

Nº 170691

Purificação de silício grau solar rota metalúrgica

João Batista Ferreira Neto

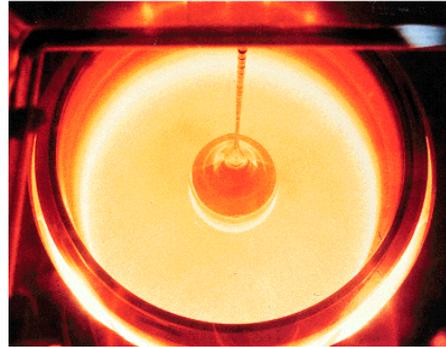
*Slides apresentado no Workshop Inovação
para Estabelecimento do Setor de Energia
Solar Fotovoltaica no Brasil, Campinas, 2012.*

A série "Comunicação Técnica" compreende trabalhos elaborados por técnicos do IPT, apresentados em eventos, publicados em revistas especializadas ou quando seu conteúdo apresentar relevância pública.

Silício Grau Solar – Rota Metalúrgica



From Computer Desktop Encyclopedia
Reproduced with permission.
© 1996 Texas Instruments, Inc.

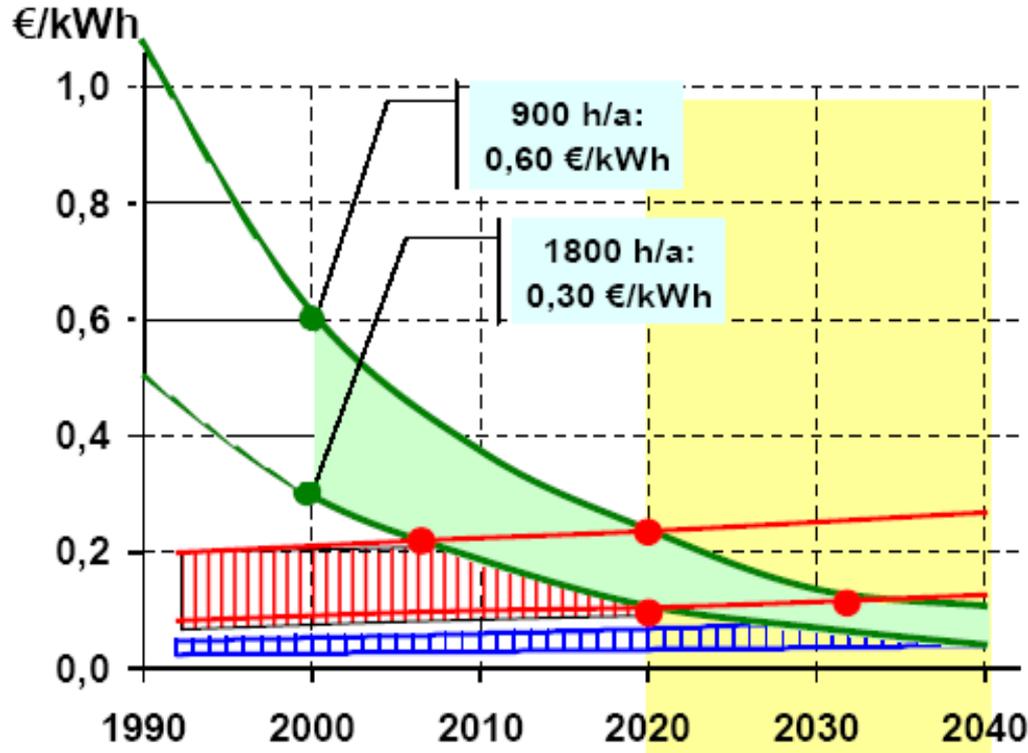


BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL 

CIA FERRO LIGAS MINAS GERAIS – MINASLIGAS 

- **Mercado Energia PV – Foco em Si**
- **Rota Metalúrgica x Rota Química**
- **Projeto FUNTEC IPT/MinasLigas**

Custo energia PV na Europa



Paridade em algumas regiões com elevada radiação solar

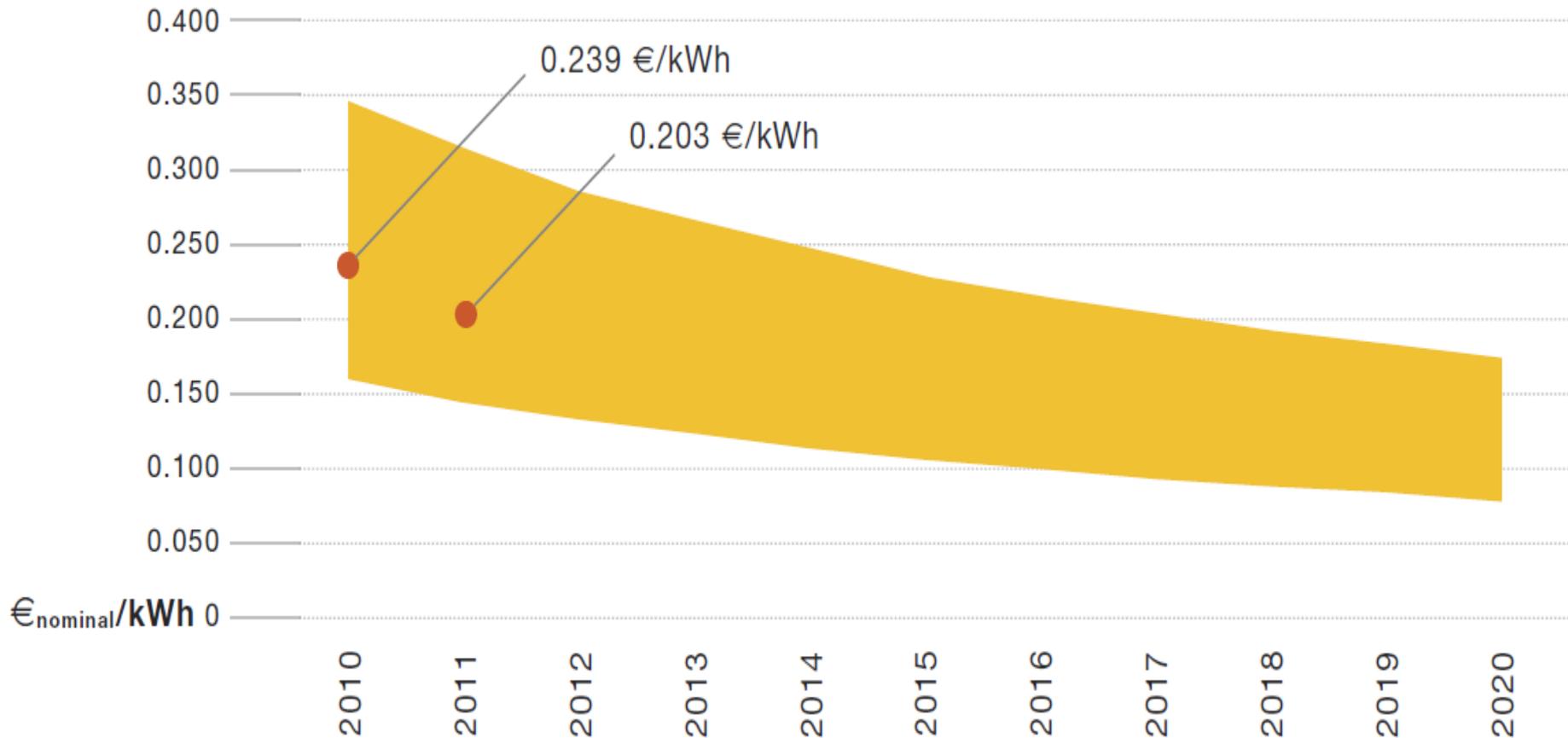
▶ Photovoltaic
 ▶ Utility Peak Cost
 ▶ Bulk Cost

Source: EPIA towards an Effective Industrial Policy for PV.ppt/05.06.2004/Rapp @RWE Schott

Redução de custos

- Desenvolvimento tecnológico (wafer – 150 μm)
- Crescimento do Mercado (incentivos – Tarifa prêmio)

Custo energia PV na Europa



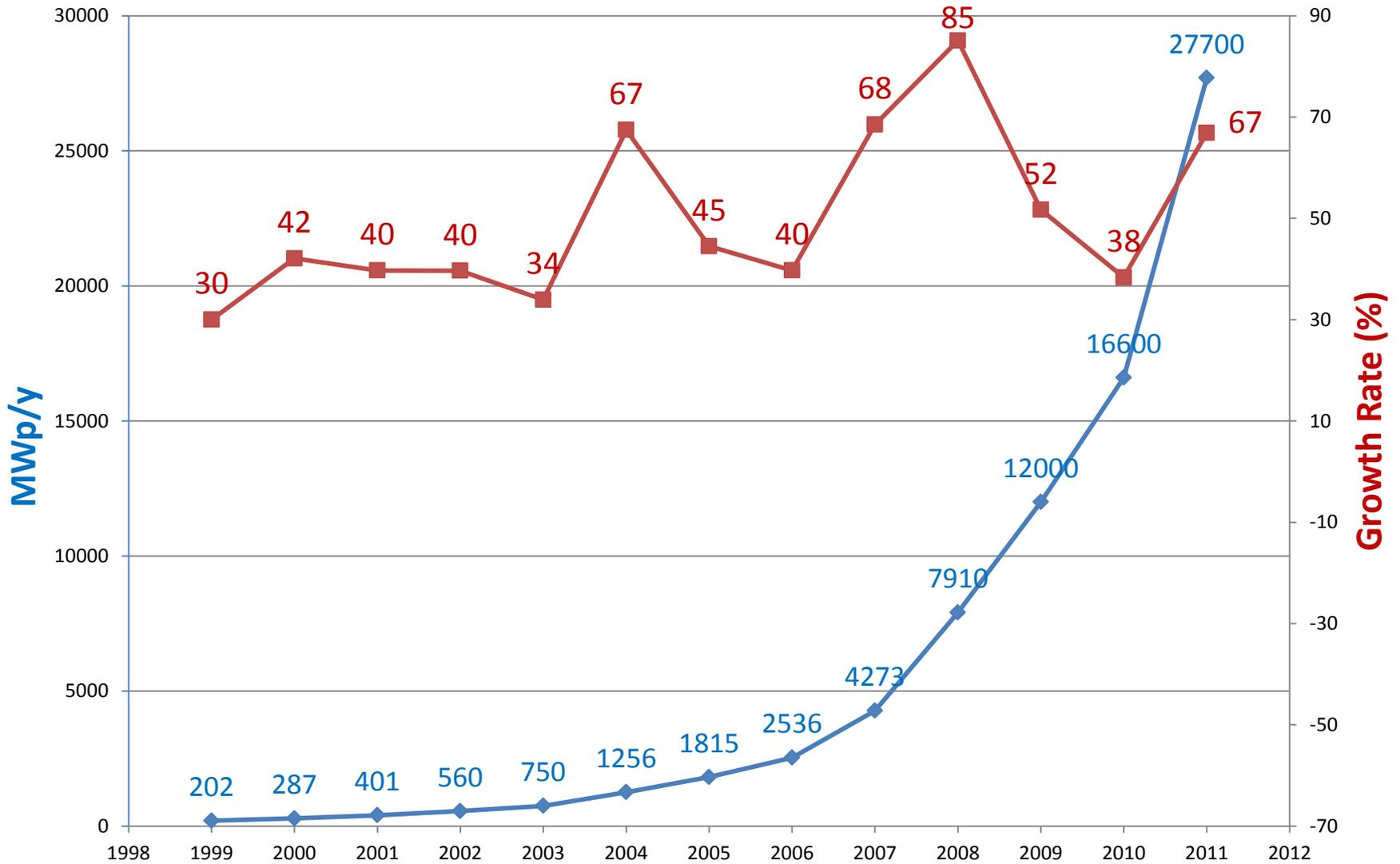
Custos (ref: set 2011): 0,16-0,35 euros/kwh

Previsão 2020: 0,08-0,18 euros/kwh

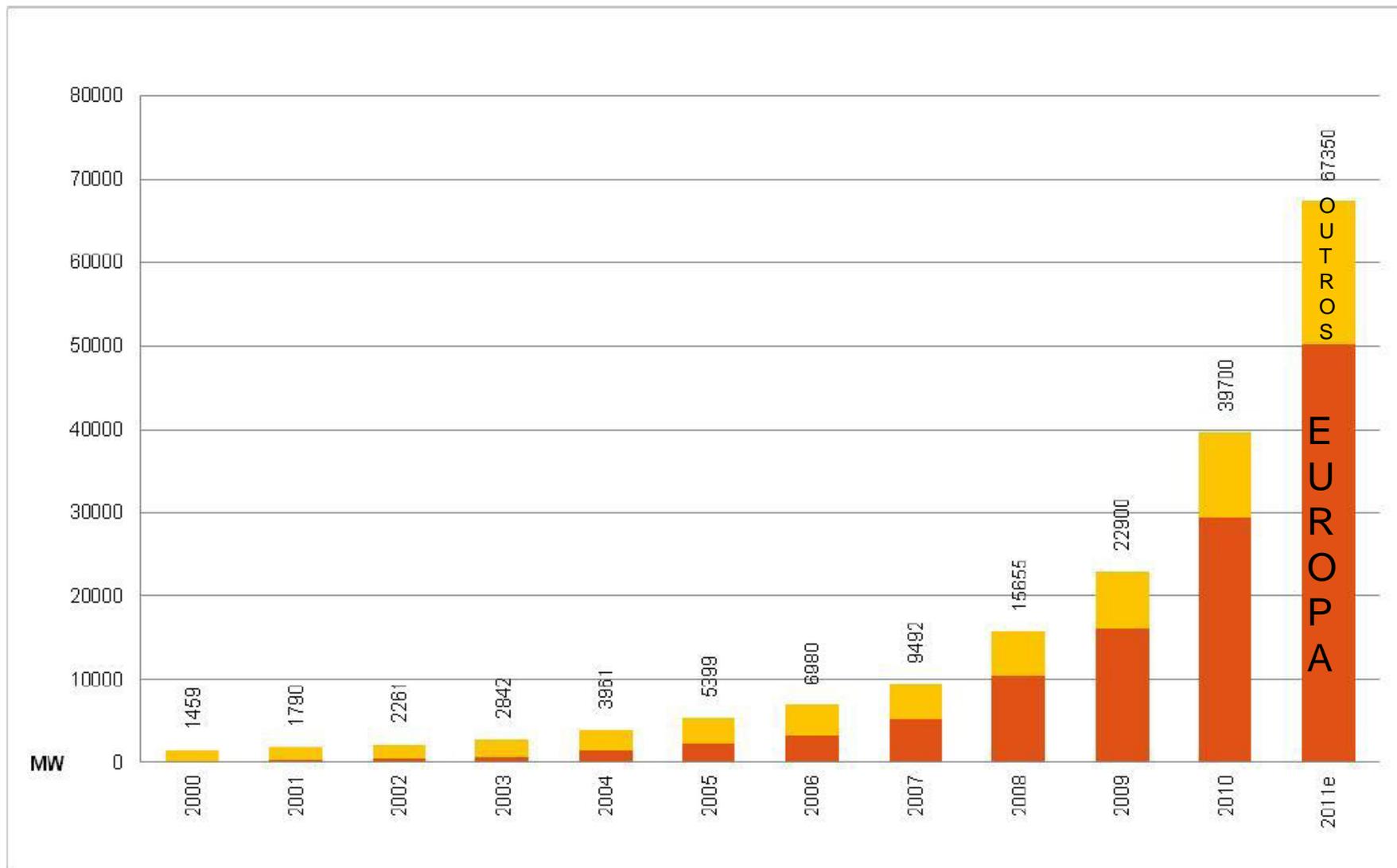
Tempo de vida de sistema PV de 25 para 35 anos

Paridade atingida na Itália em 2013/2014

World PV growth (1999 – 2011)



Evolução capacidade instalada



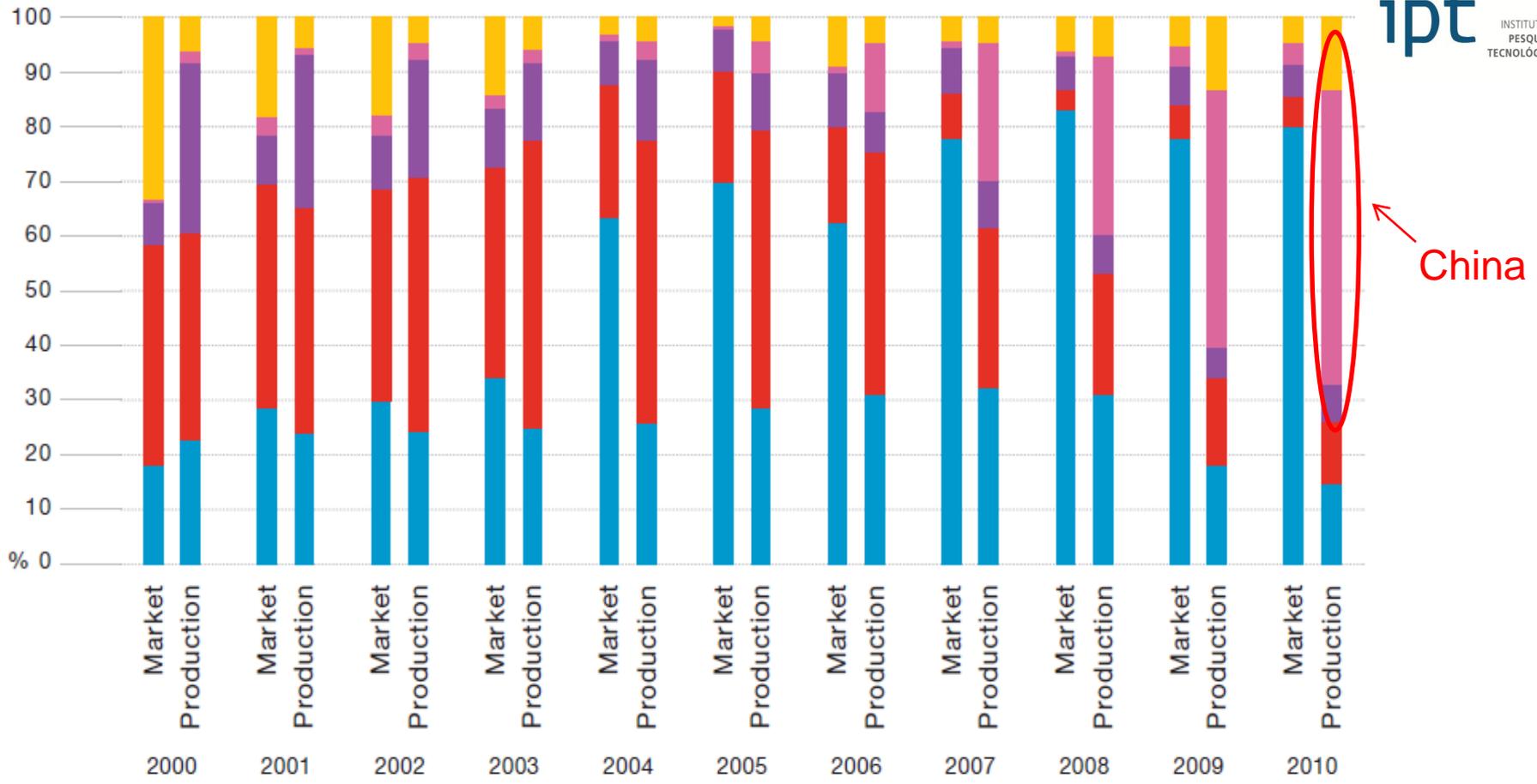
Fonte: European Photovoltaic Industry Association

Country	2011 Newly connected capacity (MW)	2011 Cumulative installed capacity (MW)
1 Italy	9,000	12,500
2 Germany	7,500	24,700
3 China	2,000	2,900
4 USA	1,600	4,200
5 France	1,500	2,500
6 Japan	1,100	4,700
7 Australia	700	1,200
8 United Kingdom	700	750
9 Belgium	550	1,500
10 Spain	400	4,200
11 Greece	350	550
Slovakia	350	500
13 Canada	300	500
India	300	450
15 Ukraine	140	140
Rest of the World	1,160	6,060
Total	27,650	67,350

Capacidade geração 80 bilhões kWh (equivalente 20 milhões residências)

21 GW - Europa

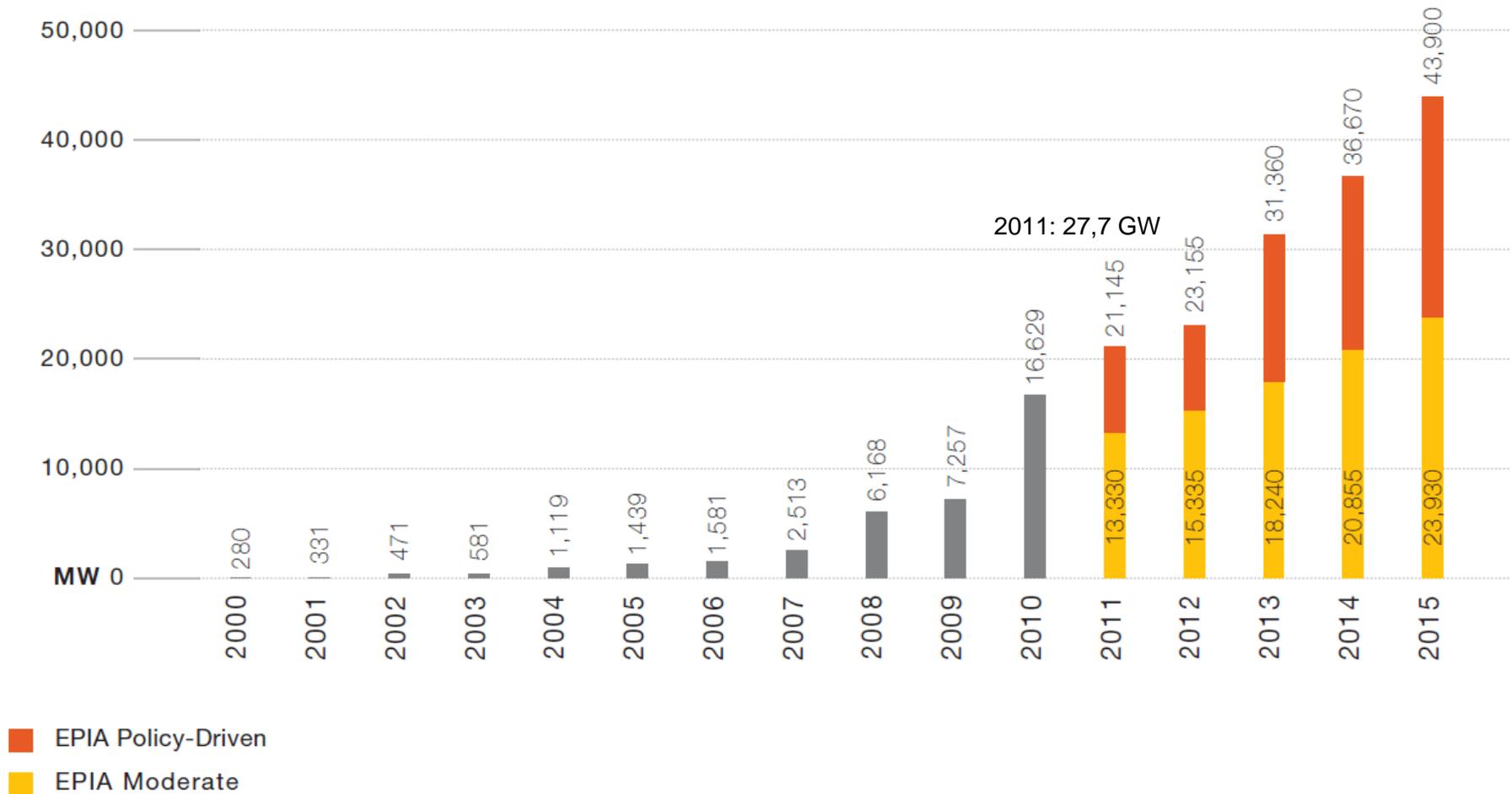
Fonte: European Photovoltaic Industry Association



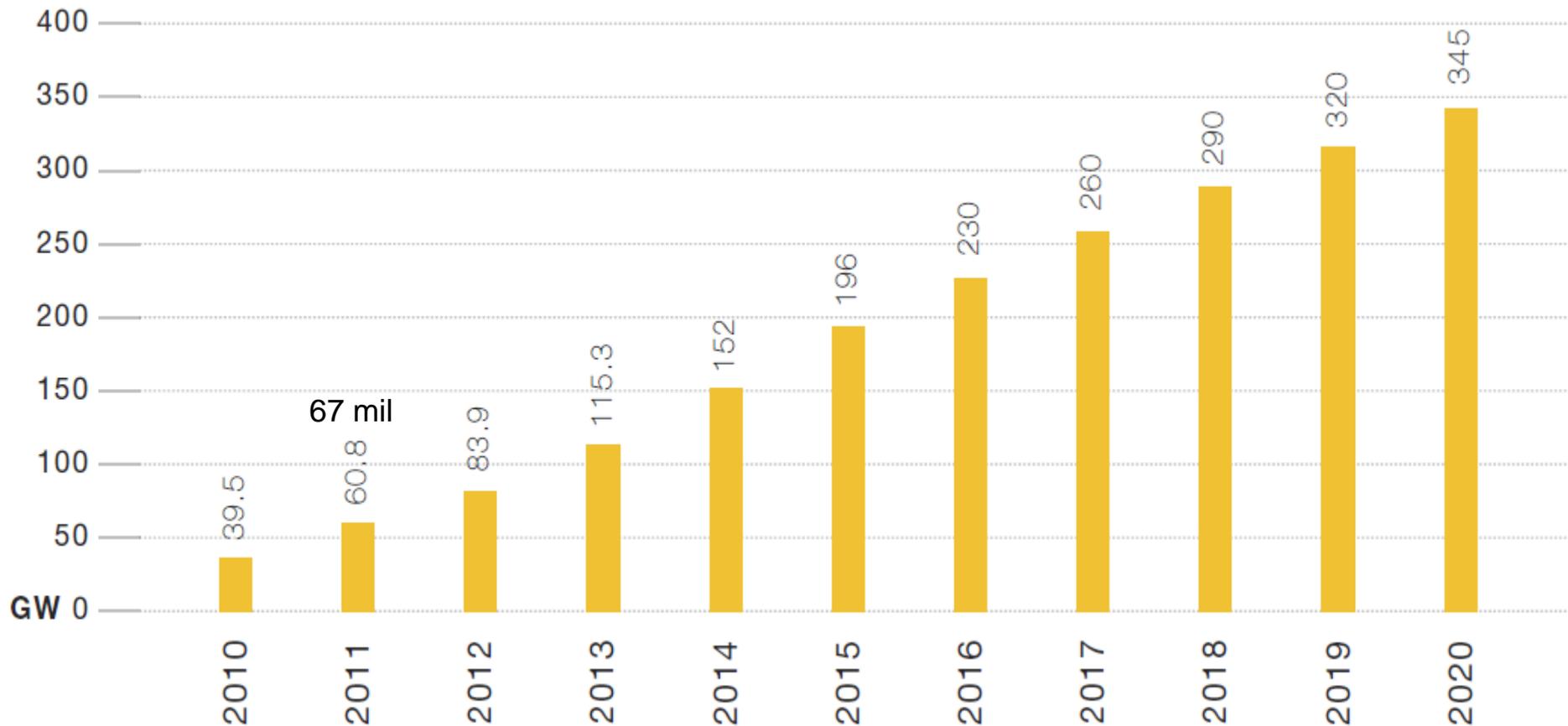
China ainda modesta em instalações, mas grande em produção

Figure 31 - Market vs production

Previsão crescimento produção anual até 2015



Previsão crescimento capacidade instalada acumulada até 2020



Evolução do preço por W dos módulos na Europa

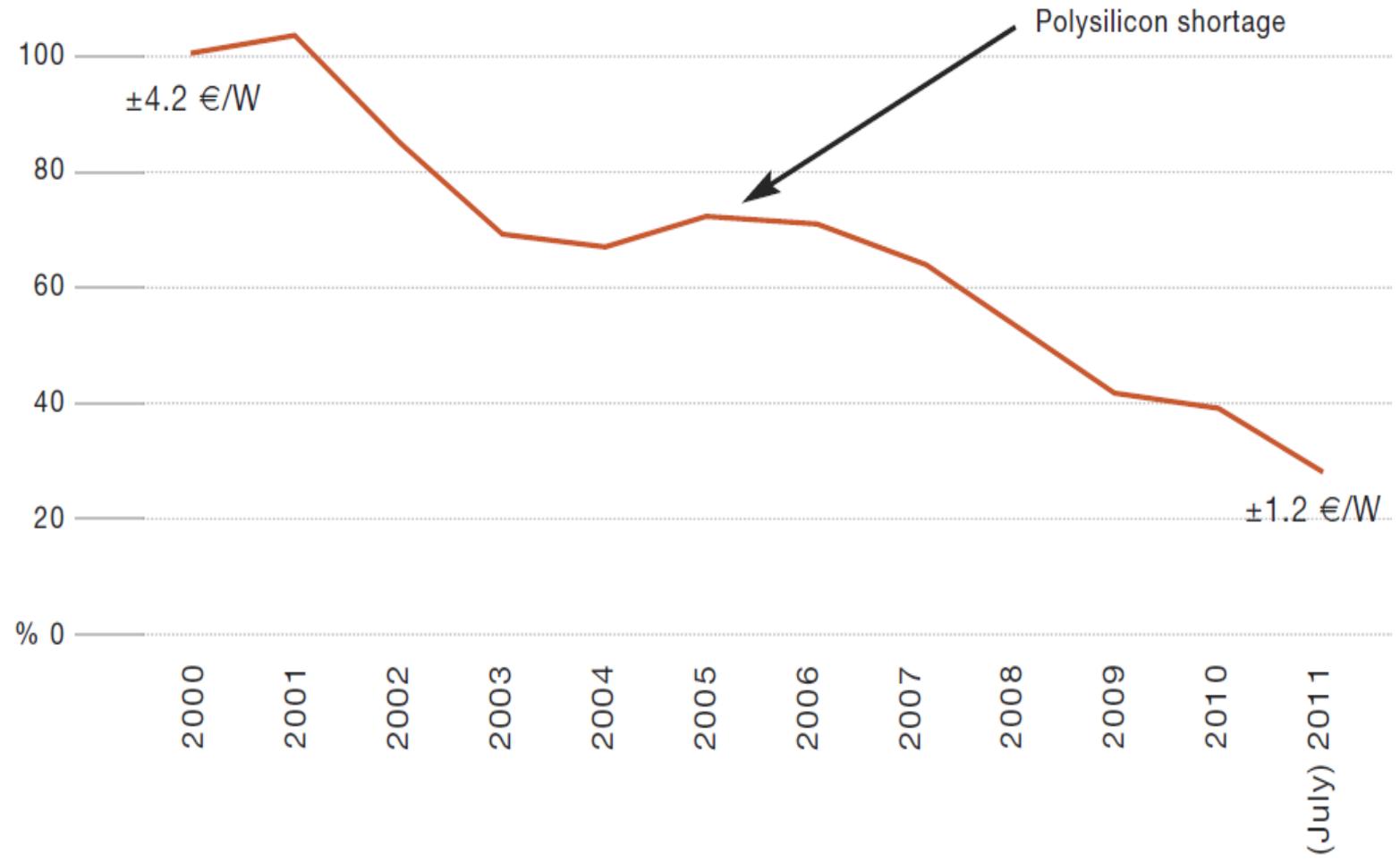
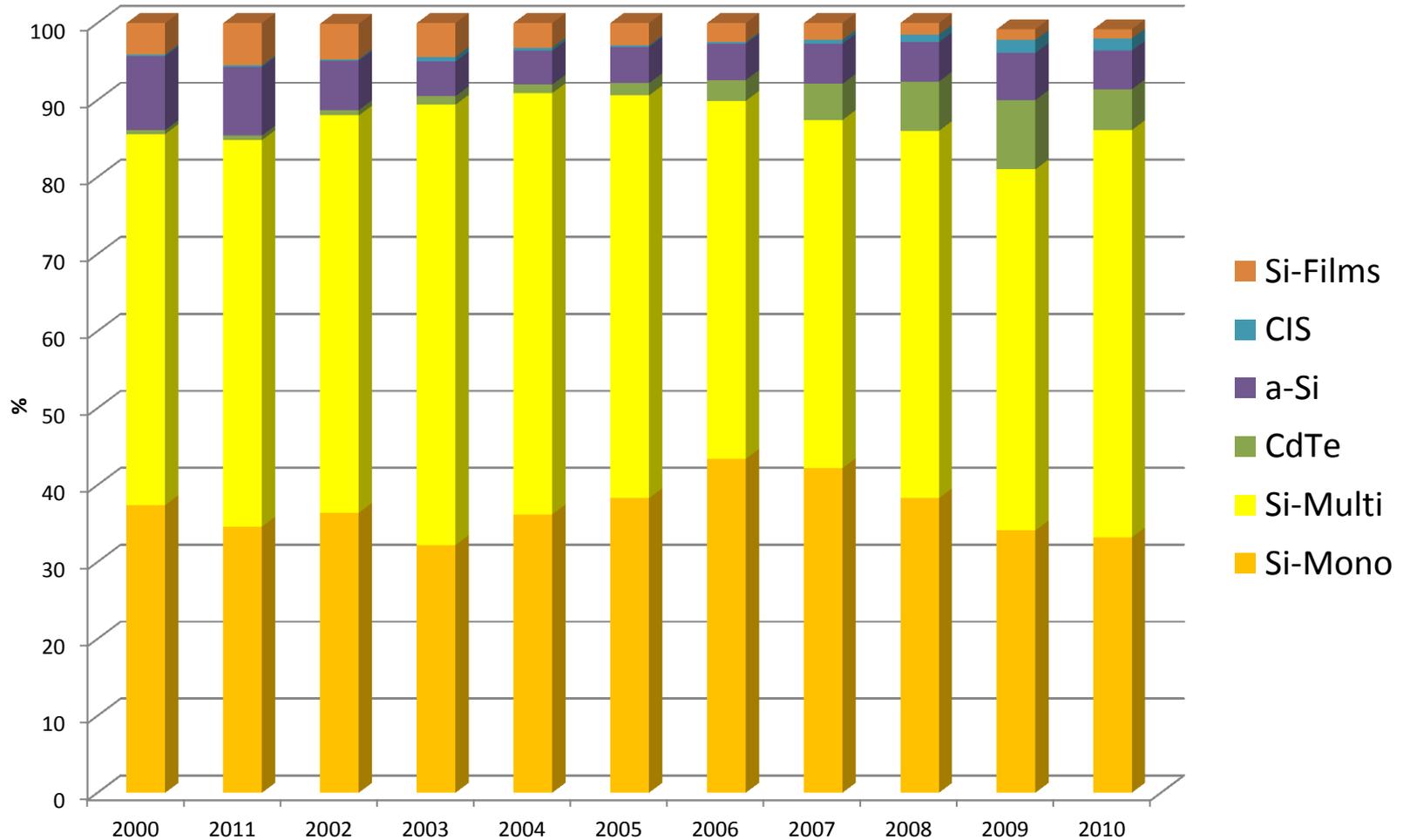


Figure 3 - Evolution of the average PV module price in Europe

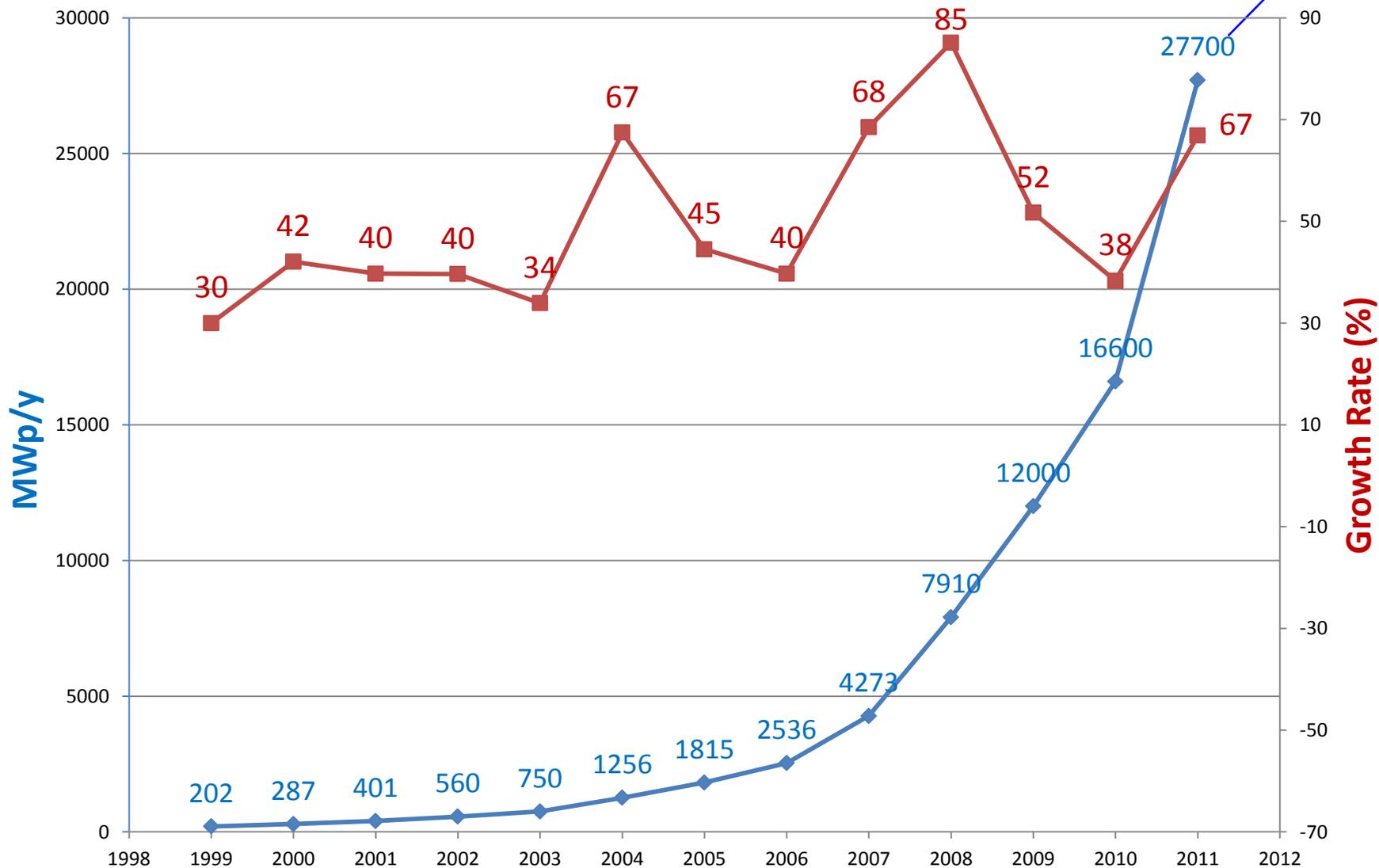
~ 85% das células fabricadas com Si cristalino



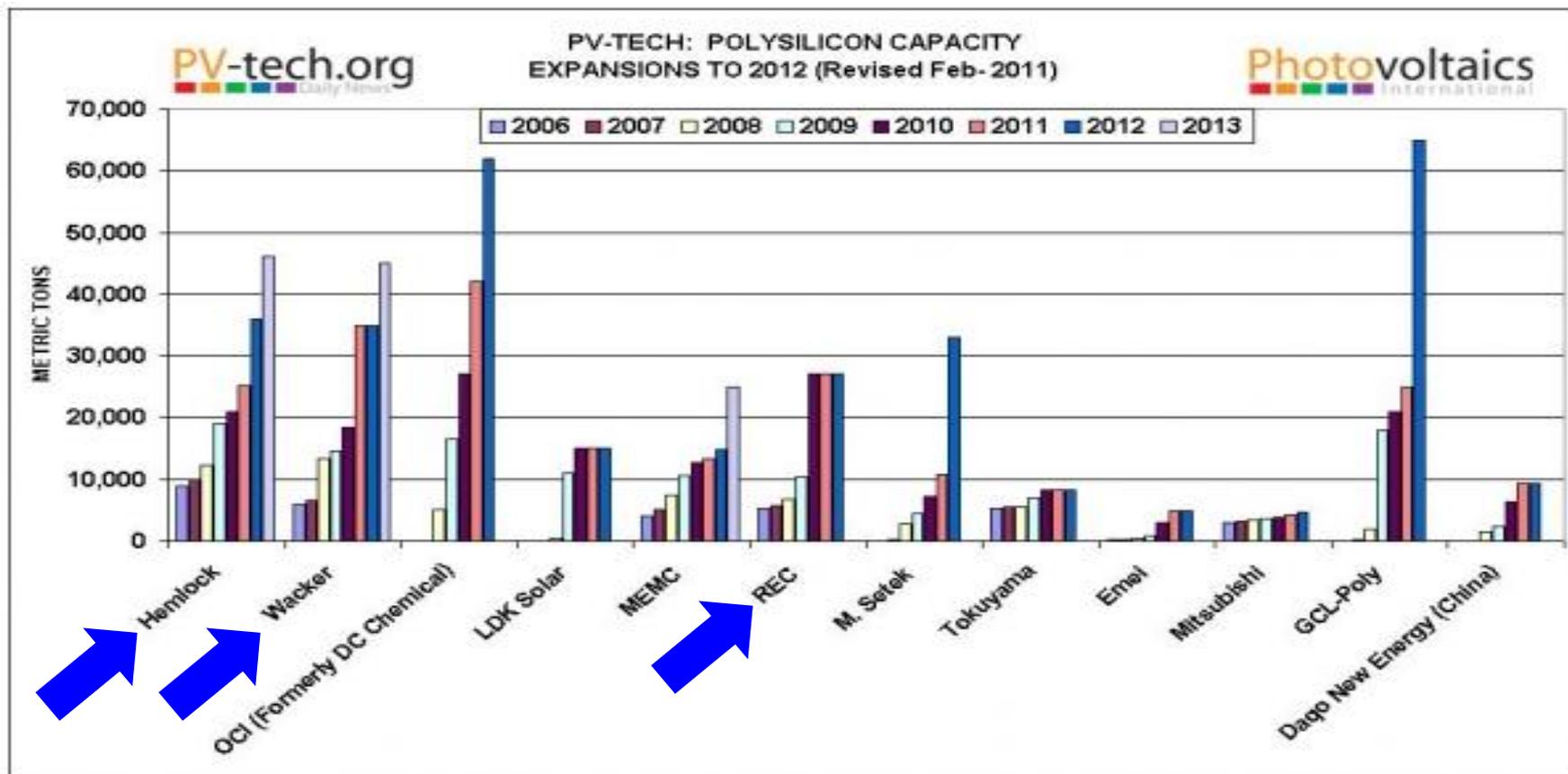
World PV growth (1999 – 2011)

Capacidade produção Si GM Brasil ~200 mil t

~270 mil t Si



Principais produtores Poly - Si Rota Química



Hemlock- JV between Shin-Etsu Handotai, Dow Corning and Mitsubishi.

Wacker – Conglomerado Indústrias Químicas – Alemanha

REC – Noruega (tem plantas nos USA). Expandindo para Singapura

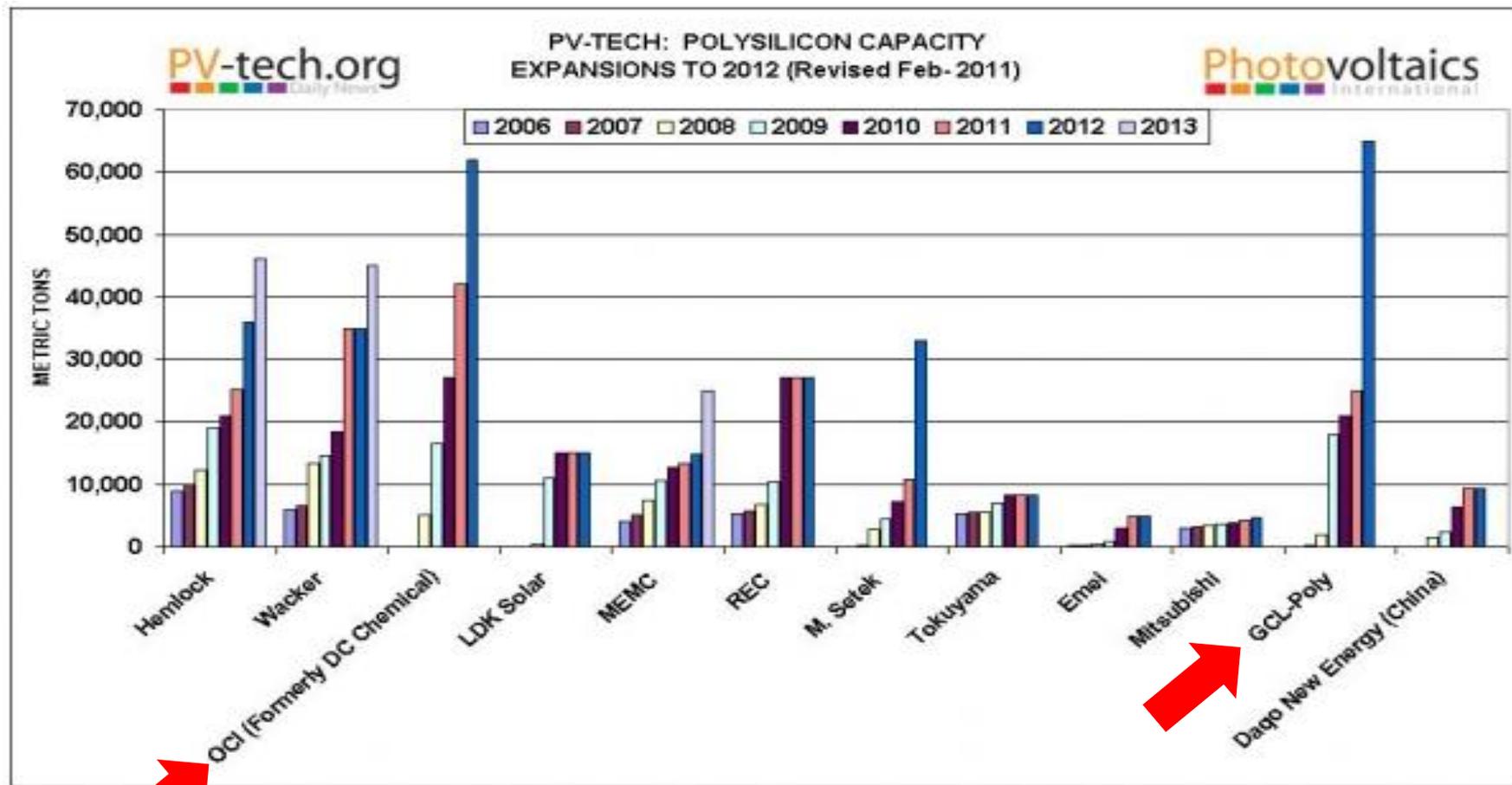
Oversupply em 2011/2012 – Novas plantas após shortage 2008.

+ 20% que o mercado pode absorver no momento

Forte queda dos preços (de ~US\$ 50/kg para ~ US\$ 30/kg)

Expectativa que com a produção atingindo níveis maiores que 30 GW o excesso de oferta seja revertido e mercado se estabilize novamente

Principais produtores Poly - Si Rota Química

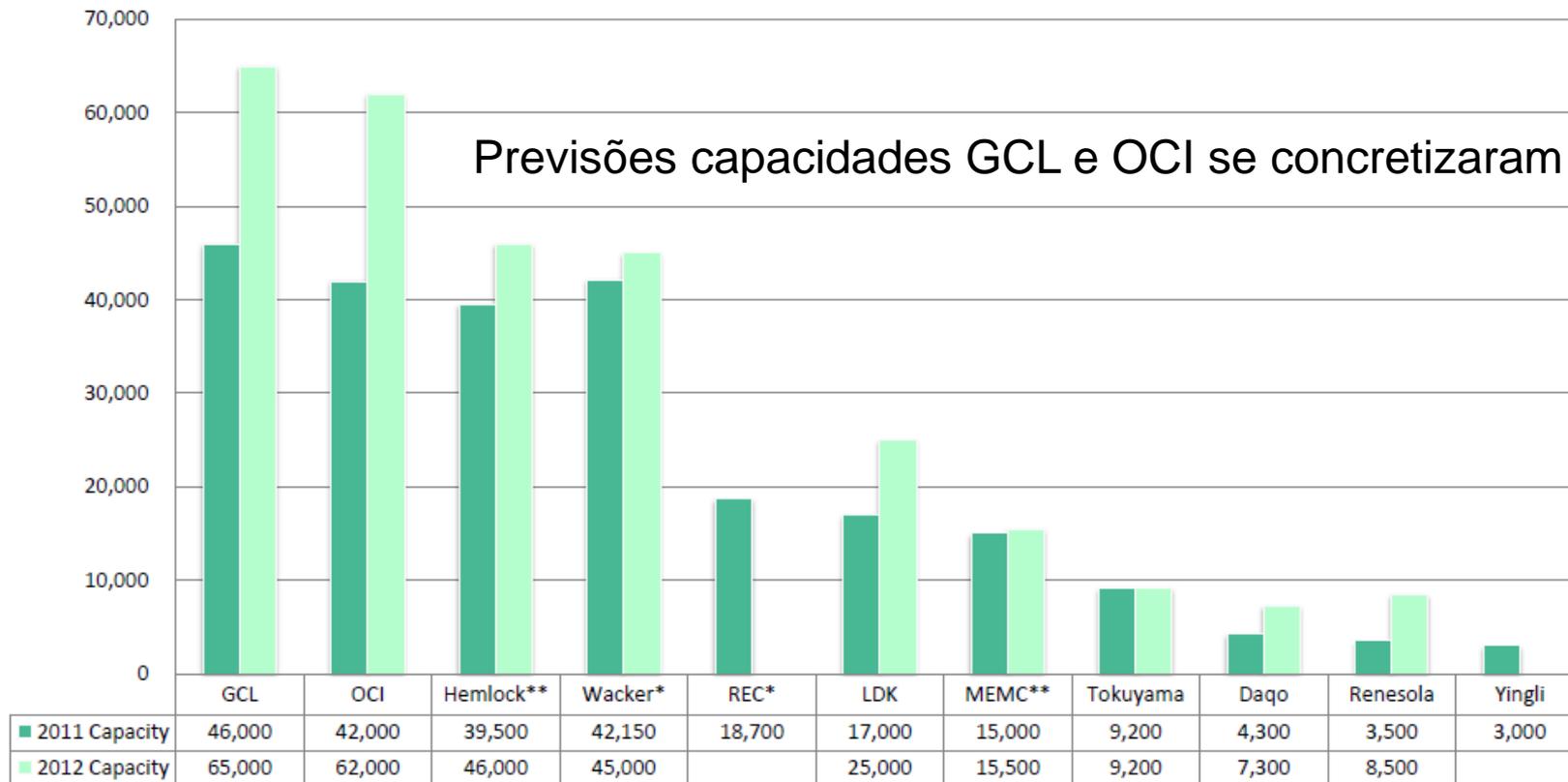


OCI – Indústria Coreana (3 anos) – pretendia ser a N°1: 62.000 t em 2012

GCL – China (de zero em 2008 a um dos maiores produtores em 2010)



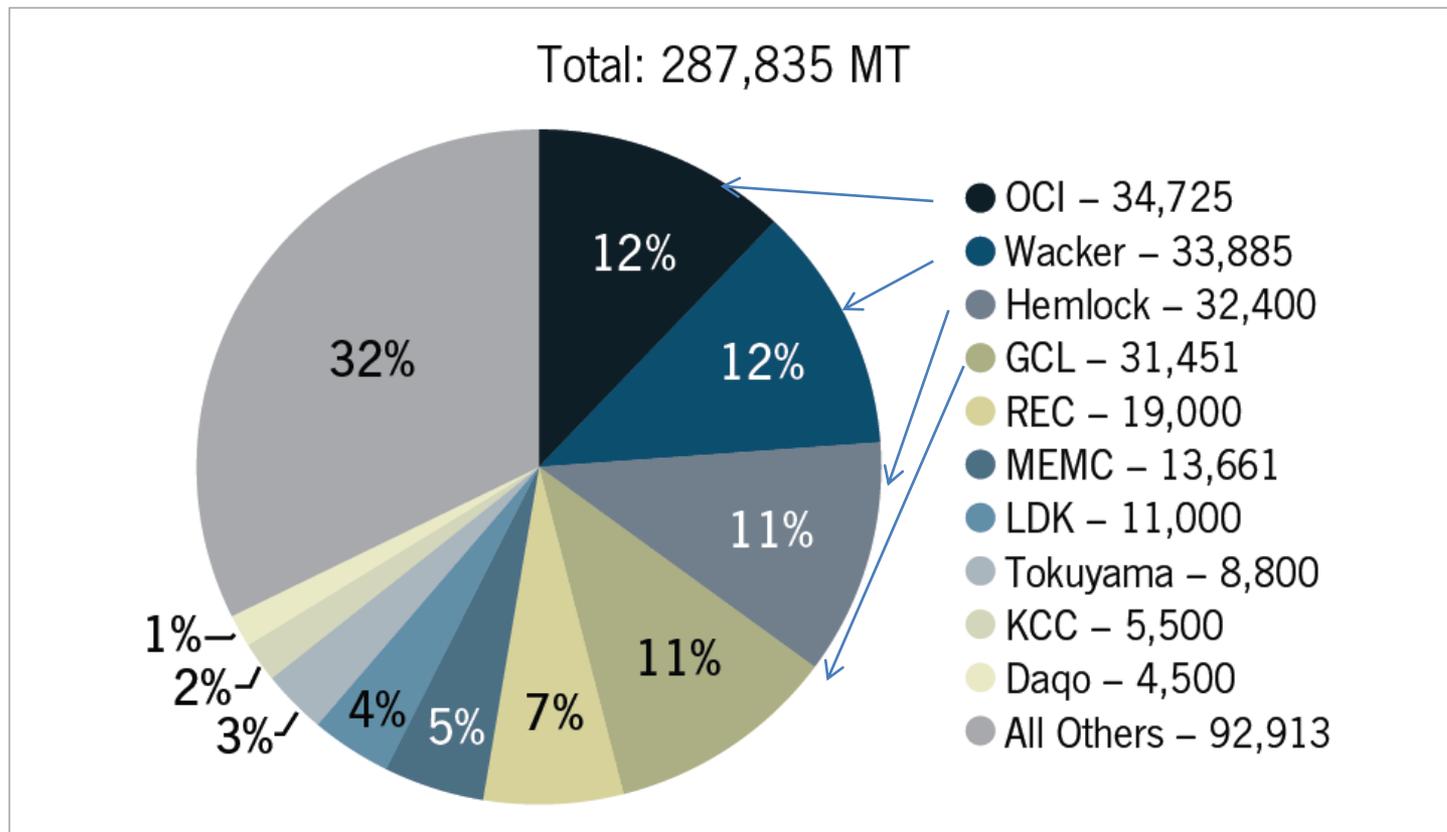
2011/2012 Polysilicon Capacity (MT)



Note(*) - Expected Production for Wacker & REC; (**) - The above information are obtained from the above companies' announced data except Hemlock & MEMC whose data come from analysts' estimates. Source: Company estimates

Principais produtores Poly - Si Rota Química

Produção efetiva 2011 Si Poly



Silício como matéria prima para a indústria PV

Até ~1990 – Sucata de produção SiGE (silício grau eletrônico)

Forte crescimento da demanda (demanda > oferta de sucata SiGE):
Necessidade de fonte independente da sucata de SiGE

Rotas alternativas de obtenção de SiGS

- Rota Química Simplificada/Modificada (Siemens-C) (usada produção SiGE)
- Rota Metalúrgica Alternativa

Nível impurezas: Metálicos < 3 ppm e B + P < 2 ppm

SiGM ~ US\$ 2-3/kg

X

SGS ~ US\$ 30/kg (já chegou a US\$ 60-70/kg)

Cadeia de Valor energia Fotovoltaica (Rota Química)



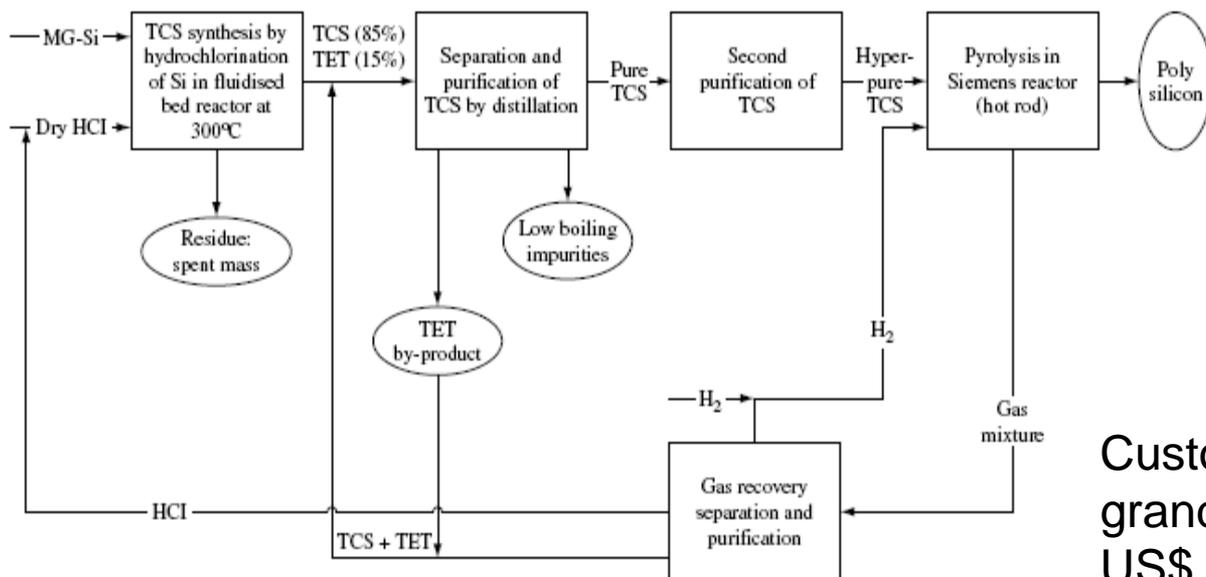
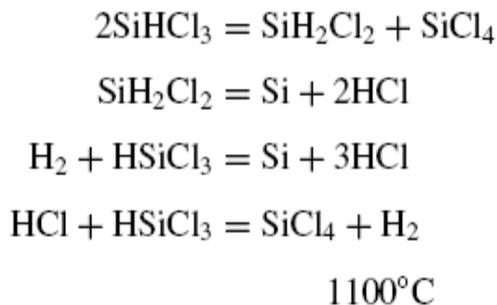
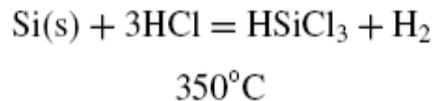
Cadeia de Valor (Rota Química)



Rota metalúrgica



Semicondutor e Solar



MG-Si: Metallurgical Grade Silicon
 TCS: Trichlorosilane
 TET: Tetrachlorosilane

Figure 5.2 Schematic representation of the Siemens process

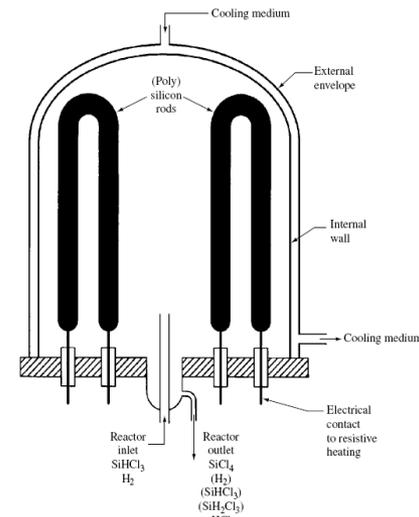


Figure 5.3 Schematic representation of the traditional Siemens reactor

120-160 kWh/kg

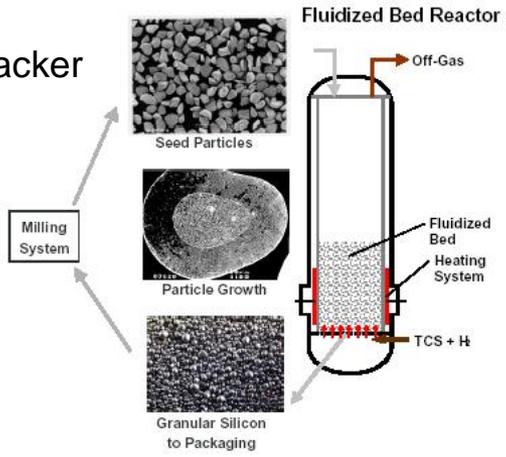
Custo de produção (plantas grandes):
 US\$ 22 – 28/kg

Planta química tradicional:
 100 milhões euros
 Capacidade: 1.300 t/ano

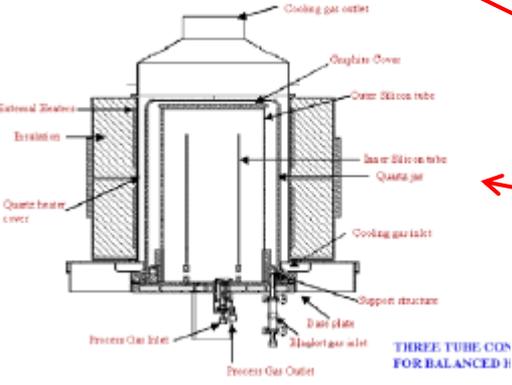
Rota Química Simplificada/Modificada (Siemens-C)

Melhorias no FBR

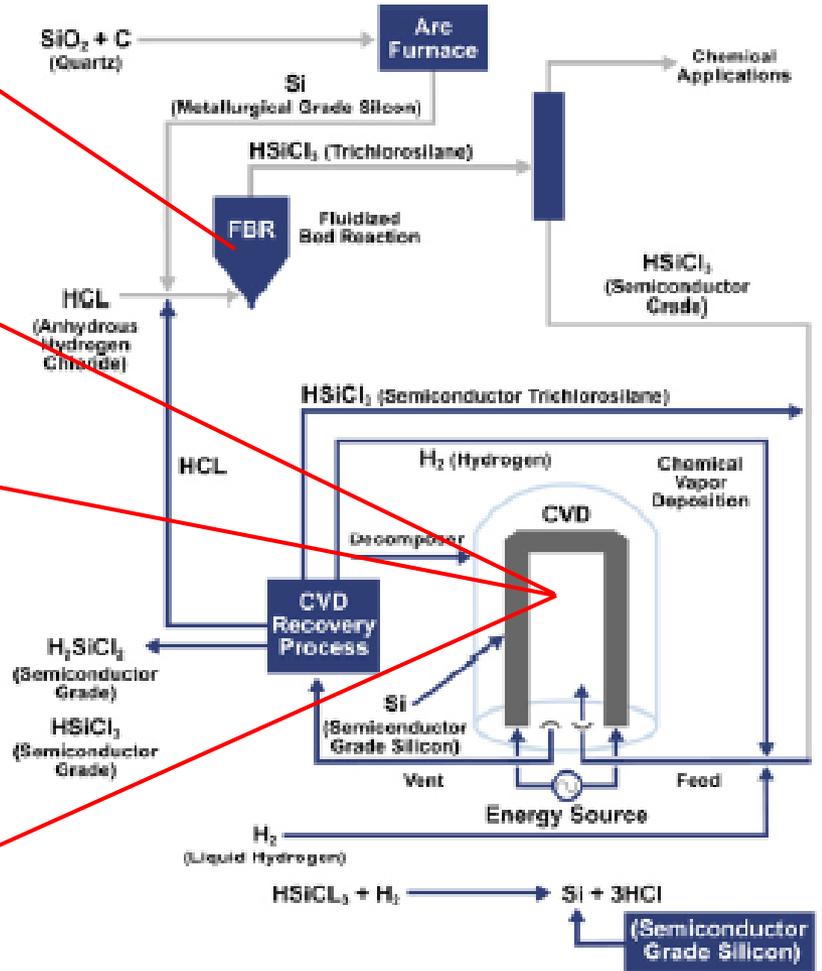
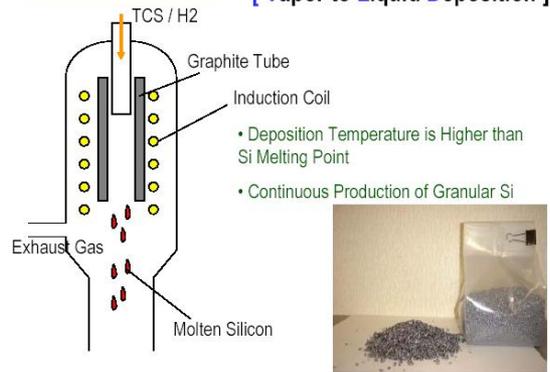
Wacker



Reator de leito fluidizado
Consumo 70-90 kWh/kg



Tokuyama VLD Method [Vapor to Liquid Deposition]



Produção Silício Grau Metalúrgico

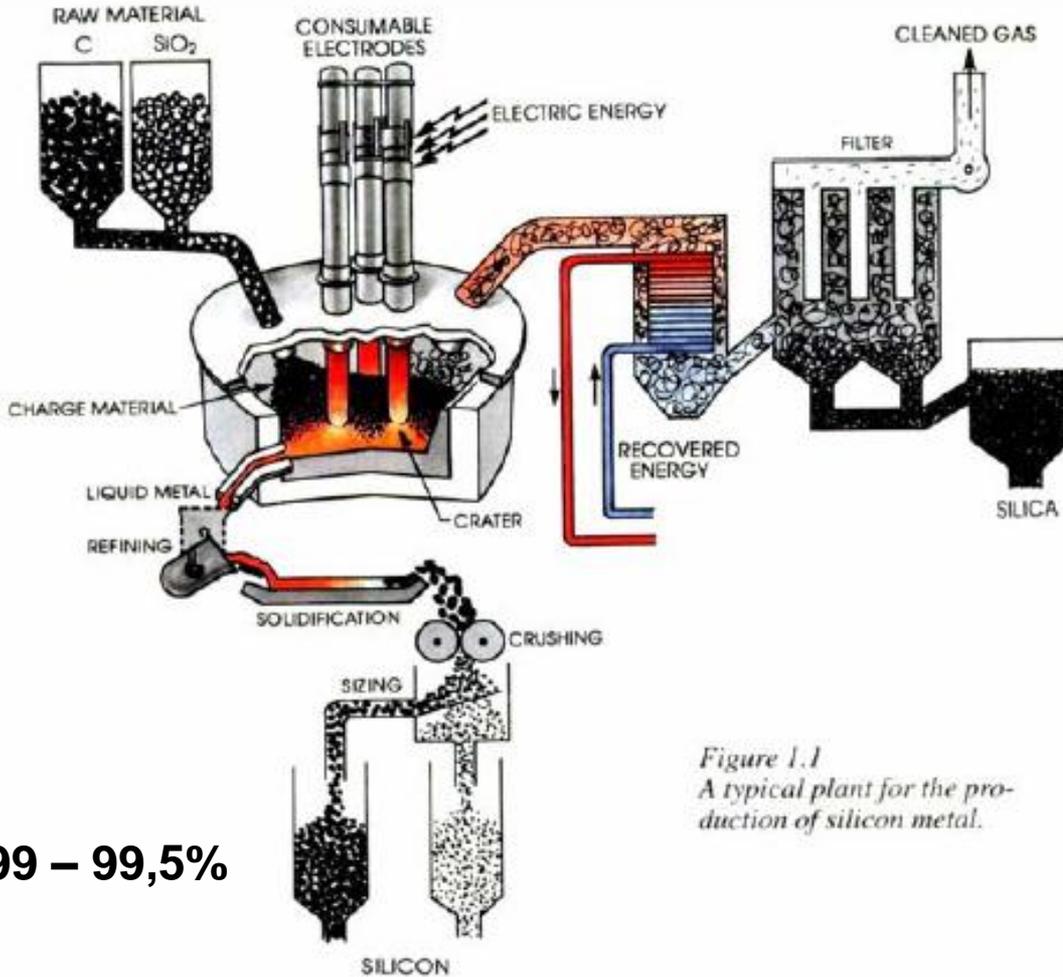


Figure 1.1
A typical plant for the production of silicon metal.

SiGM: 99 – 99,5%

Produção atual de SiGS pela Rota Metalúrgica

Destaque para duas empresas:

- **Elkem Solar - Noruega (capacidade 5.000 t/y)**
- **CaliSolar/6N – Canadá (capacidade objetivada 6.000 t/y)**

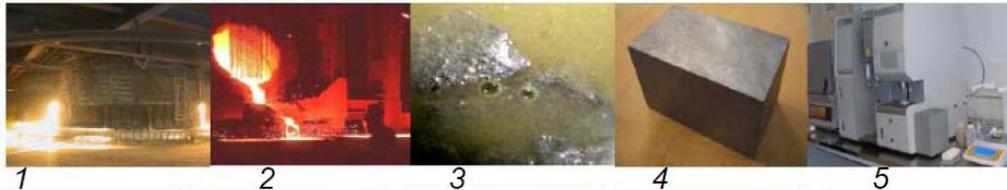


Elkem Solar (Rota Metalúrgica):

- Capacidade da planta: 5.000 t/y
- Investimento ~ 0,5 US\$ bilhão
- P&D + 15 anos
- Start up: 2009



US\$ 2 Bilhões



	Produção (t)
1º tri 10	400
2º tri 10	348
3º tri 10	598
4º tri 10	Expect. crescim.

η_{Si} do processo = 50 a 70%

Cons. energia = 40 kwh/kg (inclui prod Si)
(menor geração GEE – 22% do Siemens)

Eficiência ~ 16%

CaliSolar/6N (Rota Metalúrgica) Canadá (Ontário)

- Capacidade da planta objetivada: 6.000 t/y

- Início produção: 2008

- **Produção 400 t em 2010**

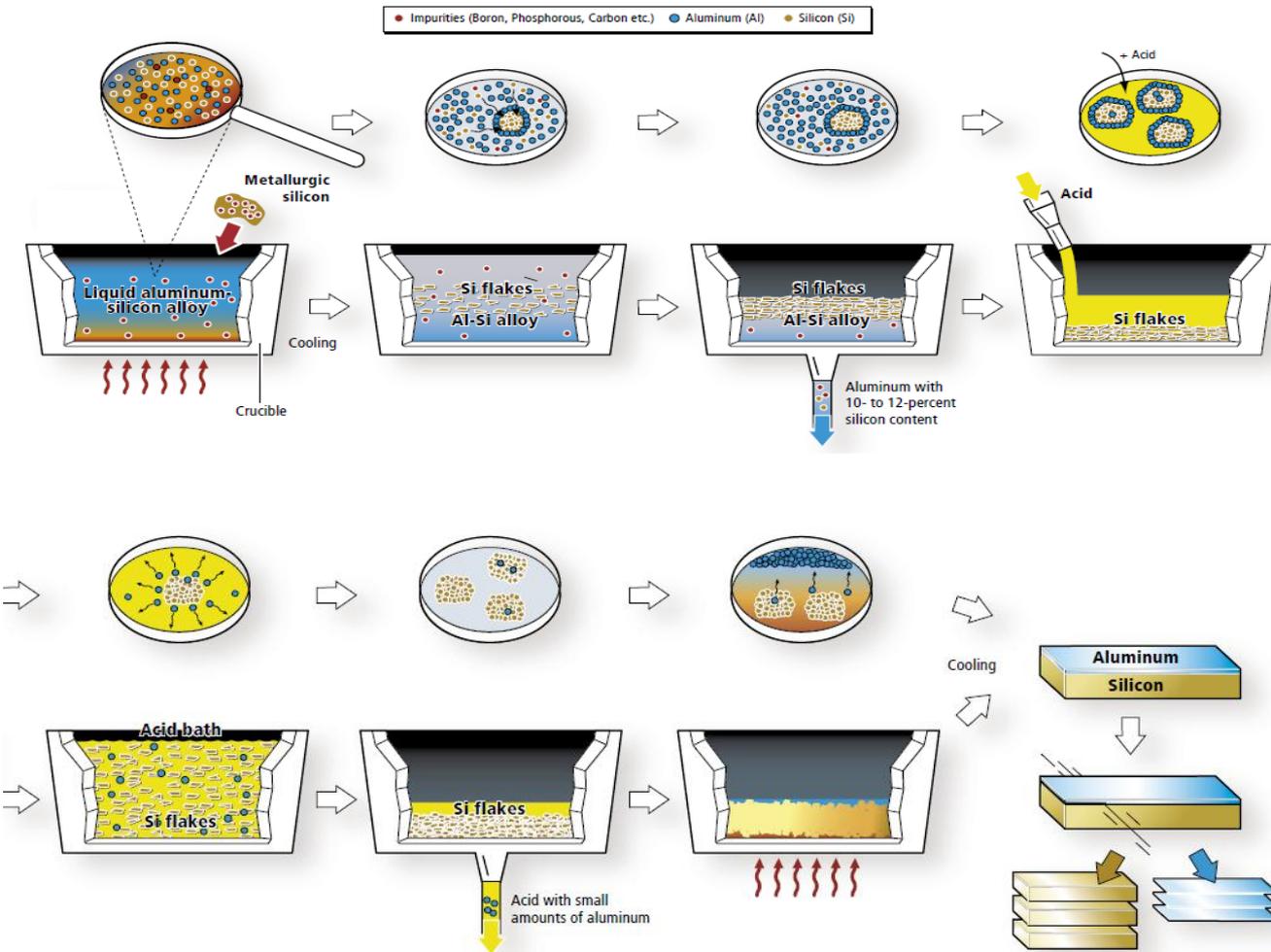
- Expansões na produção: 1300 t (Set/2011) e 2300 t em 2012.

- Alguns consumidores ainda estariam misturando o Si com o Si Poly

- Custo de produção: ½ do Siemens

- Consumo energia < 24 kwh/kg

- 16,5% eficiência



Situação Atual

CaliSolar/6N (Rota Metalúrgica)

Plano de construção de plantas nos USA e Canadá (Michigan, Califórnia e Ontário) postergado por conta do oversupply e baixos preços

Acordo com Suntech (China) para ser supridor de Si

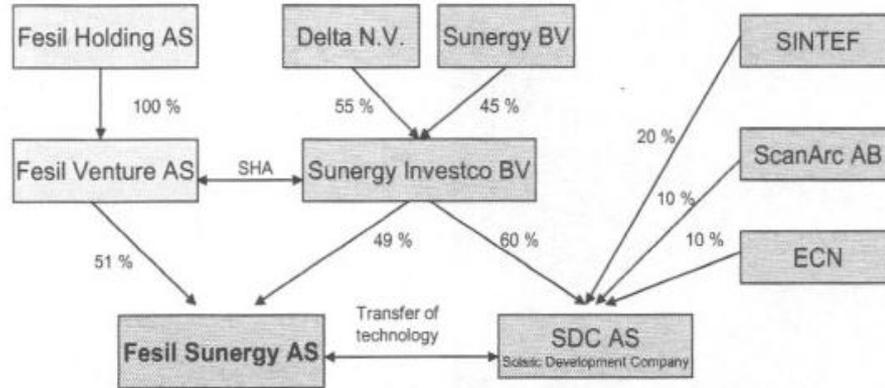
Elkem (Rota Metalúrgica)

Redução nível produção devido ao excesso de oferta

Outras iniciativas:

-Processo SOLSIC (FeSil – Noruega)

Redução carbotérmica de fonte de SiO₂ pura (fonte C alta pureza)



- Globe Specialty Metals

SOLSIL - Planta capaz de produzir 360 t/ano (2010)

- Dow Corning

Planta capacidade 3000 t

silício PV 1101 – Blend 10% SiPV 1101 + 90%Si poly

PV 1201 e 1301 em estudo (25% SiPV 1101 e 75% Poly)

Produção interrompida pela redução demanda em 2009

- Grupo Ferro Atlântica

Rotas alternativas de produção de SiGS

Química

X

Metalúrgica

- Desafio econômico. Processo já conhecido (Siemens) - permite atingir pureza – SiGE.

- Quem domina produção SiGE leva vantagem nesta rota (não é o caso do Brasil)

- Indústria Química com operações complexas (tecnologia totalmente nova para os produtores de silício nacionais)

- Difícil dissociar a tecnologia SiGS do SiGE

- Desafio técnico: atingir pureza necessária (operações da baixo custo)

- A técnica não está totalmente dominada – (Igualdade de condições para competir)

- Operações unitárias próximas do que é conhecido na indústria metalúrgica (SiGM): Fusão, solidificação controlada, refino piro. + fácil adaptação (não há indústria fabricante SiGE no Brasil)

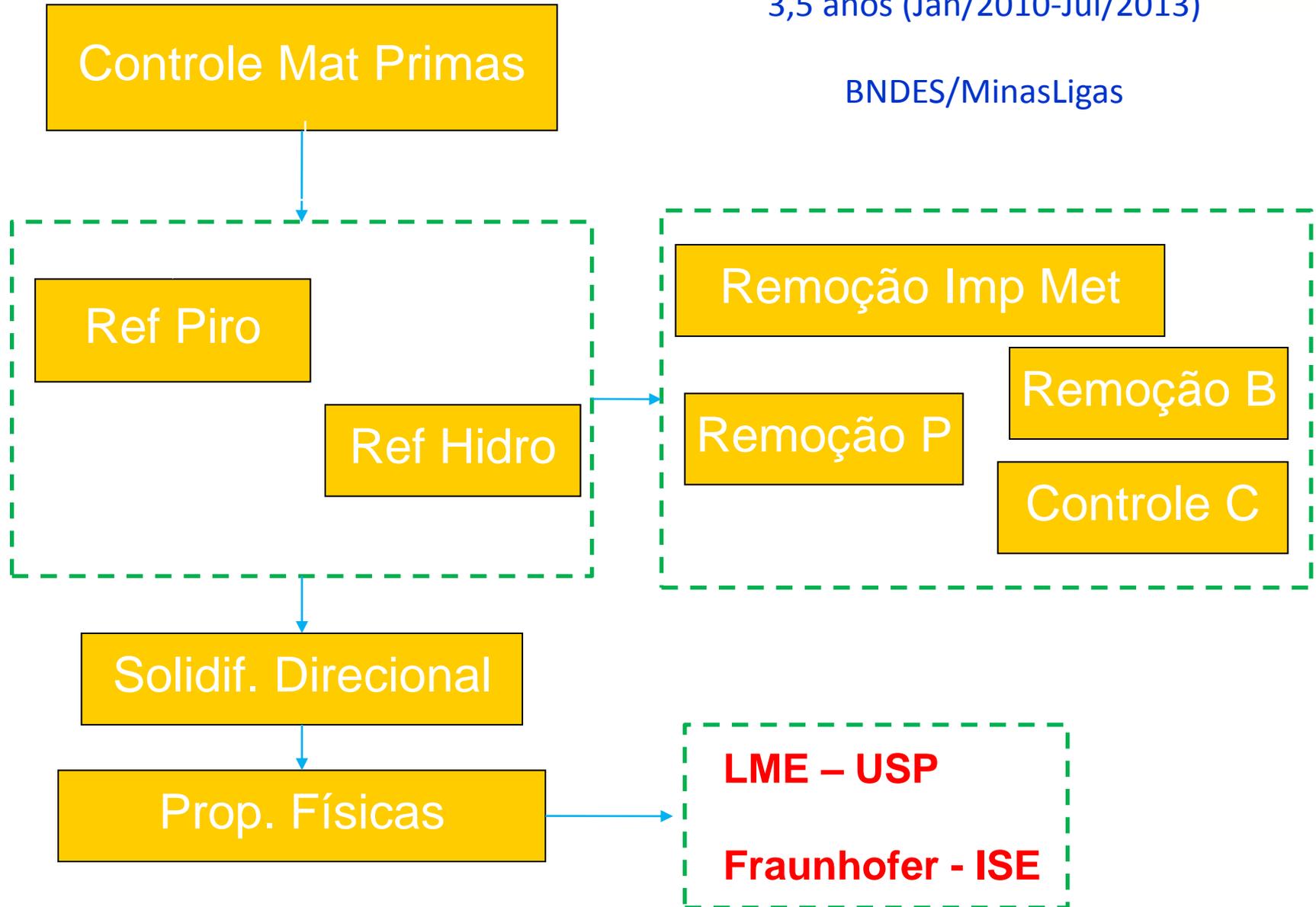
Projeto Rota Metalúrgica para obtenção de Si Solar no IPT



Projeto Si Solar

3,5 anos (Jan/2010-Jul/2013)

BNDES/MinasLigas



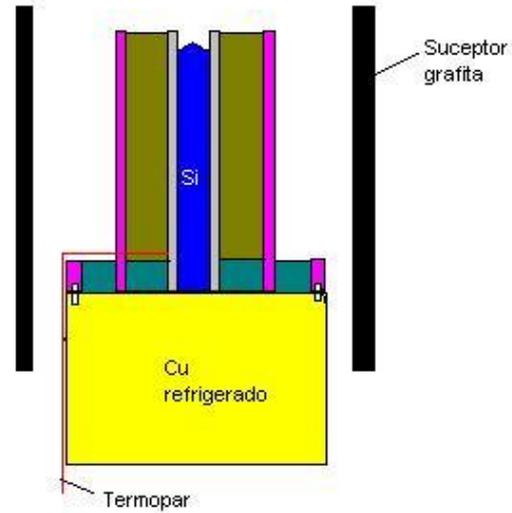
Etapas: 99,5% - 99,9 - 99,99%-99,999%

Refino Pirometalúrgico

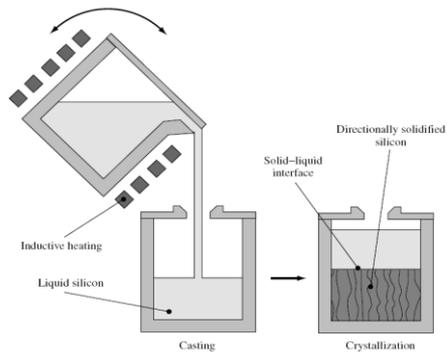
Refino Hidrometalúrgico



Refino por solidificação controlada

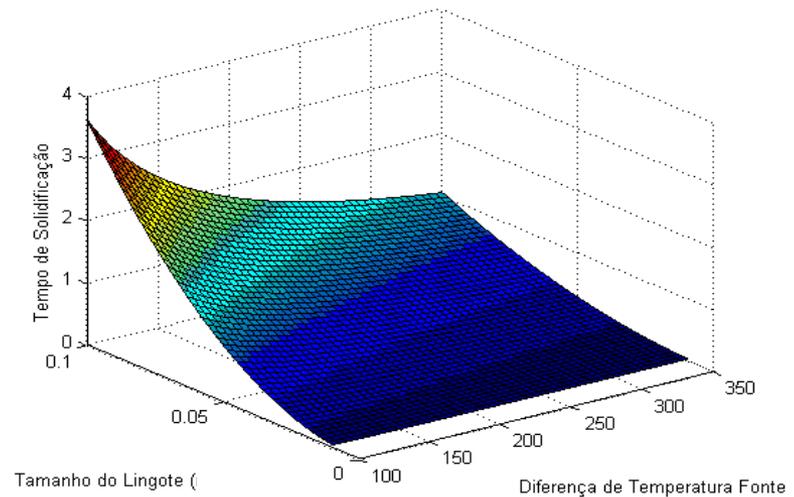
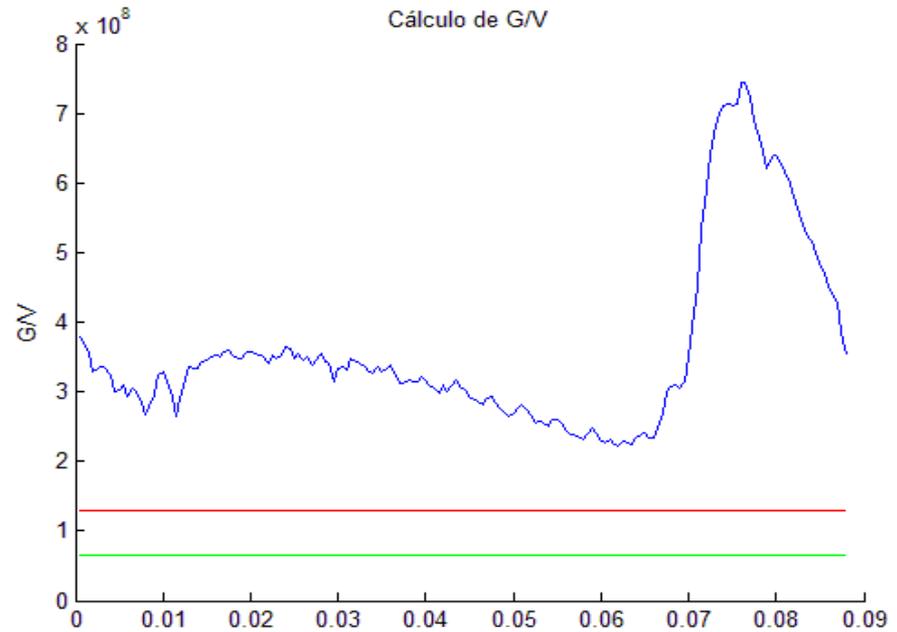
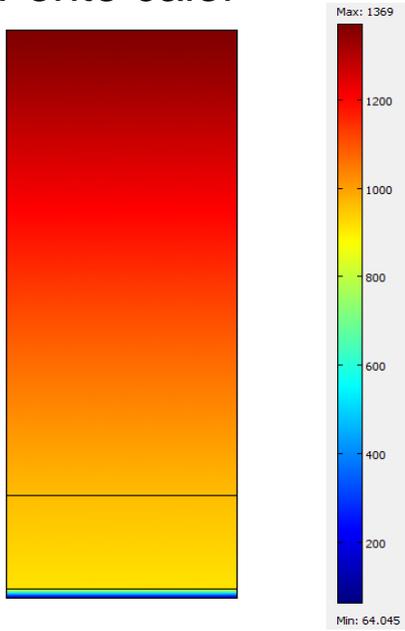


Forno construído com base no modelo matemático

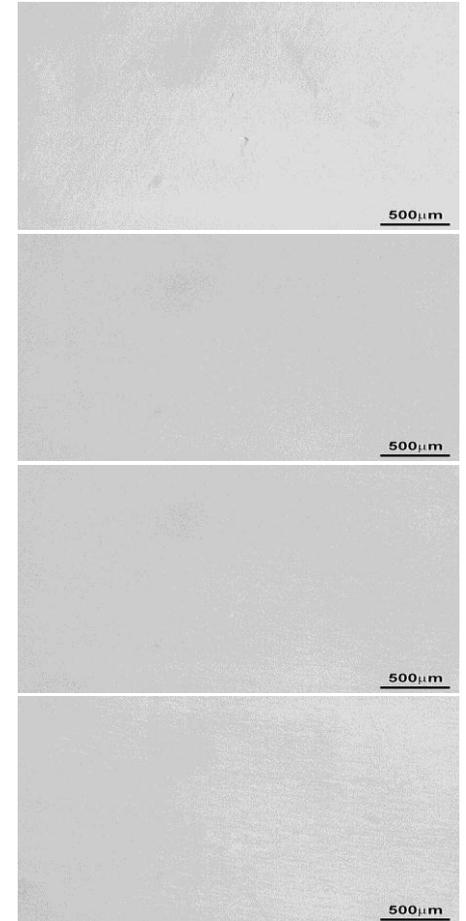


Refino por solidificação controlada – Modelo matemático de transferência de calor

Fonte calor



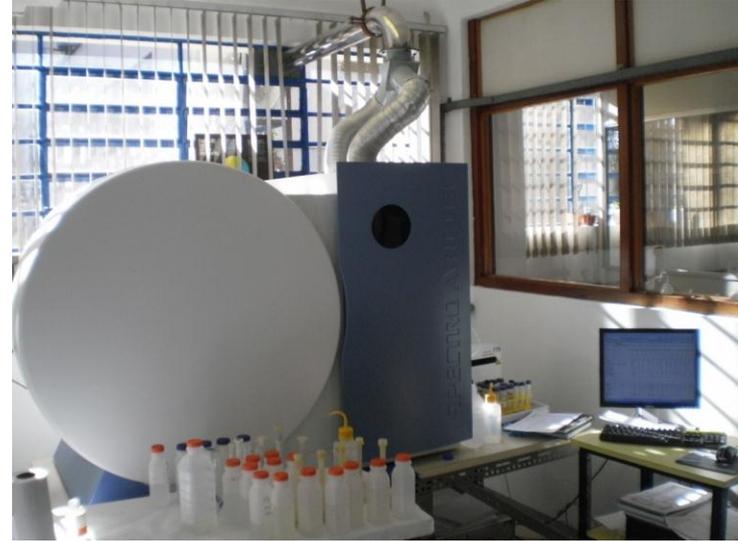
Solidificação controlada – Macro e Microestruturas



Solidificação controlada

Elementos	Teores (ppm)	
	Matéria prima (ICP)	Lingote (GDMS)
Fe	2100	< 0,05
Mn	283	< 0,01
Ca	348	<0,5
Ni	347	<0,01
Ti	244	<0,01
Cu	7	<0,05
Cr	13	<0,1
Mg	11,5	<0,05
Zr	12	<0,05
V	12	<0,05

Análises Químicas elementos traços



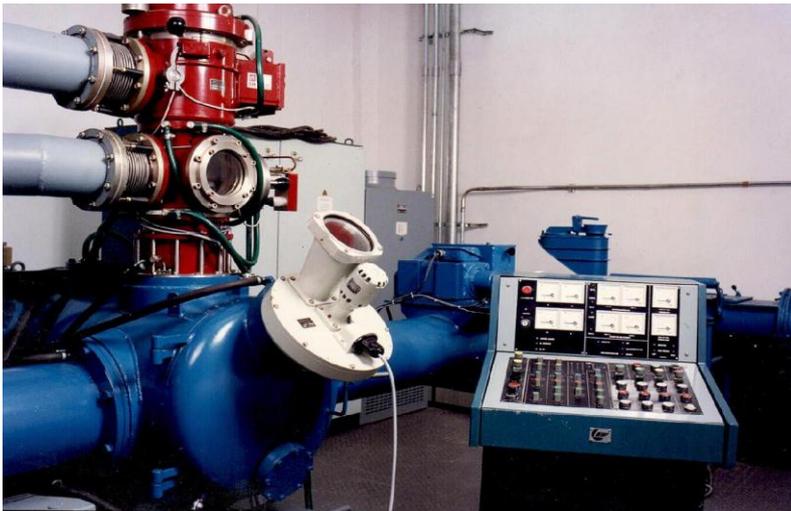
ICP óptico



Sala Limpa

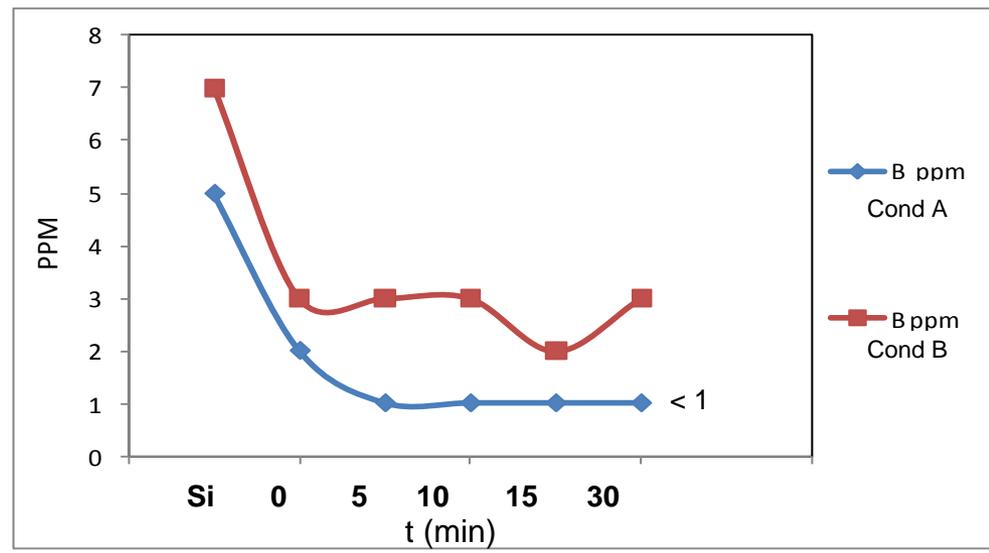
Remoção P e B

	Mn	Ca	P	Fe	Cr	Ni	Ti	Mg	Zr	Zn	V	Cu	Al
Si pré-tratado	<1	6	41	34	<3	16	<3	<0,5	3	<1	<2	1	17
10	<1	15	<3	10	<3	4	5	<0,5	<1	<1	<2	<1	12
11	<1	<1	<3	<1	<3	<1	<3	<0,5	<1	<1	<2	<1	1,5



Tratamento a vácuo (Forno de Feixe de Elétrons e outros equipamentos a vácuo e por tratamento Hidrometalúrgico

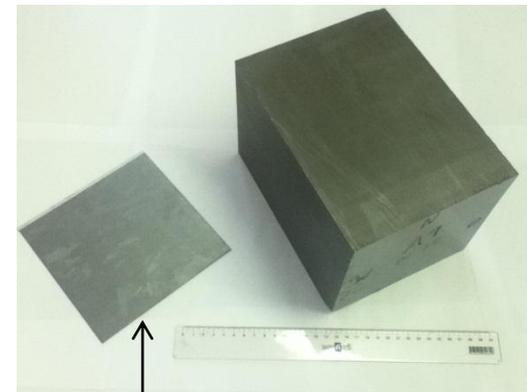
Tratamento pirometalúrgico e tratamento em forno a plasma



Forno de solidificação Direcional última geração instalado no IPT Fev 2012

– Si Multicristalino

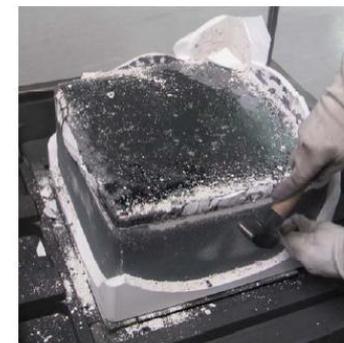
Capacidade: 1 bloco 156x156 mm (25 kg) ou 4 blocos (~100 kg)



Lâmina obtida no IPT



Testes preliminares – Fraunhofer ISE



Conseqüências esperadas

- Definição da Rota de Processamento metalúrgico alternativo para a obtenção de silício Grau Solar.
- Projeto de planta de purificação (piloto /industrial)
- Agregação de valor ao Si produzido pelo Parceiro para exportação
- Geração de empregos na planta a ser construída pelo parceiro
- Know-how para incentivo de implantação de indústrias de fabricação de células e painéis fotovoltaicos no Brasil

Obrigado pela Atenção!

Contatos:

IPT: João Batista – Coordenador do Projeto Rota Metalúrgica Si Solar:
jbfm@ipt.br

MINASLIGAS: Henrique Simões Zica – Diretor/Presidente:
henriquez@minasligas.com.br

BNDES: Pedro Landin – Depto de Indústria de Base:
pslc@bndes.gov.br