

Conceitos para a expansão da geração

Gabriel Konzen

Analista

Rio de Janeiro, RJ

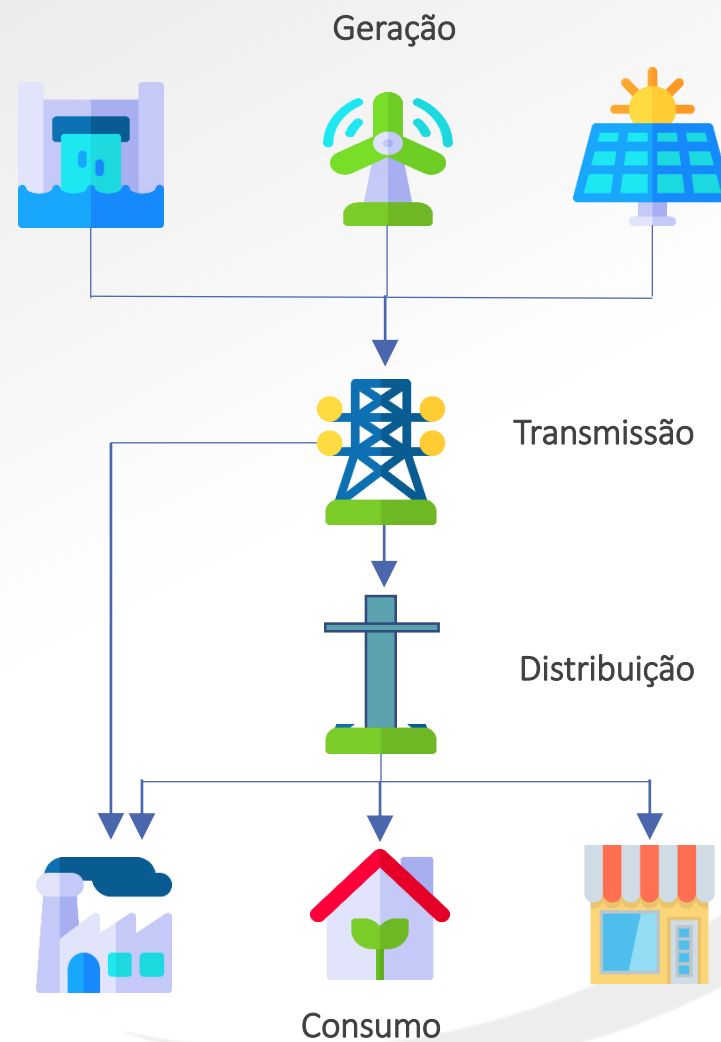
21 de setembro de 2020

Empresa de Pesquisa Energética
Ministério de Minas e Energia





O caminho da eletricidade



Icons made by Freepik from www.flaticon.com

Micro e minigeração: um elemento adicional para o sistema elétrico

Regulamentado pela ANEEL em 2012 (REN 482): até 1 MW para mesma titularidade

Revisto pela REN 687/2015: até 5 MW para diversos titulares

Revisto pela REN 786/2017: proibição de unidades existentes de migrar para GD

Micro e Mini GD

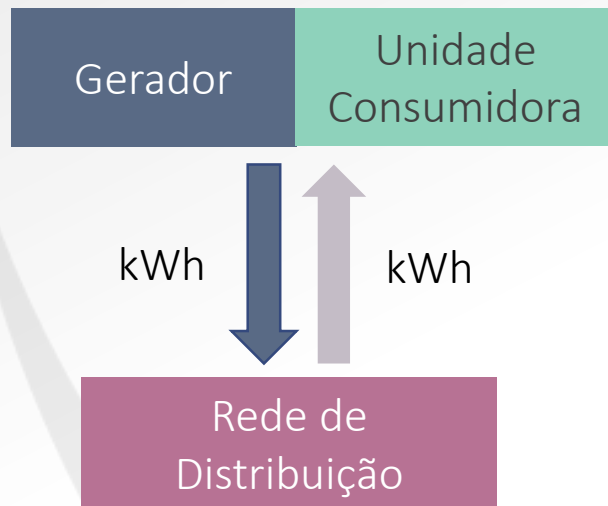
Qualquer fonte

renovável + cogeração
qualificada

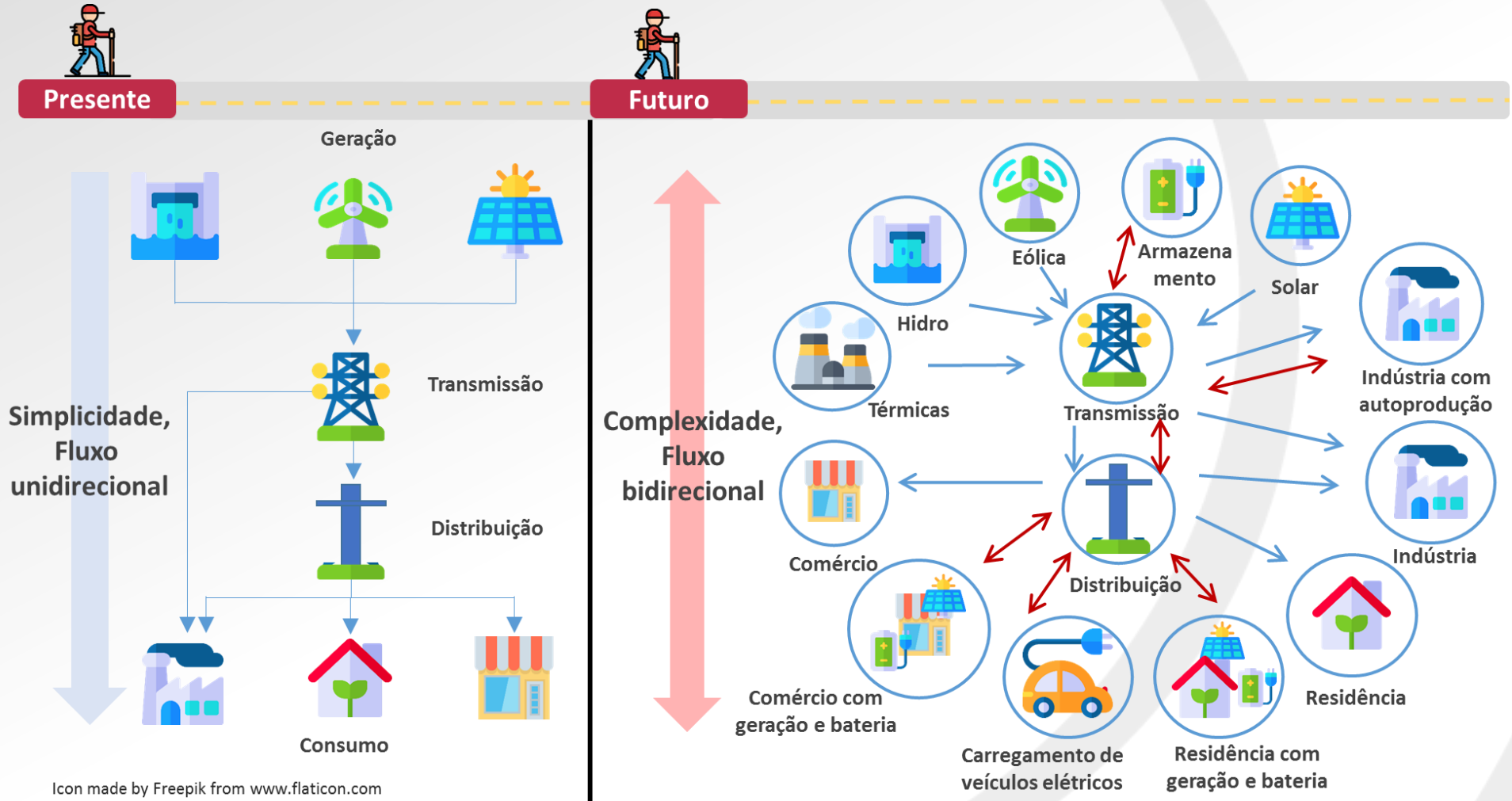


Até 5
MW

Investimento é
uma decisão
individual do
consumidor



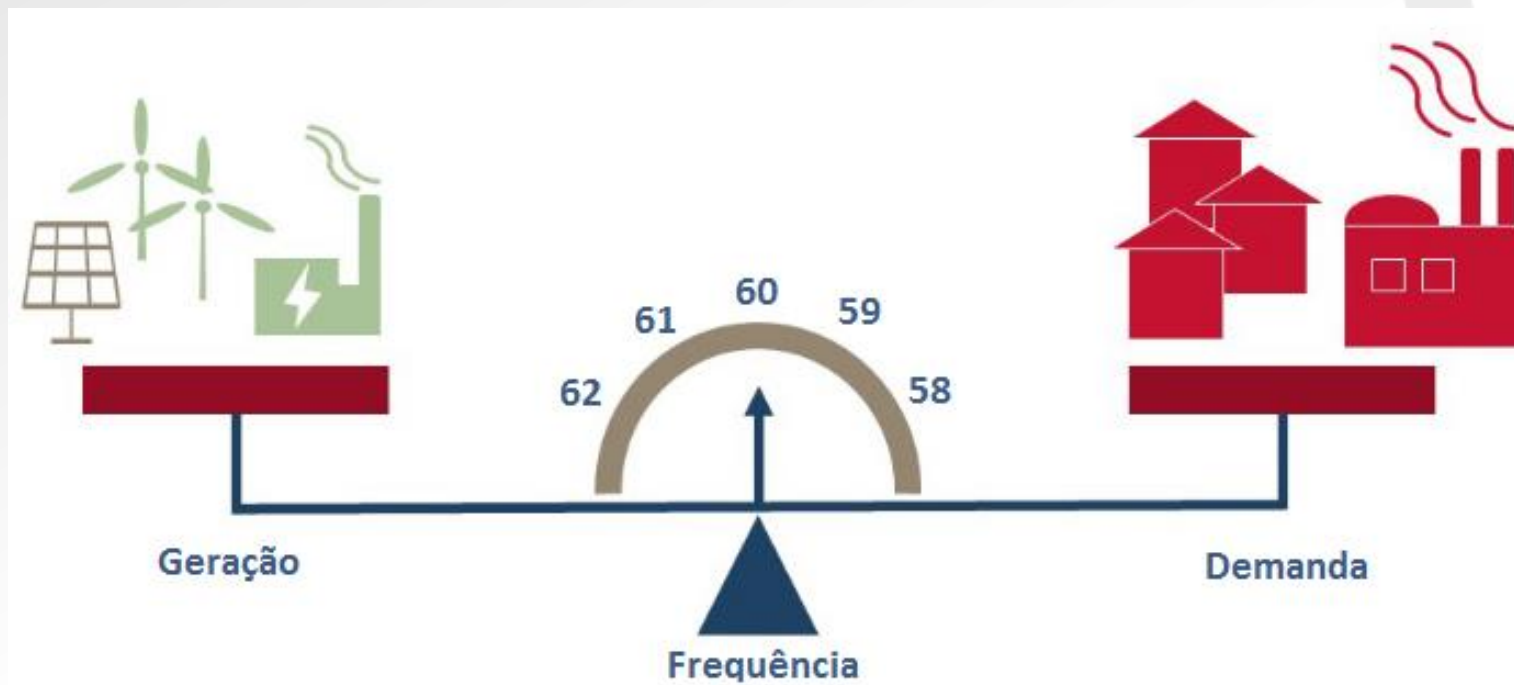
A estrutura presente e futura do setor elétrico



Maior número de agentes; Decisão nem sempre com base em aspectos econômicos -> mais incerteza para o planejamento

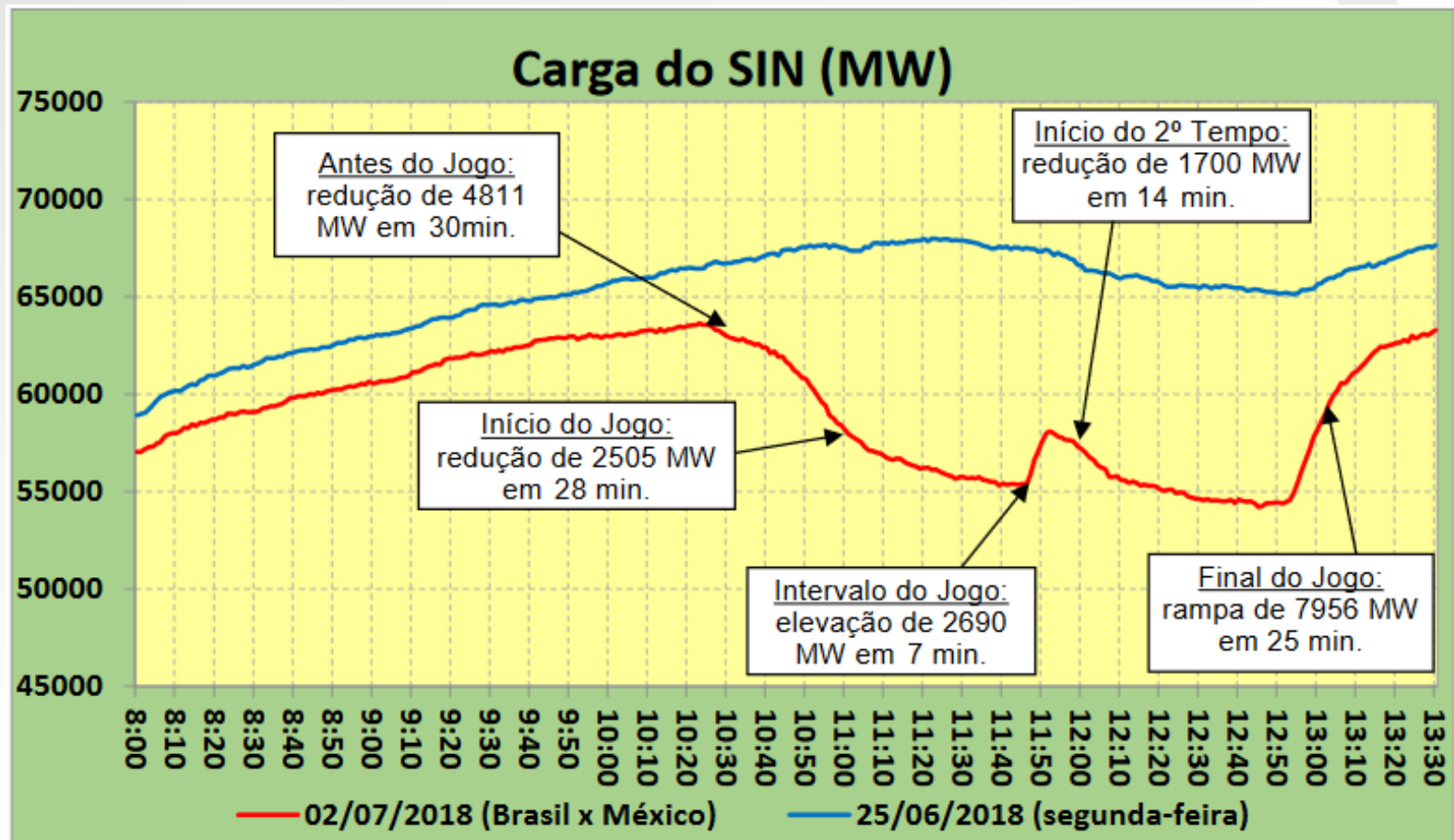
Conceitos Fundamentais

1: O sistema precisa estar em equilíbrio em todo momento



Mudanças na carga exigem adaptações na operação das usinas em tempo real

É algo que sempre fazemos, mesmo nas situações mais exigentes

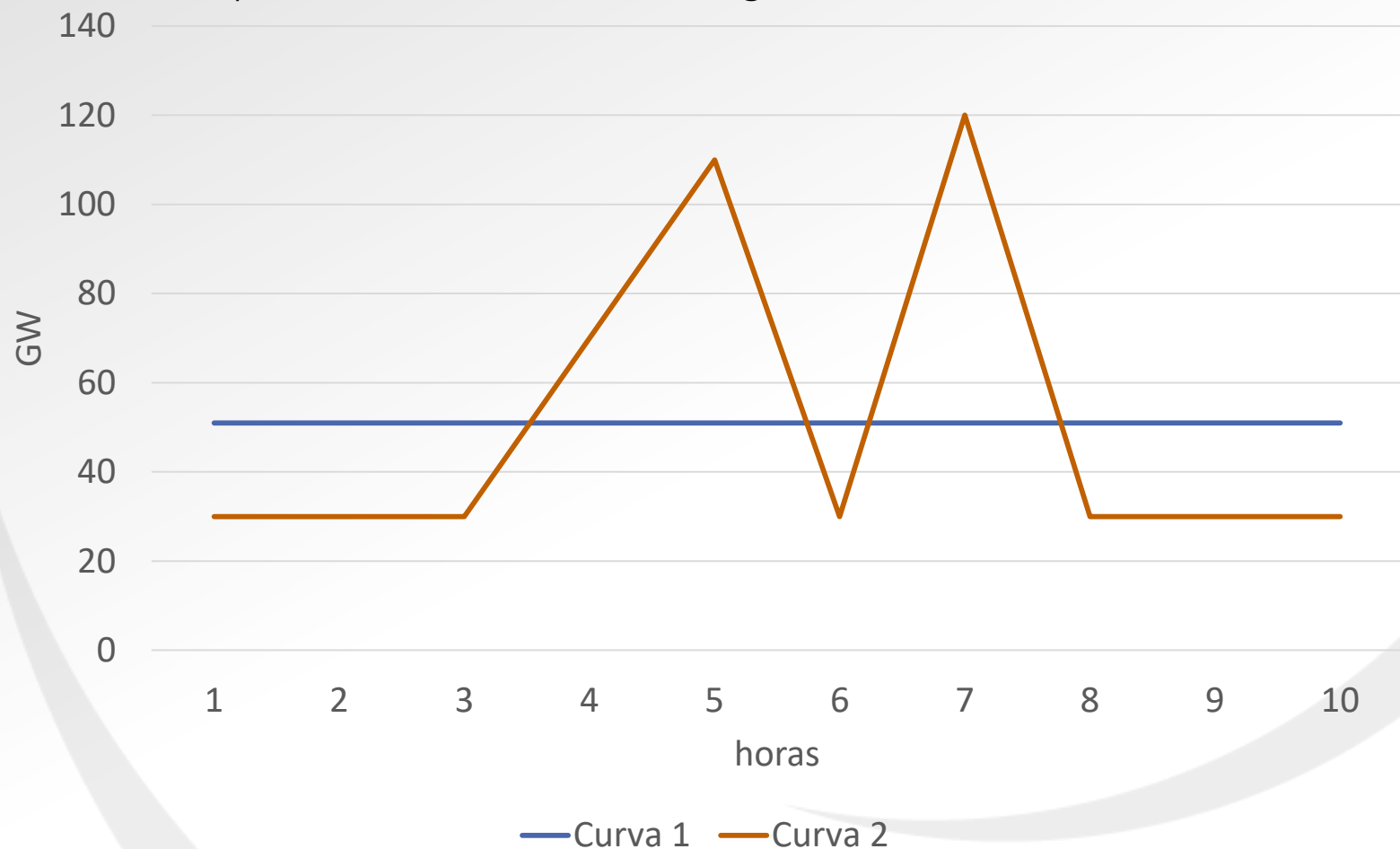


Fonte: ONS

Conceitos Fundamentais

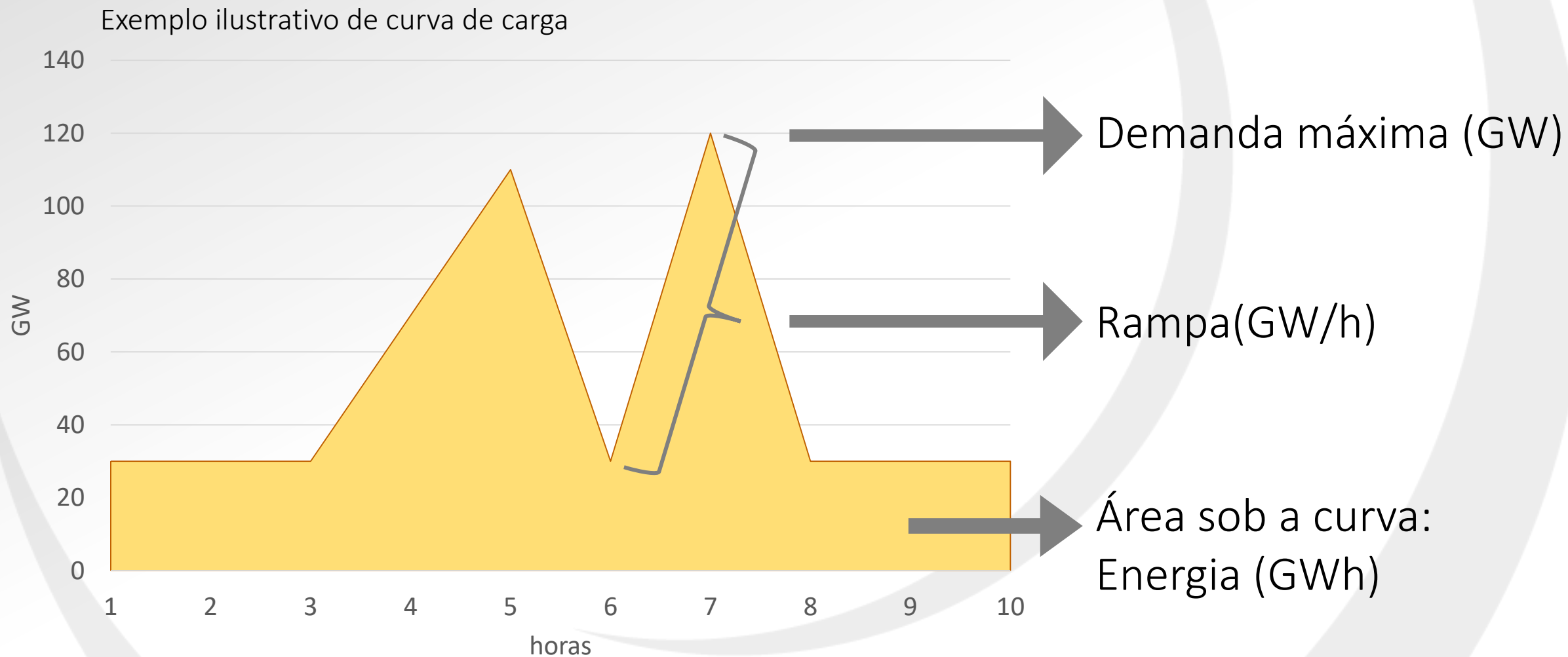
2: Precisamos mais que energia

Exemplo ilustrativo de curva de carga



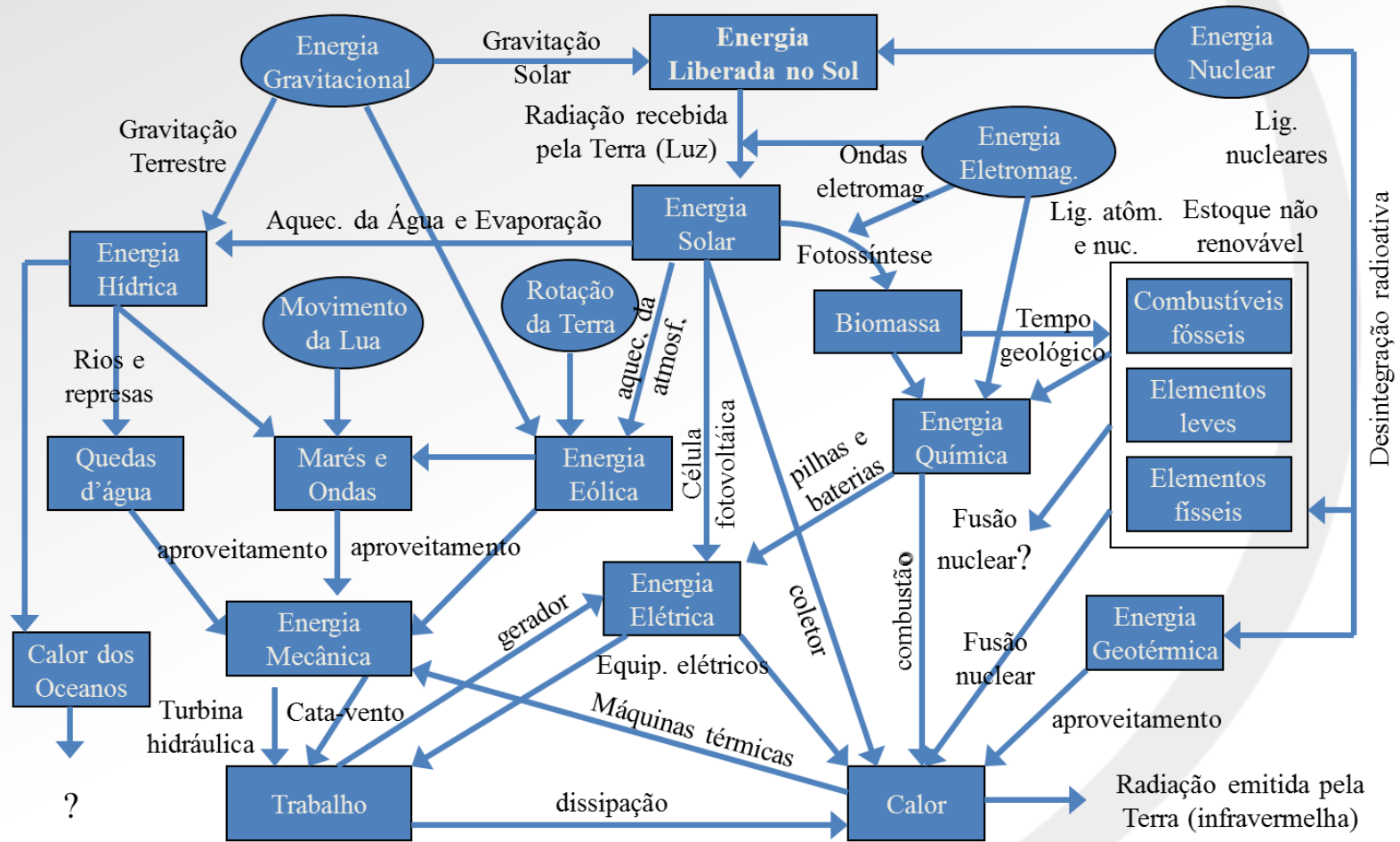
Duas curvas resultam no mesmo consumo (500 GWh), mas necessidades de potência e rampa são bem diferentes.

Conceitos Fundamentais



RECURSOS ENERGÉTICOS

Origem e Transformações Energéticas

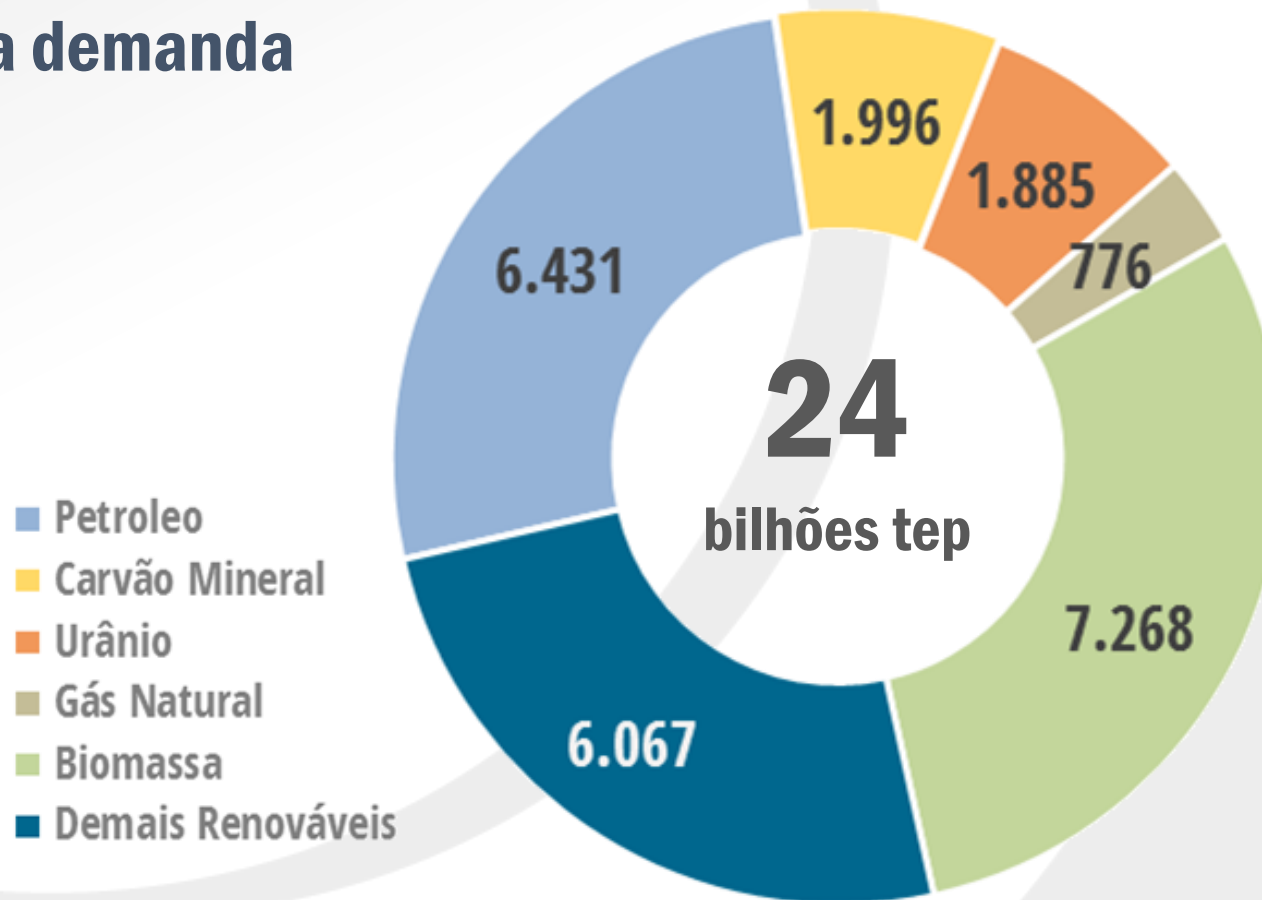


Fonte: Adaptado de LA ROVERE et al., 1985.

Recursos disponíveis para a expansão 2015-2050

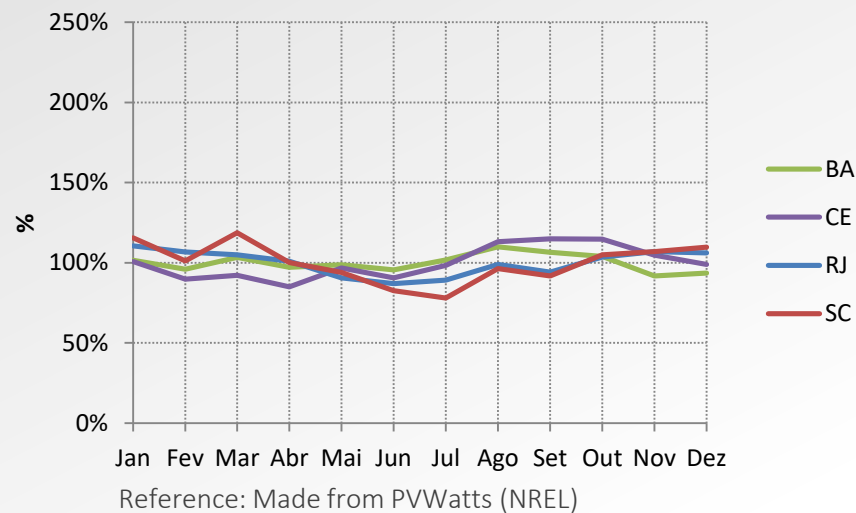
Abundância e diversidade de recursos energéticos, tanto fósseis como renováveis. Os recursos superam largamente a demanda interna.

Só a parcela dos recursos mais facilmente acessíveis representa 60% a mais do que toda a demanda do período, de 15 bilhões de tep.

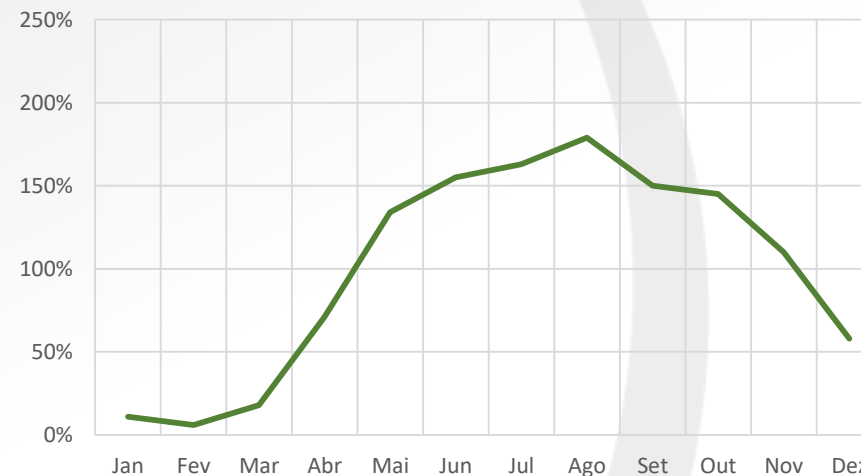


Sazonalidade e complementaridade

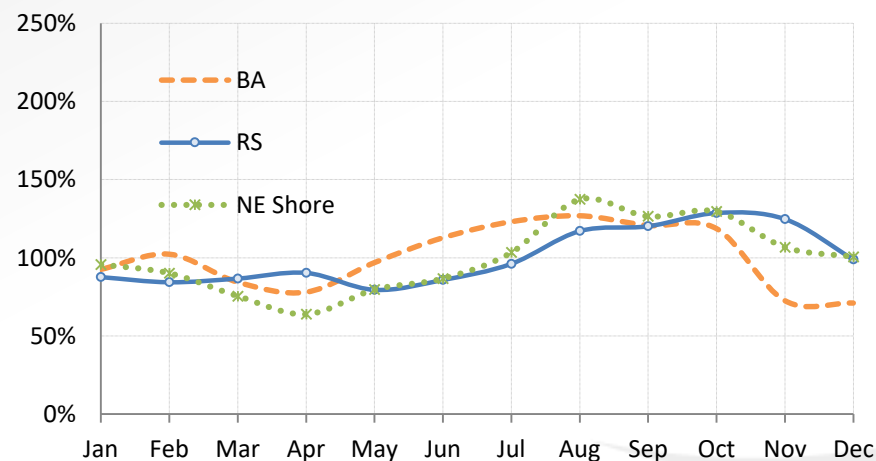
Varição Intra-anual: Fotovoltaica



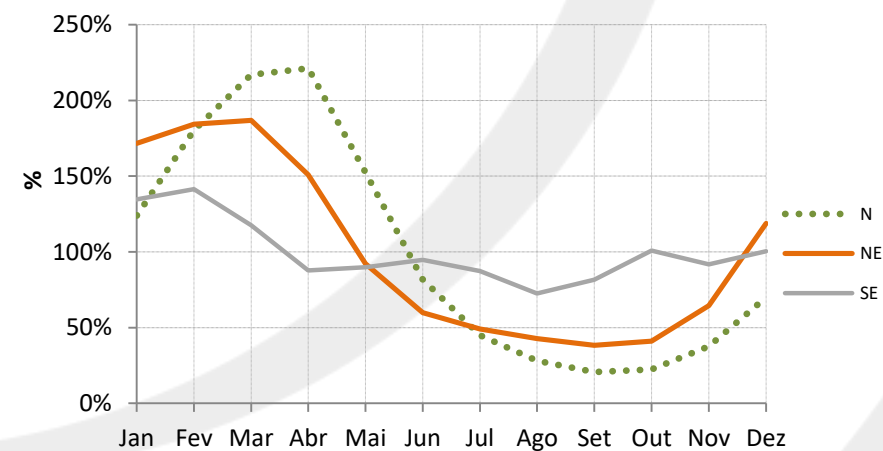
Varição Intra-anual: Bagaço de Cana



Varição Intra-anual: Eólica



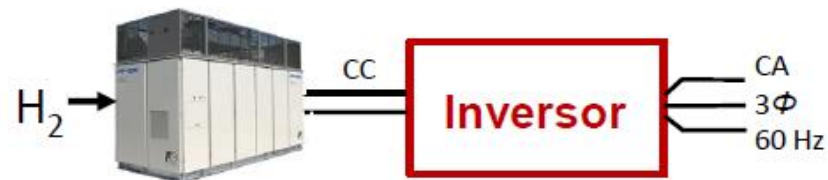
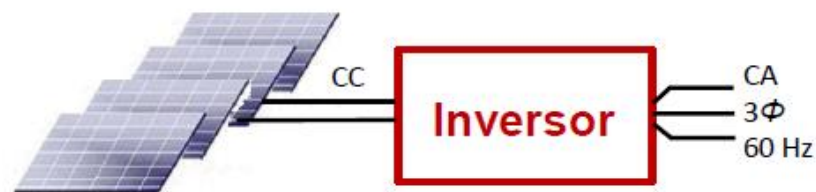
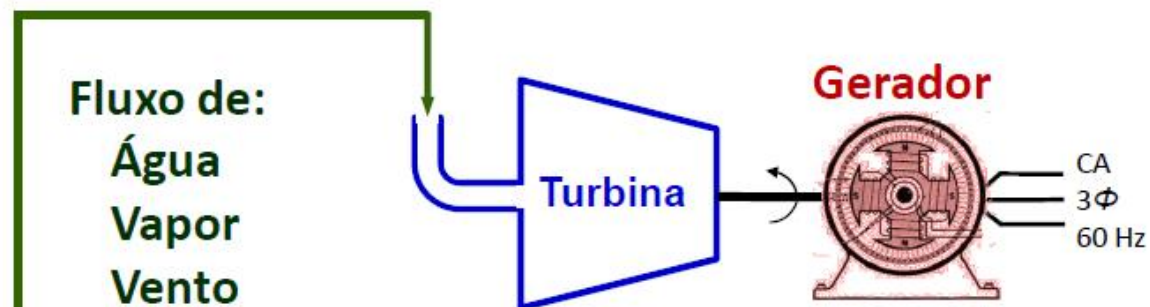
Varição Intra-anual: Vazões de água



CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DAS FONTES

Processos de Geração de Energia Elétrica

1. Conversão Eletromecânica
 - Hidrelétrica
 - Termelétrica
 - Eólica
 - Heliotérmica
 - Outras
2. Conversão Direta
 - Fotovoltaica
 - Célula a combustível



Fonte: Djalma Falcão, 2017

Hidrelétricas

$$P=Q.g.h.n$$

P -> Potência (kW)

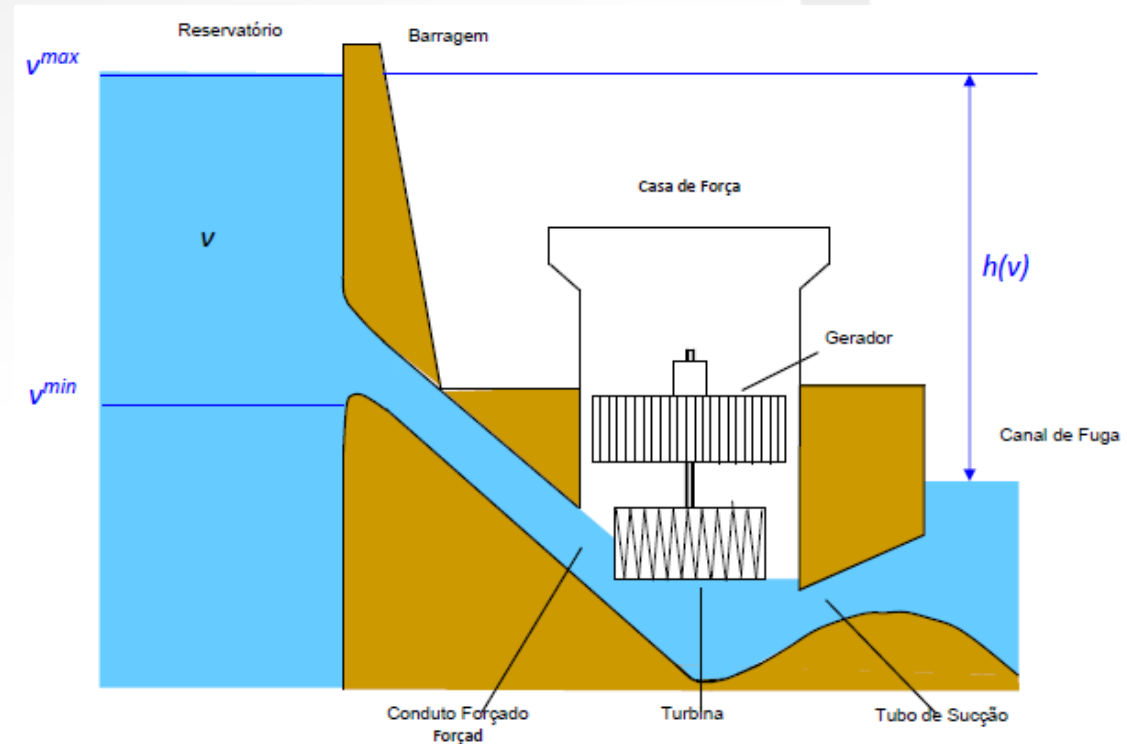
Q -> Vazão (m³/s)

g -> aceleração da gravidade

h -> altura líquida

n -> rendimento

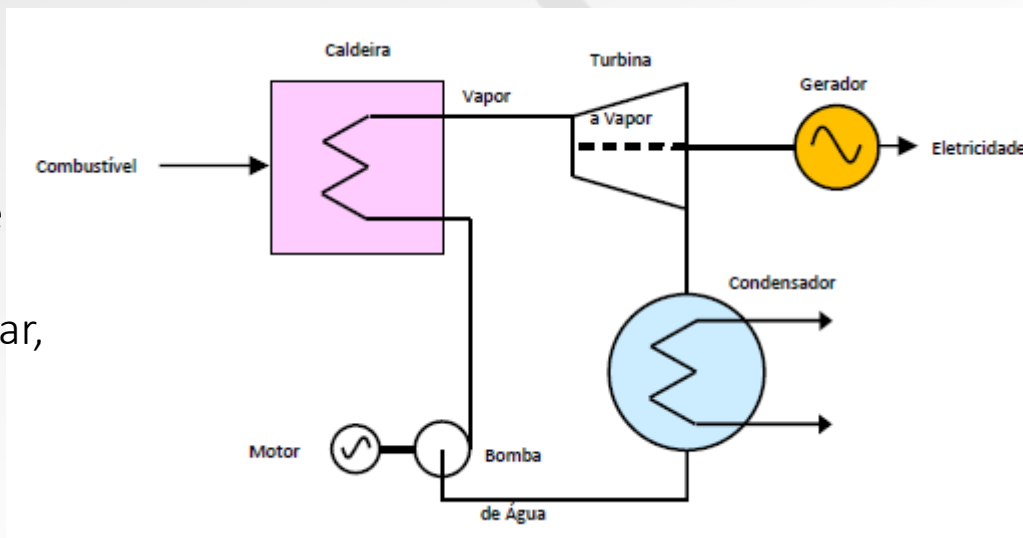
Atributo	Hidrelétrica
Custo da Energia	Verde
Atende a Ponta?	Amarelo
Flexível (rampa)	Verde
Emissões de GEE	Verde
Flexibilidade Locacional	Vermelho
Tempo de Construção	Vermelho



Fonte: Djalma Falcão, 2017 e EPE

Termelétricas a Vapor

- Queima de um combustível aquece água -> vapor movimenta turbina
- Combustível: Carvão, biomassa, solar, nuclear, etc.
- Ciclo Rankine
- Rendimento na faixa de 30-40%



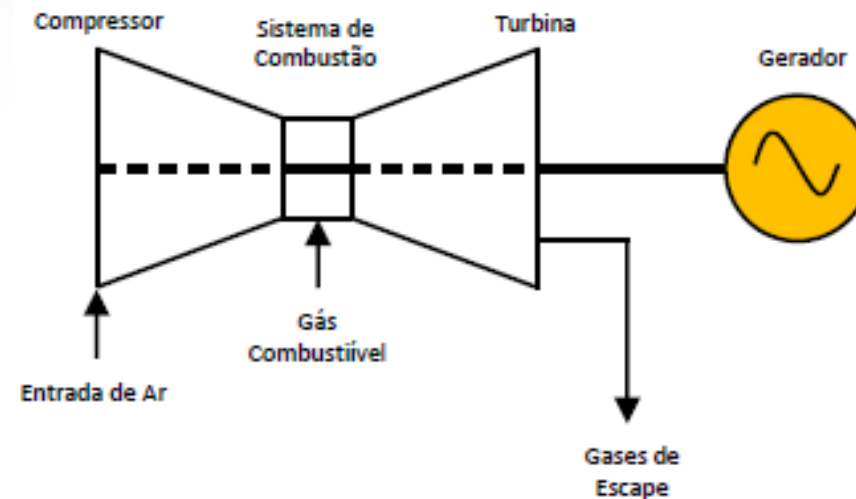
Atributo	Carvão	Biomassa	Heliotérmica	Nuclear
Custo da Energia	Amarelo	Amarelo	Vermelho	Vermelho
Atende a Ponta?	Verde	Amarelo	Verde	Verde
Flexível (rampa)	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Vermelho
Emissões de GEE	Vermelho	Verde	Verde	Verde
Flexibilidade Locacional	Amarelo	Verde	Amarelo	Amarelo
Tempo de Construção	Amarelo	Verde	Amarelo	Vermelho

Fonte: Djalma Falcão, 2017 e EPE

Termelétricas a Gás

- Combustível é queimado com ar pressurizado e movimentam uma turbina
- Combustível: Gás Natural (GN), Querosene, Diesel, etc. (gasosos ou líquidos);
- Ciclo Brayton
- Rendimento na faixa de 40-44%

Atributo	GN Ciclo Simples
Custo da Energia	
Atende a Ponta?	
Flexível (rampa)	
Emissões de GEE	
Flexibilidade Locacional	
Tempo de Construção	

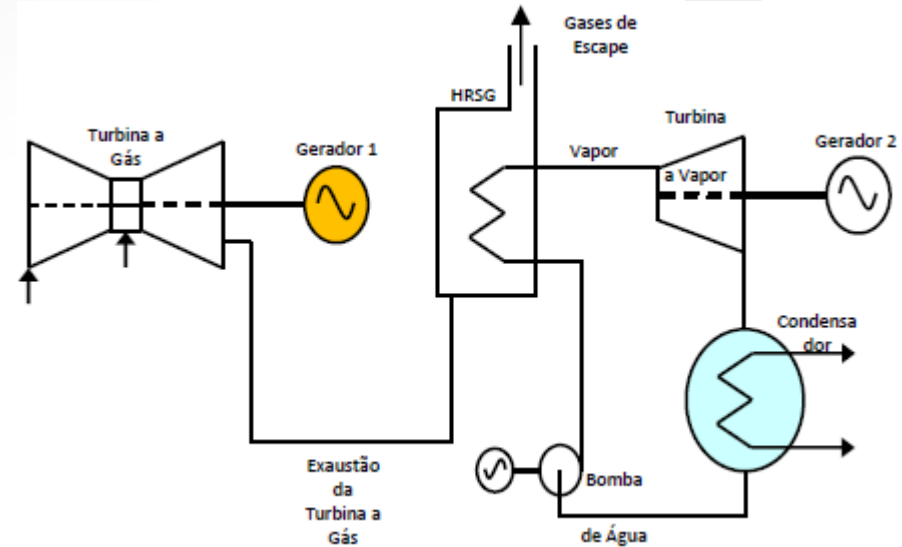


Fonte: Djalma Falcão, 2017 e EPE

Termelétricas em Ciclo Combinado

- Usa turbinas a gás e a vapor associadas em uma única planta
- Calor existente nos gases de exaustão é recuperado, produzindo o vapor necessário ao acionamento da turbina a vapor
- O rendimento de termelétricas de ciclo combinado varia na faixa 52-64 %

Atributo	GN Ciclo Combinado
Custo da Energia	Amarelo
Atende a Ponta?	Verde
Flexível (rampa)	Verde com listras diagonais
Emissões de GEE	Amarelo
Flexibilidade Locacional	Verde
Tempo de Construção	Amarelo

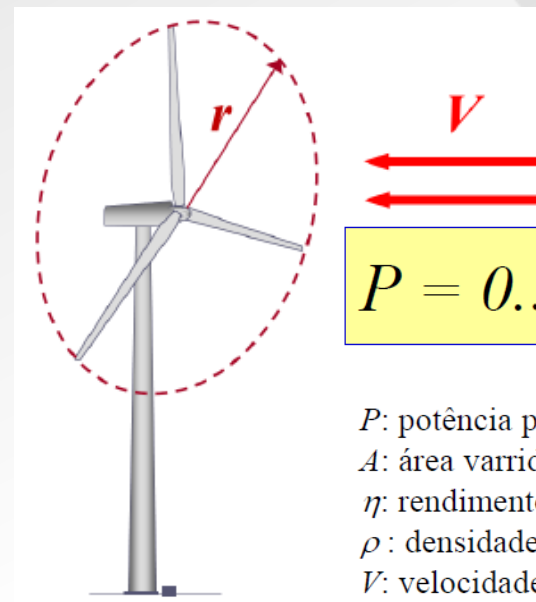


Fonte: Djalma Falcão, 2017 e EPE

Eólicas

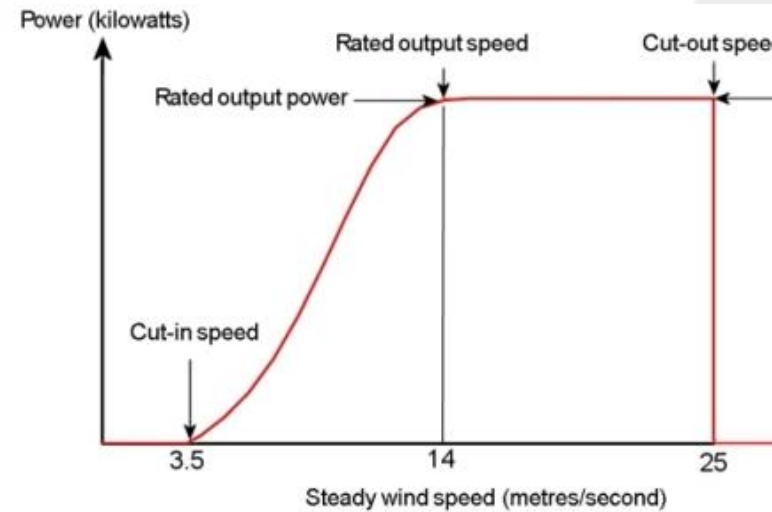
- Produz energia muito barata
- Potência varia bastante com a velocidade do vento (ao triplo)

Atributo	Eólica
Custo da Energia	Verde
Atende a Ponta?	Vermelho
Flexível (rampa)	Vermelho
Emissões de GEE	Verde
Flexibilidade Locacional	Verde
Tempo de Construção	Verde



$$P = 0.5 A \eta \rho C_p V^3$$

P : potência produzida (W)
 A : área varrida pelo rotor πr^2 (m²)
 η : rendimento turbina-gerador
 ρ : densidade do ar (1,225 kg/m³)
 V : velocidade do ar (m/s)
 C_p : coeficiente de desempenho aerodinâmico

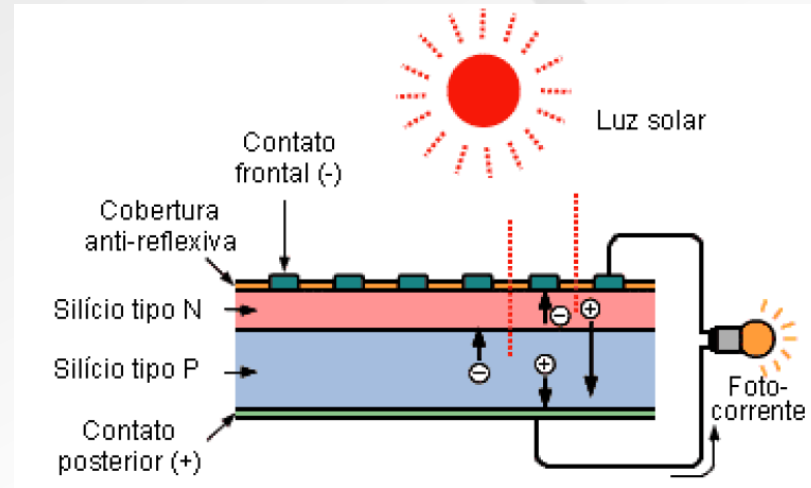


Typical wind turbine power output with steady wind speed.

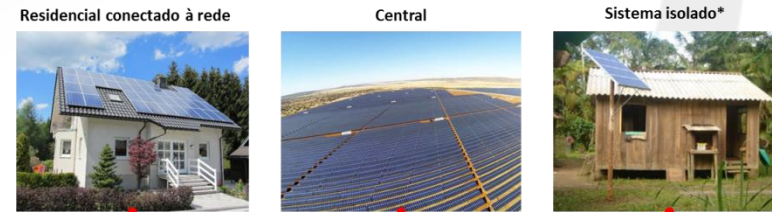
Fonte: Djalma Falcão, 2017 e EPE

Fotovoltaicas

- Conversão direta da luz em corrente elétrica (efeito fotovoltaico)
- Bastante modular (de sistemas isolados à fazendas solares)
- Geração varia bastante com passagem de nuvens.



Atributo	Fotovoltaica
Custo da Energia	Verde
Atende a Ponta?	Vermelho
Flexível (rampa)	Vermelho
Emissões de GEE	Verde
Flexibilidade Locacional	Verde
Tempo de Construção	Verde



Fonte: Djalma Falcão, 2017 e EPE

Fotovoltaica centralizada vs. distribuída

Custo Nivelado das Fontes

R\$ 383/MWh



Micro FV

R\$ 185/MWh



FV Centralizada

Nota: custo nivelado não considera o benefícios de subsídios sobre a geração.

Em que casos o benefício locacional da GD supera o ganho de escala da centralizada?

Expansão da GD deveria ser direcionada à locais específicos

Premissas de Cálculo

	Micro FV	FV Centralizada
Capacidade (MWcc)	0,004	120
Capacidade (MWac)	0,004	90
Custo de Investimento (R\$/kW)	4800	4000
O&M Fixo (R\$/kW/ano)	48	80
O&M Variável (R\$/MWh)	0	0
Fator de Capacidade (ac)	16%	30%
Vida Útil	20	20
Taxa de Desconto	8% a.a.	

Armazenamento: Baterias (Li-ion, Fluxo) e Hidrelétricas Reversíveis

- Carregam em momentos de baixo consumo e geram em horários de ponta.
- Também são bastante flexíveis.
- Várias químicas diferentes para baterias, com diferentes aplicações.

Atributo	Baterias	UHR
Custo de Armazenamento	Red	Green
Atende a Ponta?	Green	Green
Flexível (rampa)	Green	Green
Emissões de GEE	Green	Green
Flexibilidade Locacional	Green	Red
Tempo de Construção	Green	Red

Nota: análise simplificada para fins didáticos.



Classificação qualitativa das fontes

	Tecnologia	Custo da Energia*	Atende a Ponta?	Flexível (Rampa)	Emissões de GEE	Flexibilidade Locacional	Tempo de Construção
Geração	Hidrelétrica	Verde	Amarelo	Verde	Verde	Vermelho	Vermelho
	Biomassa	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Verde	Verde	Verde
	Eólica	Verde	Vermelho	Vermelho	Verde	Verde	Verde
	Solar Fotovoltaica	Verde	Vermelho	Vermelho	Verde	Verde	Verde
	Heliotérmica	Vermelho	Verde	Amarelo	Verde	Amarelo	Amarelo
	Carvão	Amarelo	Verde	Amarelo	Vermelho	Amarelo	Amarelo
	GN Ciclo Simples	Padrão diagonal	Verde	Verde	Amarelo	Verde	Verde
	Gás Ciclo Combinado	Amarelo	Verde	Padrão diagonal	Amarelo	Verde	Amarelo
	Nuclear	Vermelho	Verde	Vermelho	Verde	Amarelo	Vermelho
Armazenamento	UHR	Verde	Verde	Verde	Verde	Vermelho	Vermelho
	Baterias	Vermelho	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde

* Ou custo de armazenamento (US\$/kWh) para UHR e baterias

Obrigado!

 /epe.brasil  epe_brasil  @epe_brasil

 /EPEBrasil  Empresa de Pesquisa Energética

Avenida Rio Branco, 1 - 11º andar
20090-003 - Centro - Rio de Janeiro
www.epe.gov.br

Empresa de Pesquisa Energética
Ministério de Minas e Energia



POTENCIAL DE GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA - RENDIMENTO ENERGÉTICO ANUAL

