e-05        |

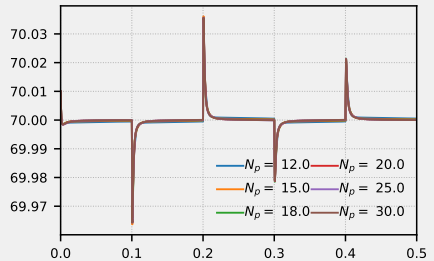
- ⚡ Mayor  $N_p$  reduce error pero aumenta carga computacional
- ⚡ Compromiso entre precisión y tiempo de cálculo
- ⚡ Tensión se mantiene estable en todos los casos

# Análisis de Horizonte de Predicción

Tensión en el bus de CC



Tensión en el bus de CC



# Conclusiones

- ⚡ Se desarrolló estrategia MPC para HESS considerando degradación
- ⚡ El enfoque permite estabilizar tensión del bus y distribuir corriente óptimamente
- ⚡ Modelo de degradación considera tensión, temperatura y corriente
- ⚡ La función de costo combina degradación y suavidad de transiciones
- ⚡ Simulaciones muestran buen desempeño con diferentes configuraciones
- ⚡ Horizonte de predicción afecta precisión y carga computacional

# Trabajo Futuro

- ⚡ Extender a sistemas con baterías y celdas de combustible
- ⚡ Implementar un optimización conjunta en el MPC
- ⚡ Análisis de estabilidad formal del sistema
- ⚡ Implementación en prototipo experimental real
- ⚡ Estudio de sensibilidad a parámetros del modelo

¡Muchas gracias por su atención!

Contacto: [isaias.moral@uns.edu.ar](mailto:isaias.moral@uns.edu.ar)