PEA 3530 – Laboratório de Energia

Experiência: geração solar fotovoltaica

Local - Laboratório Outdoor PEA

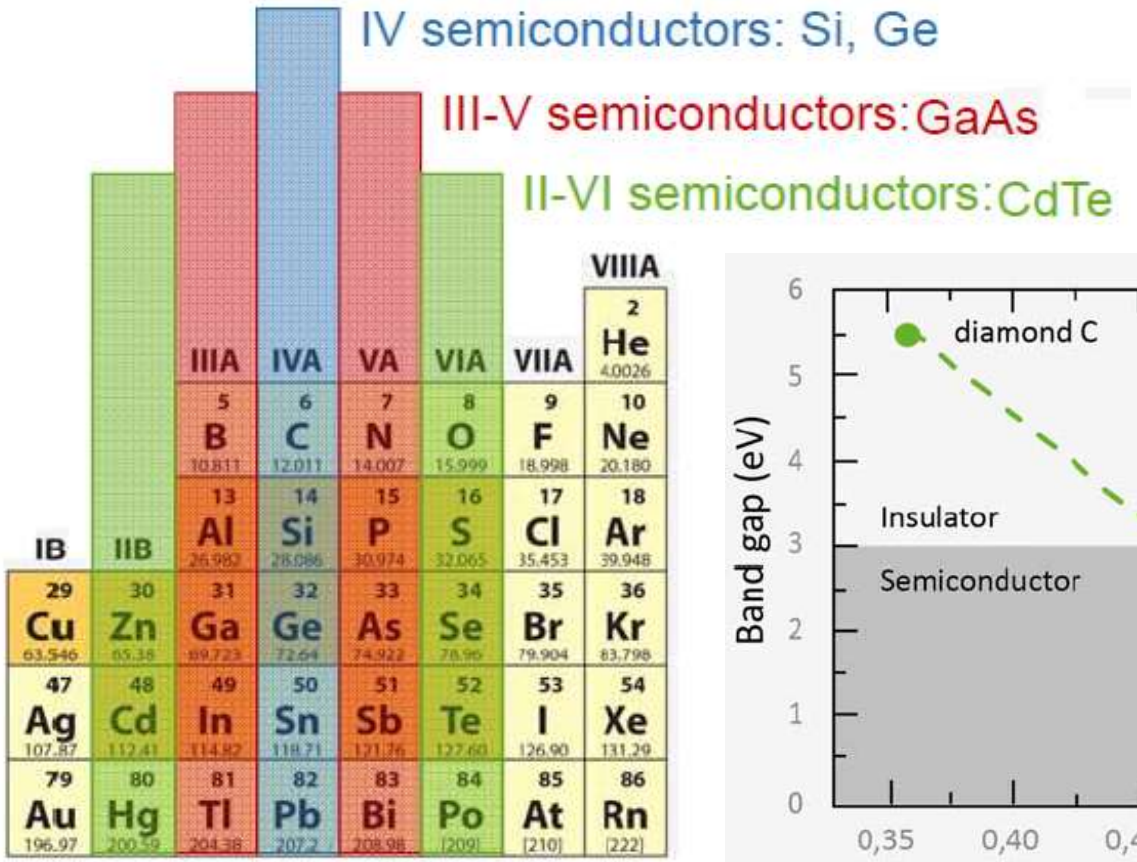
Objetivos:

- - Verificar o rendimento da geração fotovoltaica com painéis de Silício Monocristalino em diferentes condições de temperatura.
- - Verificar o rendimento de microinversores a partir de medições DC e AC nas entradas e saídas destes equipamentos
- - Verificar diferenças entre valores nominais de placa de equipamentos solares fotovoltaicos e seus respectivos valores de catálogo

Fundamentos Físicos

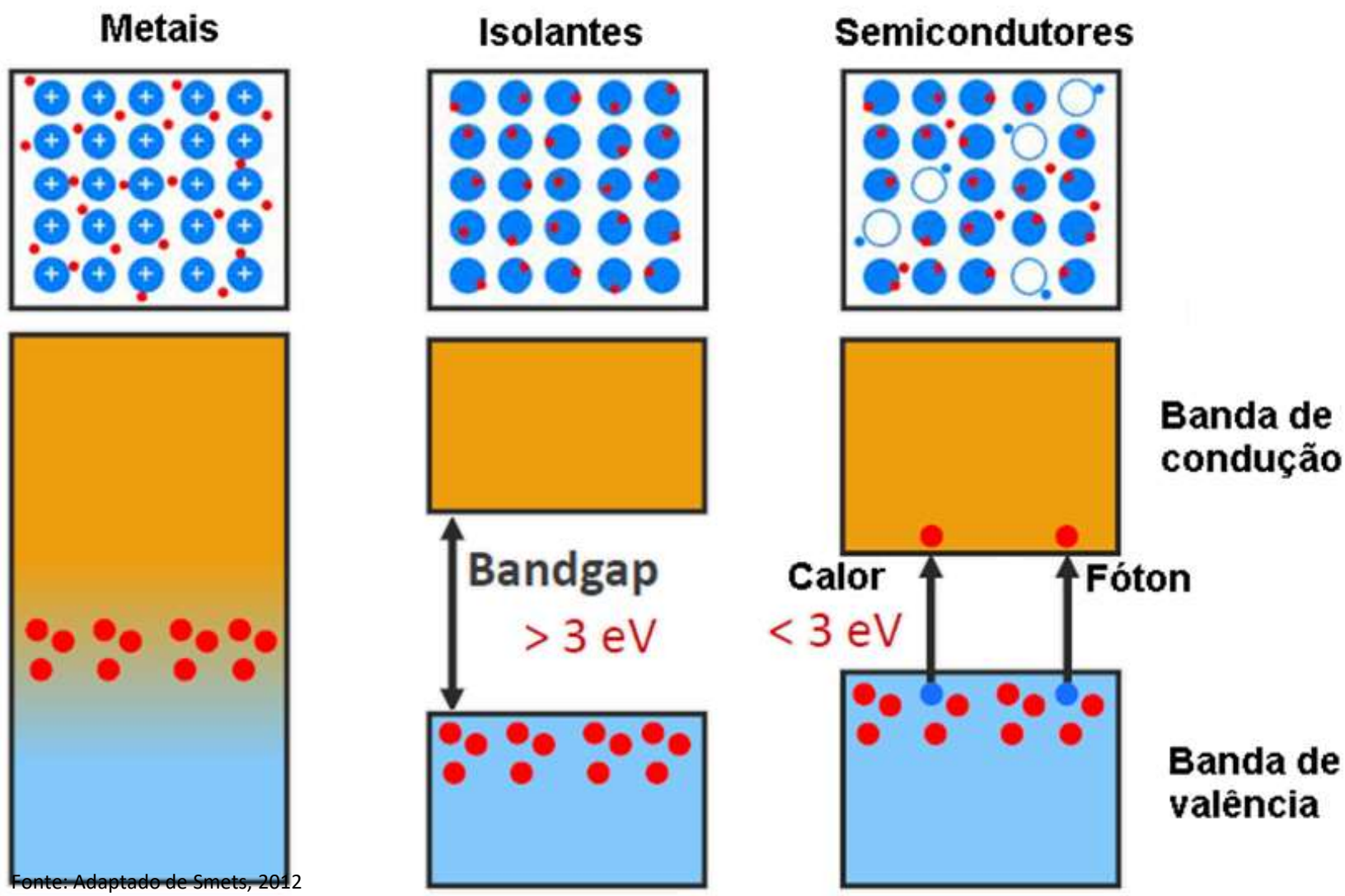
- São dispositivos semicondutores que convertem a energia luminosa em eletricidade absorvendo a energia de fótons através da geração de pares elétron-lacuna que são separados pelo campo elétrico interno produzido por:
    - A junção p-n; ou
    - Uma junção metal-semicondutor; ou
    - Uma estrutura metal-isolante-semicondutor em que a camada de isolante seja suficientemente fina.

Materiais Semicondutores



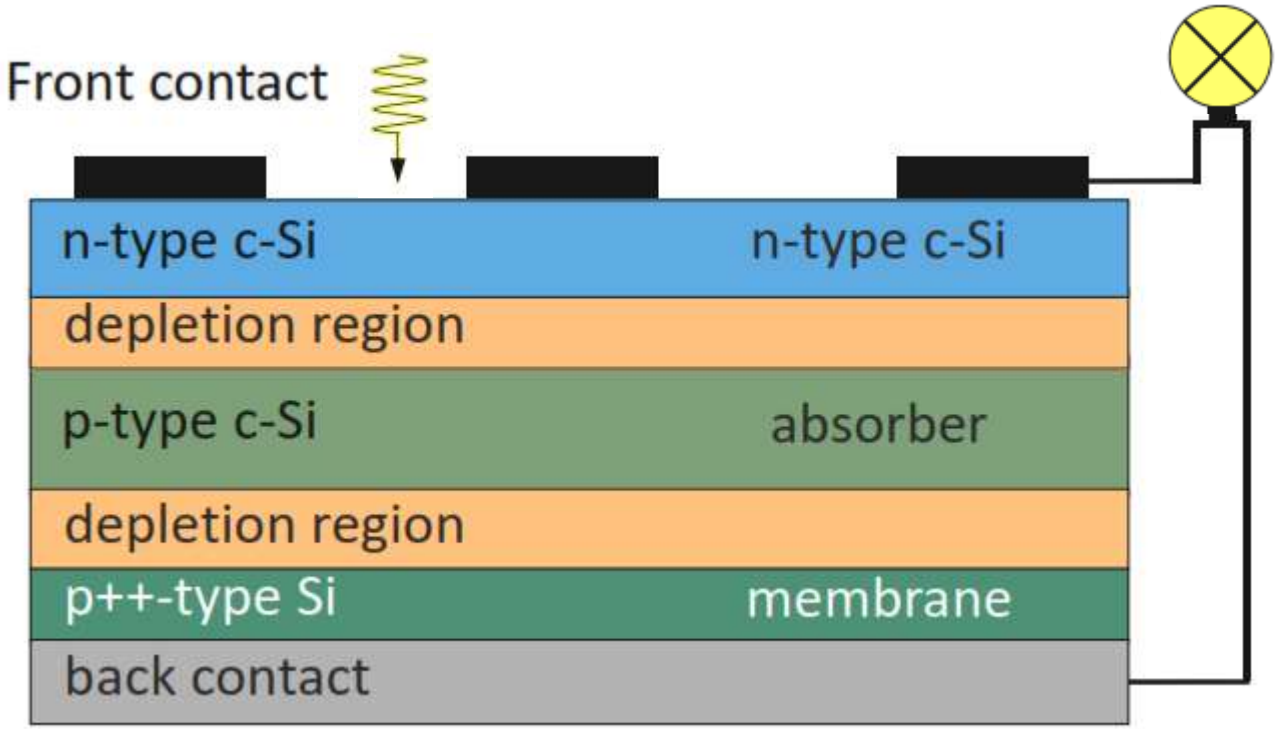
Fonte: Adaptado de Smets, 2012

Gap Energético



Fonte: Adaptado de Smets, 2012

Efeito Fotovoltaico



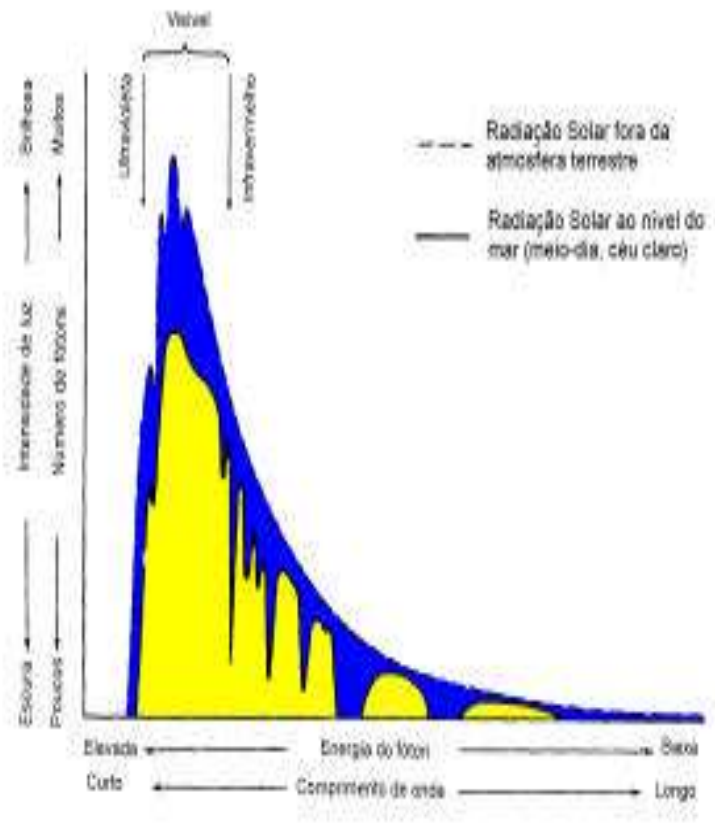
Fonte: Adaptado de Smets, 2012

Fatores limitantes do processo de conversão

- **Espectro de sua radiação** – ele se espalha em uma ampla faixa e apenas a parcela com comprimento de onda inferior a 1 micro.m é capaz de excitar os elétrons em células de silício

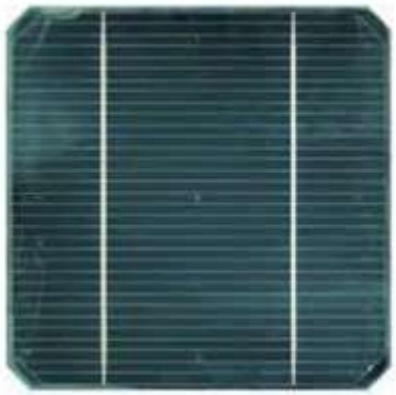
- Cada **fóton** só consegue excitar um elétron. Portanto, para fótons com energia superior a energia do gap, haverá um excesso de energia que será convertida em calor.

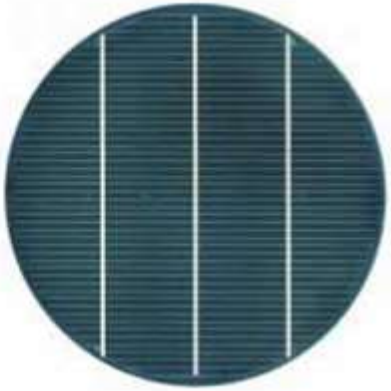
- Mesmo que os elétrons sejam excitados, existe uma probabilidade de que estes não sejam coletados, e não contribuam para a corrente. A tecnologia da fabricação de células fotovoltaicas, tenta reduzir ao máximo este efeito.



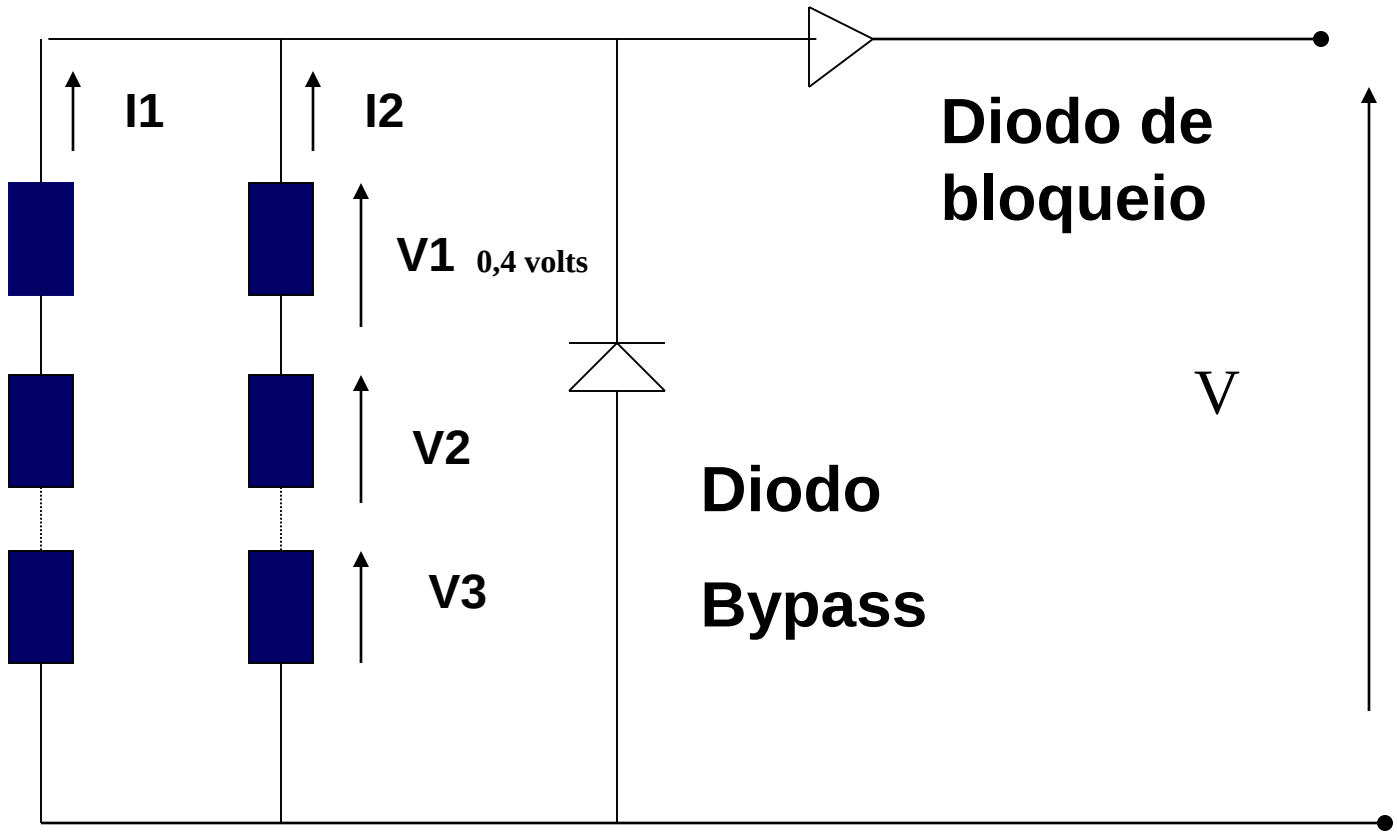
Célula Fotovoltaica

Célula Fotovoltaica - é o menor elemento do sistema fotovoltaico, produzindo tipicamente potências elétricas da ordem de 1,5 W (correspondentes a uma tensão de 0,5V e uma corrente típica de 3 amperes)





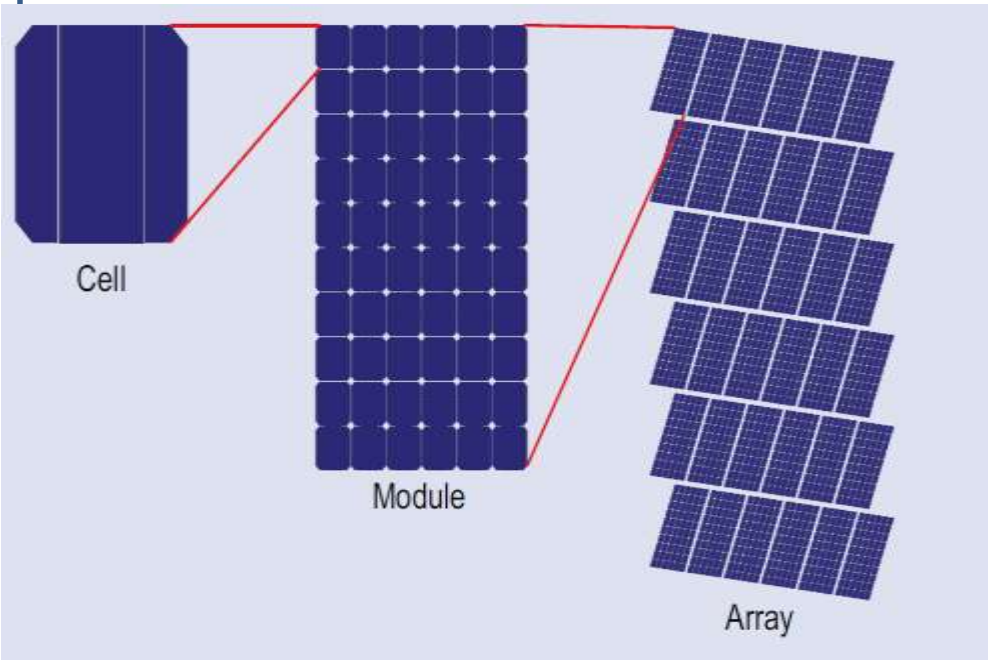
Módulo Fotovoltaico

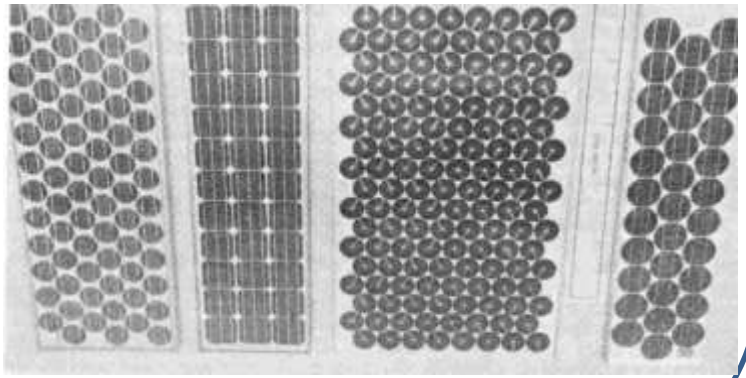


$V = V_1 + V_2 + V_3 + \ldots\ldots V_n$

$I = I_1 + I_2 + \ldots\ldots I_n$

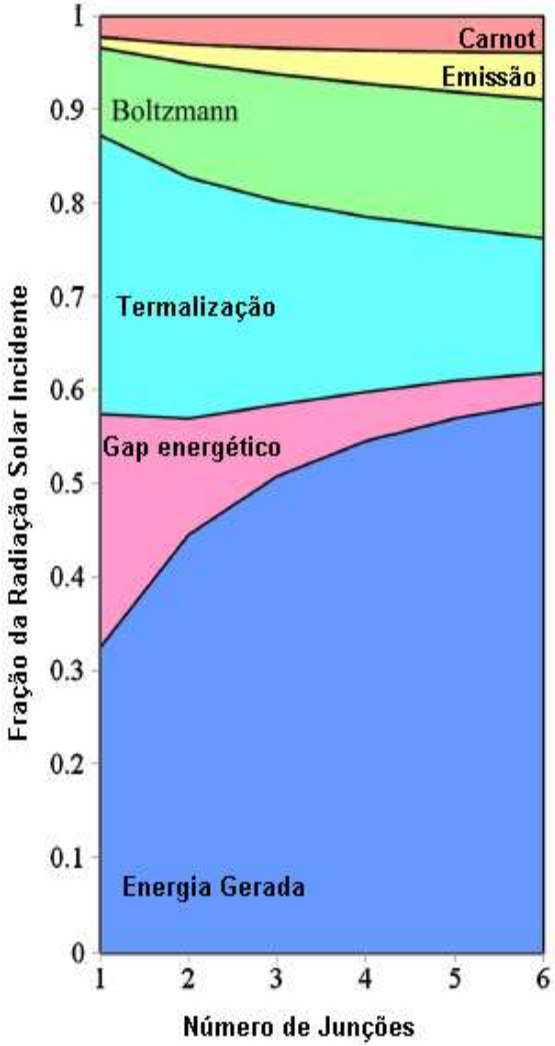
Módulos e Painéis Fotovoltaicos





Ex: Módulo de 120 Wp

Perdas na Geração FV



Reflexão: Refere-se a parte de radiação que é refletida pelo módulo não alcançando a célula. Na Figura 1 representada pela área amarela, emissão.

A utilização de uma camada anti reflexiva trouxe ganho a eficiência das células e é uma prática utilizada em todas as tecnologias.

Não absorção: Esta perda é visualizada na Figura pela área rosa. Nenhuma tecnologia pode converter todos os comprimentos de onda do espectro solar em energia de forma eficiente, apenas a radiação que possui energia próxima ao gap energético.

Pode-se citar a técnica de utilização de uma micro camada de silício amorfo – a-Si – sobre o m-Si aumentando substancialmente a eficiência da célula. A combinação destas camadas permite que uma vasta faixa do espectro de radiação seja aproveitada para conversão da irradiação em eletricidade.

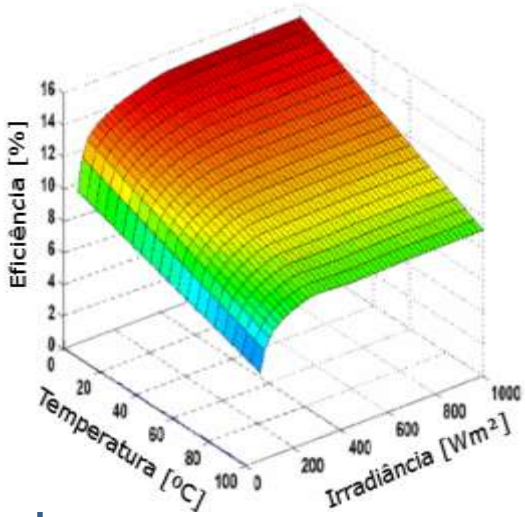
Fonte: HIRST e EKINS-DAUKES, 2011

Perdas na Geração FV

Temperatura: A perda por termalização é resultado da forte interação entre os transportadores excitados e a nuvem de fótons. Se a temperatura da célula está alta, a entropia na nuvem de fótons está alta, dificultando o transporte de elétrons. Baixar a temperatura aumenta a energia livre dos transportadores para promover o efeito fotovoltaico. Como demonstra BENDA (2012), a eficiência depende da temperatura da célula. O primeiro ponto trivial desta dependência pode ser observado na modelagem matemática dos sistemas FV, em que a diferença de potência é inversamente proporcional e a corrente diretamente proporcional a temperatura. Porém, a queda da diferença de potencial é bem maior que o aumento da corrente, resultando em diminuição da potência da célula.

Em suma, o aumento da temperatura reduz a penetração da irradiação na célula, com isso, as ondas de menor comprimento deixam de fornecer energia suficiente para ›r a lacuna de energia. Ou seja, o aumento da atura faz com que, linearmente, as ondas de menor mento deixem de promover o efeito fotovoltaico EMSKA, 2003).

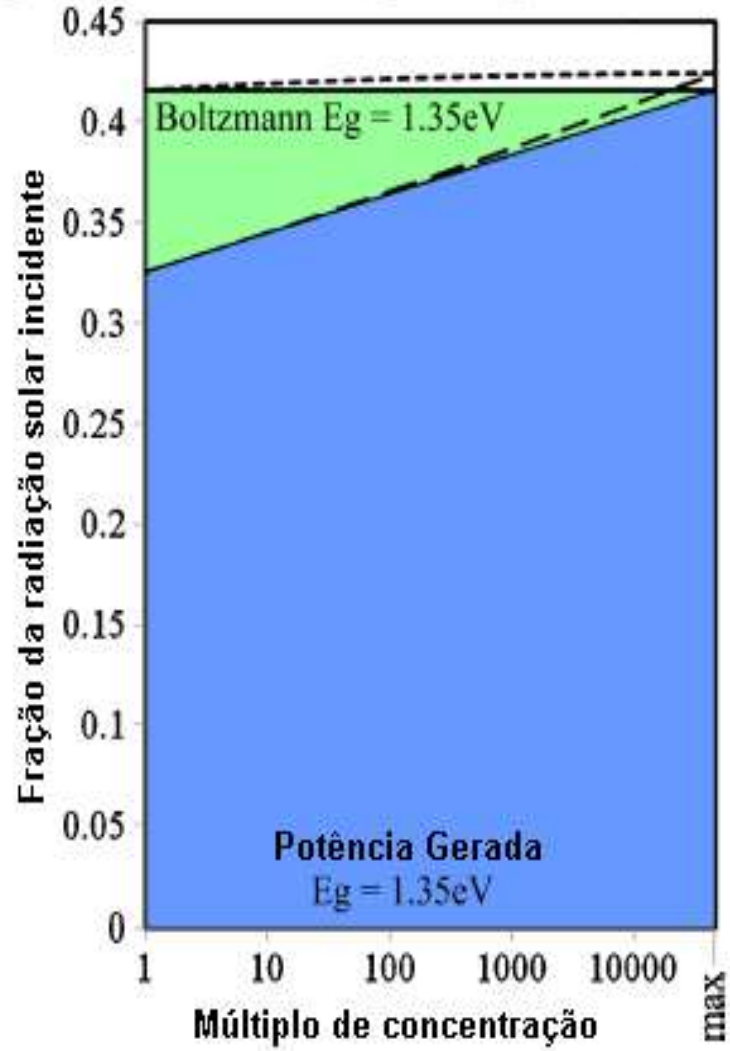
Fonte: BENDA, 2012



Perdas na Geração FV

Sombra: Os contatos são colocados sobre a célula na forma de malha para conduzir os elétrons gerados. Está área que os contatos ocupam não recebe radiação, o que ocasiona uma perda.

Boltzmann: O aumento da concentração da radiação incidente reduz o descasamento entre a radiação absorvida e o ângulo de emissão, resultando em uma redução da perda de Boltzmann.

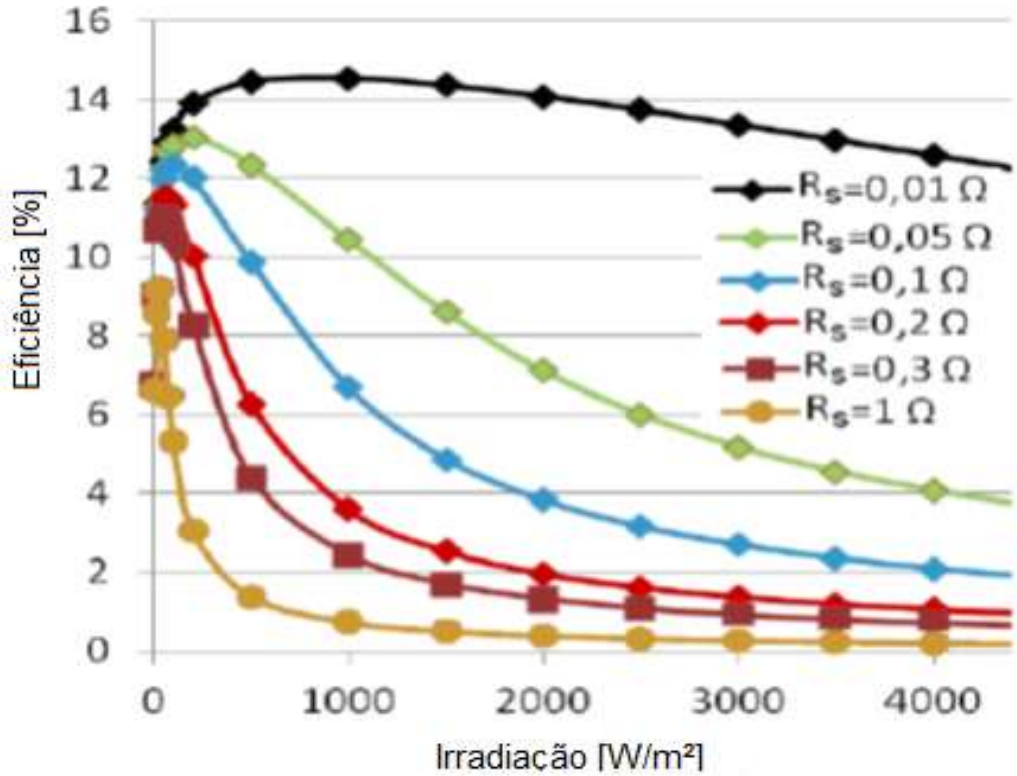


Fonte: HIRST e EKINS-DAUKES, 2011

Perdas na Geração FV

Resistência: A temperatura afeta ainda outro parâmetro que não é trivial no equacionamento. Para resistências muito baixas, a eficiência varia pouco com a temperatura, mas para resistências maiores a eficiência é fortemente afetada pela temperatura.

A não absorção e a termalização são os principais responsáveis para a baixa eficiência de células FV. Para entender por que isto ocorre é necessário



entender a natureza do espectro solar e como o efeito fotovoltaico é promovido na célula.

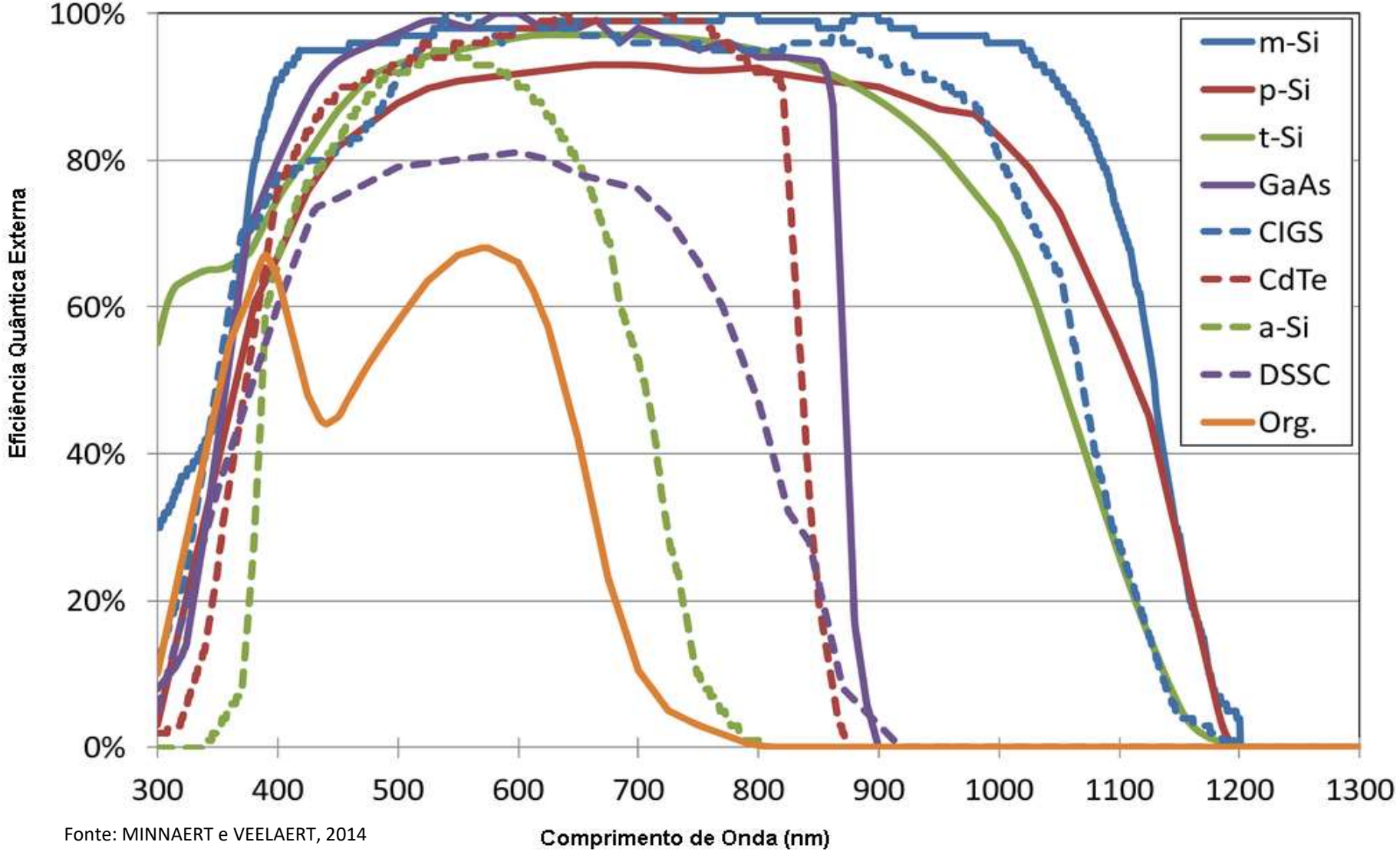
Fonte: BENDA, 2012

Perdas na Geração FV

Eficiência típica dos módulos comerciais

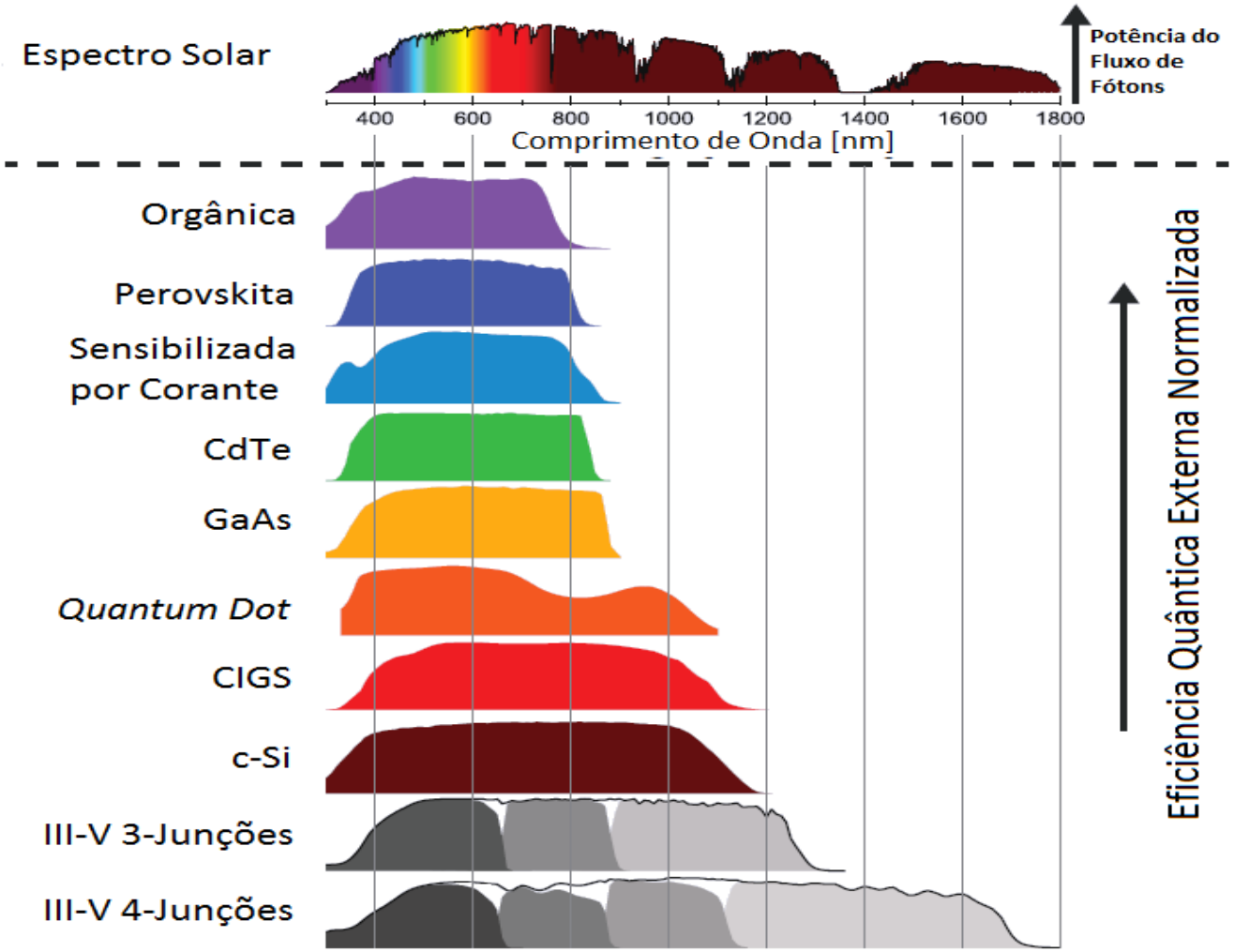
Tecnologia	Eficiência	Área/kW_p
Silício cristalino		
Monocristalino	13 a 19%	~7m^2
Policristalino	11 a 15%	~8m^2
Filmes finos		
Silício amorfo (a-Si)	4 a 8%	~15m^2
Telureto de Cadmio (Cd-Te)	10 a 11%	~10m^2
Disseleneto de cobre-índio-gálio (CIGS)	7 a 12%	~10m^2
Concentrador fotovoltaico	~25%	

Resposta Espectral de Células FV



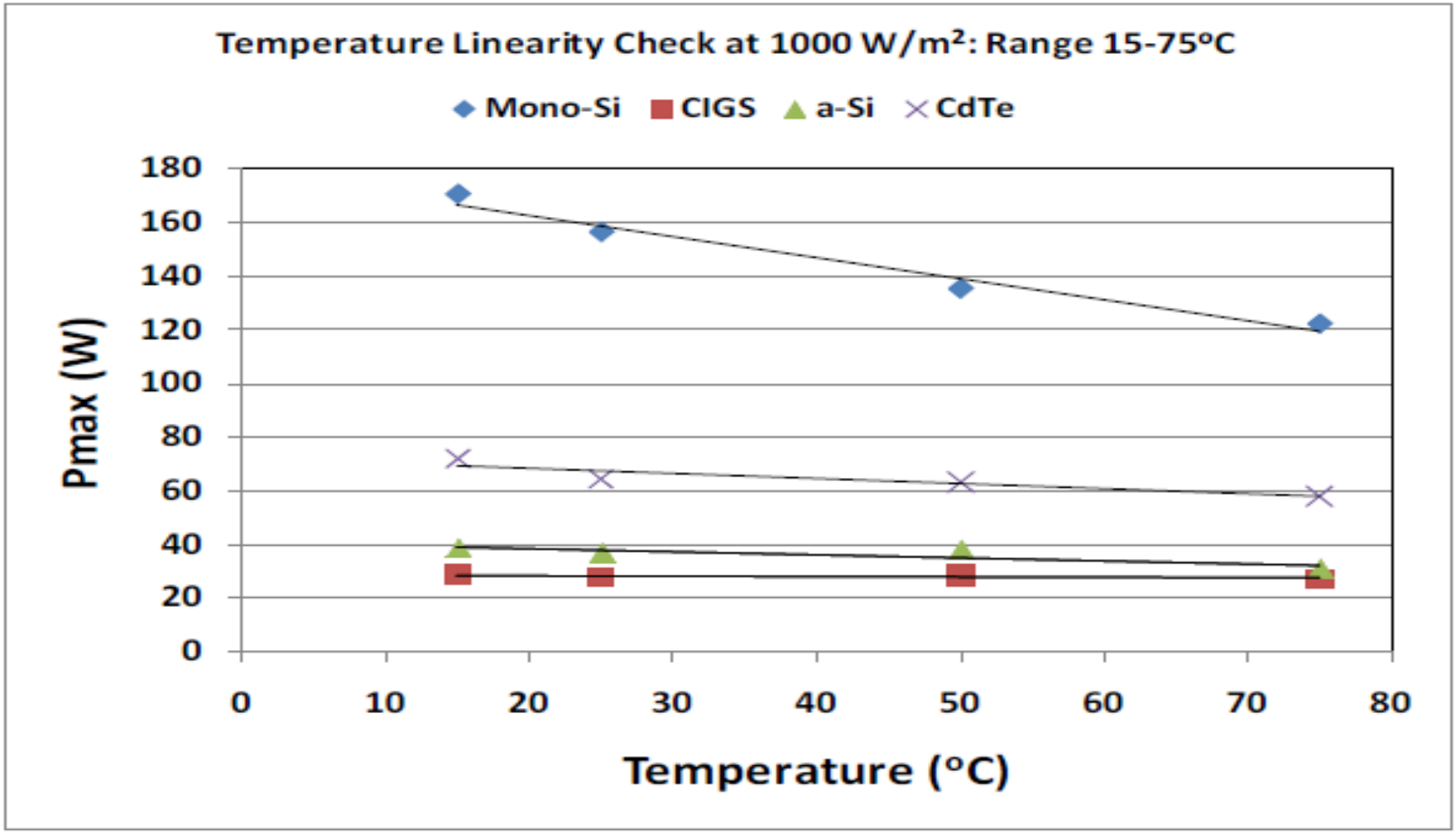
Fonte: MINNAERT e VEELAERT, 2014

Resposta Espectral de Células FV



Fonte: Adaptado de SCHMALENSEE et al., 2015

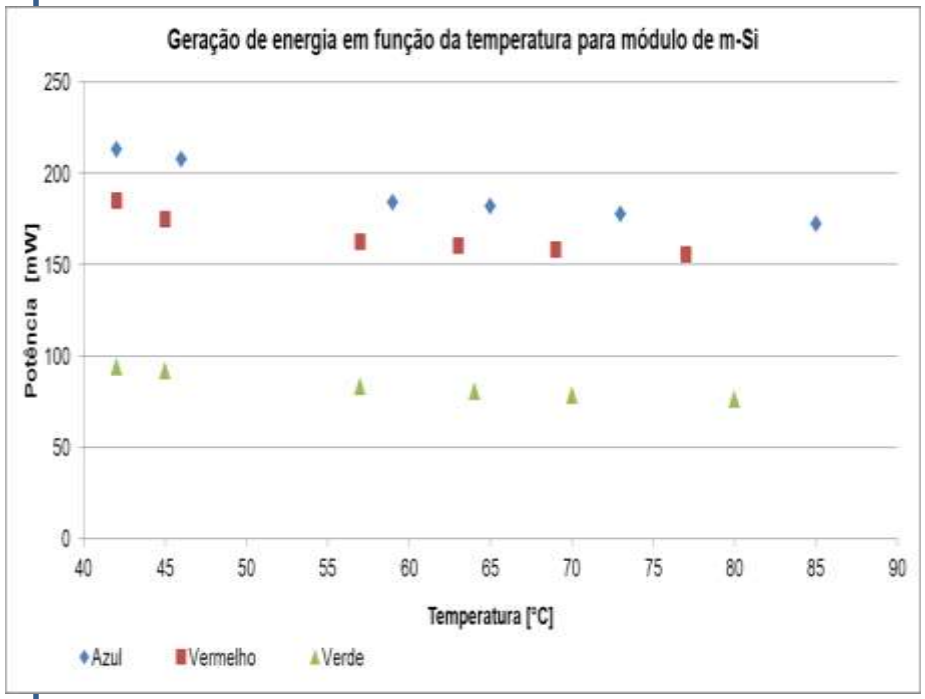
Coeficiente térmico das tecnologias FV

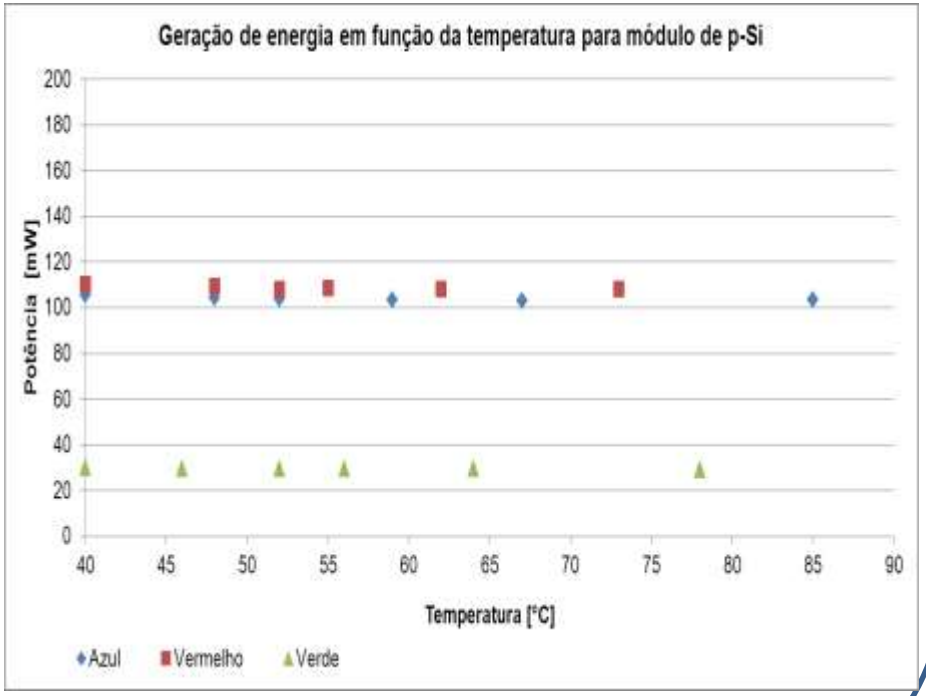


Fonte: TAMIZHMANI et al., 2011

Coeficiente térmico espectral

- O Coeficiente térmico para cada cor é o mesmo do respectivo módulo.
  - Si monocristalino é 0,5%;
  - Si Policristalino é 0,05%.





Fonte: Elaboração Própria

Arrefecedores

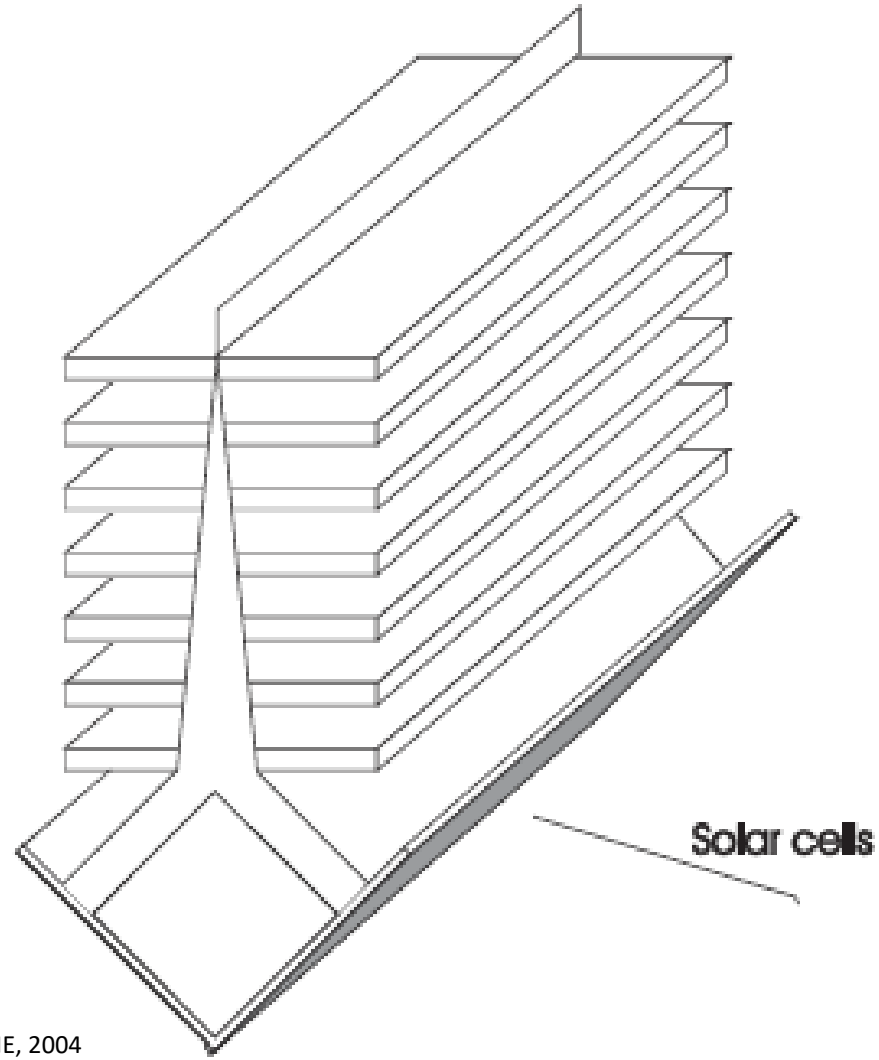
- Manter a temperatura da célula baixa e uniforme;
  - Em países com invernos rigorosos os arrefecedores são utilizados também para descongelamento dos módulos.
- Ser simples e de confiança;
- Minimizar o consumo de energia; e
- Permitir utilizar o calor térmico extraído (ROYNE et al., 2005).

- **Tipos**
  - Passivos
  - Ativos

  Nano fluidos são destaque nesta área de estudos (TAYLOR et. al., 2012).

Arrefecedores

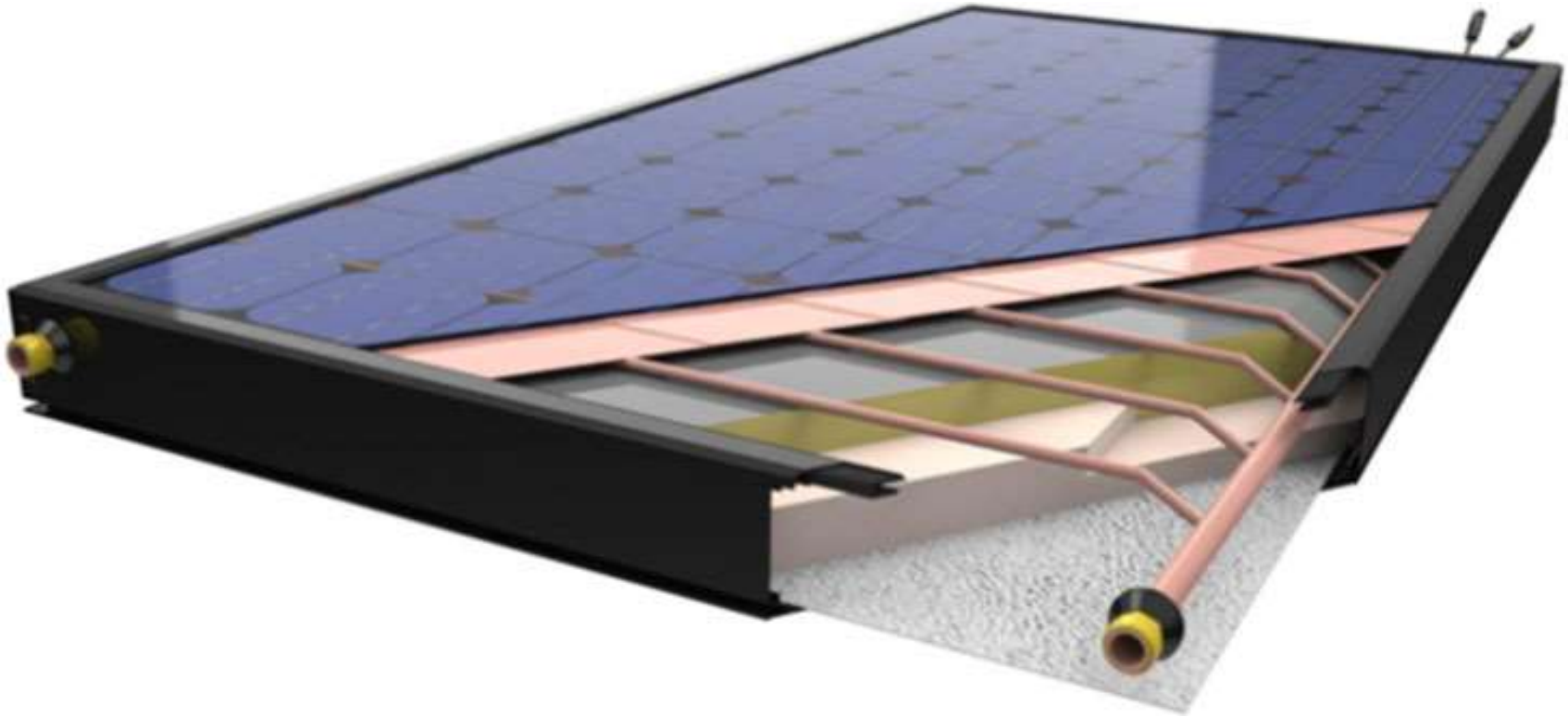
- Passivos



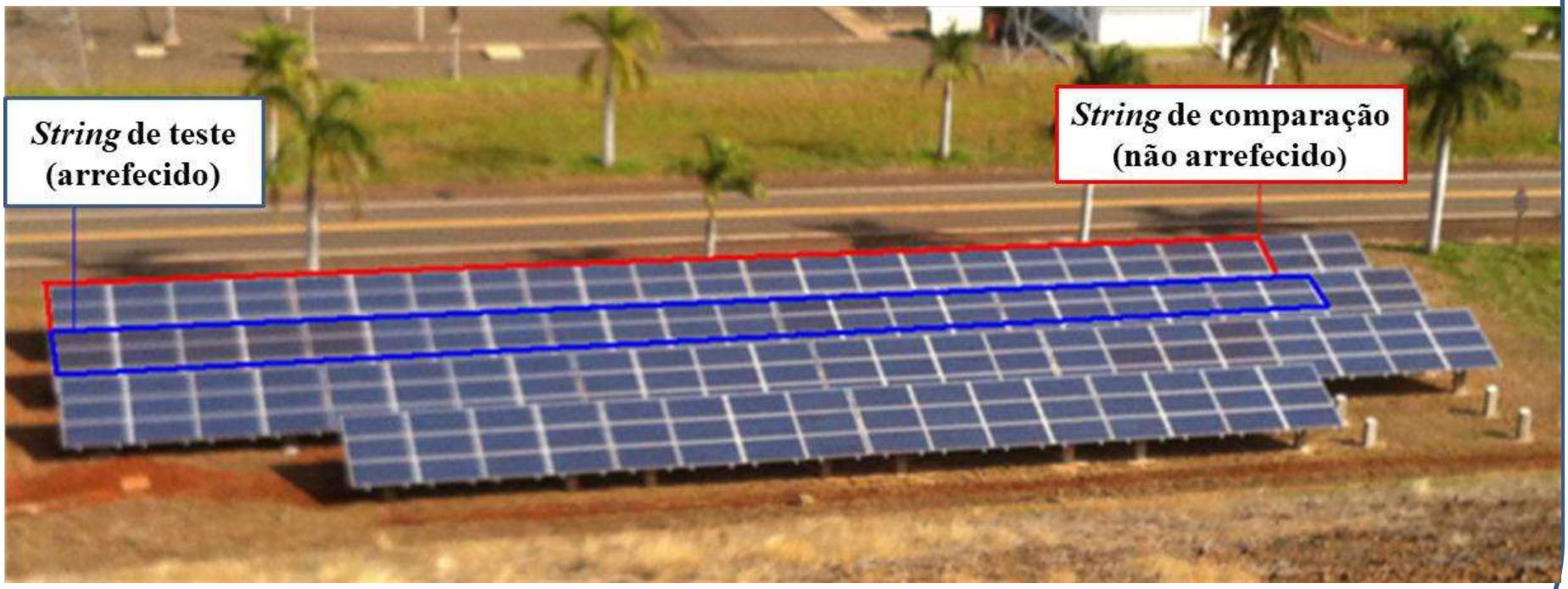
Fonte: ROYNE, 2004

Arrefecedores

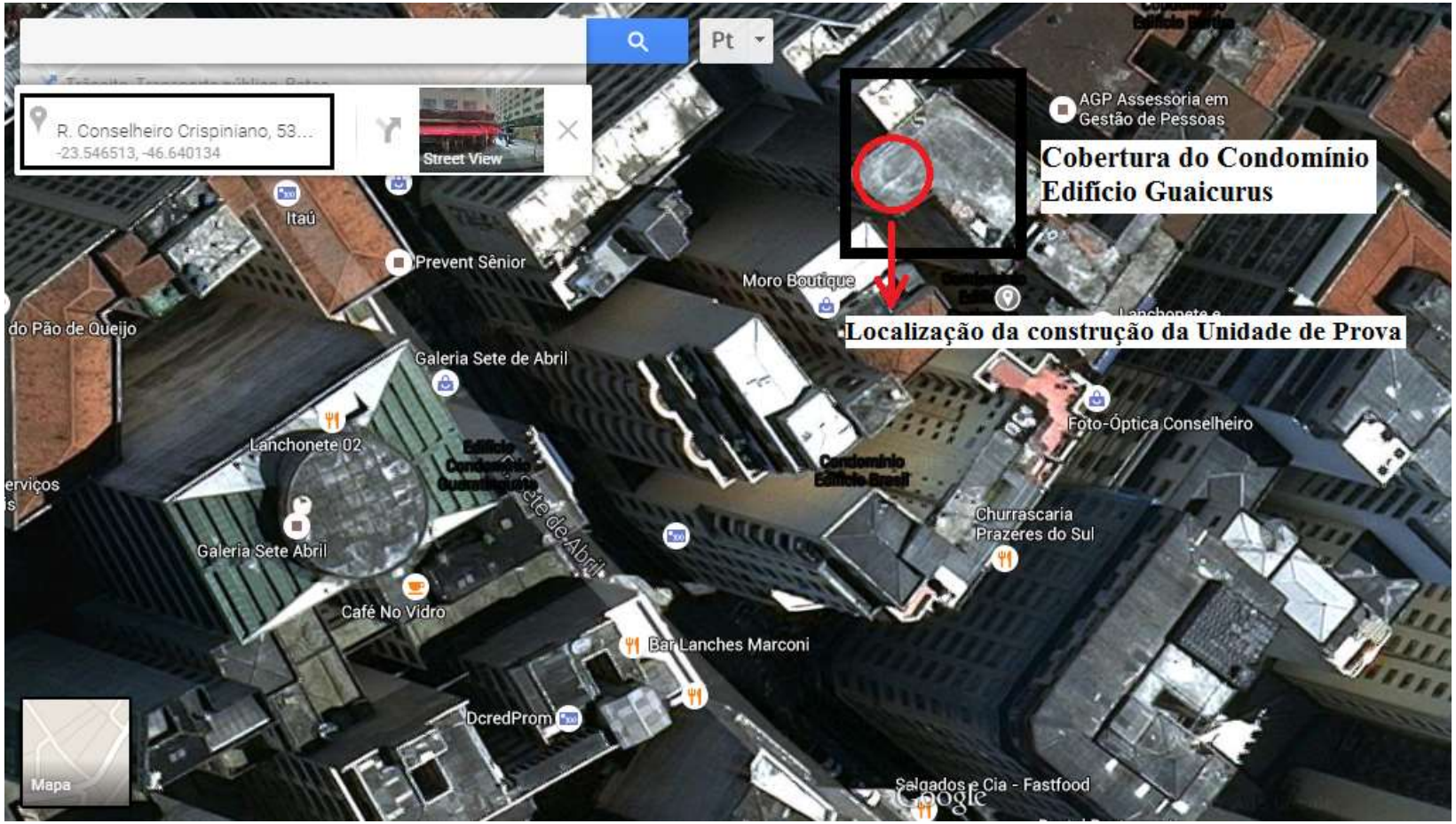
- Ativos



Exemplo de Usina Solar Fotovoltaica Arrefecida P&D ANEEL - CESP

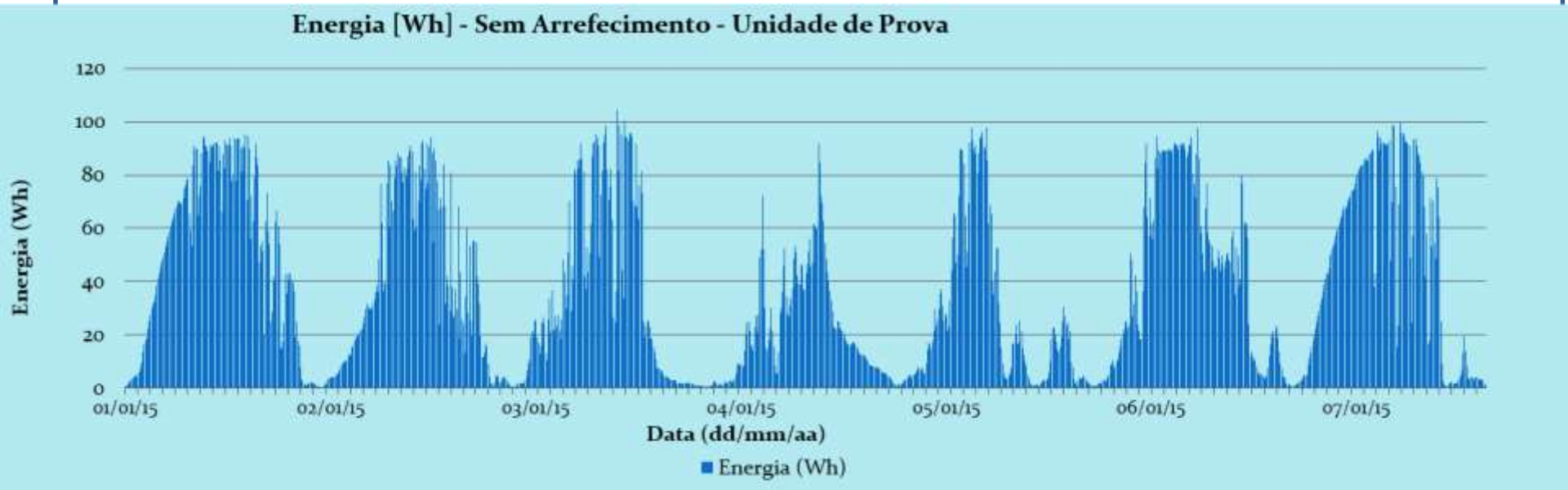


Unidade de provas - São Paulo Centro



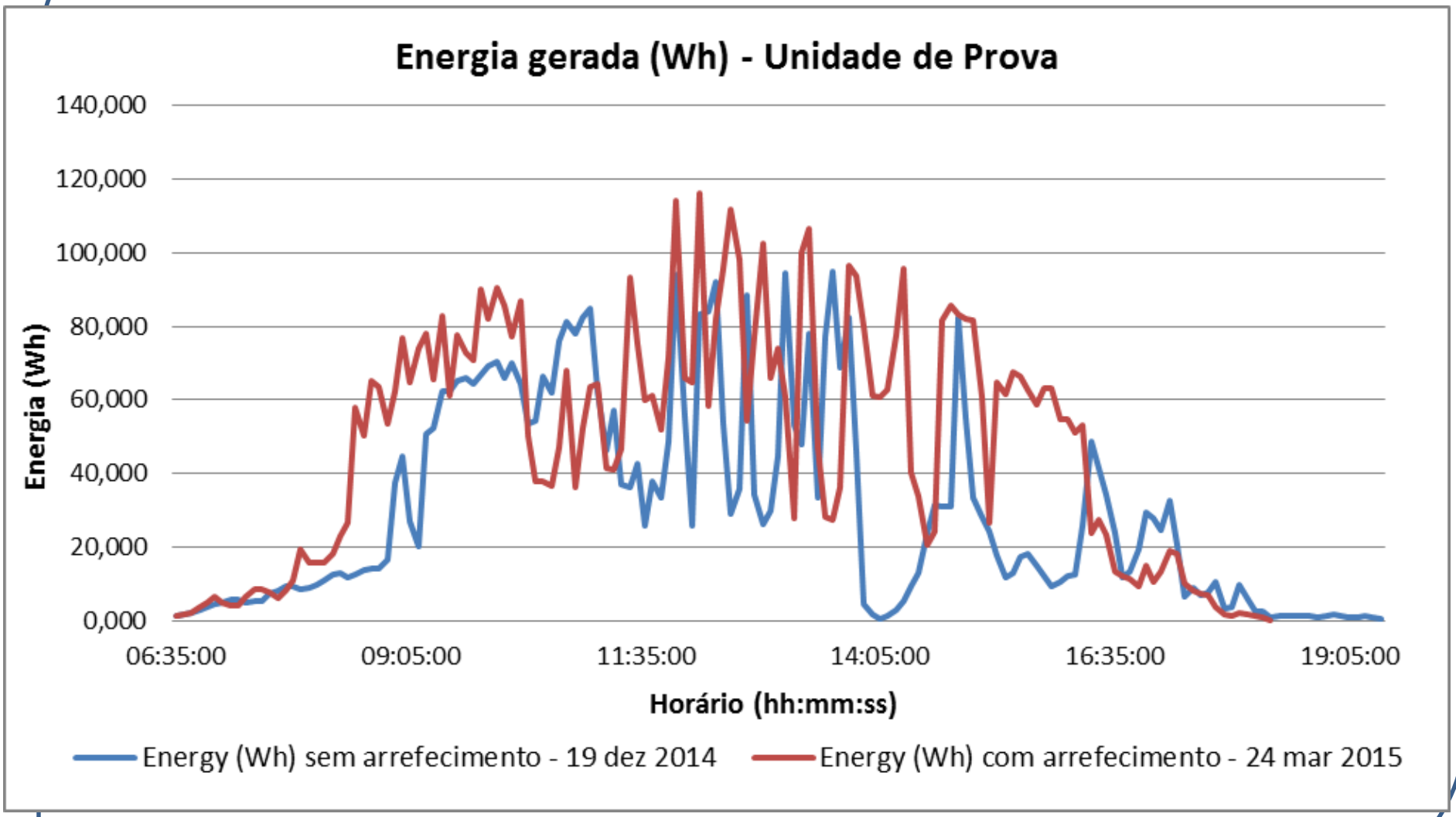
Protótipo de Usina Solar Fotovoltaica Arrefecida

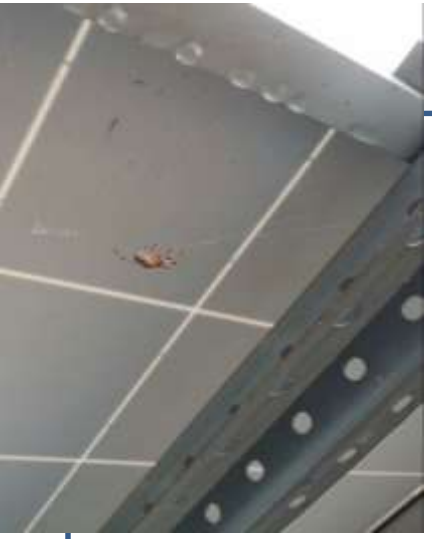
Geração da unidade de provas



- Semana de medição de energia na unidade de Provas em SP

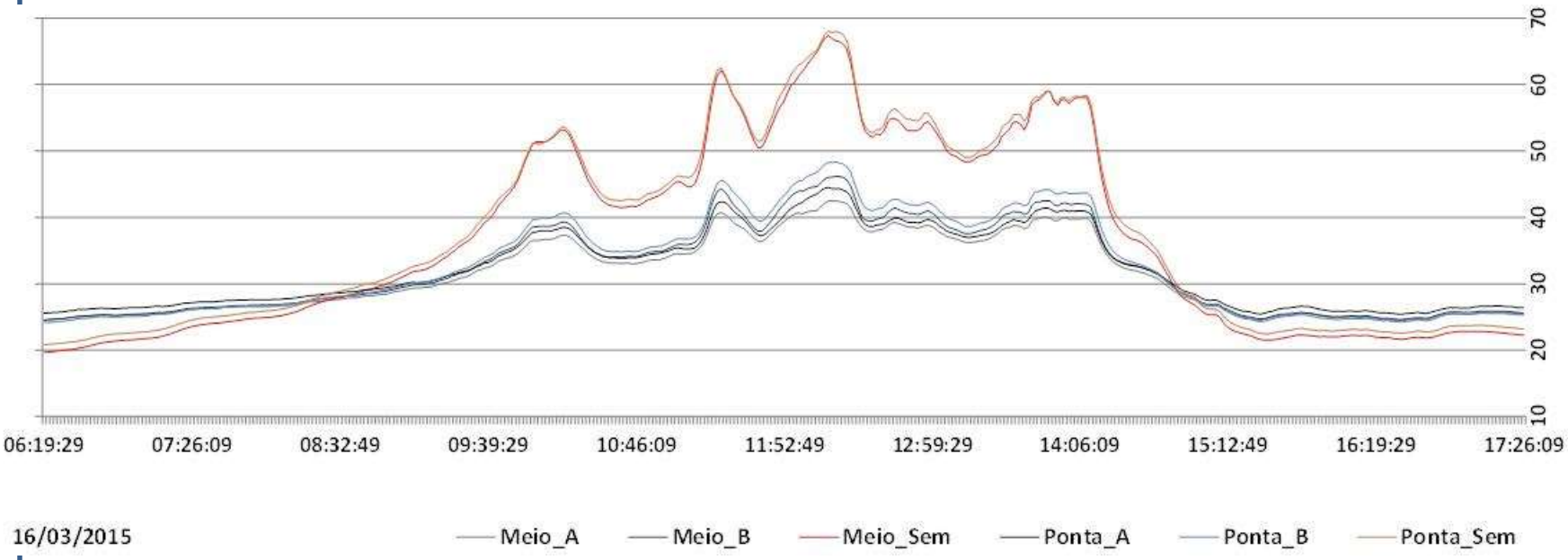
Teste de Arrefecimento





7.04
7.03

Resultados

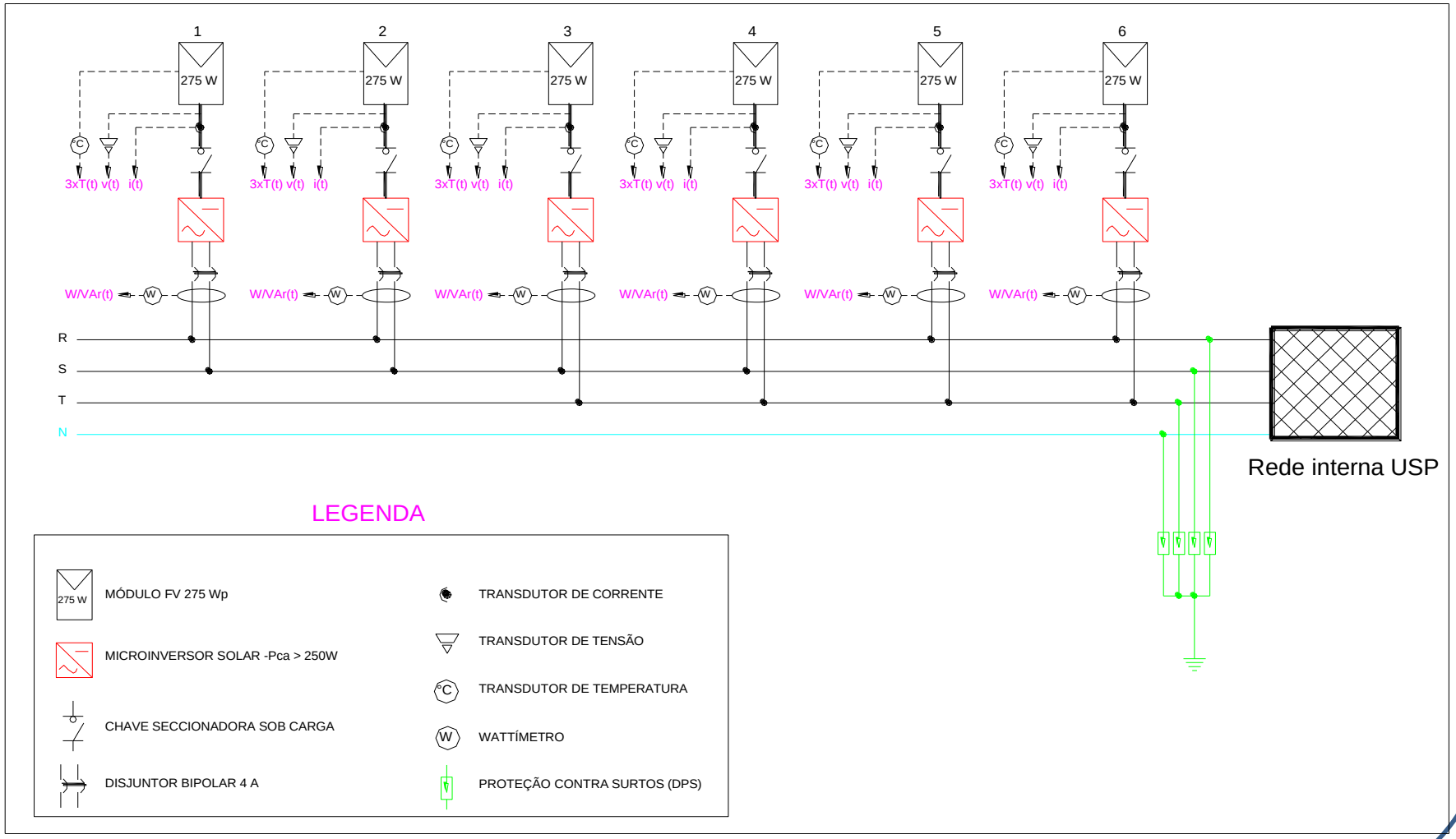

70
60
50
40
30
20
10
06:19:29
07:26:09
08:32:49
09:39:29
10:46:09
11:52:49
12:59:29
14:06:09
15:12:49
16:19:29
17:26:09
16/03/2015
Meio_A
Meio_B
Meio_Sem
Ponta_A
Ponta_B
Ponta_Sem

Caracterização do Laboratório Outdoor (LO-USP)

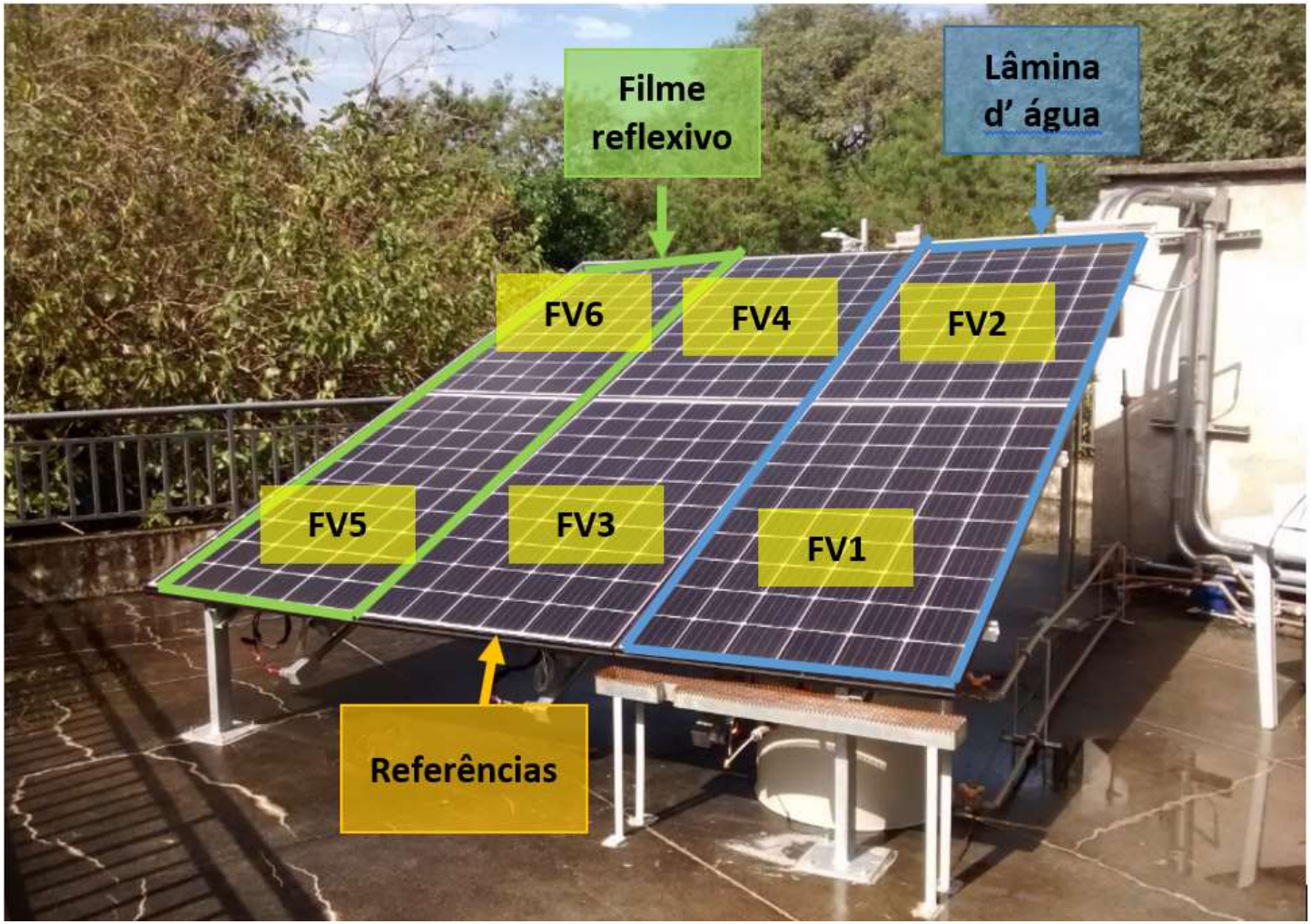
Caracterização do Laboratório Outdoor (LO- USP)

- O laboratório outdoor ocupa uma área de 45 m^2 ;
- Tem uma potência instalada de 1,65 kWp;
- Composto por 06 (seis) módulos FV m-Si de 275 Wp;
- Está conectado à rede elétrica interna do Prédio Anexo da Engenharia Elétrica da USP em tensão secundária trifásica de 220V/127V CA.

Diagrama multifilar simplificado do LO-USP

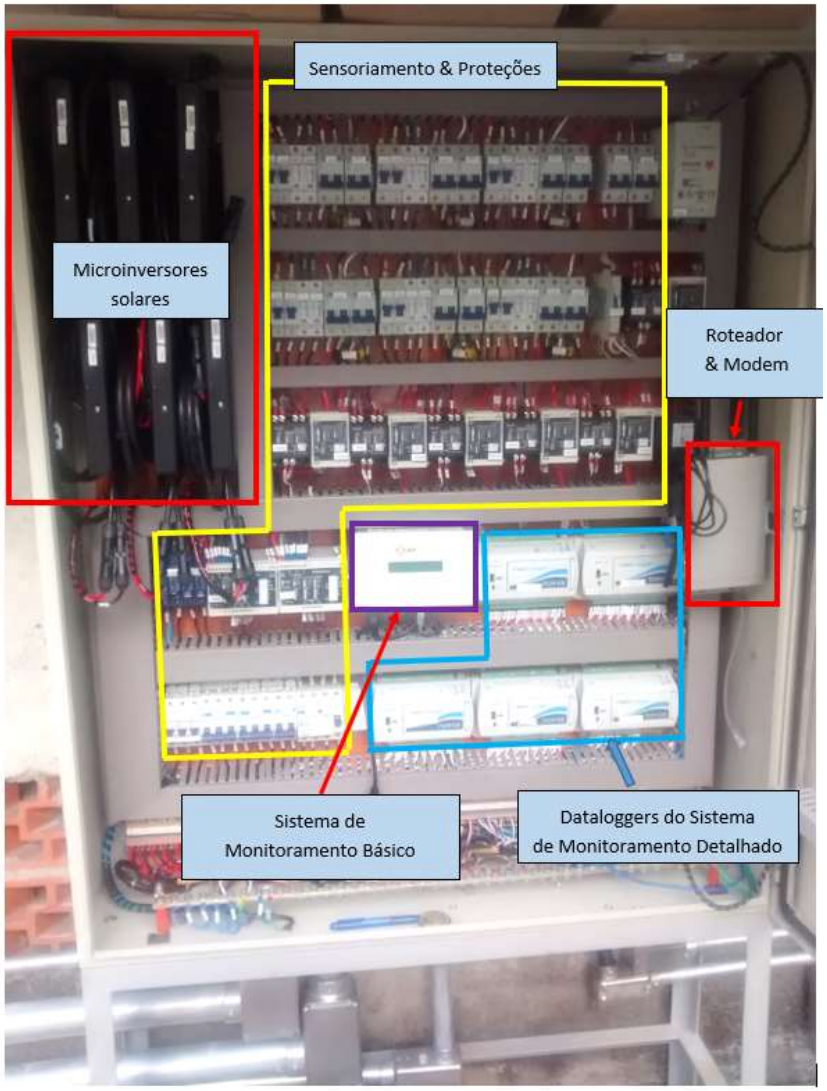


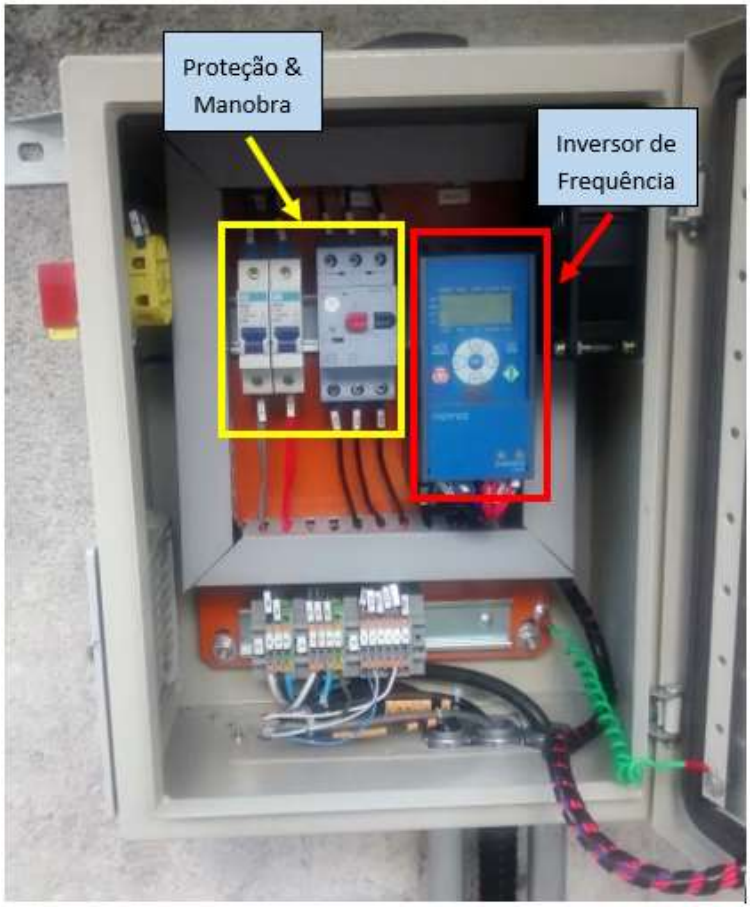
Caracterização do Laboratório Outdoor (LO-USP)



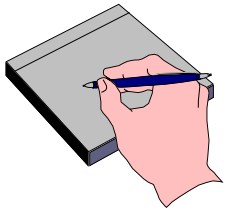
Caracterização do Laboratório Outdoor (LO-USP)

Caracterização do Laboratório Outdoor (LO-USP)





Agenda da Apresentação



Caracterização do Laboratório Outdoor (LO-USP)

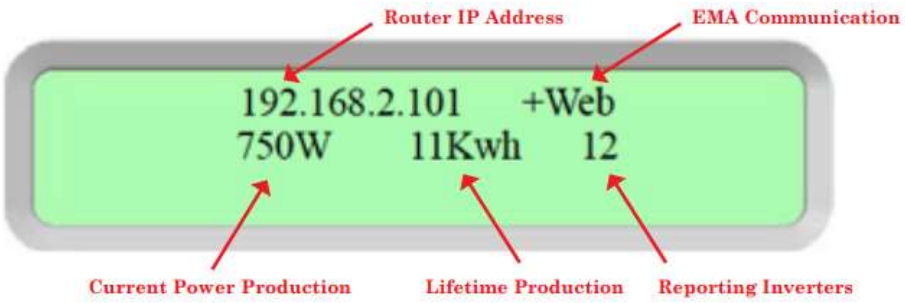
Características técnicas das grandezas medidas no LO-USP

Caracterização da Usina Piloto de Volta Redonda (UP-VR)

Características técnicas das grandezas medidas na UP-VR

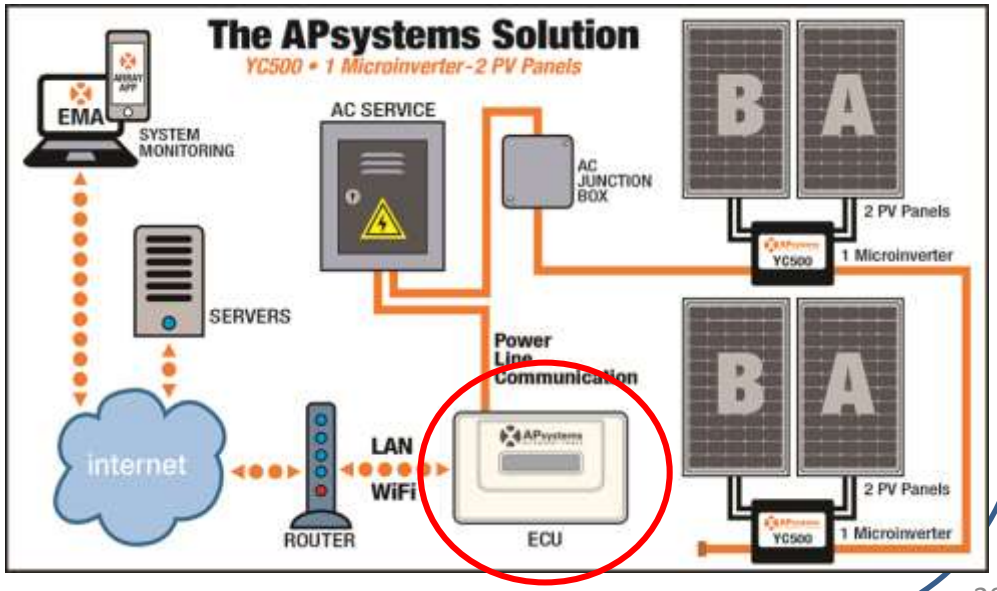
Análise qualitativa dos dados monitorados

Sistema de monitoramento básico embarcado nos Inversores Solares



Sistema de Monitoramento Básico com foco apenas na produção de energia

Tensão, frequência e potência são registrados em intervalos mínimos de **5 minutos**



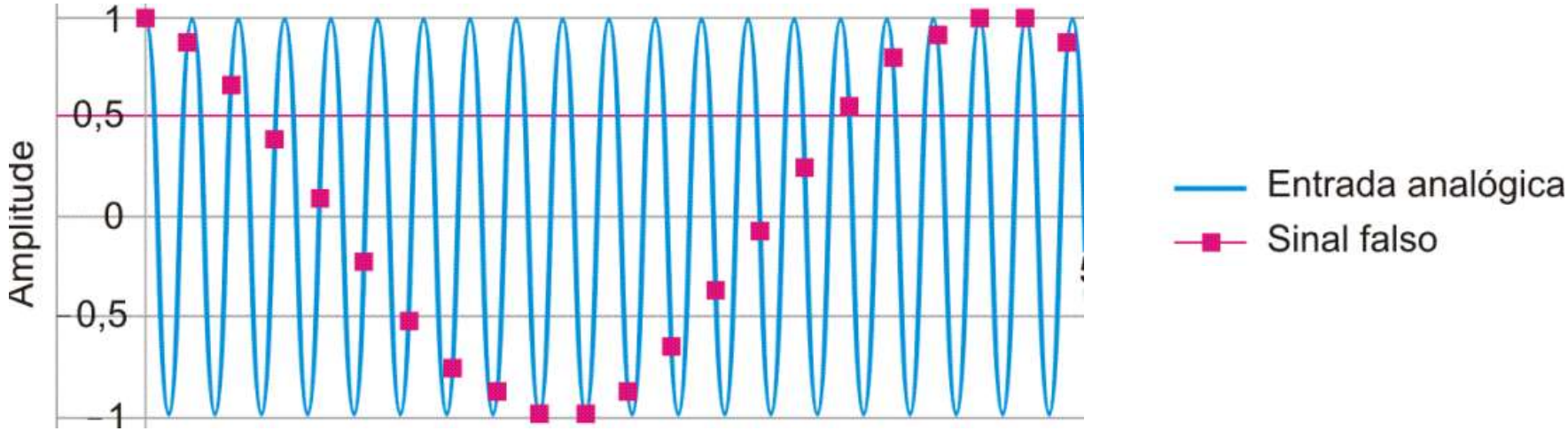
Sistema de monitoramento detalhado do LO-USP

Item	Parâmetro	Taxa de amostragem	Período de integração *	No. Sensores
01	Irradiância solar na inclinação dos módulos FV	1 seg	1 seg	1
02	Tensão (CC) para cada entrada MPPT	1 seg	1 seg	6
03	Corrente (CC) para cada entrada MPPT	1 seg	1 seg	6
04	Potência ativa/reativa (CA) na saída de cada microinversor	1 seg	1 seg	6
05	Tensão fase-neutro (CA) no ponto de acoplamento dos inversores	1 seg	1 seg	3
06	Temperatura dos módulos FV	1 seg	1 seg	18
07	Temperatura da água na caixa d'água	1 seg	1 seg	1
08	Temperatura da água na saída do difusor	1 seg	1 seg	1
09	Temperatura da água na calha de coleta	1 seg	1 seg	1
10	Medidor de vazão	1 seg	1 seg	1
11	Potência ativa consumida pela bomba de água	1 seg	1 seg	1
			Total	**45**

*** Período de integração e armazenamento.**

http://143.107.163.28:8787/

Importância da taxa de amostragem
Teorema da amostragem (Nyquist–Shannon)



O espectro de um sinal **não será afetado** pela sua discretização se esta ocorrer com uma **frequência de amostragem duas vezes maior** que a maior **frequência do sinal**

$$f_{SINAL\ max} \leq \frac{f_{AMOST}}{2}$$

$$f_{AMOST} >> 2\ f_{SINAL}$$

Norma IEC 61724 – Photovoltaic system performance monitoring – Guidelines for measurement, data, exchange and analysis

- A radiação solar pode mudar numa taxa superior aos $200\,\frac{W}{m^2.s}$ em condições de céu parcialmente nublado.

- Por esta razão, a Norma IEC 61724 recomenda que os parâmetros que variam diretamente com a radiação solar devem ser amostrados com uma taxa menor ou igual a 1 min.

- Parâmetros que possuem constantes de tempo maiores, podem ser monitorados com taxas de amostragem entre 1 min e 10 min.

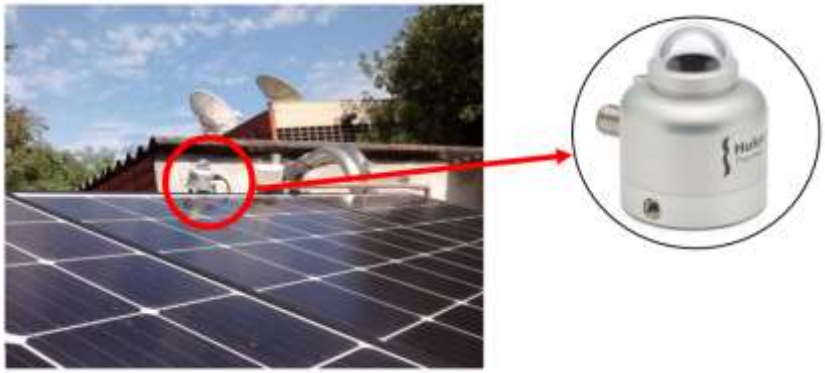
- Cálculo da potência CC: $Pcc(t) = V(t) \times i(t)$

A somatória do produto NÃO é igual ao produto das somatória

$$\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{k=N} v_k \times i_k \neq \left[\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{k=N} v_k\right] \times \left[\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{k=N} i_k\right]$$

Características dos sensores utilizados no LO-USP

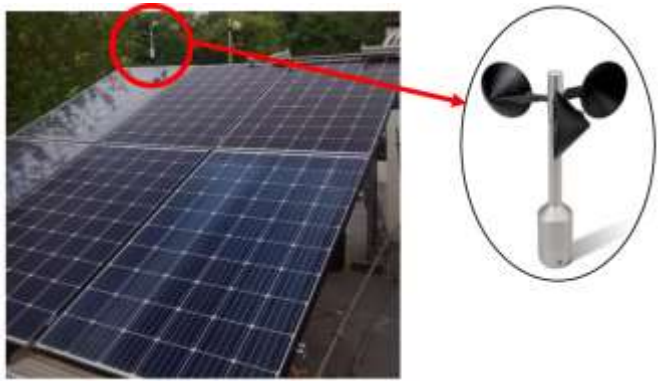
Piranômetro



Características relevantes:

- Modelo: HUKSEFLUX SR05
- Classificação ISO 9060: second class
- Princípio: termopilha
- Ângulo de visão: 180°
- Tempo de resposta $< 18\ s$
- Irradiância máxima: 2.000 W/m^2
- Faixa espectral: 285 – 3.000 nm
- Taxa de amostragem recomendada: 1 s
- Saída: analógica (4/20 mA)

Anemômetro



Características relevantes:

- Modelo: Ammonit S11200
- Classificação IEC 61400: first class
- Tipo: copo (concha)
- Faixa de medição: 0,3 – 75 m/s
- Velocidade de partida: < 0,3 m/s
- Linearidade: $r > 0{,}999\ 99$ (4-20 m/s)
- Taxa de amostragem recomendada: 1 s
- Saída: pulso (261 Hz @ 12m/s)

Características dos sensores utilizados no LO-USP

Sensor de Temperatura

Características relevantes:

- Modelo: NRG 110S
- Tipo: Sensor de circuito integrado com proteção contra radiação solar direta
- Constante térmica: 10 min
- Constante elétrica: 250 us
- Faixa de medição: -40 °C até 52,5 °C
- Umidade operacional: 0 a 100 %
- Saída: analógica linear (0 a 2,5 Vdc)

Barômetro

Características relevantes:

- Modelo: NRG BP20
- Tipo: Sensor de circuito integrado com compensação de temperatura incorporado
- Faixa de medição: 15 kPa até 115 kPa
- Precisão: $\pm$ 1,5 kPa (10°C e 50°C)
- Umidade operacional: 0 a 100 %
- Saída: analógica linear (0 a 5 Vdc)

Características dos sensores utilizados no LO-USP

Transdutor tensão CC

Características relevantes:

- Modelo: SECON V420ADC
- Faixa de medição: 0 a 50 Vdc
- Erro máx. ±1% de Vmax.
- Tempo de resposta: < 10 ms
- Tensão de isolamento: 1 kV
- Impedância de entrada: 1,0 MΩ
- Alimentação: 220 Vca
- Possui isolamento galvânico
- Saída: analógica (4-20 mA)

Transdutor de corrente CC

Características relevantes:

- Modelo: SECON C420ADC
- Tipo: efeito hall
- Faixa de medição: 0 a 20 Adc
- Erro máx. ±1% de Imax.
- Tempo de resposta: < 10 ms
- Tensão de isolamento: 1 kV
- Alimentação: 220 Vca
- Saída: analógica (4-20 mA)

Características dos sensores utilizados no LO-USP

Multifuncional grandezas CA

Características relevantes:

- Modelo: SECON
- Tipo: Trifásico (03 transdutores monofásicos independentes)
- Faixa de medição: 0 a 250 Vca / 0 a 3A 0 a 2,25 kW (cos ϕ de ± 1)
- Erro máx. $\pm 1\%$ de Pmax.
- Tempo de resposta: < 3 s
- Tensão de isolamento: 1 kV
- Alimentação: 220 Vca
- Saída: RS485 protocolo Modbus/RTU

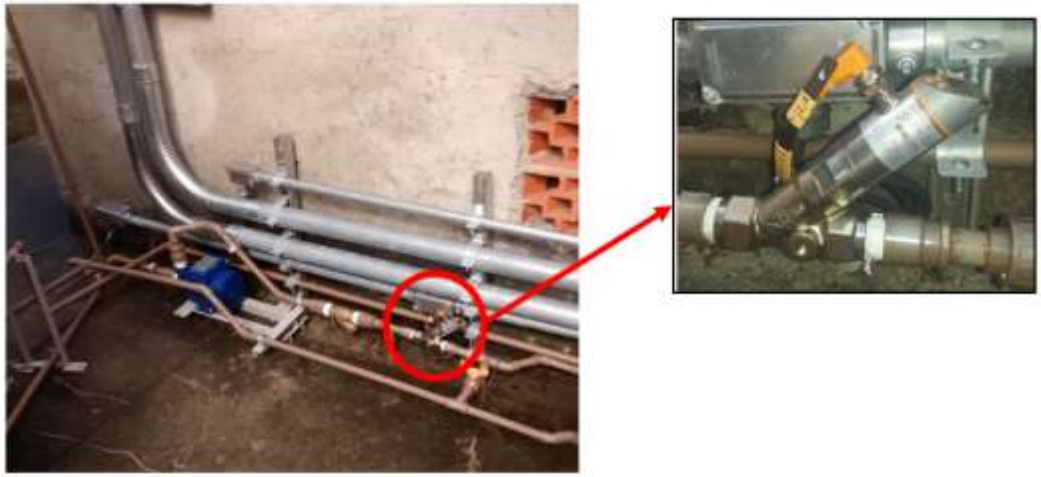
Sensores de temperatura

Características relevantes:

- Modelo: Pt100
- Tipo: termoresistor de platina encapsulado em bulbo de cerâmica exposto
- No. fios: 03 fios (24 AWG)
- Precisão: classe A ($\pm$0,15 °C)
- Faixa de medição: -30°C até +105°C
- Excitação: < 1mA

Características dos sensores utilizados no LO-USP

Medidor de vazão

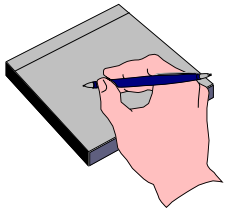


Características relevantes:

- Modelo: ifm electronic SBG233
- Aplicação: água e outras soluções aquosas
- Faixa de medição: 0,5 a 25 l/min
- Resolução: 0,1 l/min
- Precisão: 4%
- Temp. Operacional: -10 a 100 °C
- Pressão operacional: até 40 bares
- Saída: 4-20 mA / pulso (10.000 Hz)

Caracterização da UP-VR

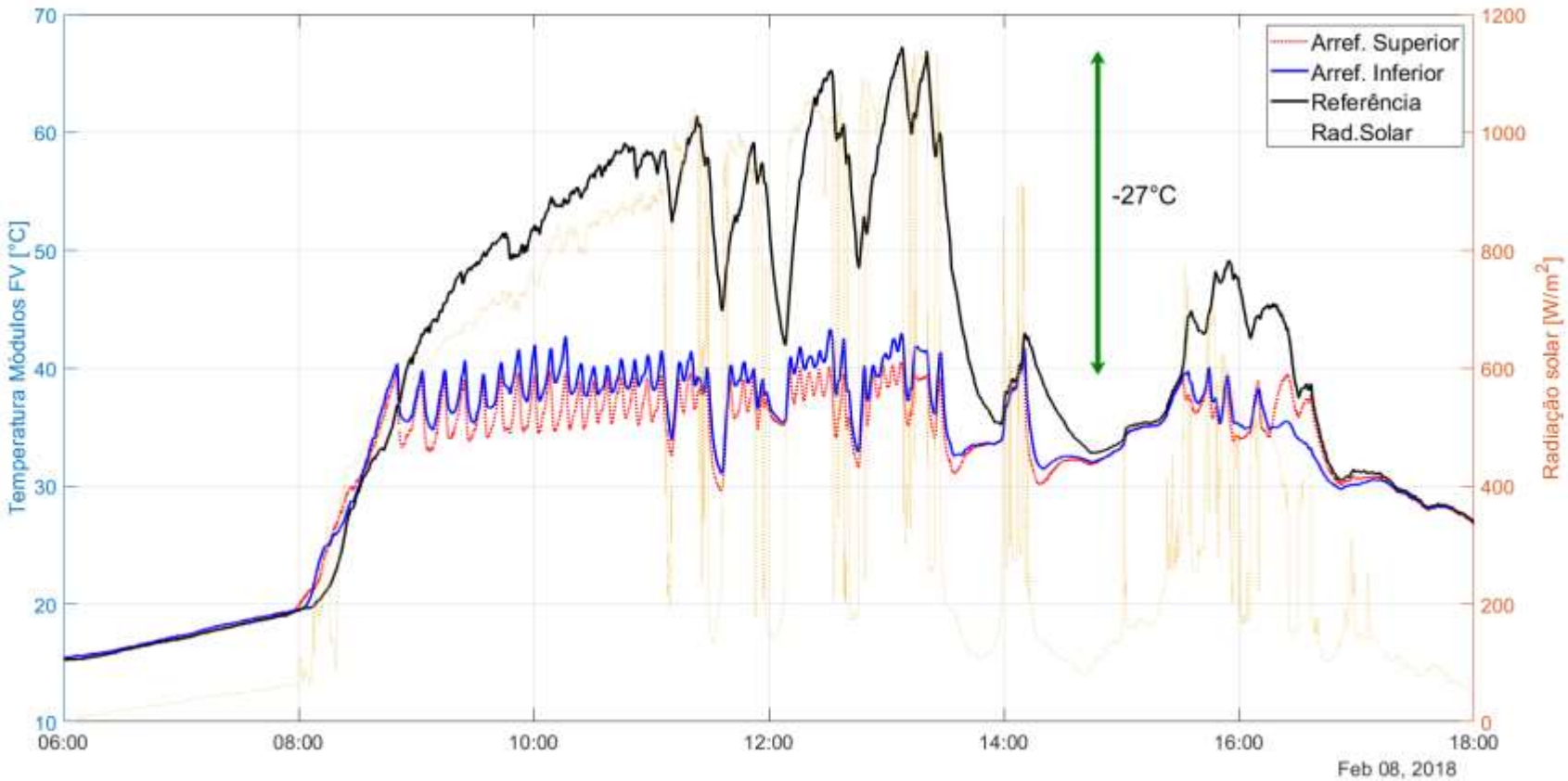
Agenda da Apresentação



- Caracterização do Laboratório Outdoor (LO-USP)
- Características técnicas das grandezas medidas no LO-USP
- Caracterização da Usina Piloto de Volta Redonda (UP-VR)
- Características técnicas das grandezas medidas na UP-VR
- **Análise qualitativa dos dados monitorados**

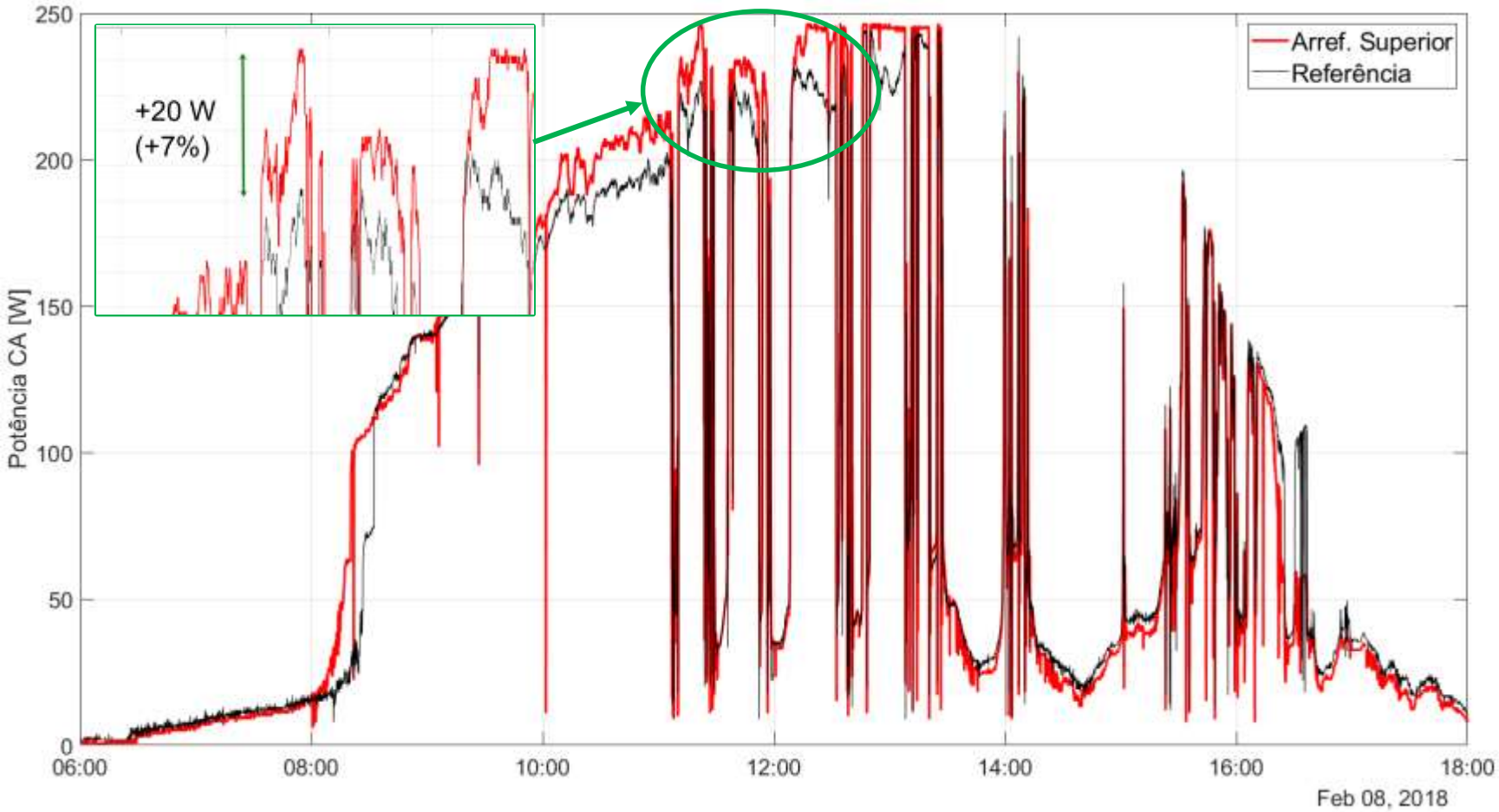
Análise qualitativa dos dados monitorados no LO-USP

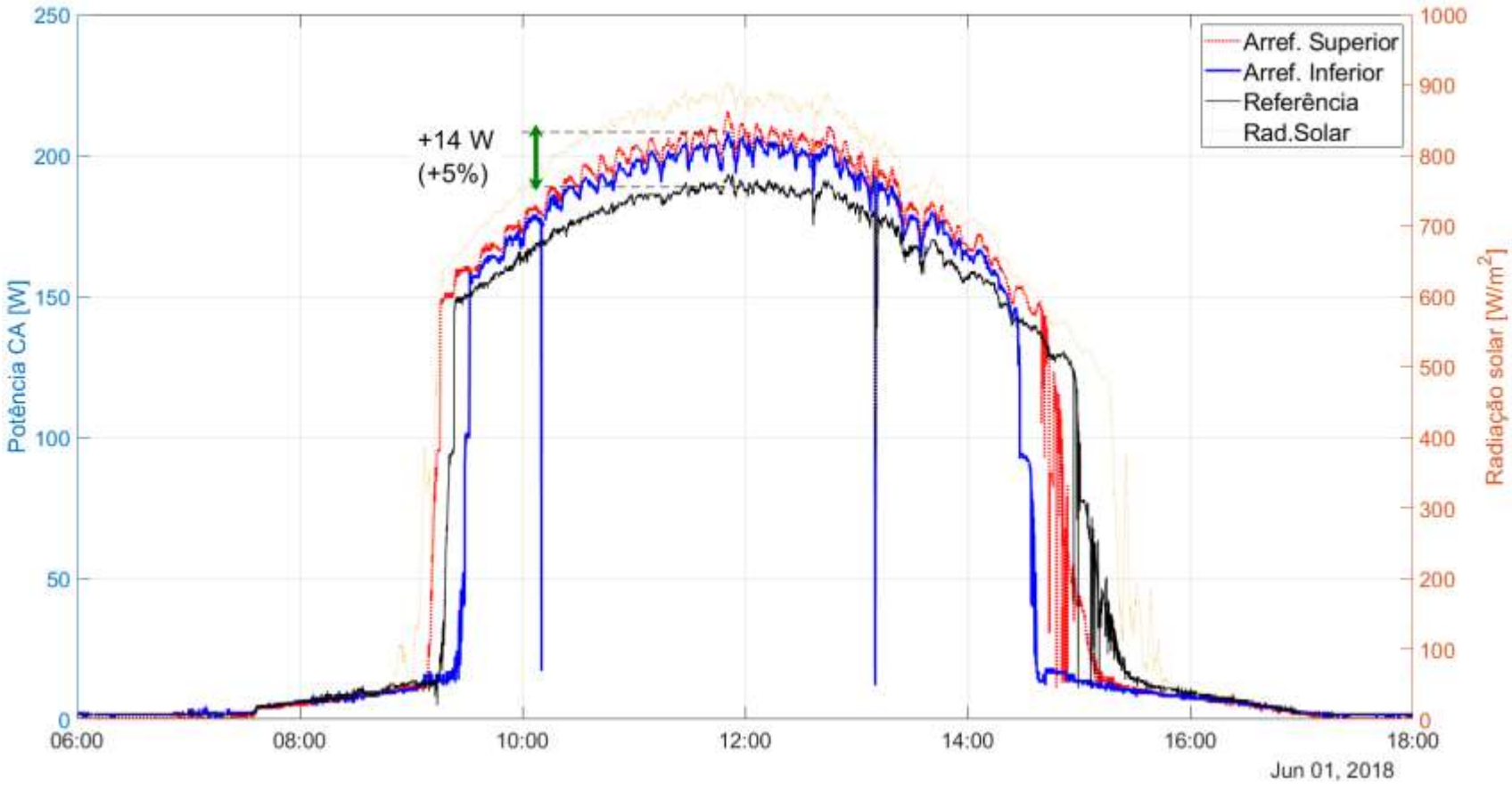
Perfil de temperatura dos módulos FV arrefecidos por lâmina d'água



Análise qualitativa dos dados monitorados no LO-USP

Perfil de potência CA dos módulos FV arrefecidos por lâmina d'água



Análise qualitativa dos dados monitorados – LO-USP

Perfil de potência CA dos módulos FV arrefecidos por lâmina d'água