



Geração solar e eólica de energia elétrica

- Centro de P&D do Sistema Eletrobras
- Maior centro do Brasil em P&D de energia elétrica
- Maiores laboratórios de alta tensão e potência na América Latina
- Associação sem fins lucrativos fundada em 1974
- Apoio técnico para o Sistema Eletrobras, MME e MCTIC, entidades setoriais (ONS, CCEE, EPE e Aneel), concessionárias e indústria



Unidade Ilha do Fundão

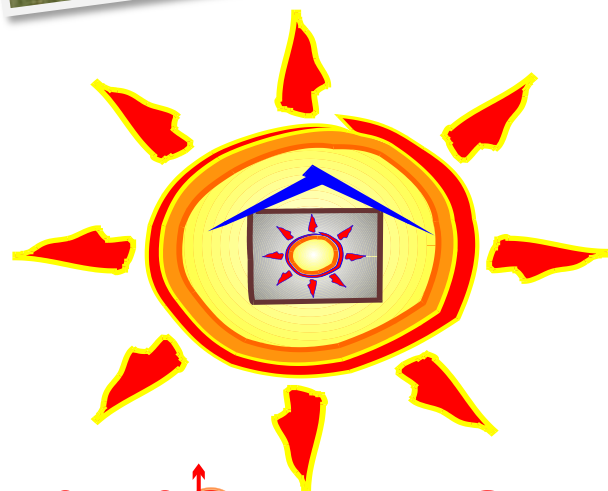


Unidade Adrianópolis

Promoção da difusão de conhecimentos nas áreas de geração solar e eólica.



Casa Solar Eficiente

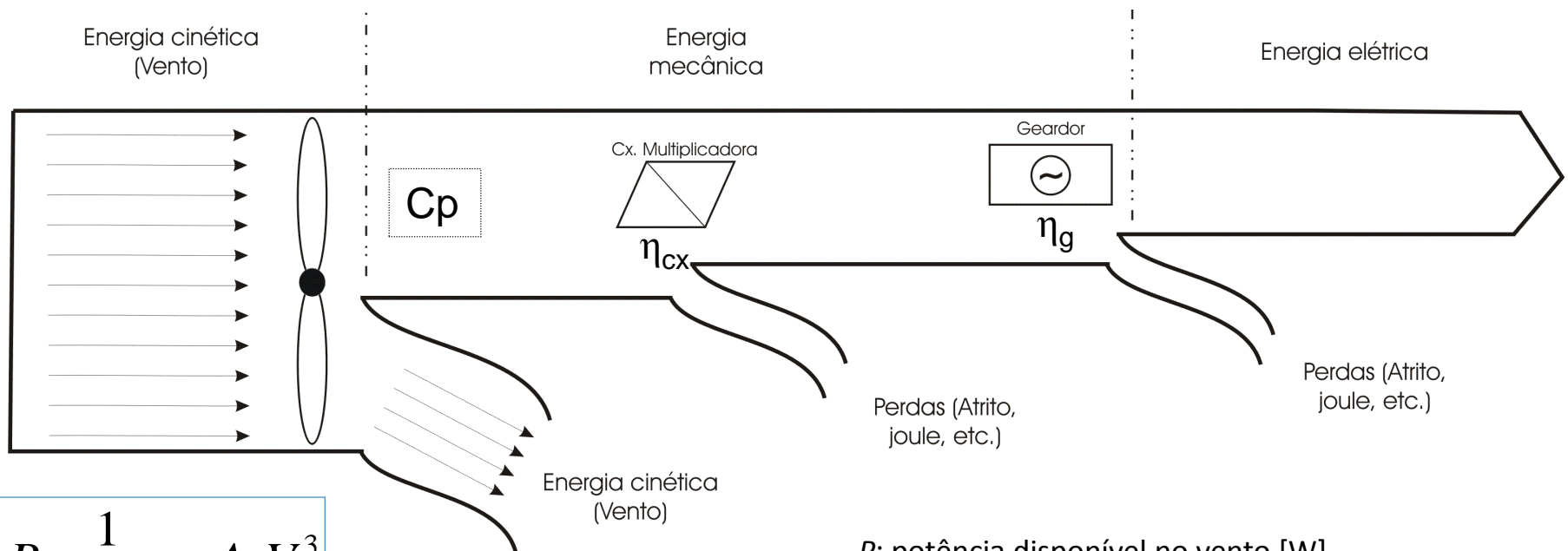


CASA SOLAR EFICIENTE

1. Princípios e componentes de um aerogerador
2. Como fazer um empreendimento
3. Como vender a energia gerada

PRINCÍPIOS E COMPONENTES DE UM AEROGERADOR

Princípio de um aerogerador



$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3$$

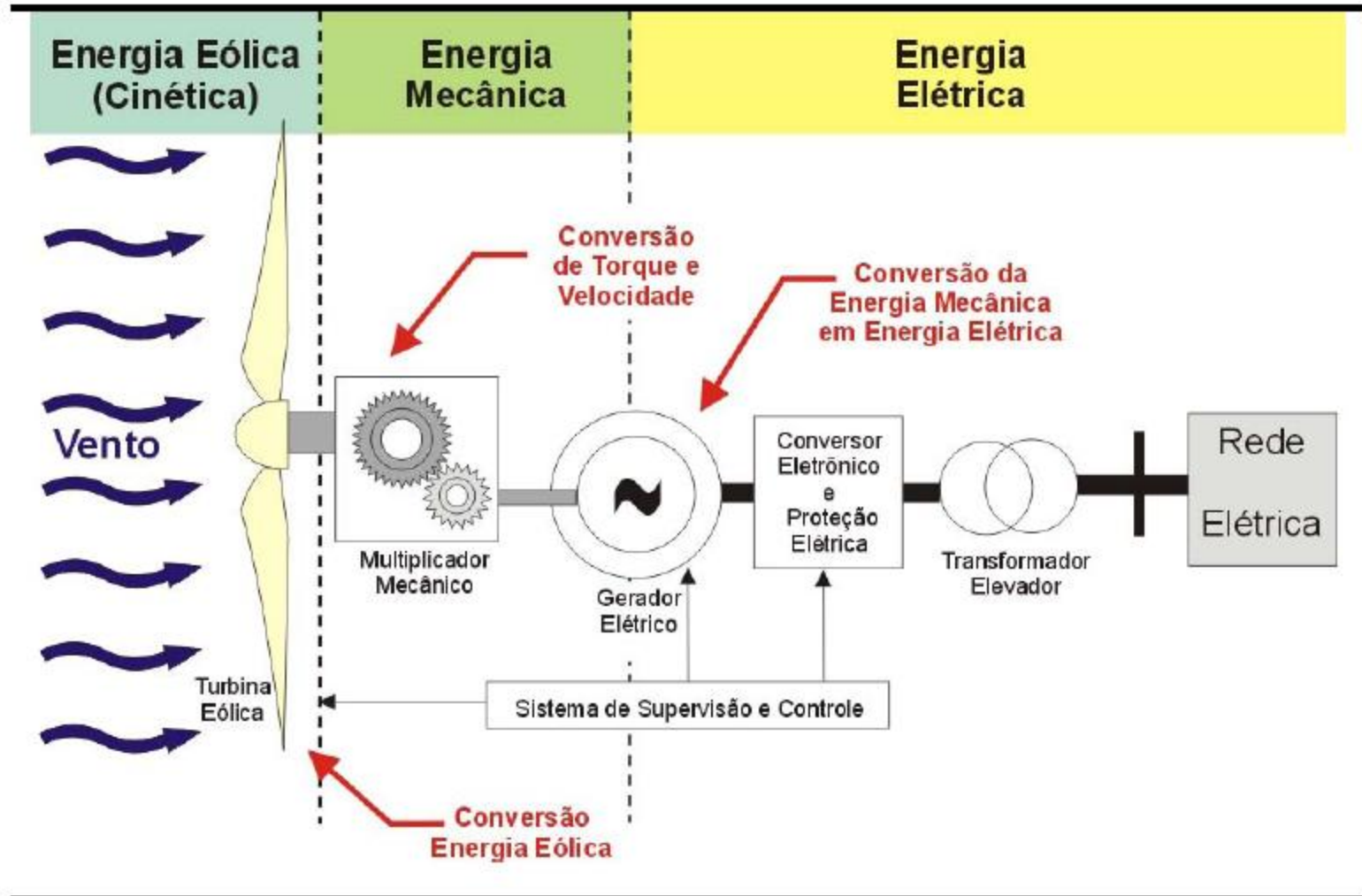
$$P_{tmáx} = C_{p_{máx}} \cdot P = 0,593 \cdot P$$

$$P_e = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p \cdot \eta_{cx} \cdot \eta_g$$

Onde $C_p \leq C_{p_{tmáx}}$

- P : potência disponível no vento [W]
- ρ : massa específica do ar [kg/m^3]
- A : área da seção transversal varrida pelo rotor da turbina [m^2]
- V : velocidade do vento livre antes da turbina [m/s]
- $P_{tmáx}$: potência máxima que pode ser extraída por uma turbina ideal [W]
- $C_{p_{tmáx}}$: coeficiente de Betz (0,593)
- P_e : potência elétrica na saída do aerogerador [W]
- C_p : coeficiente de potência da turbina
- η_{cx} : eficiência da caixa multiplicadora
- η_g : eficiência do gerador elétrico

Princípio de um aerogerador



- **Com Multiplicador**

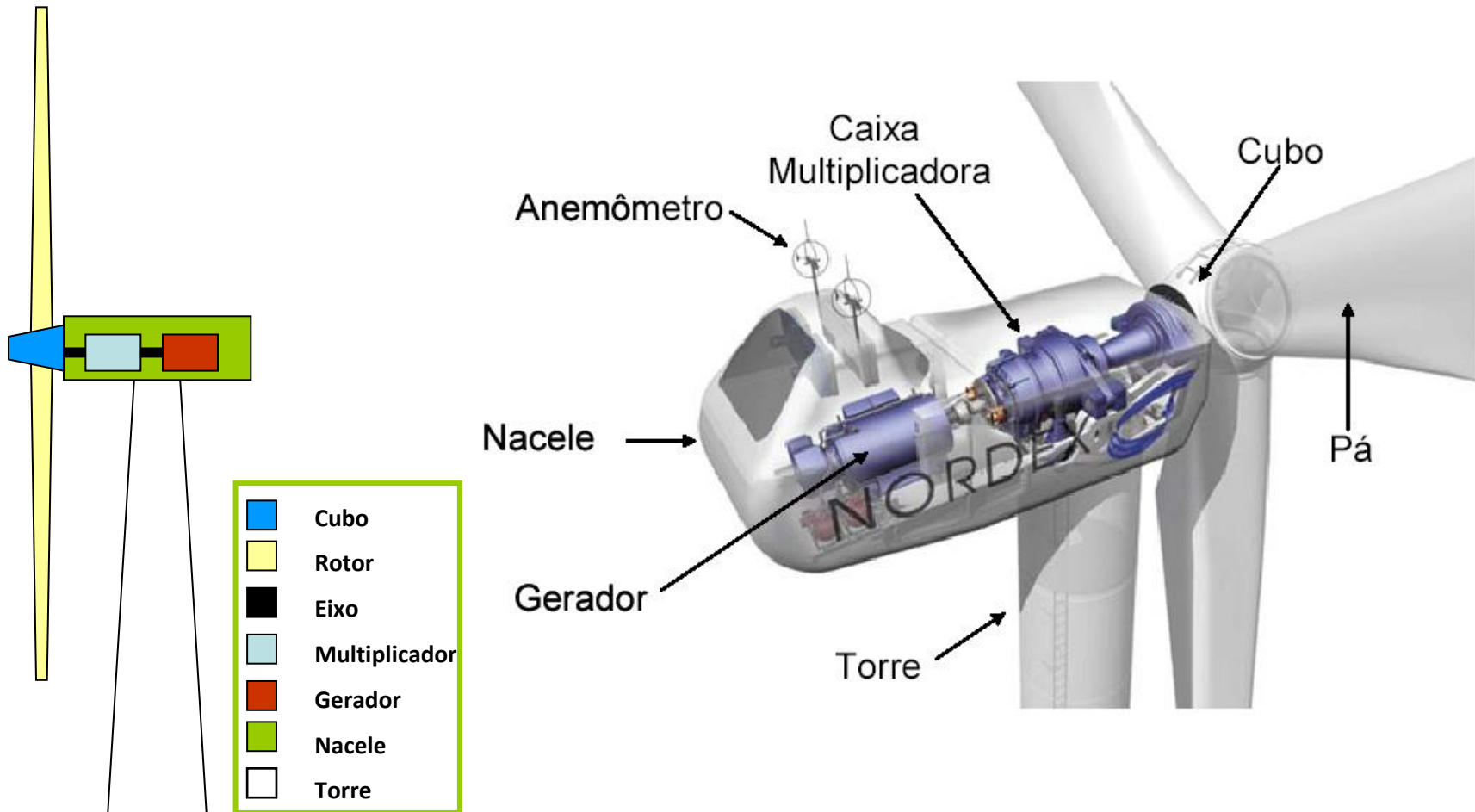
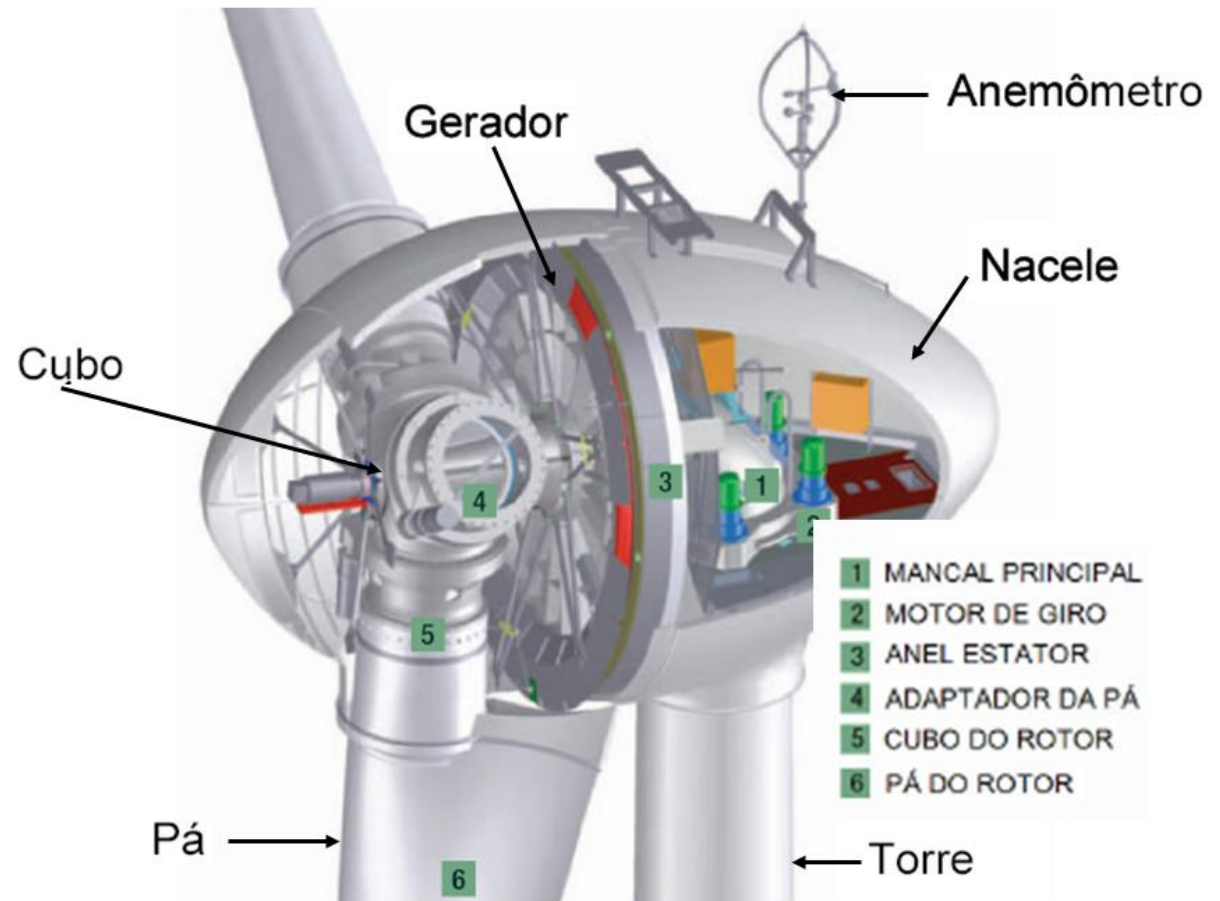
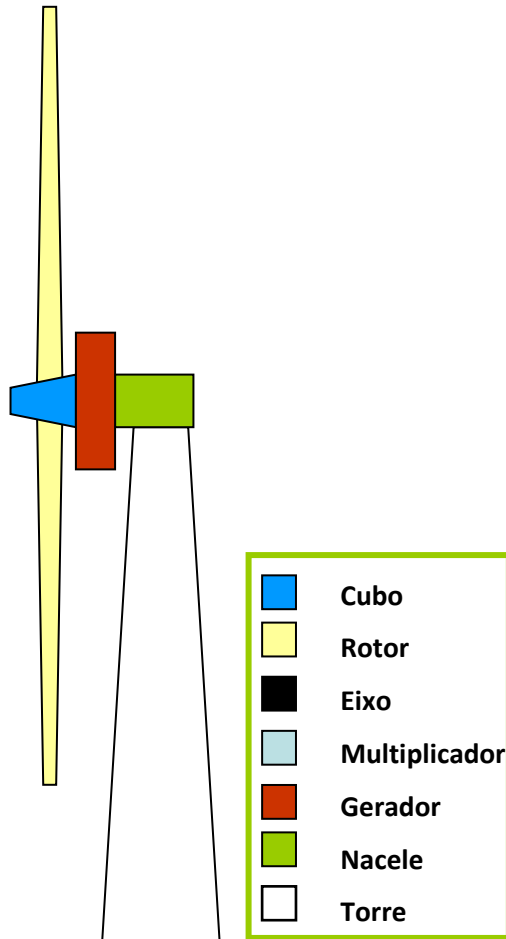
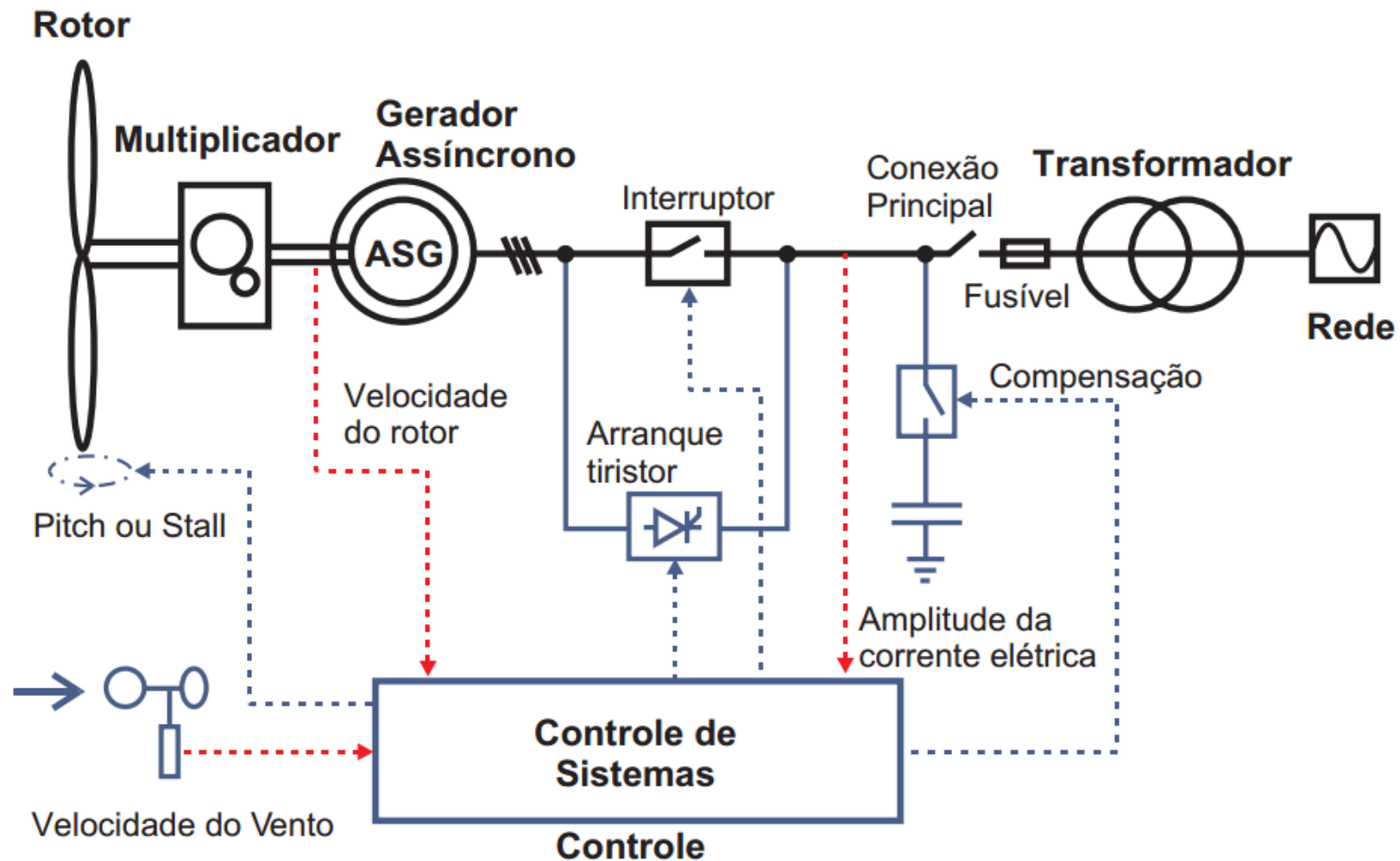


Figura adaptada de http://www.energy.qld.gov.au/infosite/eg_using_wind_turbines.html.

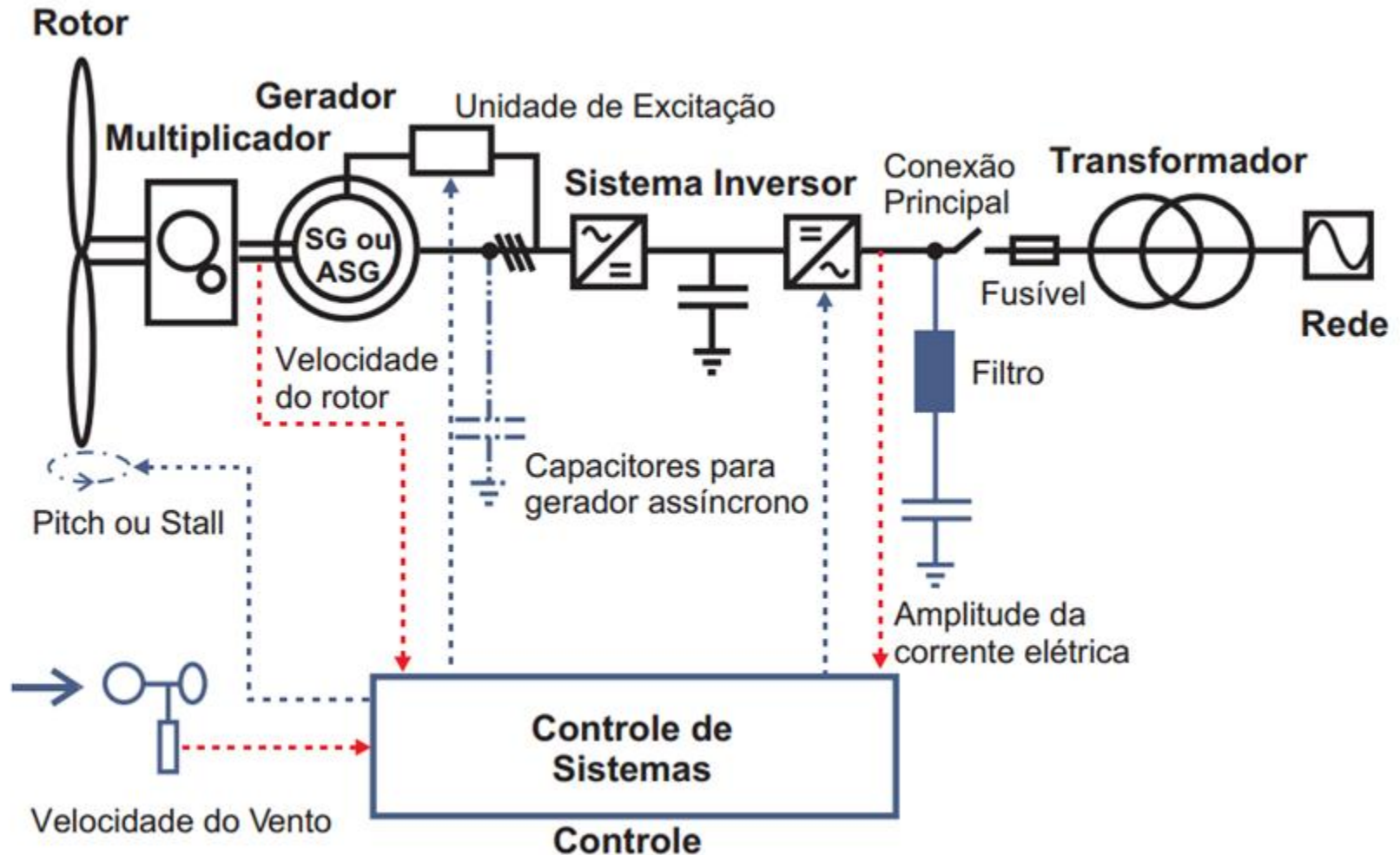
• Acionamento Direto



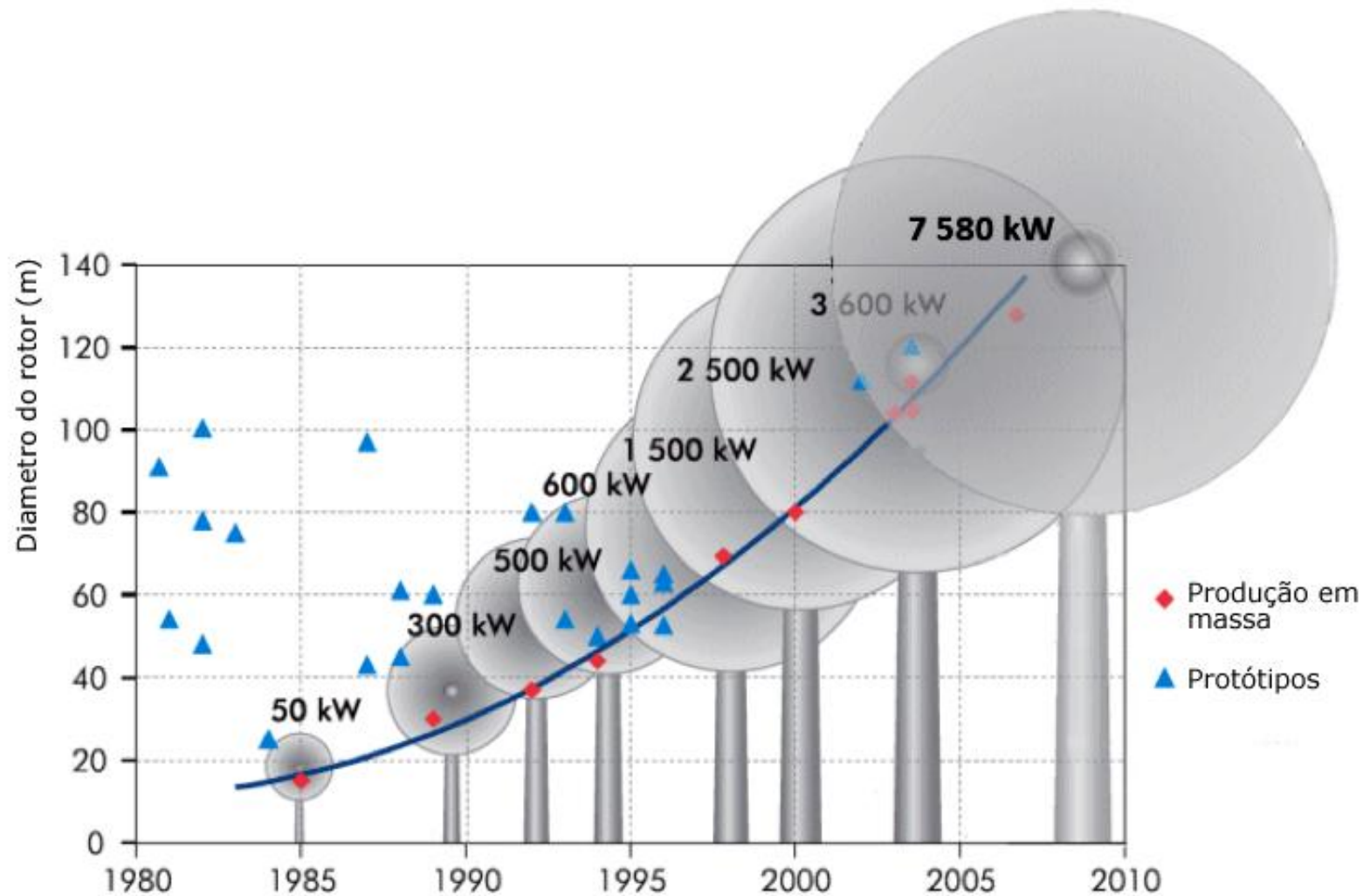
Sistema elétrico de um gerador com velocidade constante



Sistema elétrico de um gerador com velocidade variável

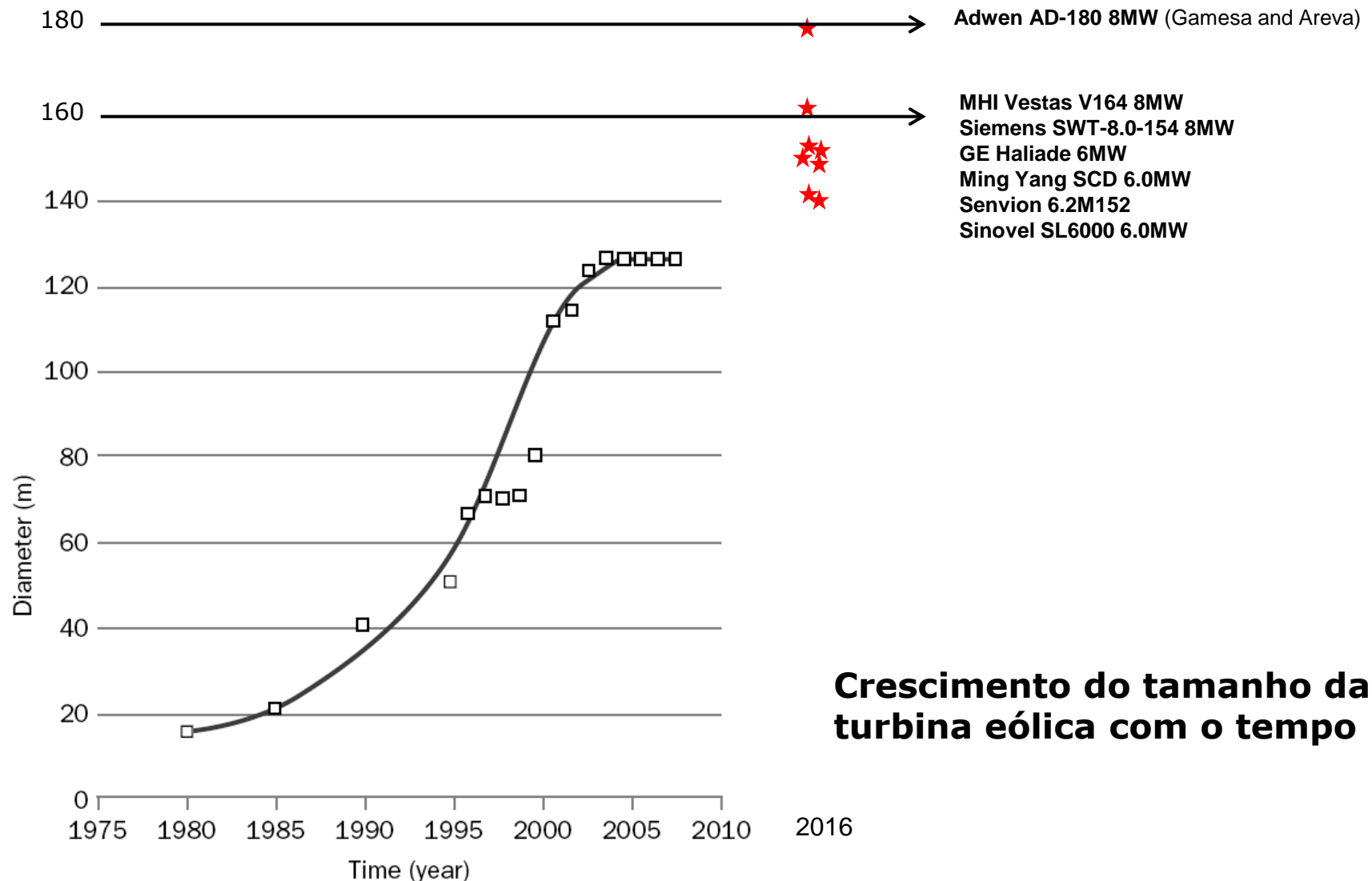


Evolução da potência dos aerogeradores



Fonte: Agência Internacional de Energia (IEA)

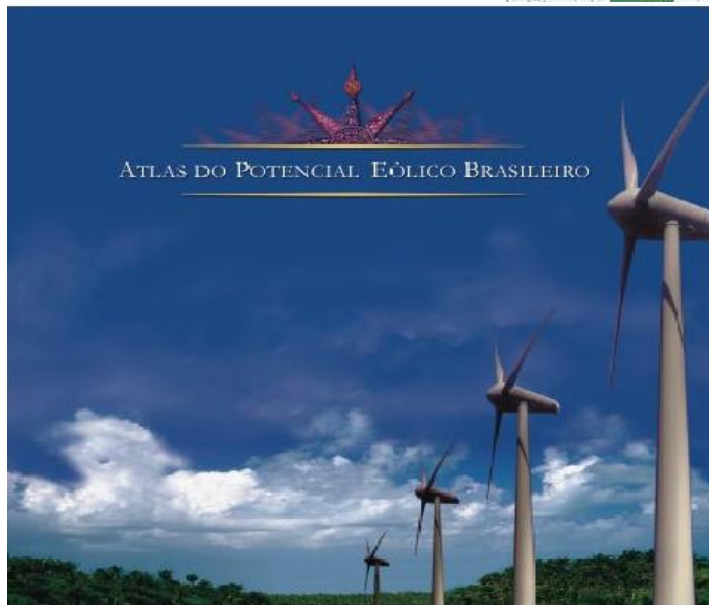
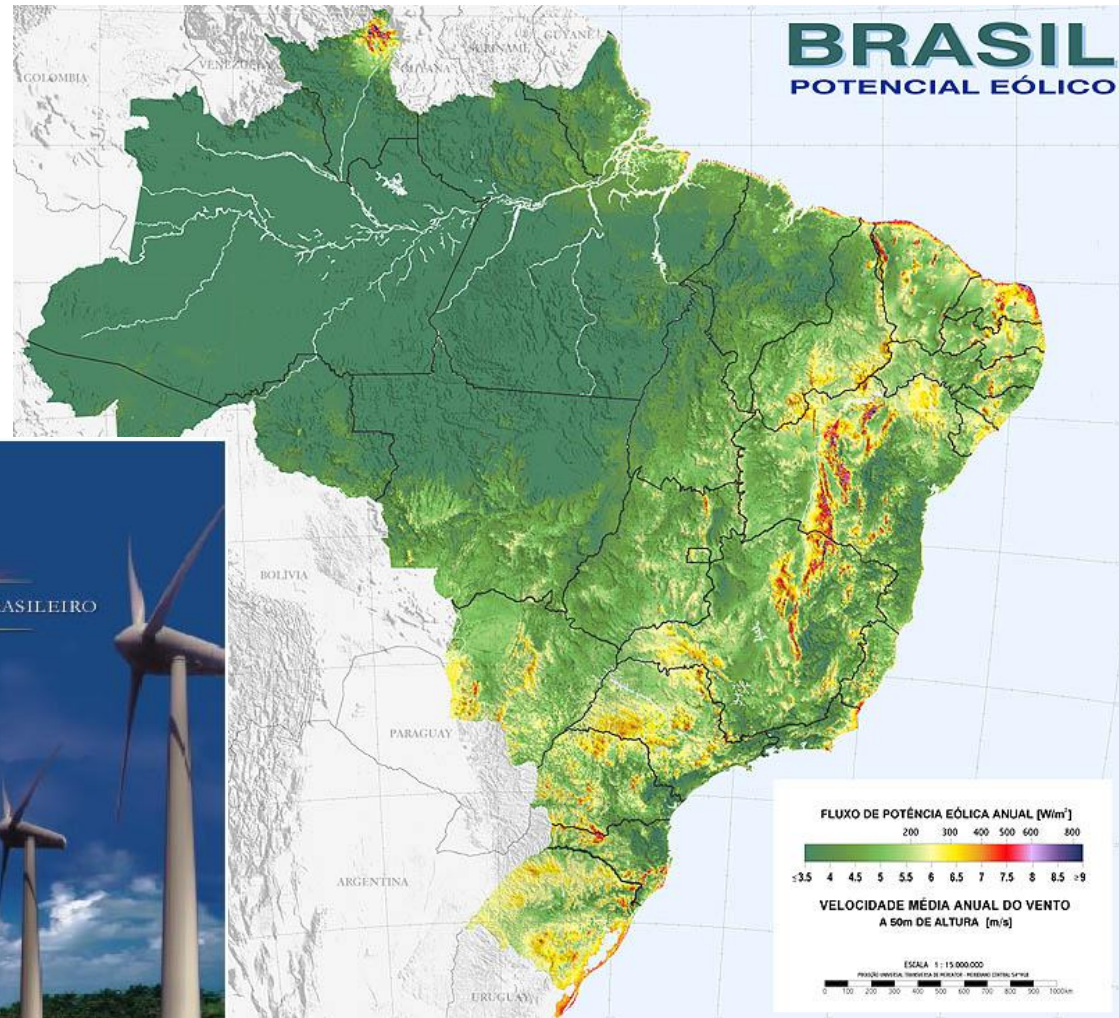
1. Evolução da potência dos aerogeradores



COMO FAZER UM EMPREENDIMENTO EÓLICO

Primeiro passo: Localização de ventos favoráveis

Início da Pesquisa pelo Atlas Eólico



Próximos passos: Detalhamento dos melhores sítios

O Atlas indica as regiões com os melhores ventos.

O que preciso saber para iniciar um projeto?



Prospecção

Características de um sítio promissor

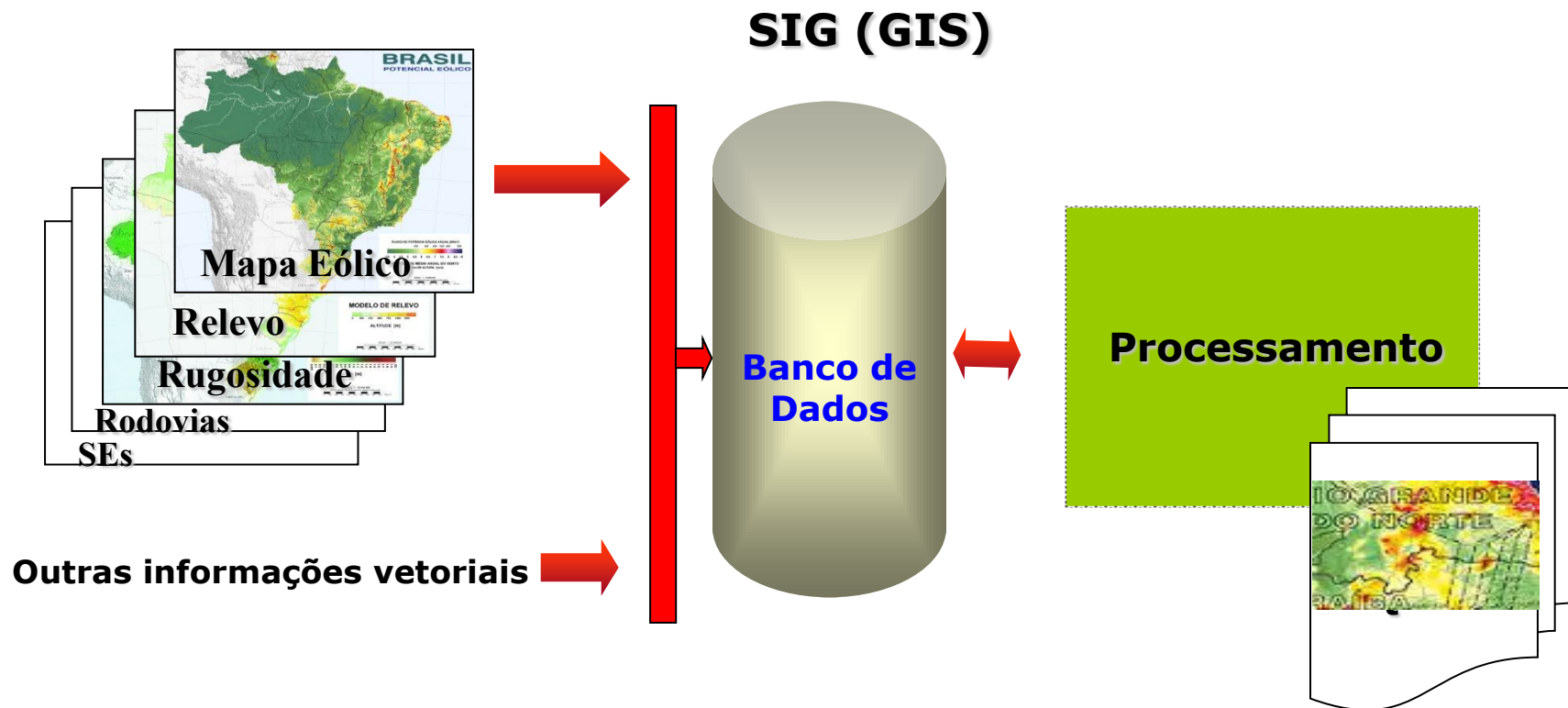
- Ventos com velocidade média anual superior a 7,0 m/s;
- Dimensões adequadas para comportar a potência do projeto;
- Baixo relevo para melhor aproveitamento da área;
- Ventos comportados, com baixo índice de turbulência;
- Acesso para veículos pesados;
- Disponibilidade de alguma subestação na redondeza, com capacidade para absorver a energia gerada pela usina eólica.



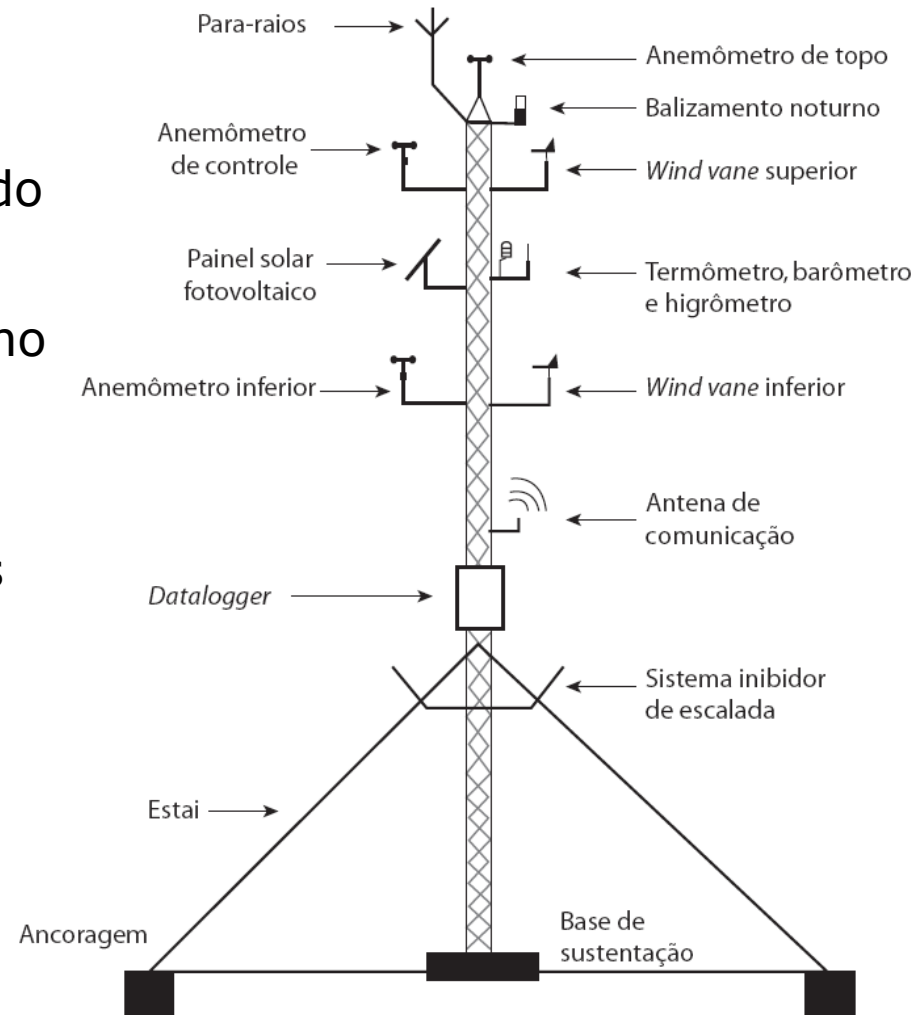
- Investigar **no Atlas Eólico** os locais que apresentam ventos superiores a 7,0m/s, na região de interesse;
- Utilizar **mapas cartográficos** para identificar o tipo de relevo, avaliar a disponibilidade de áreas planas e identificar as vias de acesso;
- Utilizar **imagens de satélite** para caracterizar o tipo de rugosidade na região de interesse e na vizinhança;
- Utilizar **diagramas elétricos** para avaliar a **viabilidade de despacho da energia produzida** na futura usina.

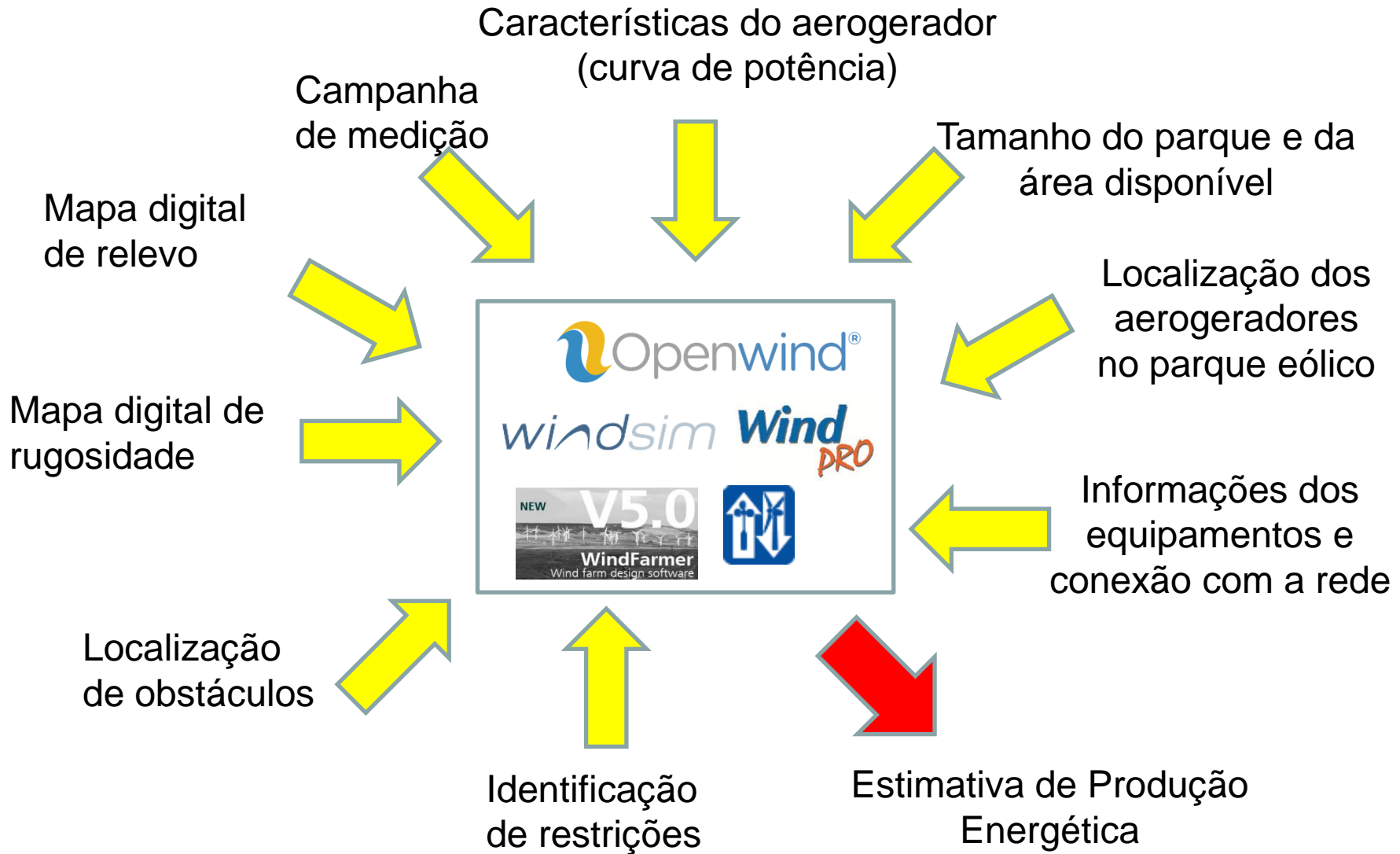


- Utilizar um sistema de geoprocessamento para identificar e elaborar os polígonos que apresentam as características desejadas, traçar as rotas de prospecção, identificar as rodovias de acesso, calcular a capacidade de produção, etc. Todos os dados coletados serão úteis para avaliação da viabilidade do empreendimento eólico.



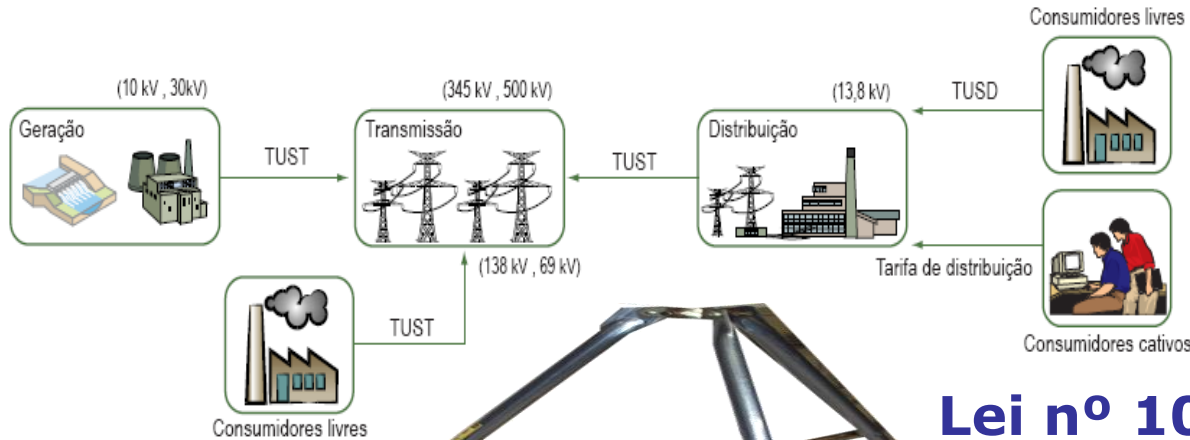
- Identificação das melhores localizações para se instalar uma torre de medição anemométrica;
- Negociações com os proprietários do terreno;
- Período mínimo de medição: um ano
- Utilização de equipamentos de qualidade;
- Coleta de dados e manutenção dos equipamentos;
- Tratamento estatístico dos dados medidos.





COMO VENDER A ENERGIA GERADA

O modelo do setor elétrico



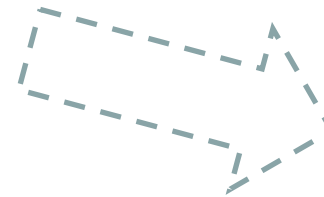
Lei nº 10.848/2004

Regulamentação estável

Segurança do abastecimento

Modicidade tarifária

Leilões de Contratação de Energia



- Leilão de Venda
- **Leilão de Fontes Alternativas**
- Leilão de Excedentes
- Leilão Estruturante
- **Leilão de Energia de Reserva**
- **Leilão de Energia Nova**
- Leilão de Energia Existente
- Leilão de Compra
- Leilão de Ajuste

- **Leilão de Fontes Alternativas**

O leilão de fontes alternativas foi instituído com o objetivo de atender ao crescimento do mercado no ambiente regulado e aumentar a participação de fontes renováveis – eólica, biomassa e energia proveniente de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) – na matriz energética brasileira.

- **Leilão de Energia de Reserva**

A contratação da energia de reserva foi criada para elevar a segurança no fornecimento de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN), com energia proveniente de usinas especialmente contratadas para esta finalidade → seja de novos empreendimentos de geração ou de empreendimentos existentes.

- **Leilão de Energia Nova**

O leilão de energia nova tem como finalidade atender ao aumento de carga das distribuidoras. Neste caso são vendidas e contratadas energia de usinas que ainda serão construídas. Este leilão pode ser de dois tipos: A -5 (usinas que entram em operação comercial em até cinco anos) e A -3 (em até três anos).

Fator de capacidade = [kWh de
energia elétrica gerada] /
[capacidade nominal de
geração (kW) x período (h)]

Resultado dos últimos leilões (2015)

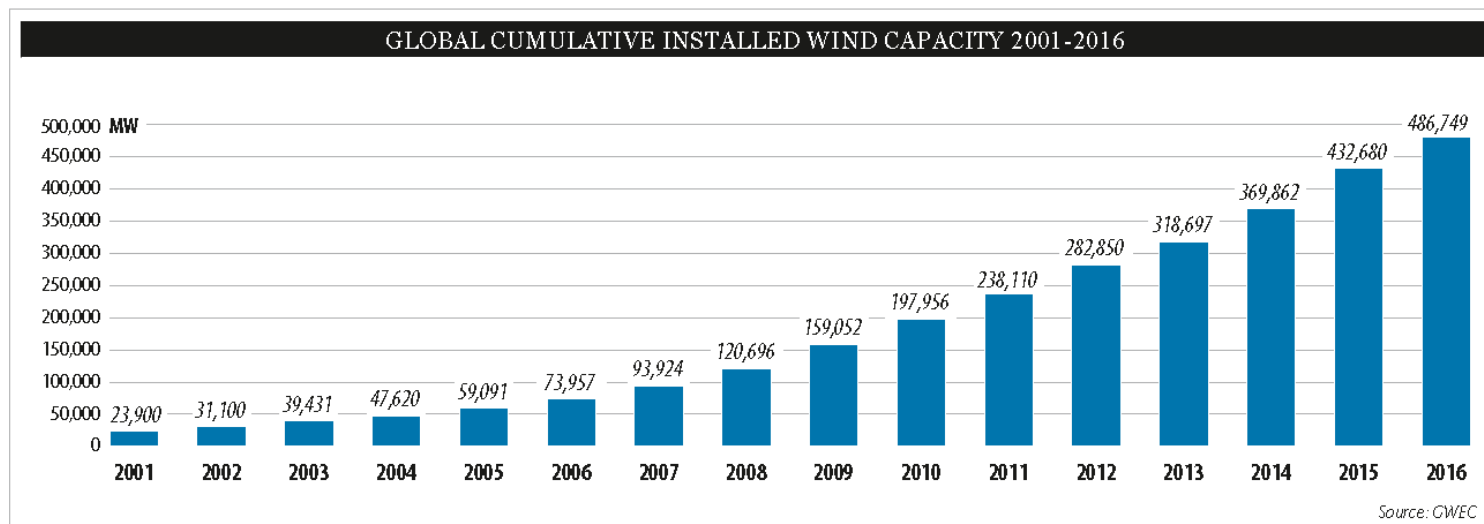
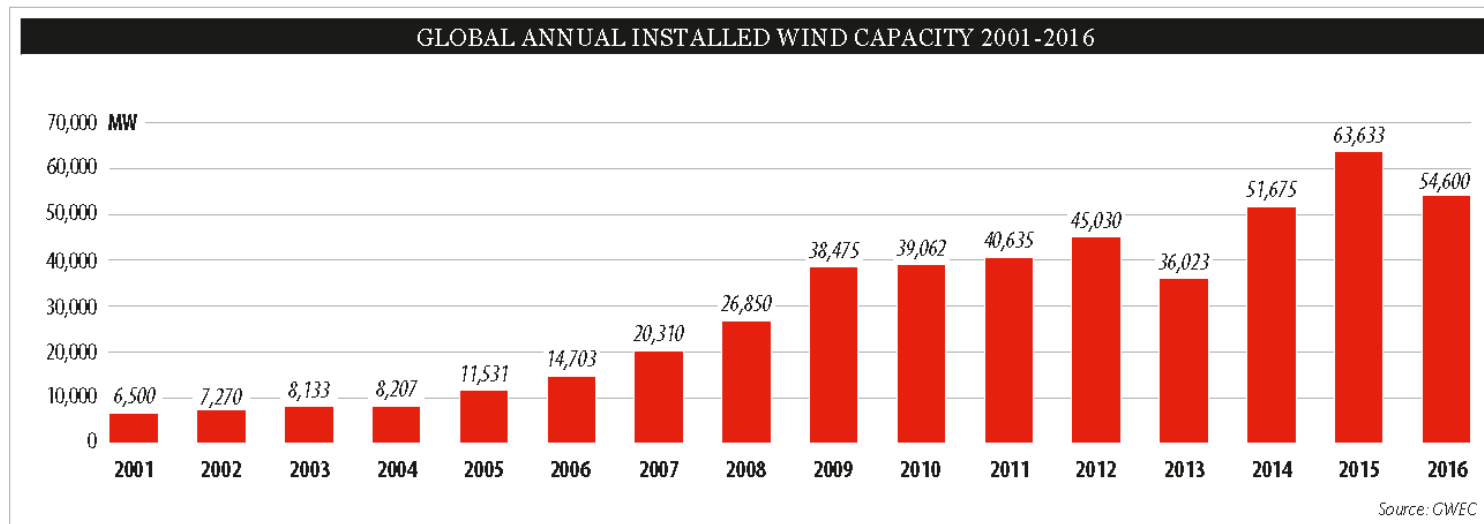
| | Potência (MW) | MWmédios | Investimento (R\$ milhões) | R\$/kW | | |
|------------------|---------------|----------|----------------------------|--------------|--------------|--------------|
| | | | | Médio | Mínimo | Máximo |
| 3º LFA 2015 A-3 | 90,0 | 42,3 | R\$ 440,76 | R\$ 4.897,00 | R\$ 4.897,00 | R\$ 4.897,00 |
| 22º LEN 2015 A-3 | 538,8 | 252,1 | R\$ 1.913,49 | R\$ 3.612,00 | R\$ 2.592,00 | R\$ 5.429,00 |
| 8º LER 2015 A-3 | 548,2 | 284,8 | R\$ 2.444,84 | R\$ 4.466,00 | R\$ 2.592,00 | R\$ 4.833,00 |

| | Potência (MW) | MWmédios | Fator de Capacidade | | |
|------------------|---------------|----------|---------------------|--------|--------|
| | | | Médio | Mínimo | Máximo |
| 3º LFA 2015 A-3 | 90,0 | 42,3 | 47% | 47% | 47% |
| 22º LEN 2015 A-3 | 538,8 | 252,1 | 47% | 40% | 54% |
| 8º LER 2015 A-3 | 548,2 | 284,8 | 52% | 44% | 60% |

| | Potência (MW) | MWmédios | Preço de Venda (R\$/MWh) | | |
|------------------|---------------|----------|--------------------------|------------|------------|
| | | | Médio | Mínimo | Máximo |
| 3º LFA 2015 A-3 | 90,0 | 42,3 | R\$ 177,47 | R\$ 177,46 | R\$ 177,48 |
| 22º LEN 2015 A-3 | 538,8 | 252,1 | R\$ 181,09 | R\$ 178,88 | R\$ 182,42 |
| 8º LER 2015 A-3 | 548,2 | 284,8 | R\$ 203,30 | R\$ 178,00 | R\$ 212,39 |

(Fonte: CCEE, 2016. *Leilões*. Disponível em: www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/o-que-fazemos?_adf.ctrl-state=w02bdojl1_167&_afLoop=4542759326414. Acesso em: 12/09/16)

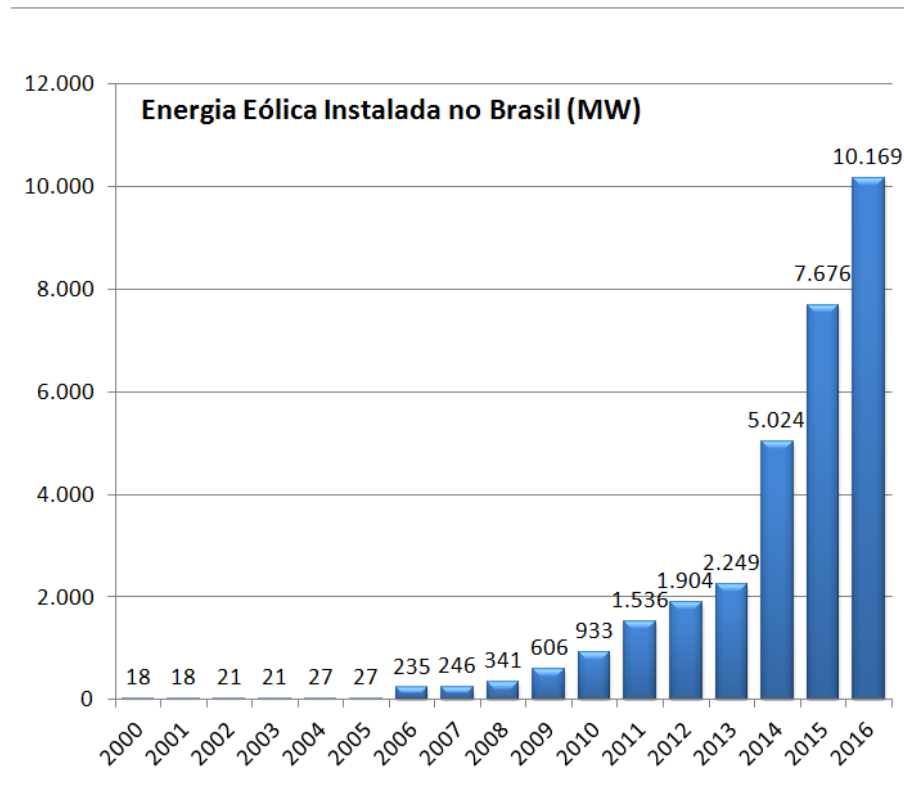
Potência instalada no mundo



(Fonte: GWEC, 2017. *Global Wind Statistics 2016*. <http://files.gwec.net/files/GlobalWindEnergyOutlook2016> Acesso em: 20/04/17)

Potência instalada no Brasil

| Estado | Capacidade Instalada MW (2016) | Parques Eólicos (2016) |
|---------------------|--------------------------------|------------------------|
| Rio Grande do Norte | 3.311,6 | 121 |
| Rio Grande do Sul | 1.750,1 | 68 |
| Bahia | 1.648,0 | 70 |
| Ceará | 1.544,3 | 57 |
| Piauí | 885,2 | 32 |
| Pernambuco | 652,9 | 30 |
| Santa Catarina | 242,5 | 15 |
| Paraíba | 69,0 | 13 |
| Sergipe | 34,5 | 1 |
| Rio de Janeiro | 28,1 | 1 |
| Paraná | 2,5 | 1 |
| Minas Gerais | 0,2 | 1 |
| Total | 10.168,7 | 410 |



Fonte: ANEEL, 2017. Banco de Informações de Geração. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br>. Acesso em: 02/03/2017

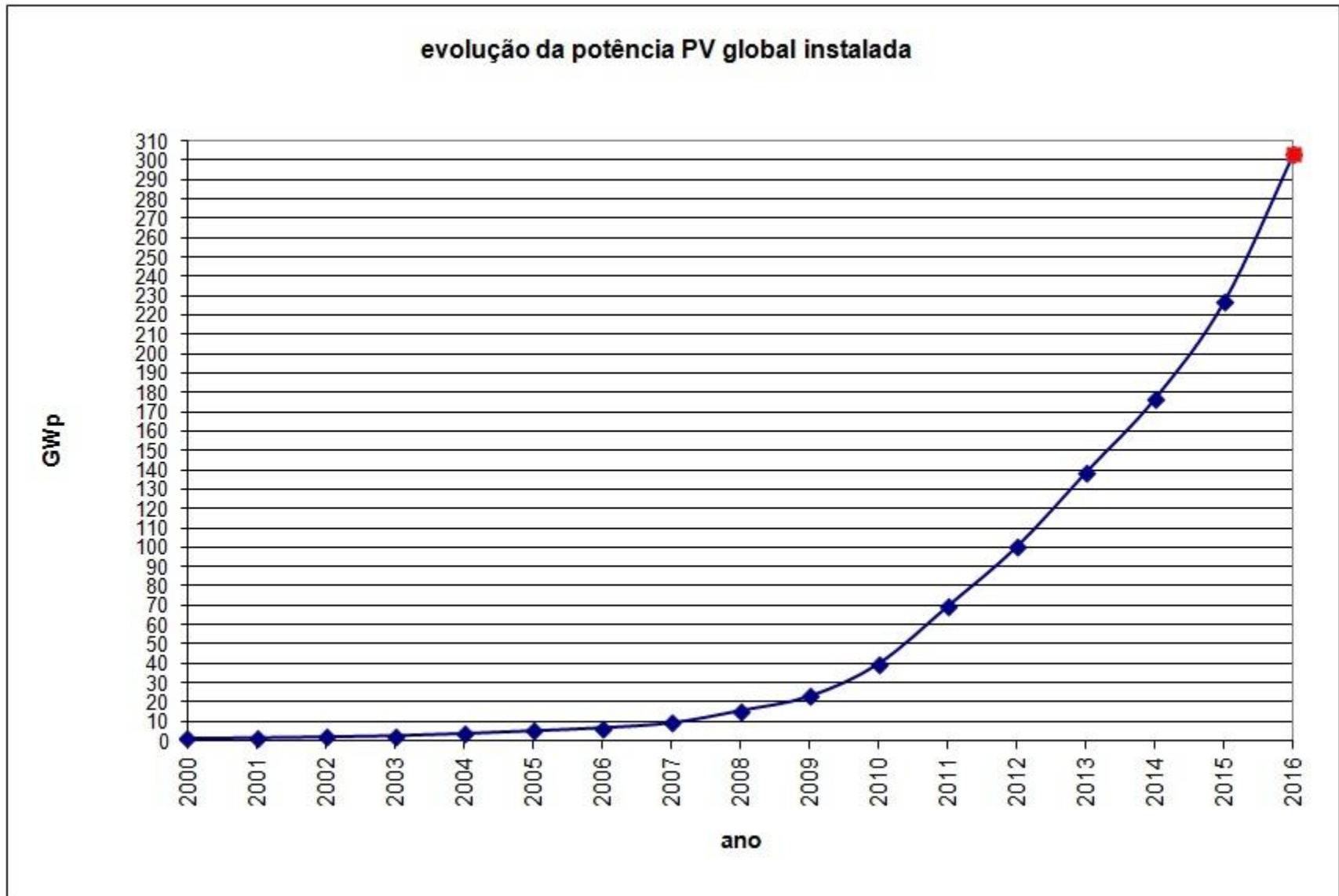
10.393,74 MW
(25/4/2017)

Parques Eólicos instalados no Brasil

| Plantas Eólicas | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | Total |
|---------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Nordeste | 1 | - | 1 | - | 1 | 1 | 5 | 15 | 12 | 7 | 10 | 10 | 97 | 67 | 93 | 322 |
| Rio Grande do Norte | - | - | 1 | - | 1 | - | - | - | 1 | 6 | 3 | 2 | 47 | 25 | 35 | 121 |
| Bahia | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 3 | 5 | 25 | 14 | 21 | 68 |
| Ceará | 1 | - | - | - | - | - | 4 | 5 | 5 | - | 2 | 3 | 22 | - | 13 | 57 |
| Piauí | - | - | - | - | - | - | 1 | - | - | - | - | - | 3 | 14 | 14 | 32 |
| Pernambuco | - | - | - | - | - | - | - | - | 5 | - | 1 | - | - | 14 | 10 | 30 |
| Paraíba | - | - | - | - | - | 1 | - | 10 | 1 | 1 | - | - | - | - | - | 13 |
| Sergipe | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1 | - | - | - | - | 1 |
| Sudeste | - | - | - | - | - | - | - | - | 1 | - | 1 | - | - | - | - | 2 |
| Rio de Janeiro | - | - | - | - | - | - | - | - | 1 | - | - | - | - | - | - | 1 |
| Minas Gerais | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1 | - | - | - | - | 1 |
| Sul | 1 | - | 1 | - | 4 | - | - | - | 1 | 15 | 4 | 4 | 11 | 40 | 4 | 86 |
| Rio Grande do Sul | - | - | - | - | 3 | - | - | - | 1 | 5 | 4 | 4 | 10 | 39 | 4 | 70 |
| Santa Catarina | 1 | - | 1 | - | 1 | - | - | - | - | 10 | - | - | 1 | 1 | - | 15 |
| Paraná | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1 |
| BRASIL | 2 | - | 2 | - | 5 | 1 | 5 | 15 | 14 | 22 | 15 | 14 | 108 | 107 | 97 | 410 |
| Brasil Acumulativo | 5 | 5 | 7 | 7 | 12 | 13 | 18 | 33 | 47 | 69 | 84 | 98 | 206 | 313 | 410 | |

Geração fotovoltaica de energia elétrica

Crescimento mundial da energia solar fotovoltaica (2016)



Geração distribuída - RN Aneel 482/2012, revisada em nov/15 pela RN 687/2015 (PRODIST – módulo 3)

- PRODIST Módulo 3, Seção 3.7, Revisão 6
- micro- (até 75kWp) e minigeração (até 5MWp) distribuída;
- sistema de compensação de energia em um período de 60 meses (*net-metering*);
- até 10kW , na BT monofásica, até 100kW na BT trifásica, 100-500kW BT trifásica ou MT e acima de 500kW na MT;
- custos de adequações necessárias na rede de distribuição para acesso da microgeração são de responsabilidade da distribuidora, enquanto que para a minigeração são de responsabilidade do consumidor;

Módulos Fotovoltaicos

Efeito Fotovoltaico

- O princípio físico denominado efeito fotovoltaico (foto = luz; volt = eletricidade), conforme indicado pelo próprio nome, é a conversão direta de energia luminosa (fótons) em energia elétrica

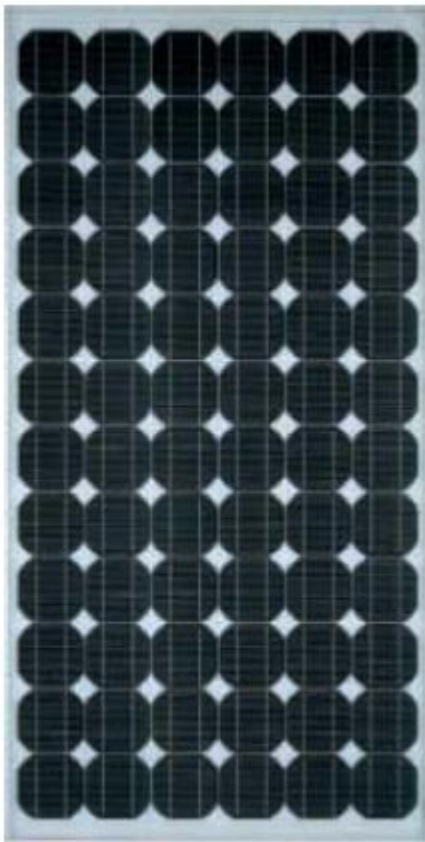
Célula Fotovoltaica

- Dispositivo eletrônico construído a partir de uma junção p-n de material semiconductor, geralmente o Silício (Si), e que tem a propriedade de implementar o efeito fotovoltaico (tensão x corrente c.c.)



Módulos Fotovoltaicos de Si

Silício
monocristalino
(m-Si)



Silício
policristalino
(p-Si)



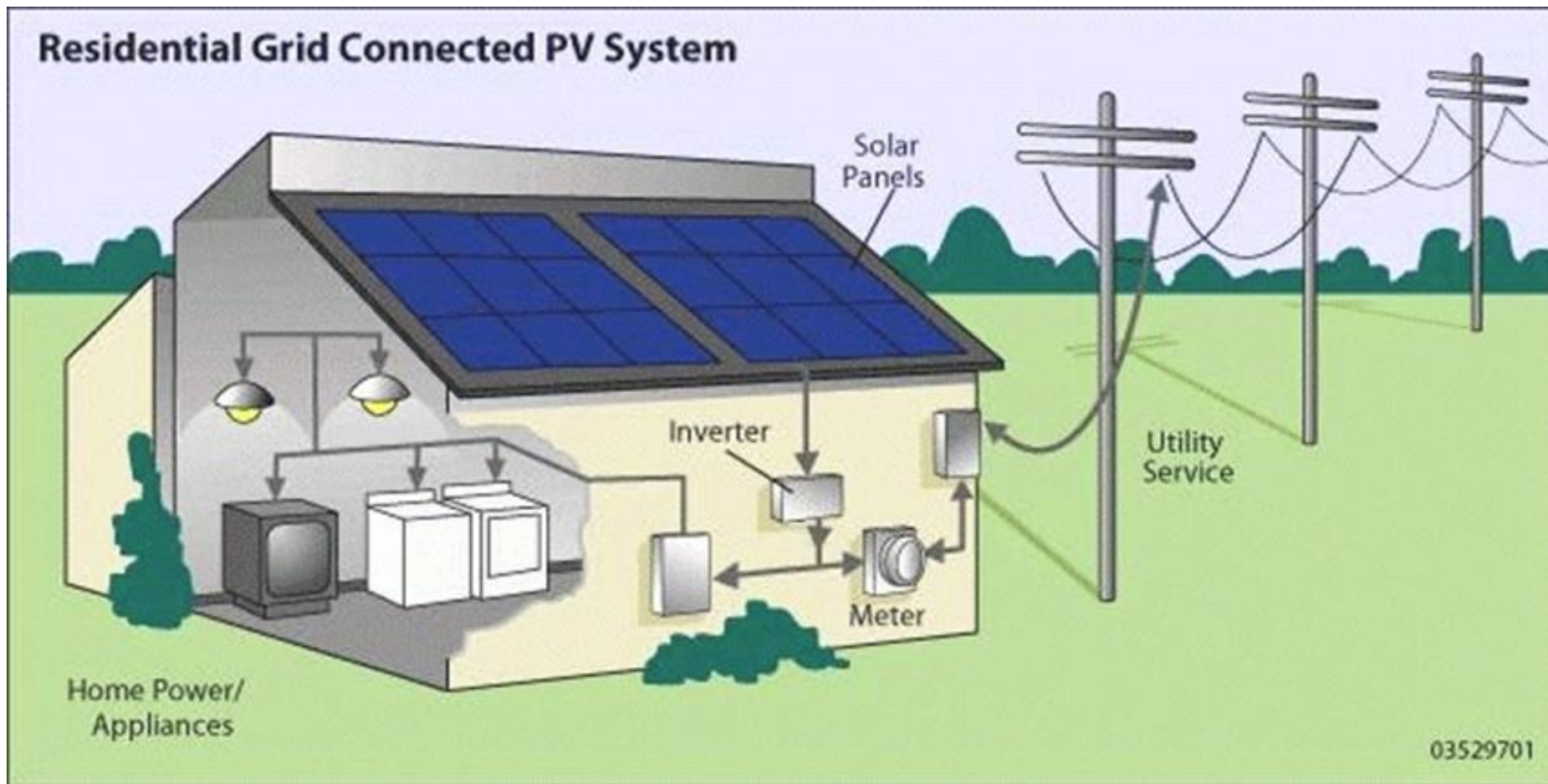
Silício amorfo
(a-Si)



- Eficiências dos módulos fotovoltaicos de Silício cristalino (c-Si) geralmente na faixa de 15% a 17%
- Melhores eficiências de módulos comerciais são superiores a 20%, segundo os fabricantes
- A China é o maior produtor de células e módulos fotovoltaicos, detendo mais de 60% da produção mundial, além de ser também o maior mercado mundial
- Mais de 90% do mercado mundial compreende módulos de c-Si

SFCRs - Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede

Sistema Fotovoltaico Residencial Conectado à Rede



Sistema *net metering* - RN Aneel 482/2012, sistema de compensação

CEPEL – 16,2 kWp



Sistema entre os pioneiros no Brasil (desativado p/ reforma)

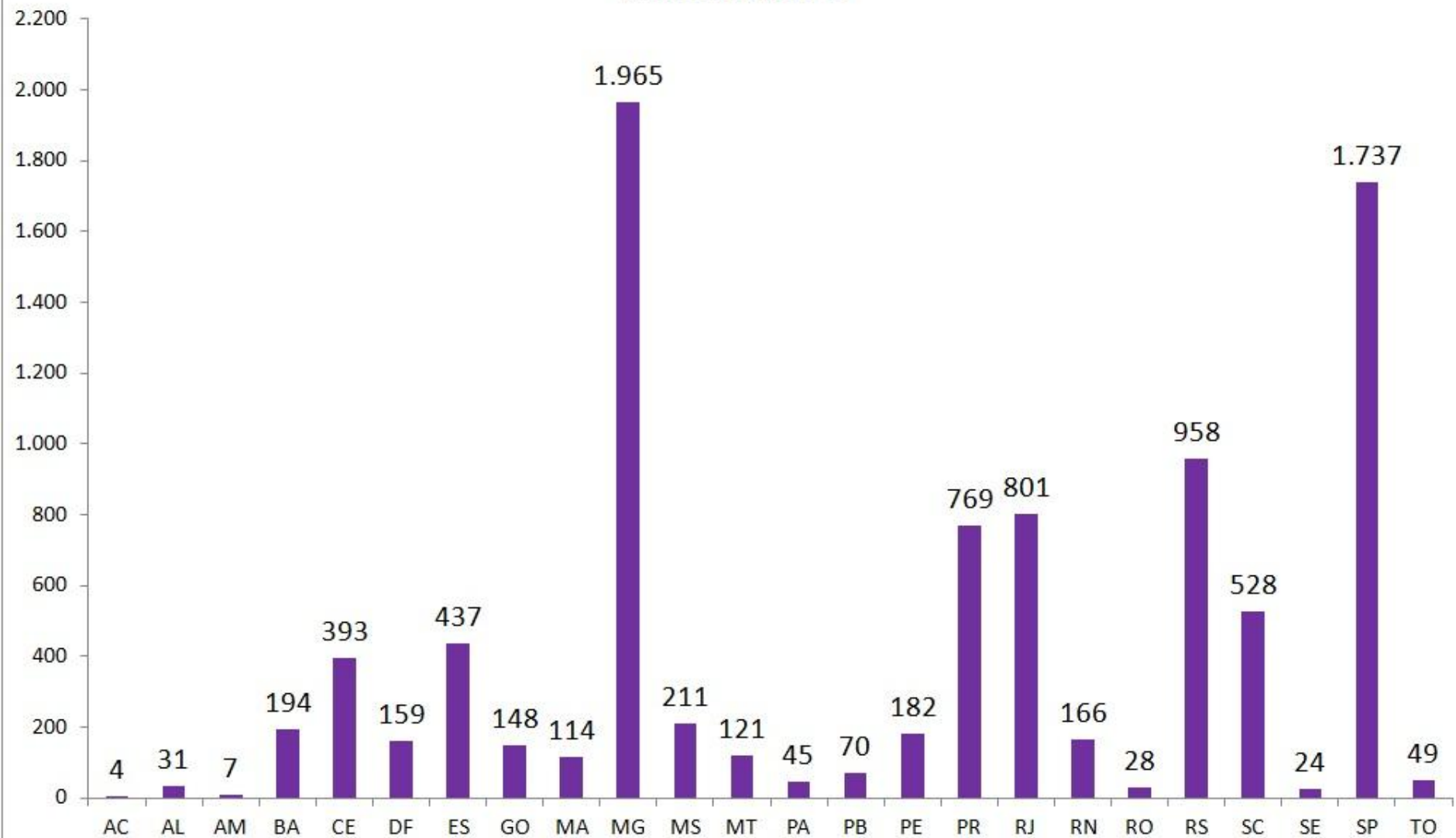
- Cobertura de um dos prédios do CEPEL (Bloco J, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro) - Instalado em dez/2002
- < 1% do consumo do CEPEL (não gera excedente de energia);
- Geração total de ~21,05 MWh/ano (média 2003 e 2004);
- Geração média mensal de 1,87 MWh/mês (max: ~2,1 MWh/mês; min: ~1,3 MWh/mês);
- Fator de capacidade anual 14,7% ($fc_{\text{mensal max}}: 17,5\%$; $fc_{\text{mensal min}}: 10,9\%$);

Número de Conexões Acumulado



Conexões micro- e minigeração - Brasil

Conexões por UF



UFVs – Usinas Fotovoltaicas

UFV Tauá, CE – 1MWp (ex-MPX, atual Eneva)

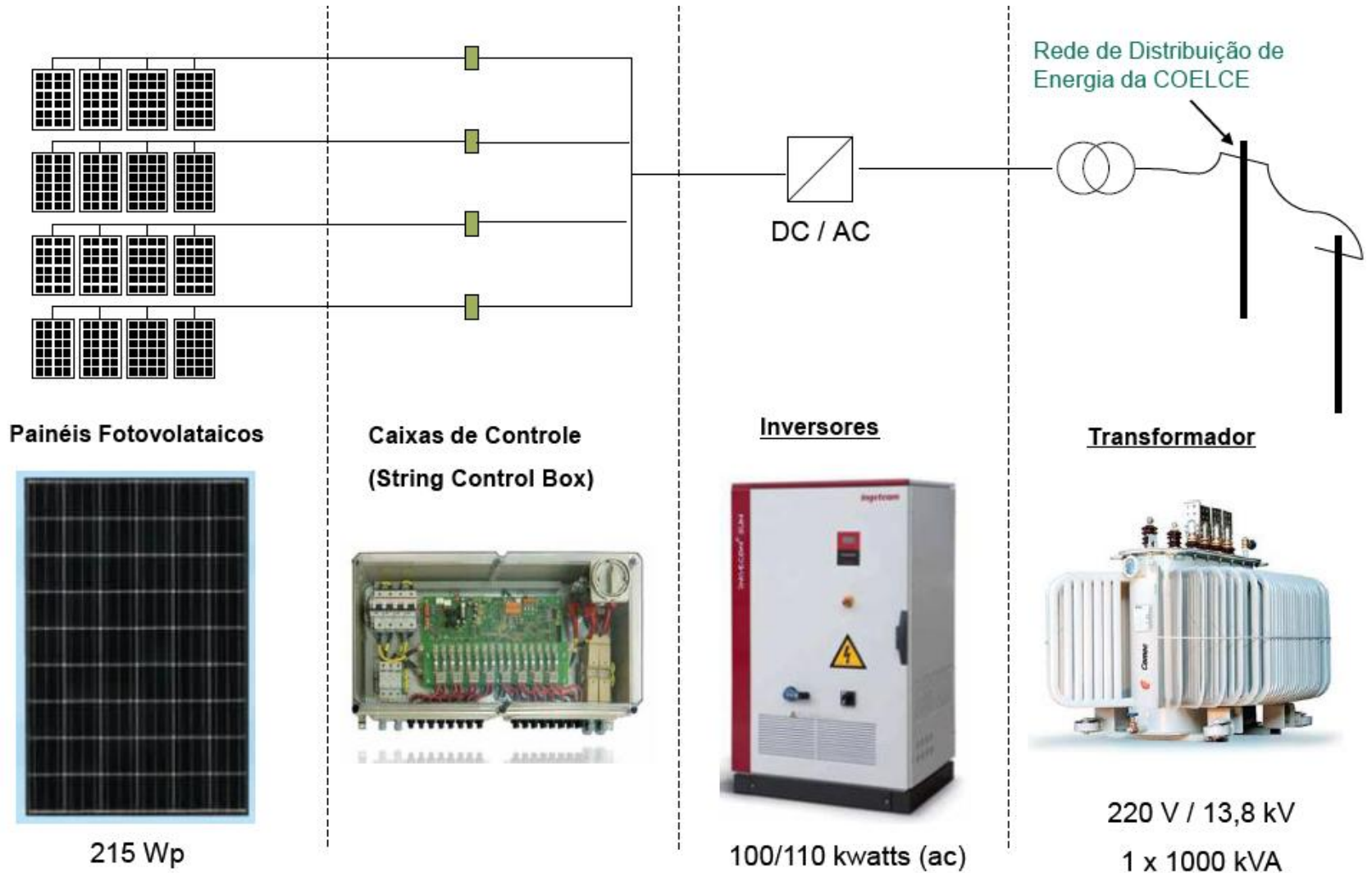


Fonte: www.mpx.com.br



- Primeira UFV no Brasil - operação comercial desde jul/11, interior do CE;
- 4.680 painéis fotovoltaicos instalados em uma área de 12 mil m².
- Geração 1621 MWh/ano; fc_{anual} : 18,4%; $fc_{\text{máximo}}$: 22,1% - ago/12 (dados de 2012)

Fonte: Apresentação V. Oliveira durante o evento Solar Energy LatAm 2013, Rio de Janeiro



Fonte: Apresentação V. Oliveira durante o evento Solar Energy LatAm 2013, Rio de Janeiro

SFIs - Sistemas Fotovoltaicos Isolados

- Alimentam cargas elétricas exclusivamente a partir de energia solar fotovoltaica; entre outras aplicações, destinam-se à eletrificação rural em locais não atendidos pela rede elétrica convencional (locais isolados, de difícil acesso, ilhas, etc.). Podem ser:

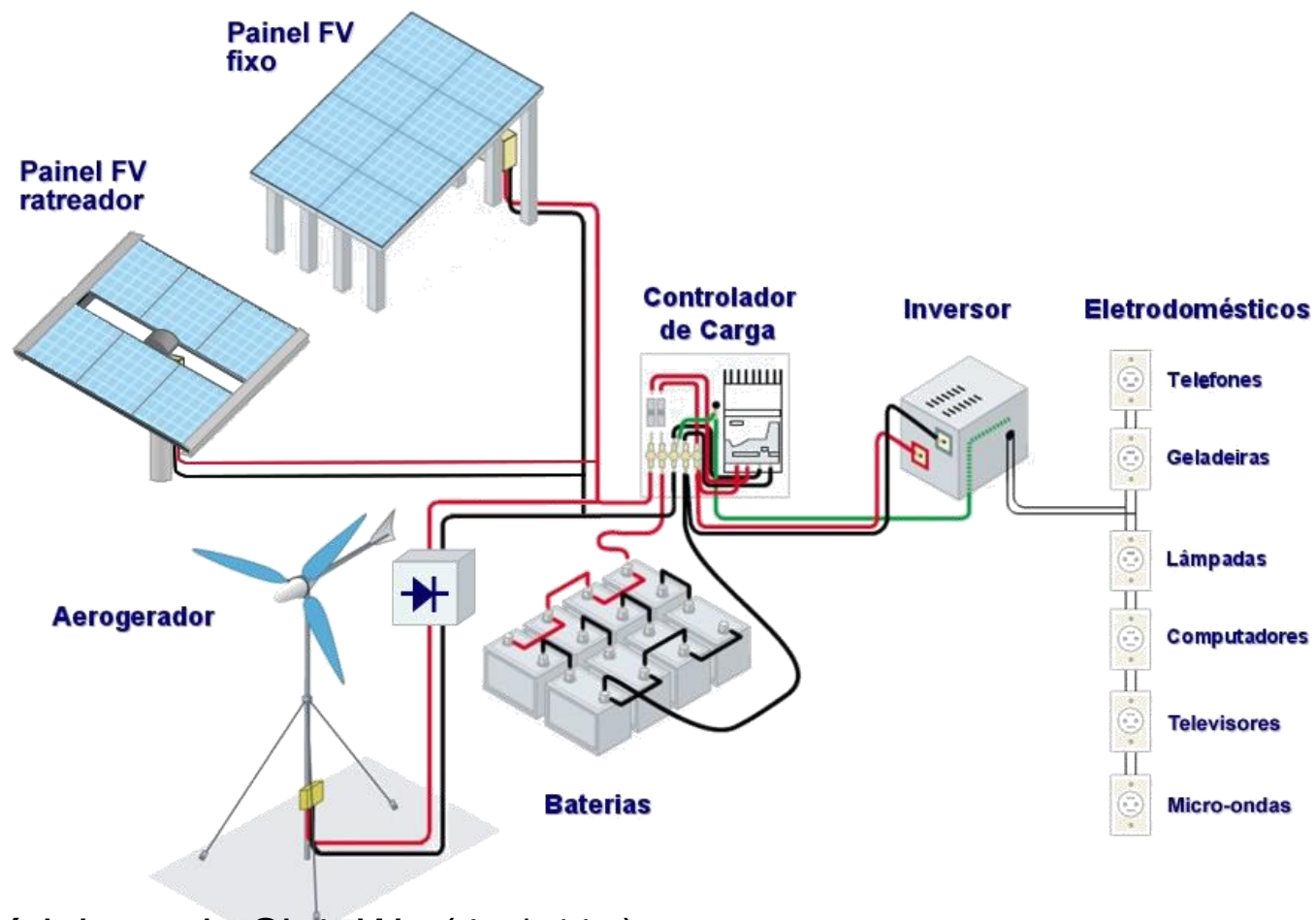
Sem Armazenamento: alimentam cargas somente diurnas (ex: sistemas de bombeamento d'água para consumo humano)

Com Armazenamento: atendem a cargas que necessitam de alimentação contínua (ex: escolas, postos de saúde, etc.), sendo o armazenamento de energia geralmente feito a partir de baterias Chumbo-ácido

Casa Solar Eficiente do CEPEL

- sistema fotovoltaico isolado - auto-suficiente em água e energia
- sistema FV geração energia; sistema FV de bombeamento d'água de poço; sistema solar térmico de aquecimento de água; gerador eólico;
- em operação desde mar/97
- sistema de monitoração
- ~16 mil visitantes
- cursos





Configuração

Painel PV ~2kWp - 44 módulos poly-Si 45Wp (4s * 11p)

Banco 750Ah/48V - 20 baterias Pb-H₂SO₄ 12V 105Ah (4s * 5p)

Inversor 4kW, 48Vdc/120Vac

Sistemas Isolados - Resolução 493/2012 – jun/2012

- Estabelece condições para fornecimento de energia através de:
 - MIGDIs - Microssistema Isolado de Geração e Distribuição de Energia Elétrica) - “minirrede”;
 - SIGFIs – Sistema Individual de Geração de Energia Elétrica com Fonte Intermitente;
- Sistemas isolados para eletrificação rural (sistemas com baterias);
- Pode ser sistema misto c.c./c.a.;
- Medidor é opcional, podendo ser cobrado por estimativa, sem que se aplique custo de disponibilidade;
- Estabelece requisitos técnicos, como DIC etc.;
- MIGDI pode ser em período reduzido, com mínimo 8h/dia com justificativa técnica e econômico-financeira;

Escola Beneficiada - Seringal Iracema



Família Beneficiada - Seringal Dois Irmãos

Fonte: Eletrobras

Sistemas fotovoltaicos instalados no Município de Xapuri-AC



Araras Grande Norte-PA

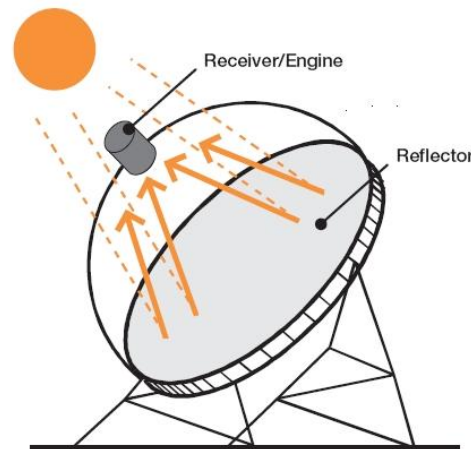
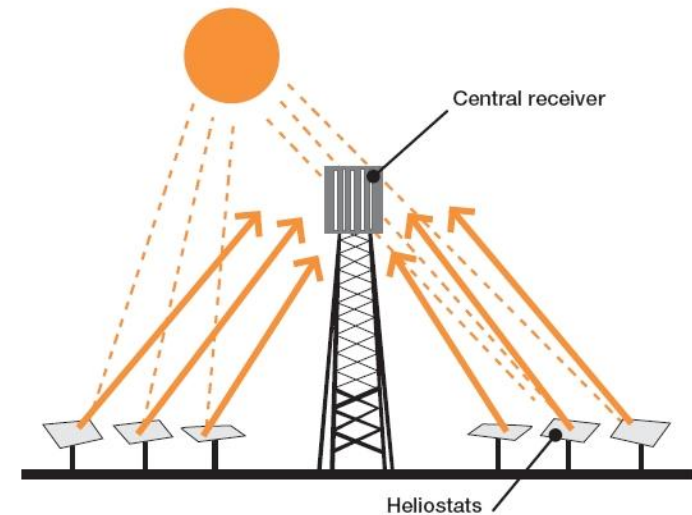
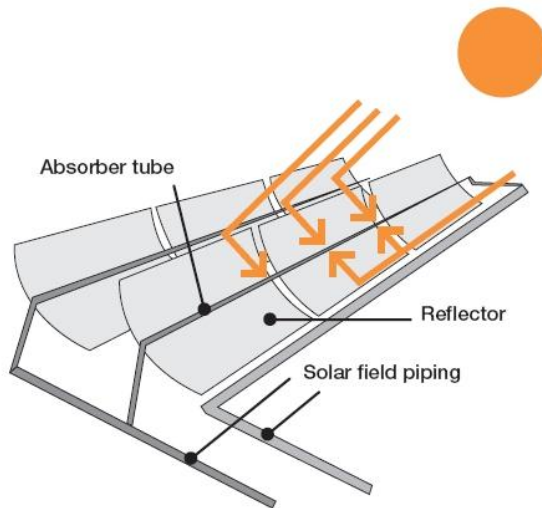


Fonte: Eletrobras Amazonas Energia

Fonte: SS Solar

Geração heliotérmica de energia elétrica

- **Principais tecnologias com concentradores**
 - Cilindros parabólicos, torre central e discos parabólicos.



O Recurso solar no Brasil

| Localidade | Estimativa da Irradiação direta normal (kWh/m ²) | | | |
|-------------------|--|----------------------------|----------------------------|-----------------|
| | diária média anual | máxima diária média mensal | mínima diária média mensal | Anual acumulada |
| Mojave (EUA) | 7,7 | - | - | 2.800 |
| Almeria (Espanha) | 5,9 | - | - | 2.140 |
| Barra (BA) | 5,9 | 7,7 | 4,2 | 2.139 |
| Petrolina (PE) | 5,6 | 6,5 | 4,5 | 2.040 |
| Cabrobó (PE) | 5,5 | 6,9 | 4,2 | 2.004 |

O Brasil possui uma área com irradiação comparável às áreas onde atualmente estão sendo construídas usinas solares com concentradores

• Geração Heliotérmica

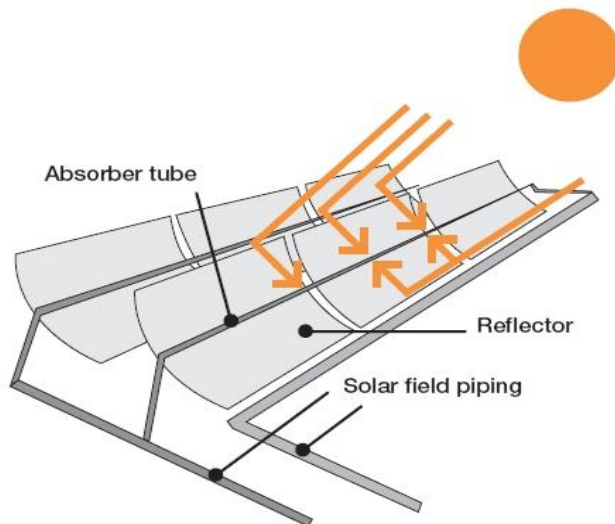
- Produção de energia elétrica a partir da conversão da energia solar em calor com alta temperatura com emprego sistemas de concentração da irradiação solar direta.
- O calor produzido pela concentração da energia solar é utilizado em um ciclo térmico convencional de potência, com emprego de turbinas a vapor ou a gás, ou com a utilização de motores Stirling.

• Requisitos para a implementação de sistemas de Geração Heliotérmica

- Níveis elevados de irradiação solar direta, topografia adequada, baixa incidência de ventos, infraestrutura de acesso (rodovias), disponibilidade de água e acesso ao sistema interligado para conexão à rede.
- Nas plantas sem armazenamento térmico, há necessidade também de disponibilidade de uma pequena fração de combustível. com o objetivo de manter a estabilidade operacional de geração de eletricidade.

Tecnologia de Cilindros Parabólicos

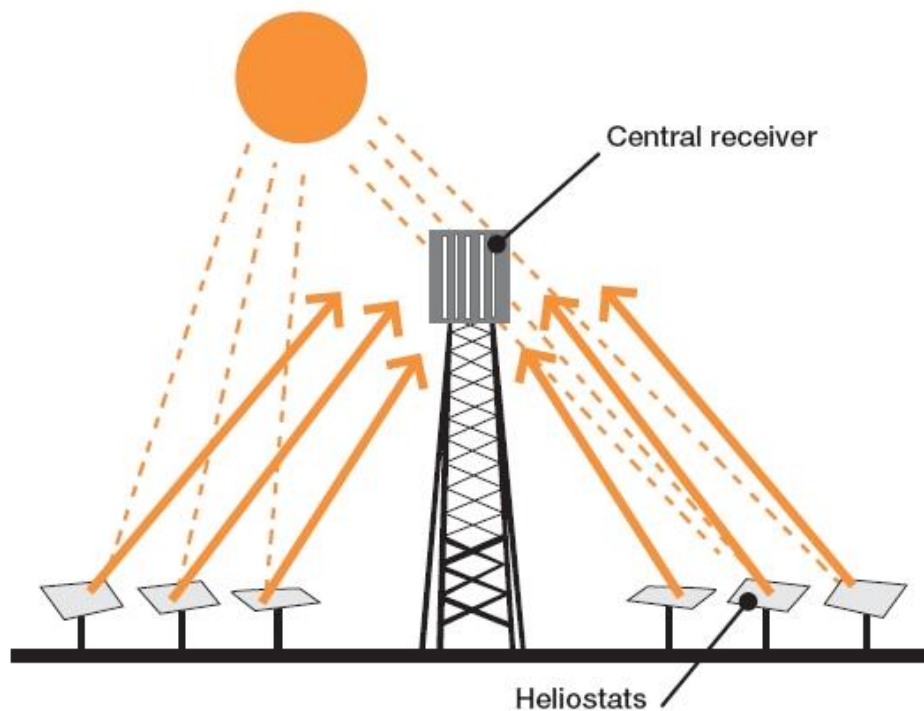
- utiliza semicilindros com seção parabólica para concentrar a irradiação solar direta em um tubo absorvedor, no qual circula um fluido térmico que transporta a energia, para ser utilizada num ciclo Rankine convencional



Solar Electric Generation Station – SEGS
354 MW (9 unidades), Deserto de Mojave, USA
0,65 km²/100MW, 2300 a 2900 kWh/m².ano

Tecnologia de Torre Central

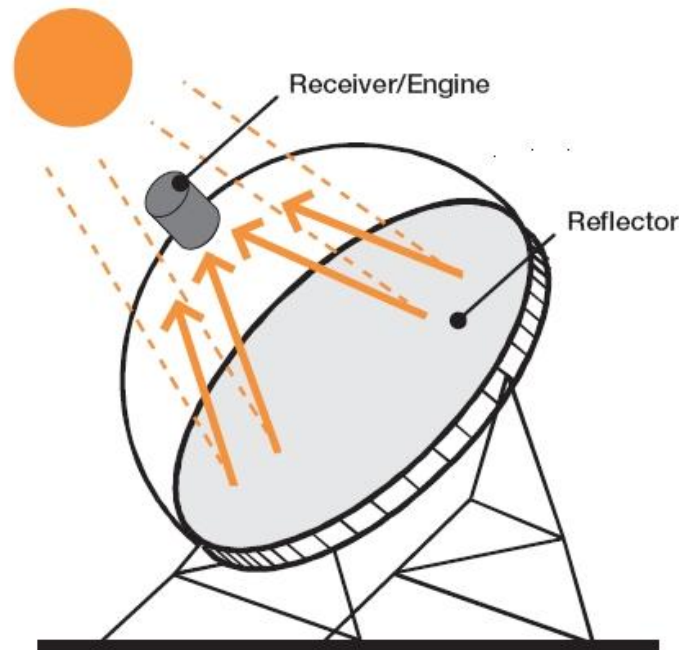
- a energia da irradiação é concentrada no alto de uma torre em um único absorvedor por meio de espelhos (heliostatos)



Planta PS10 (11 MW, com armazenagem de energia), Espanha, Sevilla.

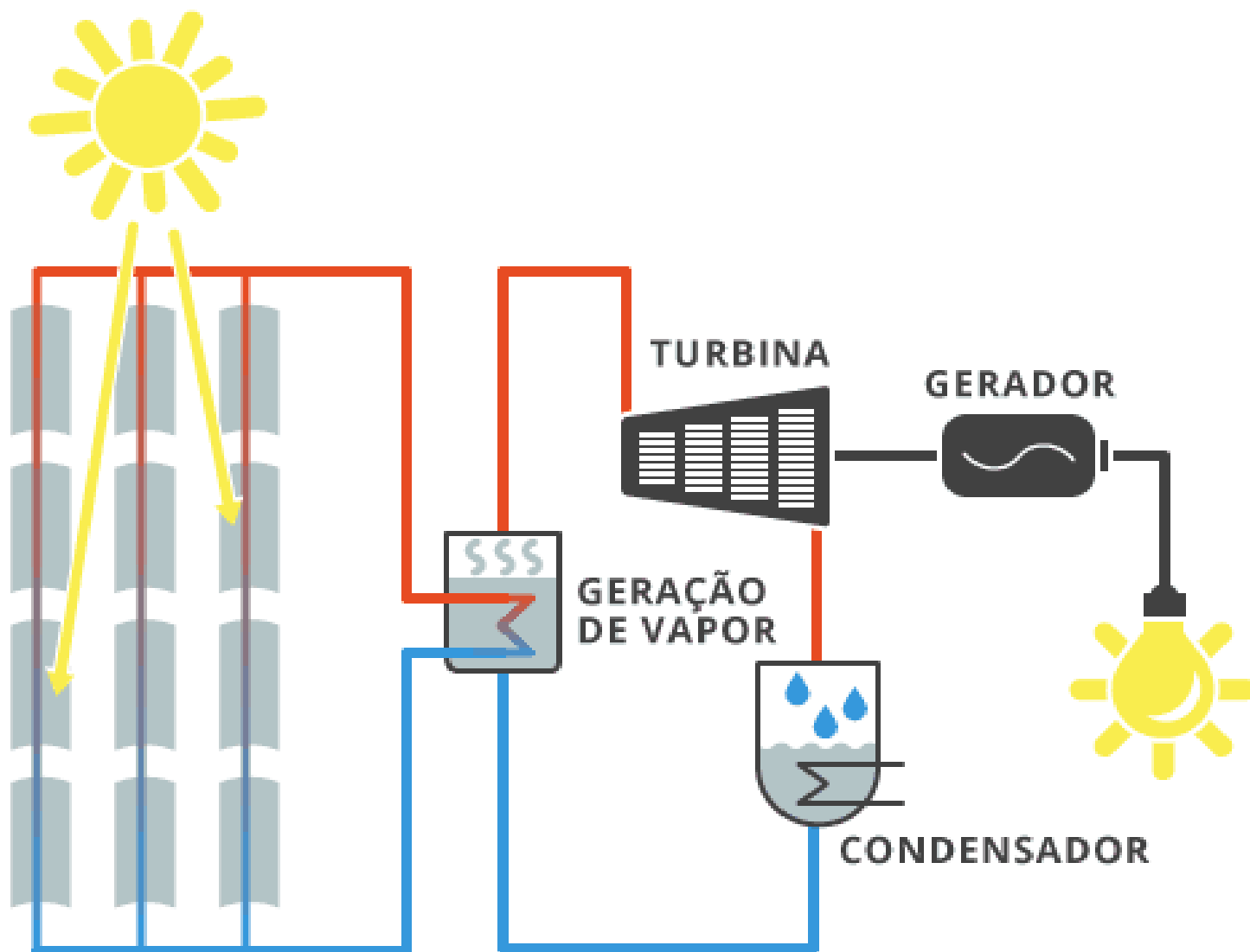
Tecnologia de Discos Parabólicos

- empregados coletores no formato de discos parabólicos pequenos que concentram a irradiação no ponto focal dos coletores. Neste ponto se localiza um absorvedor acoplado a um motor Stirling ou uma pequena turbina

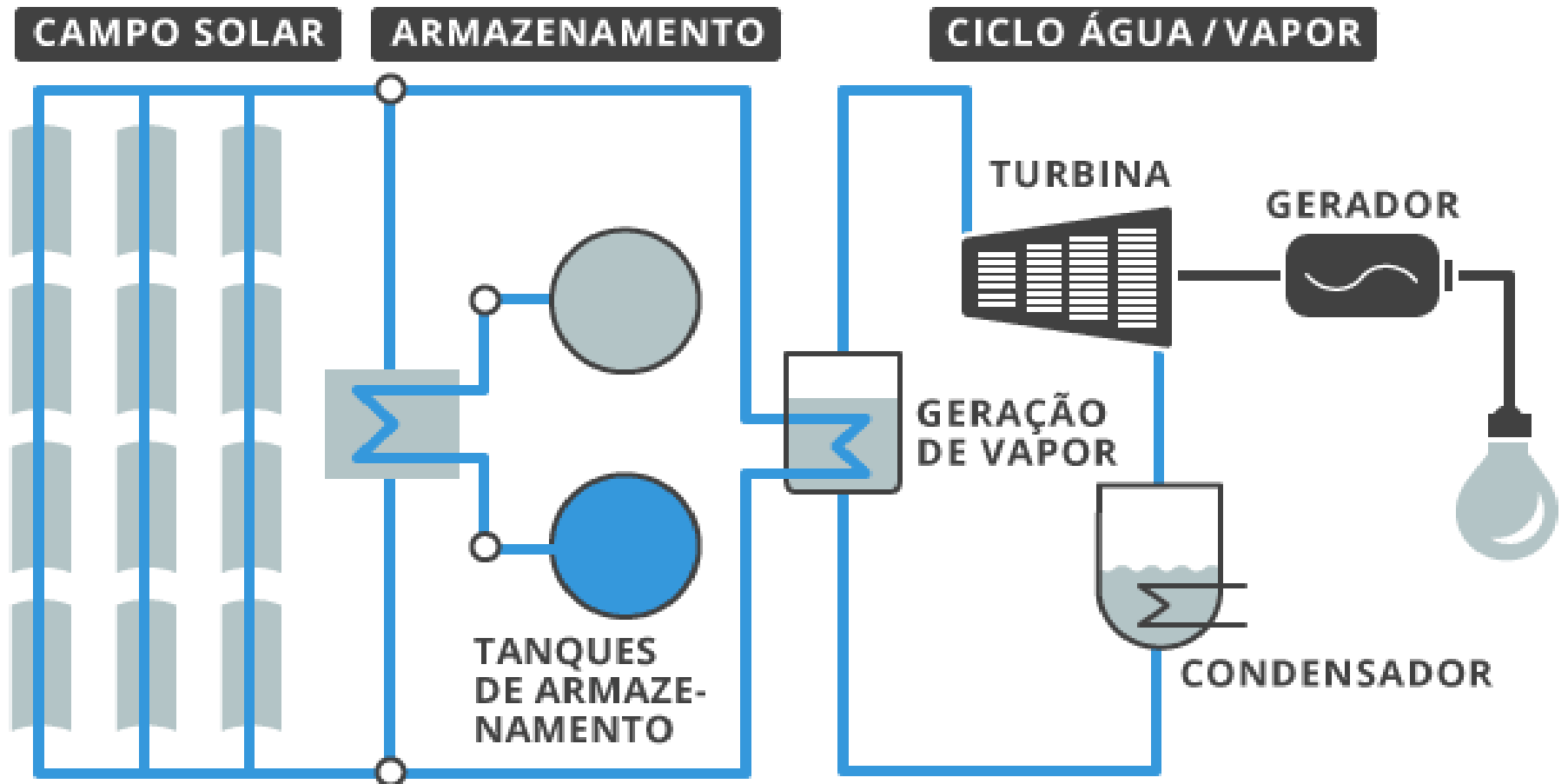


Concepções com potência nominal 10 kW

CICLO HELIOTÉRMICO SIMPLIFICADO SEM ARMAZENAMENTO



CICLO HELIOTÉRMICO COM ARMAZENAMENTO



Comparação entre as tecnologias de CSP

| | Cilindro parabólico | Torre central | Disco parabólico |
|-------------------|---|--|---|
| Aplicações | <ul style="list-style-type: none">• Plantas conectadas à rede, fornecimento de calor a plantas industriais.• Maior potência instalada e operada atualmente em unidade individual: 80 MW.• Existem projetos em desenvolvimento da ordem de centenas de MW. | <ul style="list-style-type: none">• Plantas conectadas à rede, fornecimento de calor (alta temperatura) a plantas industriais.• Maior potência instalada e operada atualmente: 10 MW.• Existe projeto em desenvolvimento de 20 MW. | <ul style="list-style-type: none">• Aplicações com potências atualmente utilizadas na faixa de dezenas de kW. |

Comparação entre as tecnologias de CSP

| | Cilindro parabólico | Torre central | Disco parabólico |
|------------------|--|--|--|
| Vantagens | <ul style="list-style-type: none">• Comercialmente disponível – experiência operacional superior a 10 bilhões de kWh; temperatura de operação até 500 °C (comercialmente provada até 400 °C).• Modularidade• Melhor fator de utilização do espaço físico (uso do terreno)• Possibilidade de armazenamento térmico | <ul style="list-style-type: none">• Boas perspectivas aumento da eficiência na captação e concentração da energia solar; temperatura de operação de até 1000 °C (provada de 565 °C na planta de 10 MW)• Possibilidade de armazenamento térmico. | <ul style="list-style-type: none">• Maior eficiência na conversão solar/elétrica• Modularidade• Operação provada em protótipos |

Comparação entre as tecnologias de CSP

| | Cilindro parabólico | Torre central | Disco parabólico |
|---------------------|--|--|---|
| Desvantagens | <ul style="list-style-type: none">• Menor eficiência solar/elétrica teórica em relação às outras duas tecnologias.• O emprego da tecnologia com óleo térmico na transferência de calor que é a tecnologia atualmente comercial e está limitada à temperatura de operação em 400 °C. | <ul style="list-style-type: none">• Desempenho, custos de investimento e de operação ainda precisam ser provados em operação comercial.• Exige área maior do que a tecnologia de cilindros parabólicos. | <ul style="list-style-type: none">• Confiabilidade precisa ser melhorada.• Os custos projetados para produção em larga escala necessitam de validação. |

Obrigado pela atenção!

Ary Vaz

CEPEL/DTE – ary@cepel.br
2598-6180



Ministério de
Minas e Energia