



PROGRAMA FVCONECT

**SIMULACIÓN DE OPERACIÓN DE
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS
CONECTADOS A LA RED ELÉCTRICA**

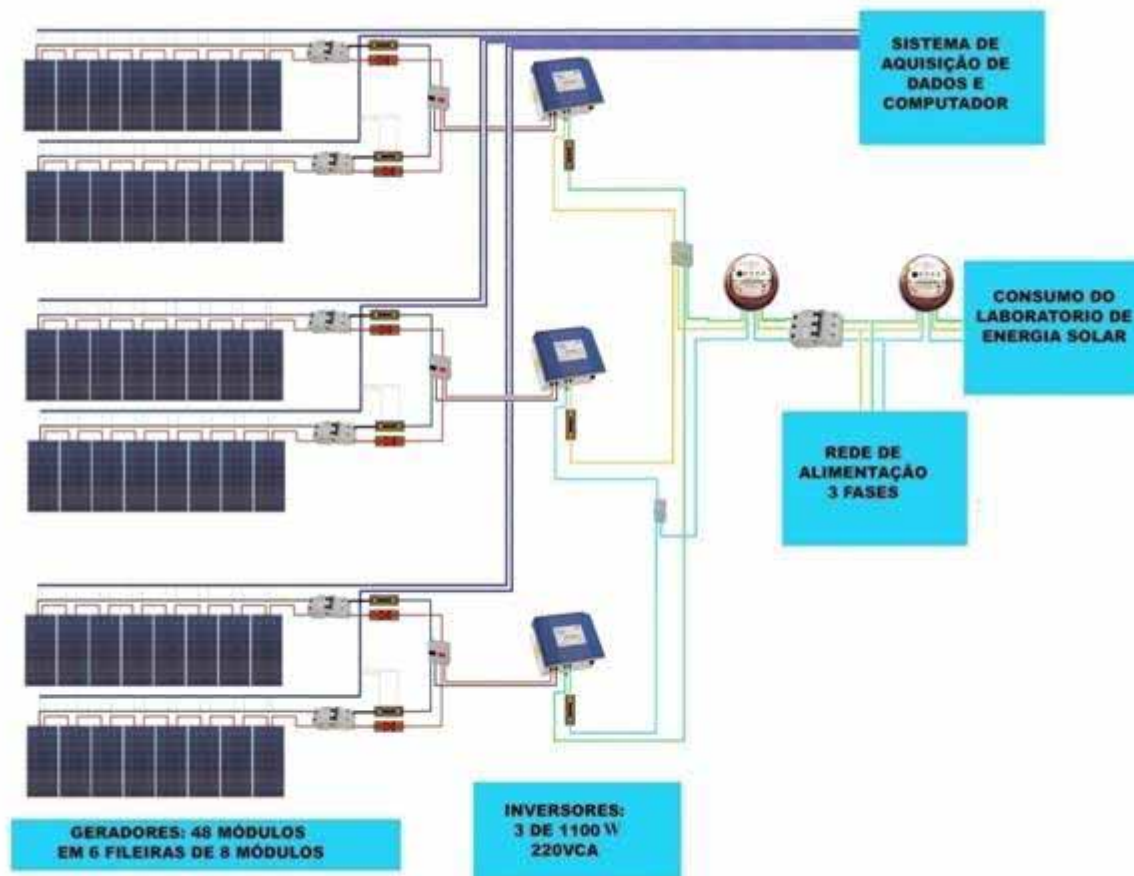


Laboratório de Energia Solar - UFRGS





Conexiones eléctricas de la instalación





Componentes ensayados





Características Eléctricas de los Inversores

Fabricante	Modelo	Potência de Entrada [W]		Potência de Saída [W]	
		Máxima	Nominal	Máxima	Nominal
<i>SMA</i>	SB 700U	1000	780	700	700
<i>SMA</i>	SB 1100E	1350	1100	1100	1000
<i>SMA</i>	SB 2100	2450	2000	2100	1900
<i>SMA</i>	SB 2500	3000	2480	2500	2300
<i>SMA</i>	SB 3800U	4800	4040	3800	3800
<i>Fronius</i>	IG 15	2000	1400	1500	1300
<i>Fronius</i>	IG 20	2700	1940	2000	1800
<i>Fronius</i>	IG 30	3600	2690	2650	2500
<i>Mastervolt</i>	QS 2000	2100	1750	1725	1600
<i>Mastervolt</i>	QS 3200	3600	2750	2750	2600



Sistema de Adquisición de Datos





Metodologia



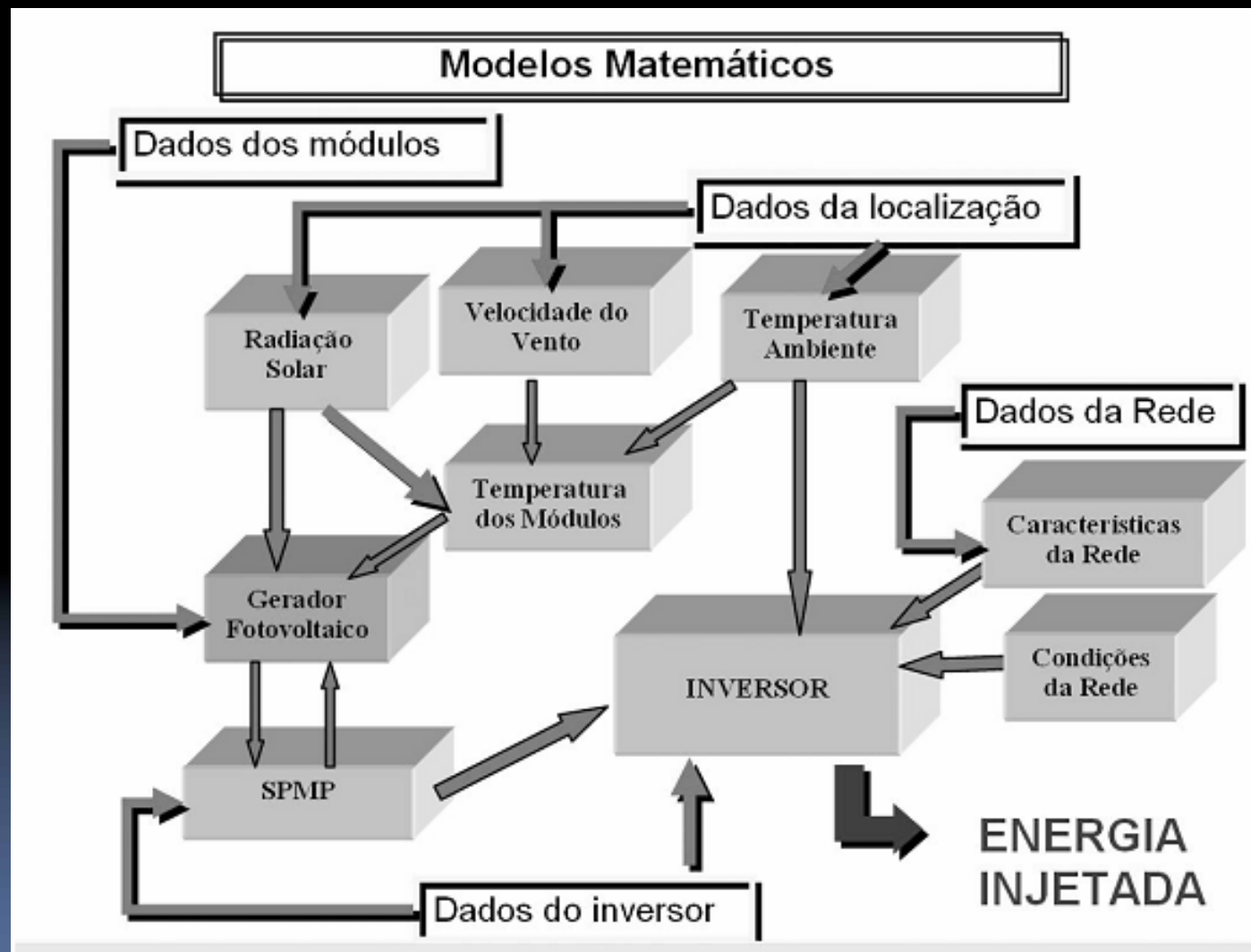


Programa de Simulación FVCONECT

- **Software desarrollado en el LES/UFRGS y financiado por Eletrobrás y Finep.**
- **El software está dividido en bloques donde los datos de entrada son manipulados mediante modelos matemáticos para producir los datos de salida de la simulación.**
- **La finalidad es realizar simulaciones del comportamiento eléctrico y térmico de cada componente de un SFCR a lo largo de un período pre-determinado.**
- **La simulación retorna datos de temperatura de los componentes, corriente eléctrica y voltaje en varios puntos del circuito y cantidad y calidad de energía entregada a la red.**



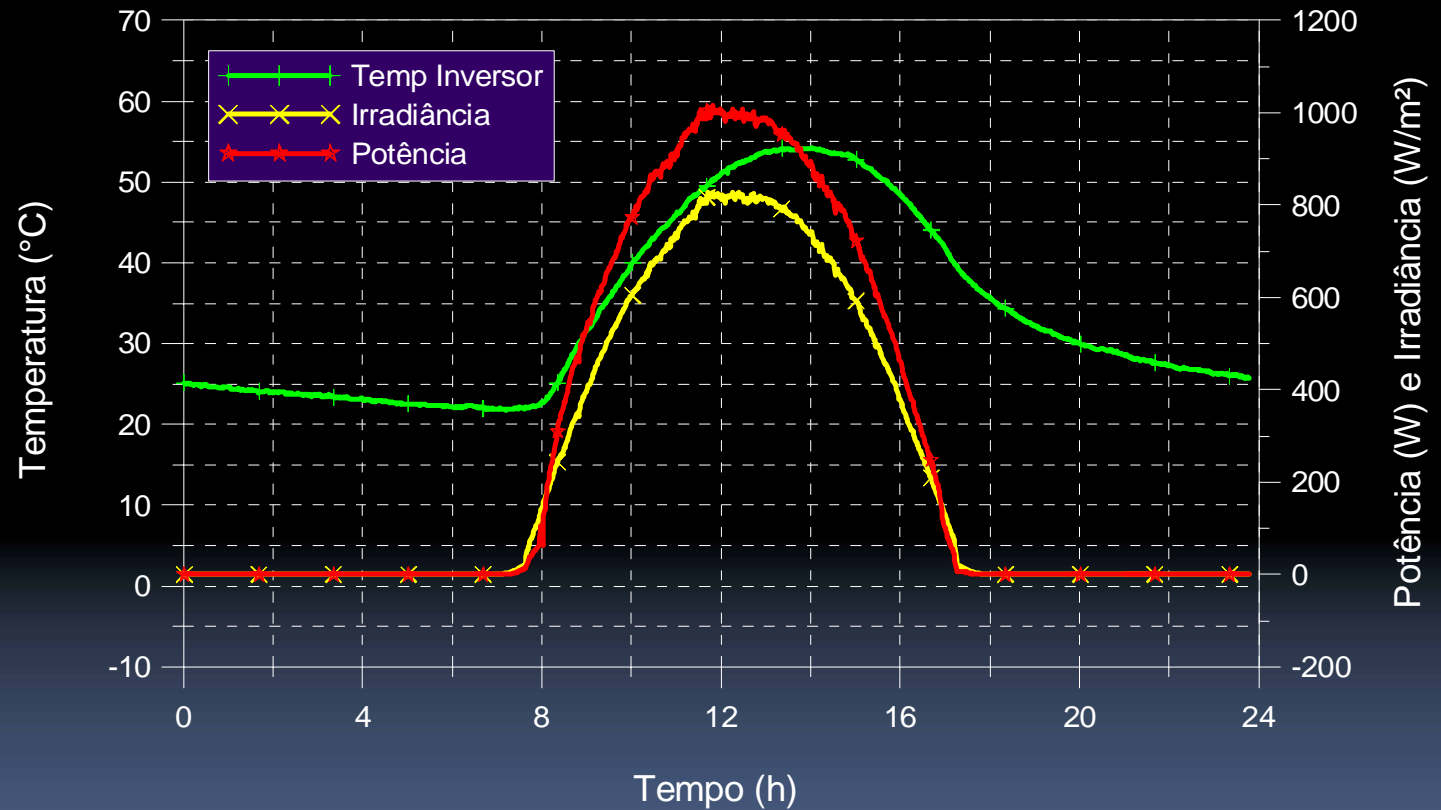
Flujo de Datos dentro de la Simulación





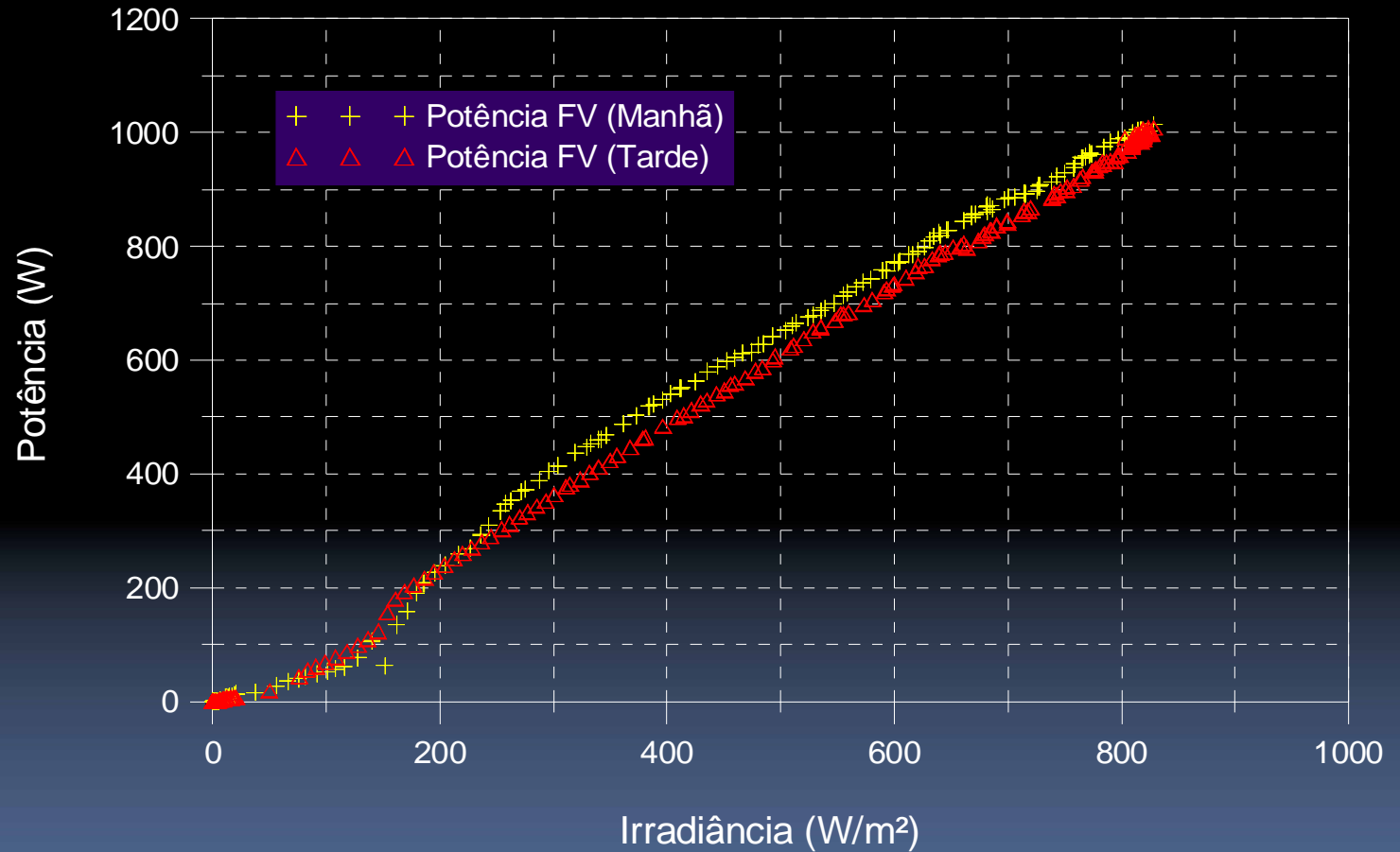
SFCR en Condiciones Normales de Operación

RESULTADOS EXPERIMENTALES





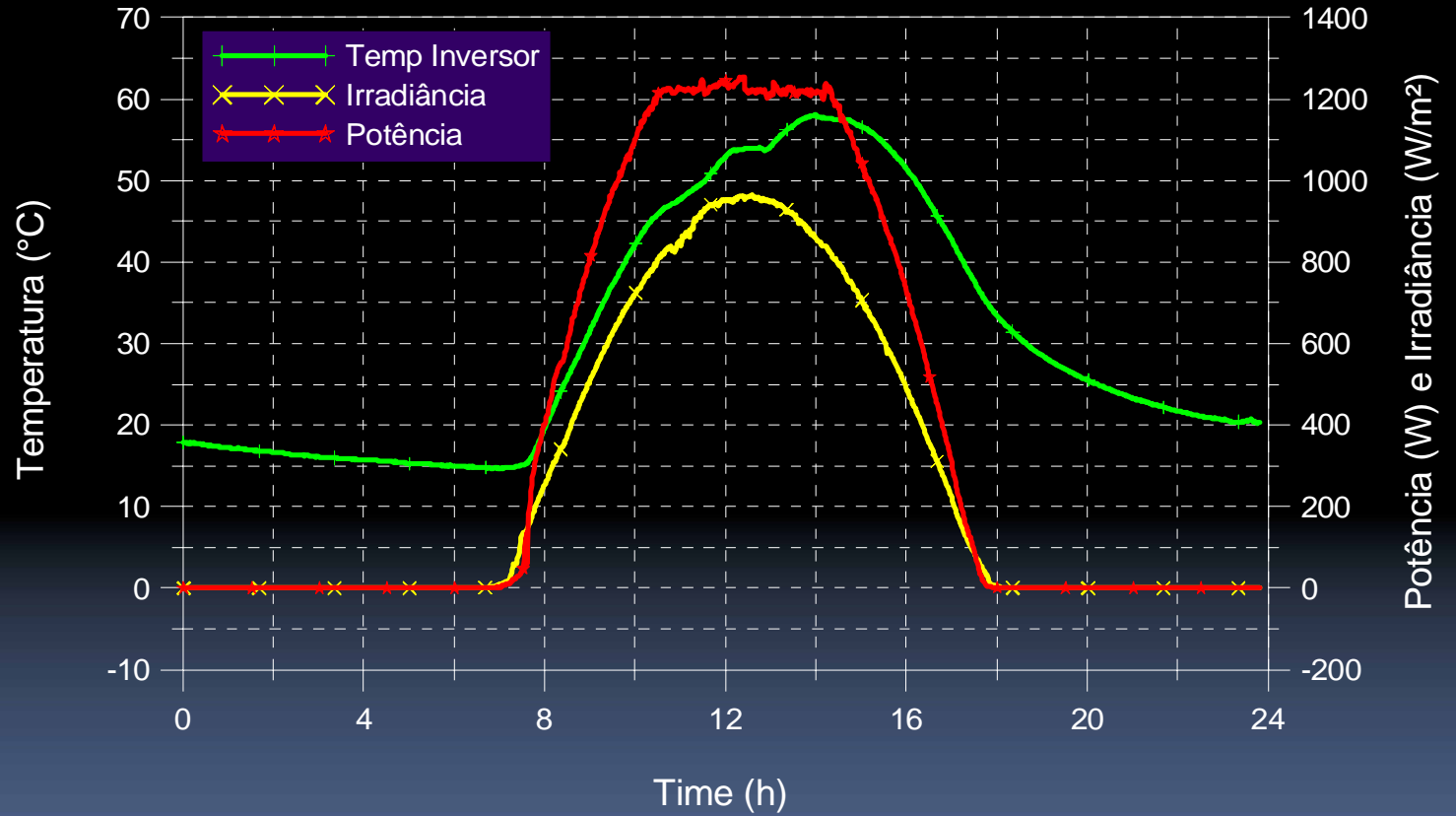
SFCR em Condições Normales de Operación RESULTADOS EXPERIMENTALES





Limitación de Potencia por sobrecarga

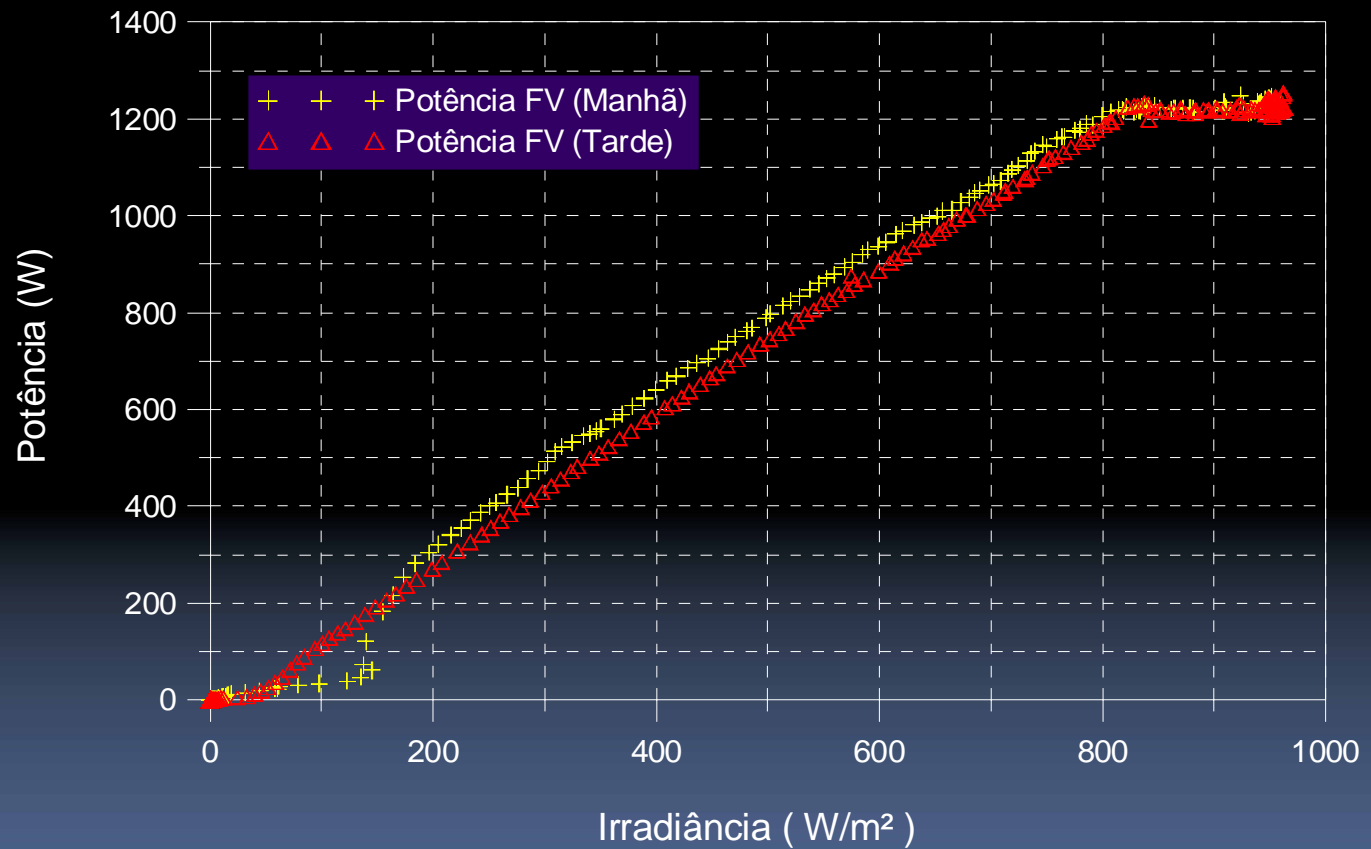
RESULTADOS EXPERIMENTALES





Limitación de Potencia por sobrecarga

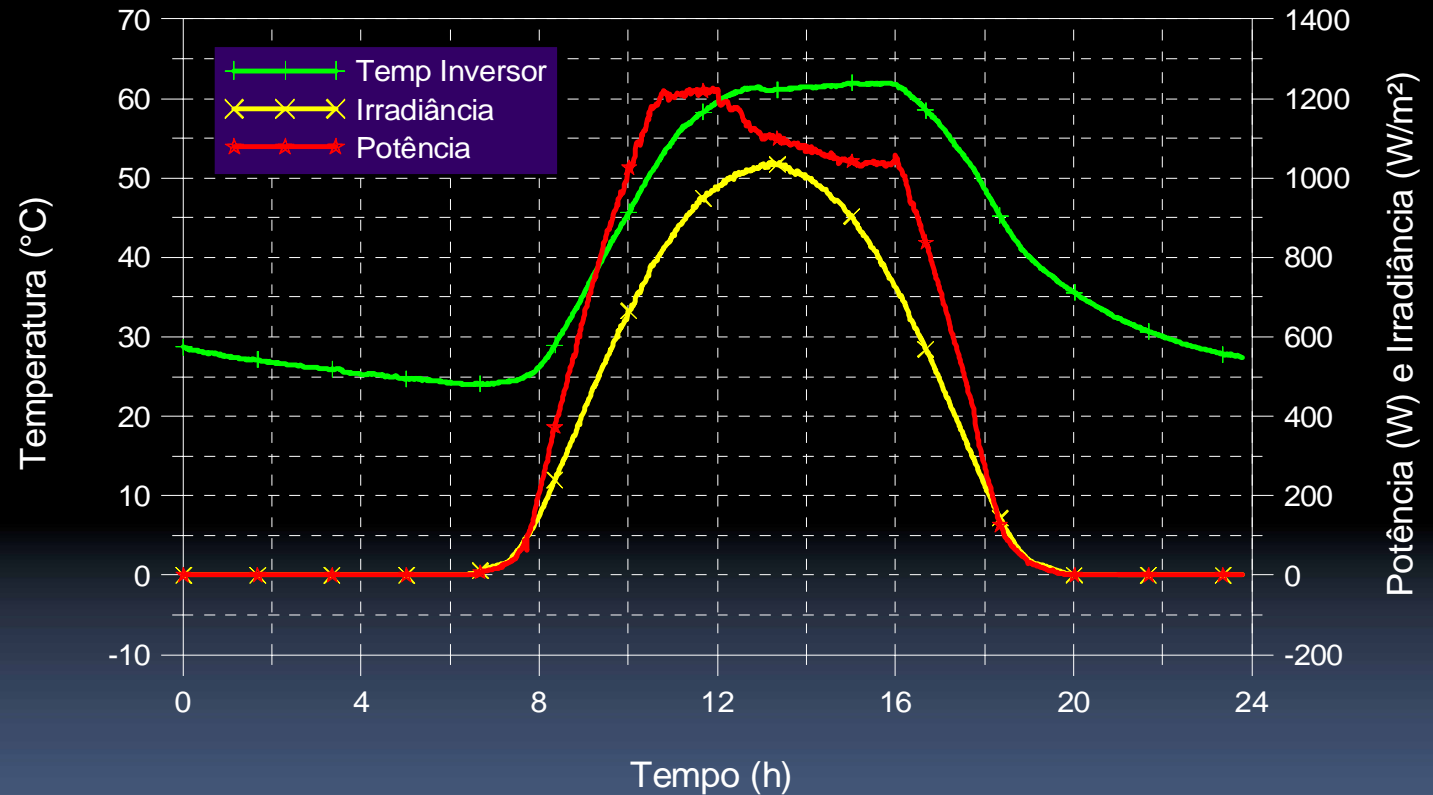
RESULTADOS EXPERIMENTALES





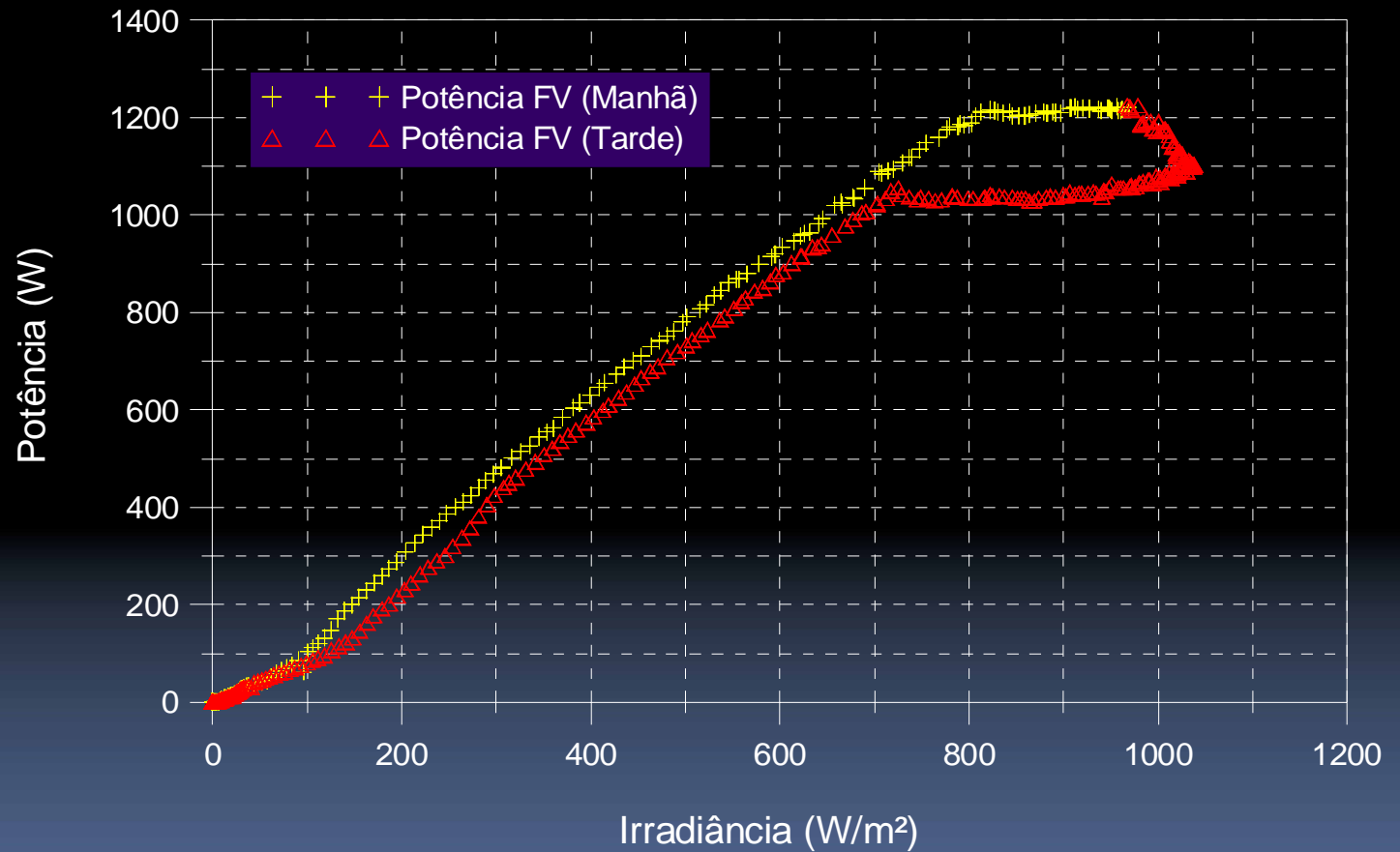
Limitación de Potencia por Temperatura

RESULTADOS EXPERIMENTALES



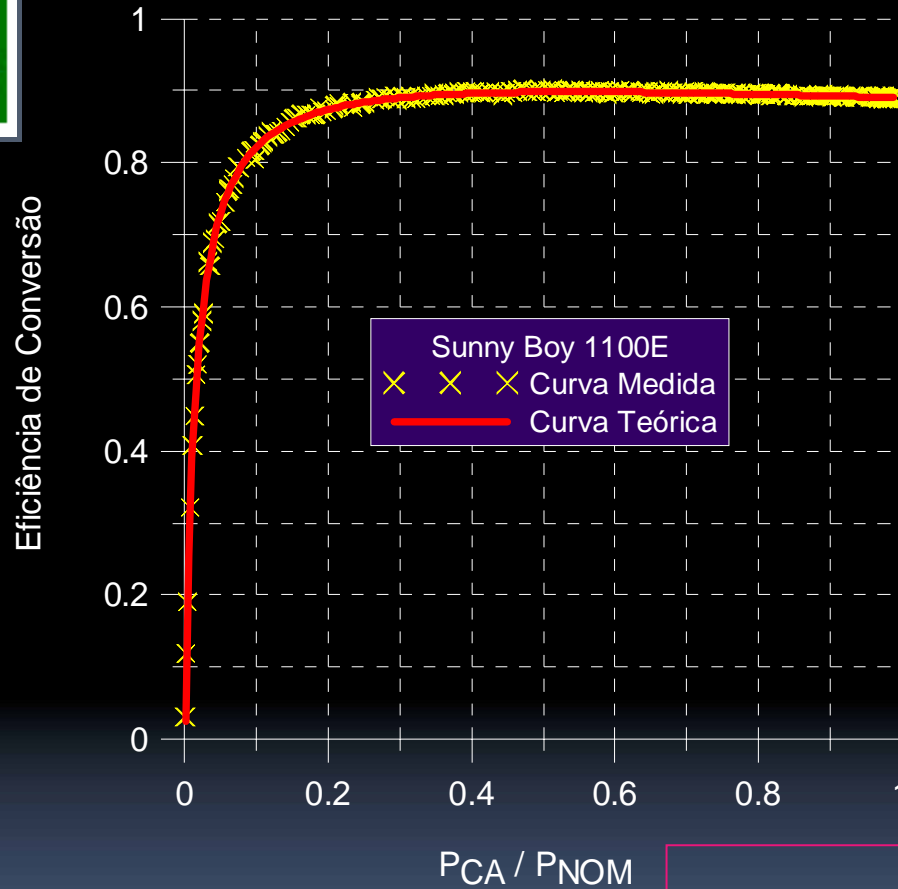


Limitación de Potencia por Temperatura





Curva de Eficiencia de Conversión de un Inversor



$$\eta_{inv} = \frac{E_{CA}}{E_{CC}} = \frac{\int P_{CA} \cdot dt}{\int P_{CC} \cdot dt}$$

$$\eta_{inv} = \frac{\frac{P_{CA}}{P_{NOM}}}{\frac{P_{CA}}{P_{NOM}} + \left(K_0 + K_1 \frac{P_{CA}}{P_{NOM}} + K_2 \left(\frac{P_{CA}}{P_{NOM}} \right)^2 \right)}$$



Eficiencia de Conversión de los Inversores

Inversor	5%	10%	20%	30%	50%	100%	η_{EU}
SB 700U	70,8	81,3	87,4	89,4	90,5	89,7	88,6
SB 1100E	73,1	82,2	87,4	89,0	89,8	89,0	88,2
SB 2100	75,7	84,5	89,4	90,9	91,6	90,9	90,2
SB 2500	89,2	92,5	93,7	93,8	93,2	90,8	92,7
SB 3800U	70,7	81,4	87,7	89,9	91,2	90,9	89,3
IG 15	66,3	77,0	83,9	86,5	88,8	90,9	86,9
IG 20	56,9	71,0	80,9	84,7	87,8	89,7	85,0
IG 30	68,6	79,7	86,5	88,7	90,1	89,9	88,1
QS 2000	71,5	80,9	86,5	88,4	89,8	90,4	88,2
QS 3200	68,2	79,0	85,5	87,8	89,3	89,5	87,4



Coeficientes del Modelo Matemático de la Eficiencia de Conversión CC/CA

Inversor	Eficiência de Conversão			
Modelo	K_0	K_1	K_2	R^2
SB 700U	0,0185	0,0393	0,0562	0,99
SB 1100E	0,0154	0,0562	0,0519	0,99
SB 2100	0,0139	0,0395	0,0465	0,99
SB 2500	0,0042	0,0327	0,0635	0,91
SB 3800U	0,0187	0,0368	0,044	0,99
IG 15	0,0209	0,0895	-0,0113	0,97
IG 20	0,0349	0,057	0,0218	0,99
IG 30	0,0205	0,0438	0,0477	0,95
QS 2000	0,0164	0,0696	0,0199	0,99
QS 3200	0,0201	0,0606	0,0366	0,98



Eficiencia del SPMP

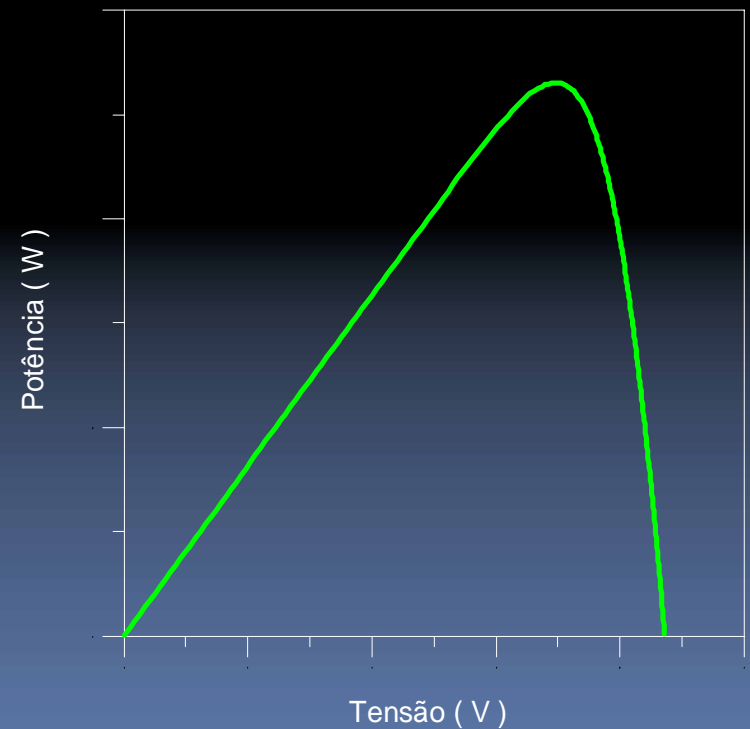
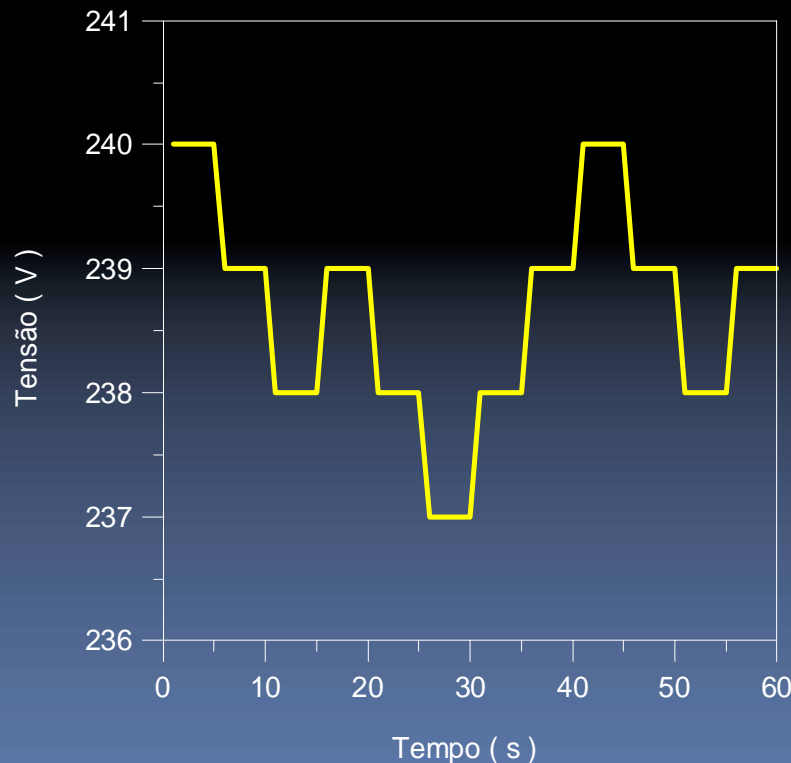
$$\eta_{SPMP} = \frac{E_{CC}}{E_{PMP}} = \frac{\int P_{CC} \cdot dt}{\int P_{PMP} \cdot dt}$$



Determinación de la Eficiencia del SPMP

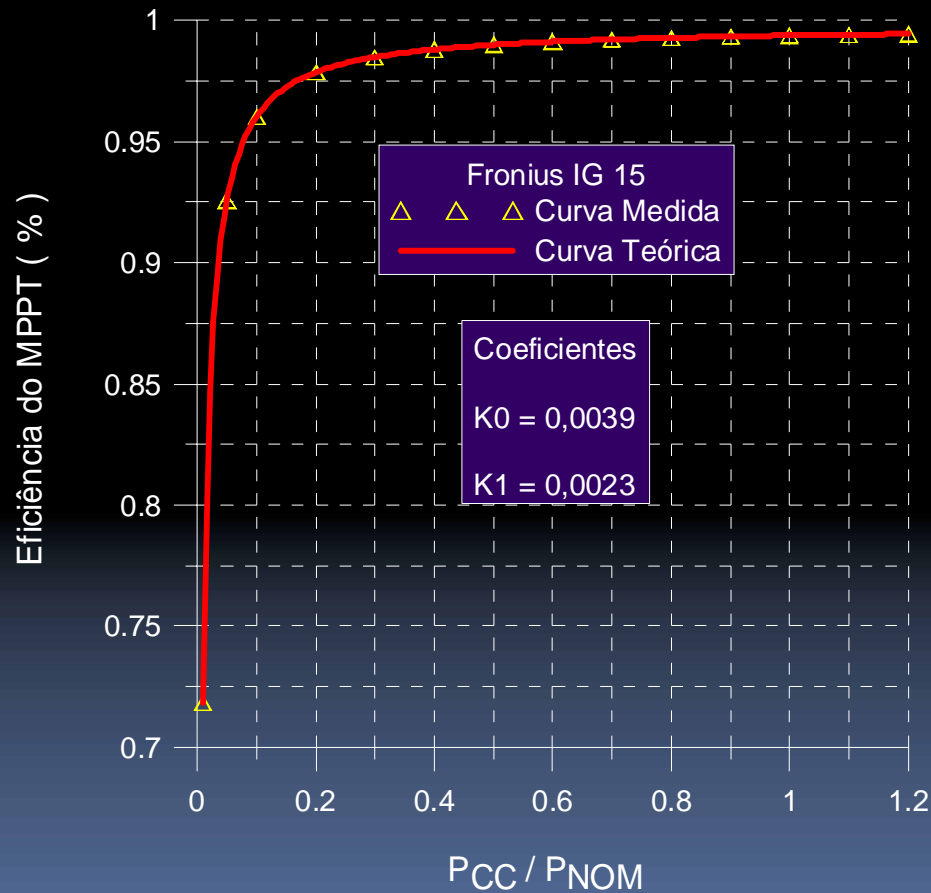
Eficiencia del SPMP

1. Intervalo de 1 minuto → Irradiancia Constante
2. Intervalo de 1 minuto → SPMP encuentra PMP





Curva de Eficiencia del SPMP

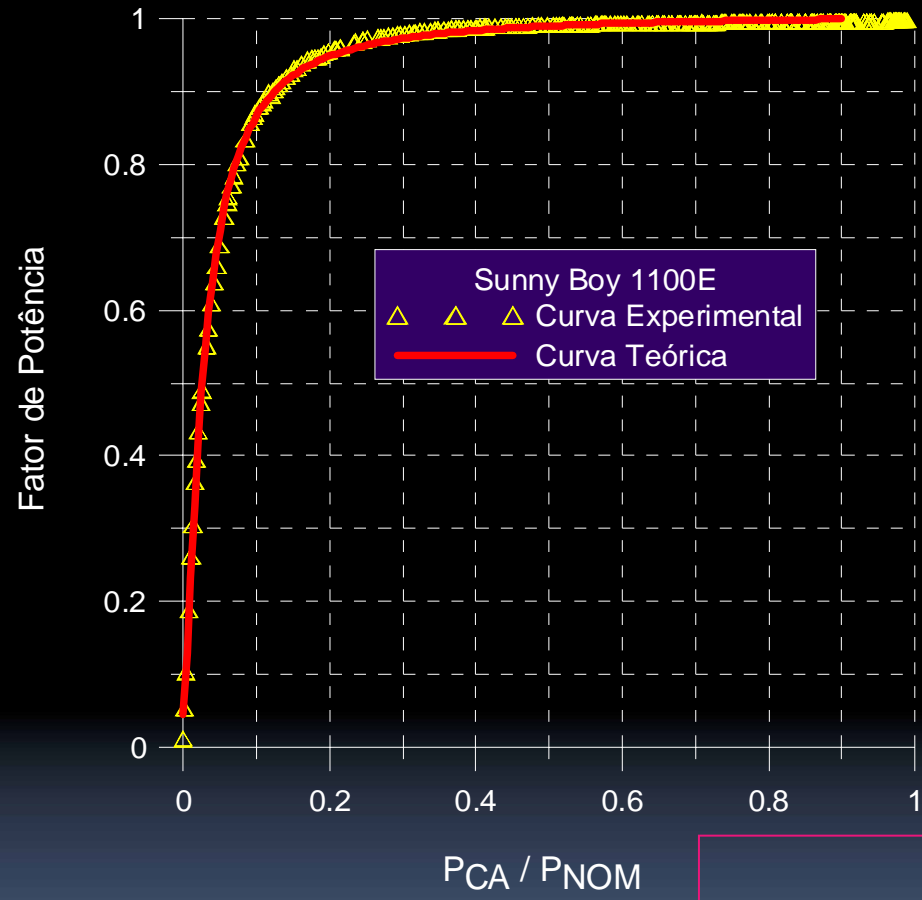


$$\eta_{inv} = \frac{\frac{P_{CC}}{P_{NOM}}}{\frac{P_{CC}}{P_{NOM}} + \left(M_0 + M_1 \frac{P_{CC}}{P_{NOM}} \right)}$$

$$\eta_{inv} = N_0 - N_1 \cdot \left(\frac{|P_2 - P_1|}{P_{CC}} \right)$$



Curva del Factor de Potencia de un Inversor



$$FP = \frac{P}{S} = \frac{\frac{1}{T} \int V_i(t) \cdot I_i(t) \cdot dt}{V_{RMS} \cdot I_{RMS}}$$

$$FP = \frac{C_0 \cdot C_1 + \left(C_2 \cdot \left(\frac{P_{CA}}{P_{NOM}} \right)^{C_3} \right)}{C_1 + \left(\frac{P_{CA}}{P_{NOM}} \right)^{C_3}}$$



Factor de Potencia de los inversores medidos

Inversor	5%	10%	20%	30%	50%	100%	FP _{EU}
SB 700U	31,6	56,8	80,3	89,3	96,0	99,9	89,7
SB 1100E	71,0	86,8	94,9	97,3	99,0	100,0	96,9
SB 2100	75,5	91,2	97,2	98,5	99,3	99,7	97,8
SB 2500	71,2	95,5	99,2	99,5	99,6	99,6	98,4
SB 3800U	77,9	92,5	97,7	98,8	99,4	99,7	98,1
IG 15	37,5	63,1	84,0	91,0	95,8	98,4	90,5
IG 20	50,1	73,0	88,3	93,4	97,0	99,3	93,1
IG 30	60,5	82,7	94,1	96,9	98,6	99,3	95,8
QS 2000	56,3	78,7	91,5	95,2	97,6	99,0	94,4
QS 3200	52,6	74,4	88,4	92,9	96,1	98,1	92,5

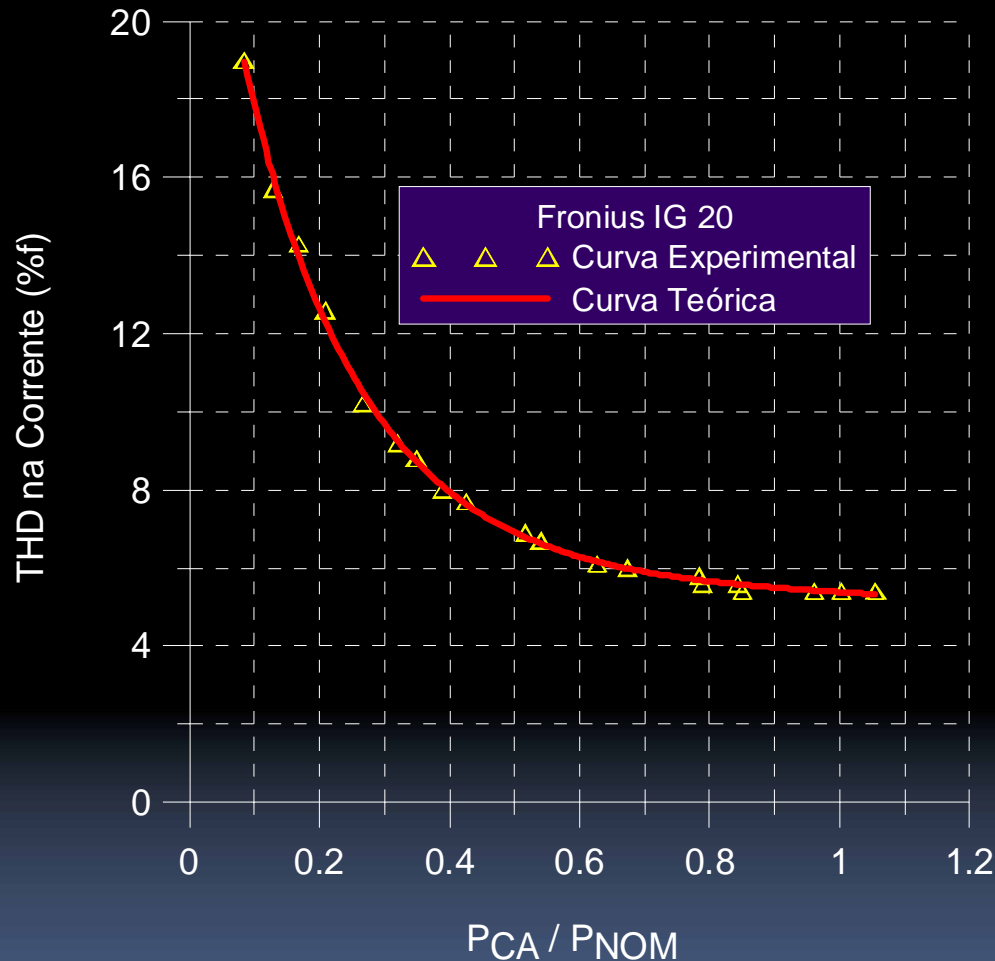


Coeficientes del Modelo Matemático del Factor de Potencia

Modelo	C_0	C_1	C_2	C_3	R^2
SB 700U	0,0464	0,0221	1,021	1,593	0,99
SB 1100E	0,0422	0,0067	1,007	1,4	0,99
SB 2100	0,0344	0,0016	0,999	1,787	0,98
SB 2500	0,1138	$2,55 \times 10^{-5}$	0,997	3,283	0,99
SB 3800U	0,1703	0,0012	0,998	1,902	0,99
IG 15	0,0935	0,0137	0,997	1,696	0,99
IG 20	0,0602	0,0139	1,006	1,473	0,97
IG 30	0,2156	0,0039	0,997	1,853	0,99
QS 2000	0,0781	0,0075	0,997	1,595	0,99
QS 3200	0,0442	0,0126	0,993	1,449	0,98



Curva de la Distorção Harmónica de Corriente



$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1}$$

$$THD_i = T_0 \cdot \exp\left(-T_1 \cdot \frac{P_{CA}}{P_{NOM}}\right) + T_2 \cdot \exp\left(-T_3 \cdot \frac{P_{CA}}{P_{NOM}}\right)$$



Distorsión Harmónica de Corriente

Inversor	5%	10%	20%	30%	50%	100%	THDi
SB 2100	35,3	23,1	11,5	7,2	4,8	3,4	7,6
SB 2500	31,6	24,2	15,0	10,1	6,1	4,4	9,1
SB 3800U	21,1	14,8	8,6	6,0	3,9	1,7	5,4
IG 15	37,3	23,9	14,3	11,4	8,8	5,0	10,7
IG 20	21,5	17,7	12,6	9,6	6,9	5,3	8,6
IG 30	22,1	15,7	9,6	7,4	6,1	5,1	7,5
QS 2000	10,0	7,5	4,7	3,5	2,5	1,6	3,2
QS 3200	11,1	9,1	6,5	4,9	3,3	2,2	4,2



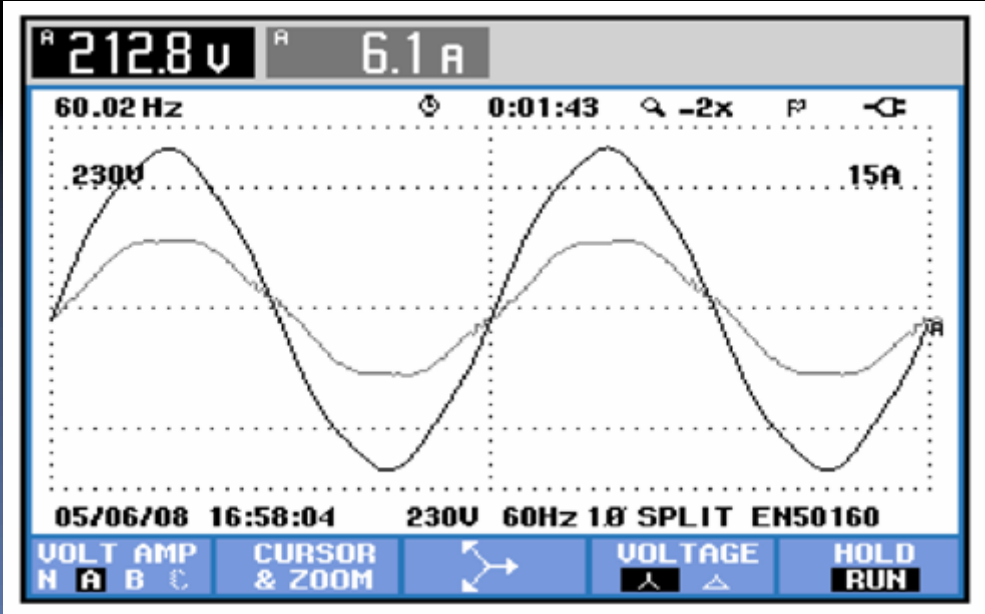
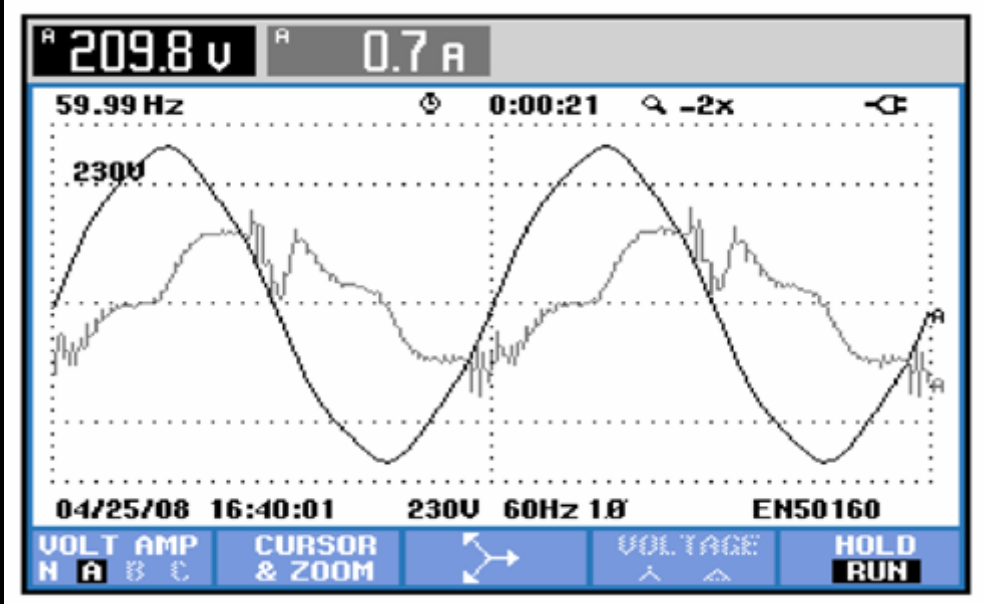
Coeficientes do Modelo Matemático da Distorção Harmônica de Corrente

Inversor	T_0	T_1	T_2	T_3	R^2
SB 2100	6,071	0,579	49,629	10,467	0,994
SB 2500	36,753	6,413	4,996	0,133	0,972
SB 3800U	8,284	1,535	23,438	11,104	0,998
IG 15	15,376	1,112	50,829	16,036	0,994
IG 20	20,735	5,473	5,849	0,099	0,998
IG 30	7,088	0,330	26,026	10,804	0,988
QS 2000	3,514	0,792	10,339	8,796	0,997
QS 3200	3,436	0,451	10,233	5,577	0,998



Formas de Onda de Corriente y Voltaje

$$P_{CA} = 10\% P_{NOMINAL}$$

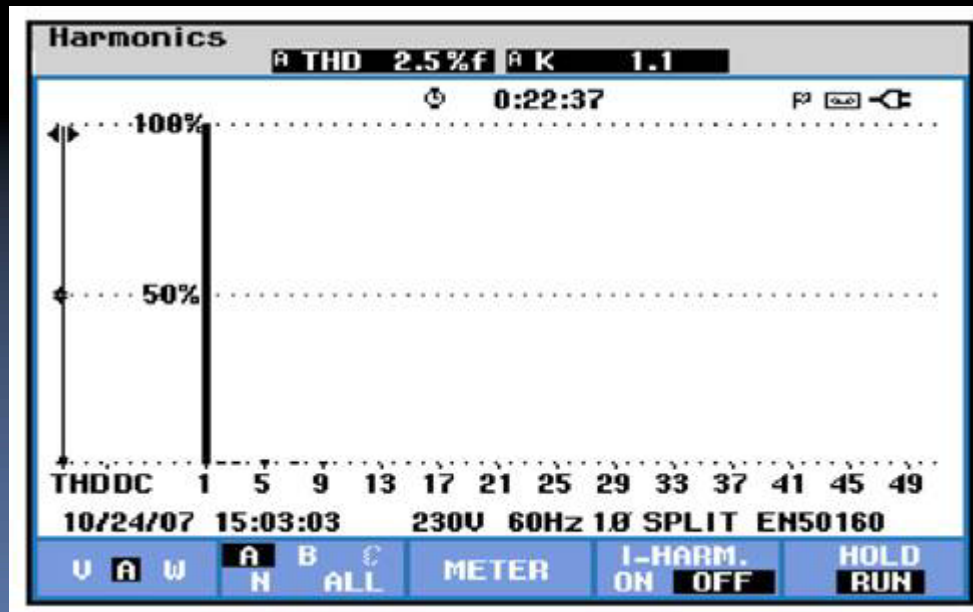
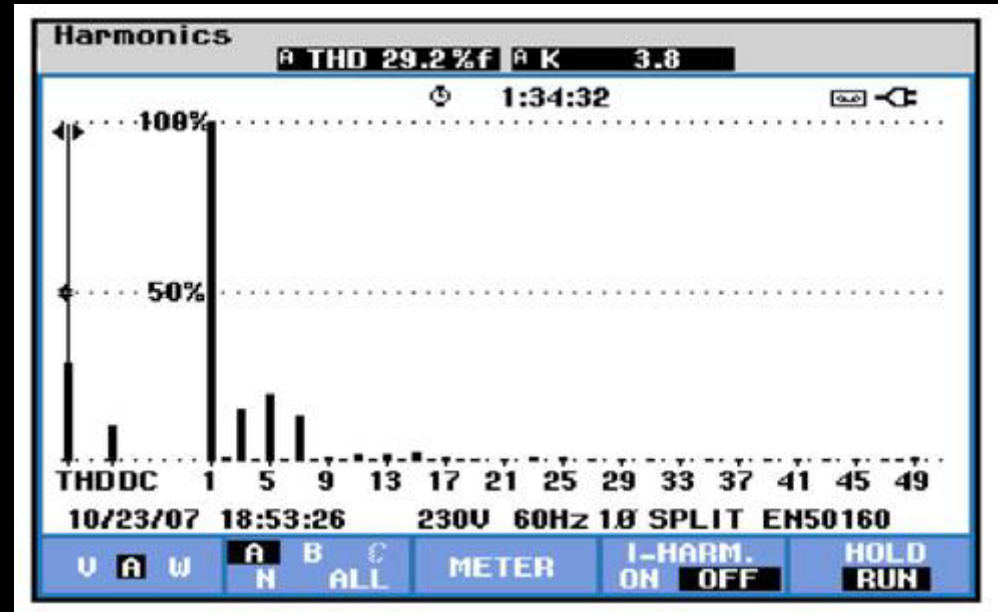


$$P_{CA} = 100\% P_{NOMINAL}$$



Componentes Harmónicos de la Corriente

$$P_{CA} = 10\% P_{NOMINAL}$$



$$P_{CA} = 100\% P_{NOMINAL}$$



Ensayos Térmicos de Inversores

Pérdidas del inversor  Energía Térmica

Potencia Térmica

$$P_T = P_D + F_{CAP} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t} = (1 - \eta) \cdot P_{CC}$$

Potencia Disipada

$$P_D = (F_D \cdot (T_{INV} - T_{AMB}))$$

Modelo Matemático

$$T_2 = T_1 + \left(\left(\frac{1 - \eta}{F_{CAP}} \right) \cdot P_{CC} \cdot \Delta t \right) - \left(\left(\frac{F_D}{F_{CAP}} \right) \cdot (T_{INV} - T_{AMB}) \cdot \Delta t \right)$$



Ensayos Térmicos de Inversores

Modelo Matemático

$$T_2 = T_1 + \left(\left(\frac{1-\eta}{F_{CAP}} \right) \cdot P_{CC} \cdot \Delta t \right) - \left(\left(\frac{F_D}{F_{CAP}} \right) \cdot (T_{INV} - T_{AMB}) \cdot \Delta t \right)$$

**Factor de Capacidad
Térmica**

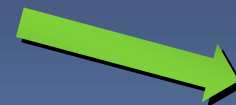


$$F_{CAP} = \frac{((1-\eta) \cdot P_{CC} \cdot \Delta t)}{(T_2 - T_1)}$$

**Factor de Disipación
Térmica**



$$F_D = \frac{((1-\eta) \cdot P_{CC})}{(T_{INV} - T_{AMB})}$$



$$F_D = \frac{(T_2 - T_1) \cdot F_{CAP}}{(T_1 - T_{AMB}) \cdot \Delta t}$$



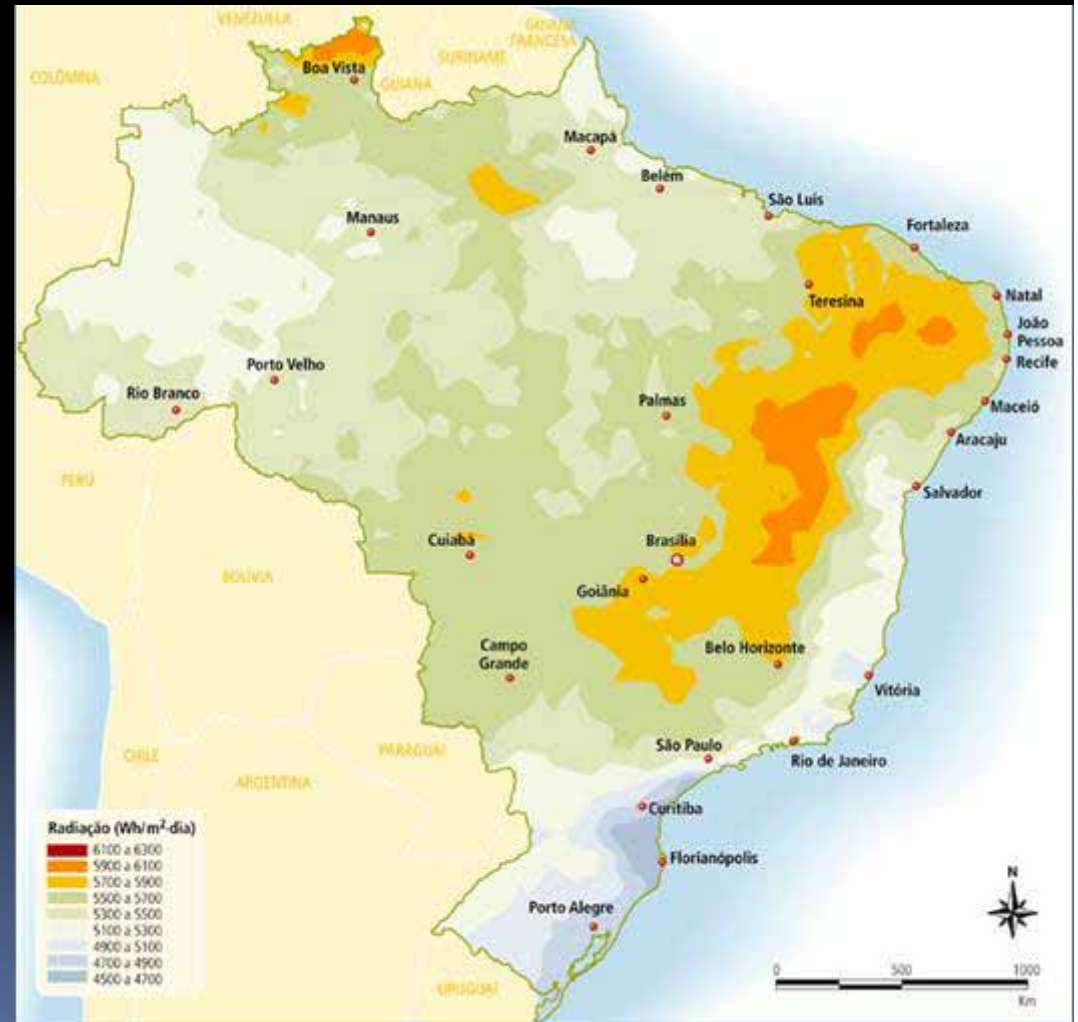
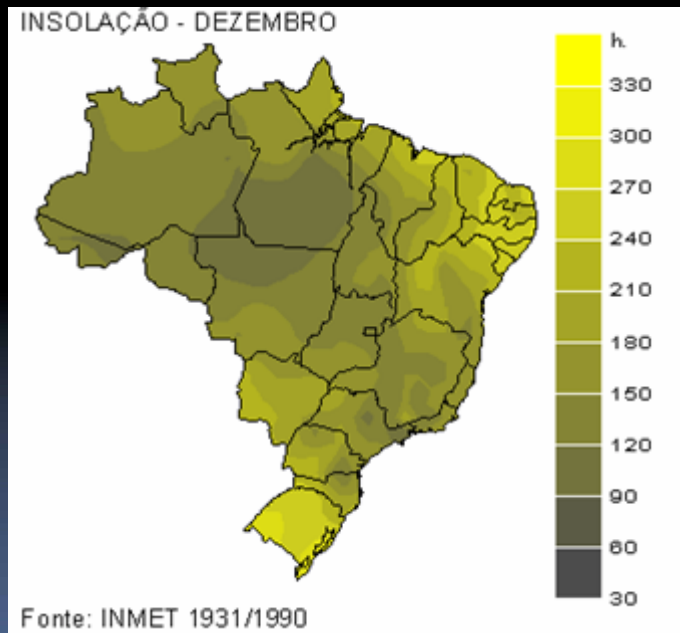
Factor de Capacidad Térmica y Factor de Disipación Térmica de los Inversores

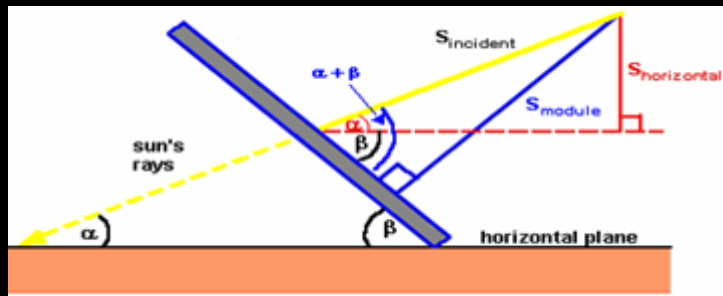
Inversor	F_{CAP} (J/°C)	Desviación Estandar	F_{DN} (W/°C)	Desviación Estandar	F_{DF} (W/°C)	Desviación Estandar	$F_{Dmédio}$ (W/°C)
SB 700U	8250	530	2,10	0,60	Não	Não	2,10
SB 1100E	9200	450	2,80	0,45	Não	Não	2,80
SB 2100	10600	370	3,20	0,22	Não	Não	3,20
SB 3800U	11200	530	2,20	0,60	7,20	0,50	3,50
IG 15	2682	315	1,28	0,20	5,35	0,25	3,31
IG 20	2449	330	1,36	0,10	5,22	0,16	3,29
IG 30	2750	515	1,42	0,20	7,87	0,36	3,35
QS 2000	3210	340	1,93	0,48	5,20	0,04	3,56
QS 3200	3520	490	1,80	0,44	5,47	0,06	3,63



Mapas de Irradiação Solar

Insolação =
horas de sol por mês

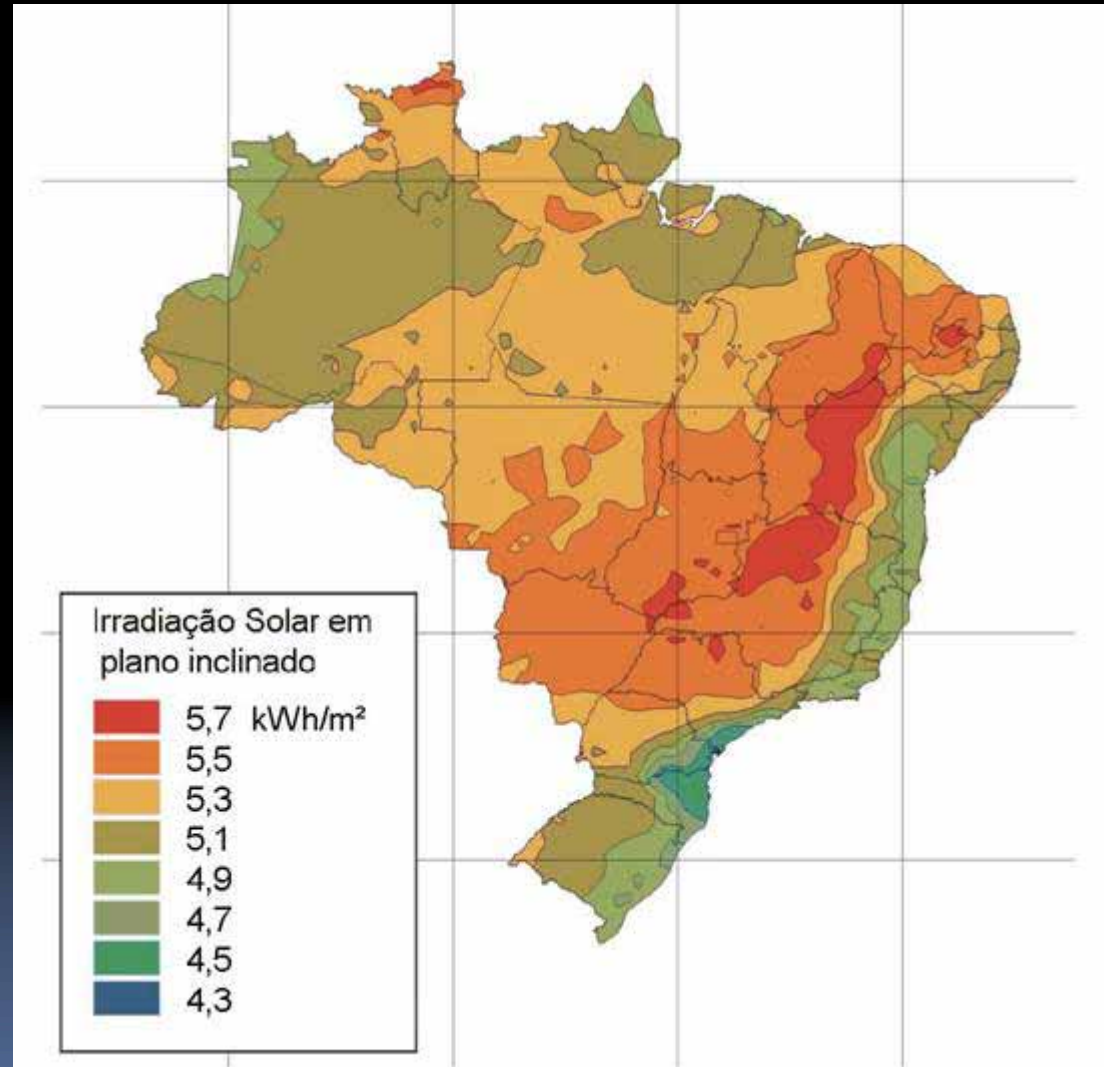




Efeito de inclinar o plano receptor:

Para coletores inclinados com ângulo igual à latitude local a irradiação disponível é bastante uniforme em média anual:

de 4,5 a 5,7 kWh/m².dia



Sintetización de datos de irradiancia solar:

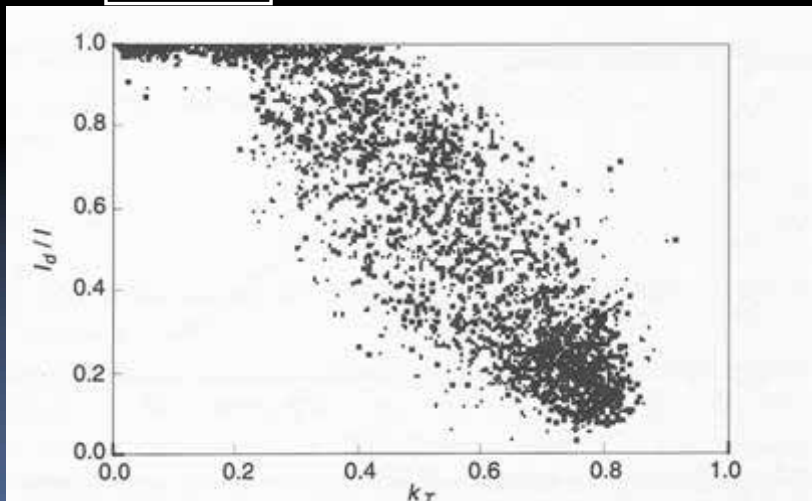
-A partir de cada valor diario de irradiación global horizontal obtener secuencias horarias de irradiación

Modelo con componente aleatoria modulada

1 día
H

24 horas
I

Separar
directa de la
difusa



$$I_d/I \left\{ \begin{array}{l} = 1,0 - 0,09 kt \\ = 0,9511 - 0,160 kt + 4,388 kt^2 \\ \quad - 16,63 kt^3 + 12,336 kt^4 \\ = 0,165 \end{array} \right. \left. \begin{array}{l} 0 \leq kt \leq 0,21 \\ 0,22 \leq kt \leq 0,8 \\ kt > 0,8 \end{array} \right.$$



SEQMETBR

SeqMet BR - Laboratório de Energia Solar - UFRGS

Umidade Relativa

Mês	Umidade Relativa (%)
J	80
F	80
M	75
A	75
M	70
J	65
J	55
A	50
S	65
O	75
N	80
D	80

Radiação

Mês	Radiação
J	6.0
F	6.0
M	5.5
A	5.5
M	5.0
J	4.5
J	5.0
A	5.5
S	6.0
O	6.0
N	5.5
D	5.5

Radiação Inclinada

Mês	Radiação Inclinada
J	4.0
F	4.5
M	5.0
A	5.5
M	6.0
J	6.5
J	6.0
A	5.5
S	5.0
O	4.5
N	4.0
D	3.5

Temperatura Máxima

Mês	Temperatura Máxima (°C)
J	25
F	25
M	25
A	25
M	25
J	25
J	25
A	25
S	25
O	25
N	25
D	25

Temperatura Média

Mês	Temperatura Média (°C)
J	15
F	15
M	15
A	15
M	15
J	15
J	15
A	15
S	15
O	15
N	15
D	15

Temperatura Mínima

Mês	Temperatura Mínima (°C)
J	10
F	10
M	10
A	10
M	10
J	10
J	10
A	10
S	10
O	10
N	10
D	10

Albedo Local (%)

20

Mapa do Brasil

Cidade: Interpolado

Desvio Azimutal

0

Inclinação do Módulo

45

Mapa do Brasil

Confirmar

Cancela

Entrada manual de dados

Sugerir inclinação

Origem dos dados

- Mapas
- Interpolação



SeqMet BR - Laboratório de Energia Solar - UFRGS

Umidade Relativa

Mês	Umidade Relativa (%)
J	75
F	75
M	75
A	80
M	85
J	85
J	80
A	80
S	75
O	75
N	70
D	70

Radiação

Mês	Radiação
J	6.5
F	6.0
M	5.5
A	4.5
M	3.5
J	3.0
J	2.5
A	3.5
S	4.5
O	5.5
N	6.5
D	7.0

Radiação Inclinada

Mês	Radiação Inclinada
J	5.0
F	5.0
M	4.5
A	4.0
M	3.5
J	3.5
J	4.0
A	4.5
S	5.0
O	5.0
N	5.0
D	5.0

Origem dos dados

Mapas
 Interpolação

Sugerir inclinação

Entrada manual de dados

Cidade: Porto Alegre

Desvio Azimutal

0

Inclinação do Módulo

44

Albedo Local (%)

27

Temperatura Máxima

Mês	Temperatura Máxima (°C)
J	30
F	30
M	25
A	20
M	18
J	18
J	18
A	20
S	22
O	25
N	28
D	30

Temperatura Média

Mês	Temperatura Média (°C)
J	25
F	25
M	20
A	15
M	12
J	12
J	12
A	15
S	18
O	20
N	22
D	23

Temperatura Mínima

Mês	Temperatura Mínima (°C)
J	20
F	18
M	12
A	8
M	8
J	8
J	8
A	10
S	12
O	15
N	18
D	18

Mapa do Brasil

Confirmar

Cancelar



Entrada Manual de Dados - Alterando

Entre com os dados da localização do sistema:

Latitude: Longitude: Nome:
-30.02 51.22 Porto Alegre

Mês	Radiação*	Umidade Relativa	Temp. Máxima	Temp. Média	Temp. Mínima
Janeiro	5.97	71	30.7	24.7	20.1
Fevereiro	5.50	74	30.1	24.5	20.1
Março	4.67	75	29.0	23.3	18.8
Abril	3.86	77	25.3	19.7	15.5
Maio	2.92	81	22.3	17.1	12.9
Junho	2.42	84	20.0	14.9	11.0
Julho	2.83	81	19.6	14.0	9.9
Agosto	3.33	78	20.9	15.4	10.9
Setembro	4.08	78	21.8	16.2	12.8
Outubro	5.25	75	24.2	19.2	14.9
Novembro	6.03	71	27.0	21.4	16.5
Dezembro	6.50	69	29.4	23.2	18.4

Salvar

Cancelar

Excluir

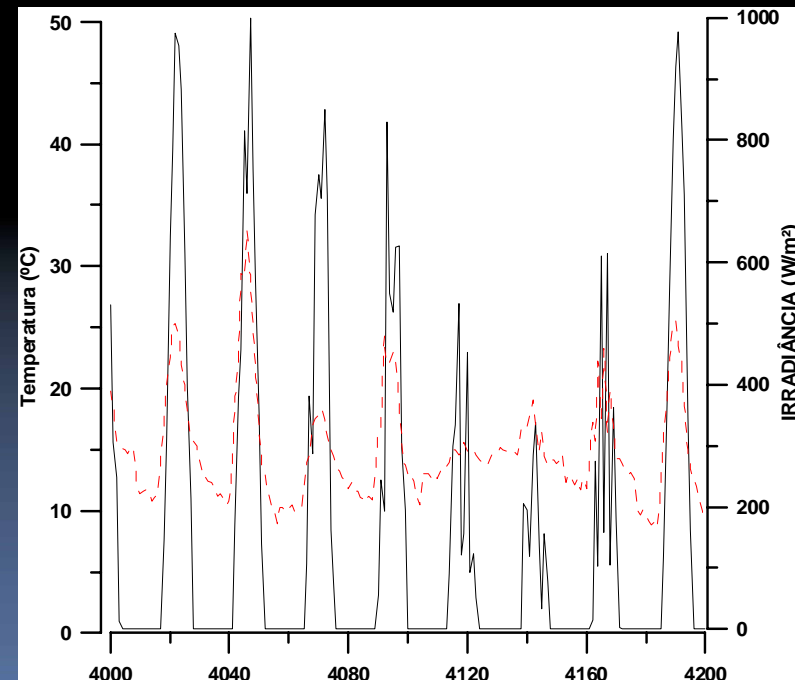
* Radiação em kWh/m²-dia

```
"nome = Porto Alegre Azimute = 0 Inclinação = 45 Latitude = -30,02 Longitude = 5122,"  
"mes","dia","hora","Rad_Horiz","Rad_Inclin","Modific","Cos(Inc)","Vel_Vento","TempAmb","TempTank"  
1,1,0,0,0,0,0,3.2383,20.9316714211246,22.1141110859285  
1,1,1,0,0,0,0,4.009146,20.6270008219376,21.961775786335  
1,1,2,0,0,0,0,2.070387,20.122150842947,21.7093507968397  
1,1,3,0,0,0,0,1.515326,20.8457167018191,22.0711337262758  
1,1,4,0,0,0,0,2.044522,20.5476900231307,21.9221203869316  
1,1,5,44.77374,35.29185,.5634902,.211162,.6148942,19.9075128489098,21.6020317998211  
.....
```

Secuencia de datos ...

SEQMETBR:

<ftp://ftp.solar.ufrgs.br/progs/seqmetbr.zip>



ACCIONAR PROGRAMA

