

Modelado de Centrales Fotovoltaicas para aplicación de Restricciones Operativas



UNIVERSIDAD
DE LA REPUBLICA
URUGUAY



Ing. Diego Oroño
Ing. Gonzalo Hermida
Dr. Ing. Mario Vignolo



Agenda



- Introducción y motivación
- Análisis del modelo ADME
- Definición de indicadores
- Modelación y análisis de funcionamiento
- Desarrollo de un modelo teórico
- Conclusiones y recomendaciones



Introducción y Motivación



Introducción y Motivación

- En el escenario energético nacional, y teniendo en cuenta de la generación no despachable, eólica y fotovoltaica, se han constatado casos de sobreoferta de energía en los que resulta necesario que ADME imponga Restricciones operativas (RROO).
- En el Decreto N° 59/015 se fijan normas regulatorias de los contratos de compraventa de energía de fuente eólica y solar fotovoltaica relacionadas con el pago de la energía que el generador se encuentre en condiciones de generar, pero que por restricción operativa establecida por el Despacho Nacional de Carga, no resulte despachada en forma total o parcial.

Introducción y Motivación

- Convenio de Cooperación entre ADME y FJR de forma tal de realizar una consultoría de modelos de forma tal de poder aplicar las correspondientes restricciones operativas.
- Grupo de Investigación en Energía Solar Fotovoltaica (PV_UY) del IIE, de UdelaR.



Alcance del trabajo

- Análisis de la modelación implementada por ADME
- Proponer y acordar indicadores de los resultados de modelación
- Modelación de las centrales
- Análisis del desempeño de las centrales en base a la información meteorológica
- Propuestas de campañas de medición
- Conclusiones y recomendaciones

Análisis de la modelación implementada por ADME



Análisis de la modelación

- ADME propone un modelo empírico del tipo:

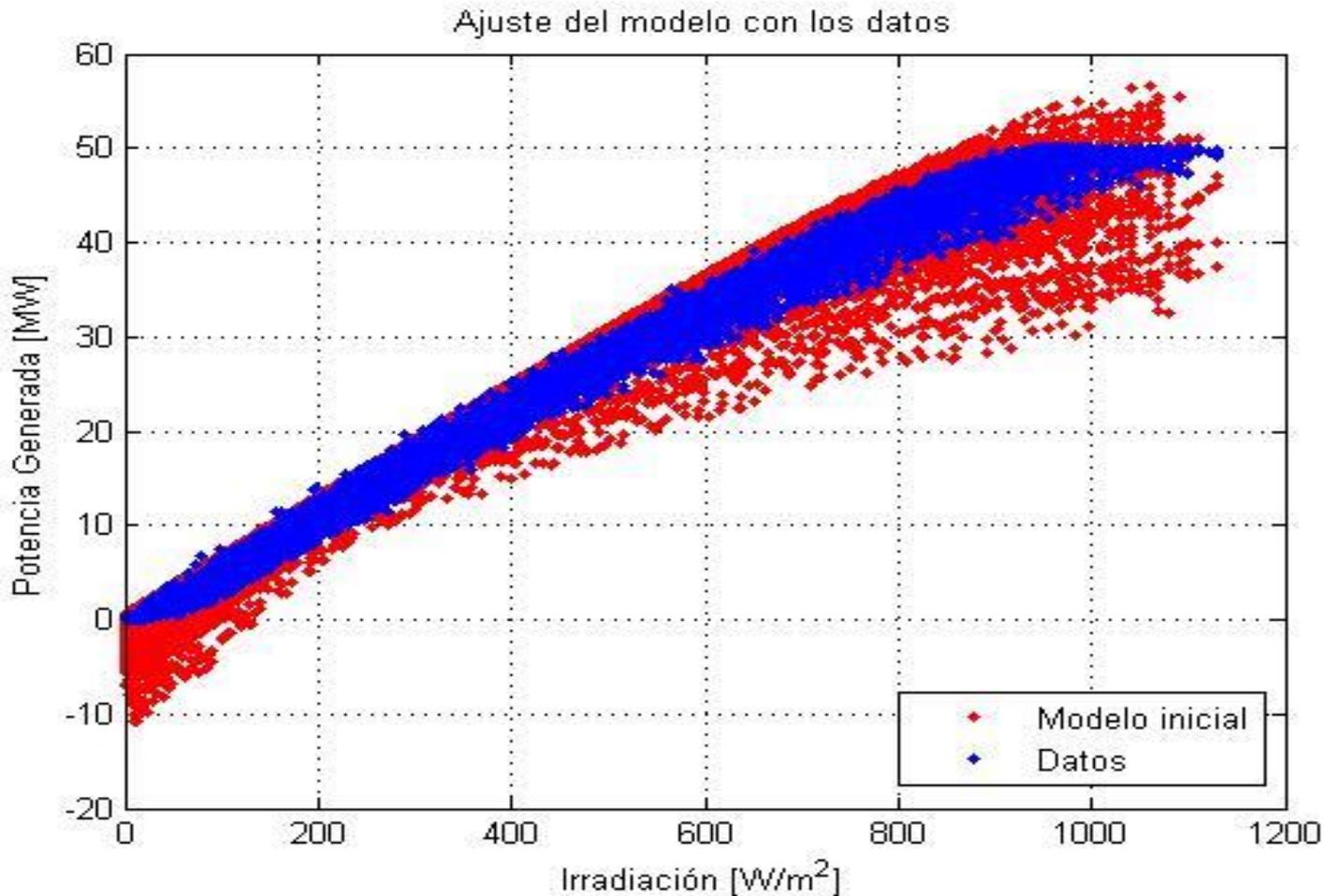
$$P_E(r, T) = c_1 r + c_2 T + c_3 r^2 + c_4 r T + c_5 T^2$$

Siendo P_E la potencia eléctrica (en MW) inyectada por la central en la red, r la radiación solar recibida en el piranómetro (en el plano de los paneles) y T la temperatura ambiente.

- Los parámetros **c1...c5** se calibran por mínimos cuadrados.

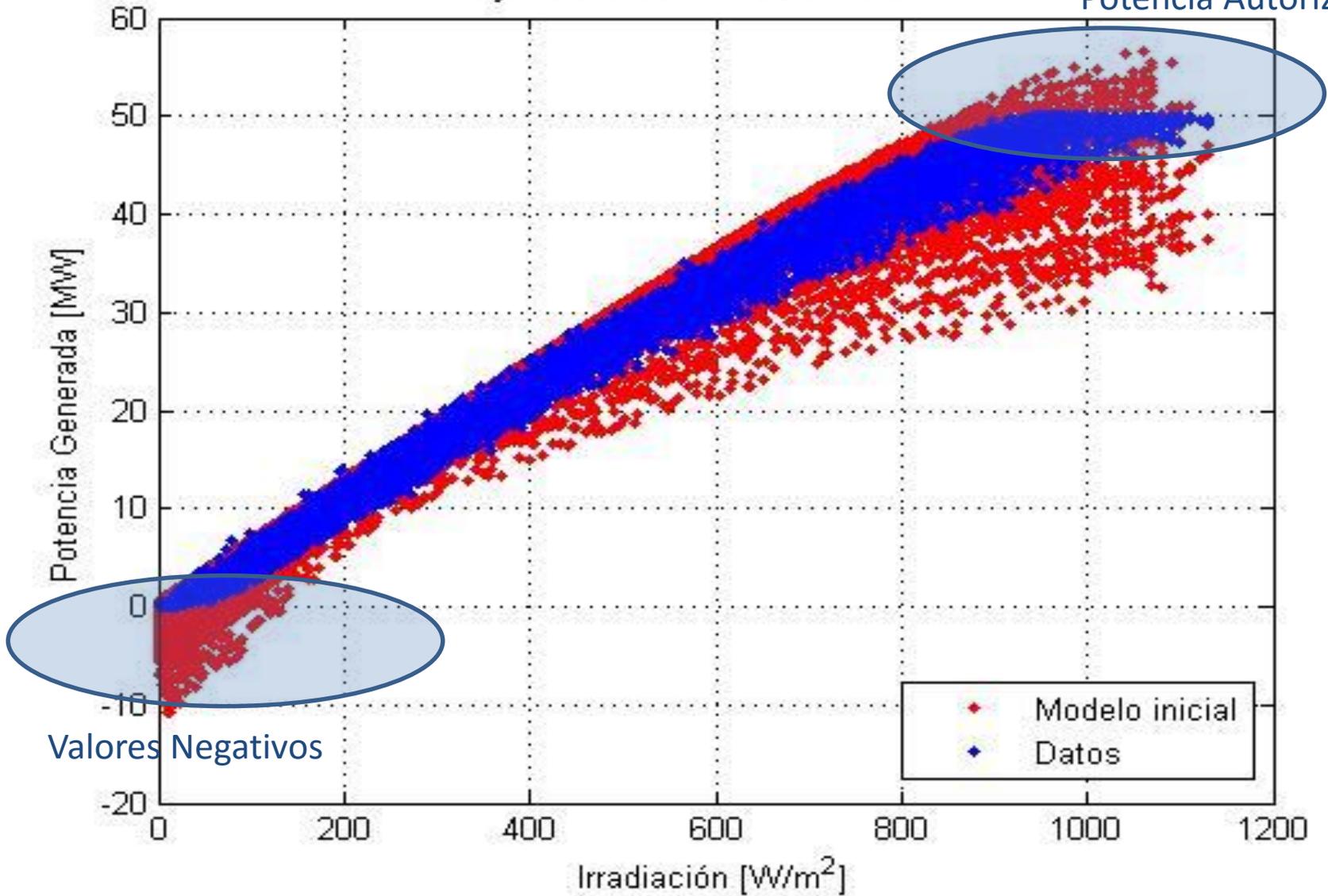
Ejemplo: Central Fotovoltaica “La Jacinta”

$$P_E(r, T) = 8.9E(-2) + 1.09T \pm 1.84E(-5)r^2 - 1.04E(-3)rT - 2.27E(-2)T^2 - 12.5$$



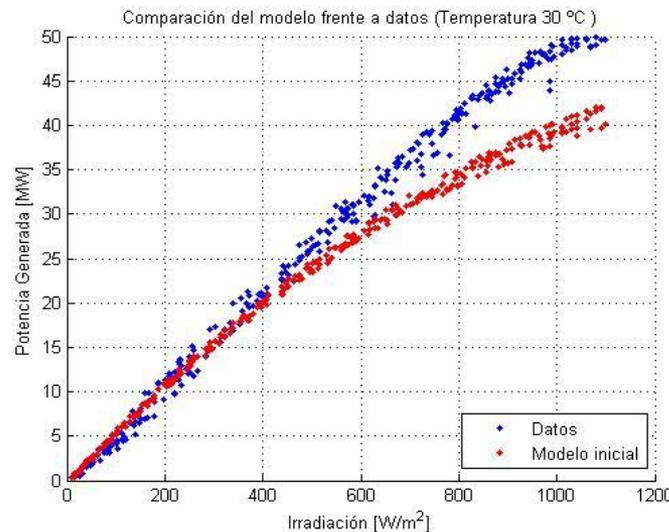
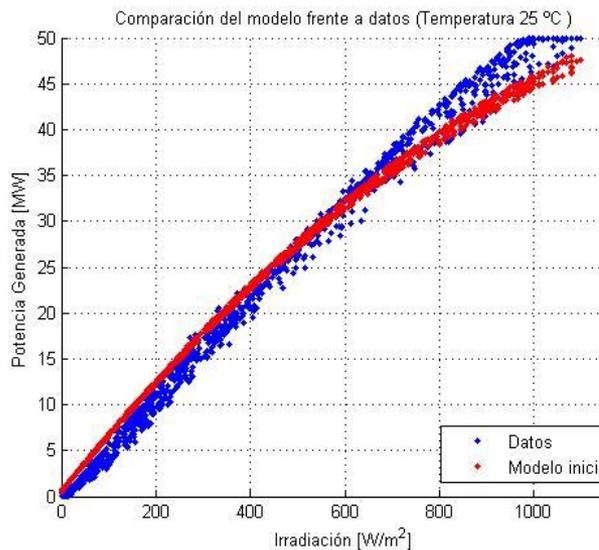
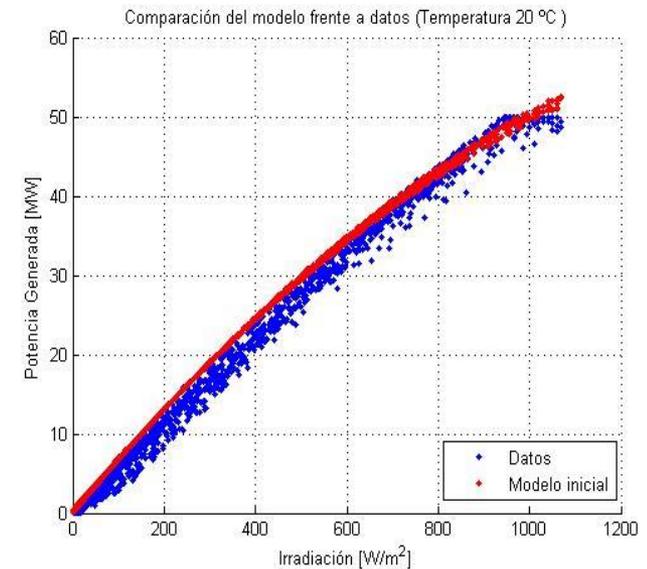
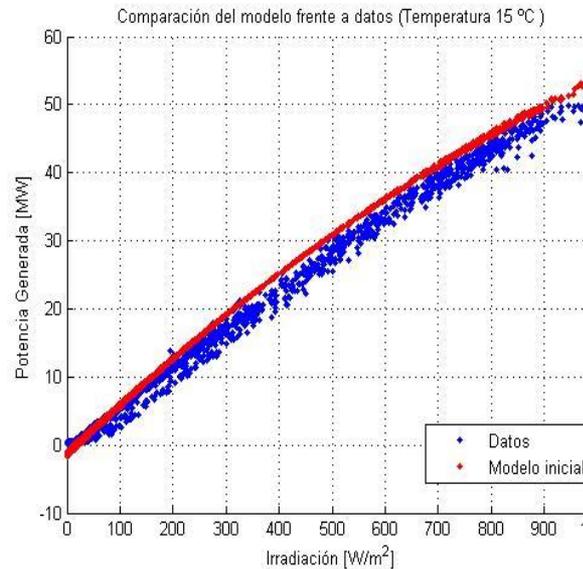
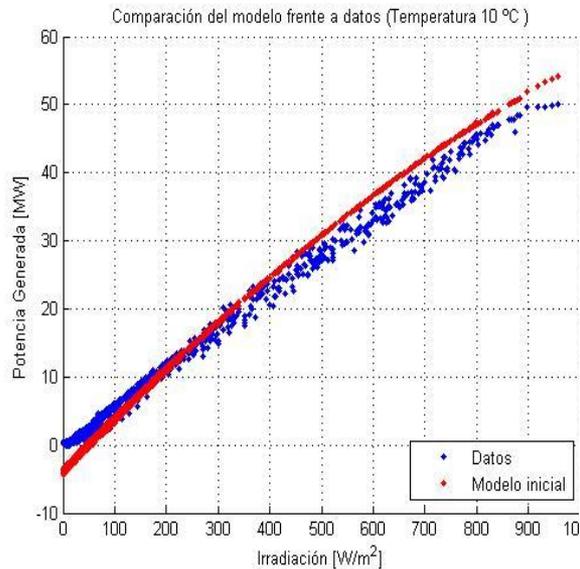
Ajuste del modelo con los datos

Límite Superior:
Potencia Autorizada



Valores Negativos

Dependencia con la temperatura



Para el caso de temperaturas bajas (10 °C) el modelo sobreestima la generación y en temperaturas altas (30 °C) el modelo subestima la generación



Definición de indicadores



Indicadores para analizar los modelos

- **MBE (Mean Bias Error)**: representa la desviación del modelo con las medidas. Se calcula el promedio del sesgo.

$$MBE = \frac{\sum_{n=1}^N (P_{modelo_n} - P_{medidas_n})}{N}$$

- **MAE (Mean Absolute Error)**: representa la desviación del modelo con las medidas en valor absoluto.

$$MAE = \frac{\sum_{n=1}^N |P_{modelo_n} - P_{medidas_n}|}{N}$$

- **RMSE (Root Mean Square Error)**: representa el error cuadrático medio del modelo y se calcula con la expresión que se encuentra a continuación.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (P_{modelo_n} - P_{medidas_n})^2}{N}}$$

A los efectos de la comparativa entre modelos se utilizarán las versiones normalizadas de estos indicadores

- **MBE normalizado**

$$MBE_{normalizado} = \frac{MBE}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N P_{medidas_n}} = \frac{\sum_{n=1}^N (P_{modelo_n} - P_{medidas_n})}{\sum_{n=1}^N P_{medidas_n}}$$

- **MAE normalizado**

$$MAE_{normalizado} = \frac{MAE}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N P_{medidas_n}} = \frac{\sum_{n=1}^N |P_{modelo_n} - P_{medidas_n}|}{\sum_{n=1}^N P_{medidas_n}}$$

- **RMSE normalizado**

- $RMSE_{normalizado} = \frac{RMSE}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N P_{medidas_n}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (P_{modelo_n} - P_{medidas_n})^2}{N}}}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N P_{medidas_n}}$

Modelación y análisis de funcionamiento

$Q = mc\Delta T$

$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{(1+x)^n - 1}{x} = n$

$v^2 - v_0^2 = 2a(x - x_0)$

$T = \frac{2\pi}{\omega}$

$V = v_0 + at$

$P = mV$

$v = \omega r$

$\frac{\sin \alpha}{a} = \frac{\sin \beta}{b} = \frac{\sin \gamma}{c}$

$a^2 + b^2 - 2ab \cos \gamma = c^2$

$E = mc^2$

$F = \frac{\Delta P}{\Delta t}$

$\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1$

$E_k = \frac{1}{2}mv^2$

$y = x^2 + a$

$v = f\lambda$

$PV = nRT$

$P = IV$
 $= \frac{V^2}{R}$
 $= I^2 R$

$2H_2 + O_2 \rightleftharpoons 2H_2O$

$\omega = 2\pi f$

$\Delta P = \rho g \Delta h$

$K_{eq} = \frac{[H_2O]^2}{[H_2]^2 [O_2]}$

$\Delta E = h\nu$

$F = \frac{G m_1 m_2}{r^2}$

Diagrams include a triangle with angles α, β, γ and sides a, b, c ; a parabolic graph with vertex a ; a sine wave with wavelength λ and frequency f ; a circuit diagram with a battery, a resistor, a voltmeter, and an ammeter; and a molecular structure of a phenol ring.

Modelación y análisis de funcionamiento

- Se consideran los tres proyectos fotovoltaicos con sets de datos suficientes
- **La Jacinta:**
 - Ubicado en Salto, Salto
 - Potencia nominal de 50 MW
 - Datos disponibles desde 30/09/2015
- **Raditon:**
 - Ubicado en Casa Blanca, Paysandú
 - Potencia nominal de 8 MW
 - Datos disponibles desde 17/11/2015
- **Alto Cielo:**
 - Ubicado en Tomás Gomensoro, Artigas
 - Potencia nominal de 20 MW
 - Datos disponibles desde 15/02/2016



- Inicialmente se realizó un filtrado de datos inválidos
- Factor de disponibilidad no confiable – Se consideró disponibilidad 100%
- Se calculan los parámetros de los modelos:

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
La Jacinta	6.51E-02	-6.11E-02	-1.18E+09	-1.79E-04	1.13E-03
Raditon	1.07E-02	-7.31E-02	1.73E-07	-1.35E-04	2.95E-03
Alto Cielo	3.01E-02	-1.19E-02	-7.09E-06	-1.47E-04	-4.15E-04

- Y los correspondientes indicadores:

	MBE (%)	MAE (%)	RMSE (%)
La Jacinta	-0.3	7.3	14.8
Raditon	0.1	12.2	21.1
Alto Cielo	-0.5	10.3	20.2



- Se propone la aplicación de un segundo filtro más fino, para eliminar datos inválidos. Se elimina el 10% de los puntos que más se apartan del modelo calculado y se recalculan coeficientes

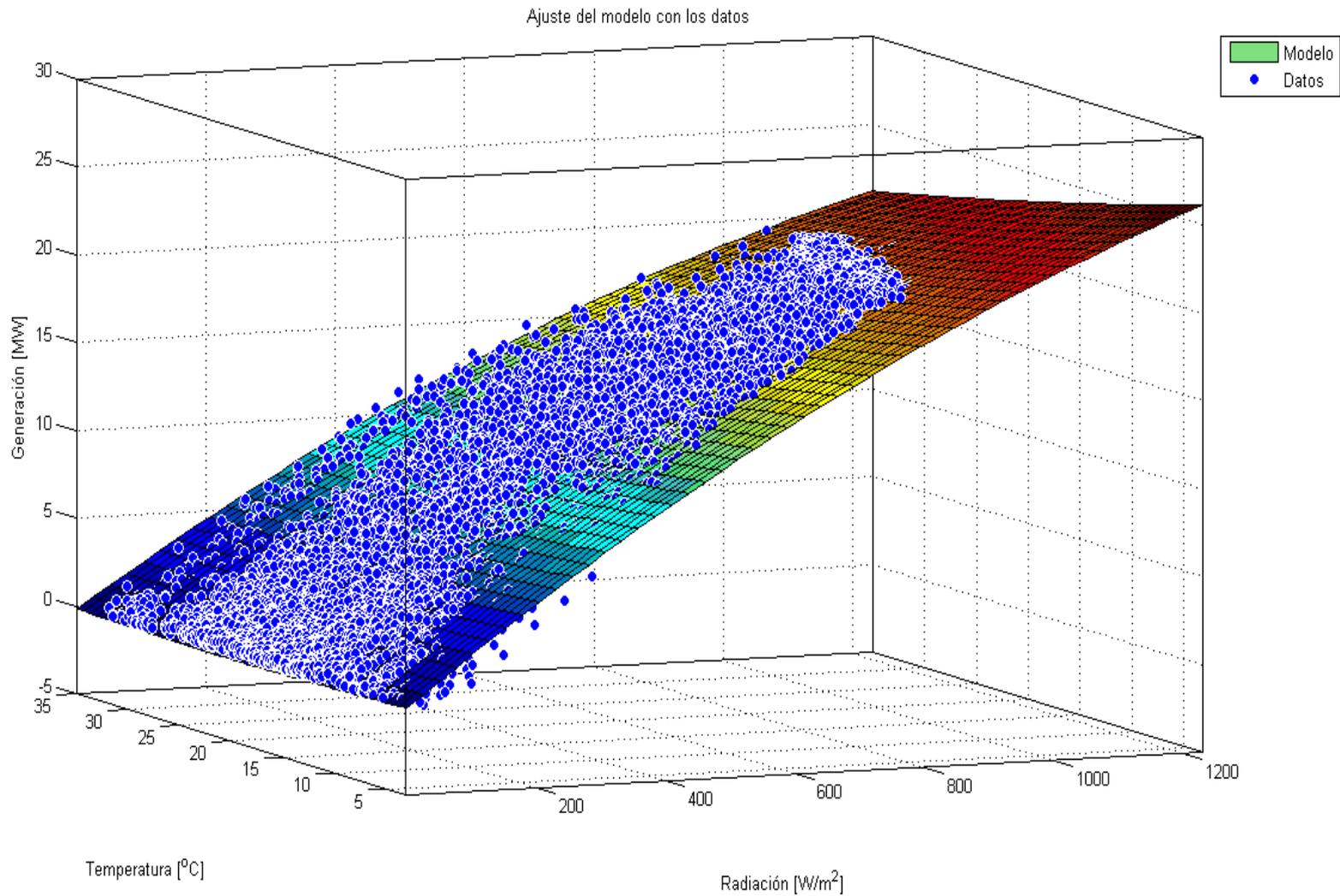
	MBE (%)	MAE (%)	RMSE (%)
La Jacinta	-0.2	4.4	5.9
Raditon	0.0	6.2	8.2
Alto Cielo	-0.2	5.9	7.9

- Modelo inicial:

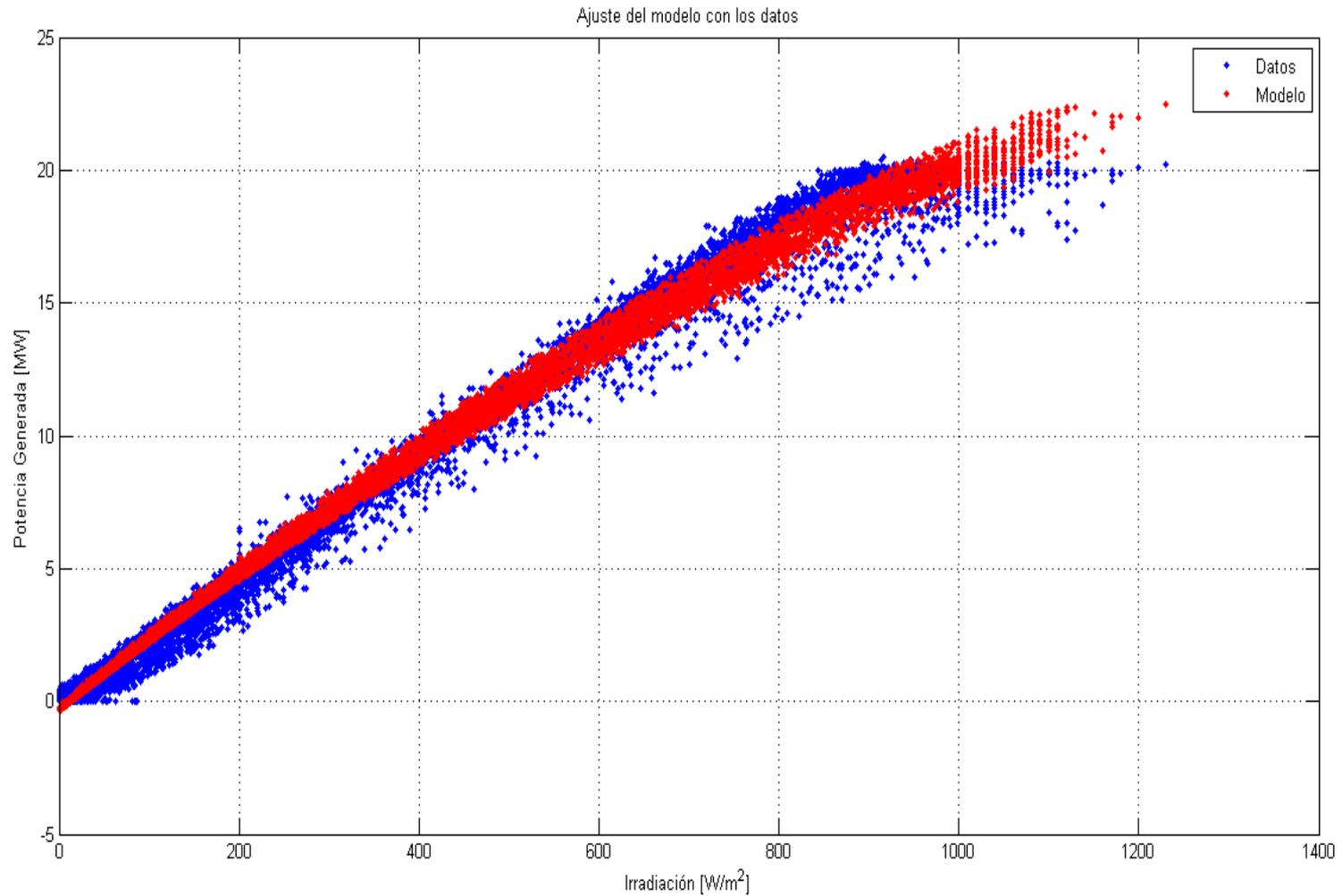
	MBE (%)	MAE (%)	RMSE (%)
La Jacinta	-0.7	11.3	15.5



- Ejemplo – Central Alto Cielo



- Ejemplo – Central Alto Cielo



Problemas y mejoras del modelo

- El modelo es adecuado para la mayoría de los valores de irradiación, pero se observa que para valores altos de irradiación no representa correctamente la generación → Consideración de potencia pico.

	Potencia Pico (MWp)	Potencia Nominal (MW)	Sobredimensionado (%)
La Jacinta	67.2	50	34.4%
Raditon	9.5	8	18.8%
Alto Cielo	26.3	20	31.5%

- Los generadores pueden llegar a una potencia similar a la nominal con distintos valores de irradiación.



Modelo 1 tramo - topeado

- Se ajusta el modelo, de forma tal que si los valores de generación son cercanos a la potencia autorizada no se utilizan para calcular el modelo empírico.
- La calibración del polinomio se realiza sólo para aquellos datos cuya potencia generada es menor al 99% de la potencia autorizada

Modelo 1T topeado	MBE (%)	MAE (%)	RMSE (%)
La Jacinta	-0.2	4.0	5.5
Raditon	0.2	6.1	8.1
Alto Cielo	0.2	5.3	7.3



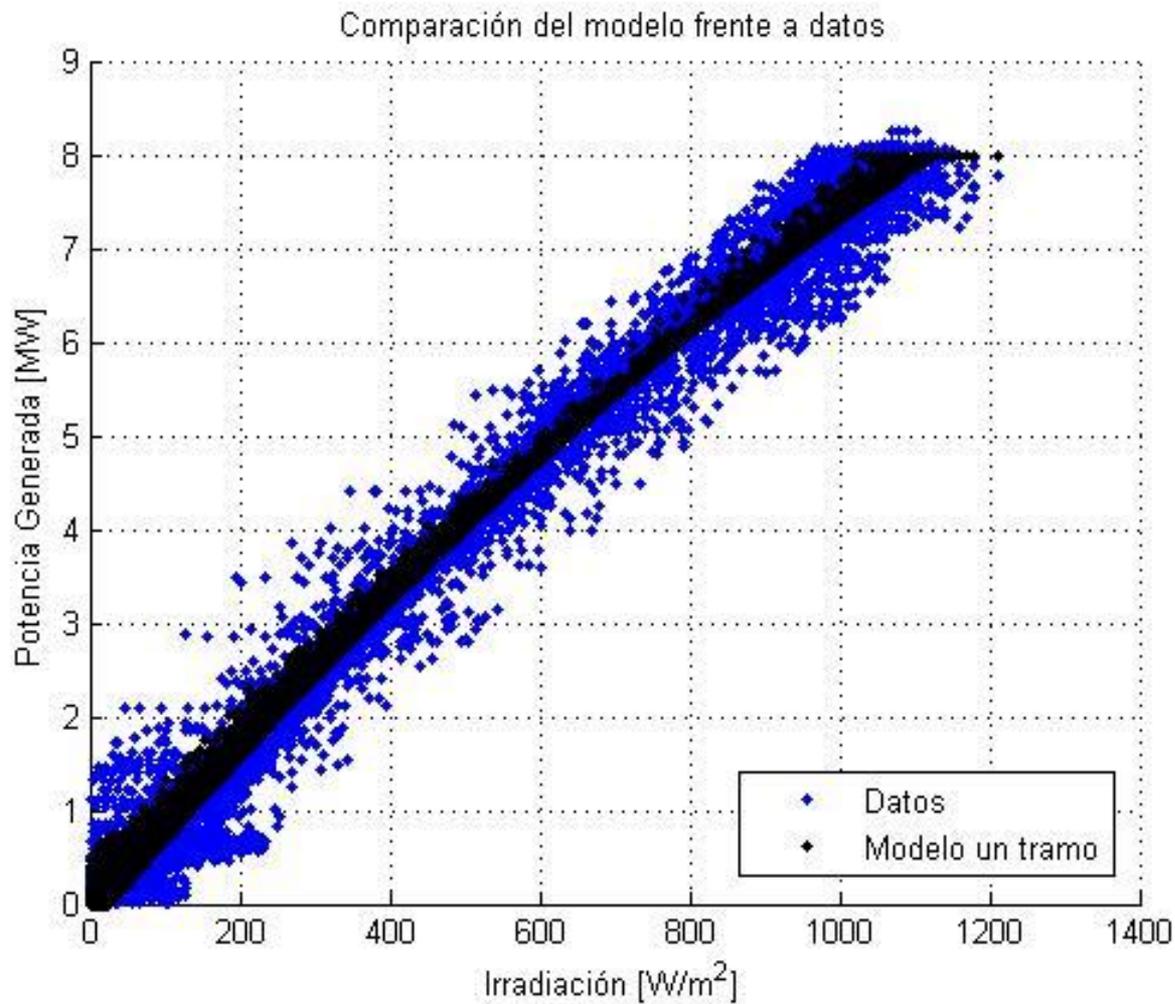
Término independiente

- Se analizó si el nuevo ajuste del modelo mejoraba al agregar un término independiente.
- $P_E(r, T) = c_0 + c_1r + c_2T + c_3r^2 + c_4rT + c_5T^2$

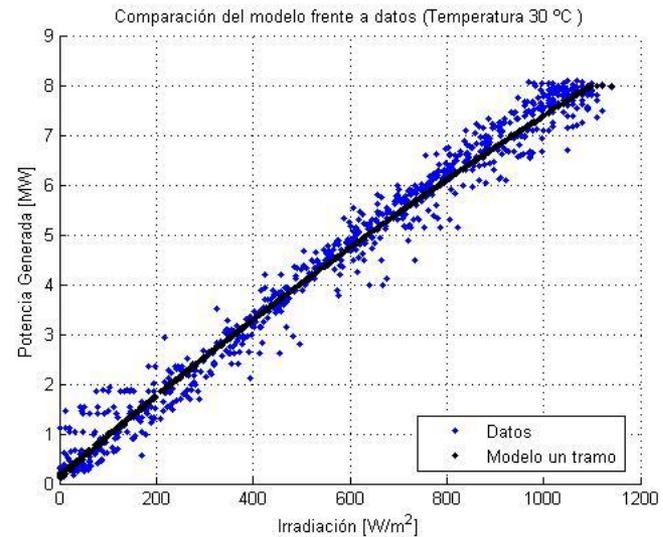
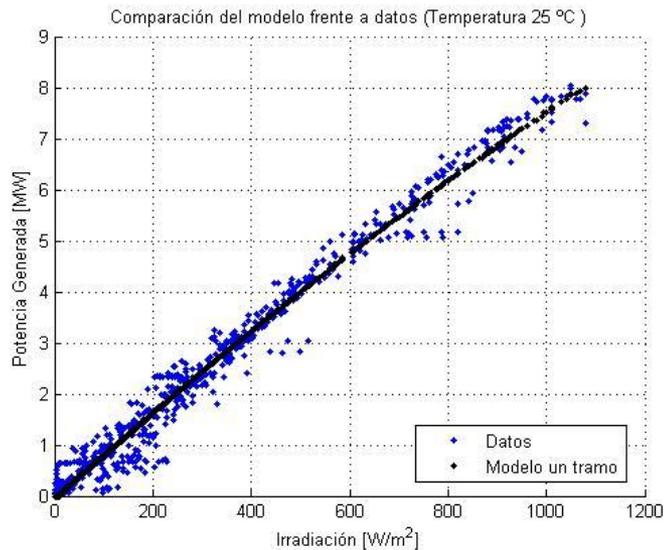
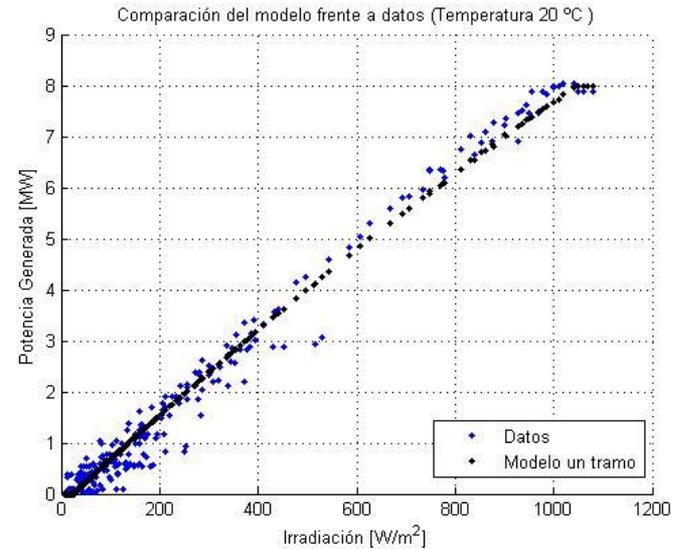
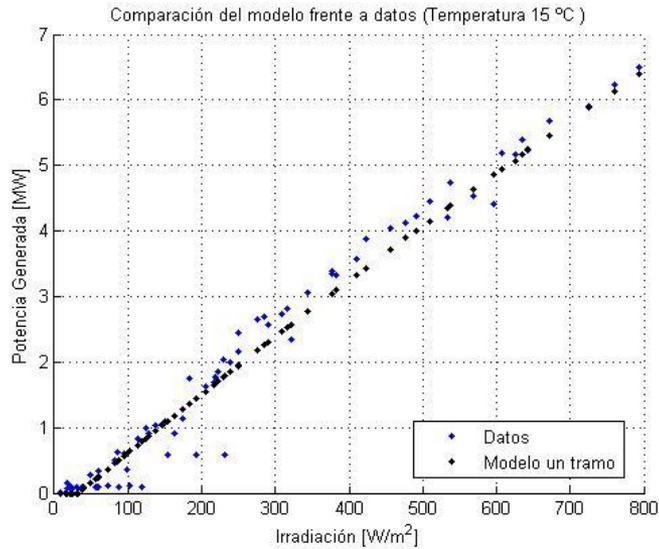
Modelo un tramo con TI	MBE (%)	MAE (%)	RMSE (%)
La Jacinta	-0.1	3.9	5.4
Raditon	0.2	6.1	8.1
Alto Cielo	0.2	5.1	7.1

- Comparando los desvíos obtenidos se nota una leve mejora al agregar el término independiente por lo que se recomienda su uso.

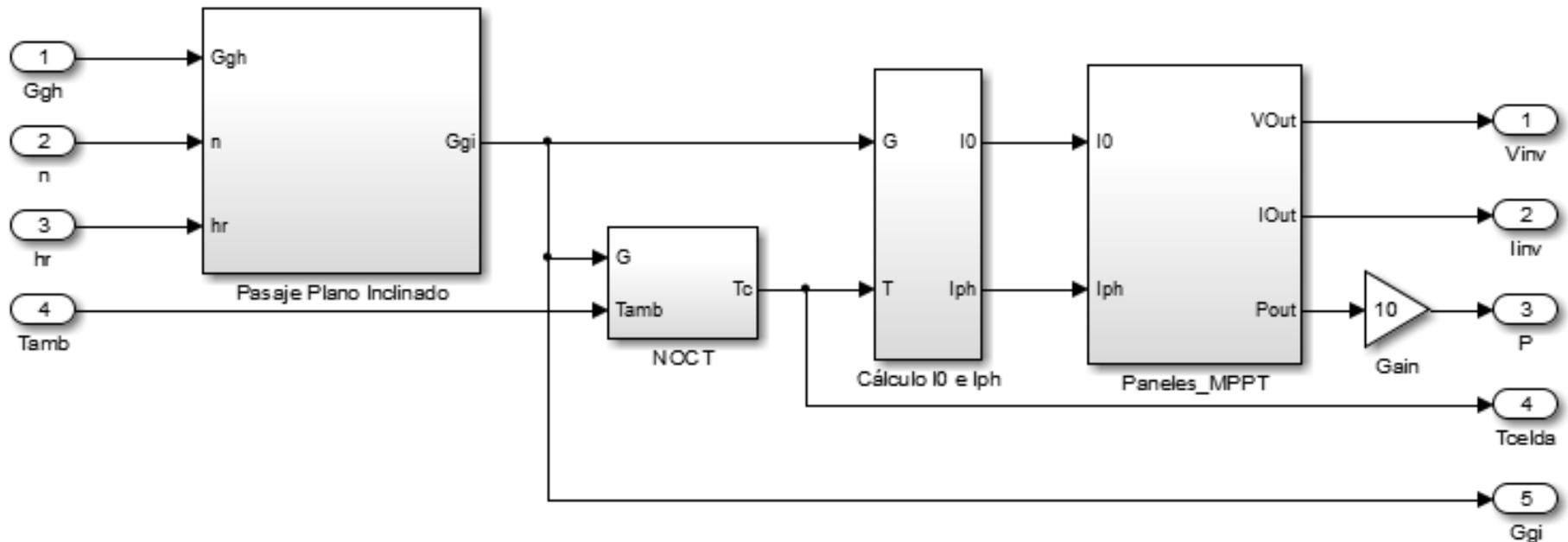
- Ejemplo – Central RADITON



Dependencia con la temperatura



Desarrollo de un modelo teórico

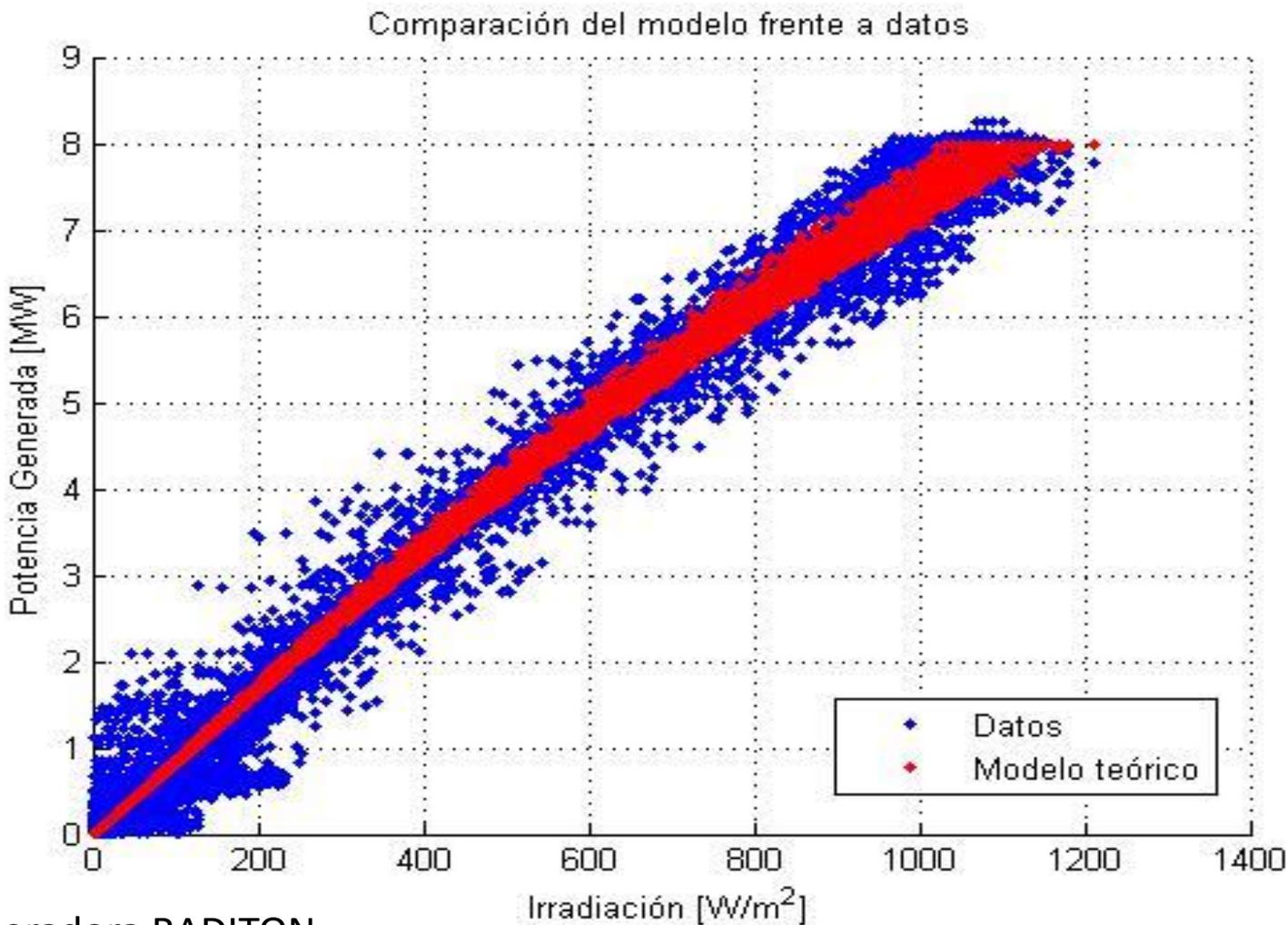


Desarrollo de un modelo teórico

- Como contrapartida del modelo empírico analizado, se propuso utilizar el modelo computacional teórico desarrollado por el Grupo de Investigación PV_UY. El mismo se encuentra desarrollado sobre Matlab.
- El modelo global de la planta se puede dividir en los siguientes bloques:
 - Pasaje a plano del panel (No utilizado)
 - Panel fotovoltaico
 - MPPT (Maximum Power Point Tracker)
 - Pérdidas globales de la planta
- Una descripción detallada del modelo teórico se encuentra en el informe presentado a la ADME.

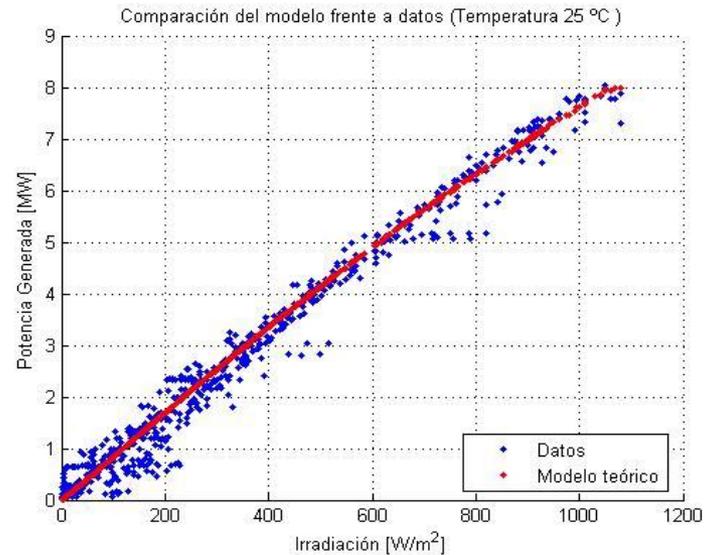
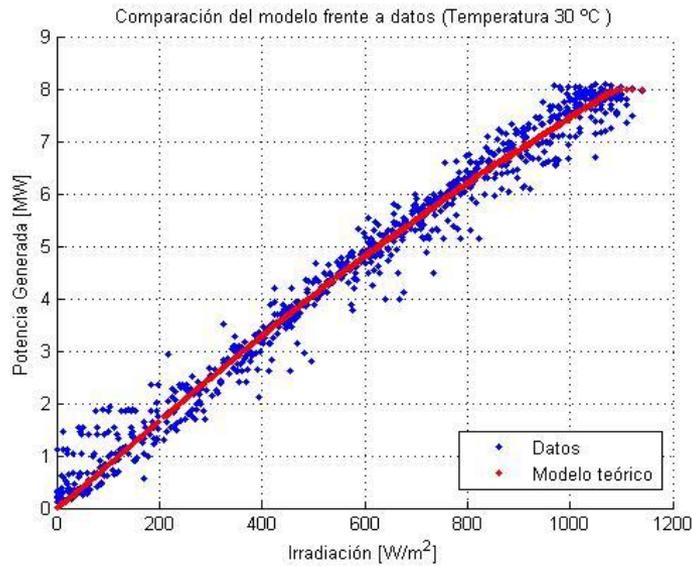
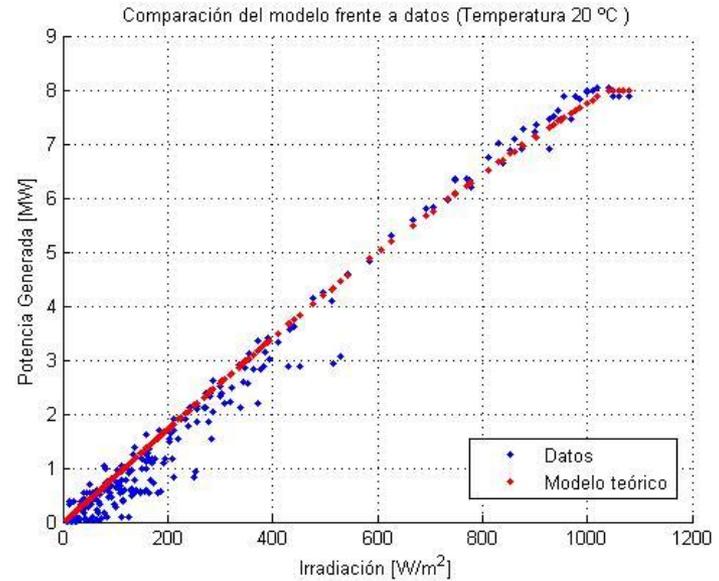
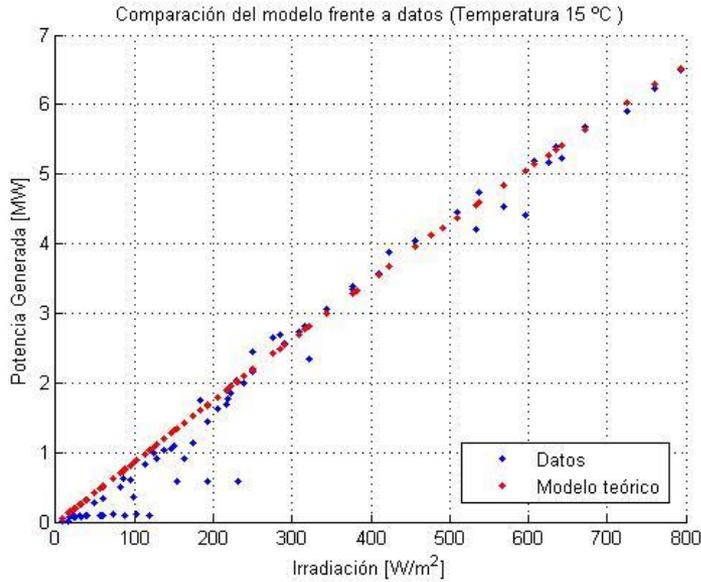


Evaluación del modelo teórico



Central generadora RADITON

Dependencia con la temperatura



Conclusión modelo teórico

- Indicadores del modelo teórico

Modelo Teórico	MBE (%)	MAE (%)	RMSE (%)
Raditon	-0.1	6.2	8.7

- Comparando estos resultados del modelo teórico con los obtenidos con el modelo final propuesto para la central Raditon no se observa gran diferencia, siendo incluso el modelo empírico más adecuado para la estimación de la generación para los indicadores MAE y RMSE.

Conclusiones y recomendaciones



Comentarios finales

- Se analizó a partir de un modelo propuesto por ADME, diferentes modelos para representar correctamente la generación de los parques solares fotovoltaicos.
- Se converge en el modelo empírico topeado, de un solo tramo, con término independiente al ser el que desde el punto de vista estadístico representa mejor el comportamiento de cada parque.
- Se sugiere previo al procesamiento de los datos, realizar un filtrado para eliminar datos inválidos.



Comentarios finales

- Problemas con representación del factor de disponibilidad. Resulta importante por demás el formato y validez de este parámetro. Se recomienda utilizar un factor de disponibilidad porcentual.
- Se debe mantener el modelo calibrado en base al histórico de medidas de potencia e información meteorológica.
- Se recomienda incorporar medidas de irradiación y plano horizontal y temperatura de celda para futuros estudios y mejoras del modelo.

Comentarios finales

- Dado que el modelo depende de los valores de irradiación y temperatura, registra fundamental la calibración periódica de los equipos de medida (piranómetros y termómetros).
- Se calibró el modelo teórico desarrollado por PV_UY obteniendo desvíos del orden de los alcanzados por el modelo empírico. Debido a su practicidad se recomienda el uso de este último.
- A la hora de modelar centrales con seguimiento solar se recomienda una revisión del modelo.





**MUCHAS GRACIAS POR SU ATENCIÓN
¿CONSULTAS ?**

Diego Oroño: diego.orono@gmail.com

Gonzalo Hermida: gonzalohermida@gmail.com

