



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



**Centro de
Posgrados**
Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE

Diseño de un sistema de gestión de energía basado en control predictivo por modelo para una microrred aislada localizada en zonas rurales del Ecuador

Iván Antonio Salazar Escobar

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE
Maestría de Investigación en Electrónica mención Automática

Junio - 2022



KU LEUVEN

**MIRA – ESTE: Microgrids for Isolated Rural Areas:
Environmental, Social, Technological and
Economic aspects**



Belgium

partner in development

<https://www.vliruos.be/en/projects/project/22?pid=4564>

<https://investigacion.espe.edu.ec/proyectos-externos/>

AGENDA

1. Introducción
2. Descripción del Sistema
3. EMS basado en MPC
4. Implementación en HIL
5. Simulaciones y Resultados
6. Conclusiones
7. Trabajos Futuros
8. Publicaciones



Desarrollo Sostenible



Condiciones:

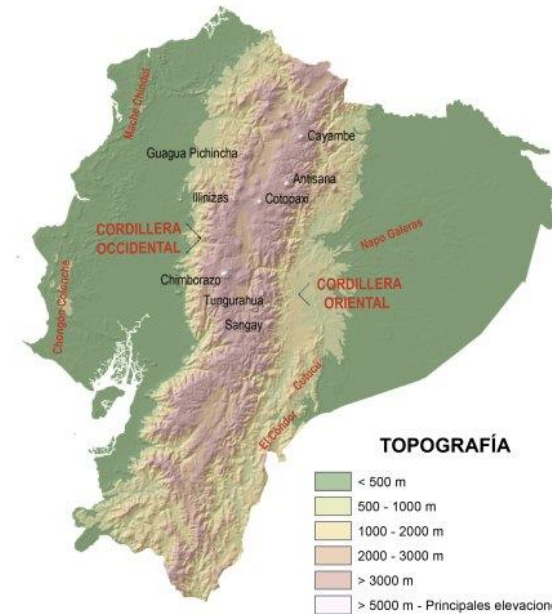
- Humanas
- Sociales
- Económicas
- Ambientales

Alrededor de 1.1 billones de personas no tienen acceso a la electricidad.



87% vive en áreas rurales

Fuente: IGM



2019 - la región Amazónica en Ecuador



Índice más bajo de electrificación



92.77% de su población

1. Introducción

Áreas geográficamente remotas y aisladas

Sin energía eléctrica



Generación Distribuida



Avances tecnológicos



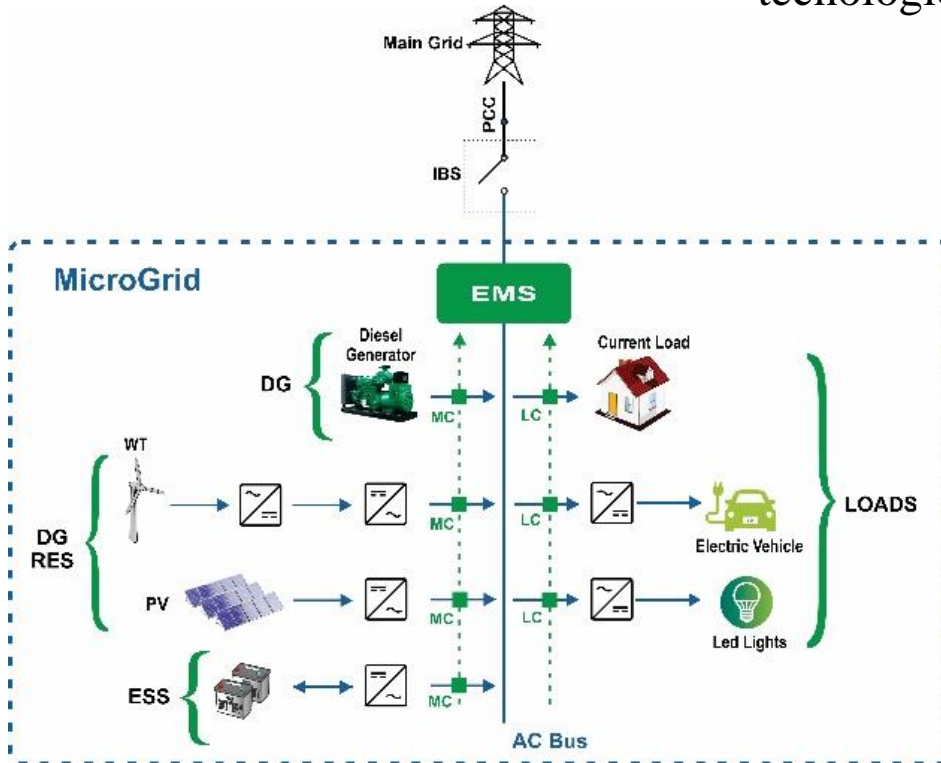
Energías Renovables



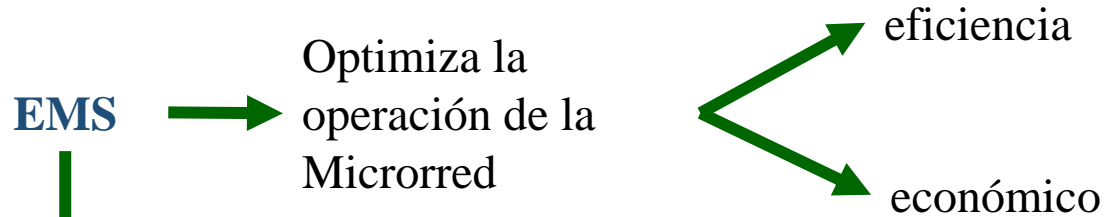
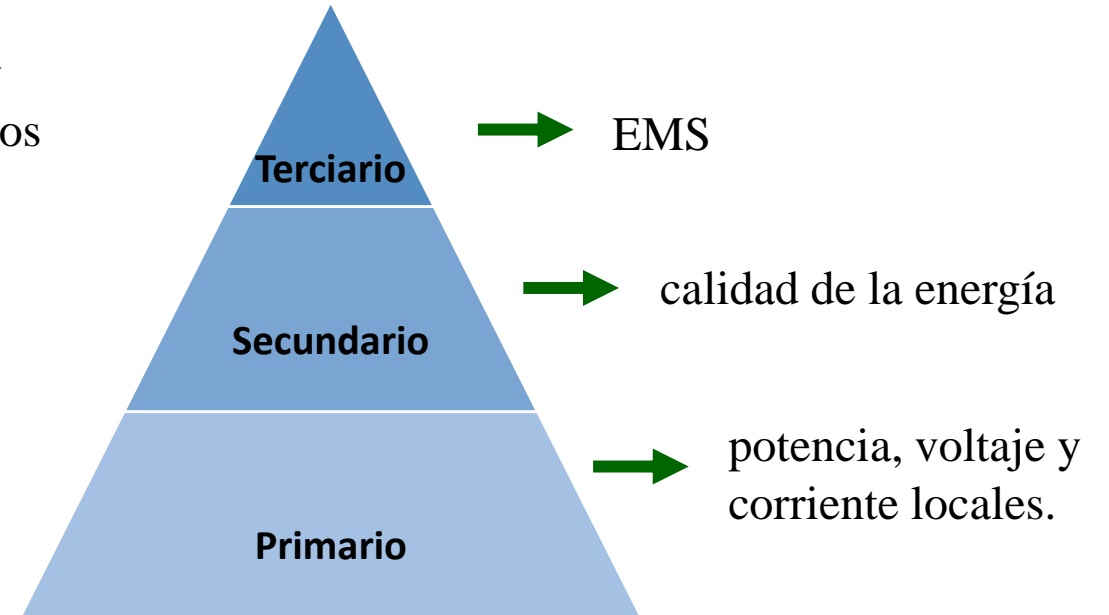
Microgrids (MG)



alternativas para el suministro de electricidad



La gestión general de una MG es un sistema de control **complejo y multiobjetivo** que involucran diversos aspectos, tales como, aspectos técnicos, escalas de tiempo y niveles físicos.



programación óptima de las unidades despachables

- Previsión de la demanda y generación de energía
- Las previsiones meteorológicas
- El estado de almacenamiento de energía
- Los precios de la energía, etc.

Model Predictive Control

Resuelve un **problema de optimización**



Cada tiempo de muestreo



minimiza los **costos operativos** de la MG



Satisfaciendo la demanda y tomando en cuenta los límites técnicos y físicos de los componentes.

Para sistemas que dependen de la demanda y la generación de energía renovable, el **comportamiento futuro** de las variables es esencial

AGENDA

1. Introducción
- 2. Descripción del Sistema**
3. EMS basado en MPC
4. Implementación en HIL
5. Simulaciones y Resultados
6. Conclusiones
7. Trabajos Futuros
8. Publicaciones

3. Descripción del Sistema

Descripción de la MG

La MG opera en modo permanentemente aislado

Balance de potencia eléctrica

$$P_{dg}(k) + P_{pv}(k) + P_{bat}(k) = P_{load}(k) + P_{wh}(k)$$

Balance de potencia térmica

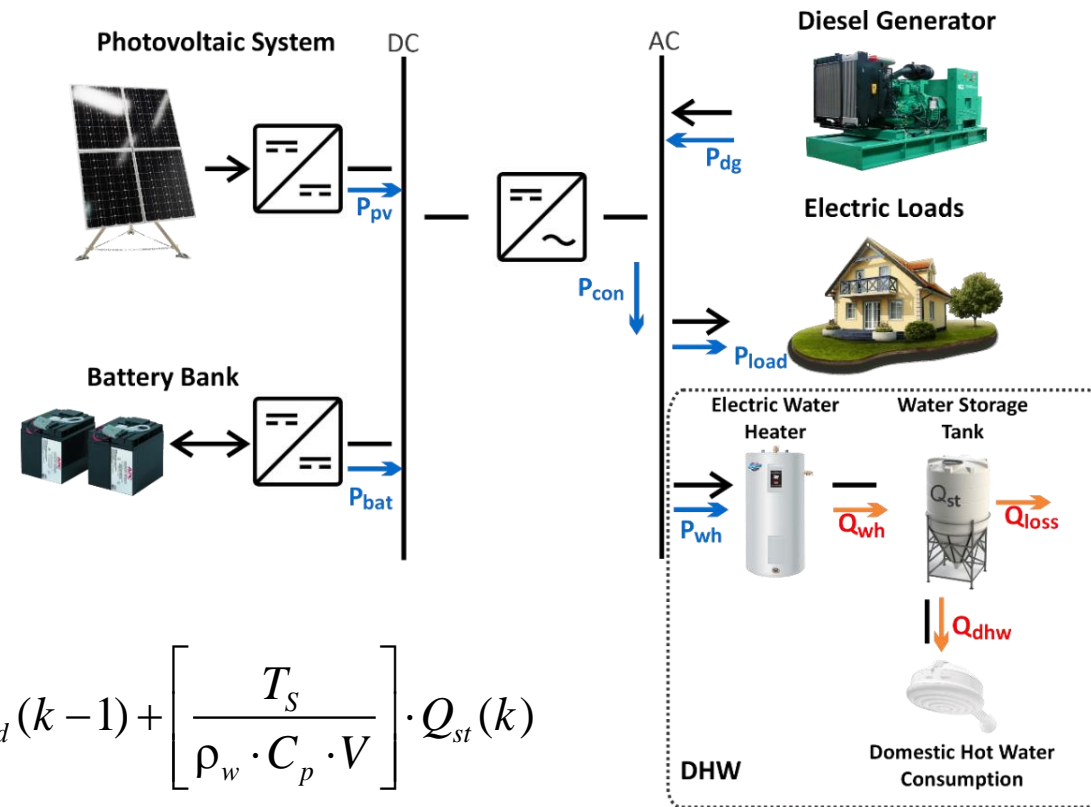
$$Q_{st}(k) = Q_{wh}(k) - Q_{dhw}(k) - Q_{loss}(k)$$

ESS

$$SOC(k+1) = SOC(k) - (\eta \cdot T_s / C_{max}) \cdot P_{bat}(k)$$

$$\eta = \begin{cases} \eta_{ch} & \text{if } P_{bat}(k) < 0 \\ 1/\eta_{dch} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$T_{wd}(k) = T_{wd}(k-1) + \left[\frac{T_s}{\rho_w \cdot C_p \cdot V} \right] \cdot Q_{st}(k)$$



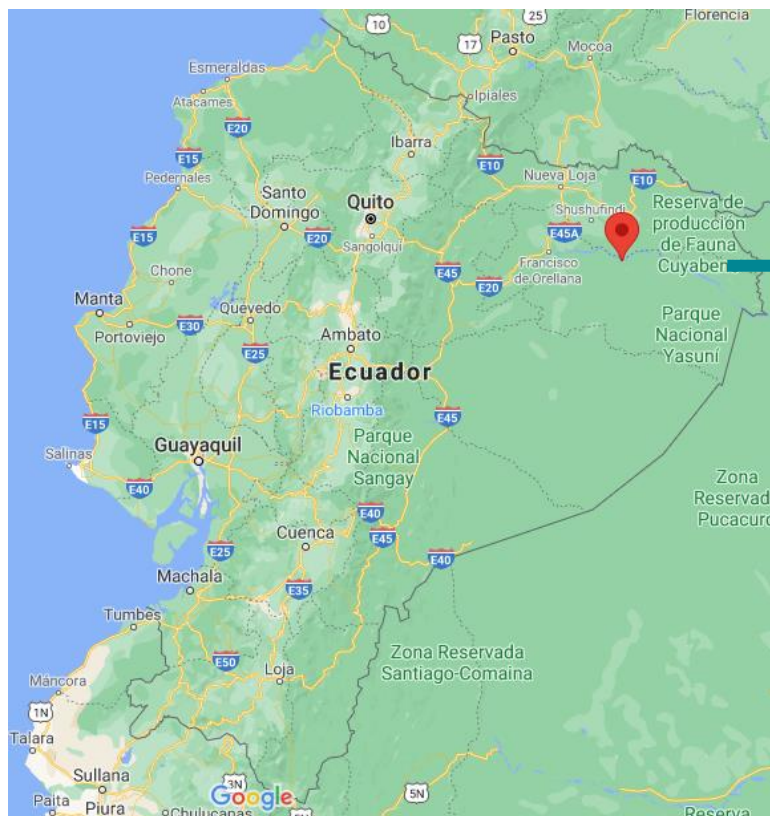
3. Descripción del Sistema

Localización

- Coordenadas $0^{\circ}29'42.4''\text{S}$ $76^{\circ}25'07.6''\text{W}$
- Amazonía Ecuatoriana
- Comunidad Kichwa Añangu (180 personas, 36 hogares)
- Parque Nacional Yasuní, uno de las áreas más biodiversas del mundo

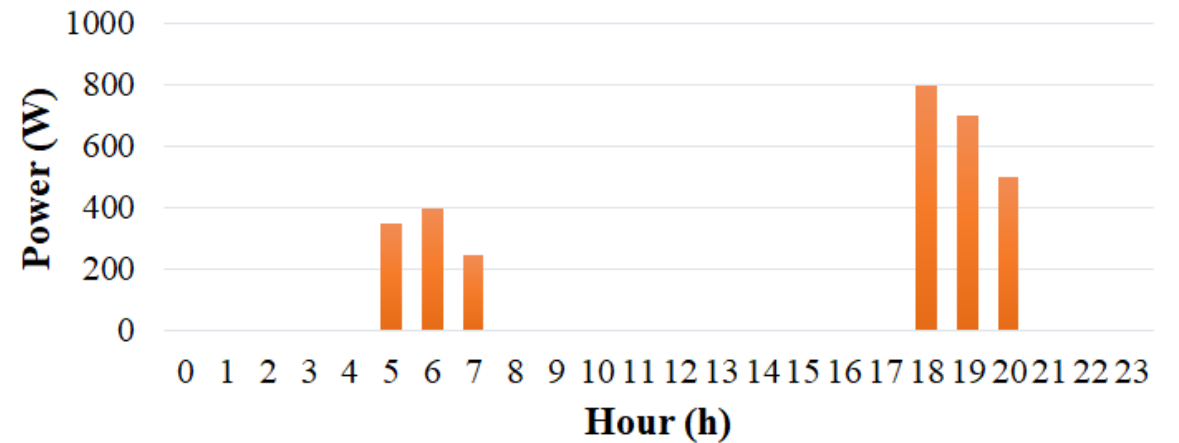
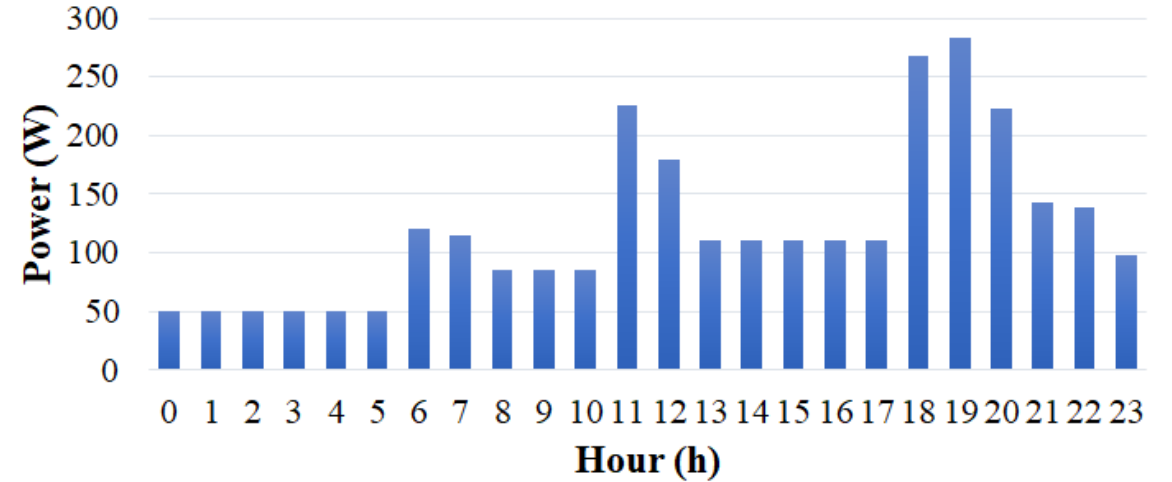
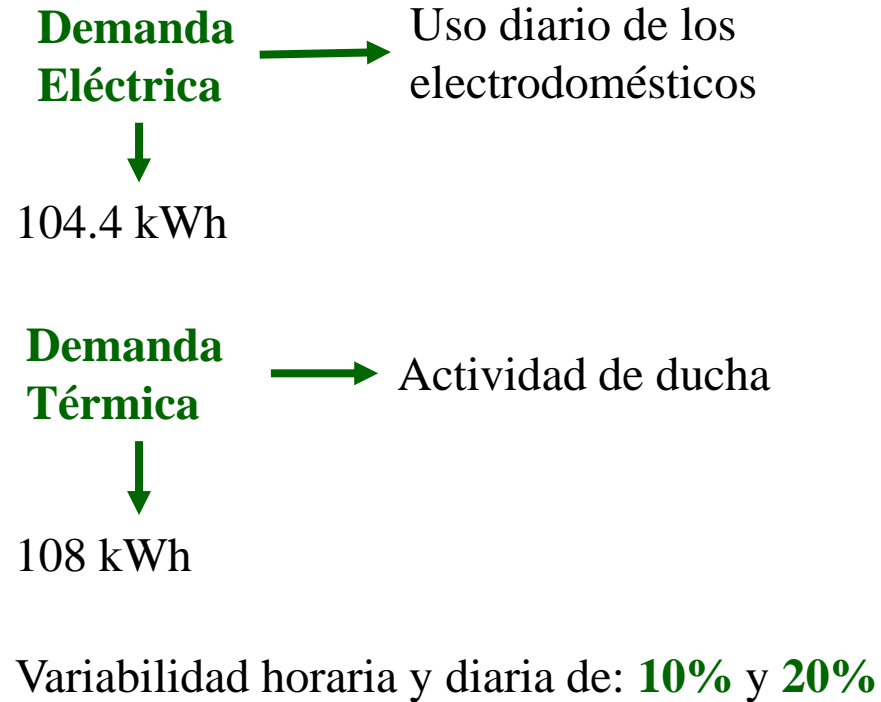
Datos meteorológicos

- Datos de radiación solar y temperatura del aire
- Año 2020 (Solcast)
- Período de muestreo de 15 muntos.



Source: Google Maps

Perfil de Carga



AGENDA

1. Introducción
2. Descripción del Sistema
3. **EMS basado en MPC**
4. Implementación en HIL
5. Simulaciones y Resultados
6. Conclusiones
7. Trabajos Futuros
8. Publicaciones

3. EMS basado en MPC

Objetivos del EMS

- Garantizar el suministro confiable y seguro de las cargas en la MG.
- Minimizar el costo de funcionamiento de la MG.
- Reducir las emisiones de CO2.
- Prolongar la vida útil del BESS.
- Maximizar la utilización de la energía producida por fuentes renovables.
- Mantener una temperatura adecuada del agua.

Esquema de control

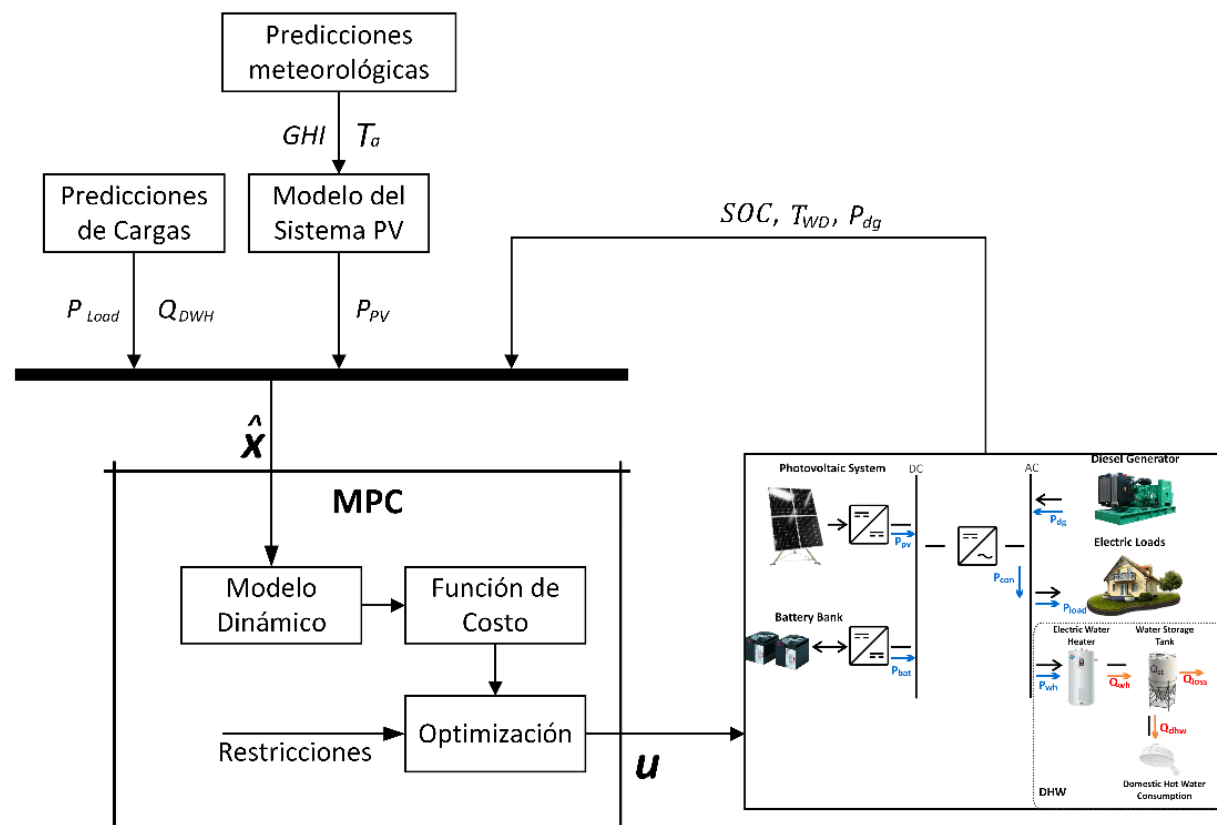
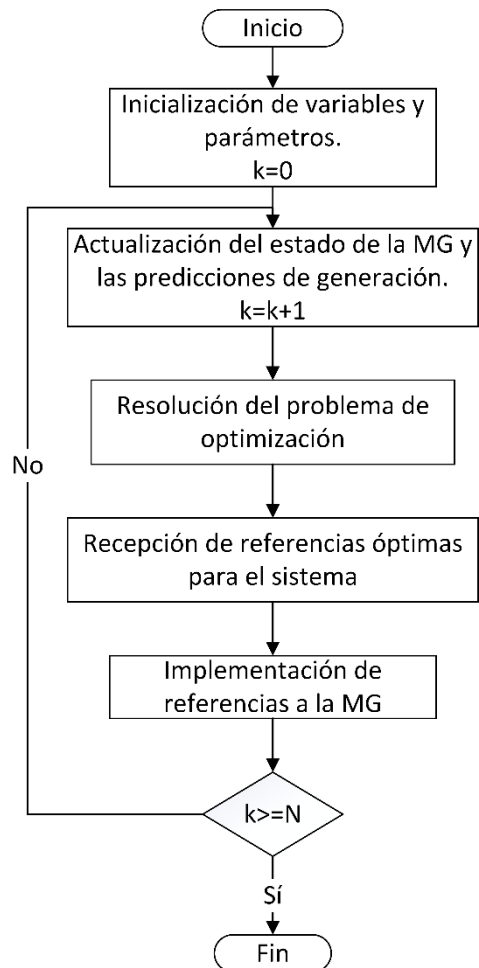


Diagrama de Flujo



K: muestra actual

N: Número de datos disponibles en la etapa de simulación

Estado de MG: SOC, Temperatura Agua, Potencia DG

Predicciones de generación fotovoltaica y carga

Optimización → FICO Xpress

Bucle de control cada 15 minutos

Función de Costo

La **función de costo** del problema de optimización está estrechamente ligada con los **objetivos** que persigue el EMS. En este contexto, el algoritmo MPC permite **minimizar** la función de coste con la selección adecuada de la acción de control

$$J(k) = \sum_{i=k}^{k+N_p-1} \left[J_{DG}(i) + J_{CUR}(i) + J_{WD}(i) + J_{BAT}(i) \right]$$

$J_{DG} \rightarrow$ Costos operativos

$J_{CUR} \rightarrow$ potencia reducida del panel fotovoltaico

$J_{WD} \rightarrow$ seguimiento a la temperatura de referencia

$J_{BAT} \rightarrow$ degradación de la batería

$$J_{DG}(i) = q_1 \cdot P_{dg}(i)$$

$$J_{CUR}(i) = q_2 \cdot P_{cur}(i)$$

$$J_{WD}(i) = q_3 \cdot \left[T_{wd}^{ref} - T_{wd}(i) \right]^2$$

$$J_{BAT}(i) = q_4 \cdot \left[SOC(i) \right]^2 + q_5 \cdot \left[SOC_{ref} - SOC(i) \right]^2$$

Restricciones

La formulación del problema de optimización requiere que el sistema sea modelado como un conjunto de restricciones

En un problema de optimización convencional no se puede utilizar modelos híbridos, por tal motivo es necesario integrar variables binarias y auxiliares para reescribir el sistema bajo un marco *Mixed Logical Dynamic* (MLD)

$$SOC(k+1) = SOC(k) + \eta_{ch} \cdot T_s \cdot P_{bat, ch}(k) - \frac{\eta \cdot T_s}{C_{max}} \cdot P_{bat, dis}(k)$$

$$0 \geq P_{bat, ch}(k) \geq P_{bat, ch_max}(k) \cdot \delta_{ch}$$

$$0 \leq P_{bat, dis}(k) \leq P_{bat, dis_max}(k) \cdot \delta_{dis}$$

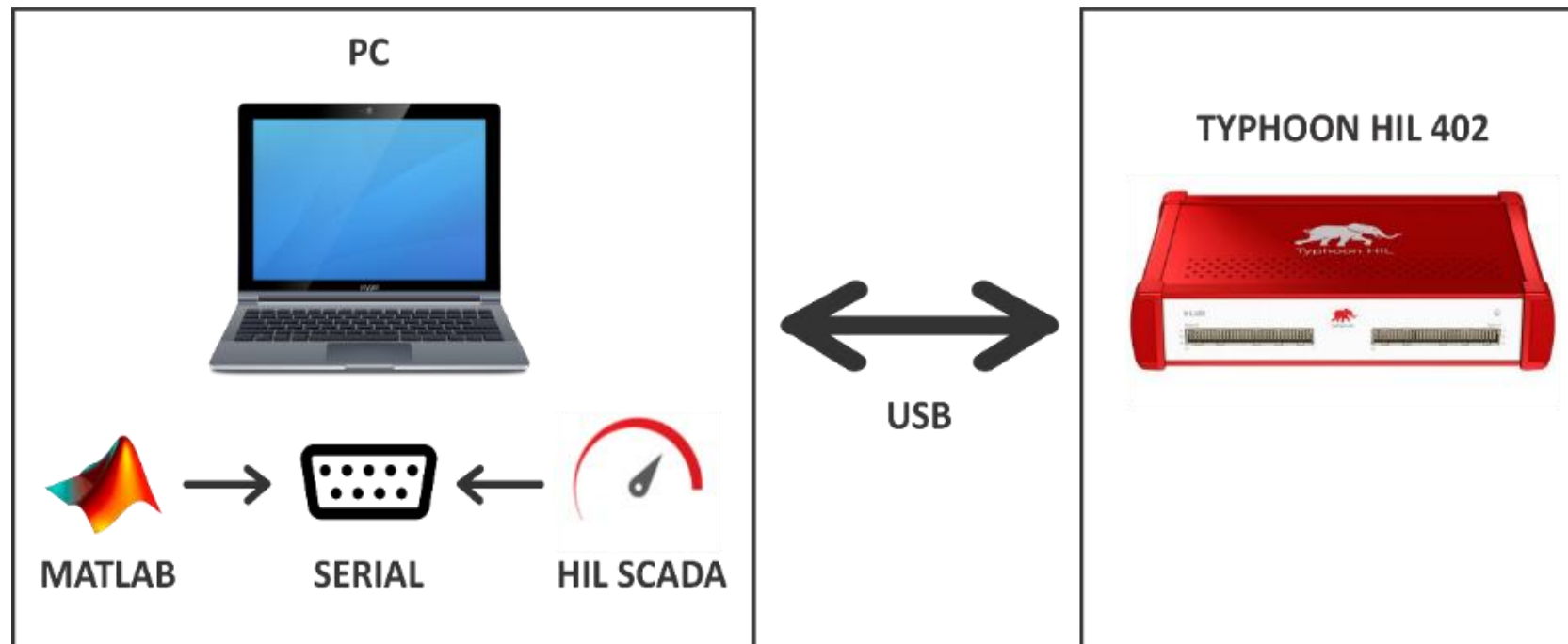
$$\delta_{ch} + \delta_{dis} \leq 1$$

$$P_{bat}(k) = P_{bat, dis}(k) + P_{bat, ch}(k)$$

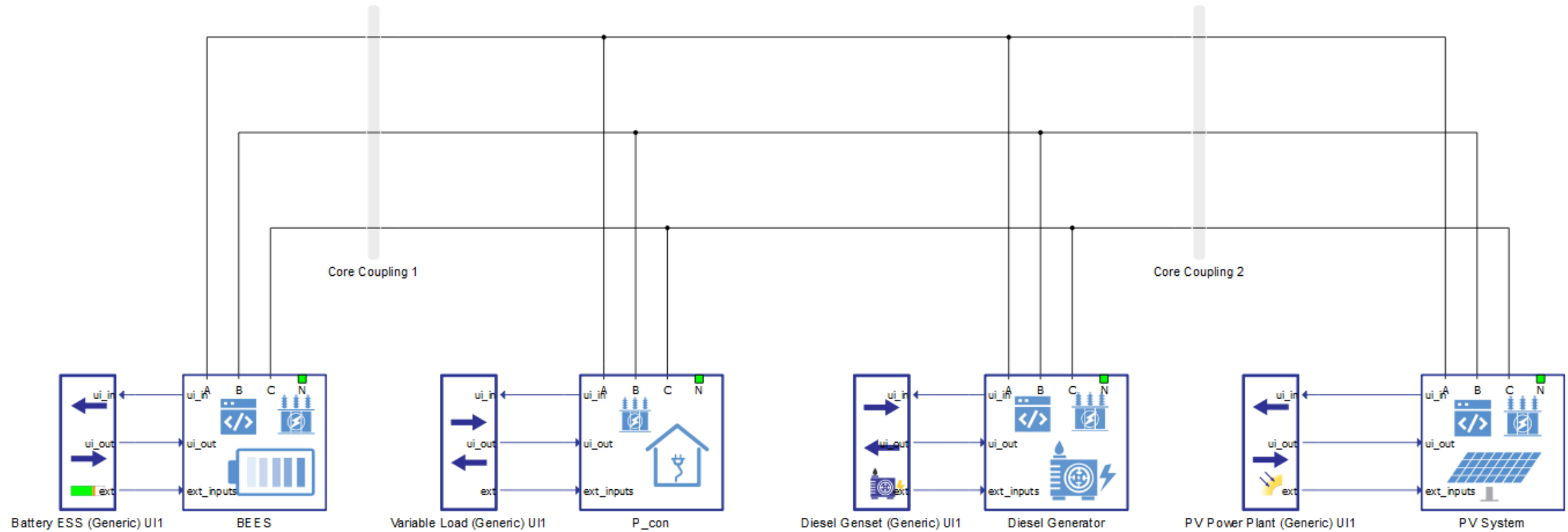
AGENDA

1. Introducción
2. Descripción del Sistema
3. EMS basado en MPC
- 4. Implementación en HIL**
5. Simulaciones y Resultados
6. Conclusiones
7. Trabajos Futuros
8. Publicaciones

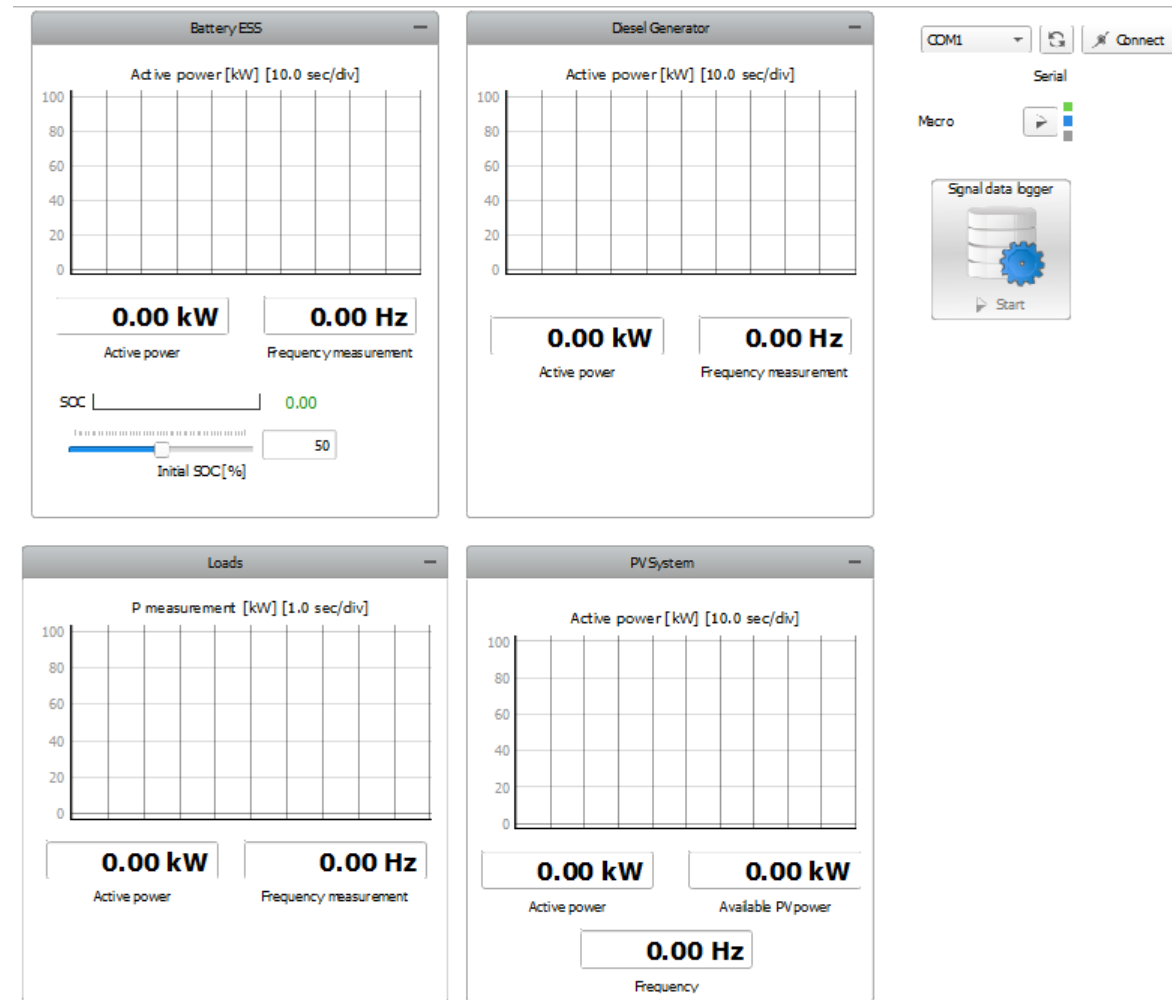
Para la validación del EMS propuesto se implementa la MG en el dispositivo Typhoon HIL 402 con el afán de obtener simulaciones en tiempo real. Estas simulaciones, permiten verificar el correcto funcionamiento de la estrategia de control en un entorno más aproximado a la realidad.



Typhoon HIL Control Center: Schematic Editor



Typhoon HIL Control Center: HIL SCADA



AGENDA

1. Introducción
2. Descripción del Sistema
3. EMS basado en MPC
4. Implementación en HIL
- 5. Simulaciones y Resultados**
6. Conclusiones
7. Trabajos Futuros
8. Publicaciones

Dimensionamiento de la MG

- HOMER Pro software
- Energy cost (COE) = \$ 0.36
- PV system → 47.5 kW
- Diesel generator → 30 kW
- ESS → 105 kWh
- % Renovable → 60 %

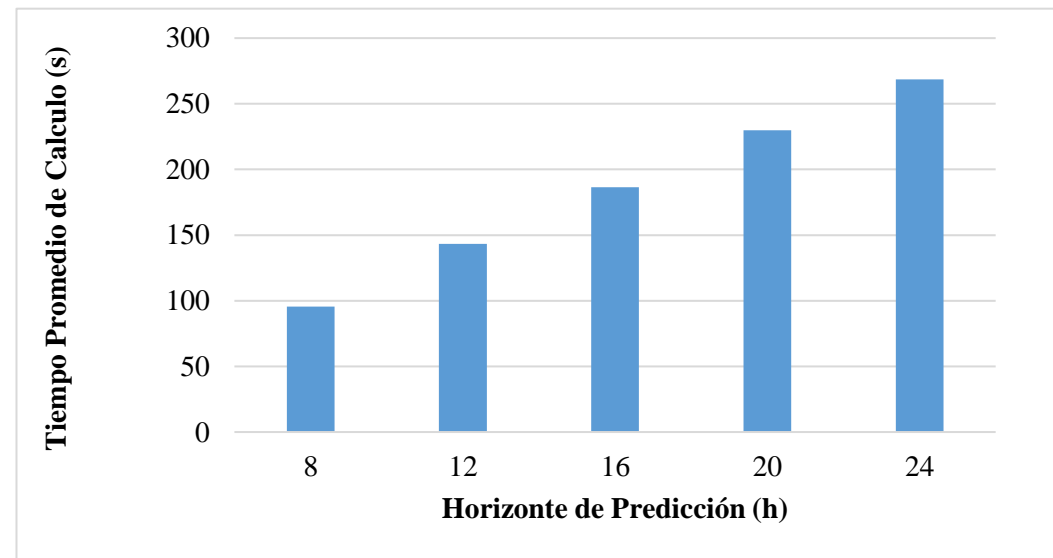
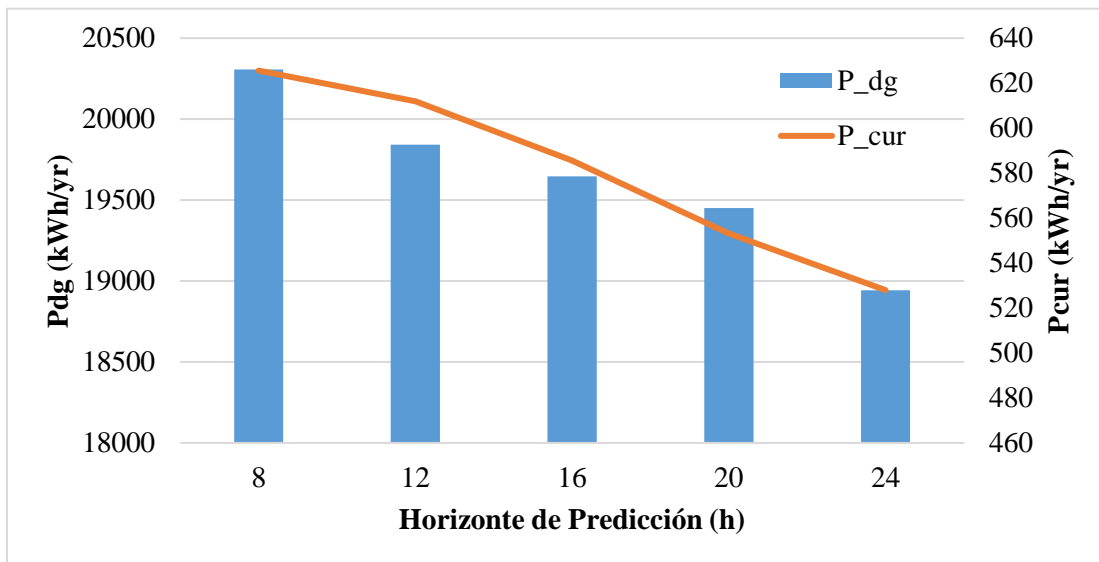
Integración de las Energías Renovables

Escenarios	P_{PV} (kWh)	P_{DG} (kWh)	Costo operacional (\$)	P_{cur} (kWh)
DG	0	77440	7240.33	-
DG+PV	61418	29079	2719.25	13028.52
DG+PV+BESS	61418	18943	1772.70	527.94

4. Simulaciones y Resultados

Análisis del EMS propuesto

Efecto del horizonte de Predicción.



Energía reducida en el sistema PV (--)

Utilización de recursos renovables (++)

Horizonte de predicción(++)

Tiempo computacional (++)

Energía suministrada por el DG (--)

Costo operativos

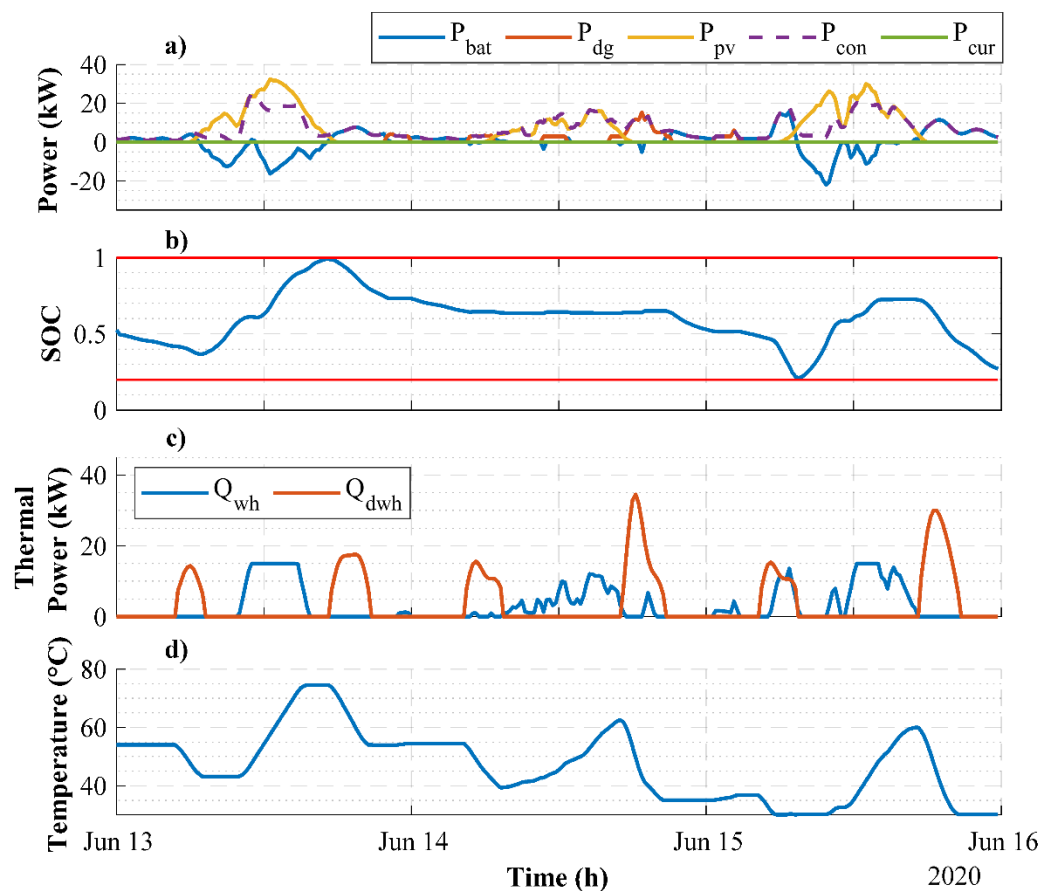
Emisiones de CO₂

4. Simulación y Análisis de Resultados

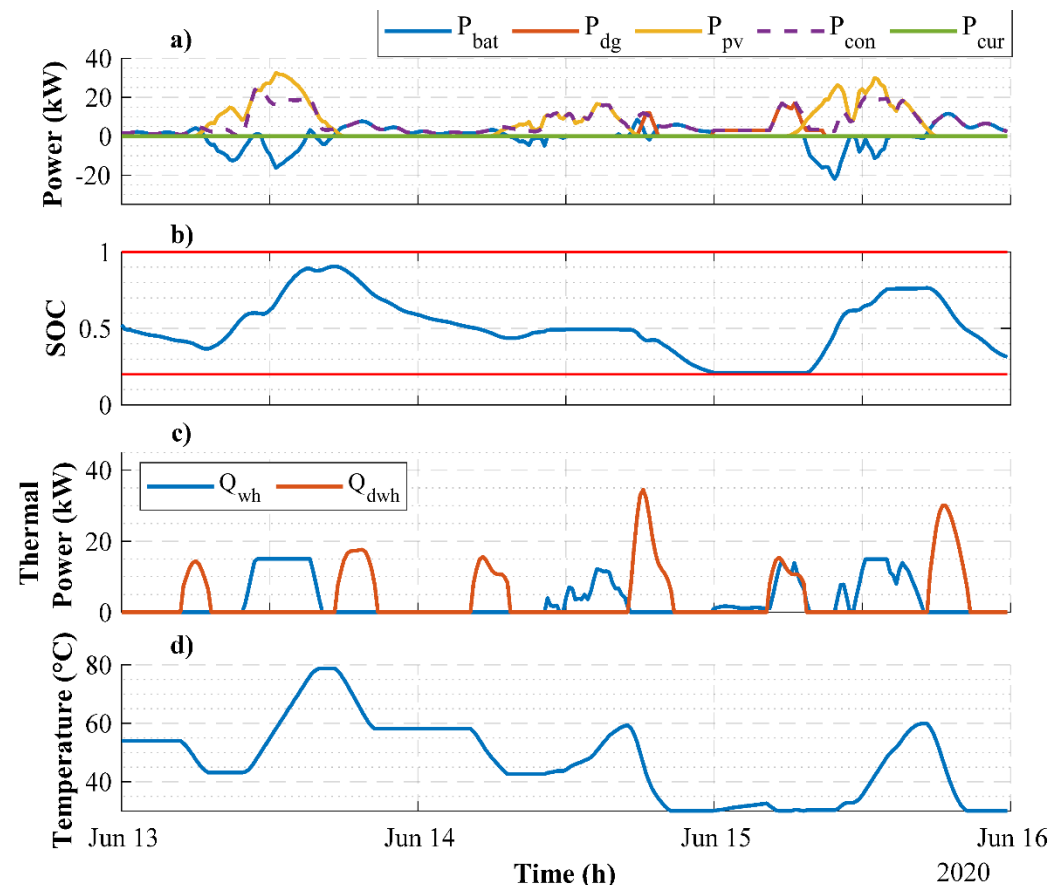
Análisis del EMS propuesto

Evaluación del EMS con diferentes escenarios de irradiancia. (Irradiancia moderada)

EMS - MPC



EMS – UC standard

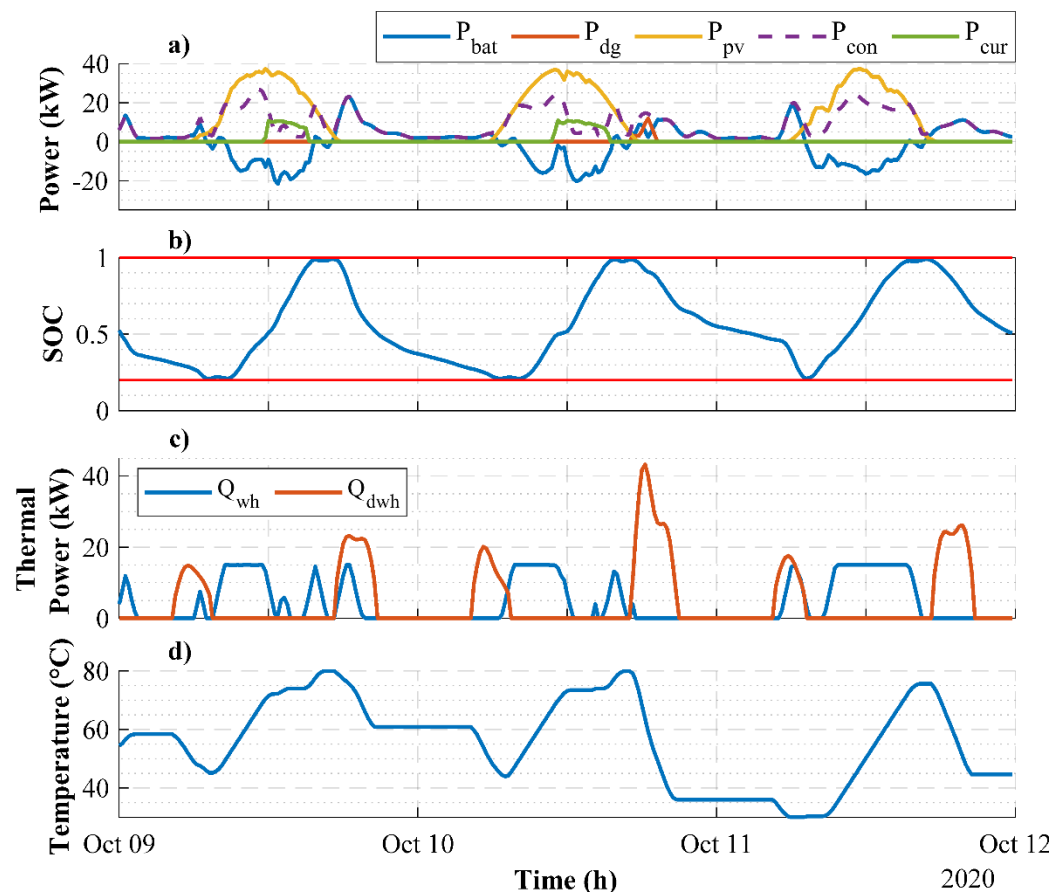


4. Simulaciones y Resultados

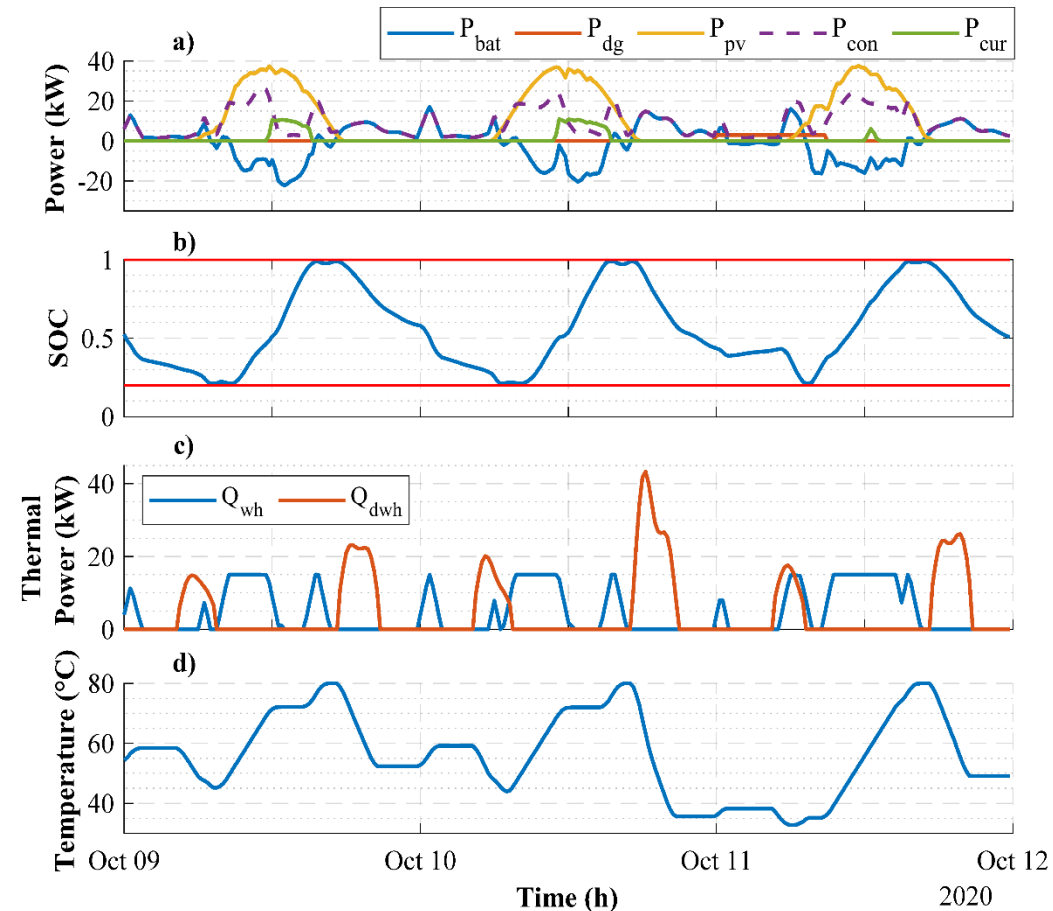
Análisis del EMS propuesto

Evaluación del EMS con diferentes escenarios de irradiancia. (Irradiancia alta)

EMS - MPC



EMS – UC standard

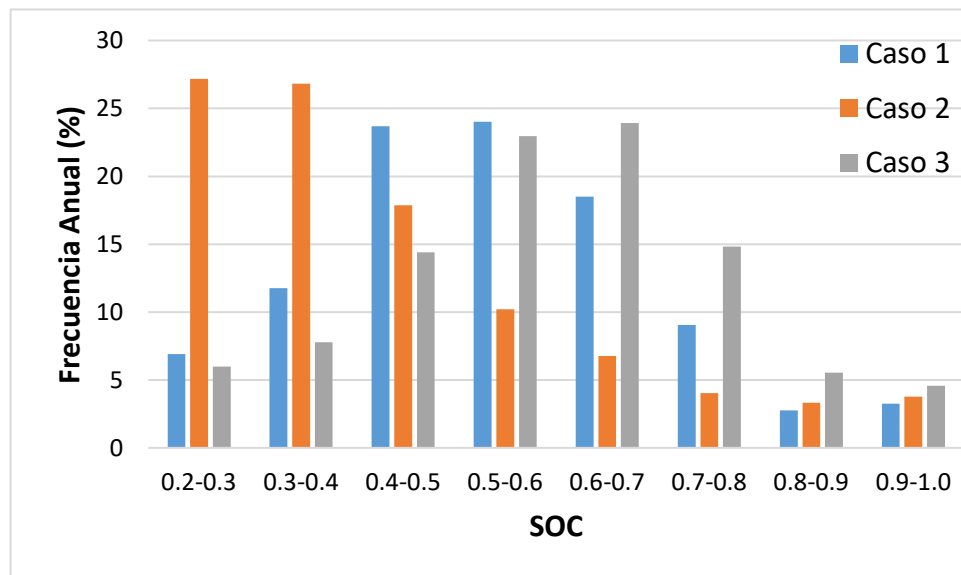


4. Simulaciones y Resultados

Análisis del EMS propuesto

Evaluación del EMS sin considerar ciertos objetivos en la función de costo.

1. Todos los objetivos.
2. Sin degradación de la batería.
3. Sin seguimiento a la temperatura de referencia.



	P_{DG} (kWh)	Cost (\$)	P_{cur} (kWh)	$RMSE_{Twd}$	ΔSOH (%)	Tiempo de cálculo (s)
Caso 1	18943	4662.4	527.94	49.26	-1.52	0.37
Caso 2	19894	4896.5	657.80	37.54	-1.65	0.42
Caso 3	19658	4838.2	556.06	50.79	-1.46	0.52

El error cuadrático medio (RMSE) del seguimiento a la temperatura de referencia ($RMSE_{Twd}$)

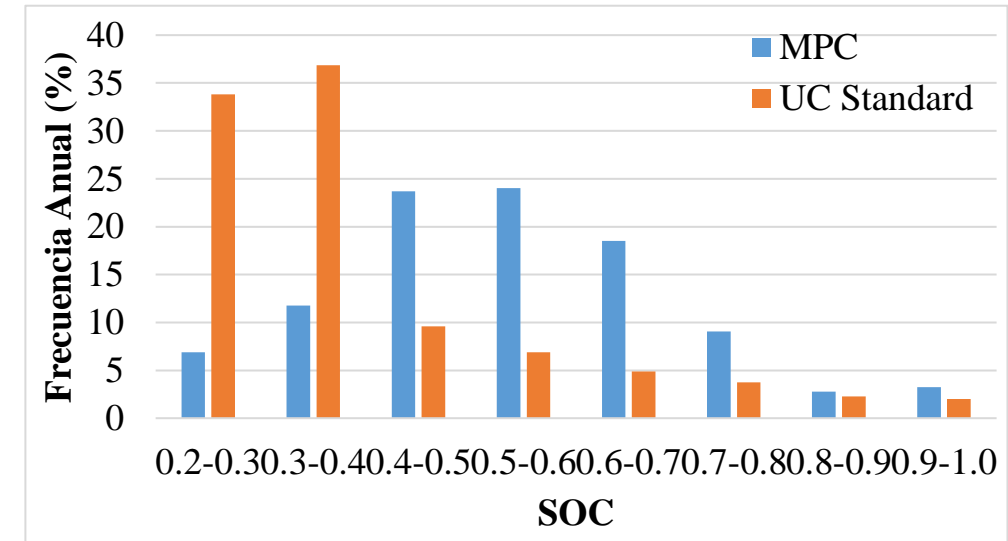


Métrica de rendimiento de confort del usuario de acuerdo al suministro de agua caliente

Análisis del EMS propuesto

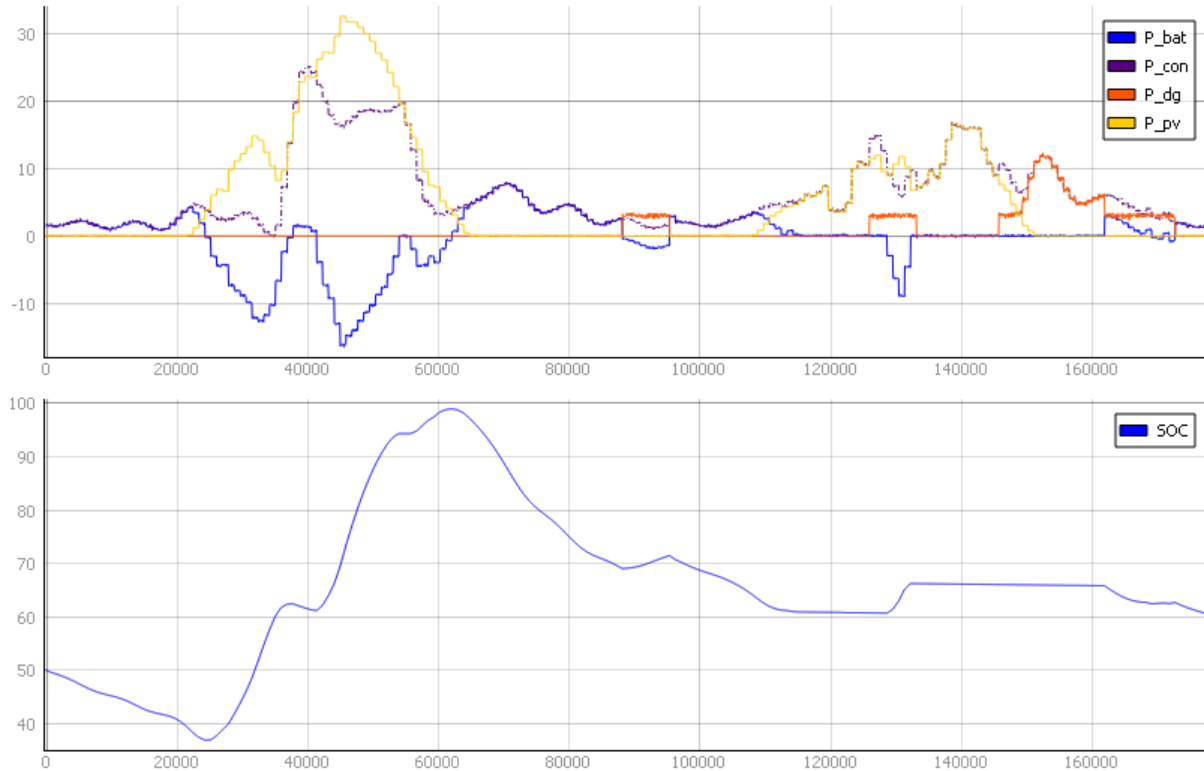
Comparación anual con un EMS basado en Unit Commitment standard.

	P_{DG} (kWh)	Cost (\$)	CO_2	P_{cur} (kWh)	$RMSE_{Twd}$	ΔSOH (%)
MPC	18943	1771.7	11190	527.9	49.26	-1.32
UC	20119	1881.7	11884	771.6	62.04	-1.78

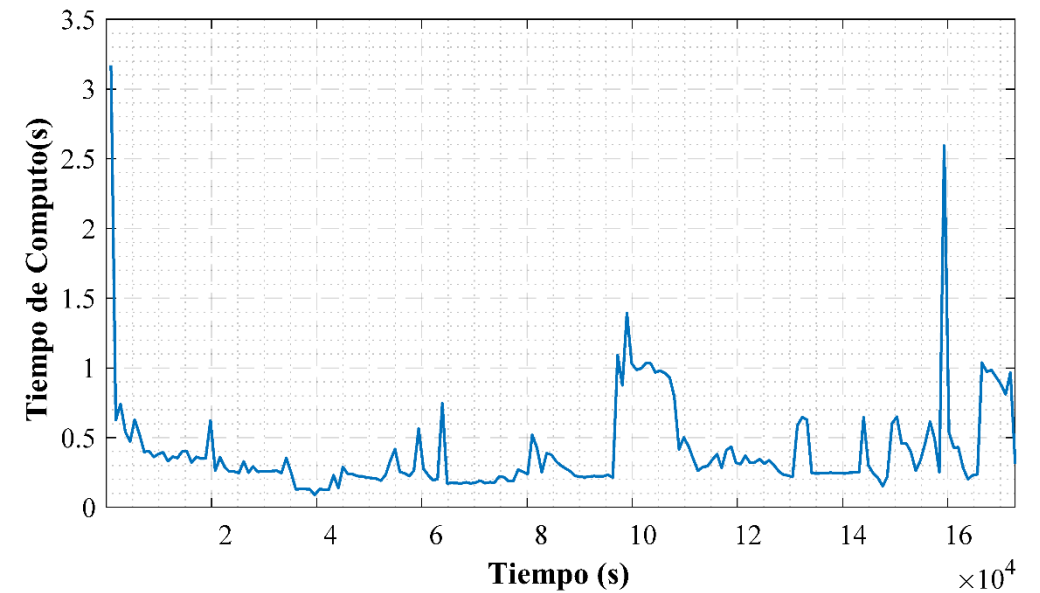


Validación del EMS propuesto

Despacho de la Energía en tiempo real



Tiempo de cálculo empleado para cada acción de control



AGENDA

1. Introducción
2. Descripción del Sistema
3. EMS basado en MPC
4. Implementación en HIL
5. Simulaciones y Resultados
- 6. Conclusiones**
7. Trabajos Futuros
8. Publicaciones

- ❖ Contribución al desarrollo de energías renovables en Ecuador → futuras implementación de MGs en áreas aisladas.
- ❖ SOLCAST → Datos meteorológicos con periodo de muestreo de 15 minutos, año 2020.
- ❖ Demanda → Eléctrica: estimación de consumo para cada electrodoméstico
 - Térmica: actividad de ducharse
 - Variabilidad diaria y horaria: 10% y 20 %
- ❖ EMS basado en MPC: Horizonte de predicción de 24 horas mayor rendimiento
 - Disminución del 6.71 % de energía producida por el DG
 - Disminución de 15.68 % de energía fotovoltaica reducida.

- ❖ Influencia de los objetivos de la función de costo en el rendimiento de la MG:
 - Sin degradación de la batería: 54 % de veces en niveles bajos de SOC
 - Sin seguimiento de la temperatura: RMSE aumenta 31.22 % comparado al principal.
- ❖ EMS propuesto comparado con EMS basado en UC standard
 - Costos de operación: reducen 5.86 %
 - Disminuye la energía fotovoltaica reducida 31.57 %
 - Degradación de la batería disminuye 0.46 % cada año.
- ❖ Validación experimental en Typhoon HIL 402:
 - Comportamiento del sistema similar a las simulaciones realizadas en Matlab.

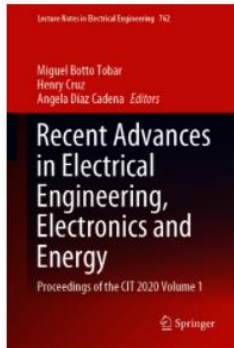
AGENDA

1. Introducción
2. Descripción del Sistema
3. EMS basado en MPC
4. Implementación en HIL
5. Simulaciones y Resultados
6. Conclusiones
- 7. Trabajos Futuros**
8. Publicaciones

- ❖ Marco metodológico detallado en cuanto a costos de implementación → dimensionamiento de MG en Ecuador
- ❖ Métodos de predicción de generación fotovoltaica y predicción de la demanda → Redes Neuronales
- ❖ Desarrollo de un EMS basado en MPC estocástico → mayor robustez para manejar incertidumbres

AGENDA

1. Introducción
2. Descripción del Sistema
3. EMS basado en MPC
4. Implementación en HIL
5. Simulaciones y Resultados
6. Conclusiones
7. Trabajos Futuros
- 8. Publicaciones**



[1]
Recent Advances in
Electrical Engineering,
Electronics and Energy



[2,3]
European Conference on
Power Electronics and
Applications EPE 2021

IEEE
Access®

- [1] Rodríguez M., Salazar A., Arcos-Aviles D., Llanos J., Martínez W., Motoasca E. (2021) A Brief Approach of Microgrids Implementation in Ecuador: A Review. In: Botto Tobar M., Cruz H., Díaz Cadena A. (eds) Recent Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy. CIT 2020. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 762. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72208-1_12
- [2] A. Salazar et al., "Model predictive control-based energy management system for isolated electro-thermal microgrids in rural areas of Ecuador," 2021 23rd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'21 ECCE Europe), 2021, pp. 1-10. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9570196>
- [3] M. Rodriguez et al., "Fuzzy-based energy management system for isolated microgrids using generation and demand forecast," 2021 23rd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'21 ECCE Europe), 2021, pp. 1-10. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9570529>

¡ Gracias !



¿ Preguntas ?



Contacto:

Antonio Salazar

iasalazar3@espe.edu.ec