



# TESIS DE MAESTRIA EN FISICA

Facultad de Ciencias

Centro de Tecnologías de la Información y comunicaciones - CTIC  
Universidad Nacional de Ingeniería - UNI

## MODELAMIENTO DE UNA MICROGRID DE VOLTAJE ALTERNO/CONTINUO CON FUENTES EOLICA, SOLAR, BATERIAS Y RED CONVENCIONAL

TESISTA:

**JORGE LUIS MIREZ TARRILLO.**

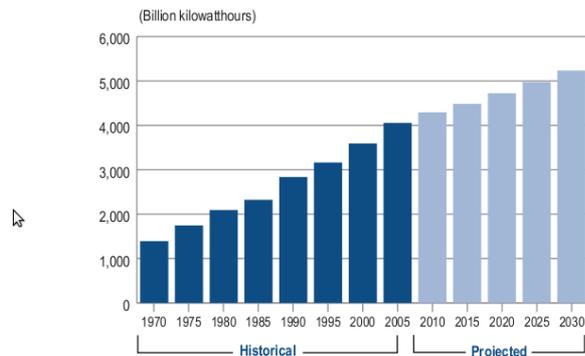
ASESOR:

**Dr. JAVIER SOLANO SALINAS**

**DICIEMBRE 2010**

**LIMA - PERU**

## Demand for Electricity Is Projected to Increase At Least 30% by 2030

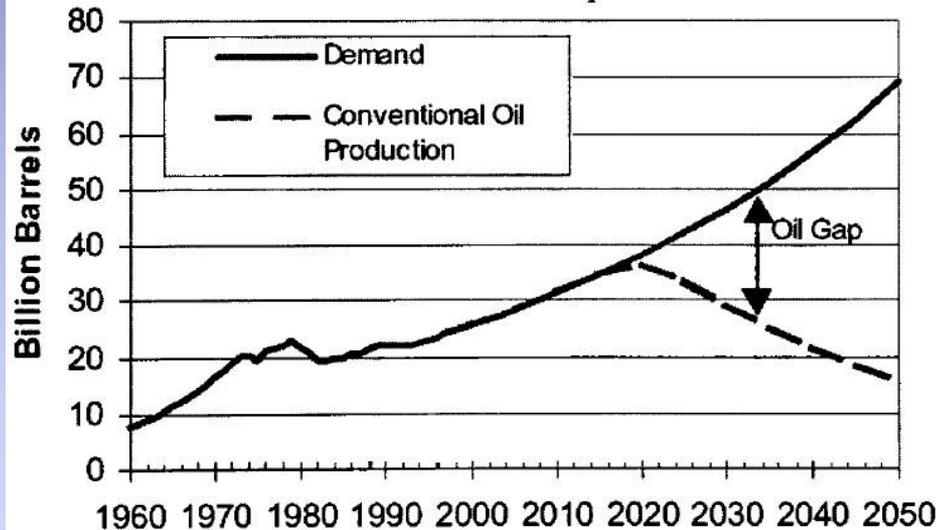


\*Electricity demand projections based on expected growth between 2006 and 2030.

Source: U.S. Department of Energy, Energy Information Administration, Annual Energy Review 2006 and Annual Energy Outlook 2008.

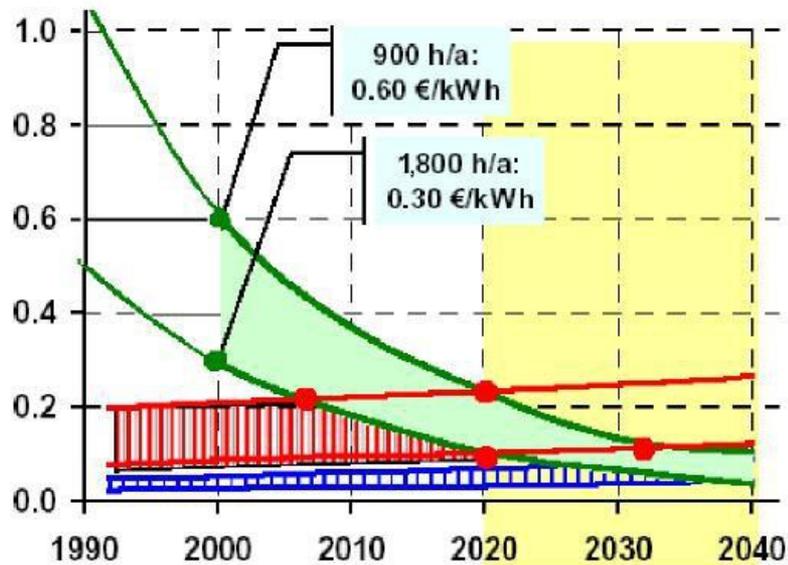
© 2008 by the Edison Electric Institute. All rights reserved.

## The World Oil Gap



## Electricity generating cost for PV and utility prices

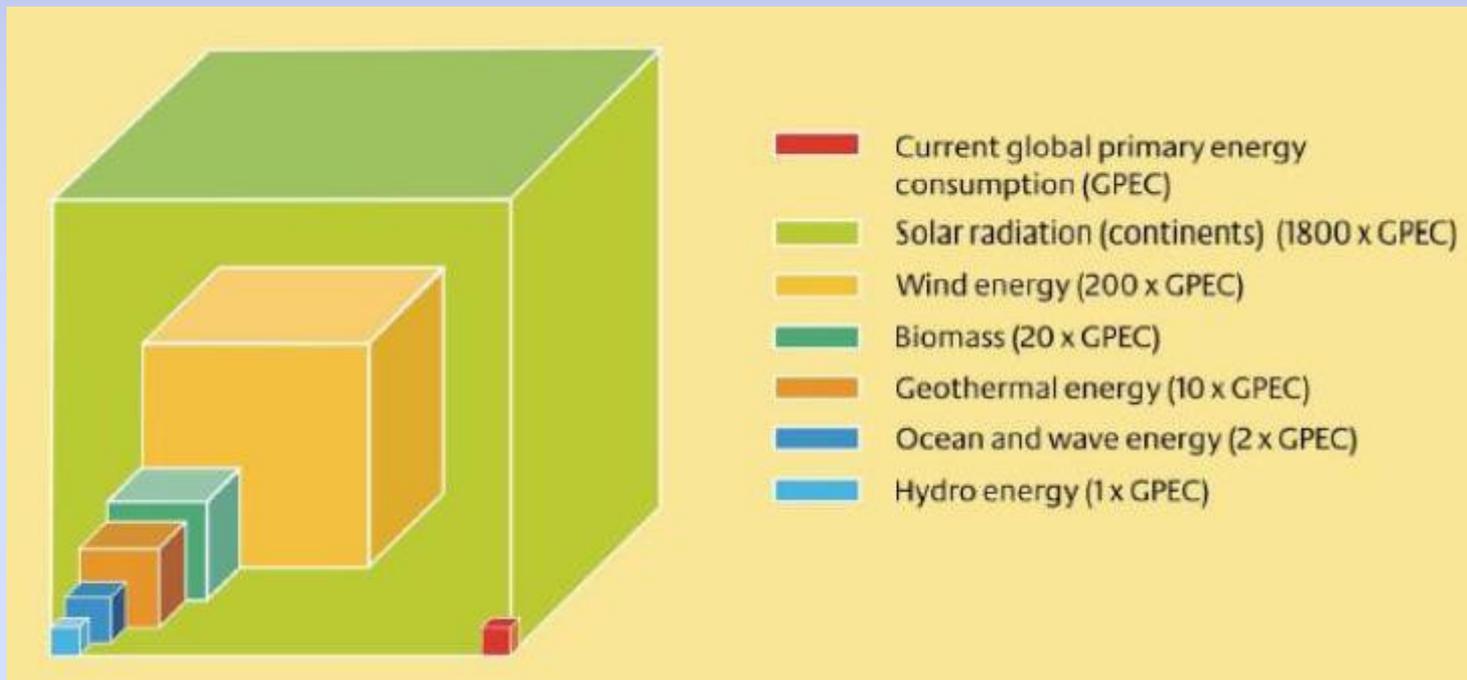
-  Photovoltaics
-  Utility peak power
-  Bulk power



Price of electricity generation forecast until 2040

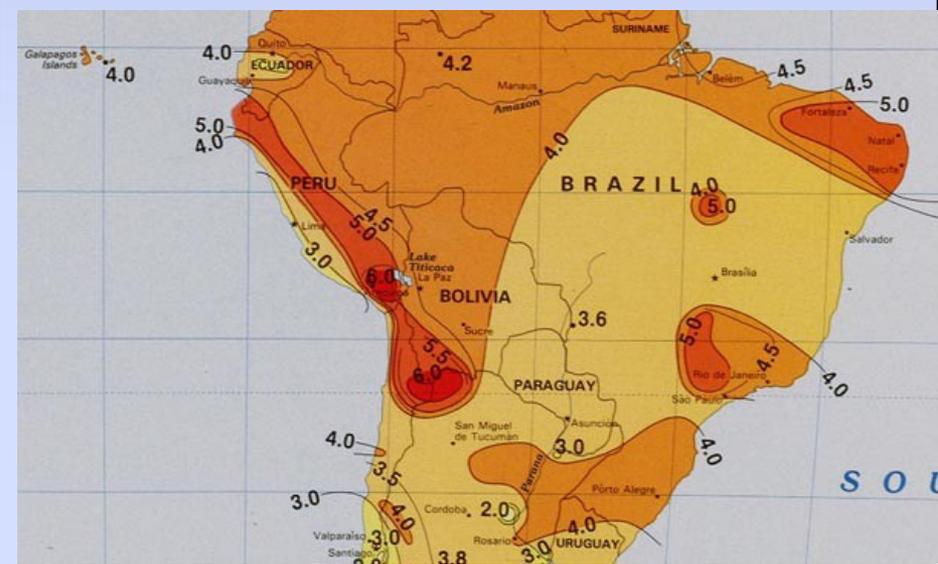


# DISPONIBILIDAD DE ENERGIAS RENOVABLES FRENTE AL CONSUMO DE ENERGIA ACTUAL

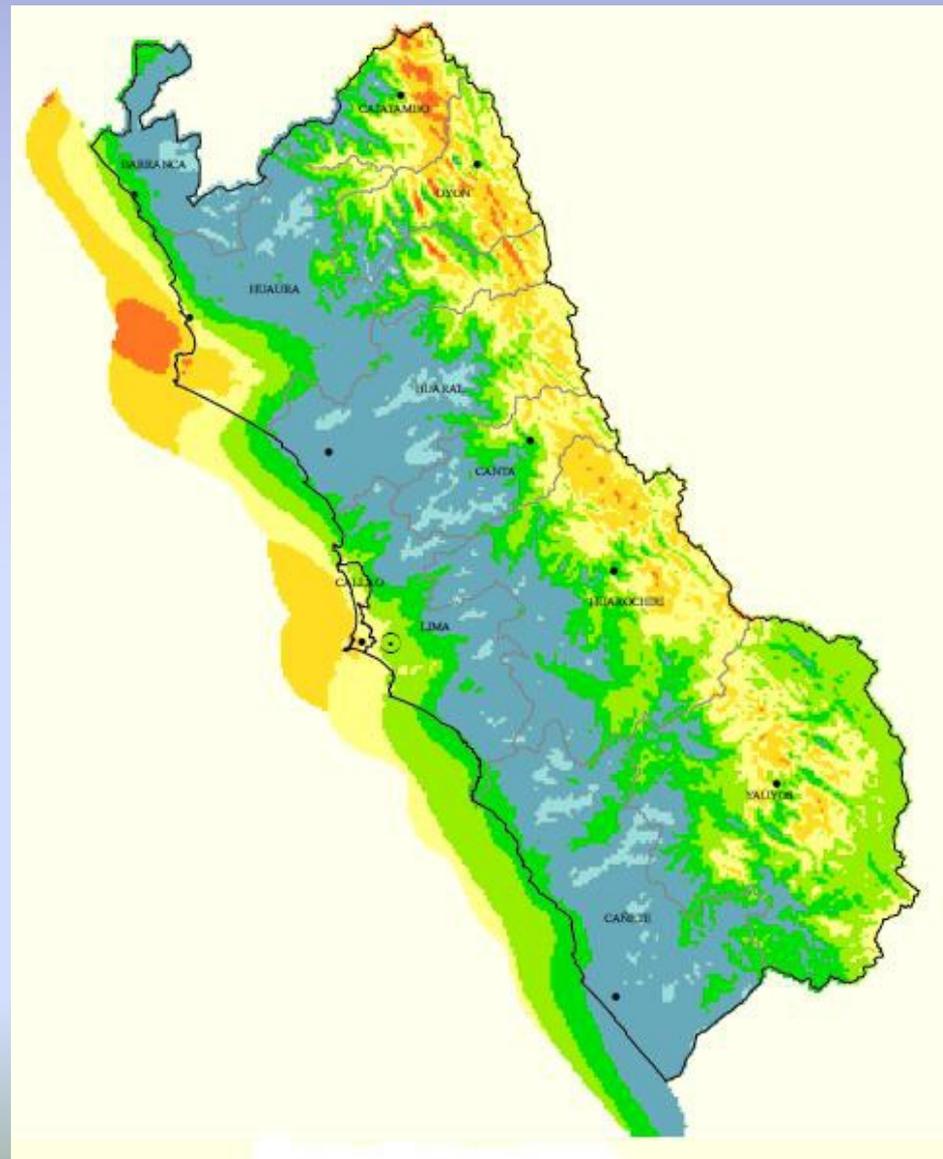
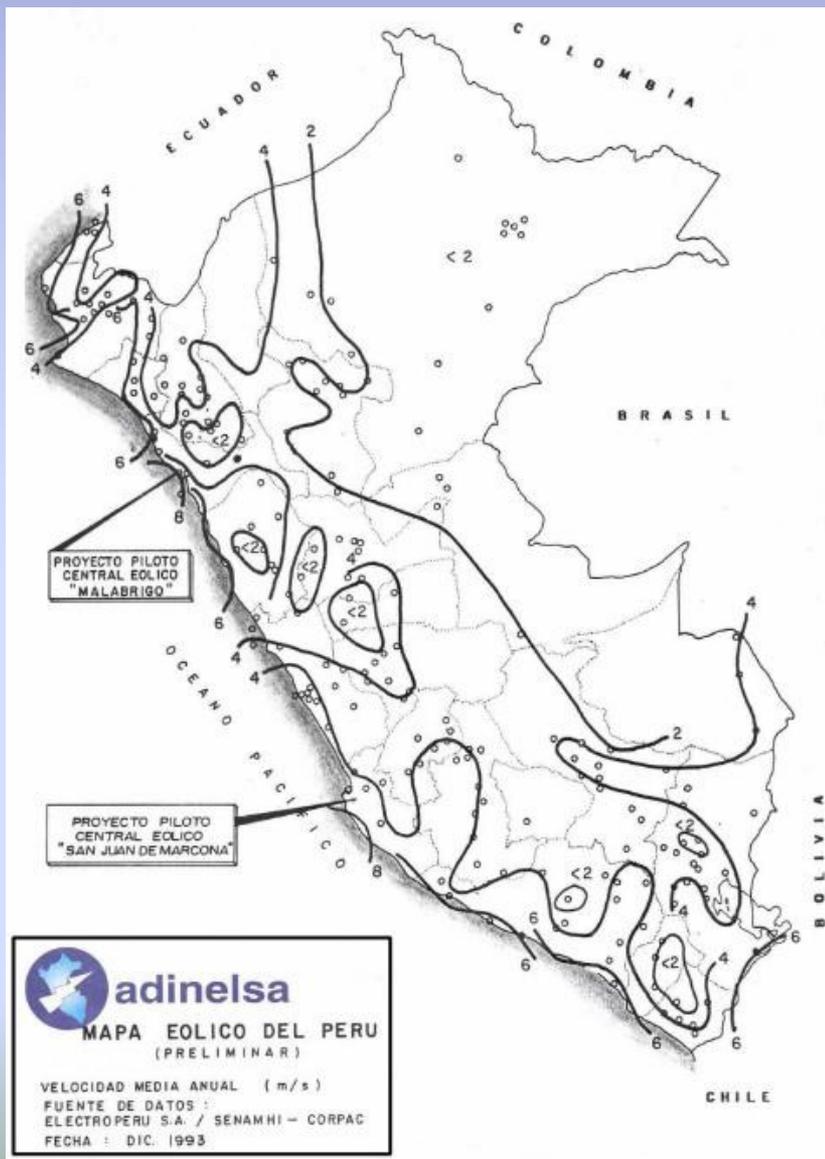




# LA DISPONIBILIDAD DEL RECURSO SOLAR EN EL PERU



# EL RECURSO EOLICO EN EL PERU





## Laboratorio de Computación Distribuida, Altas Energías y Energías Alternativas CTIC - UNI

José Calderón Choy 2007 → Micro-Networks:  
Sistemas interligados de energías no  
convencionales para la independencia  
energética

Diego Torres y Luis Arteaga PAET 2009 →  
Desarrollo de un Sistema de Biodigestores y  
Energías Limpias

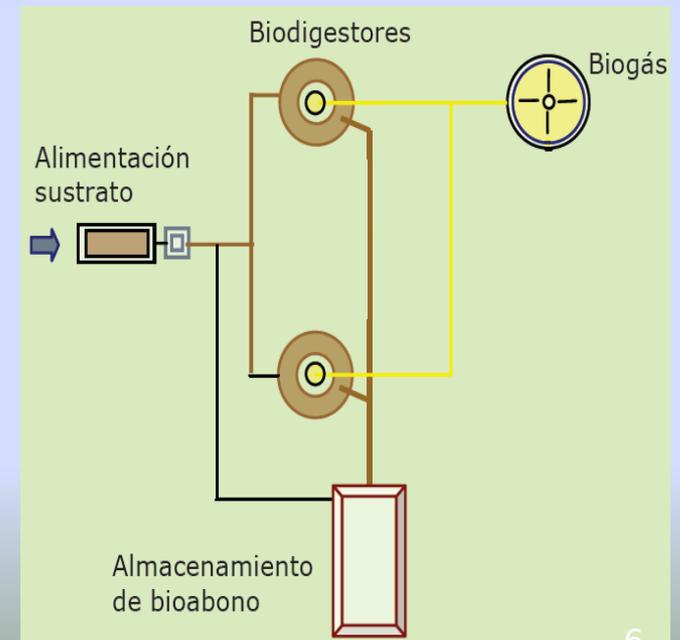
### Otras experiencias UNI:

Ing Salomé. Facultad de Ingeniería Mecánica.

Ing Dinau Velazco. Facultad de Ing Eléctrica y Electrónica.

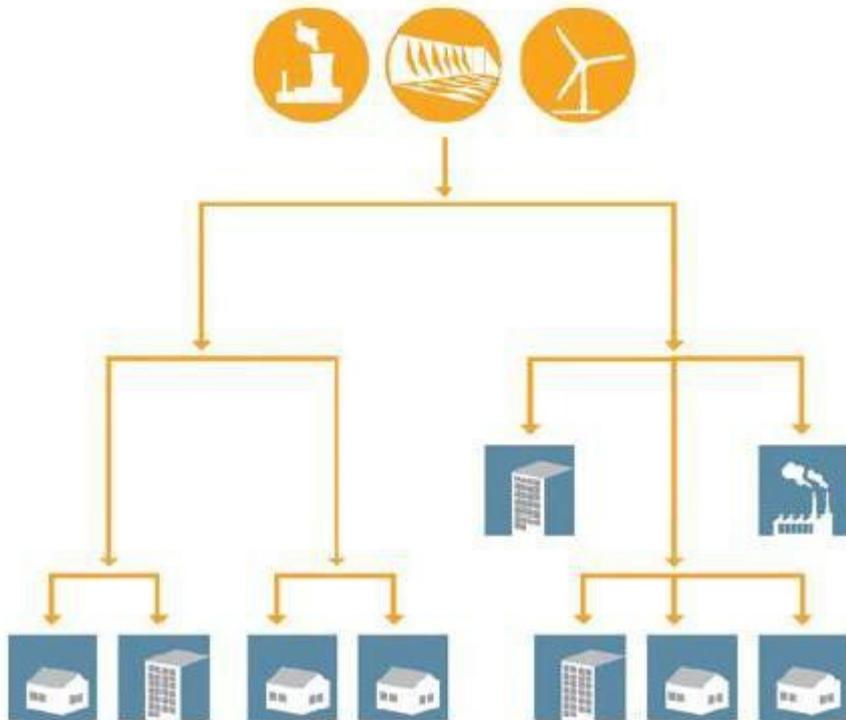
Centro de Energías Renovables.

Facultad de Ciencias.

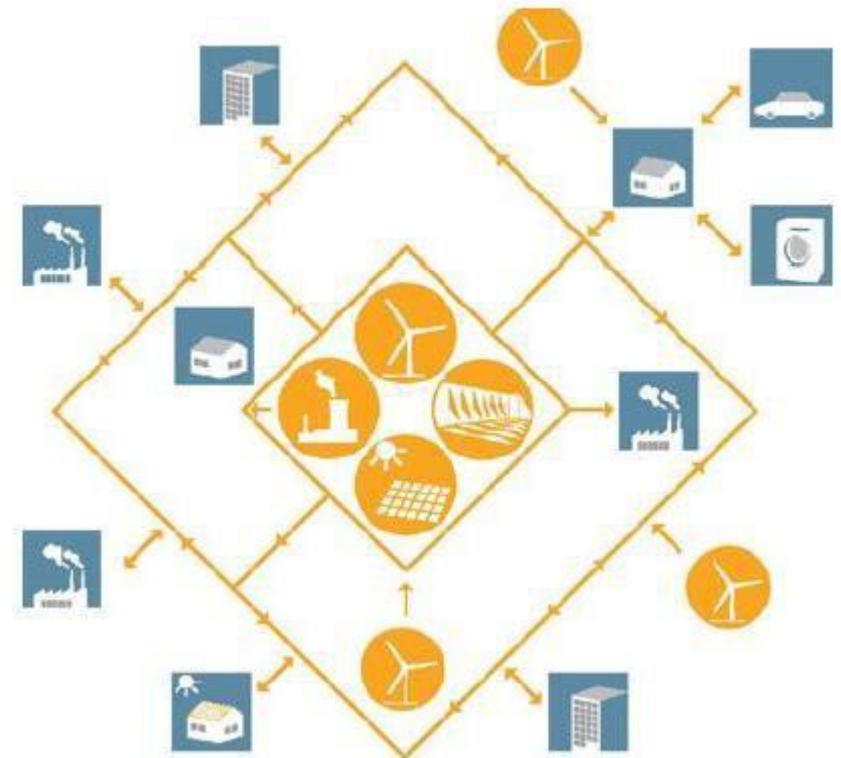


# COMPARACION SISTEMA DE DISTRIBUCION DE ENERGIA TRADICIONAL Y GENERACION DISTRIBUIDA

SISTEMA DE POTENCIA  
GENERACION CENTRALIZADA



GENERACION DISTRIBUIDA





## ¿ QUE ES UNA SMART GRID ?

Una Smart Grid es el uso de sensores, comunicaciones, capacidad computacional y de control en alguna forma para mejorar la total funcionalidad del sistema de suministro de potencia eléctrica.

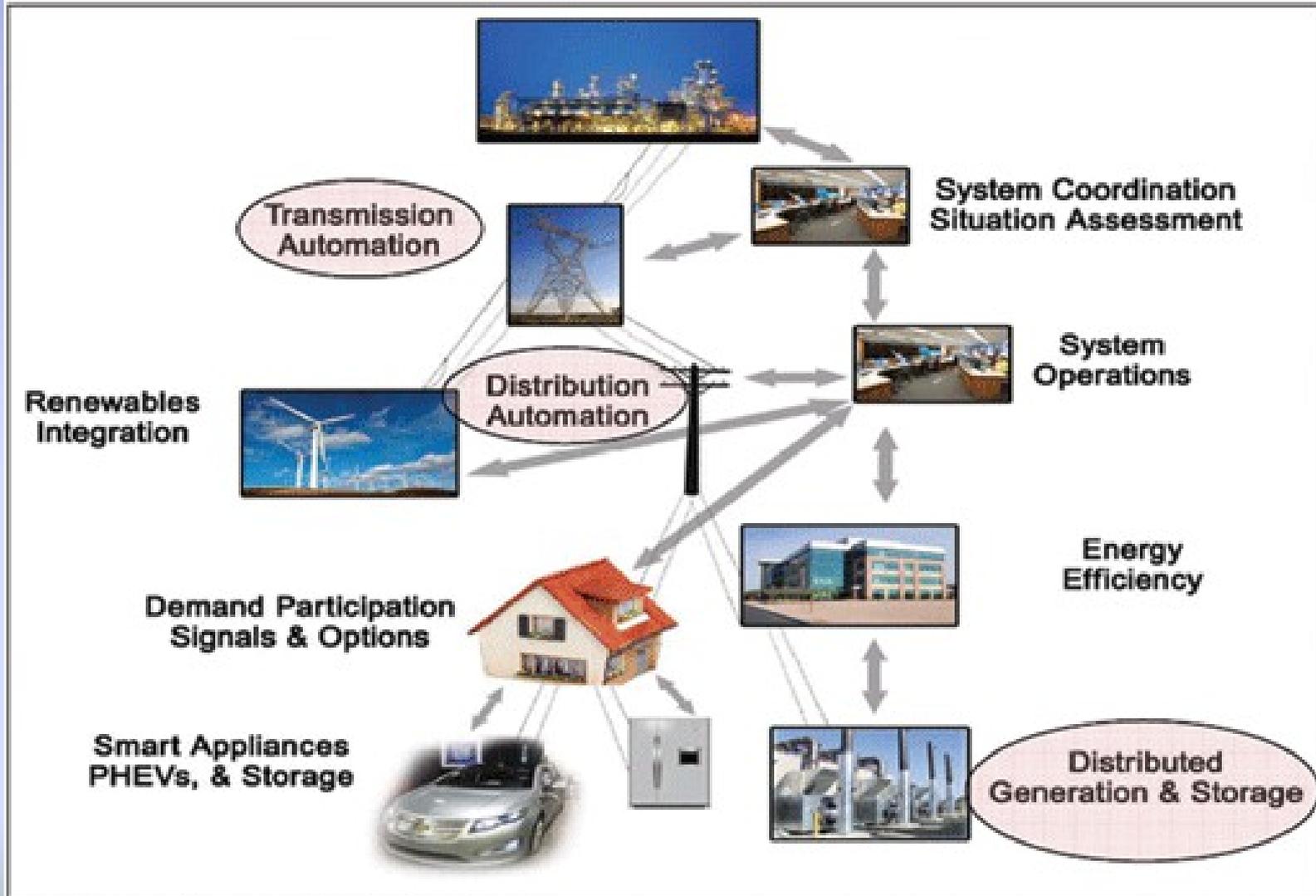
Describe un amplio rango de tecnologías, concepto de diseño y prácticas operativas que colectivamente pintan como nuestra infraestructura de transmisión eléctrica será en unos 10 ó 20 años.

No ha sido planeada para generación centralizada ni despacho centralizado. Normalmente controla menos que 50 MW.

Los generadores distribuidos son usualmente conectados al sistema de distribución que usa voltajes de 230/415 V hasta 145 KV.



## Smart Grid Components Schematic



Source: U.S. Dept. of Energy. Edited by SBI.



## ¿ QUE ES UNA MICROGRID ?

Microgrids es en pequeña escala, redes de suministro de calor y energía eléctrica que alimentan cargas eléctricas y de calor de una comunidad pequeña, industria, centros académicos, etc.

Los generadores empleados son usualmente fuentes renovables o no convencionales que generan potencia en el voltaje de distribución.

La microgrid opera de dos modos (1) conectado e (2) independiente.

La capacidad máxima de las microgrid, está normalmente limitado a aprox. 10 MVA, según las recomendaciones de la IEEE.

# ESQUEMA DE UNA MICROGRID

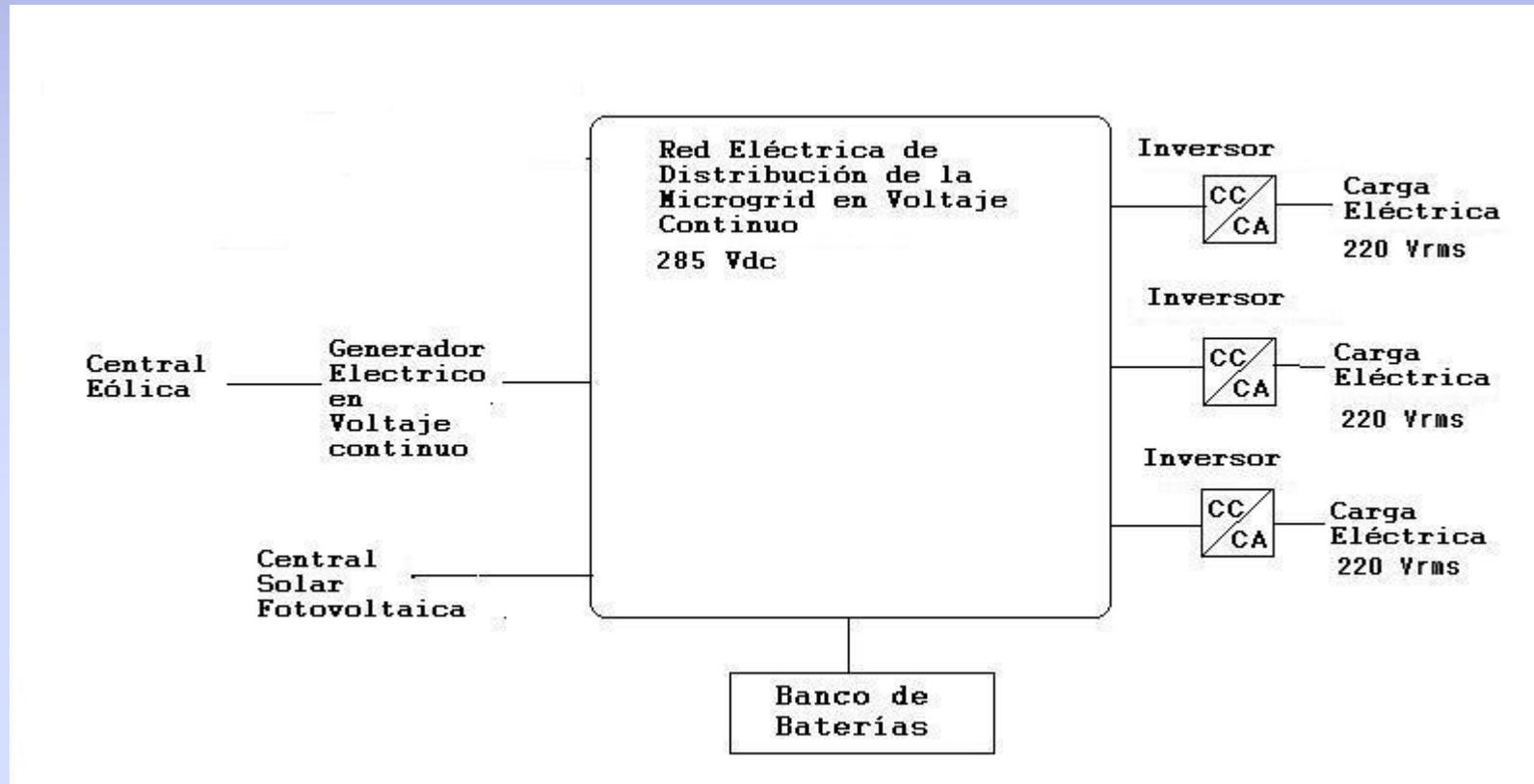




# ESTADO ACTUAL DE DESARROLLO DE LAS MICROGRIDS

2006-2008	2009-2010	2011-2012	2013-2014	2015-2016	2017-2018	2019-2020	Tema sobre el que visionar
Análisis de aplicaciones presentes y futuras. Viabilidad técnica y económica			Comercialización de las microrredes				Proposiciones de valor
Proyectos demostradores, desarrollo de herramientas							
Crear descripciones funcionales y seleccionar diseños			Comercialización e incorporación de tecnologías relacionadas con las microrredes				Tecnologías
Validación tecnologías mediante proyectos de demostración de microrredes diseñadas							
Desarrollo de plataformas de tecnologías de componentes y prototipos de microrredes							
Analizar costes, beneficios, señales de precios y marcos regulatorios			Activar cambios en los marcos regulatorios y señales de precios				Regulación
Demostrar que las señales de precios, beneficios y marcos regulatorios propugnados son los acertados							

# LA MICROGRID A ESTUDIAR TRABAJANDO DE MANERA INDEPENDIENTE.

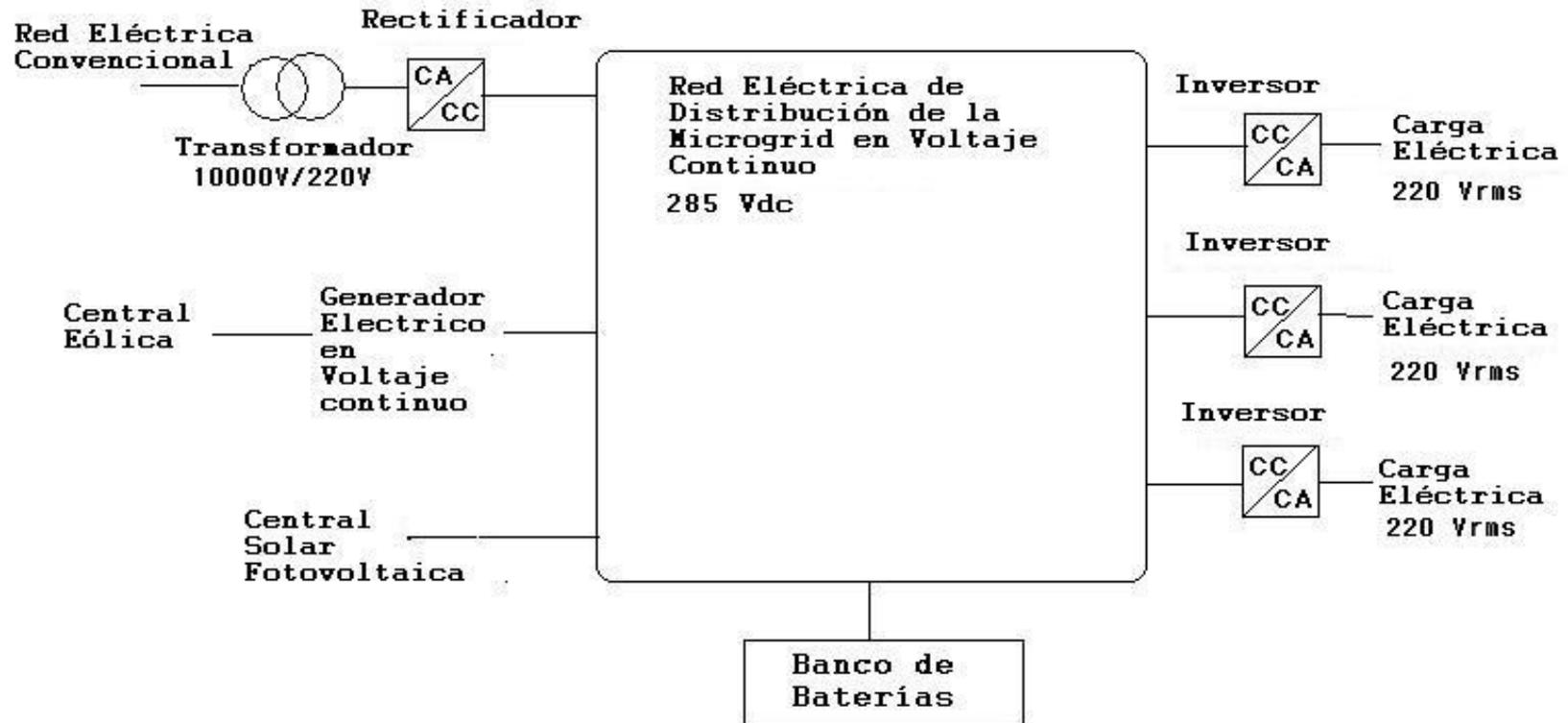


## Ventajas de la Corriente Continua:

No necesito sincronizar.

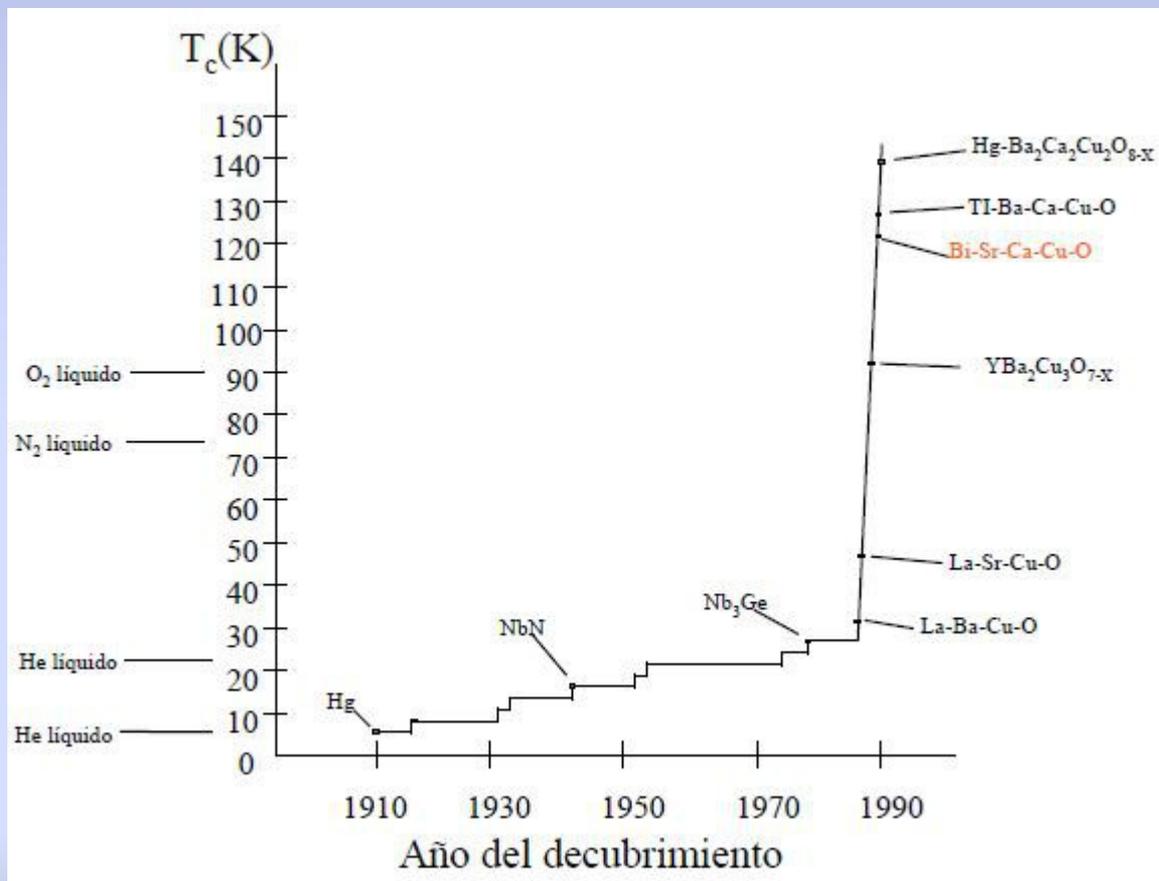
Mayor capacidad de conducción de corriente..

# LA MICROGRID A ESTUDIAR CONECTADO A RED ELECTRICA CONVENCIONAL

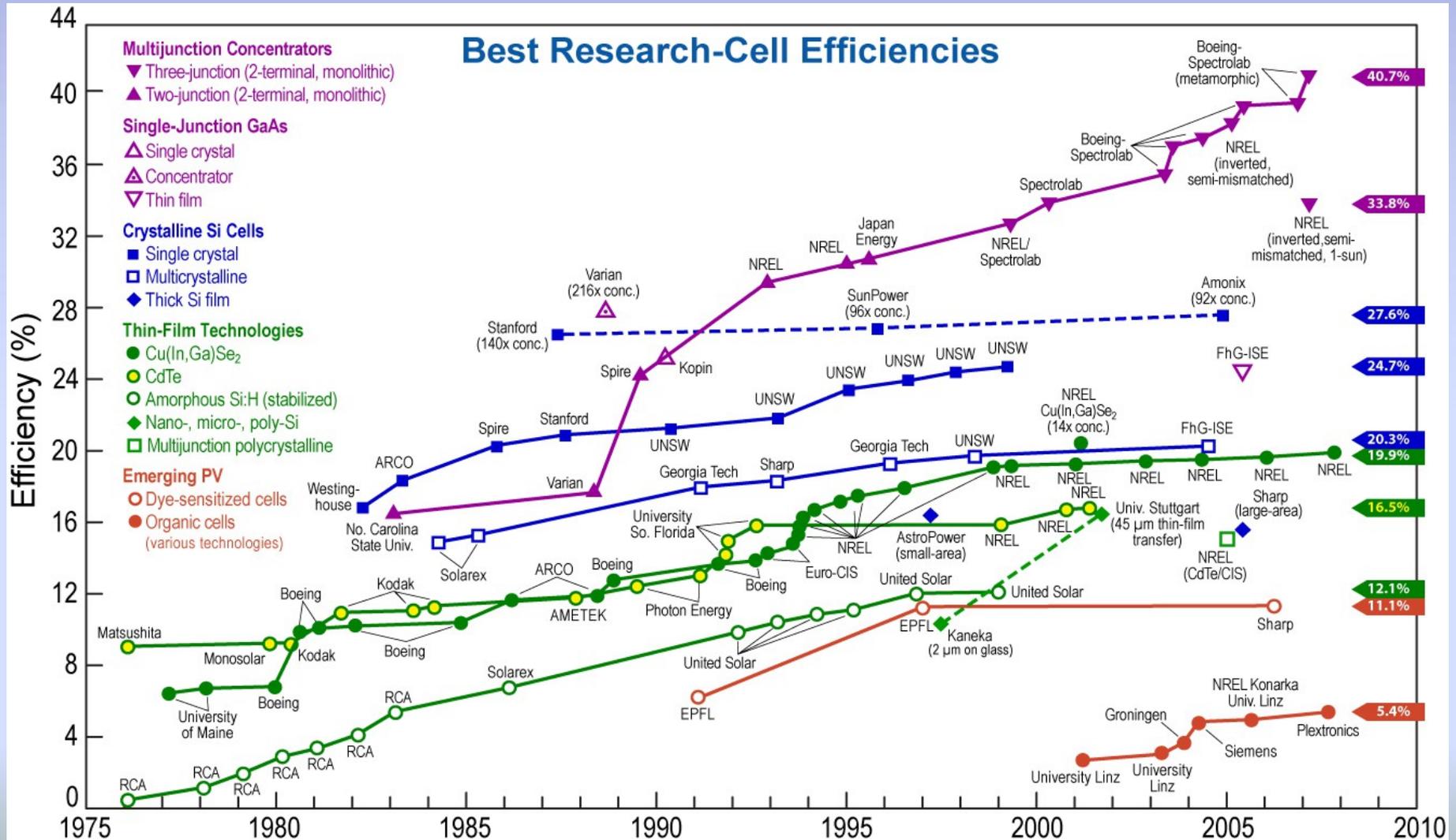




# AVANCES EN MATERIALES SUPERCONDUCTORES CON APLICACIONES EN CABLES DE ENERGÍA ELÉCTRICA, TRANSFORMADORES, MOTORES Y GENERADORES

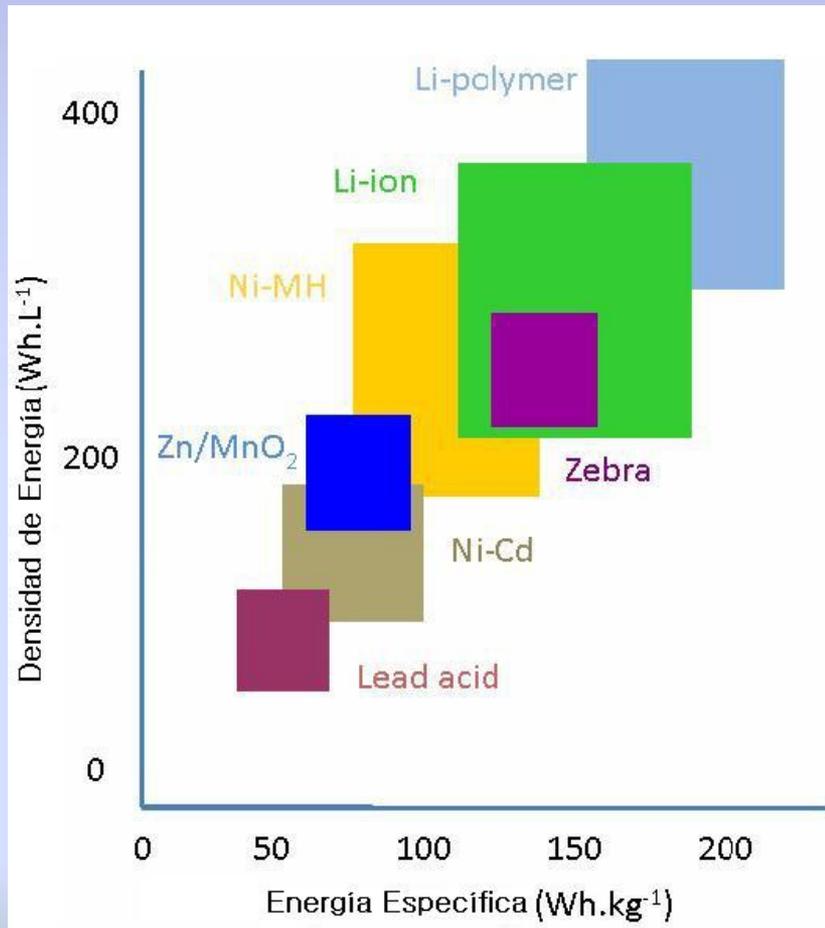
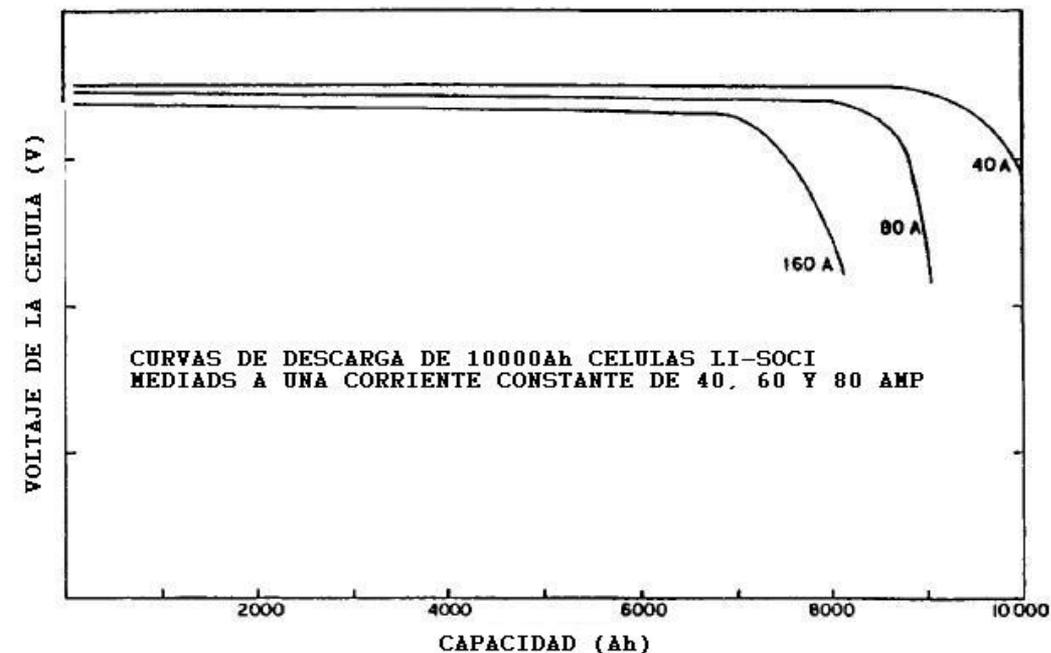


# CELULAS SOLARES FOTOVOLTAICAS CADA VEZ MAS EFICIENTES





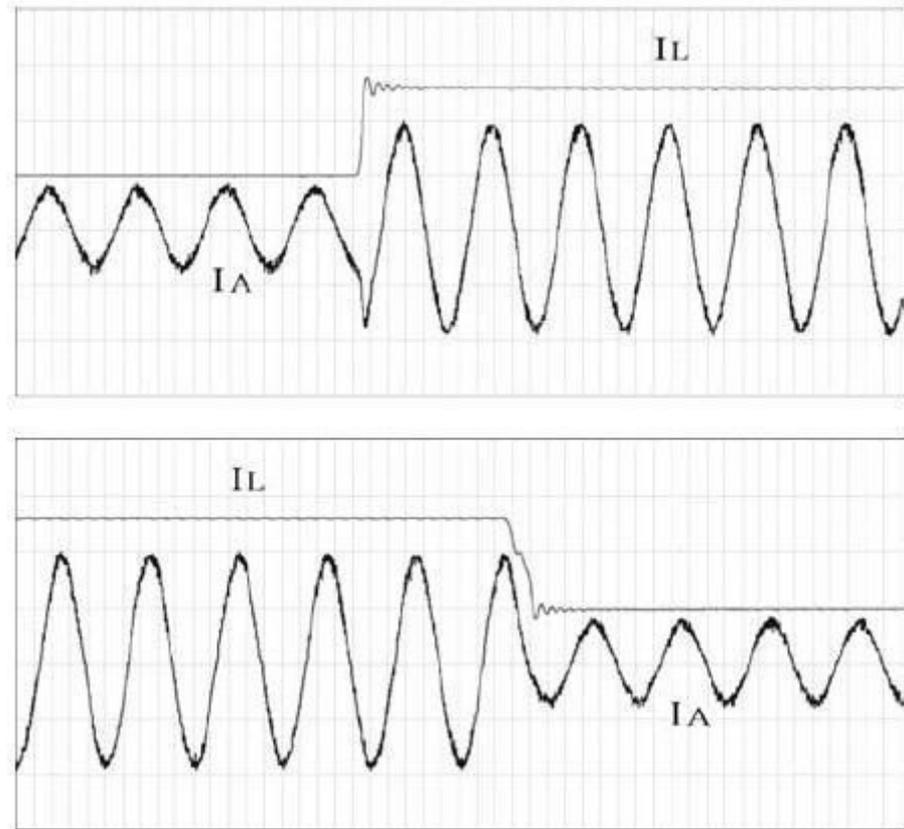
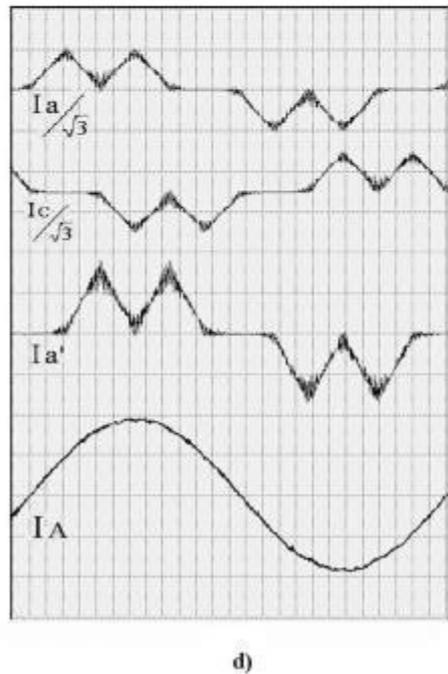
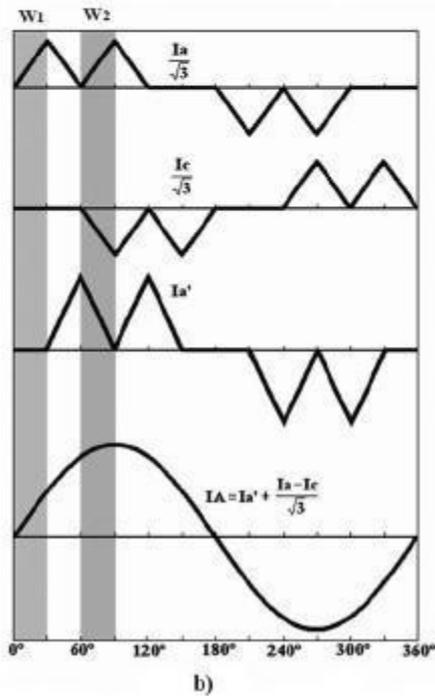
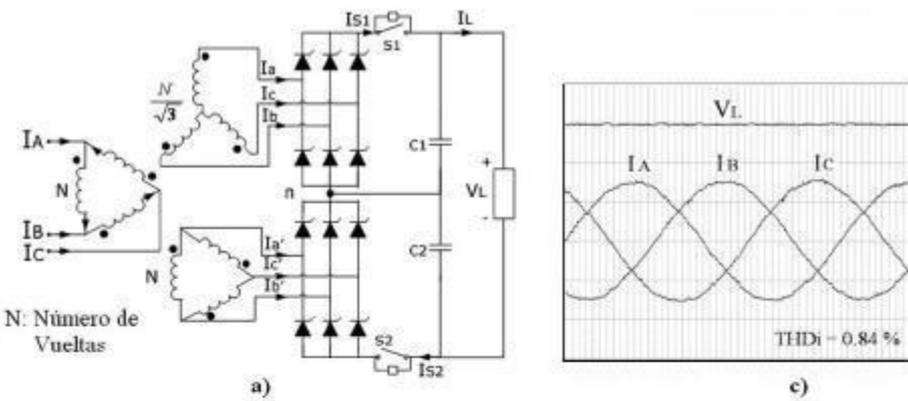
# BATERIAS CON MAYOR CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE ENERGIA Y MEJOR DESEMPEÑO EN CARGA Y DESCARGA



# RECTIFICADOR DE POTENCIA

## BUEN DESEMPEÑO EN LADO DE CORRIENTE ALTERNA

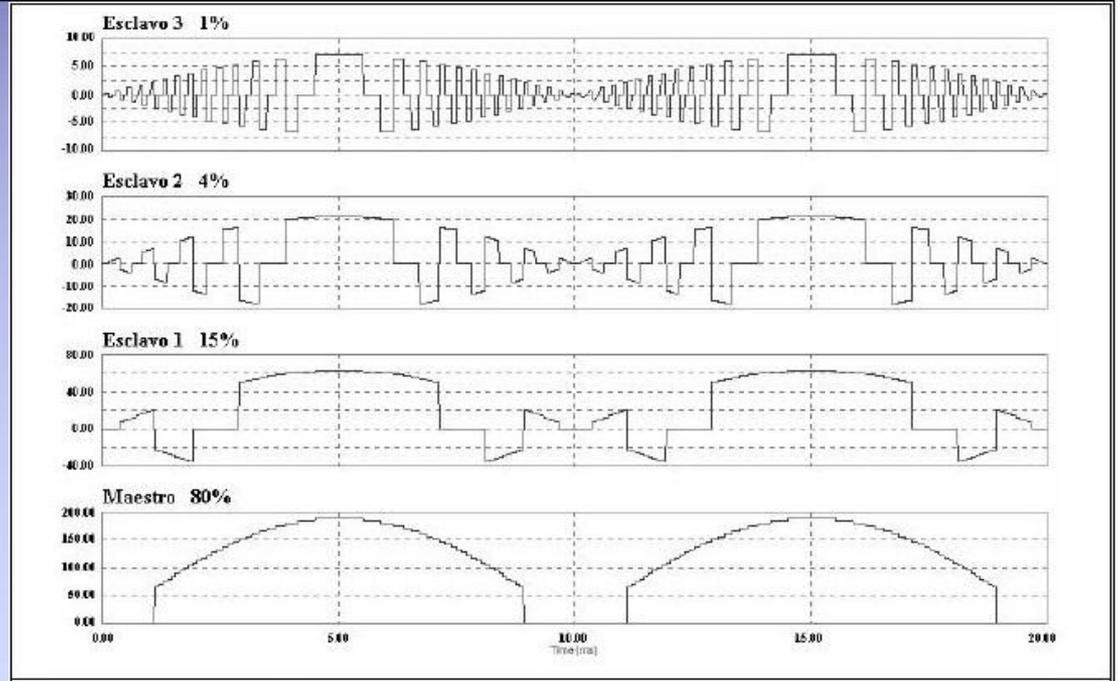
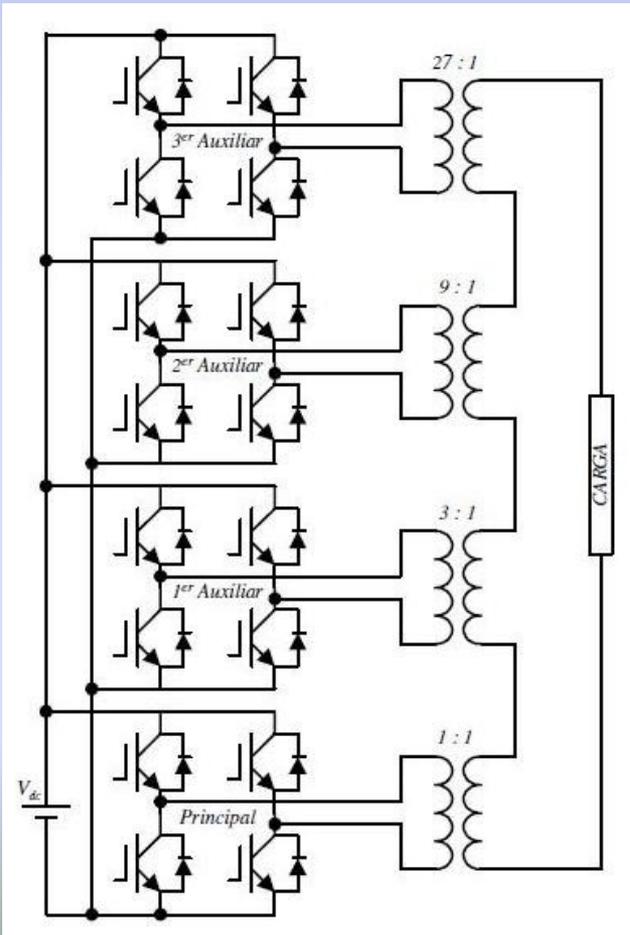
Pin=20.5 kW – Pout=18.6 kW



# INVERSOR MULTINIVEL

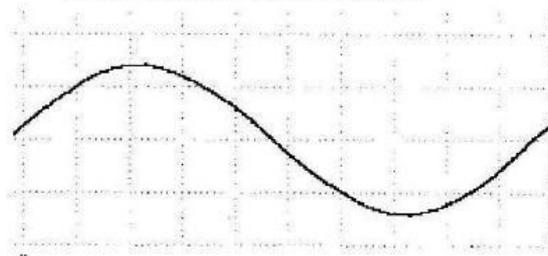
DE MEJOR DESEMPEÑO  
QUE TECNOLOGIA PWM

$P = 1 \text{ KVA}$  por fase.

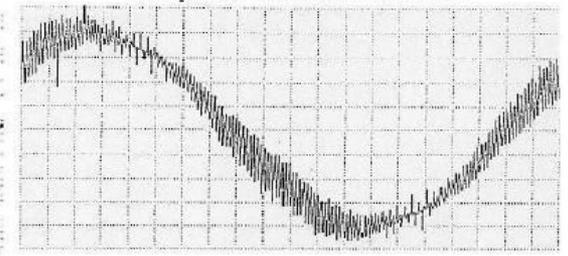


Distribución de potencias para una carga puramente resistiva ( $\text{Cos}\phi=1$ )

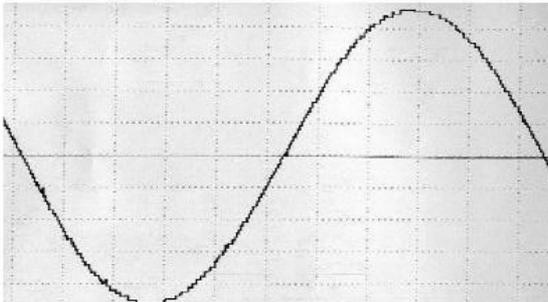
Corriente Experimental de convertidor multinivel



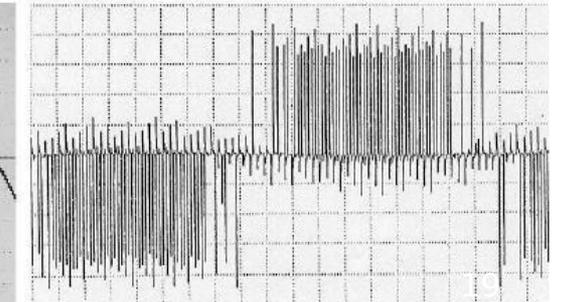
Corriente Experimental de convertidor PWM

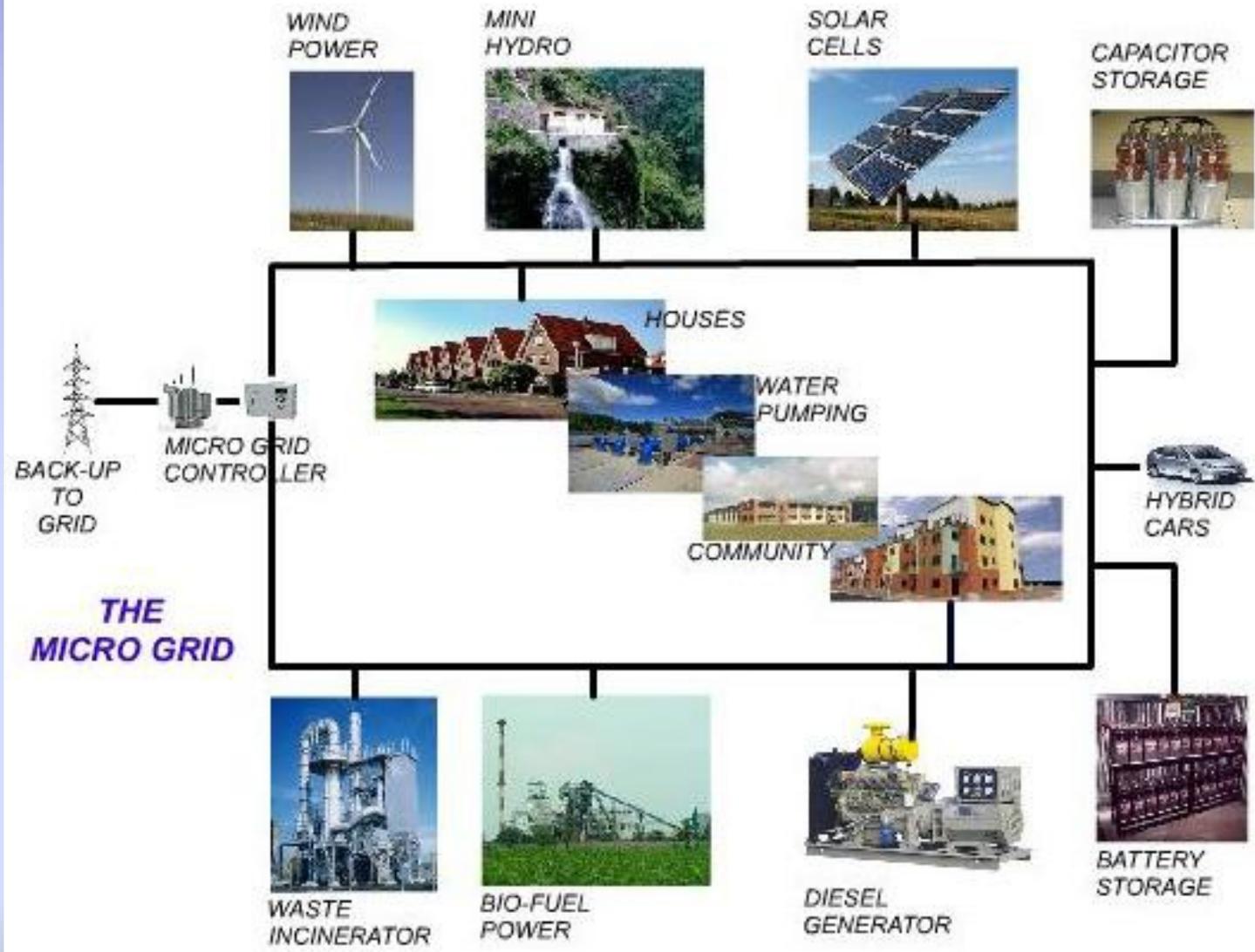


Voltaje experimental de convertidor multinivel



Voltaje Experimental de convertidor PWM





## **Propósito y Criterios:**

Modelamiento de una Microgrid en estado estable bajo ciertos criterios y que trabaja de manera similar a una SmartGrid.

Se usa Matlab/Simulink.

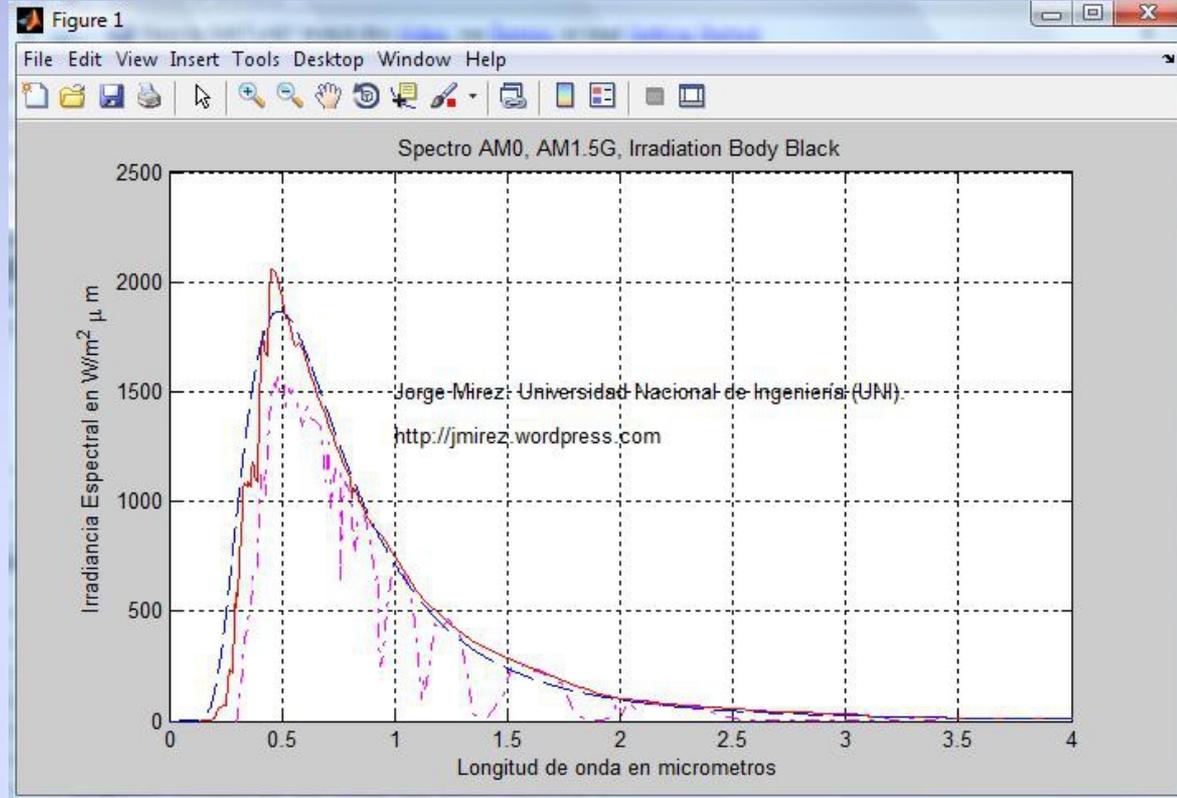
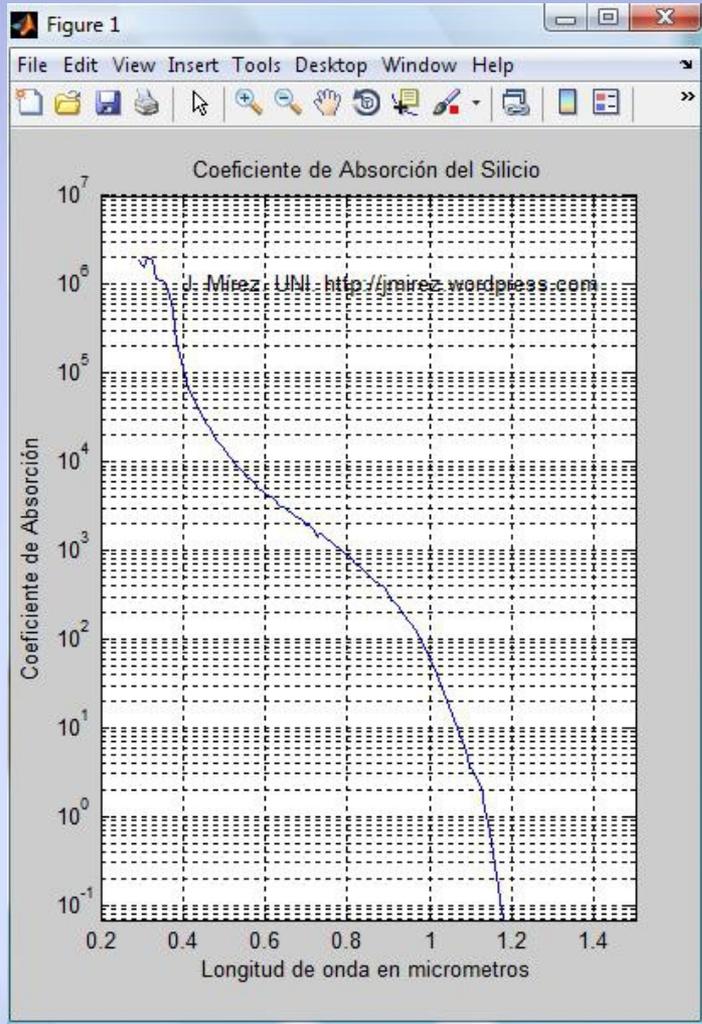
El propósito es estudiar diversos estados de funcionamiento.

## **OBJETIVOS:**

- Examinar las características de generación y de almacenamiento.
- Desarrollar el software necesario a partir de modelos físicos y experiencias
- Desarrollar simulaciones en base a datos reales.
- Desarrollar el software de tal manera que facilite futuras investigaciones.
- Proponer criterios de mando y control para una o varias microgrids interconectadas.
- Desarrollar procedimientos para la gestión de potencia y energía.
- Desarrollar los criterios necesarios que simplifiquen el modelamiento y la simulación de la microgrid.

# SIMULACION COEFICIENTE DE ABSORCION DEL SILICIO

# SIMULACION ESPECTROS DEL SOL Y RADIACION DEL CUERPO NEGRO



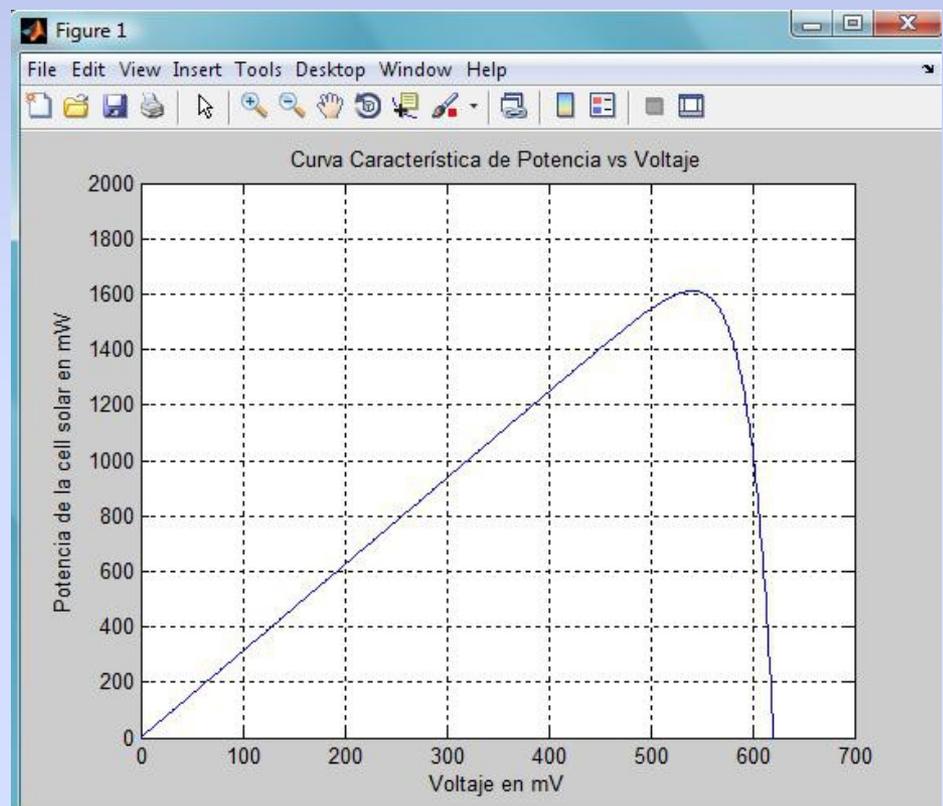
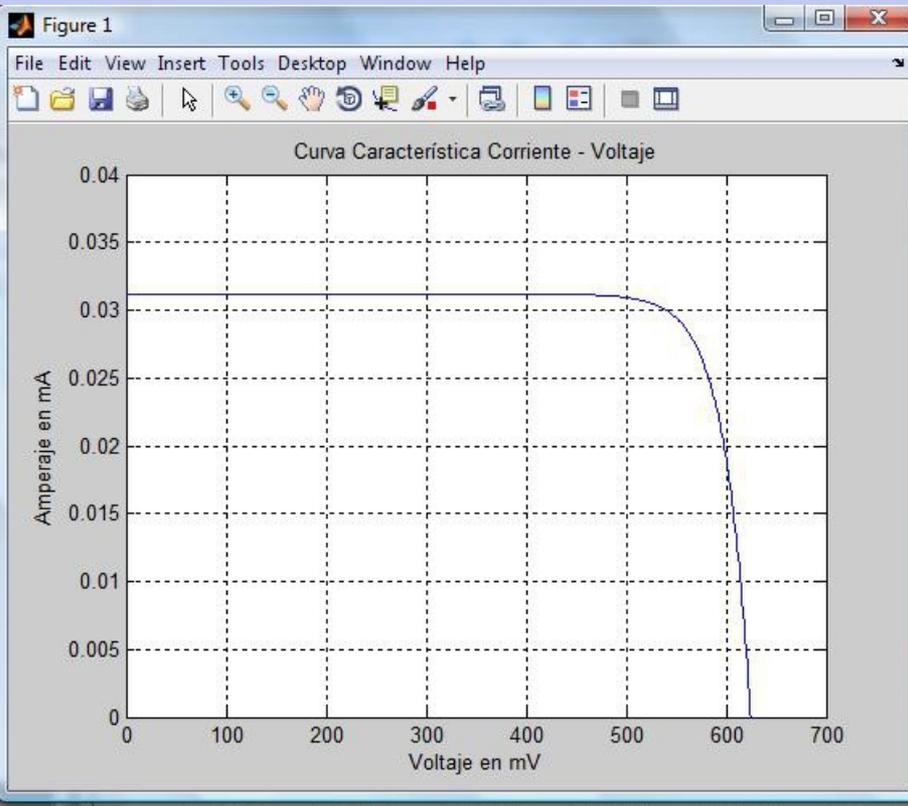
$$I_{\lambda} = \frac{8,925 \times 10^{-12}}{\lambda^5 [e^{\frac{0,0143}{\lambda T}} - 1] T^4} \left( \frac{W}{m^2 \mu m} \right)$$

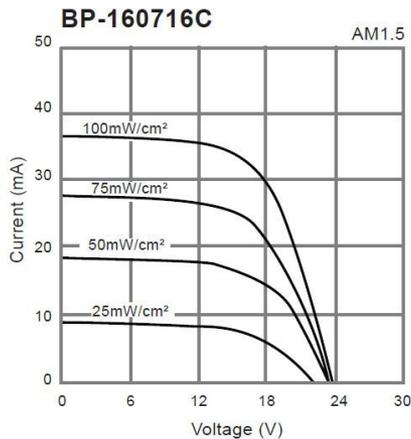
T = 5900°K

Visualizar: Coeficiente absorción de silicio, AM1.0, AM1.5G

# SIMULACIONES DE UNA CELULA SOLAR

## Curvas V-I y V-P.





# SIMULACION DE CELULA SOLAR PANASONIC BR-160716C

SUNCERAM II CELL FOR OUTDOOR USE

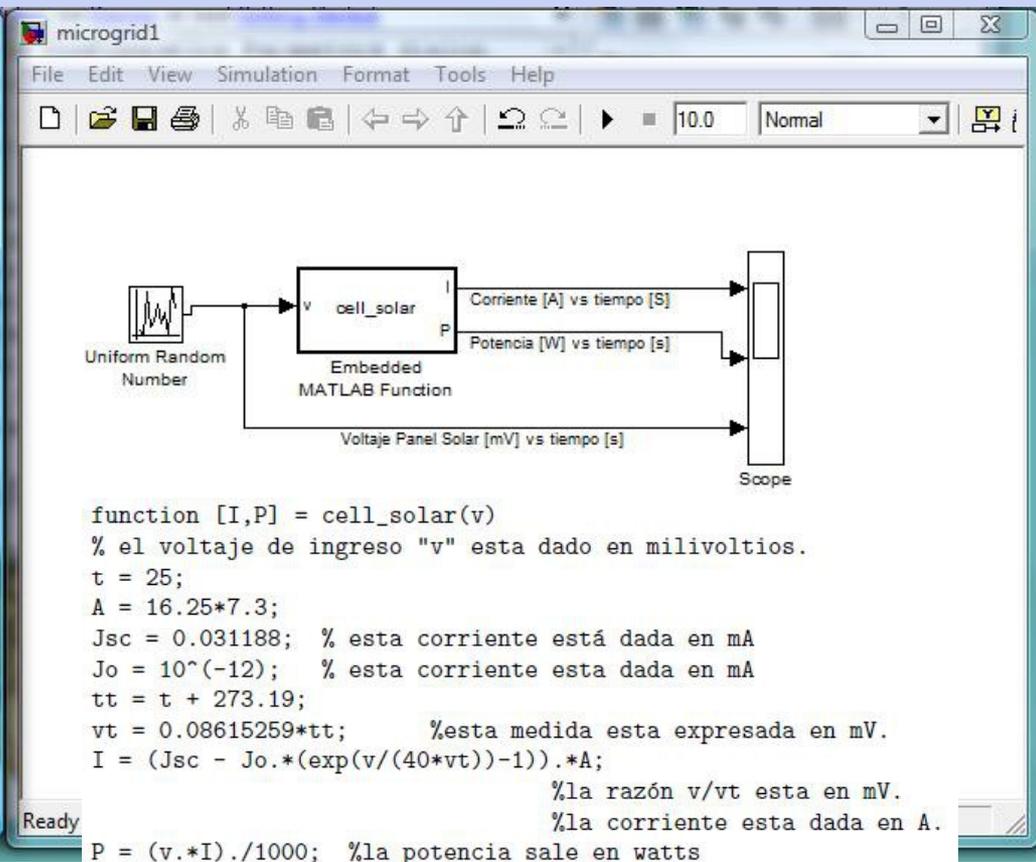
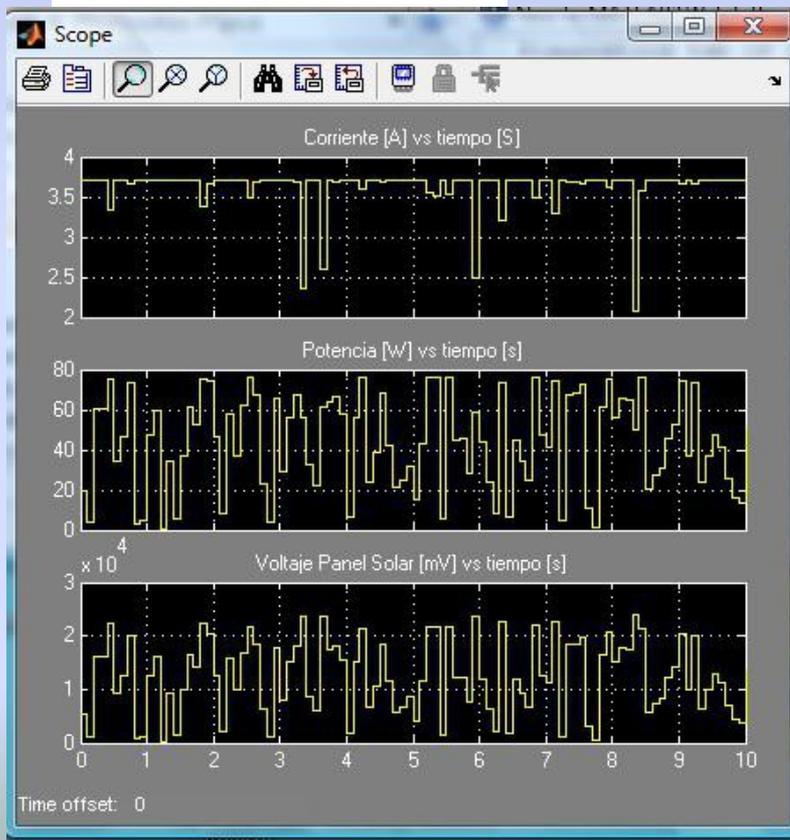
Operating Voltage  $V_p$  (V) = 16

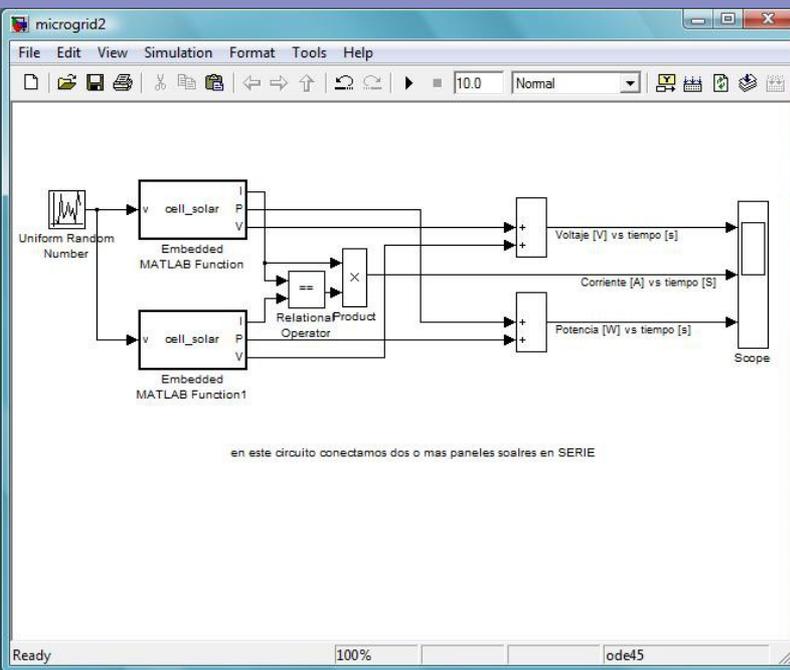
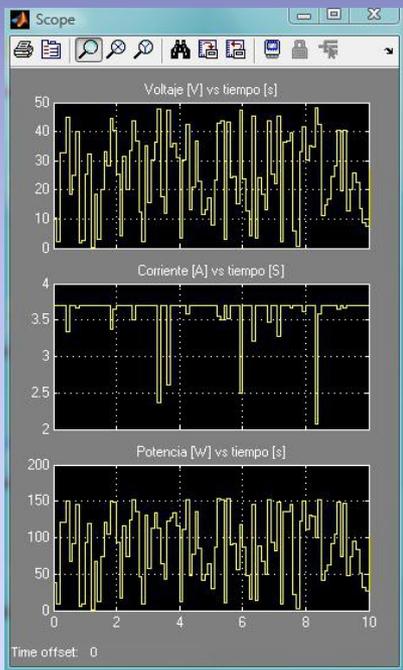
Operating Current  $I_p$  (mA) average = 34

Open Circuit Voltage  $V_{oc}$  (V) = 24

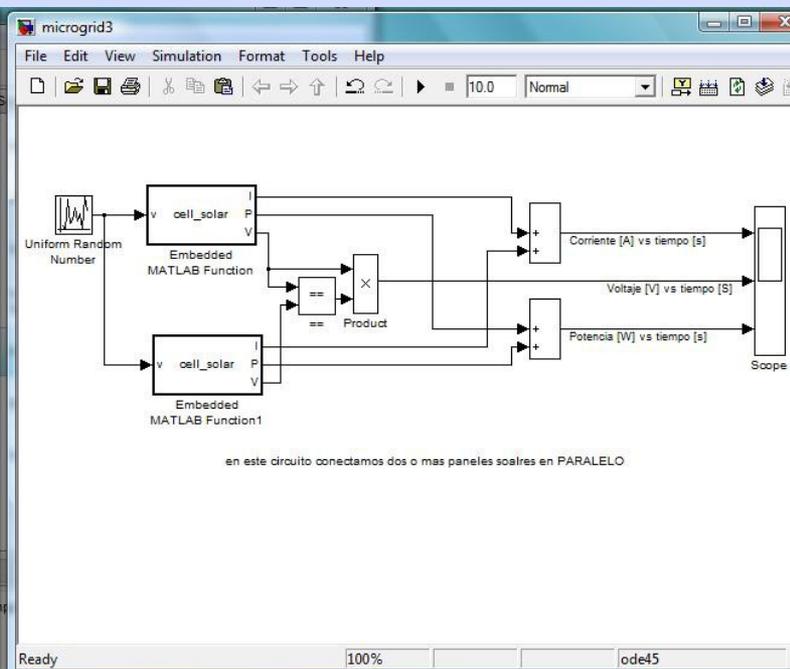
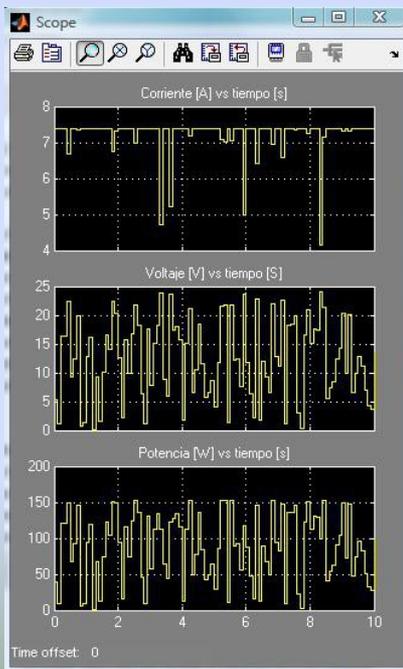
Short Circuit Current  $I_{sc}$  (mA) average = 36

Measurement Temperature  $25^{\circ}\text{C}$ .



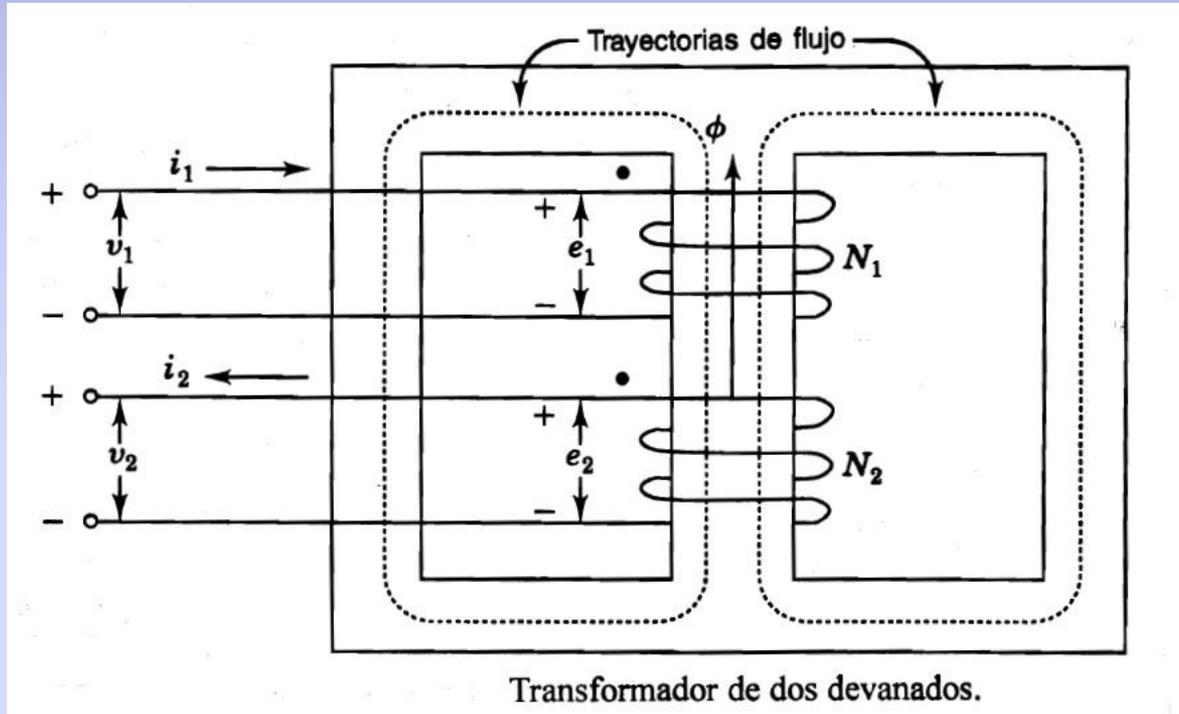


## SIMULACION CONEXIÓN SERIE DE DOS PANELES SOLARES



## SIMULACION CONEXIÓN PARALELO DE DOS PANELES SOLARES

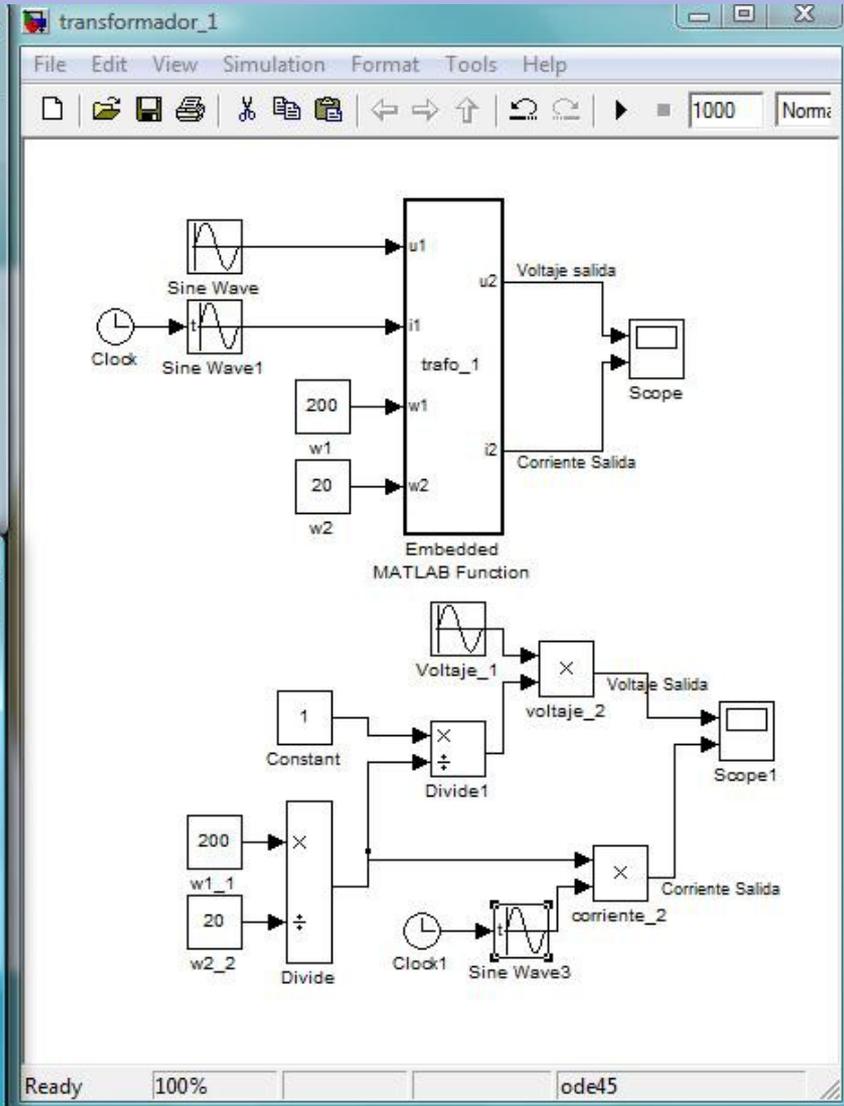
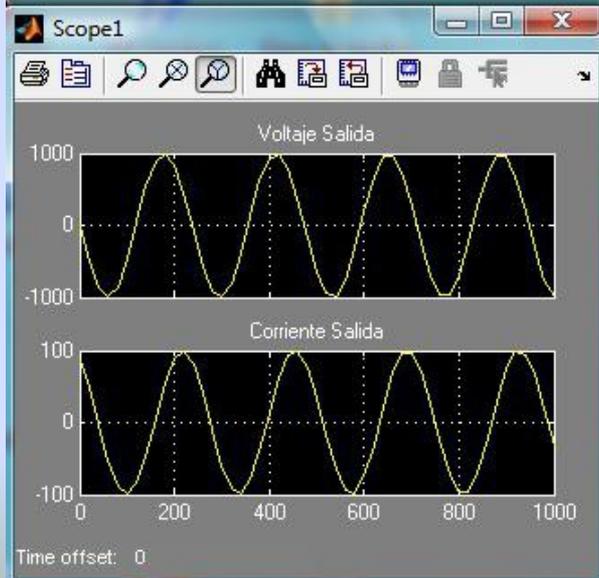
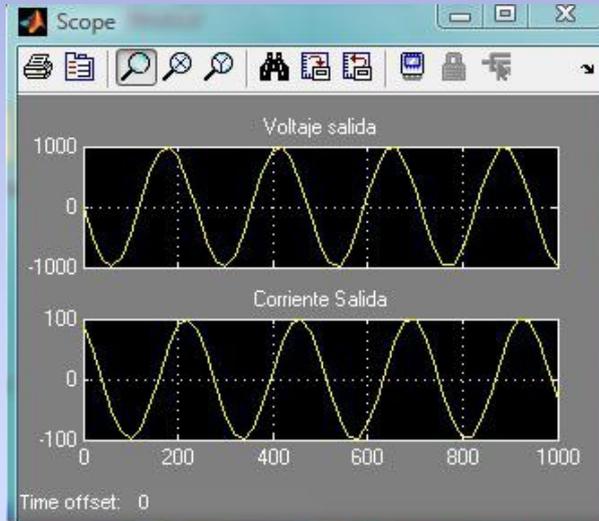
## ESQUEMA DE UN TRANSFORMADOR IDEAL



$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$I_1 = \frac{N_2}{N_1} I_2$$

# SIMULACION DE TRANSFORMADOR IDEAL

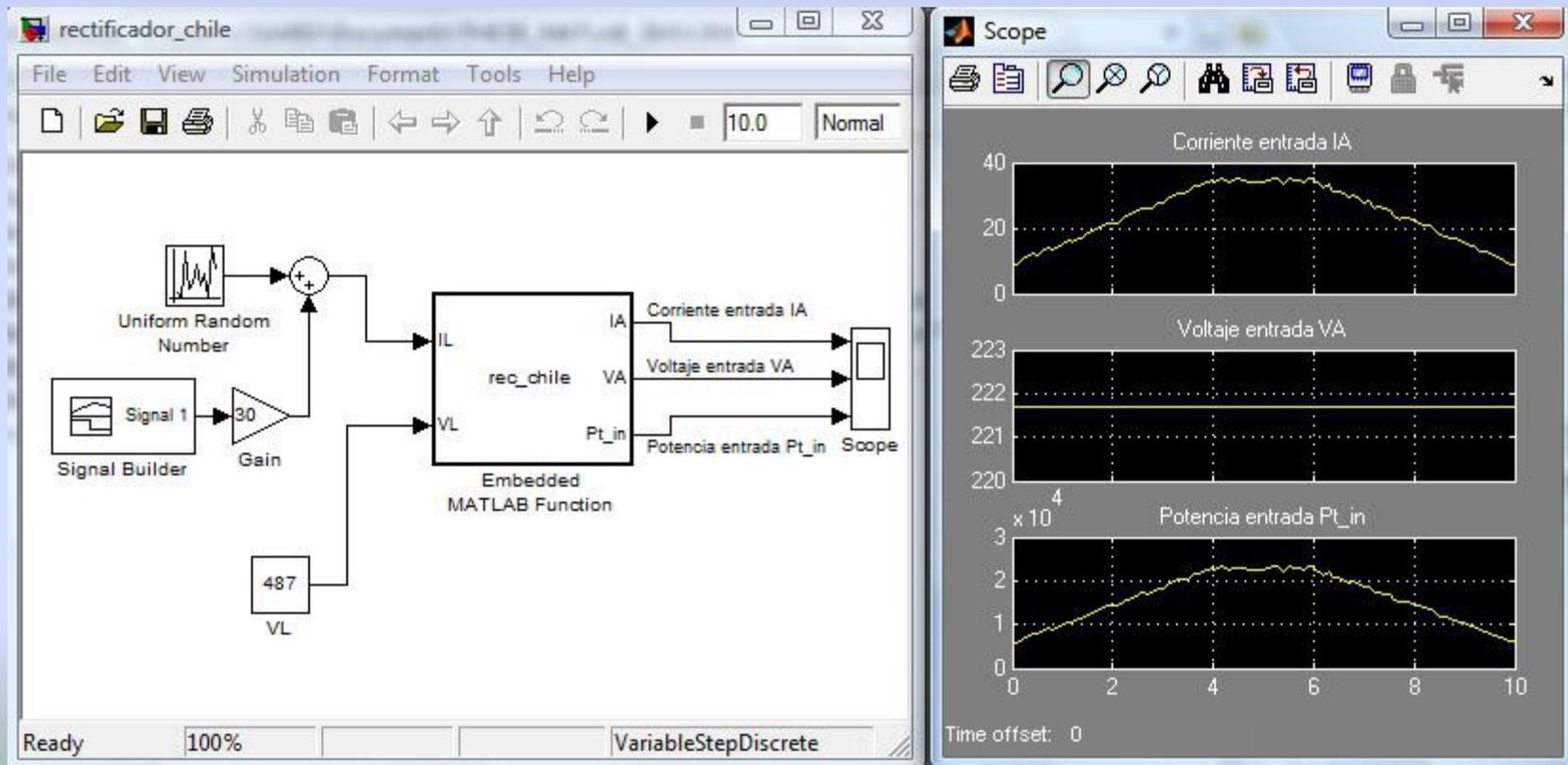


# SIMULACION RECTIFICADOR DE POTENCIA PUC DE CHILE

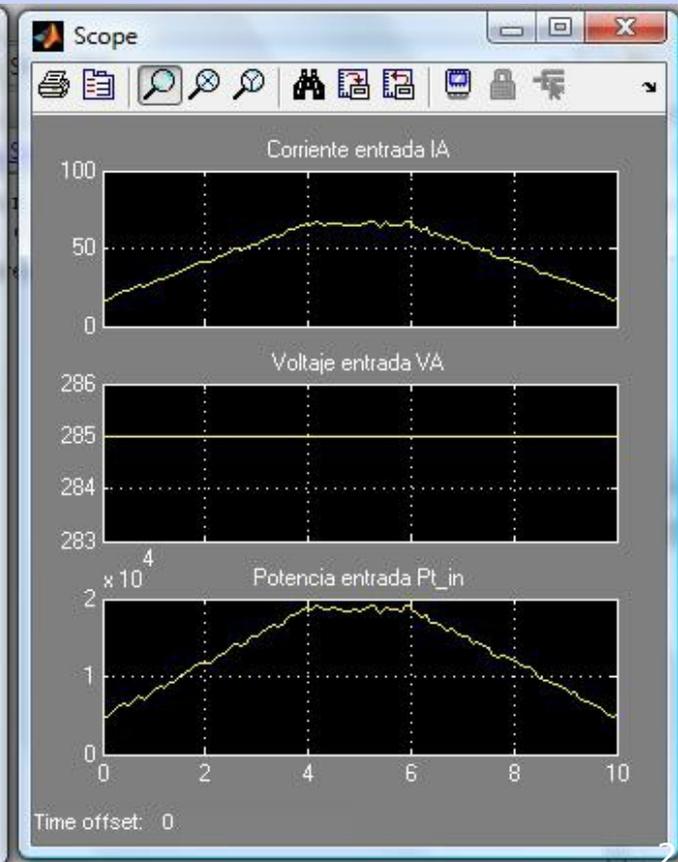
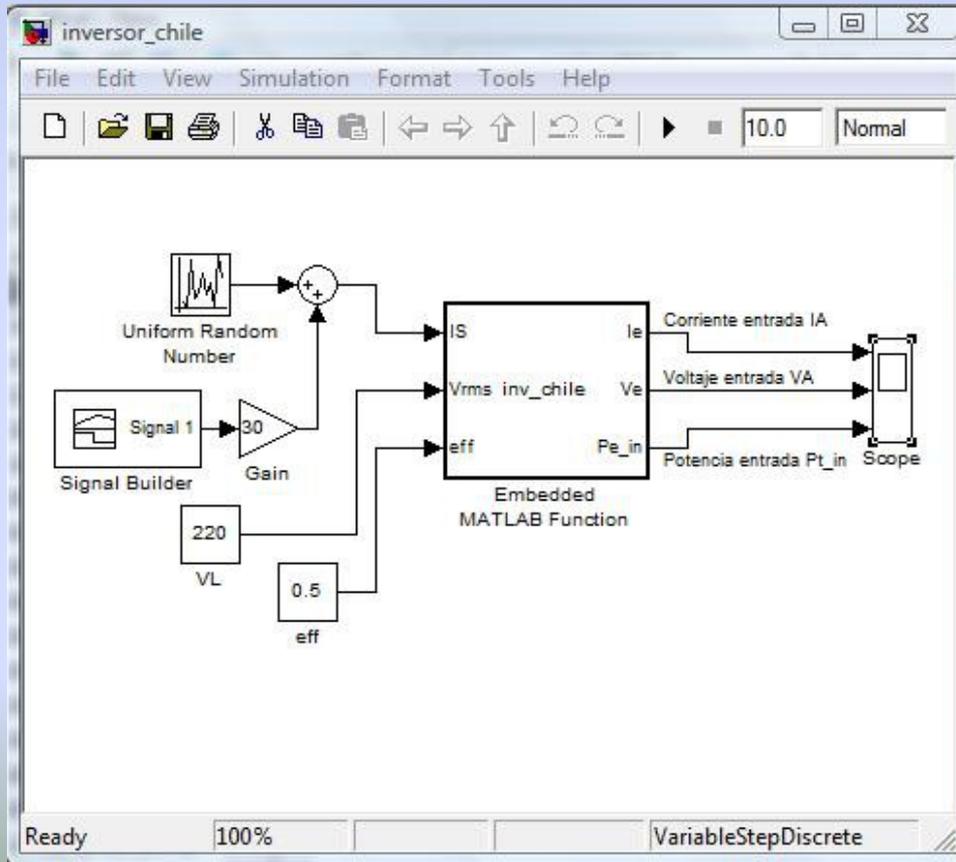
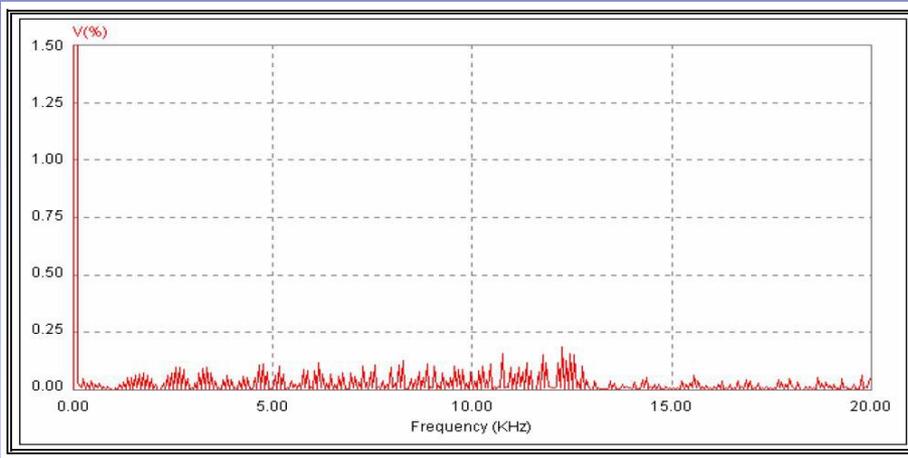
*Rectificador de doce pulsos*

$I_A=31$  [A], THDi=1,3% (THDi<sub>CONVENCIONAL</sub>=14,8%)  
 $V_A=221,7$  [V] ;  $V_L=487$  [V] ;  $I_L=38,2$  [A]  
 $P_T(IN)=20,5$  [kW]  $P_T(OUT)=18,6$  [kW]

$\eta=91\%$  ( $\eta_{CONVENCIONAL}=95\%$ )

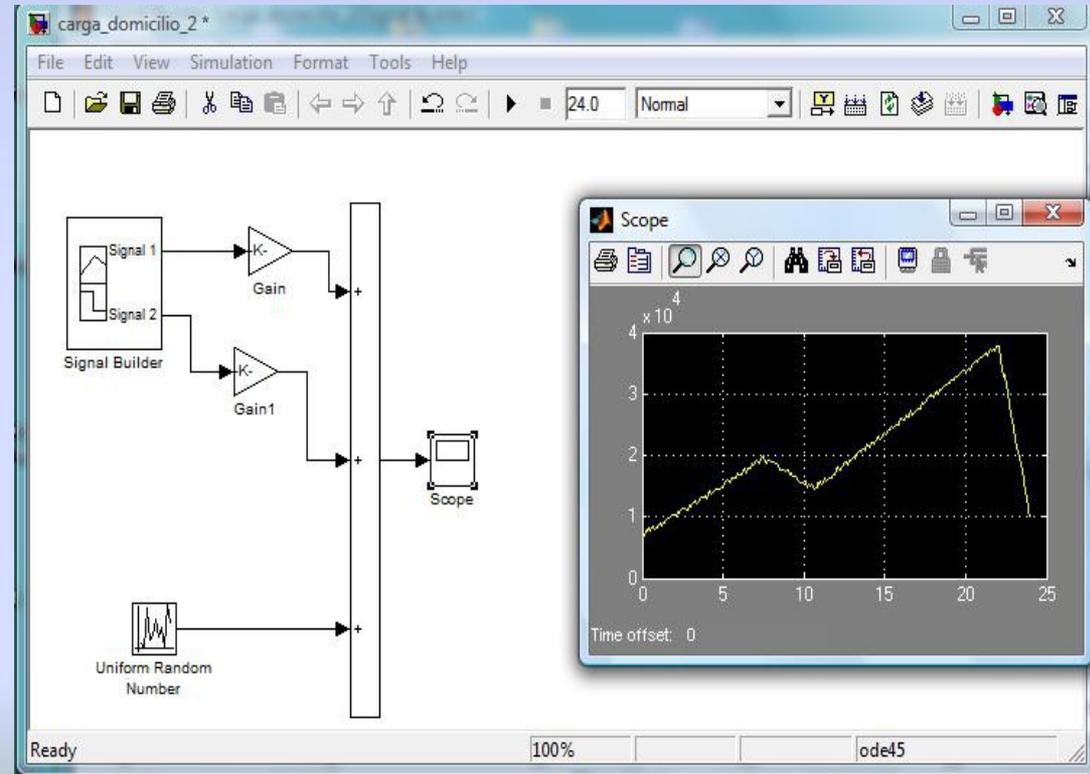
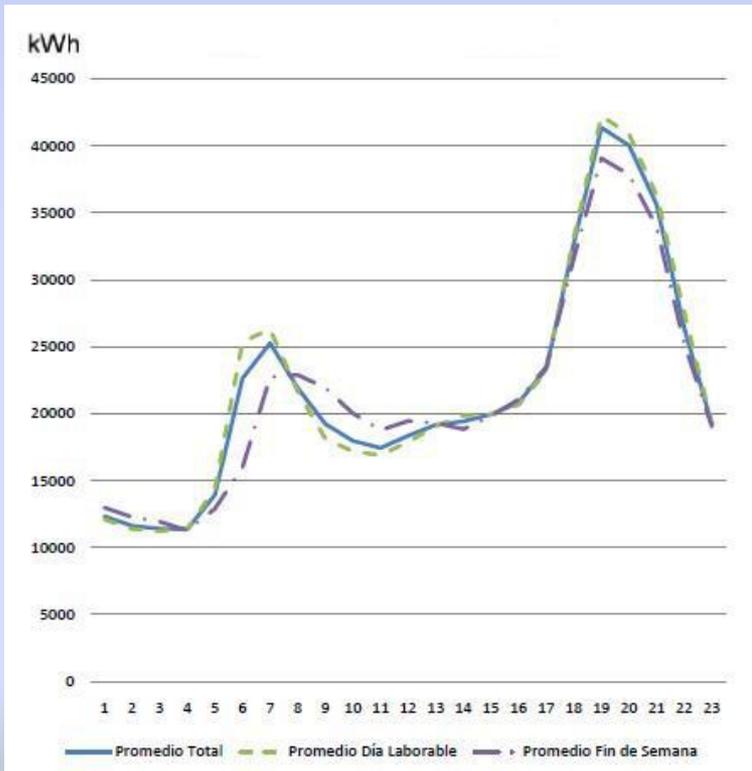


# SIMULACION INVERSOR MULTINIVEL PUC DE CHILE

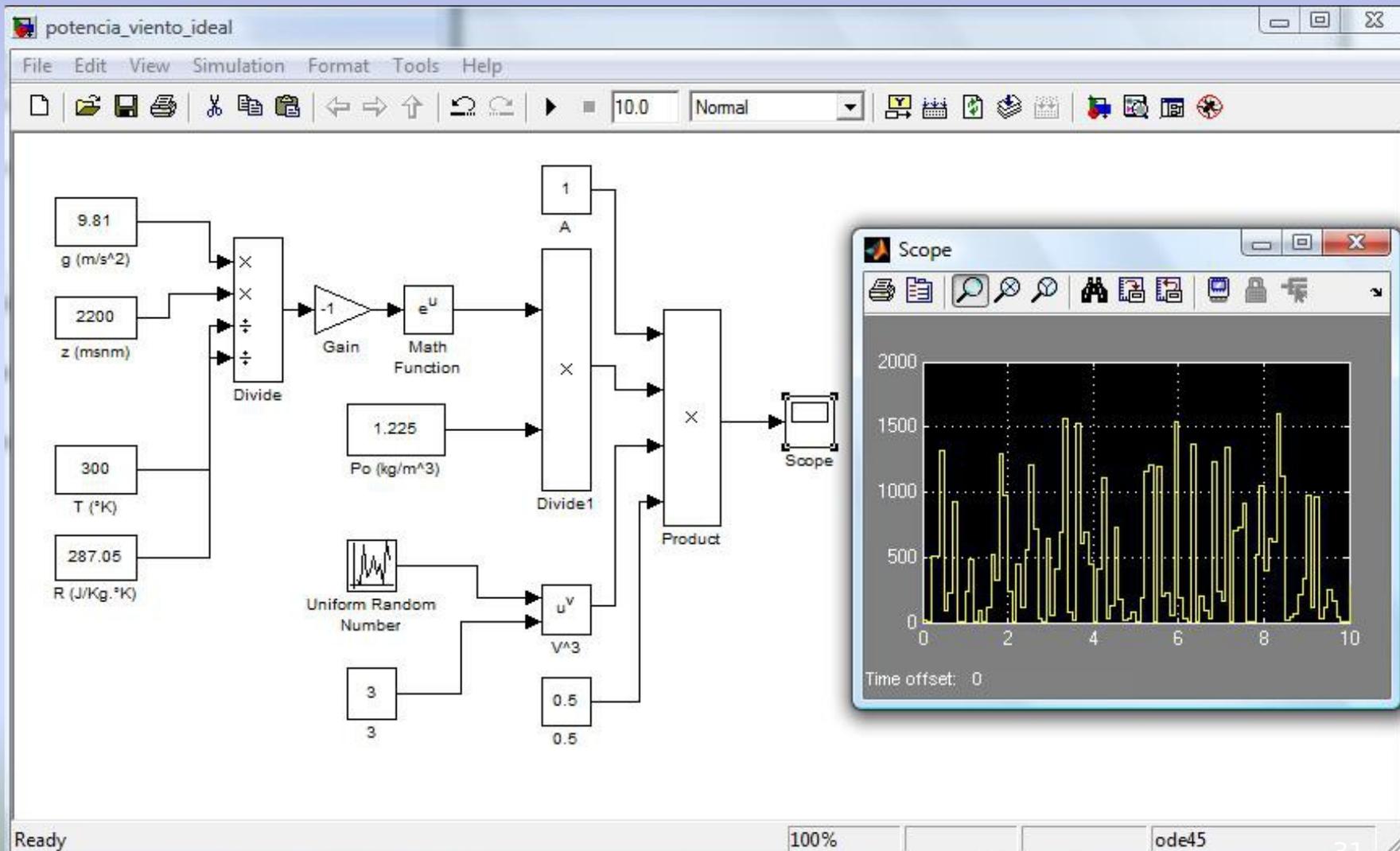


# SIMULACION CARGA DOMICILIARIA

Curva Representativa del consumo de una Carga Domiciliaria



# SIMULACION POTENCIA IDEAL EN VIENTO

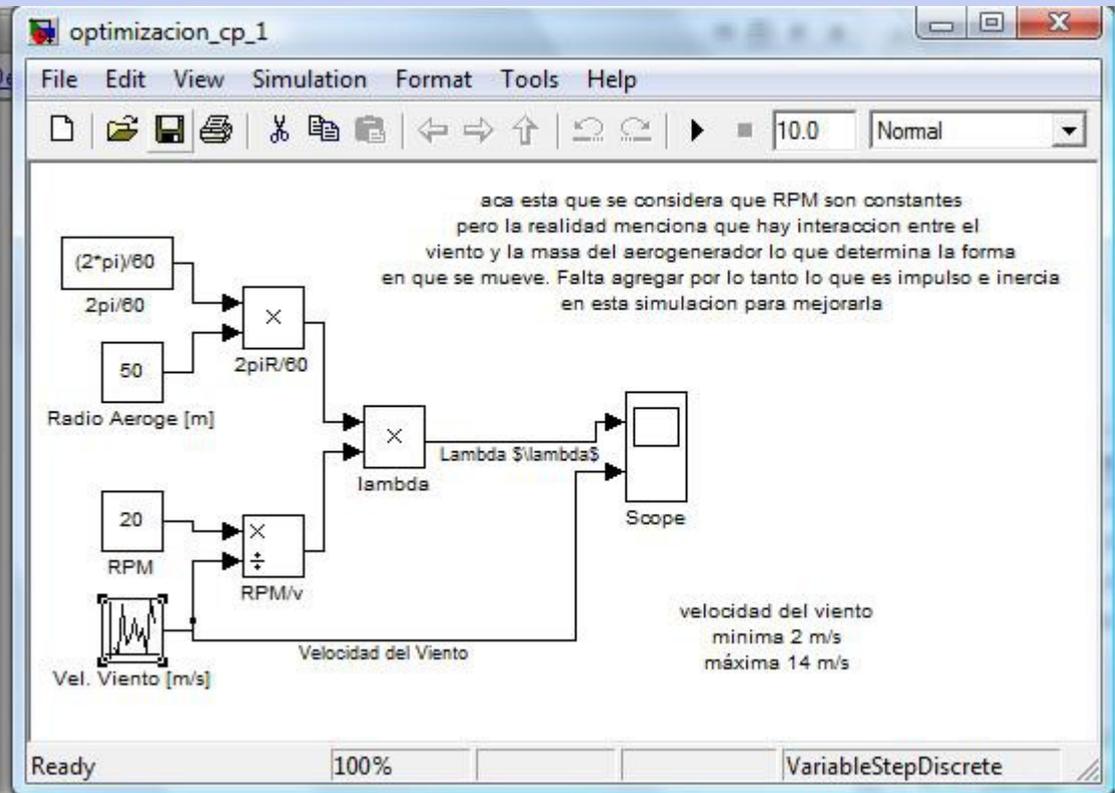
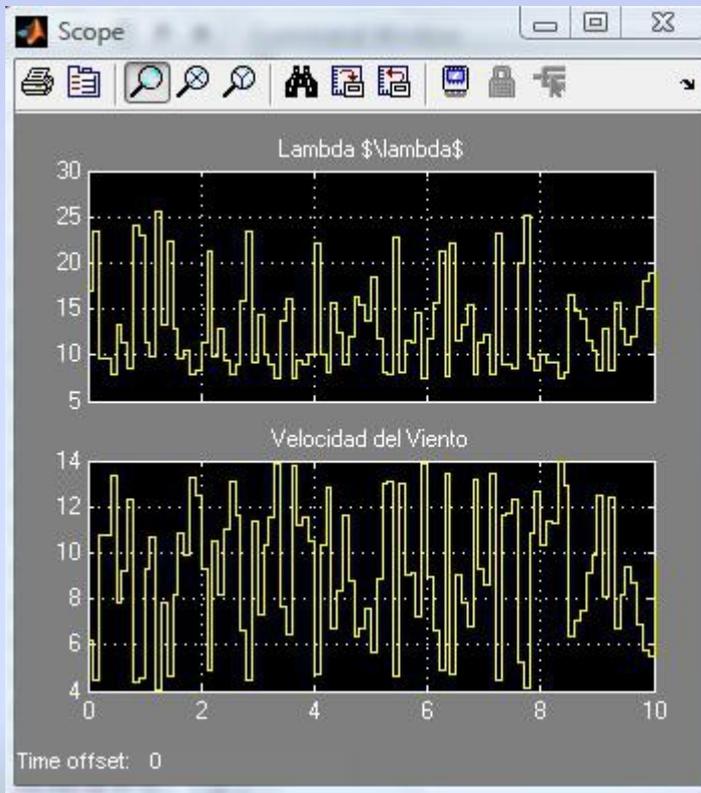




# SIMULACION DE $\lambda$ vs VELOCIDAD DE VIENTO

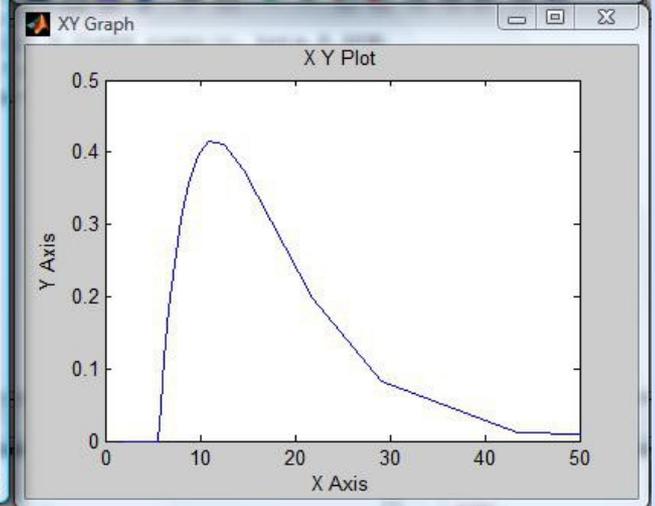
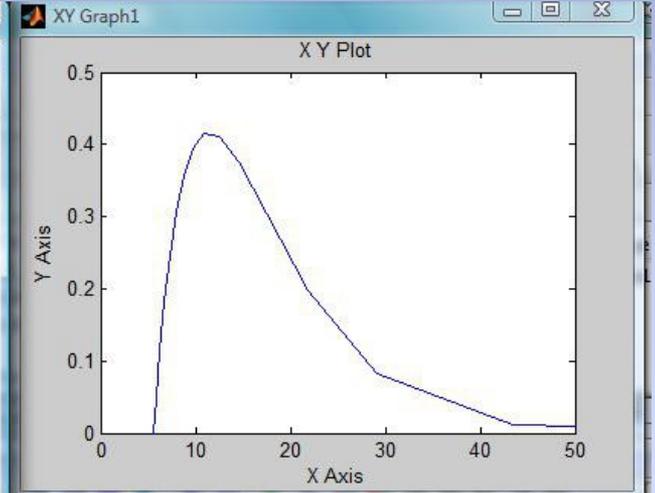
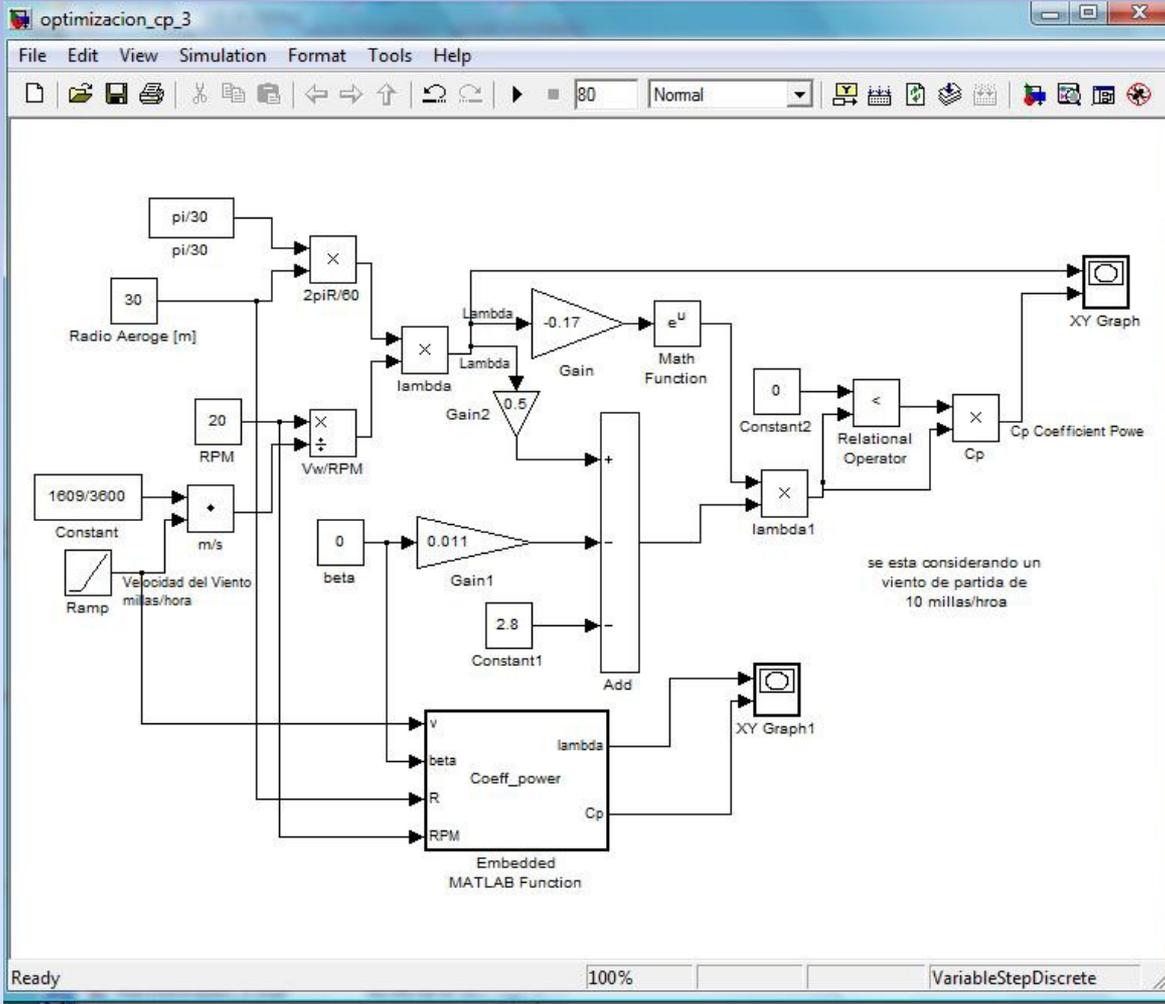
tip speed ratio " $\lambda$ "

$$\lambda = \frac{\omega R}{V}$$



# Simulación del COEFICIENTE DE POTENCIA “Cp”

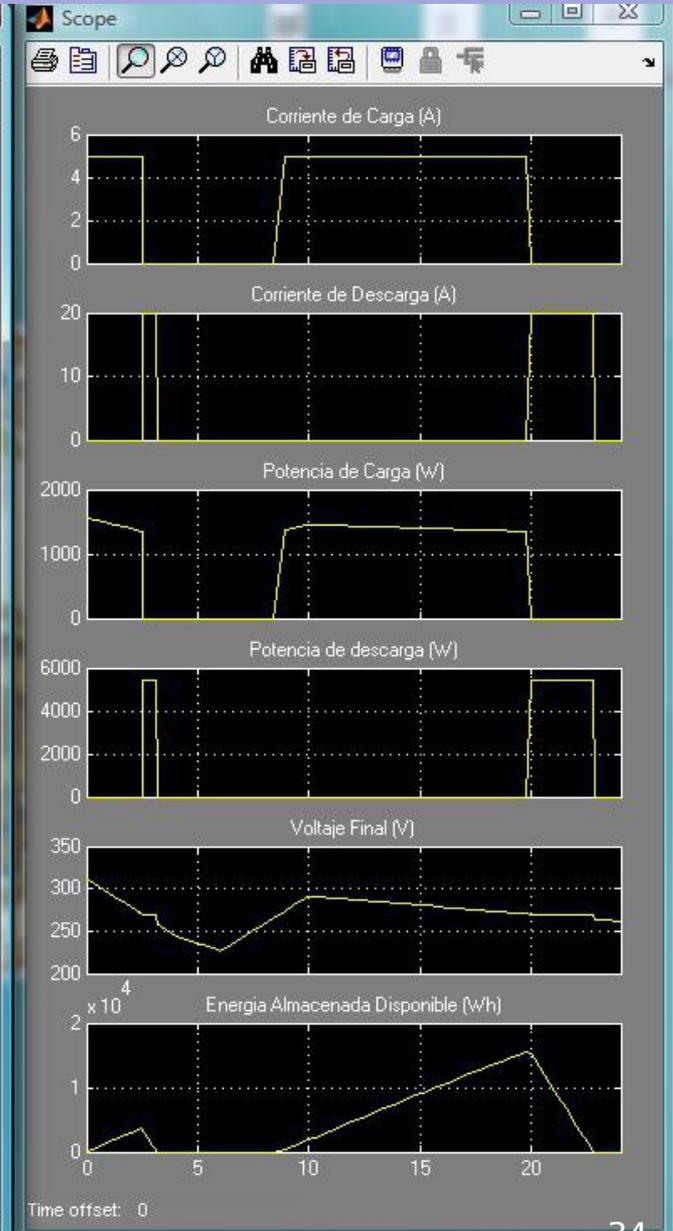
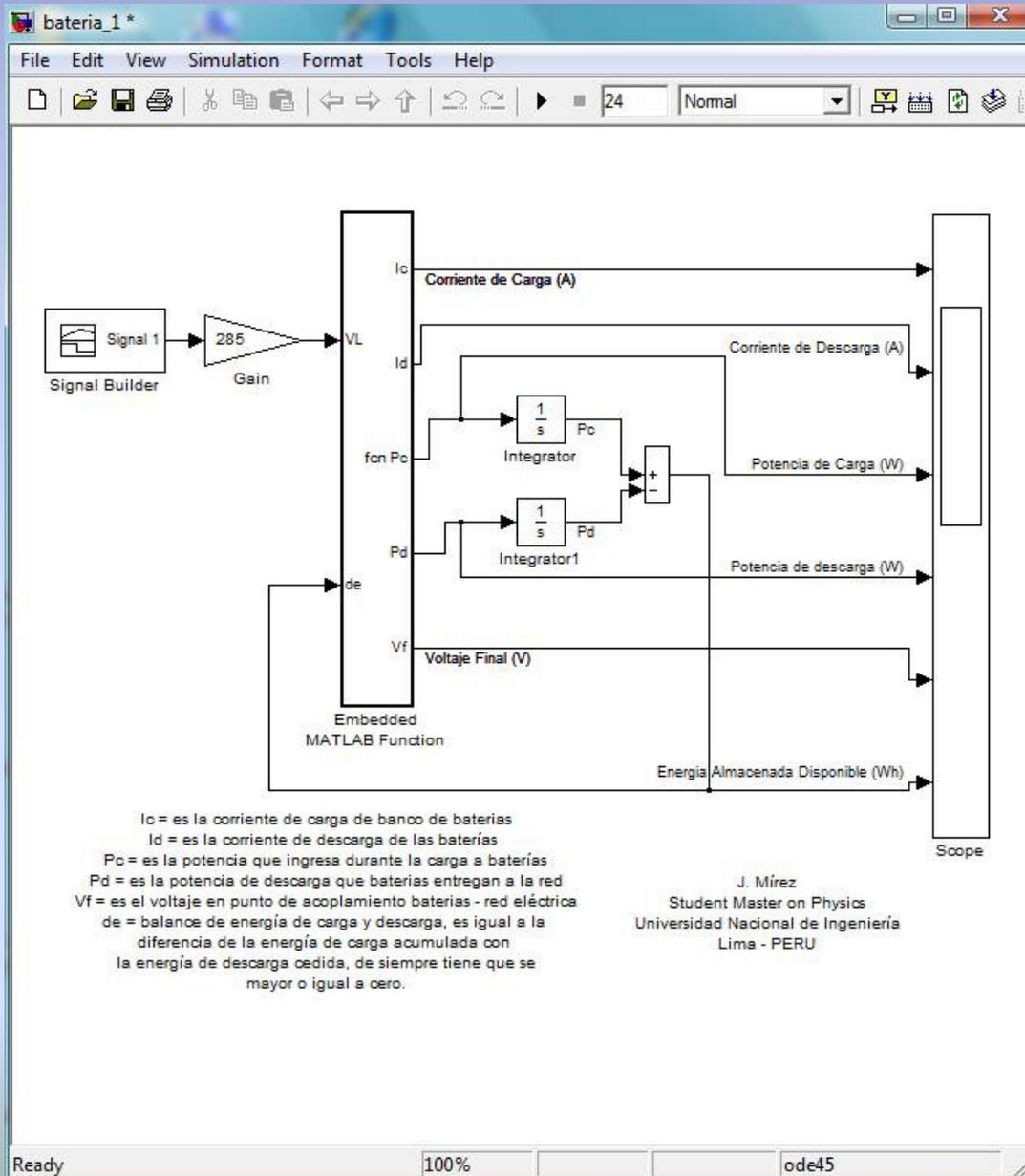
Con ángulo de ataque constante y  $C_p$  y velocidad creciente unitaria



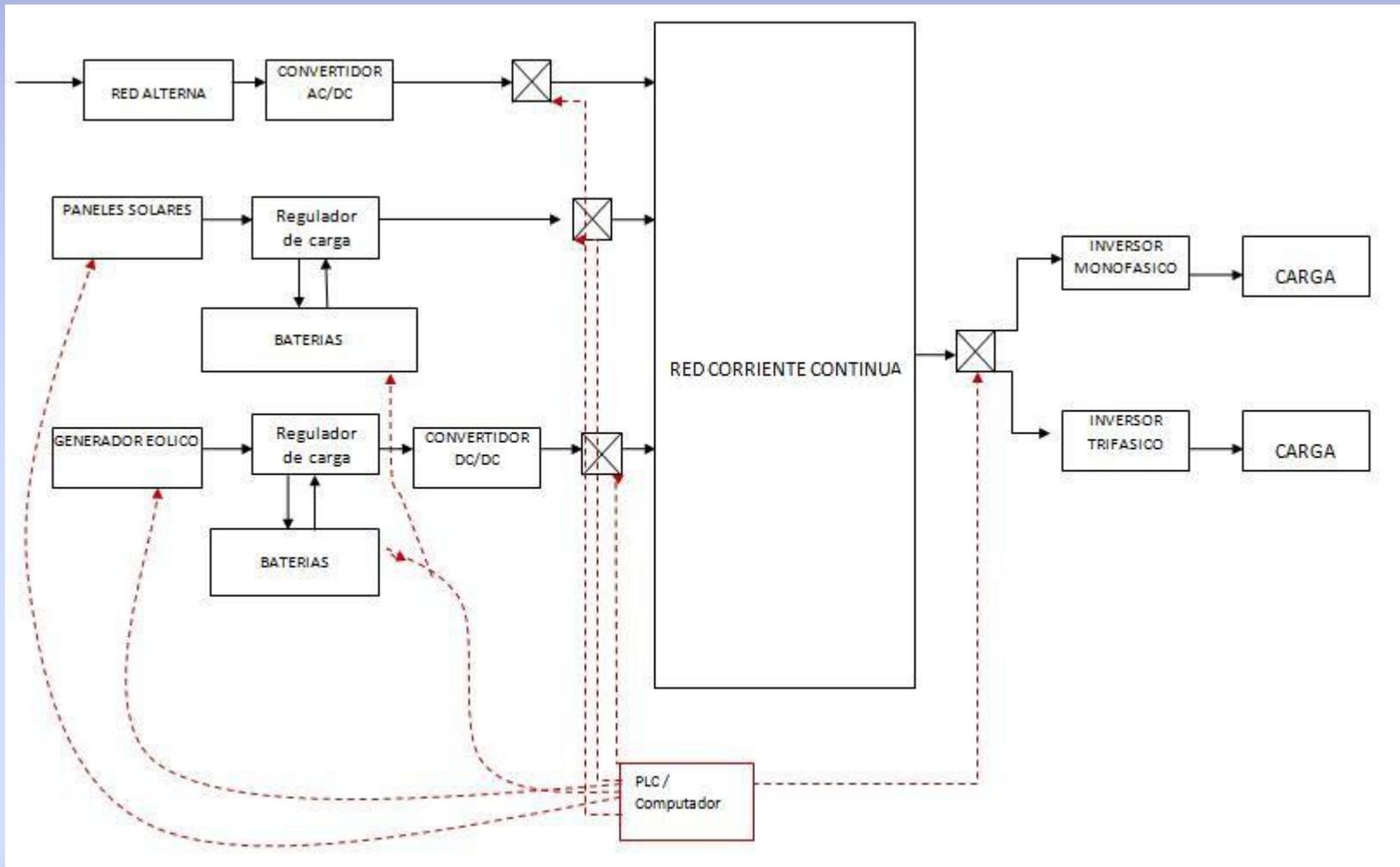
$$\lambda_i = \frac{3600R}{1609\lambda}$$

$$C_p = \frac{1}{2}(\lambda_i - 0,022\beta^2 - 5,6)e^{-0,17\lambda_i}$$

# SIMULACION FUENTE DE ALMACENAMIENTO (BATERIAS)

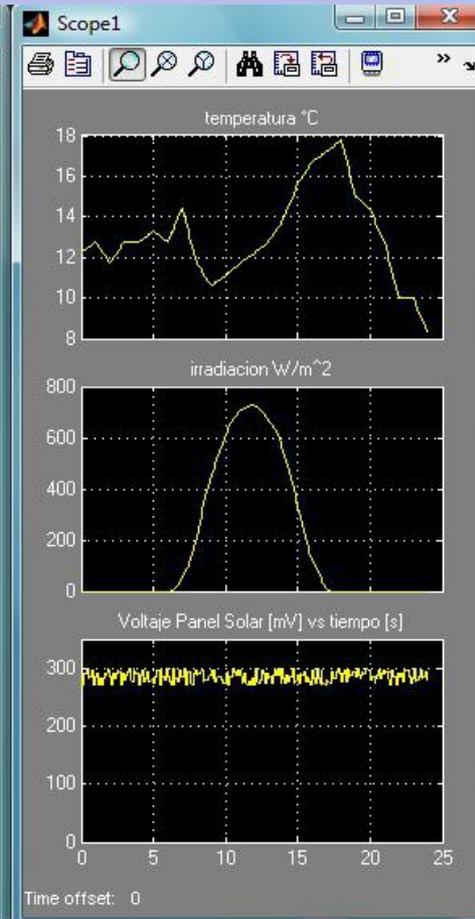
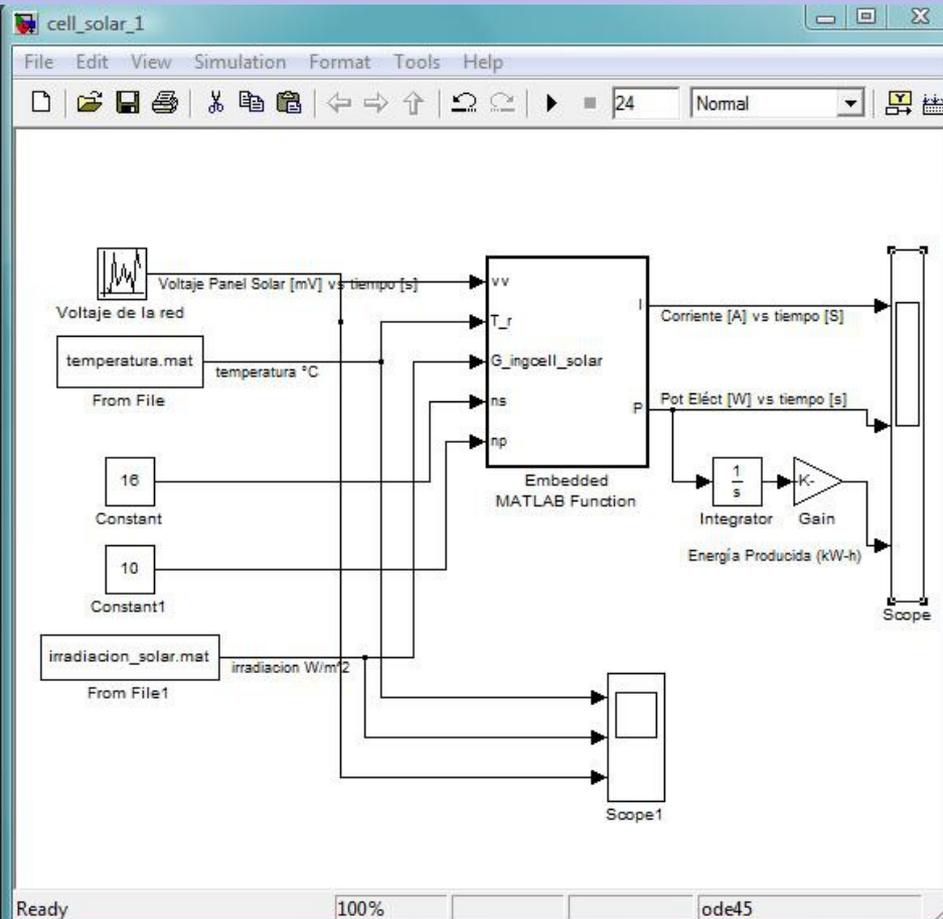
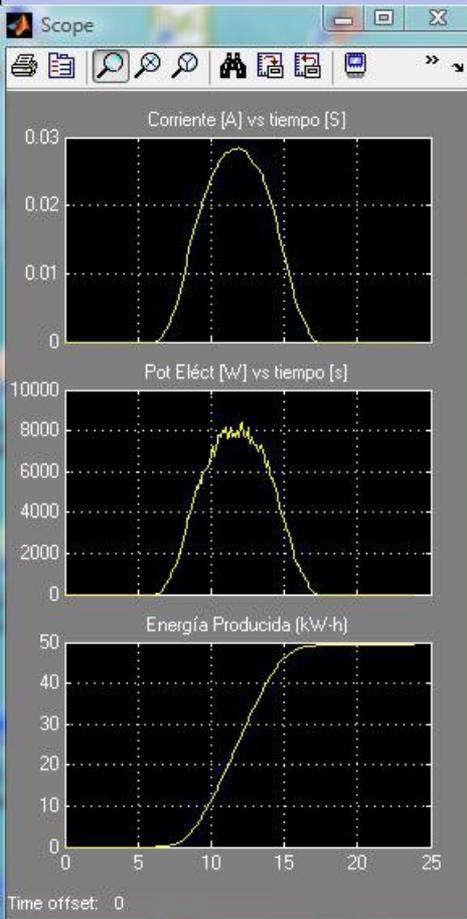


## CONOCER en DETALLE LA MICROGRID

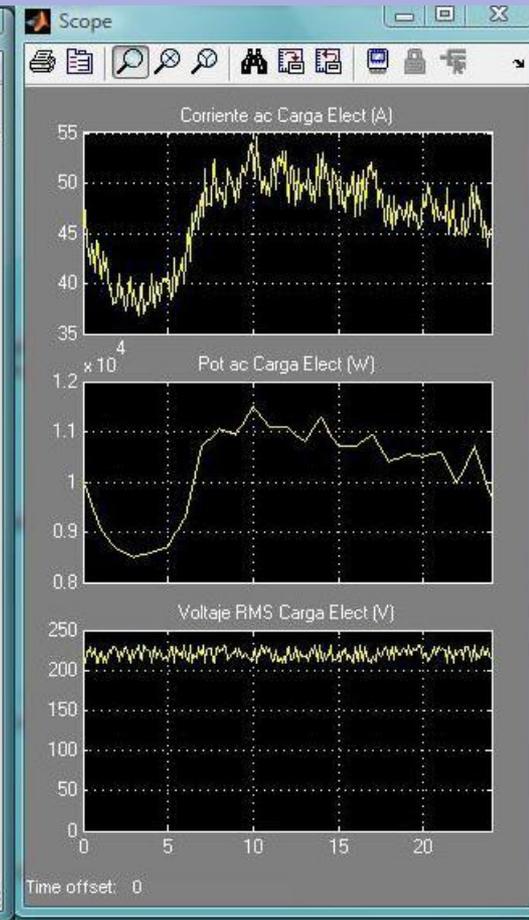
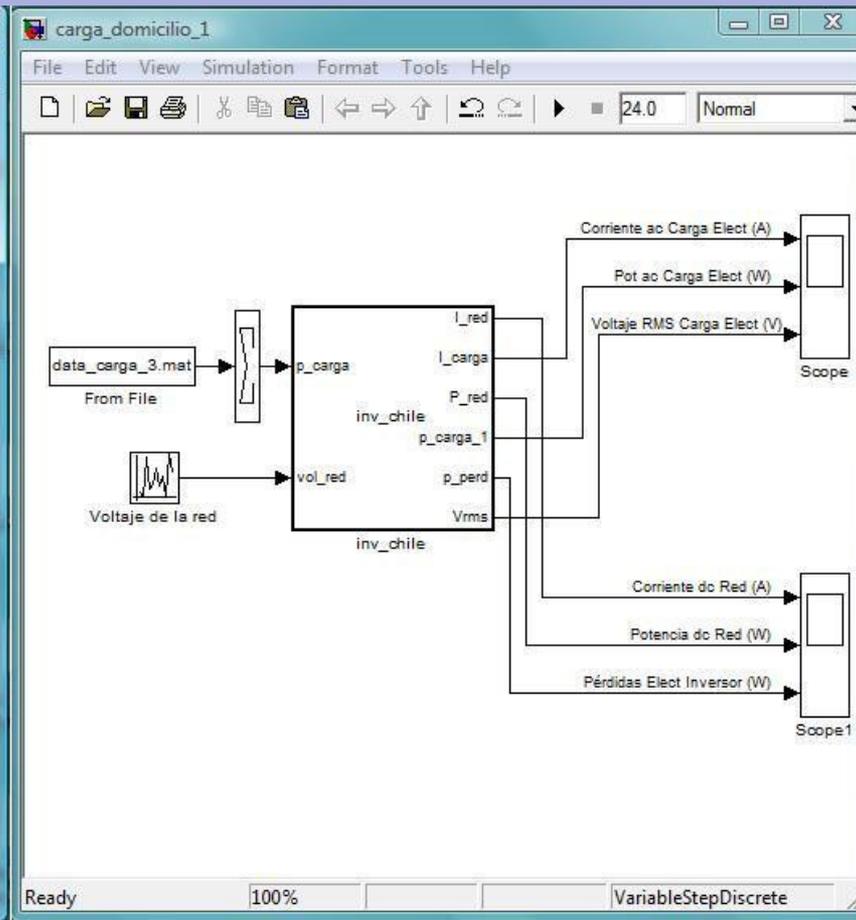
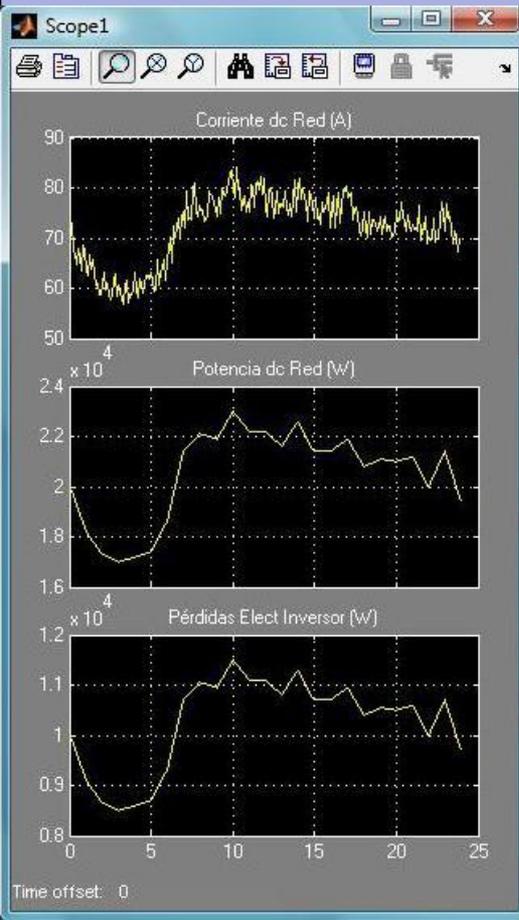


¡¡ SE HIZO INDISPENSABLE SIMULAR CADA COMPONENTE DEL SISTEMA !!

# SIMULACION CENTRAL SOLAR FOTOVOLTAICA



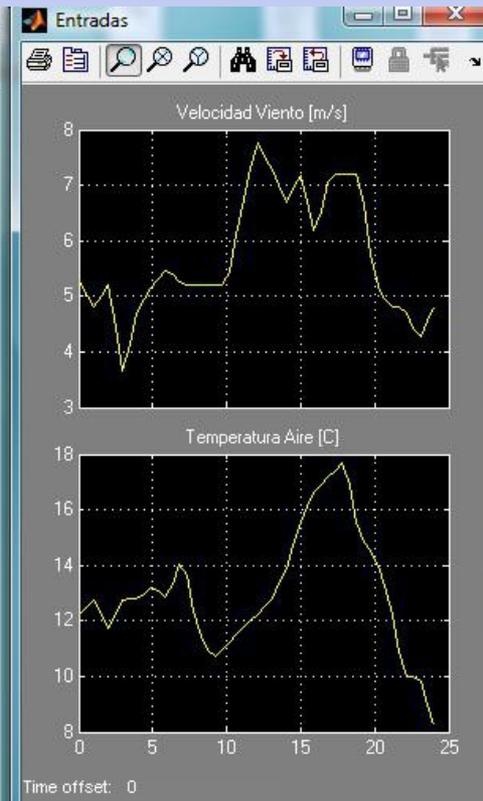
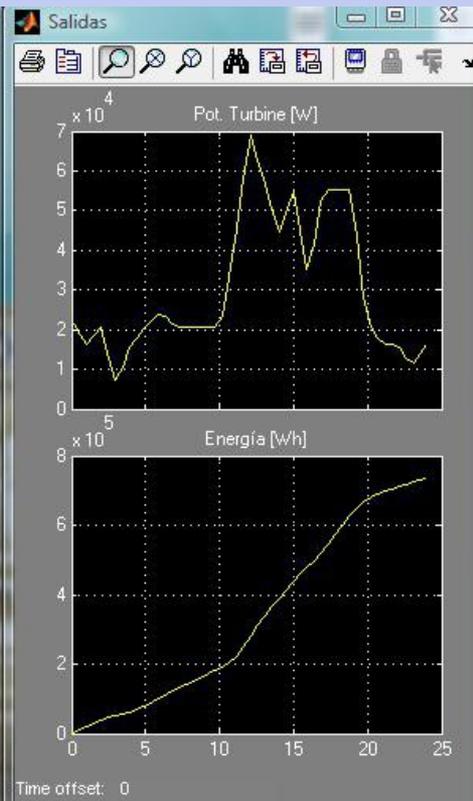
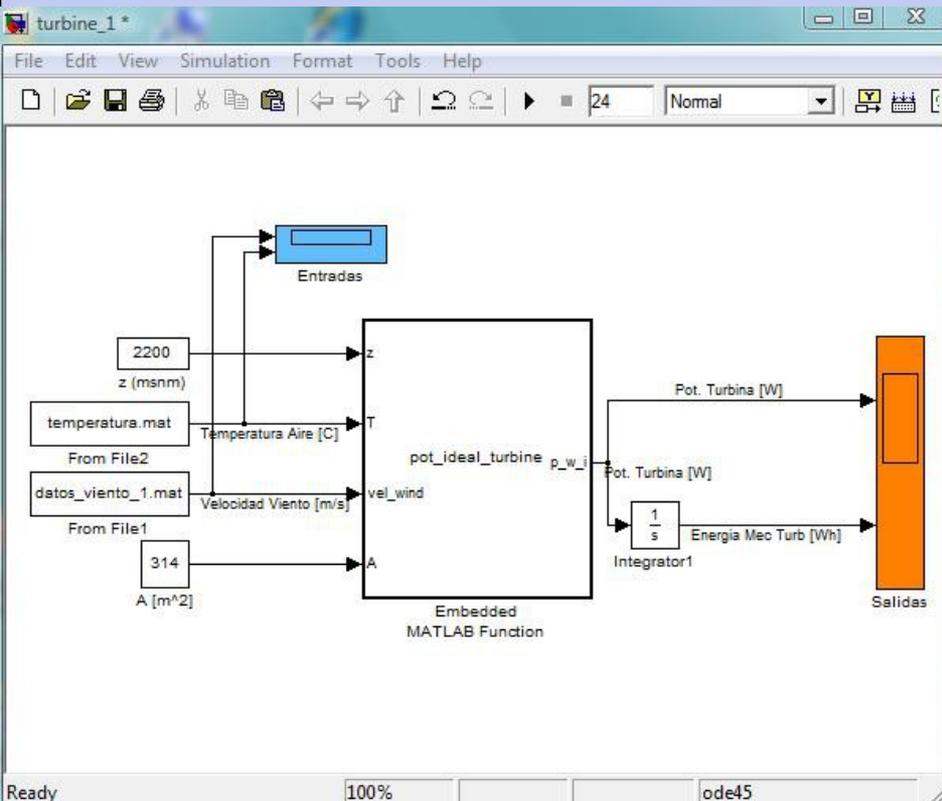
# SIMULACION DE CARGAS DOMICILIARIAS

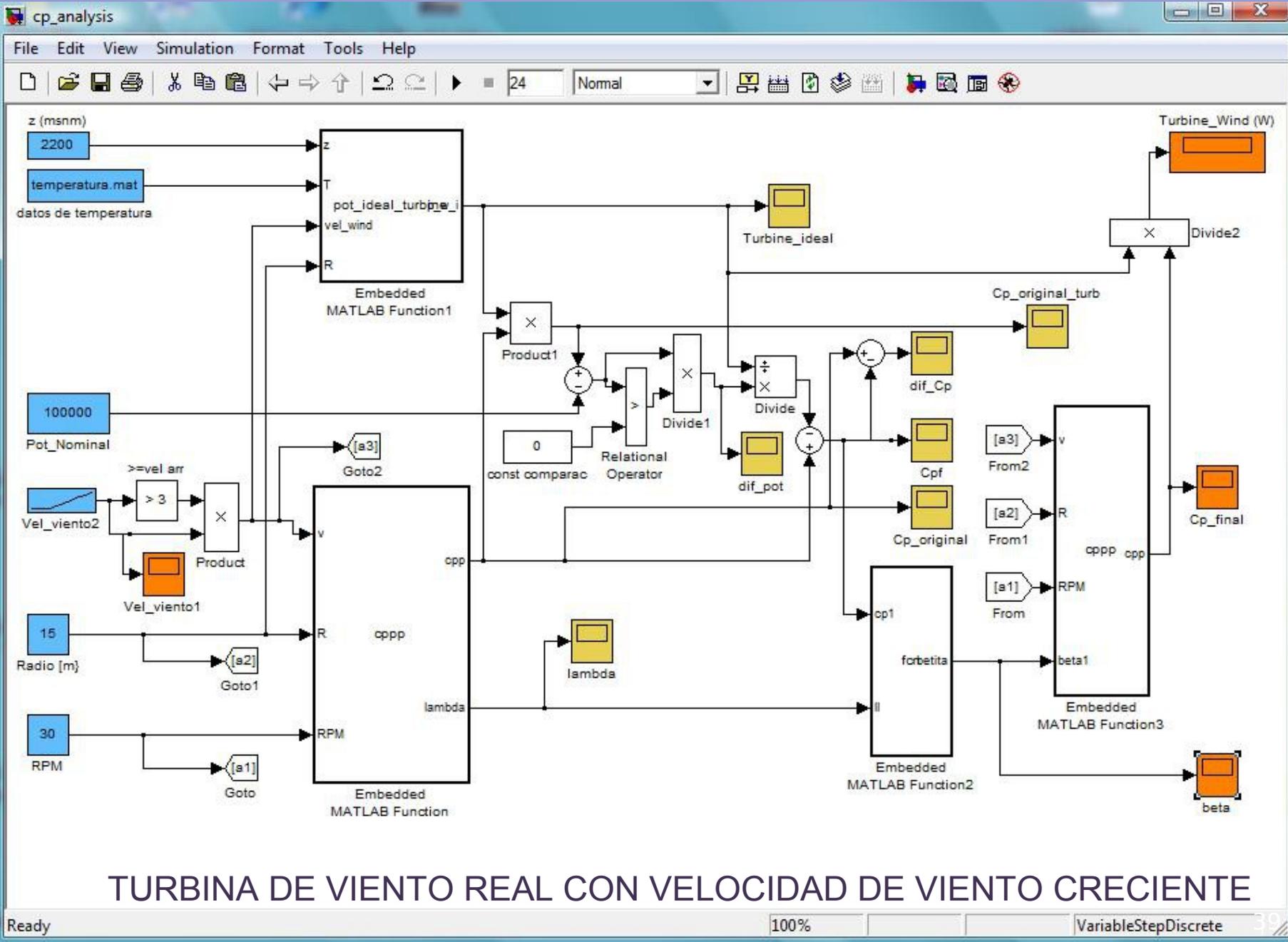


Visualizar: carga domiciliaria 1  
carga domiciliaria 2



# SIMULACION DE TURBINA DE VIENTO IDEAL

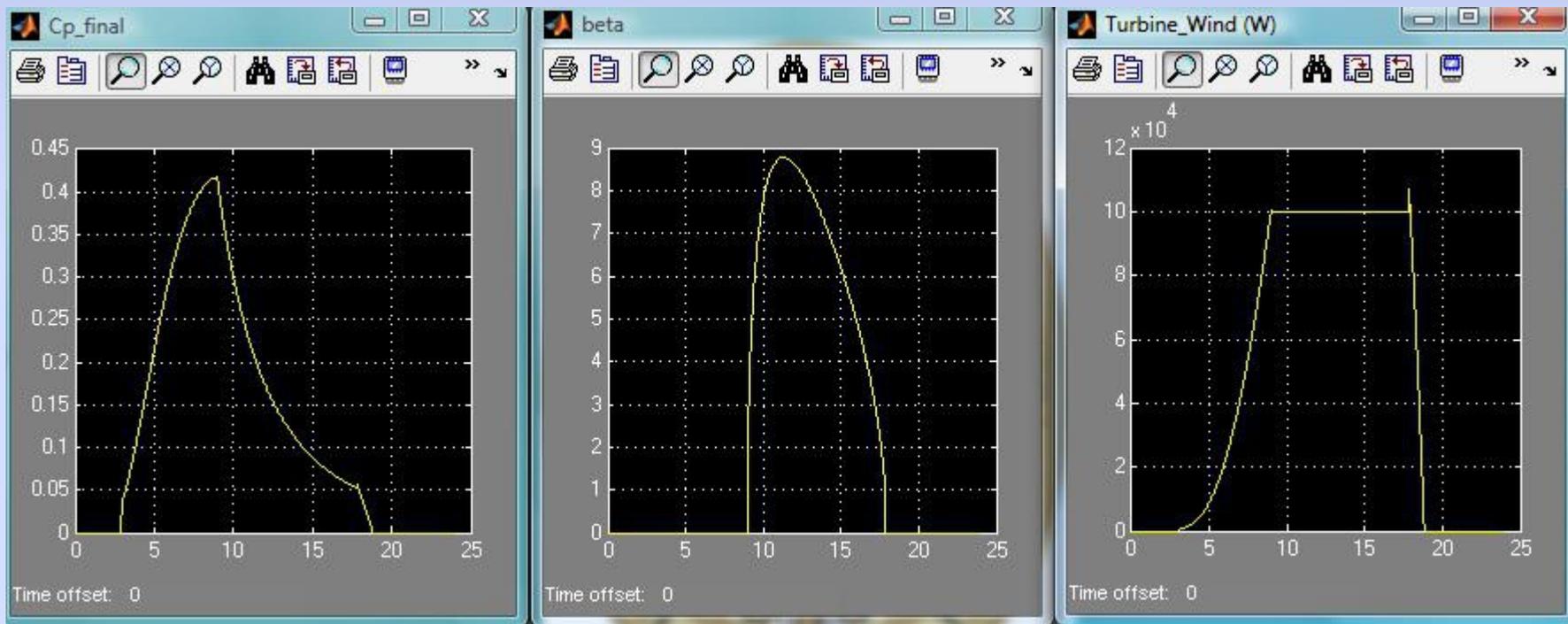


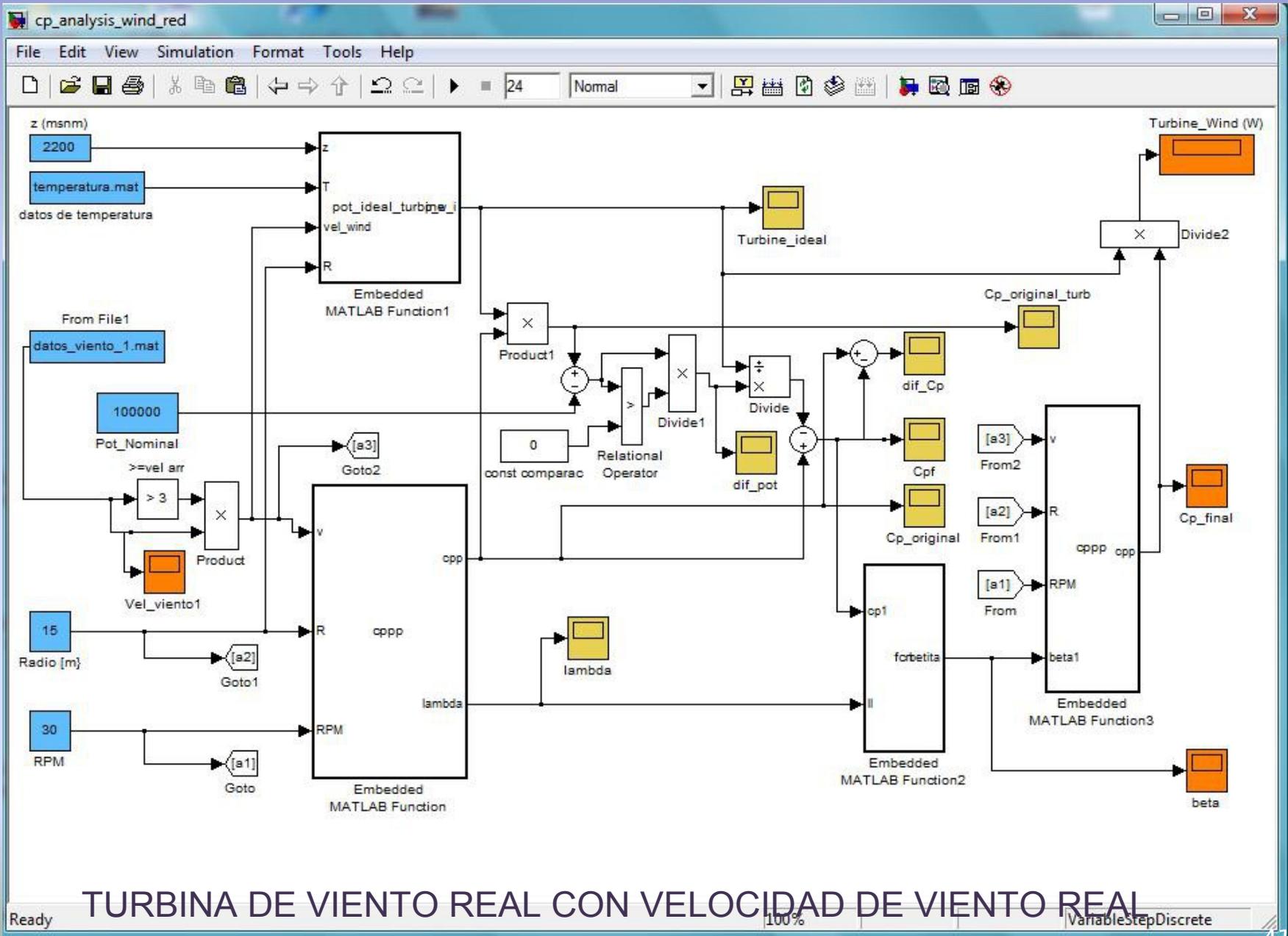


# TURBINA DE VIENTO REAL CON VELOCIDAD DE VIENTO CRECIENTE



# RESULTADO DE SIMULACION DE TURBINA DE VIENTO PARA COMPROBAR POTENCIA MAXIMA, CONTROL DE ANGULO DE ATAQUE Y VALORES DE COEFICIENTE DE POTENCIA ( $C_p$ )

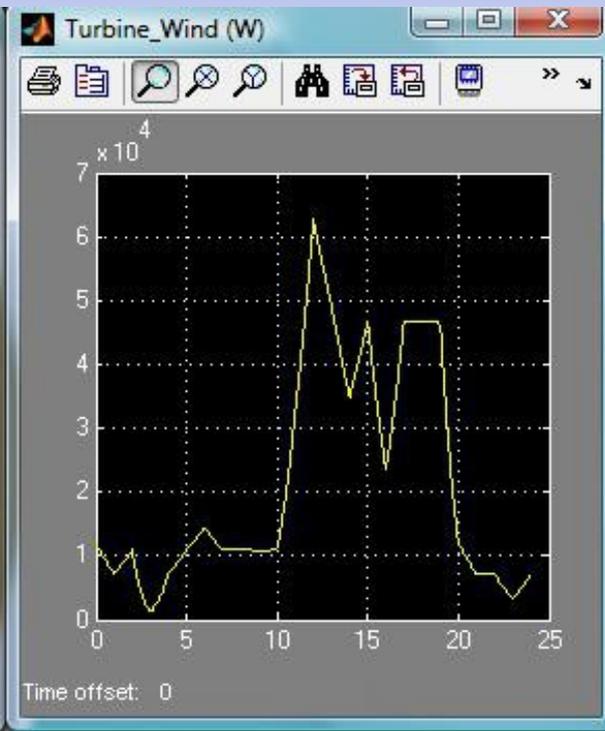
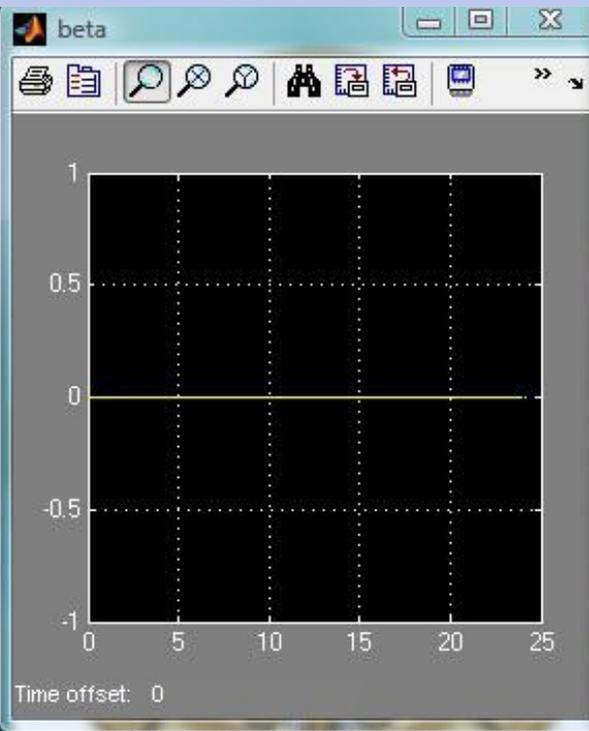
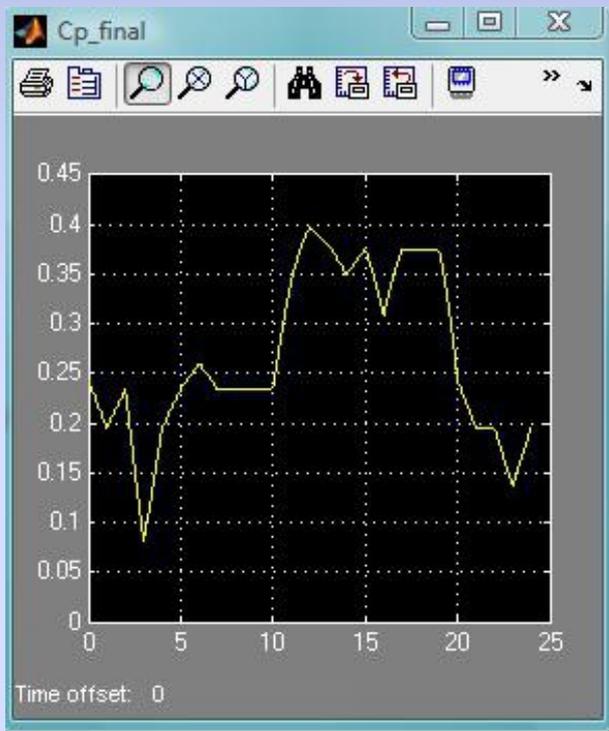




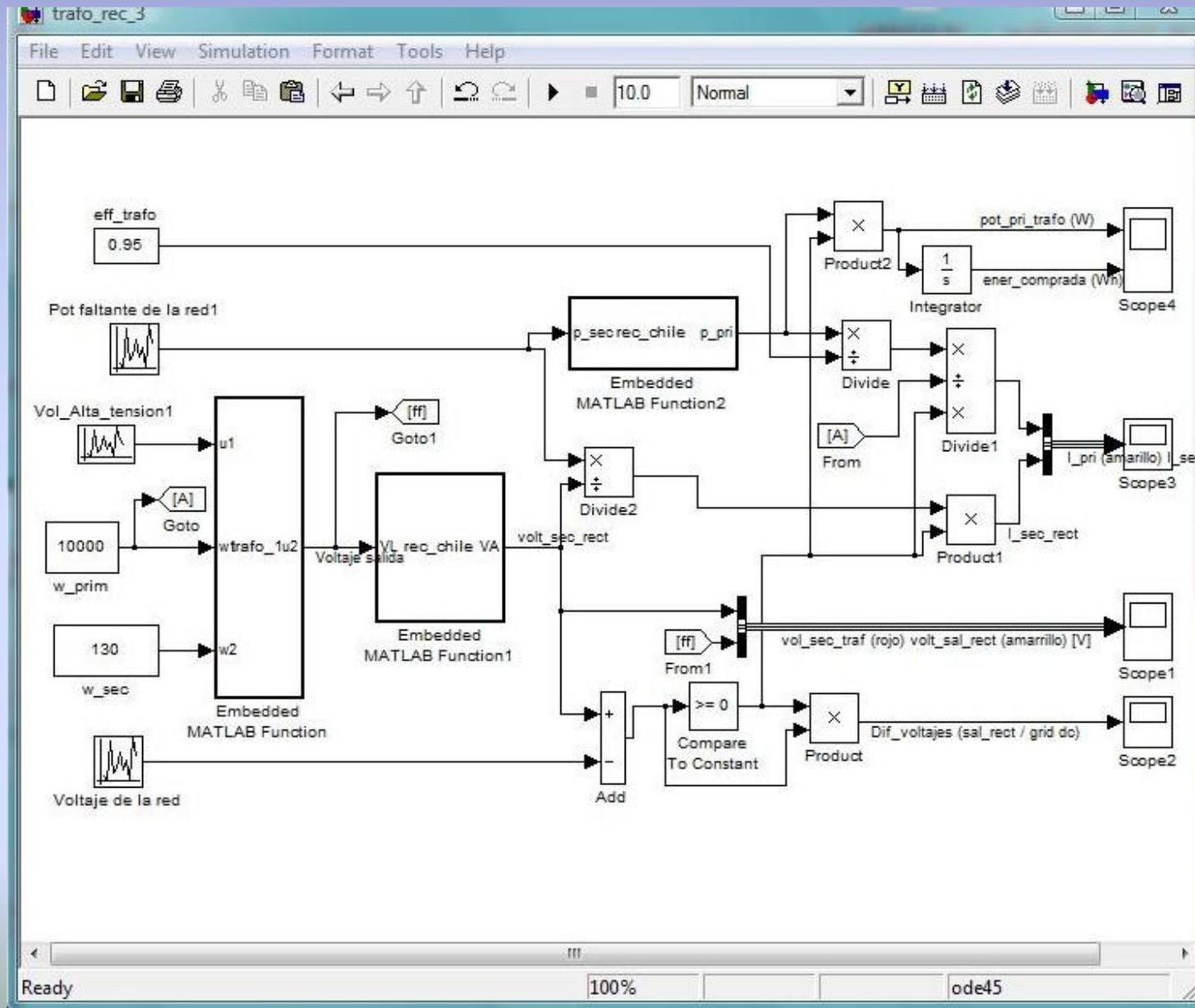
# TURBINA DE VIENTO REAL CON VELOCIDAD DE VIENTO REAL

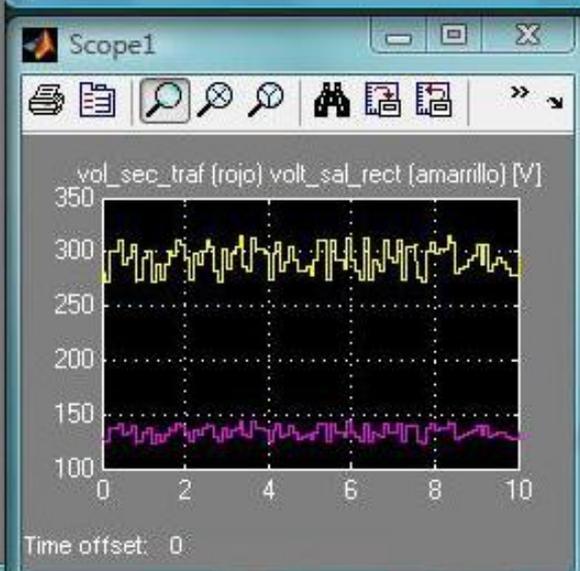
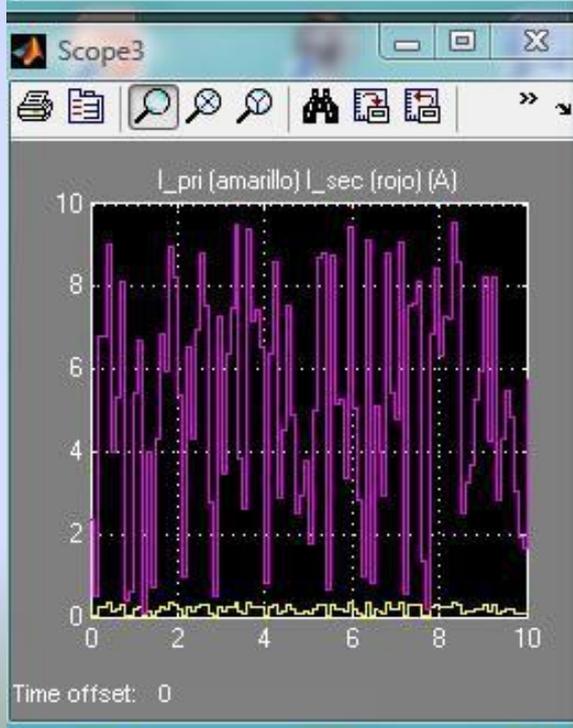
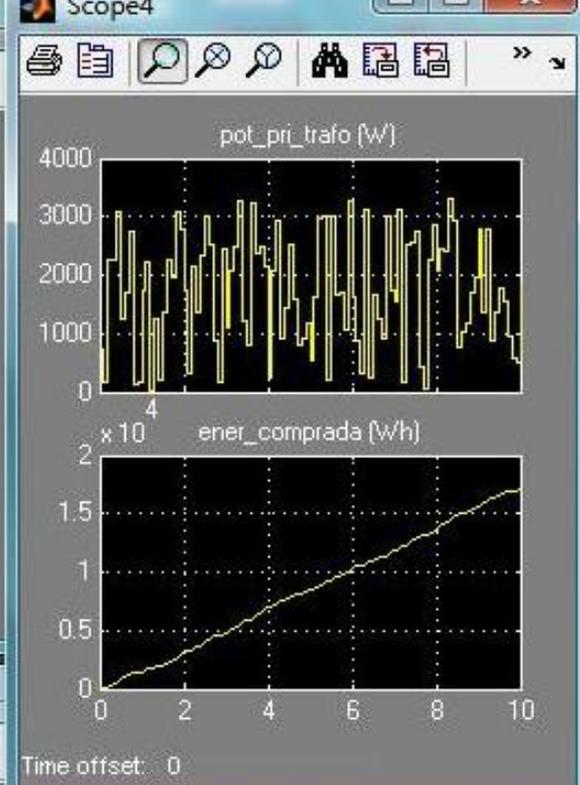
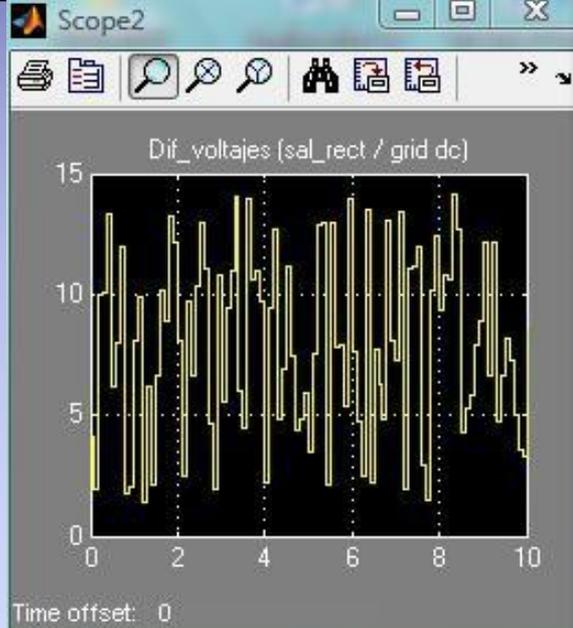


# RESULTADO DE SIMULACION DE **TURBINA DE VIENTO** CON VALORES REALES DE VELOCIDAD DE VIENTO



# SIMULACION TRANSFORMADOR - RECTIFICADOR

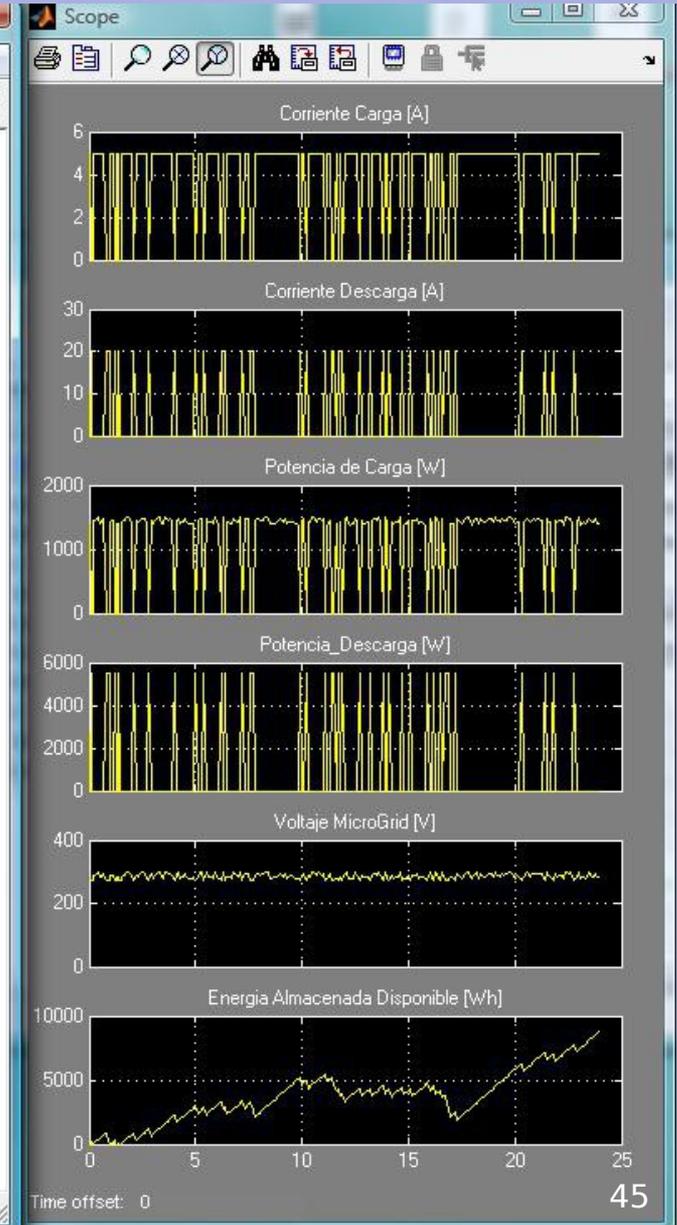
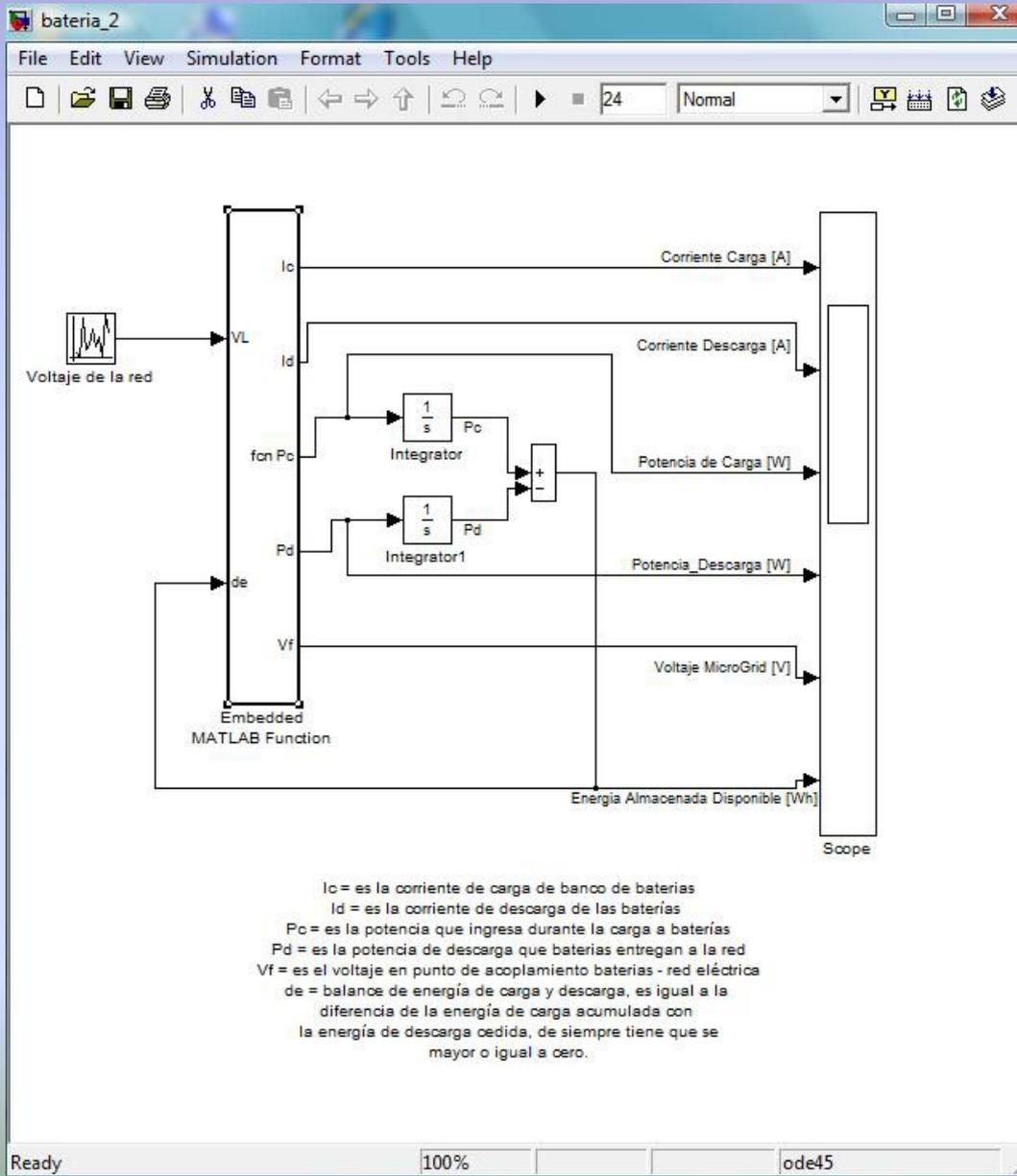




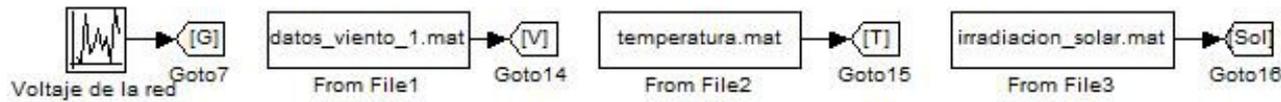
RESULTADOS  
SIMULACION

TRANSFORMADOR  
RECTIFICADOR

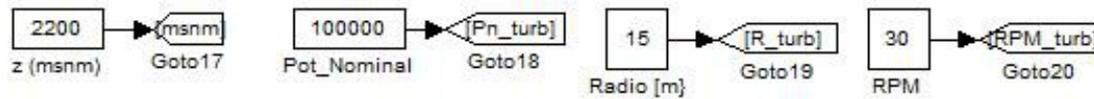
# SIMULACION BANCO DE BATERIAS CON VOLTAJE DE RED ALEATORIO



# PARAMETROS DE ENTRADA DE LA MICROGRID ESTUDIADA

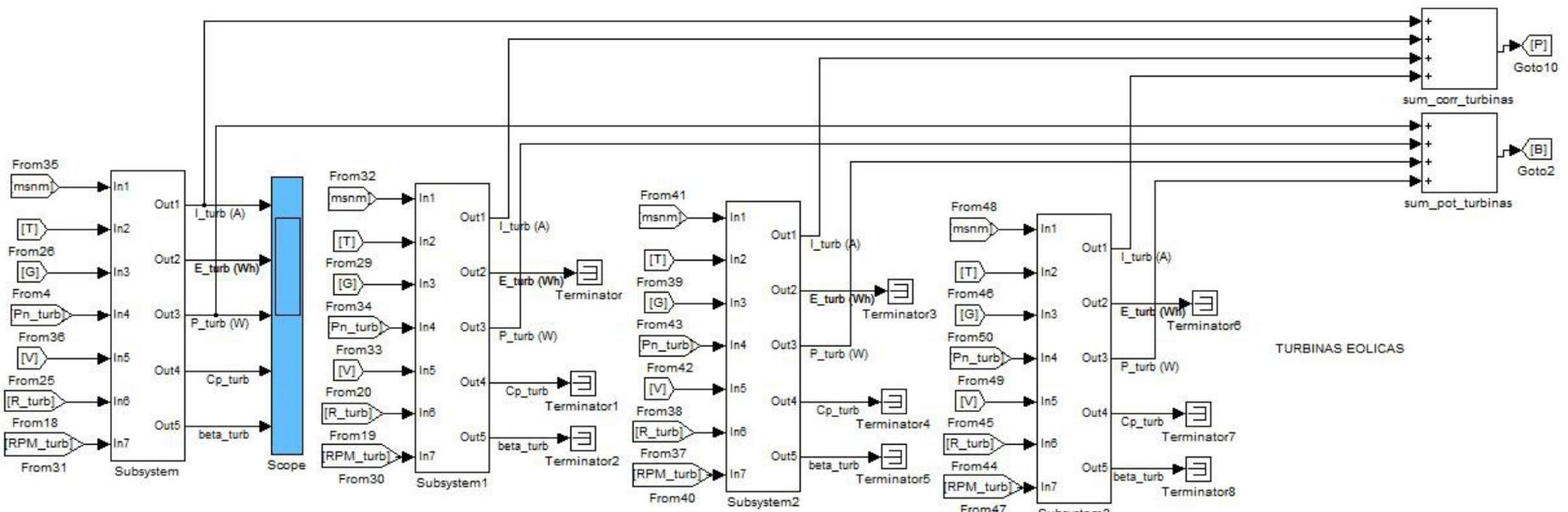


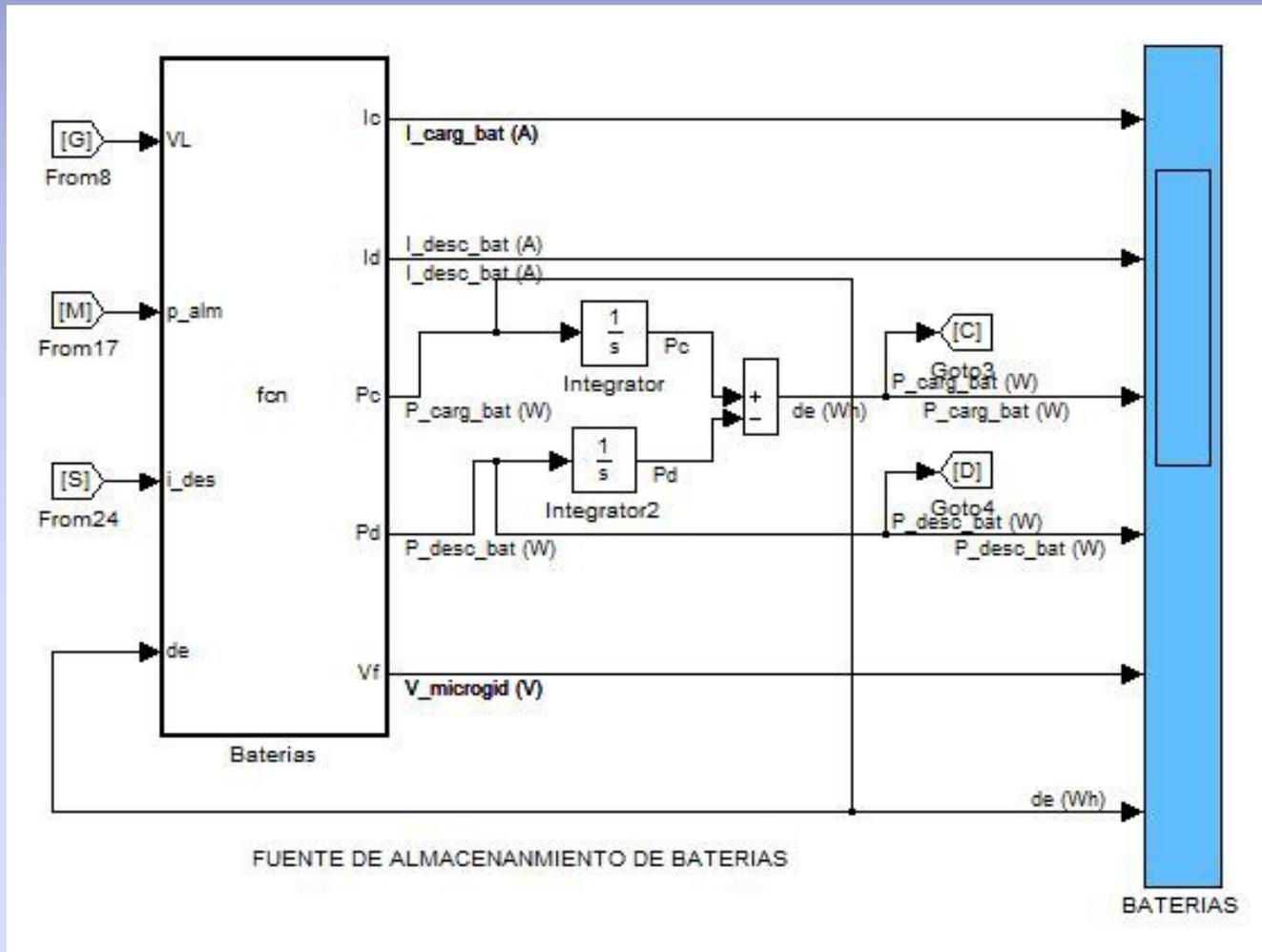
PARAMETROS DE ENTRADA  
 MEDICIONES DE RADIACION SOLAR  
 MEDIDAS DE VELOCIDAD DE VIENTO  
 MEDICION DE TEMPERATURA



DATOS GENERADORES DE AEROGENERADORES

## 4 TURBINAS DE VIENTO DE 100 KW c/u.



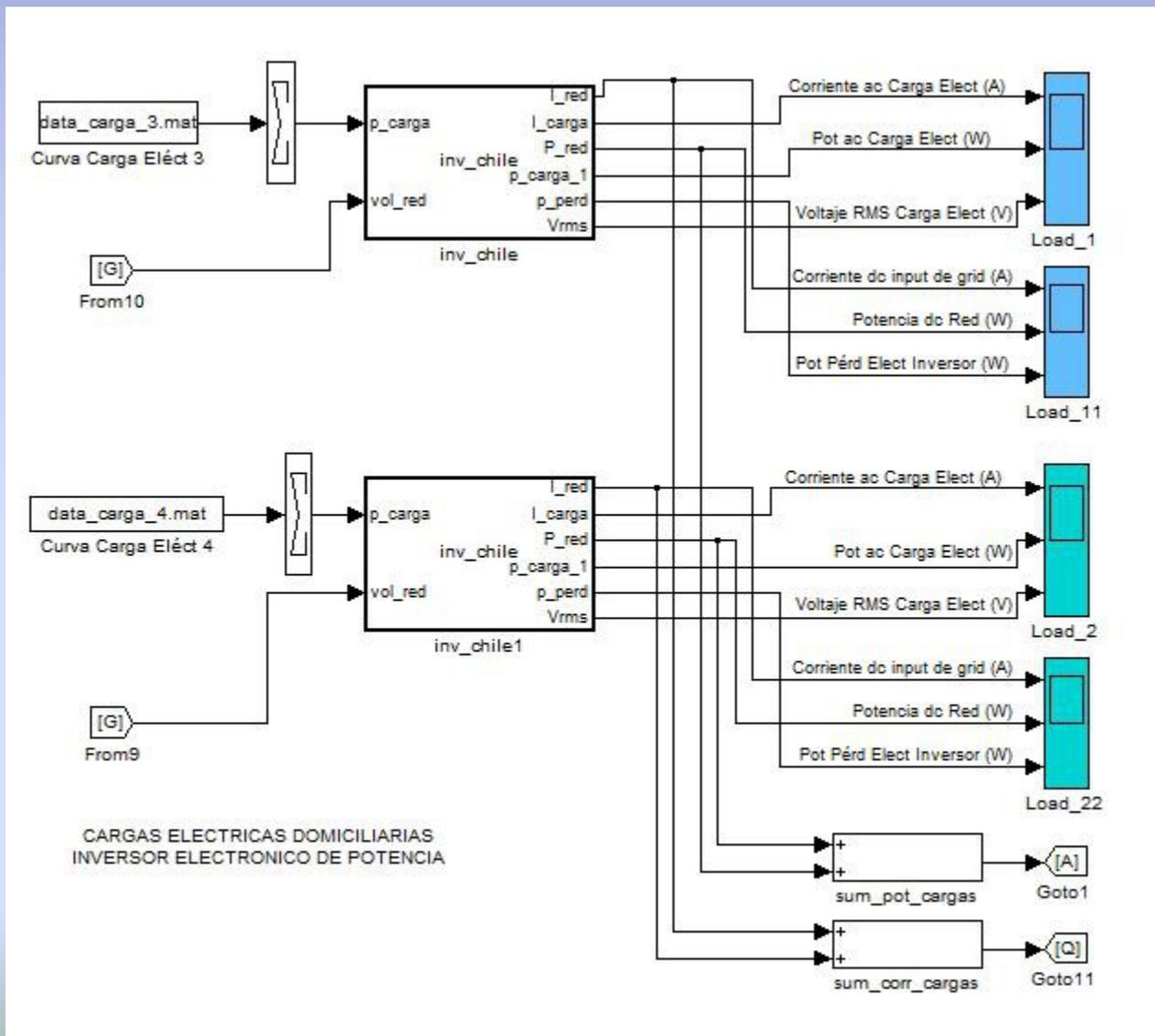


$p\_alm \rightarrow$  es la potencia a almacenar

$i\_des \rightarrow$  es la corriente faltante en la microgrid a suplir por baterías

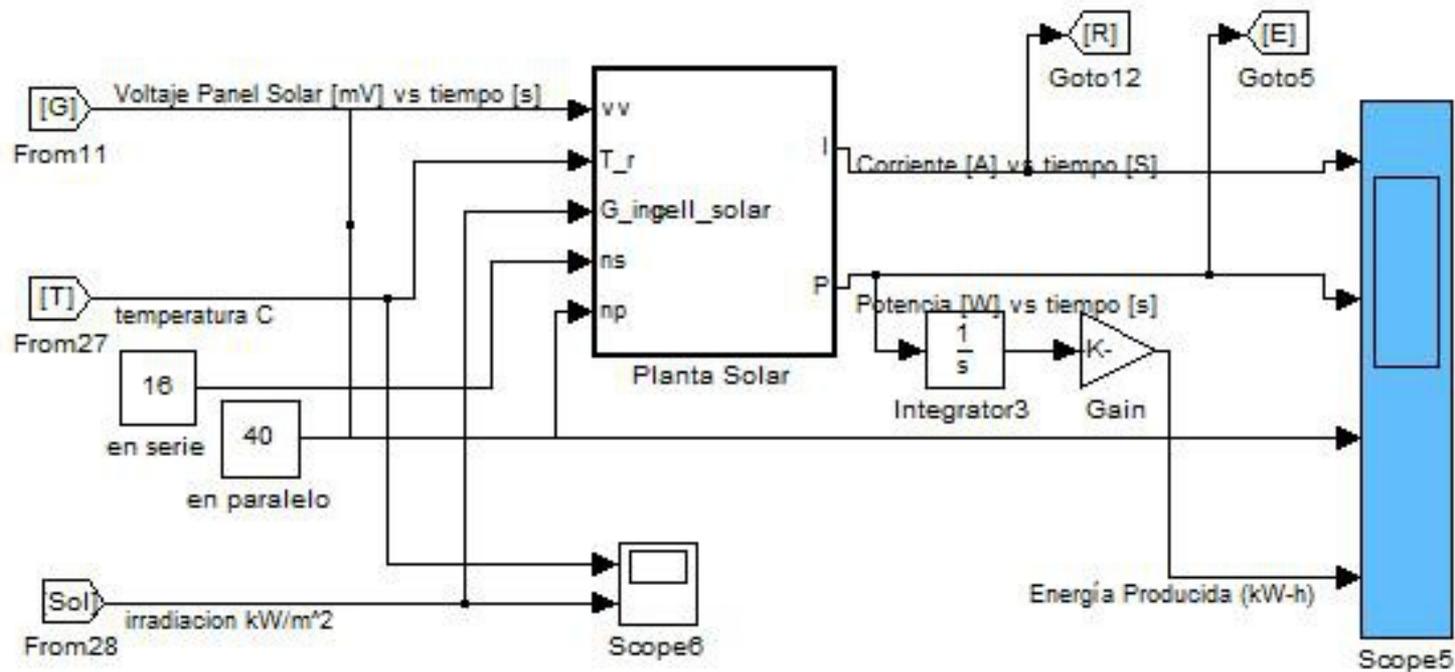


# CARGAS DOMICILIARIAS

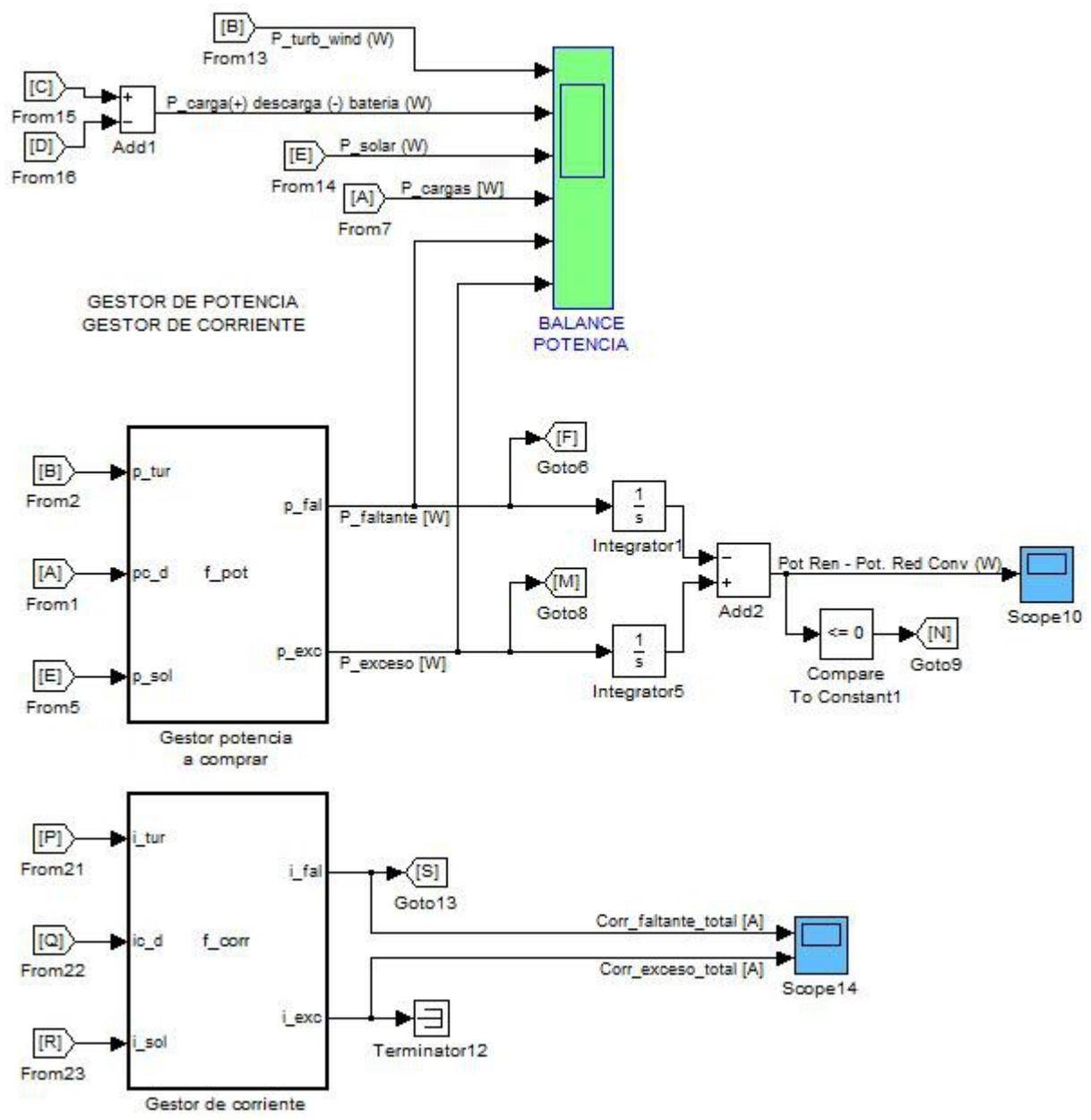




# CENTRAL ELECTRICA SOLAR FOTOVOLTAICA

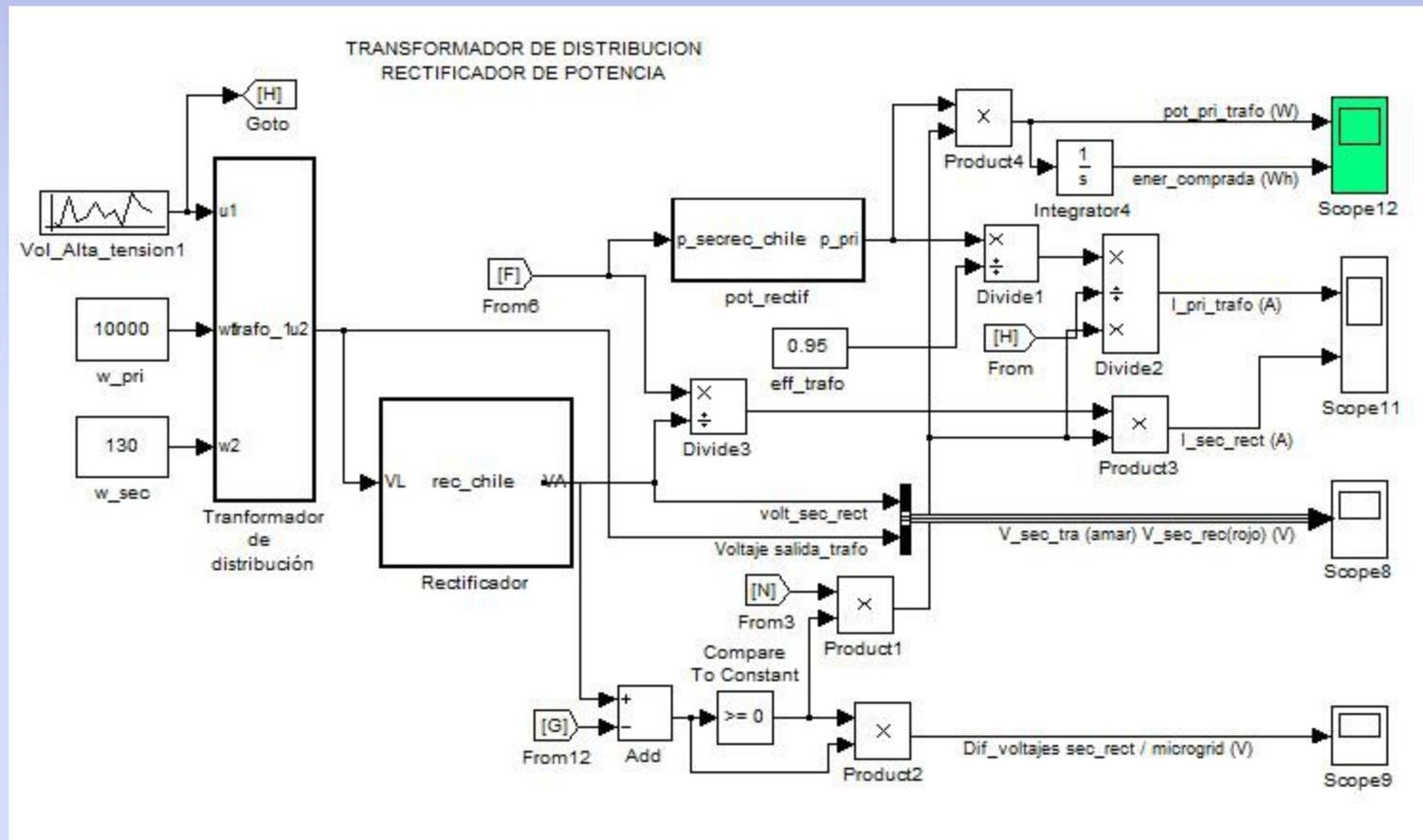


CENTRAL ELECTRICA  
FOTOVOLTAICA

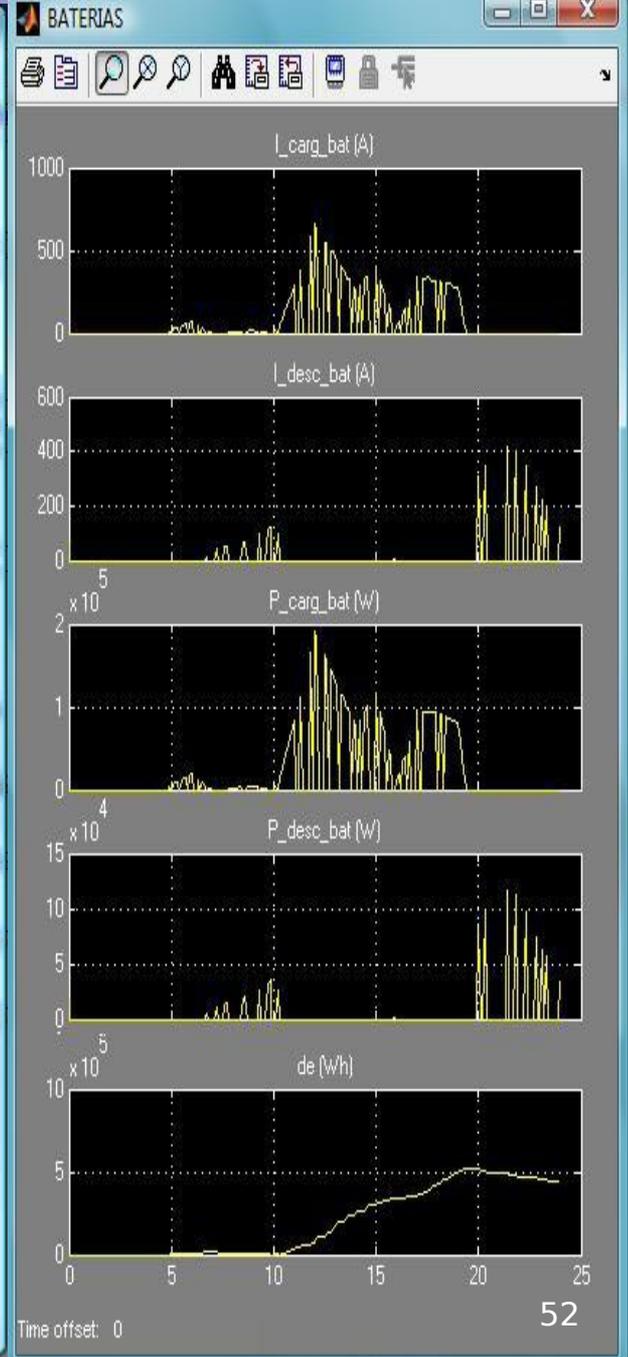
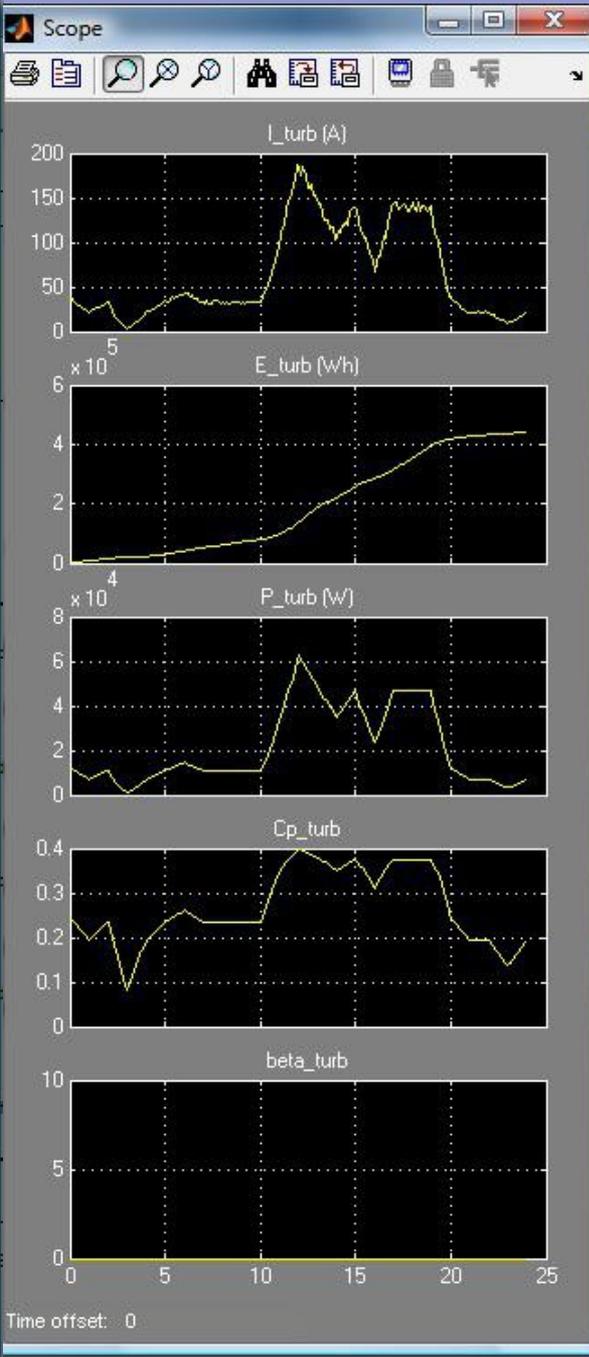
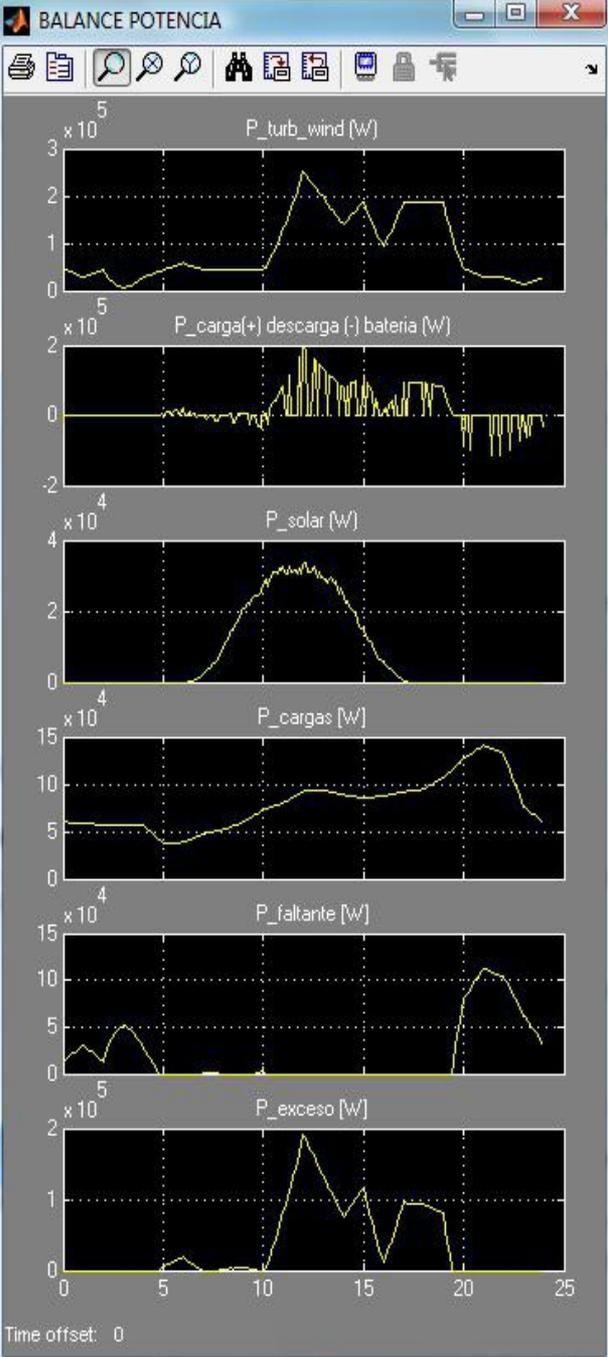


# CONTROL DE POTENCIA y CORRIENTE

# TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN – RECTIFICADOR DE POTENCIA



VEAMOS ALGUNOS RESULTADOS →→→→→





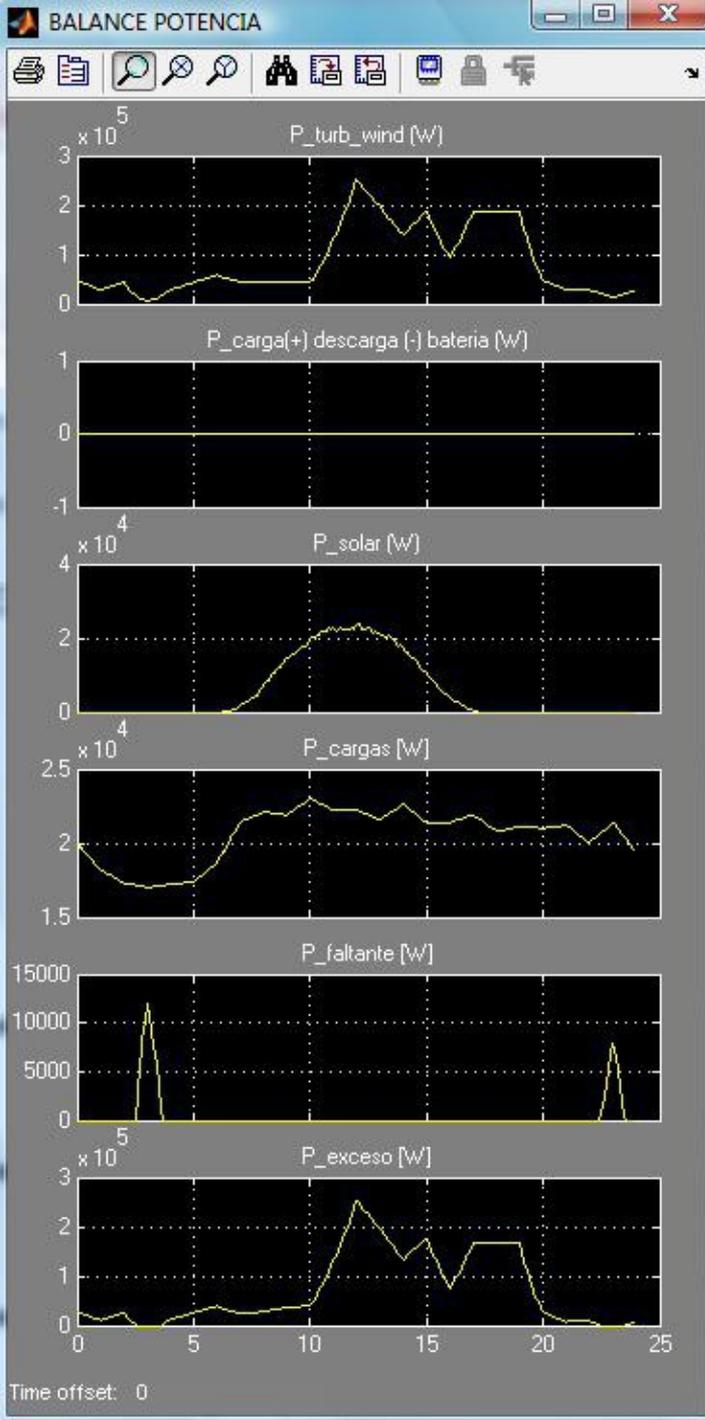
## OTROS CASOS

SON INTERESANTES OTROS CASOS EN LOS QUE SE PRESENTA:

**AGOTAMIENTO DE LA FUENTE DE ALMACENAMIENTO DE ENERGIA,**

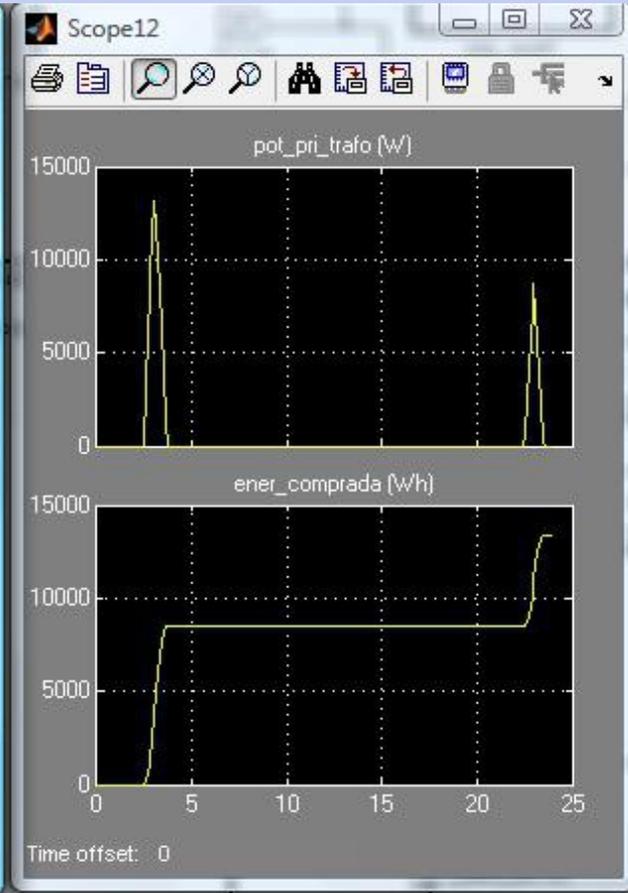
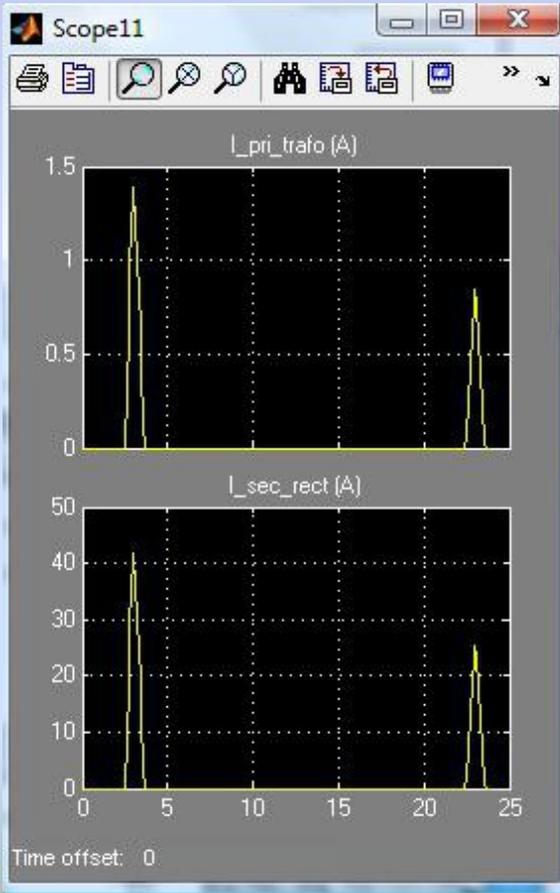
**CUANDO LAS BATERIAS TIENEN UNA CARGA INICIAL Y**

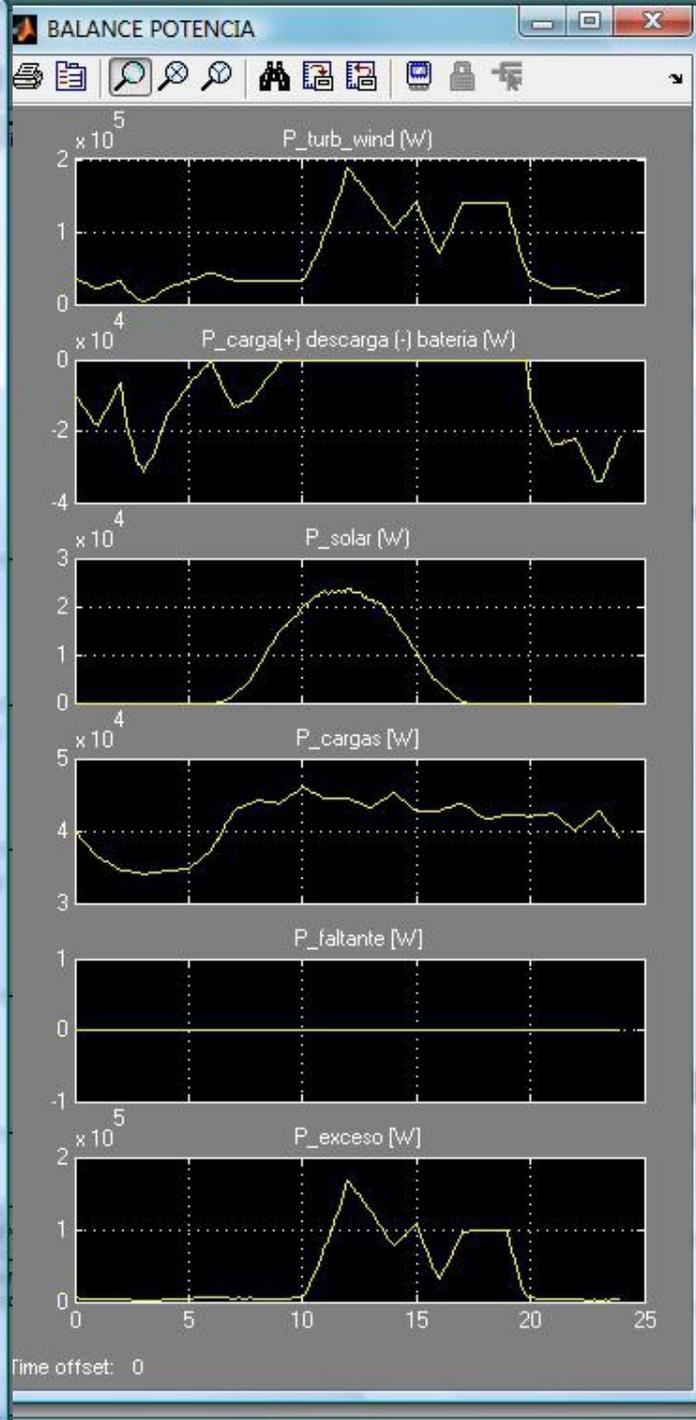
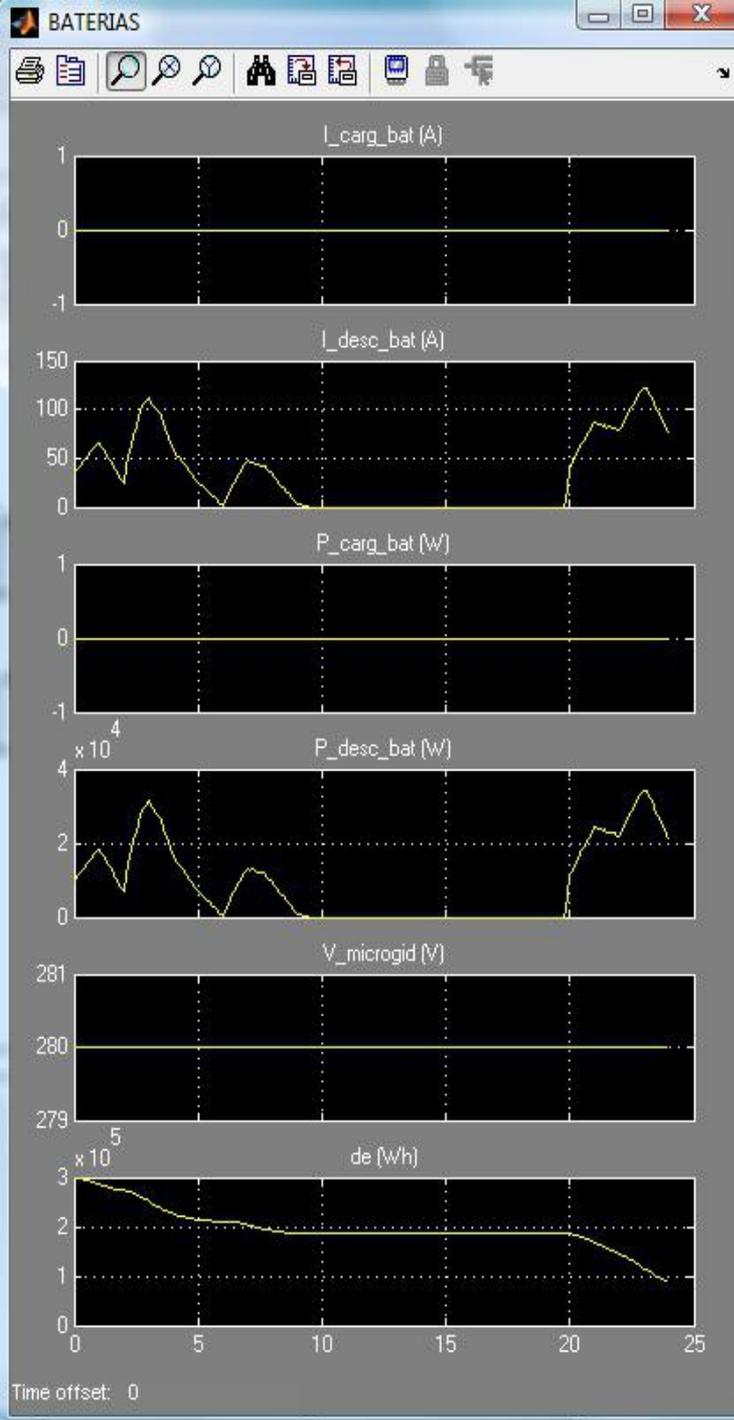
**CUANDO HAY EXCESO DE POTENCIA Y ENERGÍA EN LA MICROGRID**



# BATERIA COMPLETAMENTE DESCARGADA

ENERGIA FALTANTE INGRESA DESDE RED CONVENCIONAL

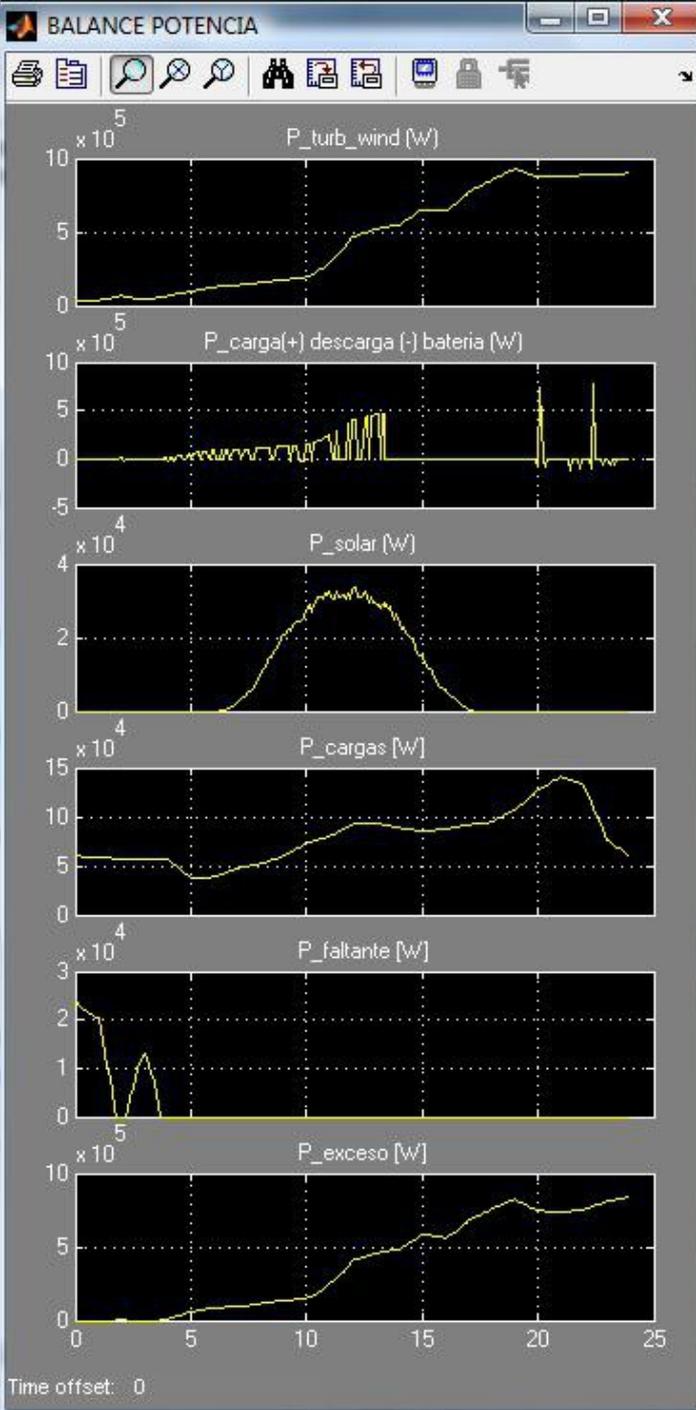
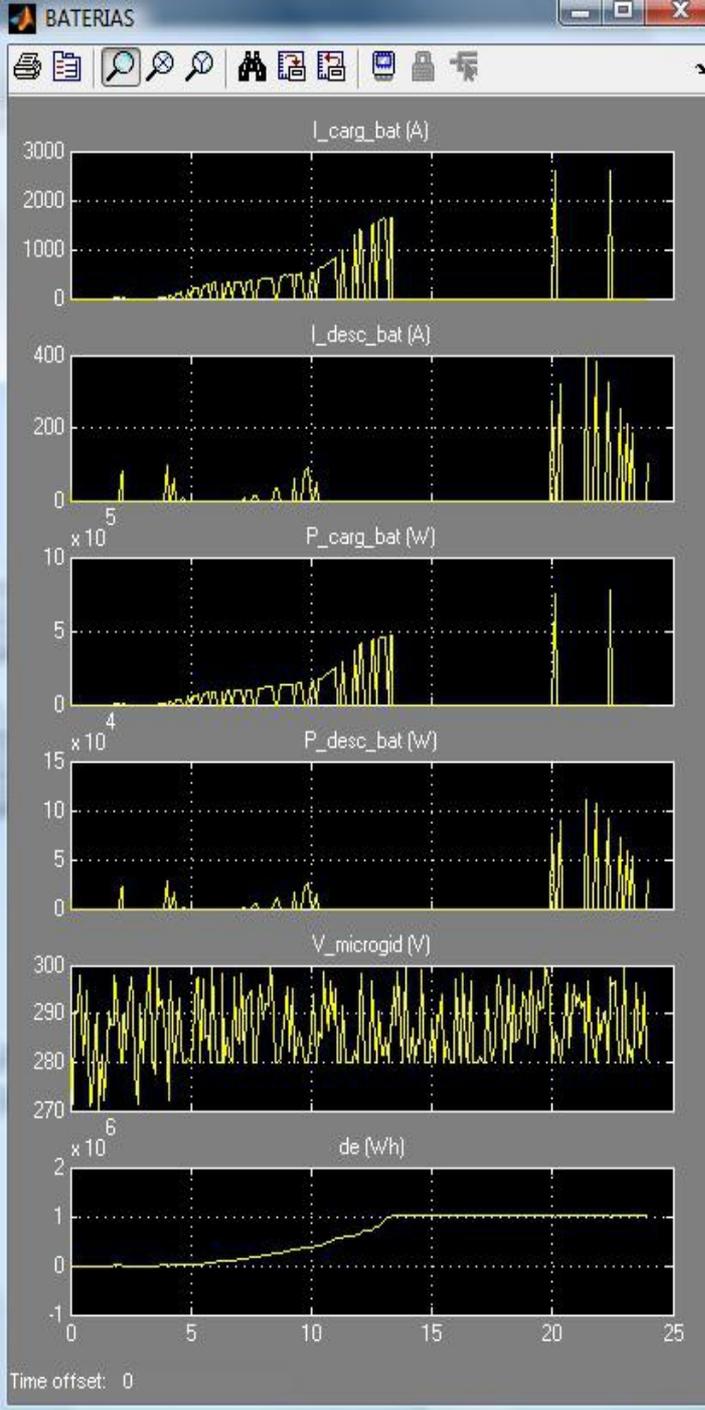




**BATERIA  
INICIALMENTE  
CON  
CARGA**

**PERO  
NO HAY  
CONDICIONES  
PARA REALIZAR  
CARGA DE  
BATERIAS**





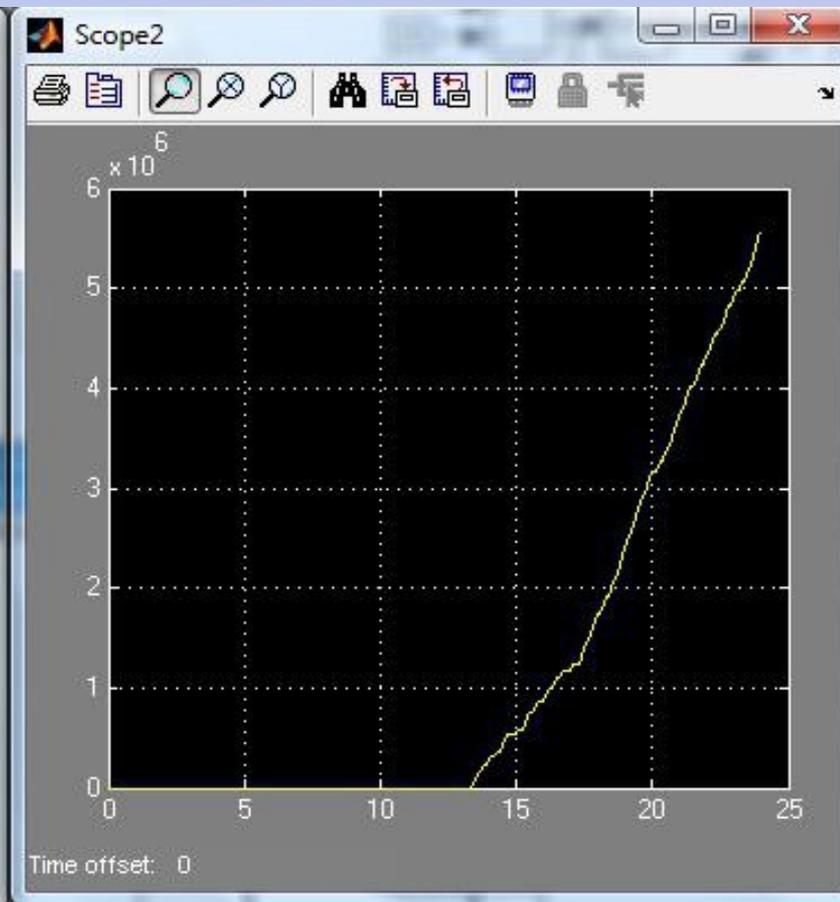
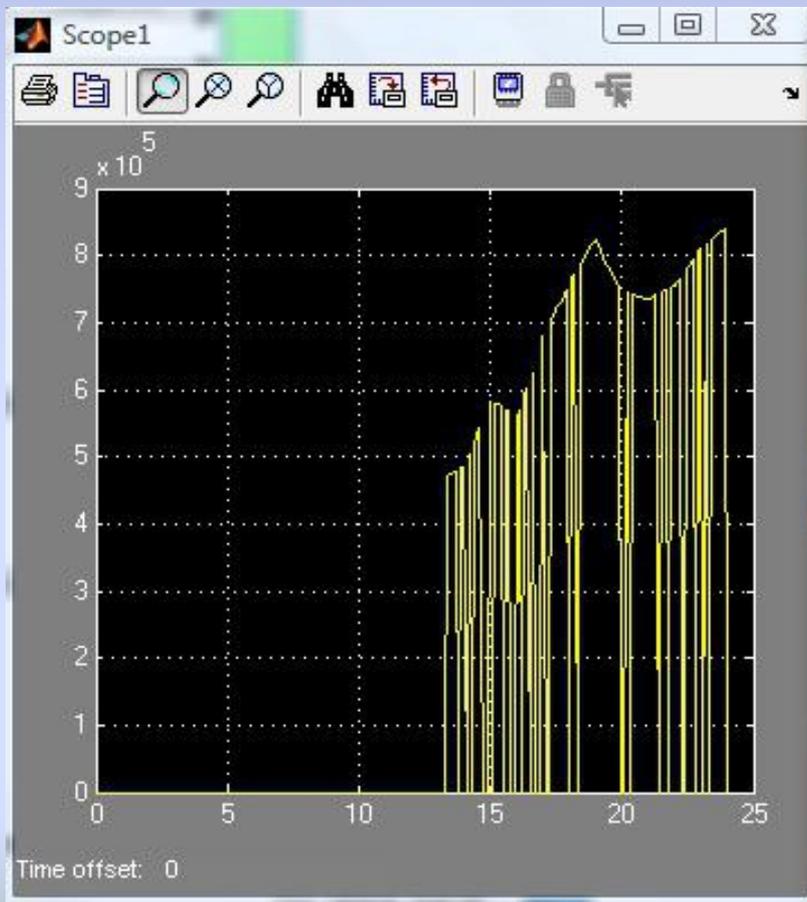
**BATERIAS SE CARGAN COMPLETAMENTE**

**HAY SOBRANTE DE POTENCIA Y ENERGIA EN EL SISTEMA**





# POTENCIA (W) Y ENERGIA (Wh) EN LA MICROGRID





## CONCLUSIONES

1. Se ha conseguido en detalle los valores de corriente, potencia, voltajes y energía de la microgrid, lo que conlleva a un primer dimensionamiento de los diferentes componentes.
2. Permite con facilidad el agregar cargas y fuentes en la cantidad y capacidad deseada para adaptarla a una situación determinada.
3. Valores no esperados pueden ser afinados incrementando la precisión de la simulación.
4. Es posible tener un gestor de energía, potencia y corriente que determine un óptimo funcionamiento de la microgrid de manera automática con poca o nula intervención humana.
5. Se deduce que es muy importante, el rol de las comunicaciones entre los diferentes equipos de la microgrid y su central de análisis.
6. Es factible técnicamente la transmisión de energía eléctrica mediante una red de corriente continua en baja tensión.
7. Para un funcionamiento autónomo se ha determinado diversos elementos necesarios para lograrlo.
8. Dentro de los supuestos tomados, el modelo de microgrid estudiado, permite ser adaptable a una variedad de distribuciones de fuentes y cargas.



## RECOMENDACIONES

1. Tomar contacto con otros grupos de investigación de manera formal para que se realice un trabajo en conjunto en temas puntuales.
2. Trabajos futuros necesitarán de mayor capacidad de computación, por lo tanto, es necesario un grupo multidisciplinario.
3. Trabajo en equipo con estudiantes y docentes de facultades relacionadas con el tema.
4. Gestionar una partida económica para la experimentación a modo de laboratorio de un equivalente eléctrico a una microgrid.



## FUTURAS INVESTIGACIONES

1. Se deben centrarse en procesos que duran poco tiempo.
2. Modelar y construir a modo de laboratorio una instalación experimental.
3. Estudios en generación y procesamiento de información de los diferentes equipos de la microgrid.
4. Modelamiento y construcción de aerogeneradores.
5. Modelamiento y construcción de generadores eléctricos de corriente continua.
6. Modelamiento y construcción de inversores multinivel.
7. Modelamiento y construcción de rectificadores de potencia.
8. Modelamiento, desarrollo y construcción de paneles solares.
9. Estudios de campo o convenios de cooperación, con la finalidad de recoger diversidad de curvas de demandas de cargas domiciliarias, velocidades de viento, radiación solar y temperatura ambiental con medidas tomadas en fracciones de segundo.