



# PALESTRAS



Universidade do Porto  
**FEUP** Faculdade de  
Engenharia

## O Futuro da Cogeração

10 de Maio de 2004

Álvaro Brandão Pinto



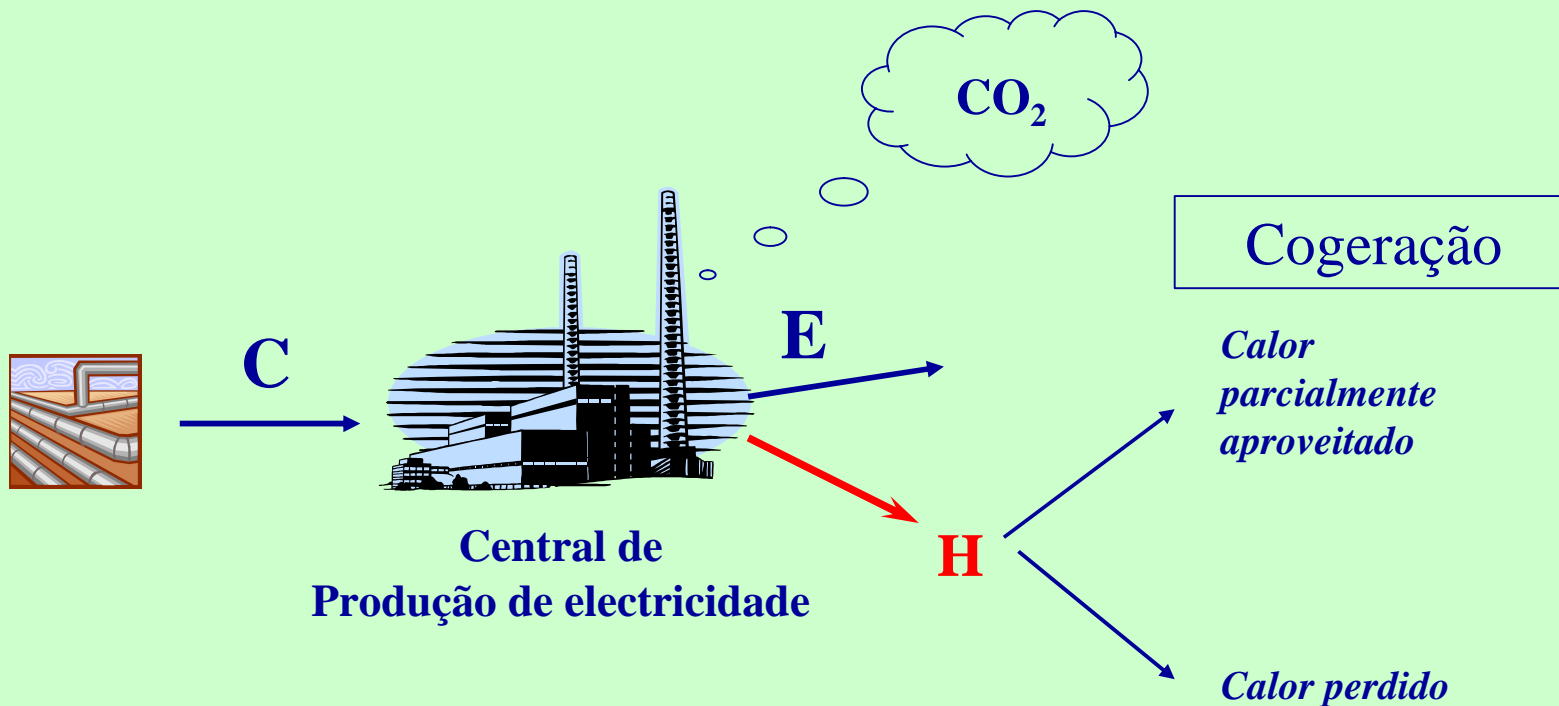
# Índice



1. O Conceito
2. Os sistemas mais representativos
3. As aplicações sectoriais
4. Os parâmetros caracterizadores
5. As vantagens
6. A situação em Portugal
7. As razões para realizar os projectos
8. A lógica da remuneração dos custos evitados
9. A Directiva Europeia
10. O comércio de emissões
11. O futuro



1. O Conceito  
**Produção de electricidade com aproveitamento do calor gerado no processo de geração**



C – Combustível consumido

E – Electricidade produzida

H – Calor gerado no processo de geração de electricidade

Central Convencional



## 1. O Conceito

### Produção de electricidade com aproveitamento do calor gerado no processo de geração

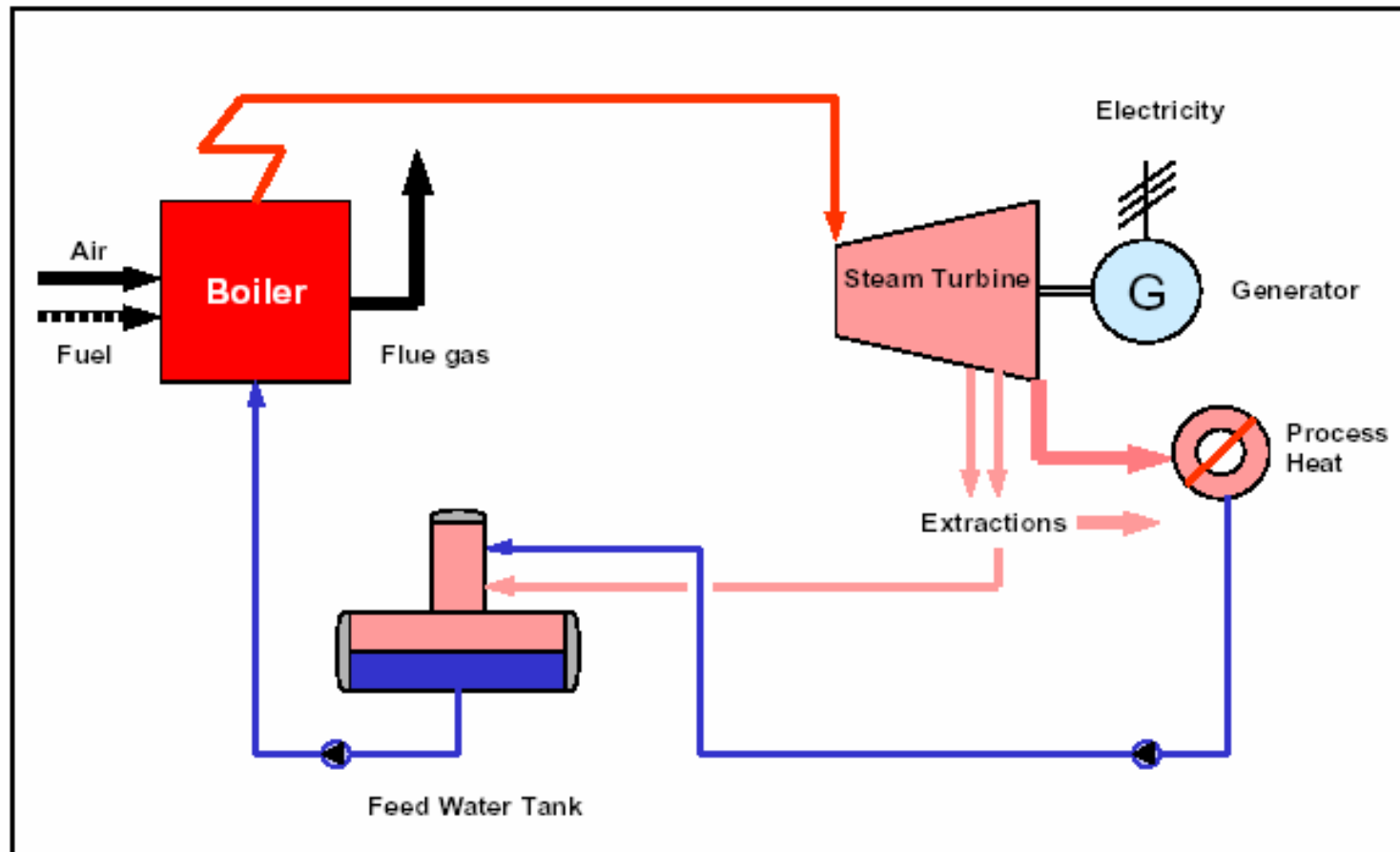


- Em toda a produção de electricidade a partir de um combustível, gera-se calor:
  - O calor pode ser útil, se é gerado junto de um consumidor que dele necessita.
  - O calor é inútil, se a central eléctrica está longe do consumidor ou é demasiado grande relativamente à necessidade térmica.
- A cogeração consiste basicamente na **produção de electricidade junto de utilizadores com necessidade de calor útil.**
- A produção de electricidade junto aos centros de consumo permite ainda poupar custos nas redes de transporte e distribuição.

Os processos de cogeração conseguem, assim, o máximo aproveitamento do combustível consumido e **pouparam energia primária relativamente à produção separada** de electricidade e de calor em instalações convencionais.

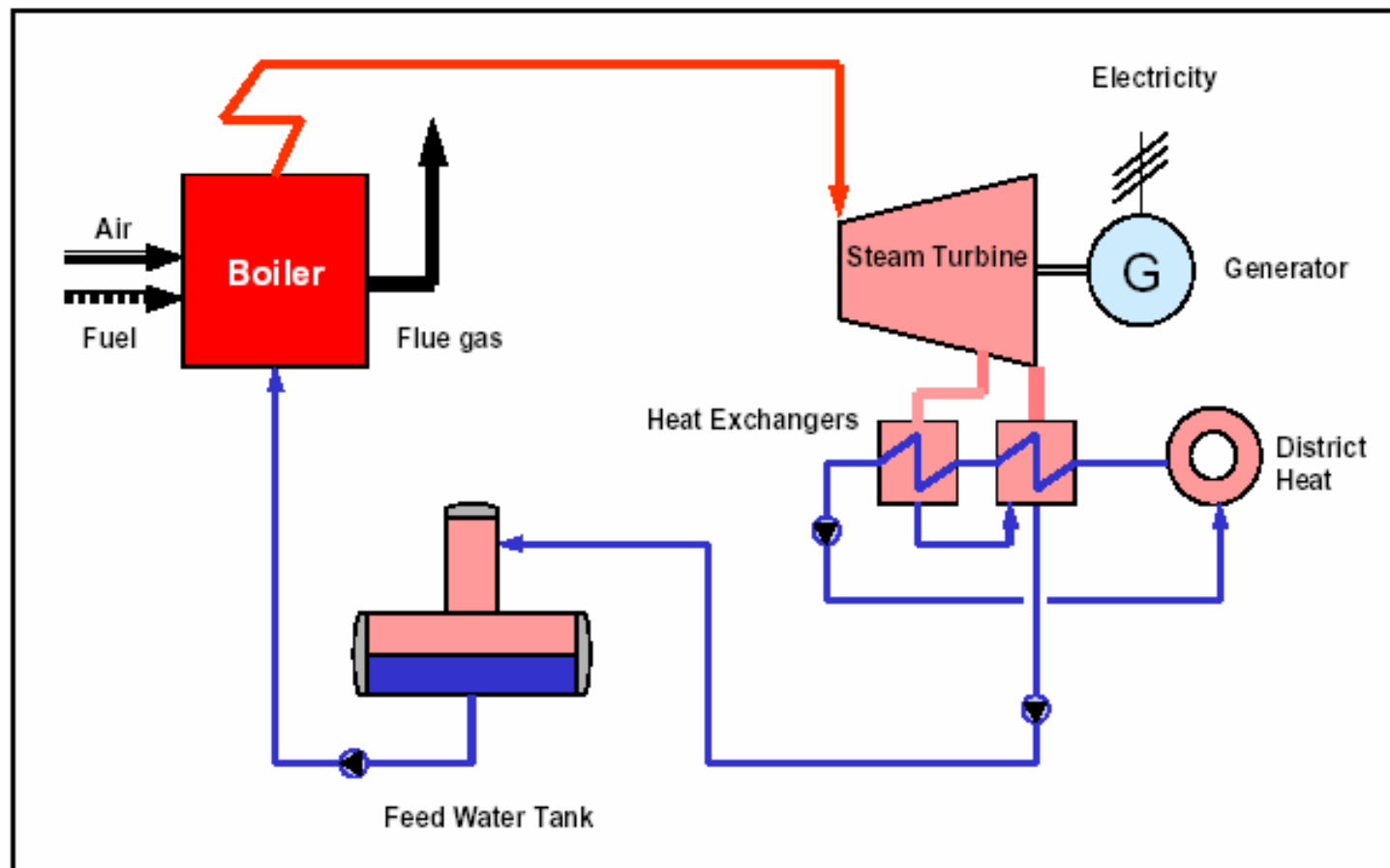


## 2. Os sistemas mais representativos Turbina de vapor em contrapressão



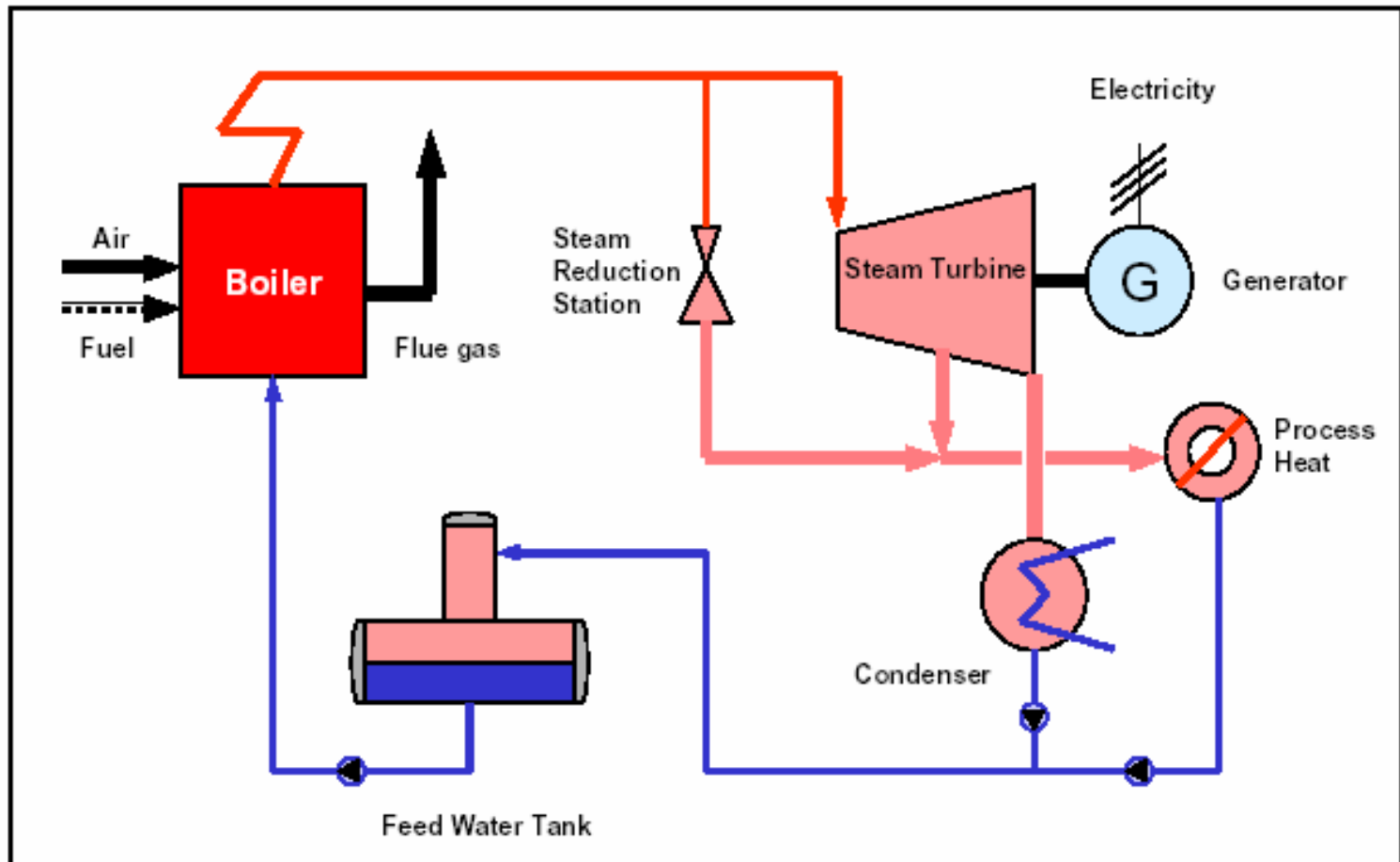


2. Os sistemas mais representativos  
**Turbina de vapor em contrapressão aplicada  
ao conceito do “District Heating”**



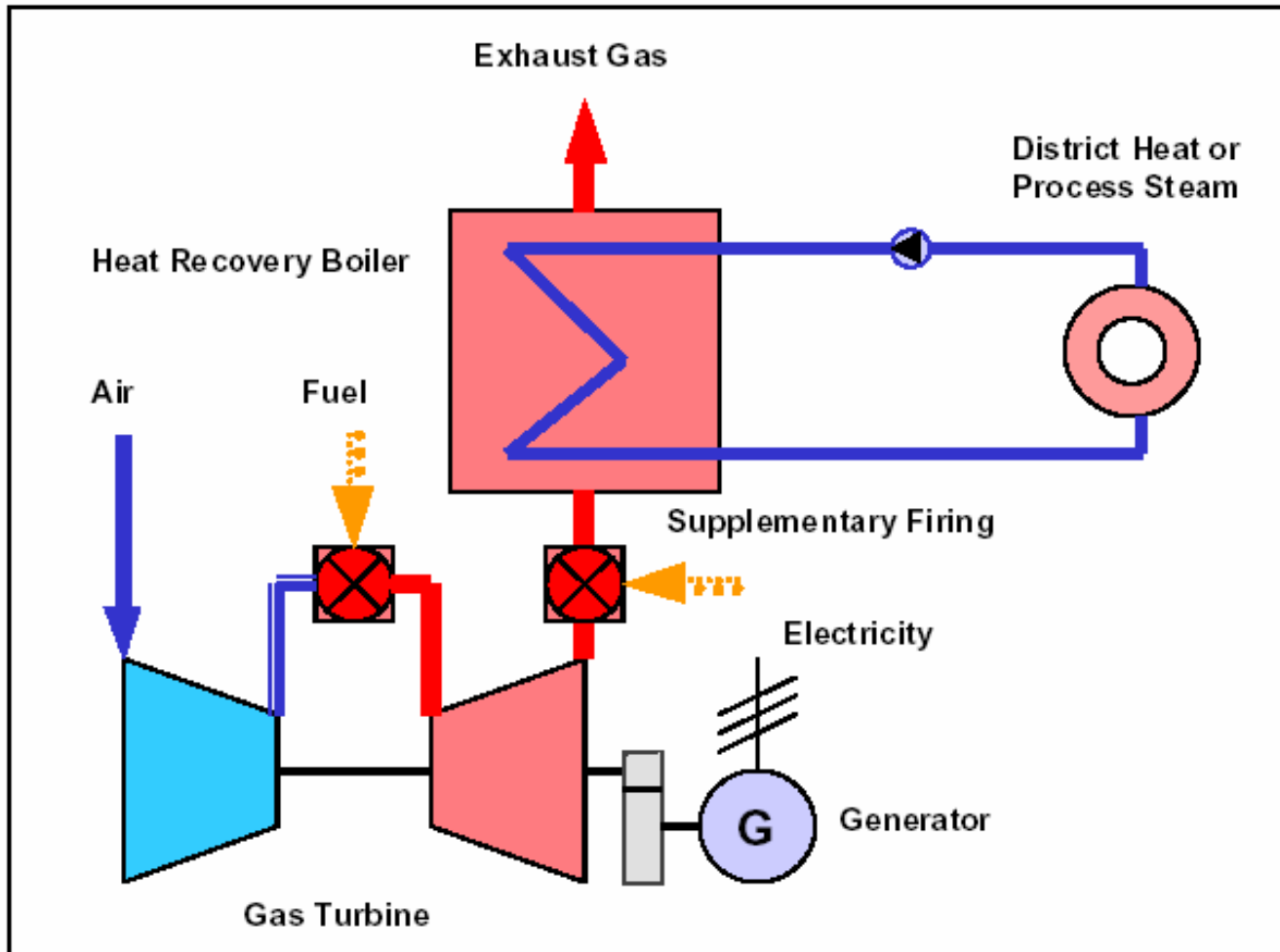


## 2. Os sistemas mais representativos Turbina de vapor a condensação





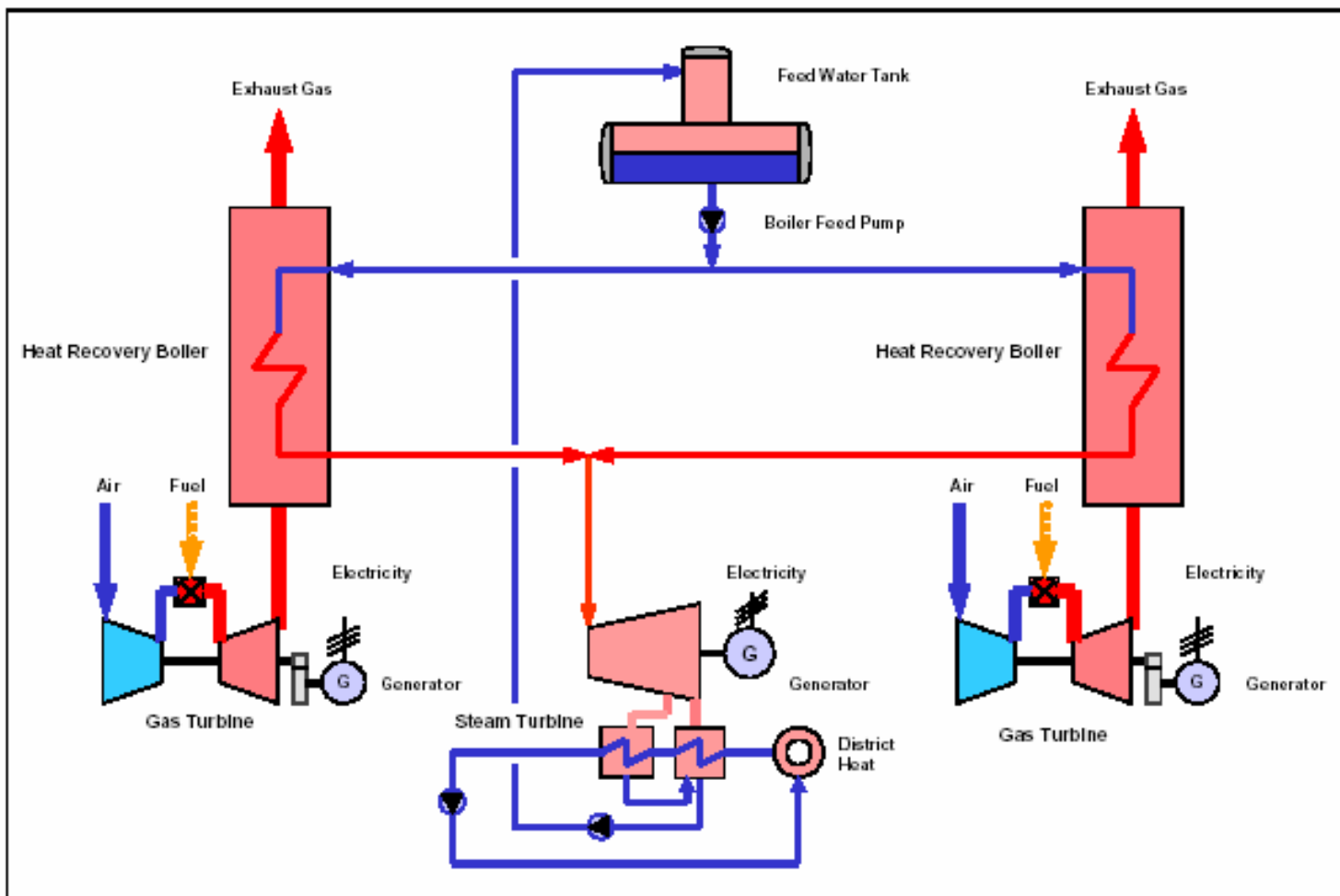
## 2. Os sistemas mais representativos Turbina de Gás em ciclo simples







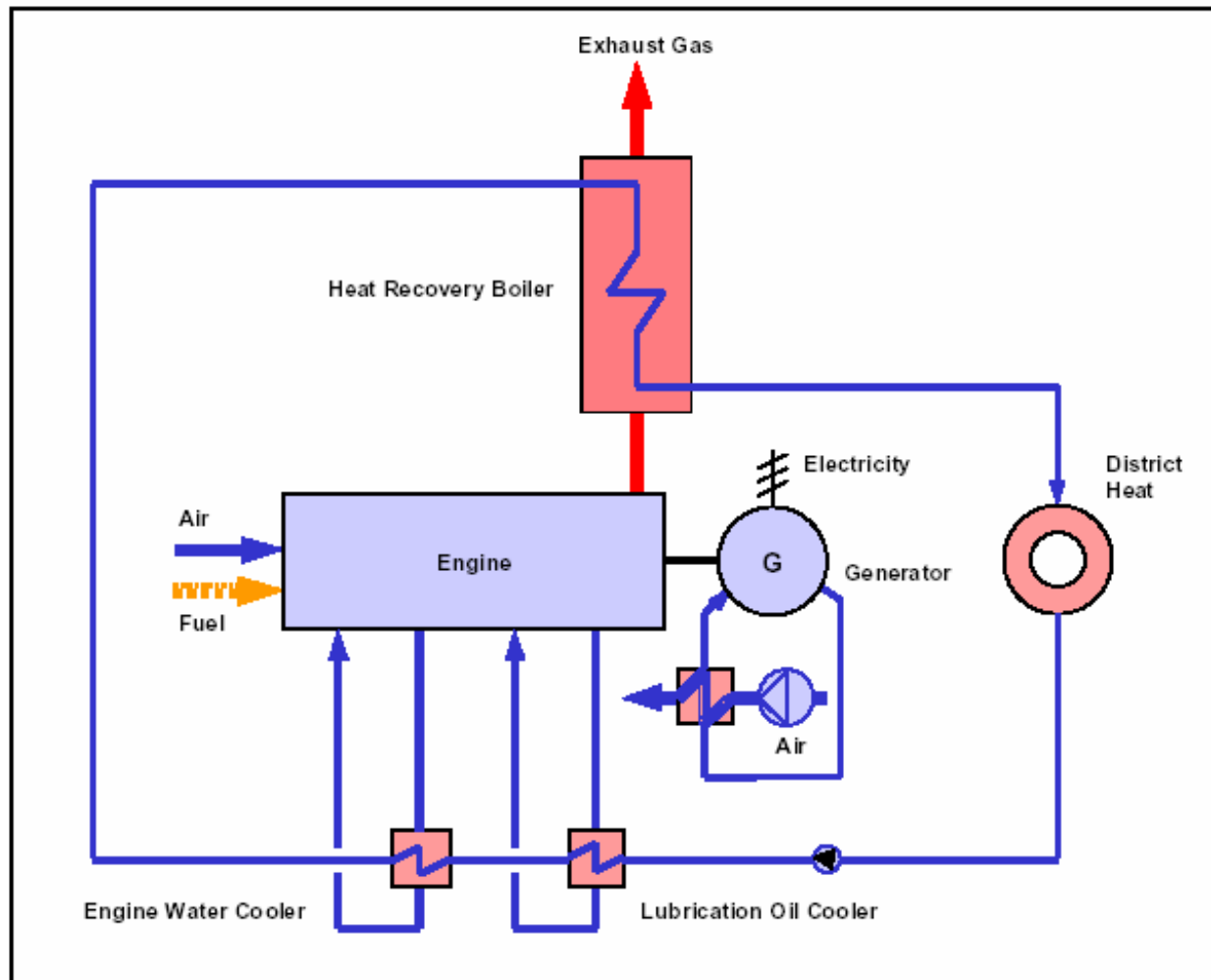
## 2. Os sistemas mais representativos Turbina de Gás em ciclo combinado





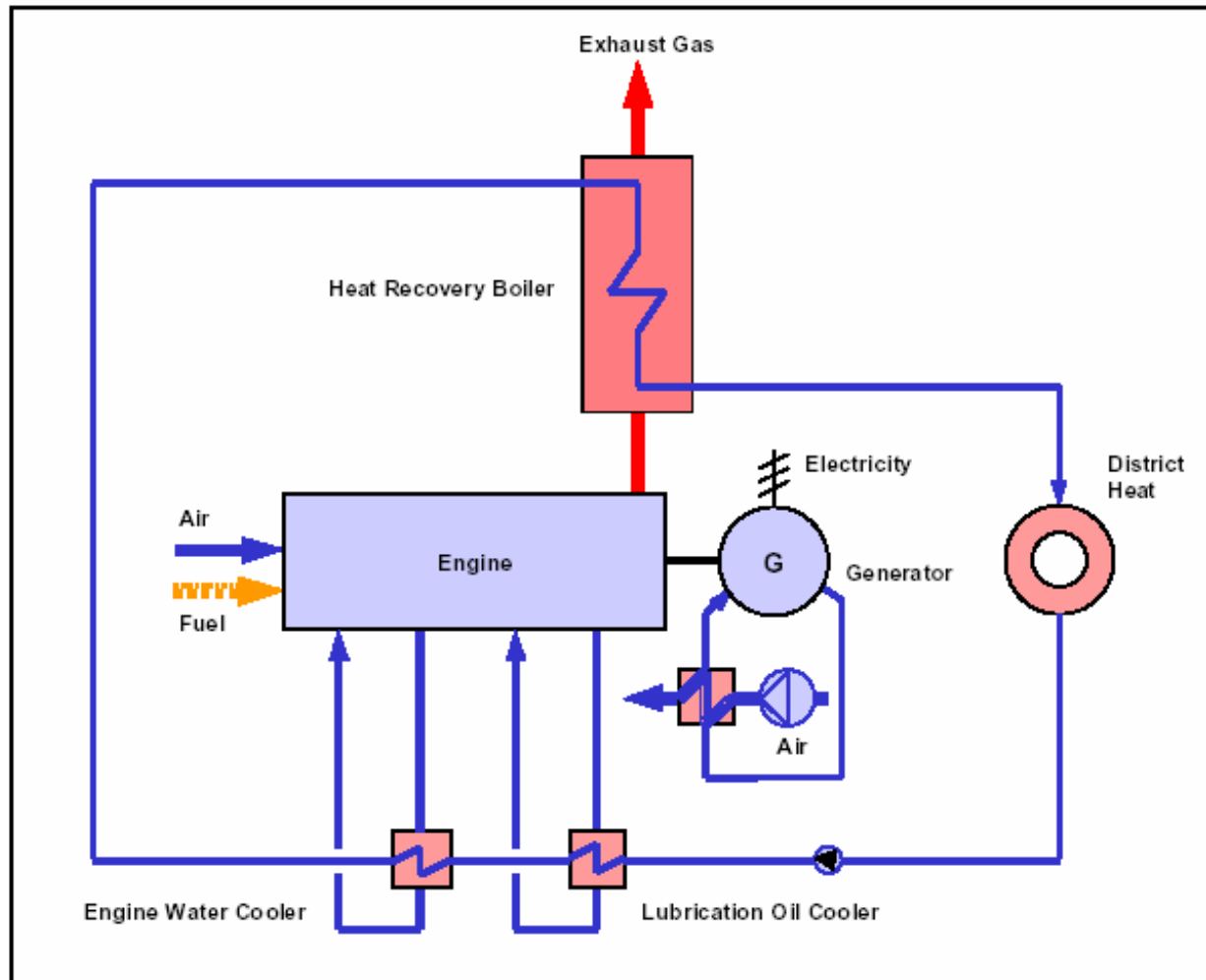
## 2. Os sistemas mais representativos

### Motores de combustão interna





## 2. Os sistemas mais representativos **Motores de combustão interna**

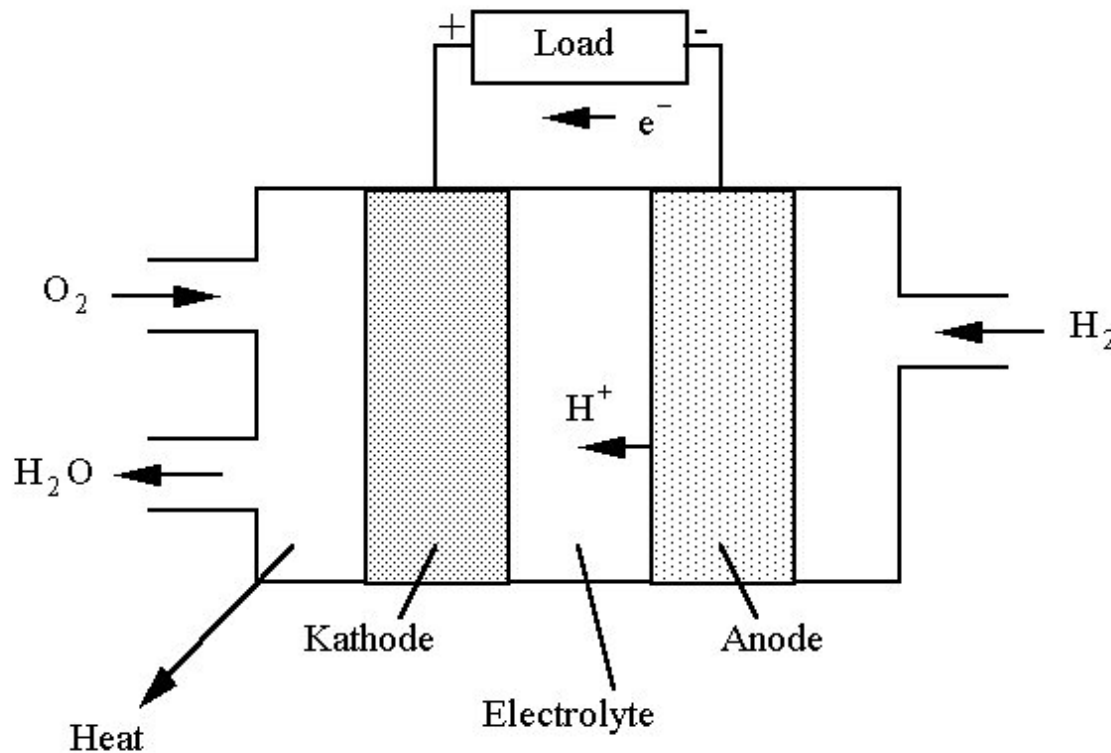


**Ciclo Diesel – Motores a  
Fuelóleo;**

**Ciclo Otto – Motores a  
Gás Natural.**



## 2. Os sistemas mais representativos Células de combustível

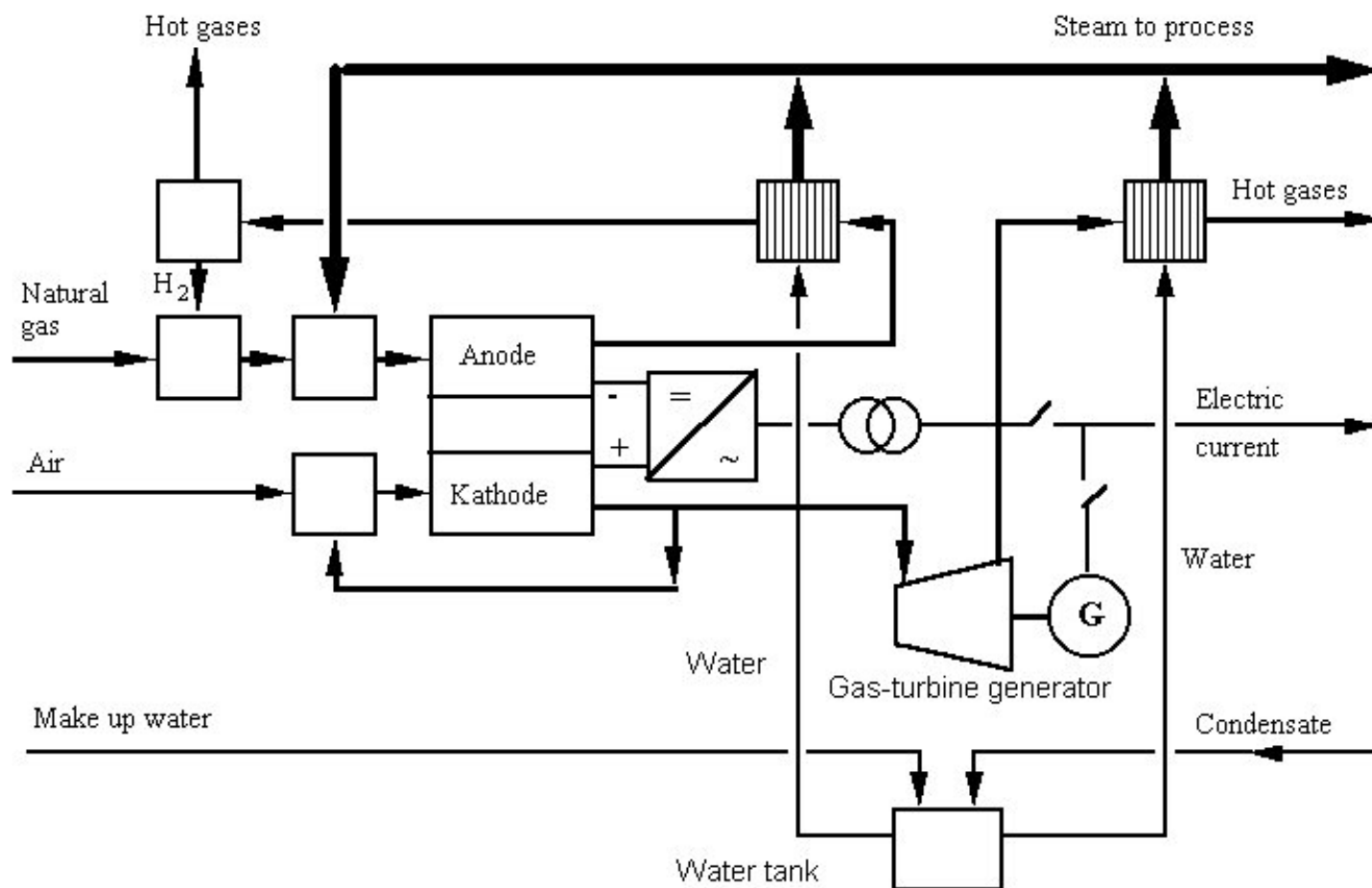


O Hidrogénio reage com o oxigénio na presença de um electrólito e produz água. Simultaneamente, é criado um potencial electroquímico que origina uma corrente eléctrica no circuito externo. A reacção que se desenvolve nos dois eléctrodos é exotérmica, pelo que o calor assim libertado pode ser usado num qualquer processo térmico.

Esquema básico do funcionamento de uma célula de combustível de hidrogénio-oxigénio



## 2. Os sistemas mais representativos Células de combustível



**Sistema de cogeração com célula de combustível de óxido sólido para aplicação industrial**



### 3. As aplicações sectoriais **Sector eléctrico**



- “District Heating”
- “District Cooling”
- Utilização de gás de aterro em motores de combustão interna em que se aproveite posteriormente o calor gerado
- Queima de resíduos em caldeira para produção de vapor que alimente uma turbina integrada num sistema de cogeração



### 3. As aplicações sectoriais **Sector industrial**



- No sector industrial é possível aplicar os distintos sistemas de cogeração, desde que convenientemente adaptados ao tipo de energia térmica a aproveitar e ao seu correspondente nível de temperatura
- Os principais subsectores onde há normalmente condições para realizar projectos de cogeração, são:
  - Pasta e papel
  - Têxtil
  - Químico
  - Refinarias de petróleo
  - Alimentar
  - Cerâmica
  - Madeiras



### 3. As aplicações sectoriais **Sector terciário**



- No sector terciário é possível aplicar basicamente sistemas de cogeração baseados em ciclos simples de turbinas de gás e em motores de combustão interna. Normalmente, as potências em causa são substancialmente mais reduzidas do que as que existem no sector industrial.
- As principais aplicações ocorrem basicamente nas seguintes instalações:
  - Hotéis
  - Hospitais
  - Estabelecimentos de ensino de dimensão relevante
  - Edifícios de escritório
  - Armazéns
  - Supermercados
  - Centros comerciais
  - Restaurantes
  - Piscinas e centros de lazer





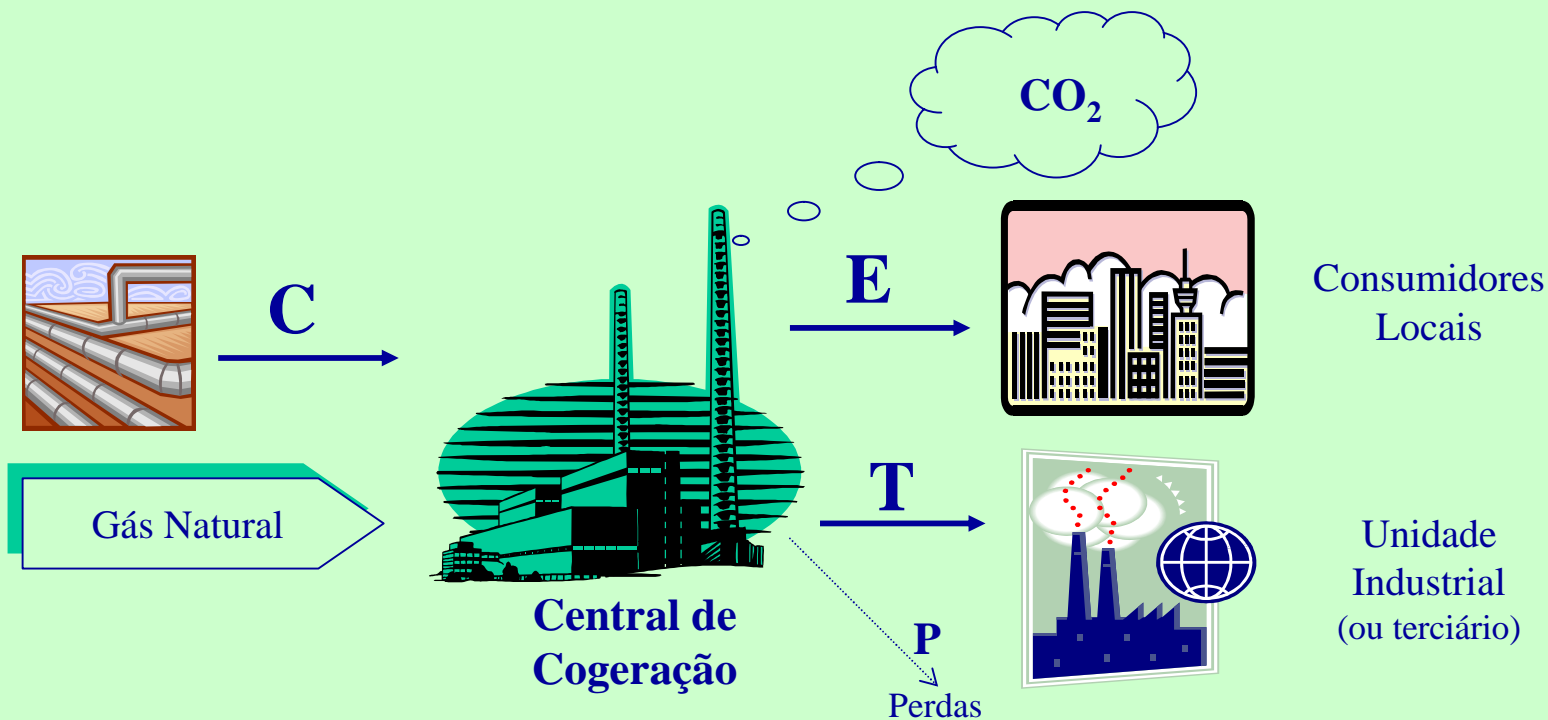
### 3. As aplicações sectoriais **Sector primário**



- No sector primário é também possível aplicar, em algumas situações, sistemas de cogeração baseados em ciclos simples de turbinas de gás e em motores de combustão interna. Normalmente, as potências em causa são também muito mais reduzidas do que as que existem no sector industrial.
- As principais aplicações que se podem identificar são:
  - Aquecimento de estufas
  - Aquecimento de abrigos de animais
  - Aquecimento de casas rurais
  - Secagem de madeira
  - Produção de etanol



#### 4. Os parâmetros caracterizadores Rendimento Eléctrico e Rendimento Global

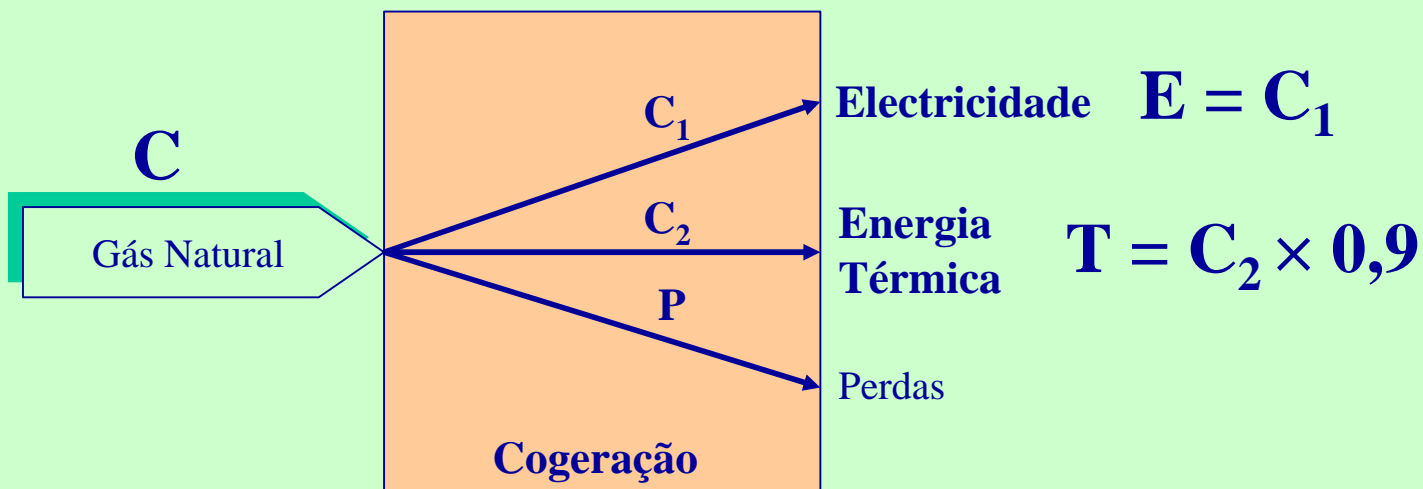


$$RE = E / C$$

$$RG = (E + T) / C$$



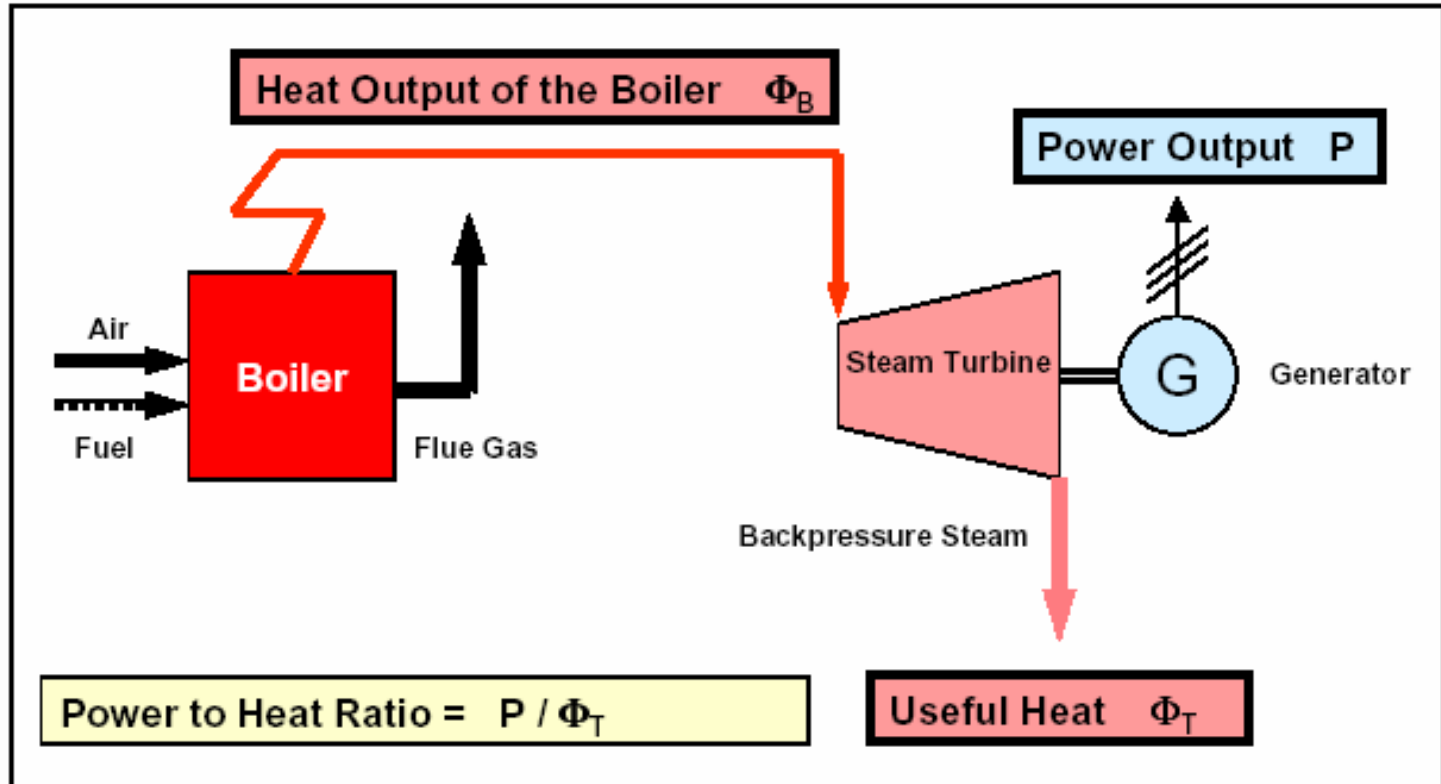
#### 4. Os parâmetros caracterizadores Rendimento Eléctrico Equivalente



$$\text{REE} = \text{E} / (\text{C} - \text{C}_2) = \text{E} / (\text{C} - \text{T}/0,9)$$



4. Os parâmetros caracterizadores  
**Power to Heat Ratio**



**Parâmetro chave no âmbito da Directiva para a promoção da Cogeração já aprovada**



## 4. Os parâmetros caracterizadores Primary Energy Savings (PES)



Características do balanço anual de uma central de cogeração:

E = Electricidade produzida; T = Calor útil produzido; C = Combustível consumido.

Por outro lado, Ref E e Ref T são os rendimentos de referência de soluções convencionais para produção separada de E e T, quer dizer, **sem cogeração**.

Com base nos valores medidos das grandezas anteriores, pode-se obter :

$$R_{E_c} = \frac{E}{C} \quad \text{Rendimento eléctrico cogeração} \quad R_{T_c} = \frac{T}{C} \quad \text{Rendimento térmico cogeração} \quad R_{EE_c} = \frac{E}{C - \frac{T}{R_{Ref T}}} \quad \text{Rendimento eléctrico equivalente}$$

$$PE = \frac{E}{R_{Ref E}} + \frac{T}{R_{Ref T}} \quad \Rightarrow \quad \text{e a poupança de energia primária da cogeração será:} \quad \Rightarrow \quad PES = PE - C = \frac{E}{R_{Ref E}} + \frac{T}{R_{Ref T}} - C = \frac{E}{R_{Ref E}} - \frac{E}{R_{EE}}$$

A partir da poupança de energia primária em valor absoluto, podem-se calcular as duas reduções percentuais a seguir apresentadas:

$$\frac{PES}{PE} = 1 - \frac{C}{\frac{E}{R_{Ref E}} + \frac{T}{R_{Ref T}}} = 1 - \frac{1}{\frac{E/C}{R_{Ref E}} + \frac{T/C}{R_{Ref T}}} \quad \Rightarrow \quad PES \% = \left( 1 - \frac{1}{\frac{EE}{R_{Ref E}} + \frac{ET}{R_{Ref T}}} \right) \times 100$$

**SOLUÇÃO ADOPTADA  
NA DIRECTIVA**

$$\frac{PES}{PE_{electr}} = \frac{PES}{\frac{E}{R_{Ref E}}} = 1 - \frac{R_{Ref E}}{R_{EE}} \quad \Rightarrow \quad \Rightarrow \quad \Rightarrow \quad EPS \% = \left( 1 - \frac{R_{Ref E}}{R_{EE}} \right) \times 100$$

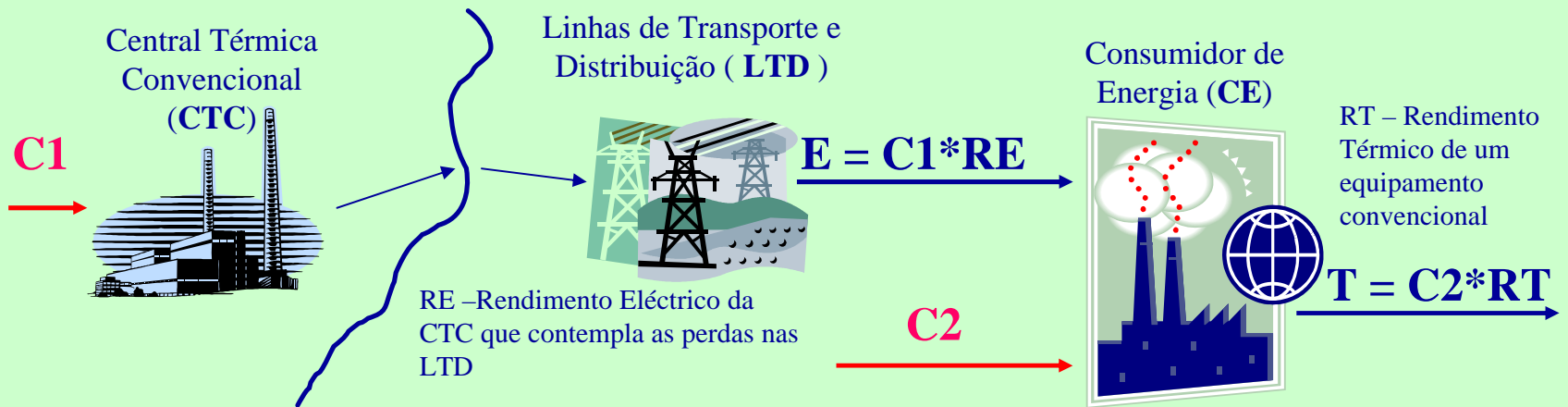
**PROPOSTA COGEN  
PORTUGAL/ESPANHA  
e outros**



5. As vantagens  
**Poupança de energia primária na produção  
de electricidade**



### *A Situação Convencional*



Necessidades do CE ? E e T

Consumo de energia ?  $C1 + C2$



5. As vantagens  
**Poupança de energia primária na produção de electricidade**



*A Situação em Cogeração*



A Poupança de Energia (PE) induzida pela Cogeração, num dado período, é igual a:

$$PE = (C_1 + C_2) - C = (E/R_E + T/R_T) - C = E/R_E - (C - T/R_T)$$

$(C - T/R_T)$  = Consumo líquido de Combustível na Cogeração para produzir **E**

Pode-se introduzir o conceito de Rendimento Eléctrico Equivalente da Cogeração

$$REE = E / (C - T/R_T)$$

Assim, pode-se exprimir a PE da seguinte forma

$$PE = E/R_E - E/REE = E * (1/R_E - 1/REE) = E * (REE - R_E) / (REE * R_E)$$

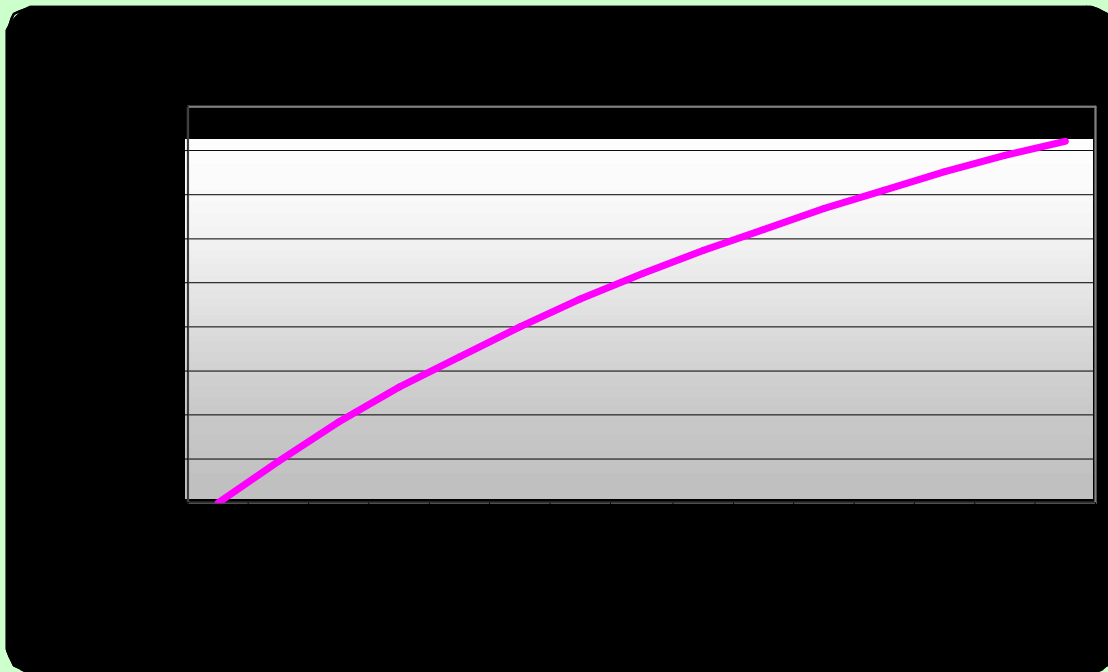
$$PE = E * f(R_E, REE)$$



5. As vantagens  
**Poupança de energia primária na produção de electricidade**



*A Situação em Cogeração*



**Cogeração com Gás Natural**

**Pot El = 1.000 KWe**

**REE = 62,5%**

**7.500 h/ano**

**f(RE,REE) = 0,4 KWhc/KWhe**

**PE ano = 3.000 MWhc**



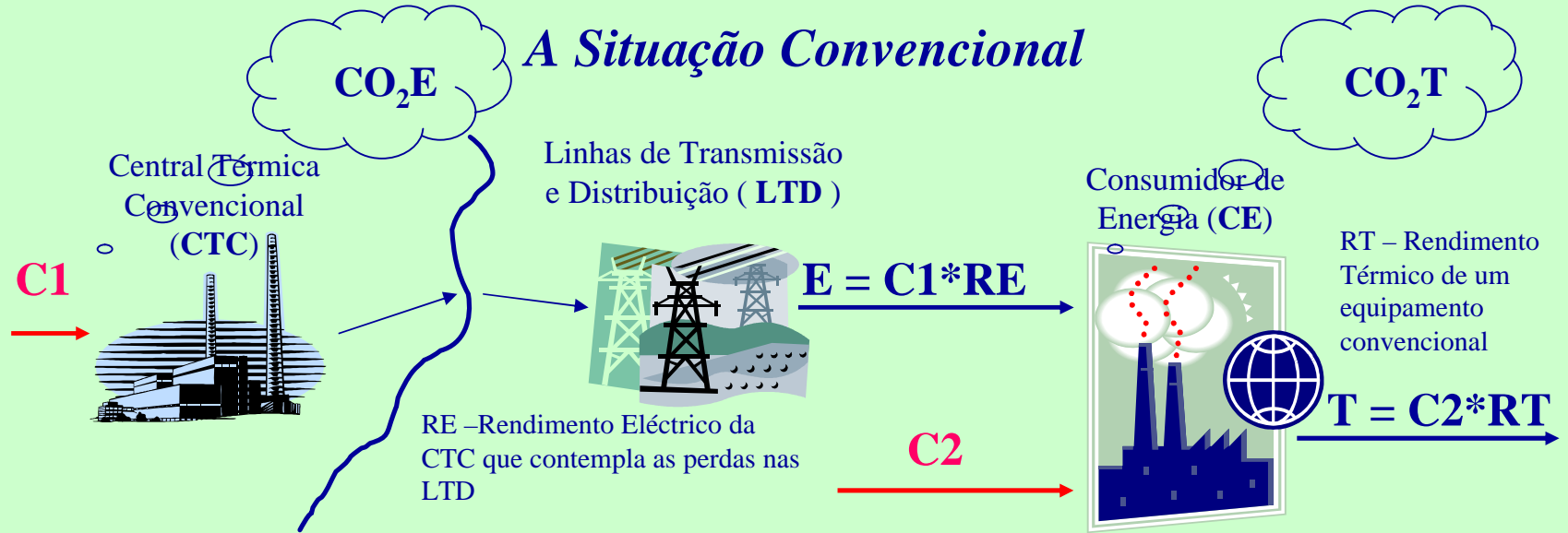
**318.000 Nm<sup>3</sup> GN/ano**

*Poupança induzida por esta cogeração, relativamente ao sistema convencional de produção de electricidade.*





5. As vantagens  
**Redução de emissões na produção de electricidade**



Necessidades do CE ? E e T

Consumo de energia ?  $C1 + C2$

Considerando que o combustível utilizado é o mesmo nas duas instalações

Emissão de  $CO_2$  na CTC ?  $CO_2E = C1 * EECO_2$

Emissão de  $CO_2$  no CE ?  $CO_2T = C2 * EECO_2$

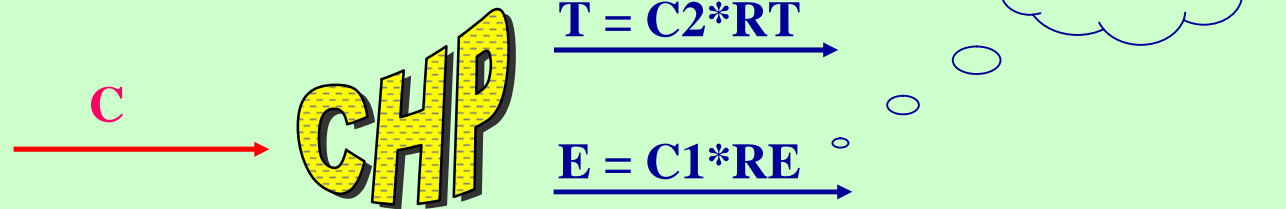
**$EECO_2$  – Emissão específica do combustível utilizado – g  $CO_2$ /KWhc**



5. As vantagens  
**Redução de emissões na produção de electricidade**



*A Situação em Cogeração*



Emissão de CO<sub>2</sub> na Central de Cogeração (CE) ?  $CO_2C = C * EECO_2$

Considerando que o combustível utilizado é sempre o mesmo

Saldo Global de emissões =  $[ C - (C1 + C2) ] * EECO_2 < 0 \Rightarrow$  **Redução**

**Ou ainda:**

Saldo Global de emissões =  $E * f (RE, REE) * EECO_2$

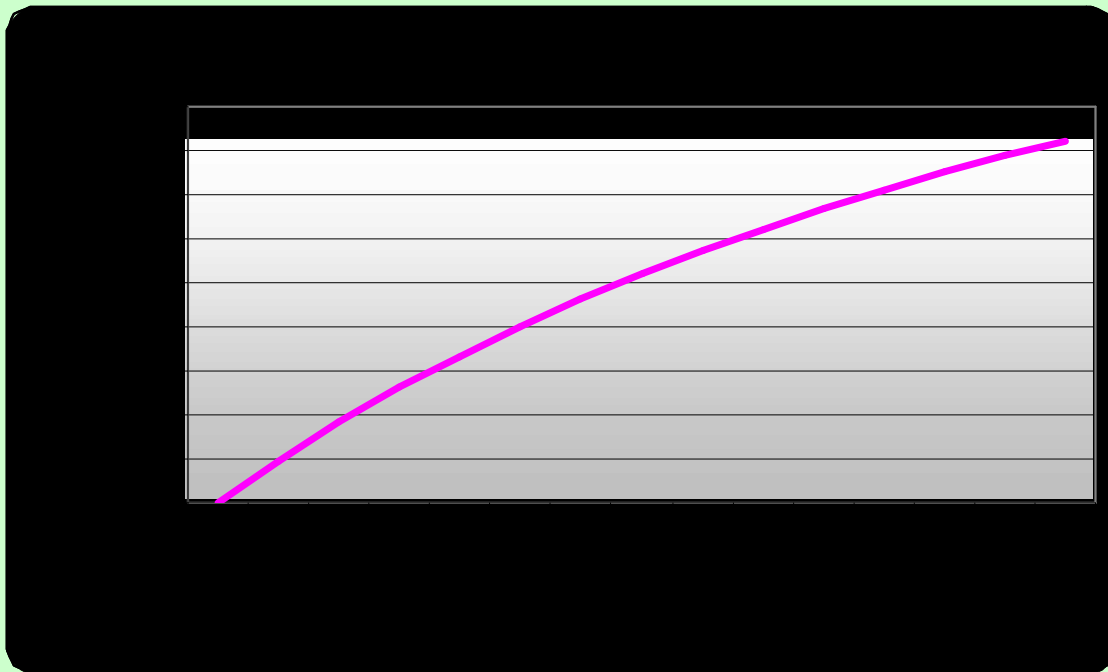
$EECO_2$  para GN = 203 g/kWhe



5. As vantagens  
**Redução de emissões na produção de electricidade**



### *A Situação em Cogeração*



**Cogeração com Gás Natural**

$E_{CO_2} = 203 \text{ g CO}_2/\text{KWhc}$

Pot El = 1.000 KWe

REE = 62,5%

7.500 h/ano

$f(\text{RE}, \text{REE}) = 0,4 \text{ KWhc/KWe}$

*Redução de emissões induzida por esta cogeração, relativamente ao sistema convencional de produção de electricidade.*

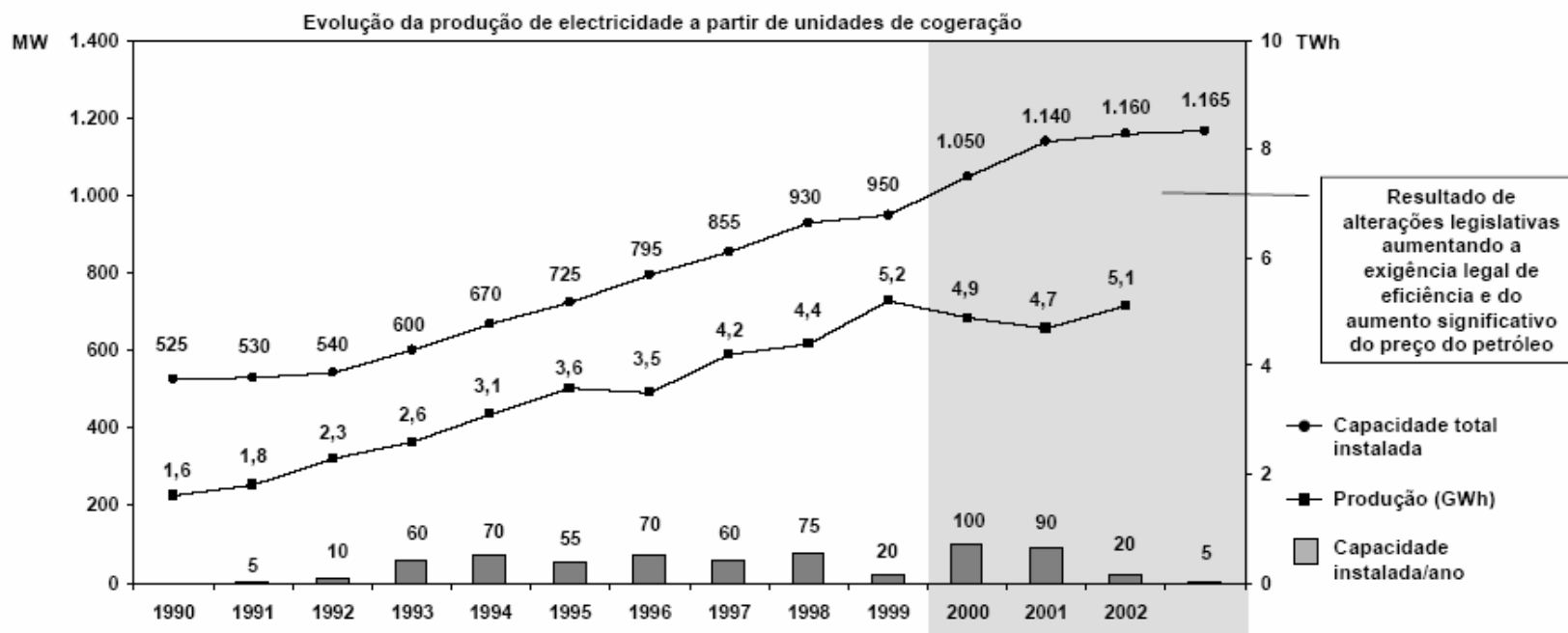
609 tons  $\text{CO}_2/\text{ano}$



## 6. A situação em Portugal Estagnação após crescimento inicial sustentado



### APÓS UM CRESCIMENTO SUSTENTÁVEL ATÉ 1999, O MERCADO COGERAÇÃO ESTAGNOU NOS ÚLTIMOS ANOS

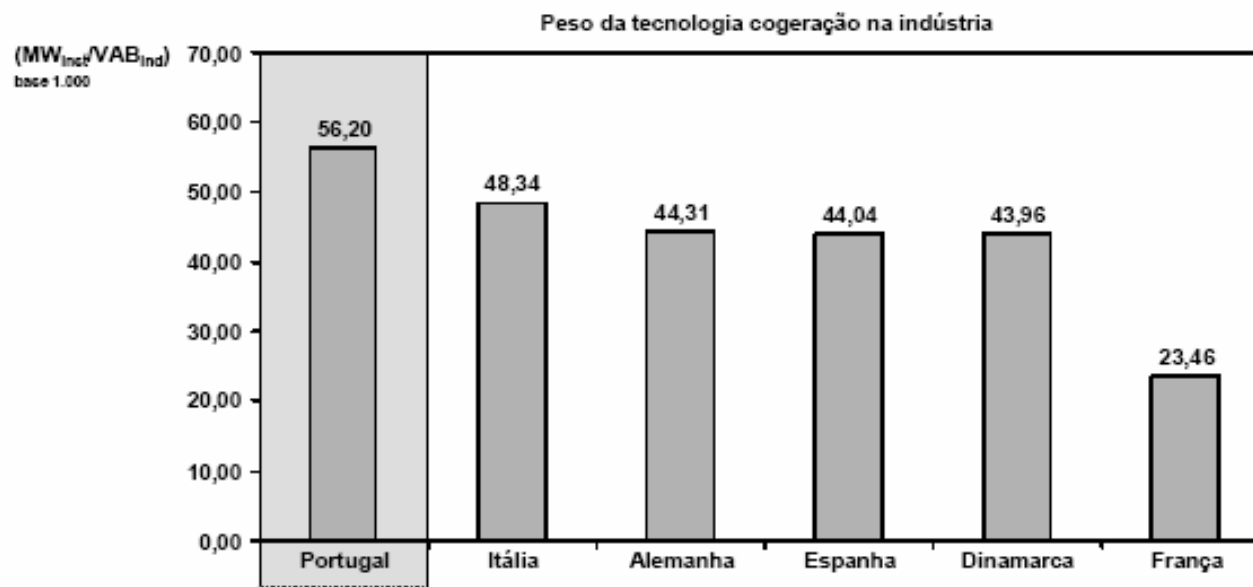




## 6. A situação em Portugal Peso importante da cogeração no sector industrial



### A TECNOLOGIA COGERAÇÃO TEM UM ELEVADO PESO NO TECIDO INDUSTRIAL NACIONAL



Nota: Valores de 2000

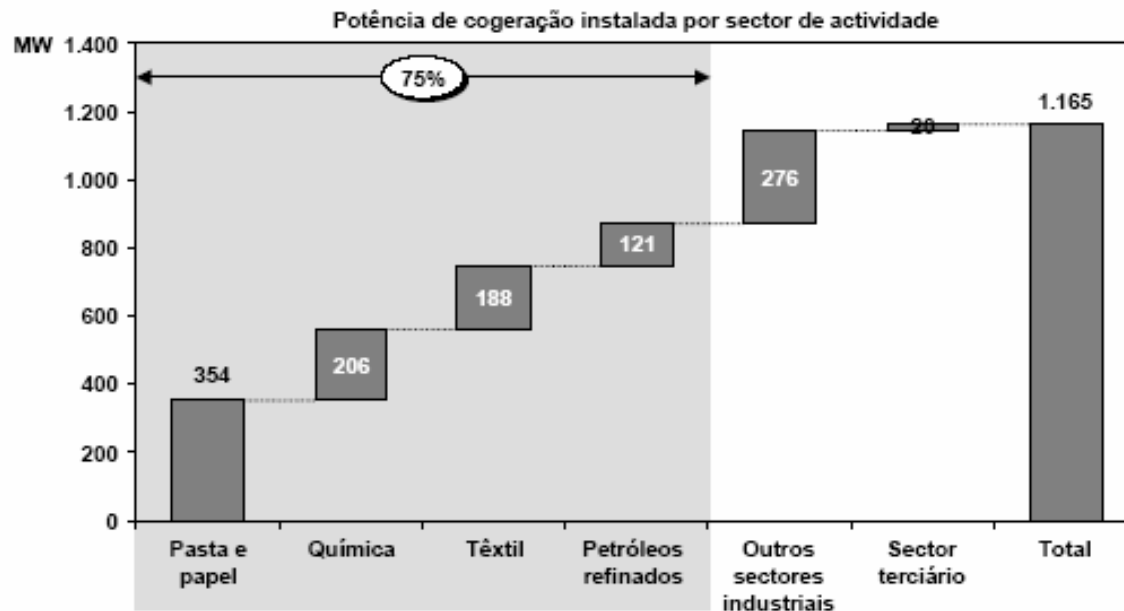
Fonte: OCDE, Cogen Europe, Análise BCG



## 6. A situação em Portugal Concentração em alguns subsectores industriais



### 75% DA CAPACIDADE DE COGERAÇÃO ENCONTRA-SE CONCENTRADA EM 4 SECTORES INDUSTRIAIS



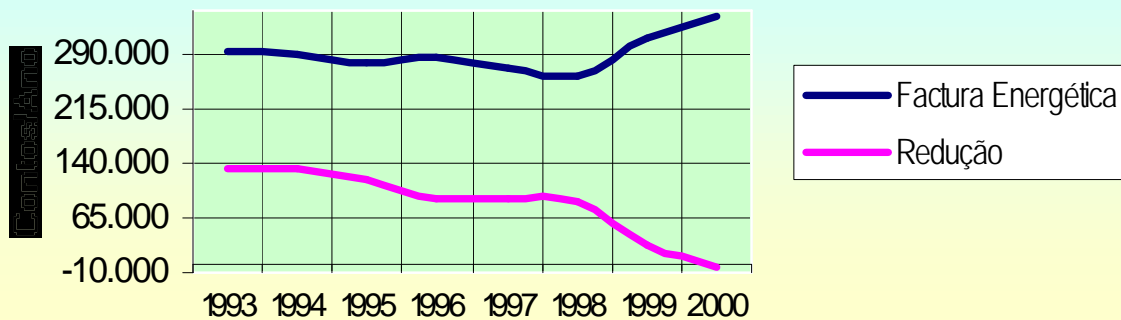
Fonte: COGEN Portugal



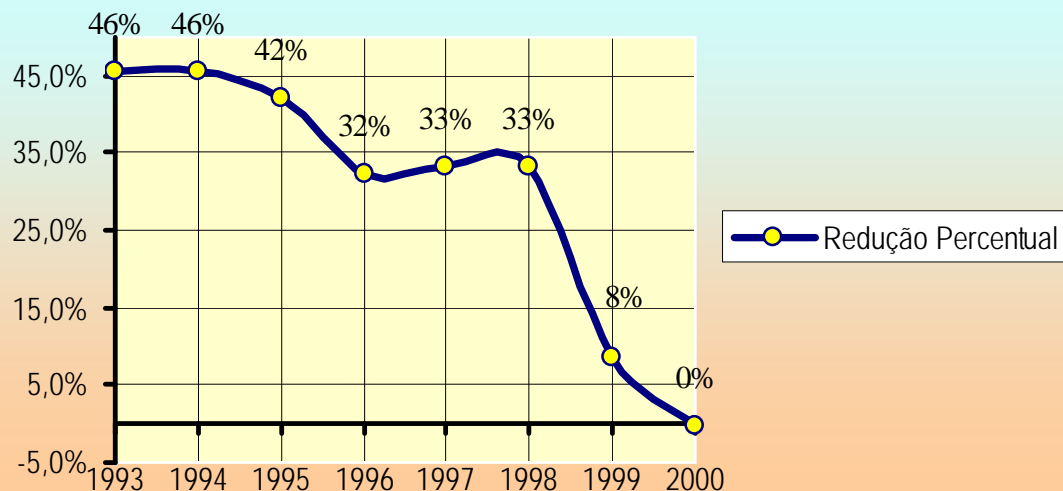
## 7. As razões para realizar os projectos Redução da factura energética em detrimento da poupança de energia primária



### Factura Energética



### Redução percentual da Factura Energética

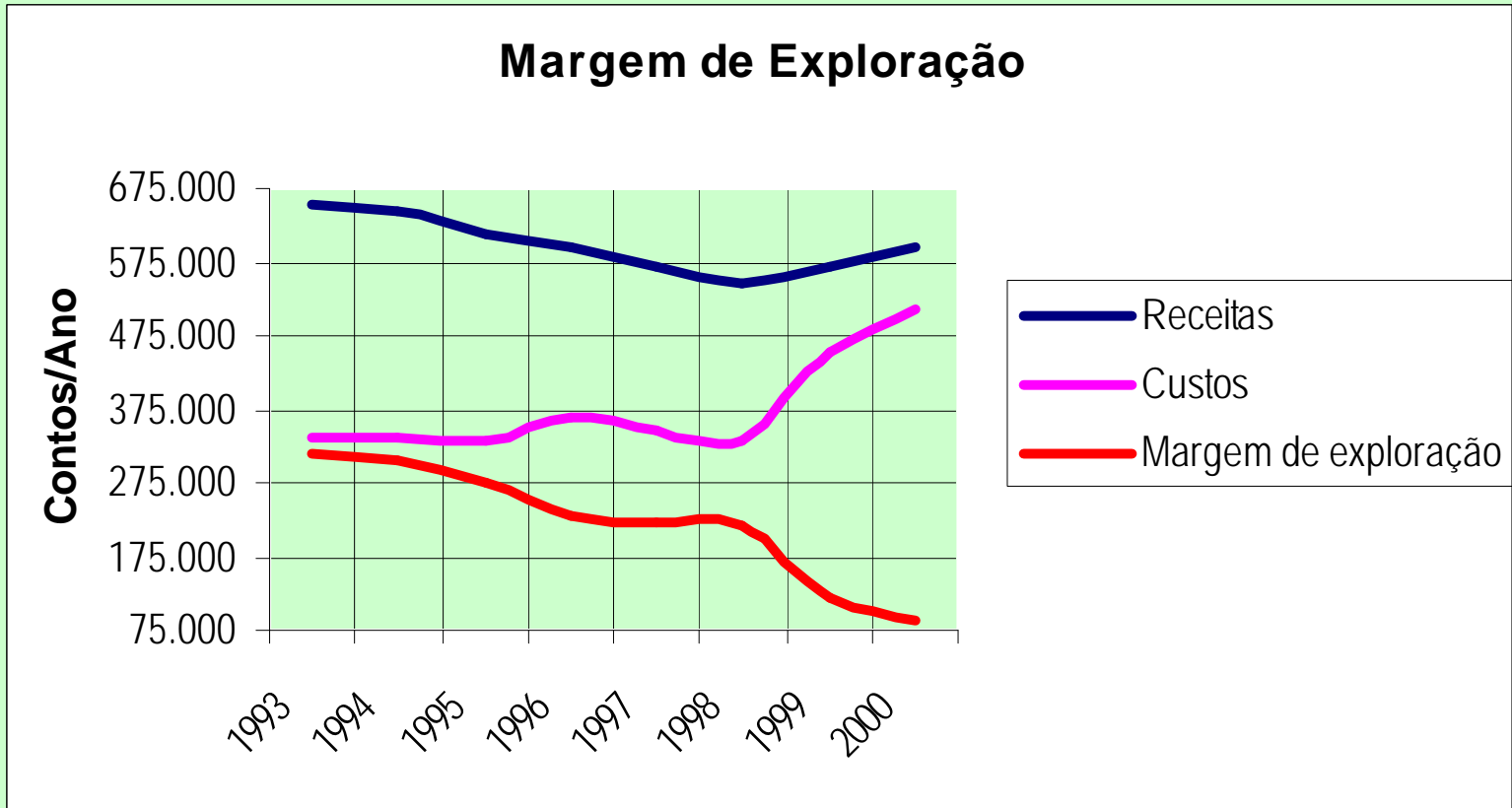




7. As razões para realizar os projectos  
**Redução da factura energética em detrimento  
da poupança de energia primária**



### Margem de Exploração



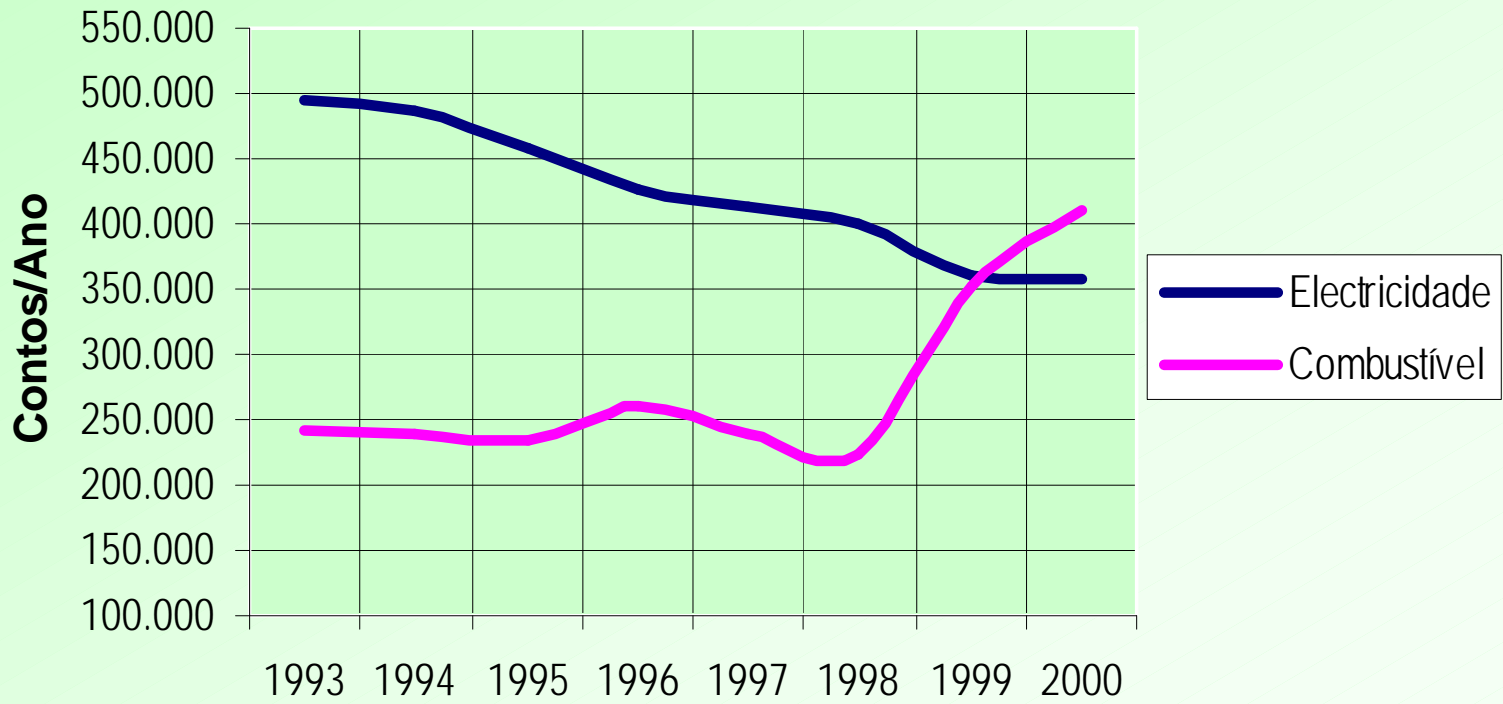




7. As razões para realizar os projectos  
**Redução da factura energética em detrimento  
da poupança de energia primária**



**Combustível vs. Electricidade**





8. A lógica da remuneração dos custos evitados  
**Custo da energia produzida nos sistemas convencionais que a Cogeração permite substituir**



- O fornecimento de Energia Eléctrica aos clientes do Sector Eléctrico Português (SEP) é suportado por um sistema centralizado de produção
  - Baseado, designadamente, em Centrais Termoeléctricas de grande potência
  - E num sistema de transporte de energia a longas distâncias
- As Centrais de Cogeração constituem um meio de produção alternativo ao sistema centralizado...
- ... e disponibilizam à rede do SEP energia e potência...
- ... evitando o Custo de Produção e Transporte dessa energia pelas grandes Centrais convencionais...
- ... e reduzindo o impacte ambiental da produção da mesma quantidade de energia



8. A lógica da remuneração dos custos evitados  
**O Custo Evitado é determinado em relação a uma Central Termoelétrica convencional de referência**



*A energia disponibilizada pelas Cogerações evita ao SEP custos com:*

- Investimento em nova capacidade de produção
- Produção de energia eléctrica
  - Combustível
  - Operação e manutenção
  - Outros custos
- Transporte e distribuição de energia
  - Investimento nas redes
  - Operação e manutenção das redes
  - Perdas de energia
- Emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera



8. A lógica da remuneração dos custos evitados  
**A referência considerada na Lei é uma grande Central de Ciclo Combinado a Gás Natural**



$$\mathbf{RE = RG = E/C = 55\%}$$

**Rendimento Eléctrico = Rendimento Global**



8. A lógica da remuneração dos custos evitados  
**O Custo do kWh nos consumidores supera 65 €/MWh, excluindo a valorização do impacte ambiental do CO<sub>2</sub>**



### Investimento

Inv. Específico = 445 €/kW  
Rentabilidade do Investidor = 8%  
Nº meses Amortização = 15 x 10  
Horas anuais de operação = 6.000

$$\text{PF} = 4.863,3 \text{ €/MW/mês} \\ = 9,72 \text{ €/kWh el}$$

### Operação+Manutenção+Outros

$$\text{PVO} = 1,30 \text{ €/MWh el}$$

### Custos Ambientais

Emissões CO<sub>2</sub> = 370 g/kWh el  
Valor = 8,1 c€/kg CO<sub>2</sub>

$$\text{Valorização CO}_2 = 29,97 \text{ €/kWh el}$$

Central de  
Ciclo Combinado

### Gás Natural

$$20,97 \text{ c€/Nm}^3 / 10,53 = 19,91 \text{ €/MWh PCI} \\ 19,91 / 0,55 = 36,20 \text{ €/MWh el}$$

$$\text{PVC} = 36,20 \text{ €/MWh el}$$

### Redes de Transporte e Distribuição

$$\text{PVR} = 18,60 \text{ €/MWh el}$$

$$\text{Custo de Produção} = 9,72 + 36,20 + 1,30 = 47,22 \text{ €/MWh}$$

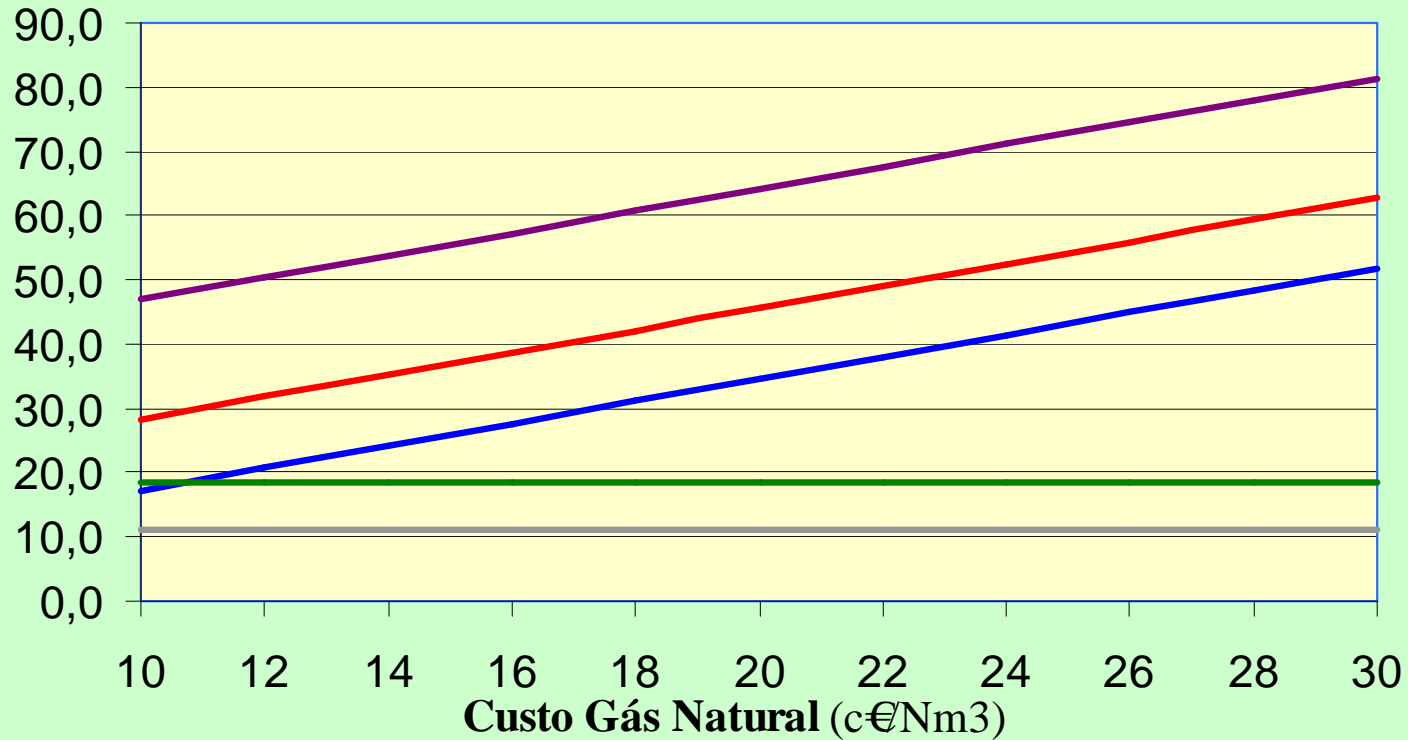
$$\text{Custo nos Consumidores} = 47,22 + 18,60 = 65,82 \text{ €/MWh}$$



8. A lógica da remuneração dos custos evitados  
**O Custo de produção da energia depende essencialmente do custo do combustível**



***Custo de Produção na Central de Referência em €/MWh***

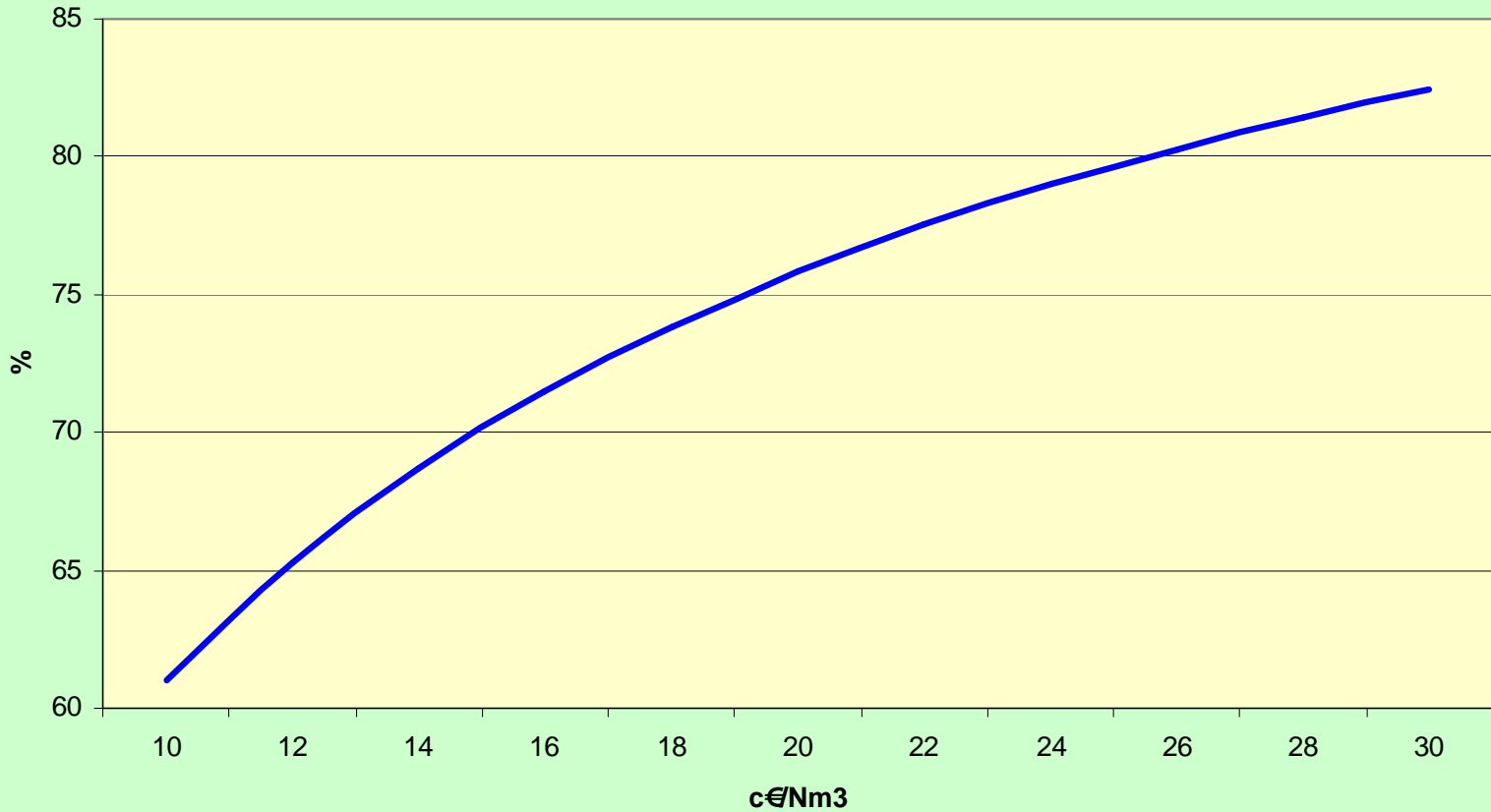




8. A lógica da remuneração dos custos evitados  
**O Custo de produção da energia depende  
essencialmente do custo do combustível**



**Peso percentual do combustível no custo de produção**





8. A lógica da remuneração dos custos evitados  
**A estrutura base de cálculo dos custos evitados é semelhante para todas as tecnologias de cogeração**



*Cálculo da Remuneração Mensal pela Energia Exportada pela Cogeração*

$$\mathbf{VRD}_m = [ \mathbf{PF} + \mathbf{PV} + \mathbf{PA} ] \times \mathbf{f}_{\text{perdas}}$$

Valor no mês m  
da Remuneração

Parcela  
Fixa

Parcela  
Variável

Parcela  
Ambiental

Factor de  
correção  
pelas perdas  
evitadas  
nas redes





8. A lógica da remuneração dos custos evitados  
**A Parcela Variável é constituída por três termos distintos**



### *Cálculo da Parcela Variável da Remuneração Mensal*

$$\mathbf{VRD}_m = [ \mathbf{PF} + \mathbf{PV} + \mathbf{PA} ] \times \mathbf{f}_{\text{perdas}}$$

**Parcela Variável**

$$\mathbf{PV}(\mathbf{VRD})_m = \mathbf{PVC}(\mathbf{VRD})_m + \mathbf{PVR}(\mathbf{VRD})_m + \mathbf{PVO}(\mathbf{VRD})_m$$

Custo evitado com  
Combustível

Custos evitados nas  
Redes a montante

Outros custos  
(Oper, manutenção, ...)

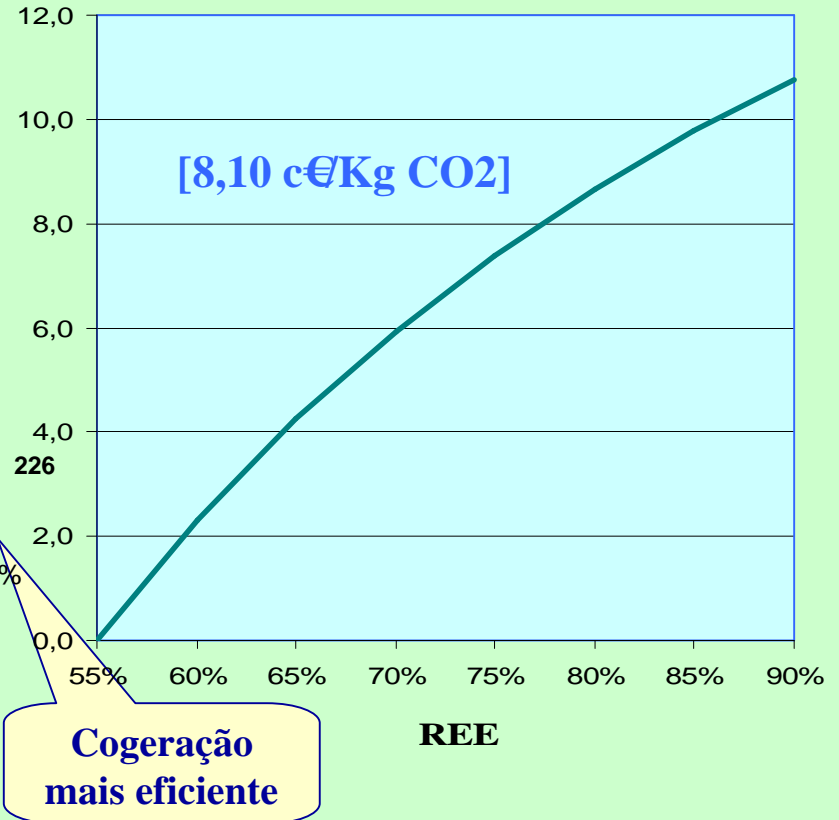
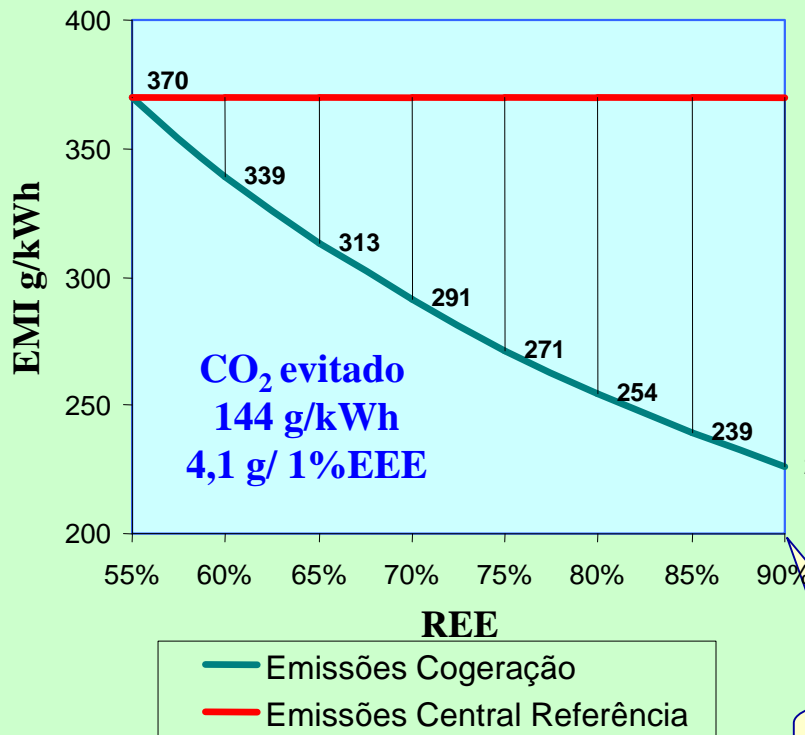


8. A lógica da remuneração dos custos evitados  
**Critério da emissão evitada de CO<sub>2</sub> na base da valorização do parcela ambiental**



### *Emissões de CO<sub>2</sub>*

### *Custo evitado relativo à menor emissão de CO<sub>2</sub>*





## 9. A Directiva da Cogeração As tecnologias abrangidas



### Tecnologias de cogeração abrangidas pela presente directiva

- a) Turbinas de gás em ciclo combinado com recuperação de calor
- b) Turbinas a vapor de contrapressão
- c) Turbinas de condensação com extracção de vapor
- d) Turbinas de gás com recuperação de calor
- e) Motores de combustão interna
- f) Microturbinas
- g) Motores Stirling
- h) Células de combustível
- i) Motores a vapor
- j) Ciclos orgânicos de Rankine
- k) Qualquer outro tipo de tecnologia ou combinação de tecnologias que correspondam às definições da alínea a) do artigo 3.º



## 9. A Directiva da Cogeração

### Conceito de electricidade produzida em cogeração



- a) A electricidade produzida em cogeração será considerada igual à produção de electricidade anual total da unidade medida à saída dos geradores principais:
- i) nas unidades de cogeração de tipo b), d), e), f), g) e h) referidas no anexo I, com uma eficiência anual global definida pelos Estados-Membros a um nível de pelo menos 75 %, e
  - ii) nas unidades de cogeração de tipo a) e c) referidas no anexo I, com uma eficiência anual global definida pelos Estados-Membros a um nível de pelo menos 80 %.
- b) Nas unidades de cogeração com uma eficiência anual global inferior ao valor referido na subalínea i) da alínea a) [unidades de cogeração de tipo b), d), e), f), g) e h) referidas no anexo I] ou com uma eficiência anual global superior ao valor referido na subalínea ii) da alínea a) [unidades de cogeração de tipo a) e c) referidas no anexo I], a cogeração é calculada de acordo com a seguinte fórmula:

$$E_{\text{CHP}} = H_{\text{chp}} \cdot C$$

em que:

$E_{\text{CHP}}$  é a quantidade de electricidade produzida em cogeração

$C$  é o rácio electricidade/calor

$H_{\text{chp}}$  é a quantidade de calor útil produzida em cogeração (calculada para o efeito como produção total de calor, deduzindo o calor que seja eventualmente produzido em caldeiras separadas ou por extracção de vapor vivo do gerador de vapor antes da turbina).



## 9. A Directiva da Cogeração Os valores do rácio electricidade/calor e a cogeração de alta eficiência



O cálculo da electricidade produzida em cogeração deve basear-se no rácio efectivo electricidade/calor. Se o rácio efectivo electricidade/calor de uma unidade de cogeração não for conhecido, podem ser utilizados, nomeadamente para fins estatísticos, os seguintes valores implícitos para as unidades de cogeração de tipo a), b), c), d) e e) referidas no anexo I, desde que a electricidade produzida em cogeração assim calculada seja igual ou inferior à produção total de electricidade da unidade:

Tipo de unidade	Rácio implícito electricidade/calor, C
Turbinas de gás em ciclo combinado com recuperação de calor	0,95
Turbinas a vapor de contrapressão	0,45
Turbinas de condensação com extracção de vapor	0,45
Turbinas de gás com recuperação de calor	0,55
Motores de combustão interna	0,75

### a) Cogeração de elevada eficiência

Para efeitos da presente directiva, a cogeração de elevada eficiência deve satisfazer os seguintes critérios:

- a produção das unidades de cogeração deve permitir uma poupança de energia primária calculada de acordo com a alínea b) de, pelo menos, 10 % em comparação com os dados de referência para a produção separada de calor e de electricidade,
- a produção das unidades de cogeração de pequena dimensão e de micro-cogeração que permita uma poupança de energia primária pode ser considerada cogeração de elevada eficiência.



## 9. A Directiva da Cogeração O cálculo da poupança percentual de energia primária



### b) Cálculo da poupança de energia primária

A poupança de energia primária permitida pela cogeração definida nos termos do anexo II será calculada com base na seguinte fórmula:

$$PES = \left[ 1 - \frac{1}{\frac{CHP H\eta}{Ref H\eta} + \frac{CHP E\eta}{Ref E\eta}} \right] \times 100 \%$$

Em que:

PES é a poupança de energia primária

CHP H $\eta$  é a eficiência térmica da cogeração cuja definição corresponde à produção anual de calor útil dividida pela quantidade de combustível utilizada na produção total de calor e electricidade num processo de cogeração

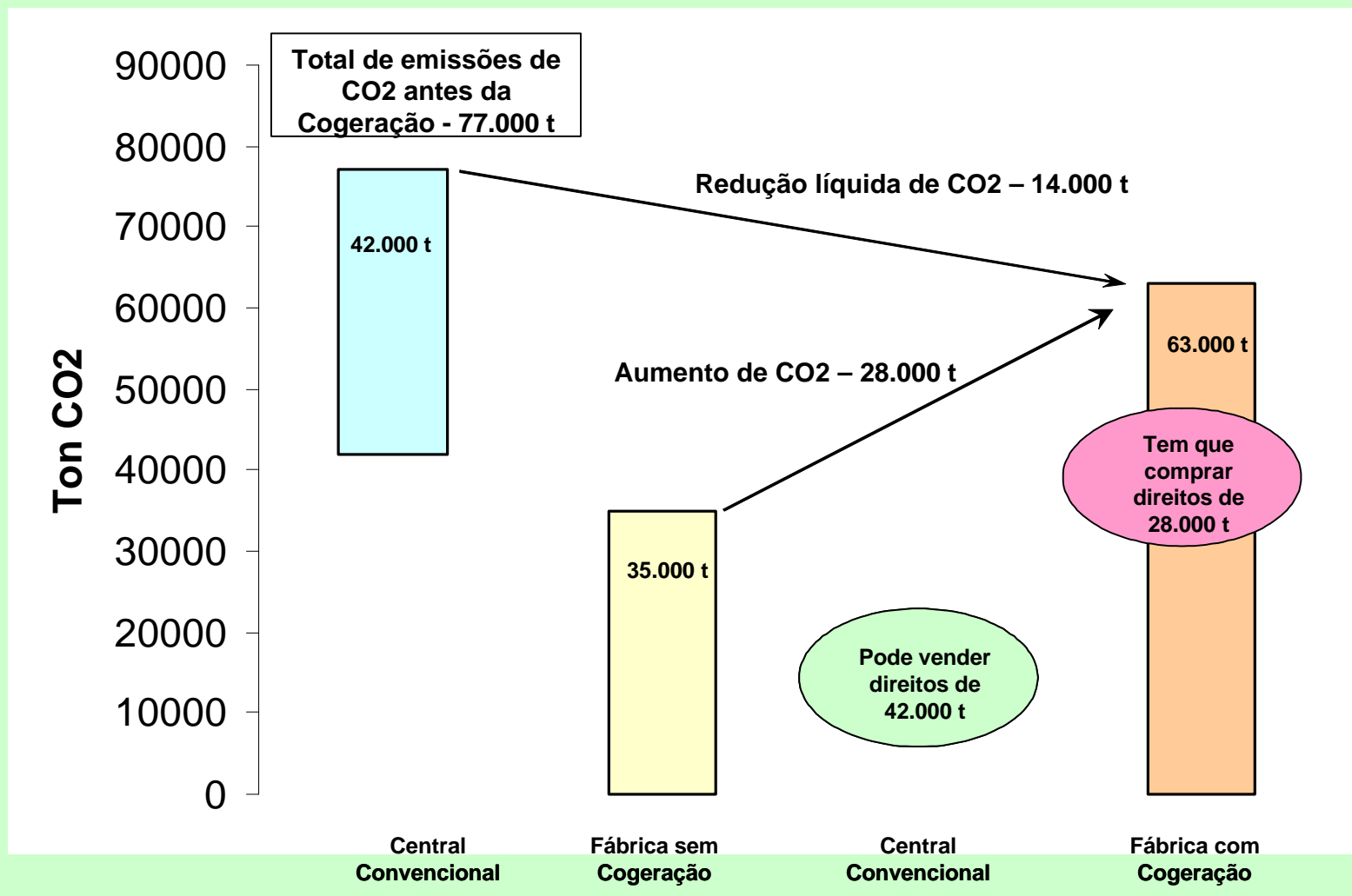
Ref H $\eta$  é o valor de referência da eficiência para a produção separada de calor

CHP E $\eta$  é a eficiência eléctrica da cogeração cuja definição corresponde à produção anual de electricidade produzida em cogeração dividida pela quantidade de combustível utilizada na produção total de calor útil e electricidade num processo de cogeração. Quando uma unidade de cogeração gerar energia mecânica, a quantidade anual de energia eléctrica proveniente da cogeração poderá ser acrescida de um elemento suplementar que represente a quantidade de energia eléctrica que é equivalente à da energia mecânica. Este elemento não criará um direito de emitir garantias de origem nos termos do artigo 5.º

Ref E $\eta$  é o valor de referência da eficiência para a produção separada de electricidade.



# 10. O comércio de emissões A lógica de o comércio se realizar entre instalações penaliza a cogeração





10. O comércio de emissões  
A cogeração é ambientalmente eficaz face a outras tecnologias de produção de electricidade a partir de renováveis, como a eólica



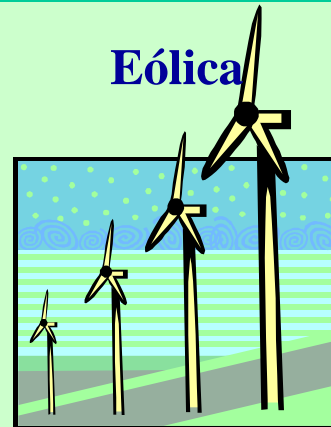
CTC a GN



$$\text{ECO}_2[\text{g/KWhe}] = \text{EECO}_2/\text{RE}$$

$$= 203/0,50 = 406 \text{ g/kWhe}$$

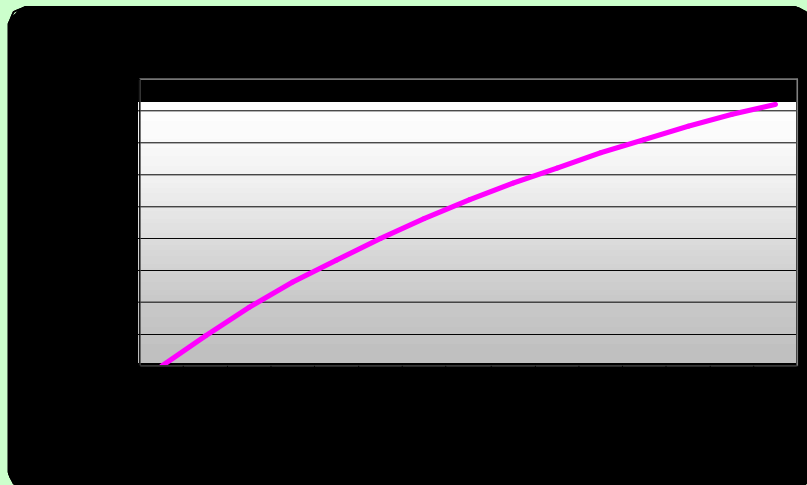
Eólica



1.000 KW evitam emissões de CO<sub>2</sub>  
iguais a :

$$1.000 * 406 * 2.200 / 1.000.000 =$$

893 tons/ano



**1.000 KW em Cogeração a Gás Natural, funcionando 7550 horas por ano, conseguiriam a mesma redução anual de emissões, desde que  $f(\text{RE}, \text{REE}) = 0,59$  KWhe/KWhe (para RE=50%), ou seja, REE = 72%**





## 11. O futuro



- Necessidade de desenvolver 800 MW de capacidade adicional até 2010, para dar cumprimento ao disposto no cenário de referência e nas medidas adicionais do Plano Nacional para as Alterações Climáticas (PNAC)
- Necessidade de manter a capacidade instalada, designadamente através da sua actualização tecnológica
- Utilização do GN como combustível preferencial, senão mesmo exclusivo, das novas instalações
- Desenvolvimento de projectos no sector terciário e da pequena indústria, recorrendo a soluções de mini e microcogeração
- Aplicação, com o impacto correspondente, da fase experimental do comércio de emissões (2005-2008)
- Preparação da 2.<sup>a</sup> fase do mercado de emissões (2008-2012)
- Pressão do mercado eléctrico em fase de criação (MIBEL), no sentido de a cogeração deixar de usufruir de um regime especial de remuneração



**Muito Obrigado pela  
atenção dispensada**