

COGERAÇÃO: BENEFÍCIOS em que CONDIÇÕES?

Clito Afonso^{1(*)}, Tiago Moutinho², Carlos Guimarães², Trigo Moutinho²

¹Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Depart. Eng^a Mecânica - Porto, Portugal

²Empresa Auditene - Porto, Portugal

(*)Email: clito@fe.up.pt

RESUMO

O acesso à energia é fundamental para o nosso quotidiano. Os mercados energéticos estão actualmente submetidos a uma enorme pressão originada pela instabilidade nos preços dos combustíveis e pelas questões de natureza ambiental. Desta forma o cidadão é afectado pelo sucessivo aumento dos preços de combustíveis, pela ameaça à segurança do aprovisionamento da energia e pelas alterações climáticas resultantes de uma política ambiental negligenciada. Uma energia sustentável, competitiva e segura é um dos principais alicerces sobre os quais assenta toda a civilização ocidental, tal como a conhecemos actualmente.

Sendo assim, surgem os sistemas de cogeração como uma forma de produção de energia de alta eficiência, de menores impactos ambientais e de uma diminuição do consumo de energia primária. No entanto a cogeração, até esta data reconhecidamente uma das formas mais eficientes de produção de energia eléctrica e de energia térmica, tem visto o seu futuro colocado em causa em virtude das recentes políticas de austeridade traduzidas na alteração, em baixa, do regime remuneratório relativamente à energia eléctrica produzida.

O objectivo deste trabalho é a abordagem do novo enquadramento legal (em Portugal) aplicável à actividade de cogeração e principalmente o desenvolvimento de um procedimento de cálculo para a execução de estudos de viabilidade técnico económica de acordo com as novas regras legislativas que resultaram da publicação do novo regime remuneratório aplicável definido pela Portaria nº 140/2012 de 14 de Maio. Exercícios como este deverão ser feitos para diferentes países com diversas legislações diferentes.

COGERAÇÃO: DEFINIÇÃO

A energia é um factor indispensável para toda e qualquer actividade humana.

Da disponibilidade energética dependem os transportes, a produção industrial, o comércio, as comunicações, etc. A geração e a utilização racional e eficiente da energia condicionam de certa forma a sociedade actual, seja por razões económicas (competitividade), seja por razões de impacto ambiental.

Contudo, a satisfação das nossas necessidades energéticas tem vindo a ser feita maioritariamente à custa de energias convencionais como o petróleo, carvão e gás natural. Embora presentes em larga escala no planeta terrestre estas não são renováveis à escala humana, trazendo consequências nefastas para o meio ambiente. Surge assim um novo conceito, designado por desenvolvimento sustentado (utilização racional da energia e satisfação das necessidades energéticas) que vem no sentido de tentar diminuir esta problemática.

Tradicionalmente, os consumidores satisfazem a sua procura de energia comprando separadamente a electricidade e os combustíveis às companhias distribuidoras.

No que respeita à geração de energia eléctrica adquirida pelos consumidores, uma boa parte é produzida nas centrais termoeléctricas convencionais.

Destas, as centrais convencionais mais antigas funcionando em ciclo simples, convertem tipicamente apenas cerca de 37% da energia química contida no combustível em energia eléctrica. Levando em linha de conta as perdas de energia inerentes ao transporte, a eficiência global baixa para valores na ordem dos 33%, significando que cerca de 67% da energia são perdidos sob a forma de calor. Nas centrais mais modernas funcionando em ciclo combinado, os valores de eficiência são de respectivamente 52,5% à saída da central e de cerca de 48,5% se levarmos em linha de conta as perdas inerentes ao transporte de energia eléctrica, significando desta forma que cerca de 51,5% da energia continua a ser perdida sob a forma de calor.

Do exposto pode-se verificar que mais de 50% da energia utilizada para geração de electricidade nas grandes centrais de produção de energia eléctrica é inevitavelmente perdida para o ambiente, sem possibilidade de utilização prática.

A geração de energia da energia térmica produzida a partir do combustível adquirido pelos consumidores é efectuada em sistemas de queima cujos rendimentos médios são, na melhor das hipóteses, de cerca de 90% (referido ao poder calorífico inferior do combustível).

Assim, pode-se verificar uma vez mais que pelo menos cerca de 10% da energia do combustível utilizada na geração de calor é igualmente perdida para o ambiente, sem possibilidade de utilização prática.

Perante esta problemática surge a necessidade do aumento da eficiência dos processos de produção de electricidade e geração de calor de forma a reduzir os custos financeiros e ambientais.

Deste modo, em alternativa às grandes centrais convencionais e às redes de distribuição de alta tensão, surge a produção descentralizada de electricidade, e em particular a cogeração com o propósito de tirar partido das limitações inerentes à conversão de calor em trabalho. Através de uma definição sucinta [Afonso, 2012], pode-se dizer que a cogeração é um processo de produção e exploração combinada de energia térmica e de energia eléctrica, num sistema integrado, a partir da mesma fonte primária, Figura 1.

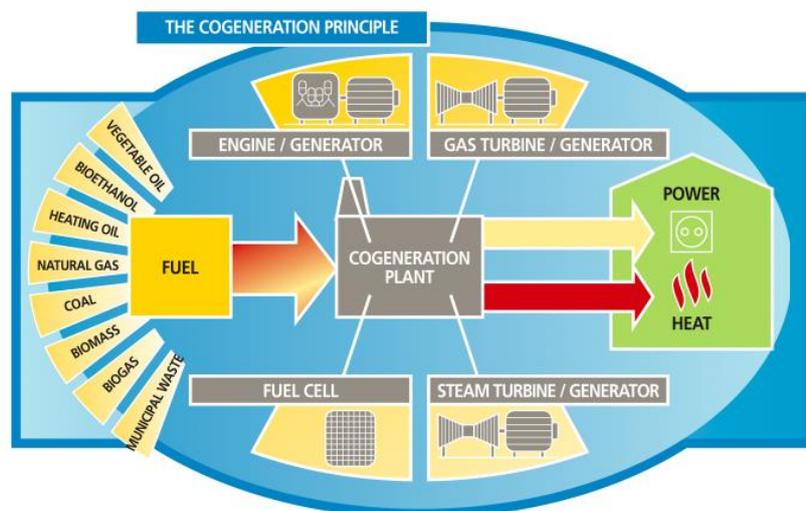


Figura 1 - Princípio da cogeração [Cogen, 2013]

A utilização da mesma fonte primária de energia para gerar simultaneamente energia eléctrica e calor resulta em níveis elevados de economia e consequentemente numa diminuição muito significativa da factura energética sem alteração do processo produtivo do consumidor.

Entre as fontes primárias utilizadas nos sistemas de cogeração estão: derivados de petróleo (fuelóleo), o gás natural, o gás propano, o carvão, a biomassa, os resíduos industriais, etc.

O calor produzido pode ser utilizado directamente no processo industrial, bem como recuperado e convertido para a utilização em aquecimento de espaços, aquecimento de águas e em chillers de absorção para a produção de frio (neste caso trata-se de um sistema de trigerção), permitindo assim a optimização e o acréscimo de eficiência nos sistemas de conversão e utilização de energia, garantindo economias de energia primária e competitividade acrescida às empresas pela redução de custos.

RESULTADOS de uma AUDITORIA a uma INSTALAÇÃO de COGERAÇÃO

Foi realizada em 2012 uma auditoria a uma empresa portuguesa que possui uma instalação de cogeração. A presente central de cogeração é constituída basicamente por um motor alternativo funcionando em ciclo OTTO a gás natural ROLLS-ROYCE KVGS16G4 com potência eléctrica de 3220 kWe interligado a uma caldeira de recuperação destinada à produção de vapor de água saturado a 11 bar efectivos.

Ao motor está acoplado um alternador para produção de energia eléctrica 4025 kVA.

Os gases de escape do motor, após passar na caldeira de recuperação, são enviados para a atmosfera através de uma chaminé.

Parte da energia térmica contida no circuito de água de arrefecimento do motor é também recuperada sob a forma de água quente para fornecimento ao processo produtivo da fábrica.

Tendo por base o levantamento feito aos consumos efectuados à empresa (histórico anual) foram obtidos os seguintes resultados globais relativos ao período da auditoria:

- Energia eléctrica útil

$$E_u = 14\,960,19 \text{ MWh}$$

- Energia térmica no vapor ao processo

$$Q_v = M_v \times \frac{H_v}{3600} = 16816,87 \times \frac{2779,70}{3600} = 12\,984,96 \text{ MWh}$$

- Energia térmica na água quente de arrefecimento do motor

$$Q_{AQ} = 4\,102,00 \text{ MWh}$$

- Energia térmica na água de alimentação à caldeira

$$Q_a = M_a \times \frac{H_a}{3600} = 17336,98 \times \frac{376,83}{3600} = 1\,814,66 \text{ MWh}$$

- Energia térmica no gás natural

$$Q_{GN} = \frac{V_{GN}}{1000} \times \frac{PCI_{GN}}{3600} = \frac{3980769}{1000} \times \frac{37910}{3600} = 41\,919,71 \text{ MWh}$$

- Rendimento global da instalação

$$\eta_{global} = \frac{E_u + Q_v + Q_{AQ} - Q_a}{Q_{GN}} \times 100$$

$$\eta_{global} = \frac{14960,19 + 12984,96 + 4102,00 - 1814,66}{41919,71} \times 100 = 72,1\%$$

- Rendimento eléctrico equivalente da instalação

$$REE = \frac{\text{Energia eléctrica útil}}{\text{Energia combustível} - \frac{\text{Energia térmica útil}}{0,9}}$$

$$REE = \frac{14960,19}{41919,71 - \frac{(12984,96 + 4102,00 - 1814,66)}{0,9}} = 0,60$$

Mostra-se respectivamente na Figura 2 e 3 o rendimento global da instalação de cogeração e a evolução mensal do rendimento eléctrico equivalente (REE) da instalação.

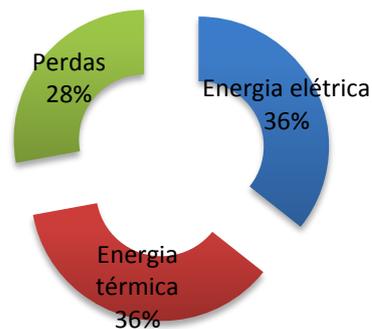


Figura 2 - Eficiência global da instalação de cogeração (dados anuais).

Tendo por base todas as medições realizadas à instalação foram obtidos os seguintes resultados globais relativos ao período da auditoria:

- Energia eléctrica útil vendida

$$E_u = 7\,935 \text{ kWh}$$

- Energia térmica no vapor ao processo

$$Q_v = M_v \times 1000 \times \frac{H_v}{3600} = 5,80 \times 1000 \times \frac{2774,60}{3600} = 4\,470,2 \text{ kWh}$$

- Energia térmica na água quente de arrefecimento do motor

$$Q_{AQ} = 2\,319,49,00 \text{ kWh}$$

- Energia térmica na água de alimentação à caldeira

$$Q_a = M_a \times \frac{H_a}{3600} = 6,0 \times \frac{958,0 \times 414,51}{3600} = 661,8 \text{ kWh}$$

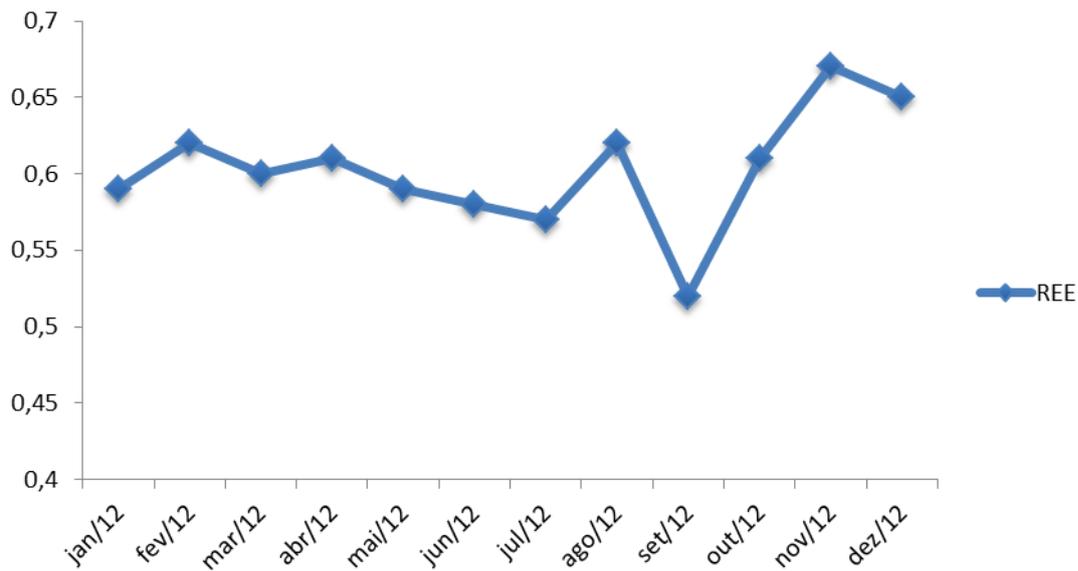


Figura 3 - Evolução mensal do rendimento elétrico equivalente (REE) da instalação.

- Energia térmica no gás natural

$$Q_{GN} = V_{GN} \times \frac{PCI_{GN}}{3600} = 1868 \times \frac{37910}{3600} = 19\,671 \text{ kWh}$$

- Rendimento global da instalação

$$\eta_{global} = \frac{E_u + Q_v + Q_T - Q_a}{Q_{GN}} \times 100$$

$$\eta_{global} = \frac{7935 + 4470,2 + 2319,49 - 661,8}{19671} \times 100 = 71,5\%$$

- Rendimento elétrico equivalente da instalação

$$REE = \frac{\text{Energia elétrica útil}}{\text{Energia combustível} - \frac{\text{Energia térmica útil}}{0,9}}$$

$$REE = \frac{7935,0}{19671,0 - \frac{(4470,2 + 2319,49 - 661,8)}{0,9}} = 0,62$$

Mostra-se na Figura 4 a eficiência global da instalação obtida com os dados experimentais (medidos).

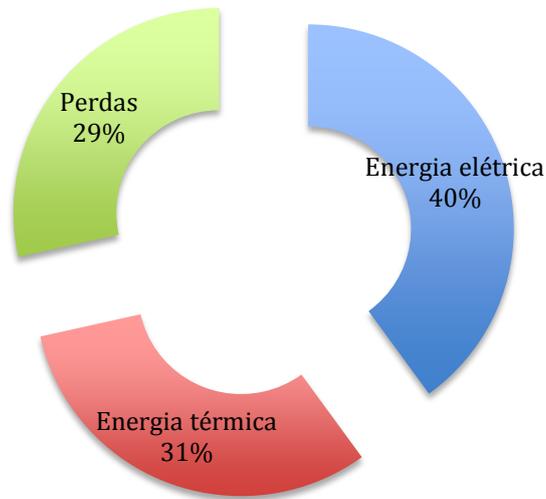


Figura 4 - Eficiência global da instalação de cogeração (dados experimentais).

POUPANÇA de ENERGIA PRIMÁRIA

No contexto do Decreto-Lei nº 23/2010, de 25 de Março, a promoção de cogeração de elevada eficiência com base na procura de calor útil é considerada prioritária, devido ao seu potencial de poupança de energia primária e, conseqüentemente, de redução das emissões de CO₂, bem como à diminuição significativa das perdas na rede associada à descentralização da produção eléctrica e também da potencial contribuição para a segurança de abastecimento. Segundo o mesmo decreto, a poupança de energia primária da actividade da cogeração relativamente à produção separada de calor e de electricidade é medida de acordo com a seguinte fórmula:

$$PEP (\%) = \left[1 - \frac{1}{\frac{H_{\eta}}{RefH_{\eta}} + \frac{E_{\eta}}{RefE_{\eta}}} \right] \times 100\%$$

O valor absoluto da poupança de energia primária da actividade de cogeração relativamente à produção separada de calor e electricidade é determinado pela seguinte equação:

$$PEP = \frac{H_{CHP}}{RefH_{\eta}} + \frac{E_{total}}{RefE_{\eta}} - F_{total}$$

O valor de referência em matéria de eficiência para a produção separada de calor (usando gás natural) é de 90%, conforme indicado no anexo II da Directiva 2004/8/CE. O valor de referência em matéria de eficiência para a produção separada de electricidade (condições ISO) é de 52,4%, conforme definido no anexo I da Directiva 2004/8/CE. O factor de correcção relativo às perdas da rede evitadas pela energia eléctrica entregue à RESP é de 0,945. Tensão de fornecimento da energia eléctrica na ligação à RESP: 15 kV.

O valor de referência em matéria de eficiência para a produção separada de electricidade, ajustado pelo factor de correcção de perdas da rede evitadas é de 49,5%.

Sendo assim, para o cálculo da poupança de energia primária no ano em que foi realizado o estudo, teve-se em conta os seguintes elementos:

- Energia eléctrica total produzida (E_{total}) = 15 188,67 MWh
- Energia térmica útil produzida (H_{CHP} = 12984,96+4102,00-1814,66 = 15 272,30 MWh
- Combustível consumido (F_{total}) = 41 919,71 MWh
- Eficiência eléctrica (E_{η}) = 36,2%
- Eficiência térmica (H_{η}) = 36,4%
- Valor de referência da eficiência para a produção separada de calor ($RefH_{\eta}$)= 90%
- Valor de referência da eficiência para a produção separada de electricidade ($RefE_{\eta}$) = 49,5%

Considerando estes valores e os consumos já apresentados anteriormente para o ano em apreço, calculou-se um valor de PEP de 11,9%, o que equivale a um valor absoluto de PEP de 5 662 MWh/ano ($41919,71 / [1-0,119] - 41919,71$).

Foi realizado o mesmo cálculo para o dia em que foram efectuados os levantamentos de campo (14/03/2013), tendo-se obtido um valor de PEP de 14,7%. Para efeitos de cálculo da poupança de energia primária foi considerada a produção de energia eléctrica bruta.

Face aos resultados indicados verifica-se que de acordo com o indicado na alínea b) do artigo 3º do Decreto-Lei nº 23/2010, esta instalação é classificada como cogeração de elevada eficiência.

RÁCIO ELECTRICIDADE/CALOR e EFICIÊNCIA GLOBAL da INSTALAÇÃO

A metodologia do cálculo do rácio electricidade/calor numa instalação de cogeração não está explicitada no Decreto-Lei nº 23/2010, nem no manual da EEGO. Este decreto,, no seu anexo II, estabelece que a electricidade produzida em cogeração será considerada igual à produção anual total da unidade medida à saída dos geradores, se a eficiência global for $\geq 75\%$, para os motores de combustão interna.

Na situação indicada acima, não é necessário determinar o rácio $C = E_{CHP} / H_{CHP}$, pois a totalidade de energia eléctrica produzida é de cogeração.

No caso desta instalação de cogeração, a eficiência global calculada com base nos dados no ano em apreço, é de 72,6%. Sendo assim, como a eficiência global é inferior a 75%, é necessário determinar o rácio C da instalação, para assim calcular a quantidade de electricidade produzida em cogeração.

Considerando os resultados anuais obtidos na instalação de cogeração, ou seja:

- Electricidade total produzida = 15 188,67 MWh
- Calor útil produzido = 15 272,30 MWh
- Combustível consumido = 41 919,71 MWh
- Eficiência eléctrica = 36,2%

- Eficiência térmica = 36,4%
- Eficiência global = 72,6%

Como a eficiência global é inferior a 75%, há produção de electricidade que não é de cogeração. Assim, para se obter uma eficiência global de, pelo menos, 75%, mantendo fixa a eficiência eléctrica de 36,2%, a eficiência térmica terá de ser de 38,8%.

Na base de uma eficiência térmica de 38,8%, para o mesmo consumo de combustível, o calor útil terá de ser igual a 16 279,26 MWh.

Então, o rácio C é:

$$C = \frac{15188,67}{16279,26} = 0,93$$

A electricidade de cogeração é igual a:

$$E_{CHP} = \left(\frac{36,4}{38,8}\right) \times 15\ 188,67 = 14\ 249,16\ MWh$$

CONSUMO de COMBUSTÍVEL ASSOCIADO à PRODUÇÃO de CALOR ÚTIL e de ELECTRICIDADE em COGERAÇÃO

A determinação do consumo de combustível do processo de cogeração, não associado à produção de energia eléctrica é calculada pela seguinte fórmula:

$$F_{CHP} = F_{total} - F_{nCHP}$$

Sendo que a determinação do consumo de combustível do processo de cogeração não associado à produção de energia eléctrica é calculado por:

$$F_{nCHP} = \frac{E_{total} - E_{CHP}}{\frac{E_{total} + \beta \times H_{CHP}}{F_{total}}} = \frac{15\ 188,67 - 14\ 249,16}{\frac{15\ 188,67}{41\ 919,71}} = 2\ 593\ MWh$$

sendo β , coeficiente de perdas, igual a zero.

Para a instalação em análise calculou-se um valor de F_{CHP} de 39 326,7 MWh/ano.

EMISSÕES de CO₂ ASSOCIADAS à PRODUÇÃO de ENERGIA ELÉCTRICA

Para efectuar a estimativa das emissões de CO₂ associadas à produção de energia eléctrica na instalação, bem como das emissões evitadas de CO₂ foram utilizados os factores de emissão definidos pelo IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change [21]:

Emissão de CO₂ para o gás natural – 202 kg CO₂/MWh

As emissões de CO₂ associadas à produção de energia eléctrica no processo obtêm-se utilizando a fórmula seguinte indicada no ponto 8.1.1 do manual da EEGO:

$$(E.CO2)_{CHPi} = \frac{(F_{CHP} - \frac{H_{CHP}}{RefH_{\eta}}) \times (E.CO2)_i}{E_{CHP}}$$

$$(E.CO2)_{CHPi} = \frac{(39326,7 - \frac{15272,30}{0,9}) \times 202}{14249,16} = 316,95 \text{ kg/MWh}$$

As emissões de CO₂ por MWh produzido de energia eléctrica no processo de cogeração pelo combustível gás natural: 316,95 kg/MWh.

EMISSÕES de CO₂ EVITADAS por MWh PRODUZIDO de ENERGIA ELÉCTRICA

As emissões evitadas de CO₂ por MWh produzido de energia eléctrica no processo de cogeração quando comparado com a produção separada de calor e electricidade obtêm-se utilizando a fórmula seguinte indicada no ponto 8.2.1 do manual da EEGO:

$$(E.E.CO2)_i = \frac{PEP}{E_{CHP}} \times (E.CO2)_i = \frac{5662}{14249,16} \times 202 = 80,27 \text{ kg/MWh}$$

As emissões de CO₂ por MWh produzido de energia eléctrica no processo de cogeração quando comparado com a produção separada de calor e electricidade são de 80,3 kg/MWh. Na Tabela 1, sintetizam-se os resultados obtidos no período da auditoria.

Tabela 1. Resumo dos valores globais da auditoria

Parâmetros	Valor
Eletricidade produzida através do processo de cogeração (E_{total}), MWh	15 188,67
Calor útil produzido em cogeração (H_{CHP}), MWh	15 272,30
Consumo de combustíveis (F_{total}), MWh	41 919,71
Eficiência global (η_{global}), %	72,6
Poupança de energia primária (PEP), %	11,9
Eletricidade produzida em cogeração (E_{CHP}), MWh	14 249,16
Rendimento eléctrico equivalente (REE)	0,60

Segundo o Decreto-Lei nº538/99, de 13 de Dezembro e de acordo com os cálculos efectuados no âmbito da auditoria verificou-se que o rendimento eléctrico equivalente médio anual da instalação ao longo do período da auditoria foi de 0,60. Este valor, agora calculado a partir do histórico anual, é inferior ao valor licenciado para esta instalação no âmbito do Decreto-Lei 538/99. Com efeito o valor licenciado foi de REE (Rendimento Eléctrico Equivalente) = 0,63. O valor real agora obtido (REE = 0,60), apesar de inferior, encontra-se dentro do limite mínimo imposto pela referida legislação e ainda dentro da margem de tolerância de 0,05 relativamente ao REE licenciado de acordo com o ponto 3 do Artigo 4º do Decreto-Lei nº 538/99, de 13 de Dezembro. No ensaio local executado nas condições da altura, foi obtido o valor de REE = 0,62. Este valor, embora superior ao valor do histórico anual, vem de alguma forma confirmar a ordem de grandeza do valor previsto no ato do licenciamento.

Segundo o Decreto-Lei nº 23/2010, de 25 de Março verificou-se que a poupança de energia primária média anual da instalação ao longo do período da auditoria foi de 11,9%. Conforme o indicado na alínea b) do mesmo artigo, esta instalação é classificada como cogeração de elevada eficiência, uma vez que o valor de PEP (Poupança de Energia Primária) é superior a 10%.

CONCLUSÕES

O risco económico associado ao projeto de investimento numa central de cogeração reside na possibilidade de se vir a verificar que os resultados da exploração não estejam de acordo com o inicialmente previsto no estudo de viabilidade técnico económico.

O preço de venda de energia elétrica à rede, o custo de combustível e o investimento real efetuado constituem fatores relevantes para a sustentabilidade financeira do projeto.

O preço de venda de energia elétrica acaba por estar, através da tarifa de referência publicada periodicamente pelo governo, indexado ao valor do arabian ligh breakeven, enquanto que o custo do gás natural está igualmente indexado ao valor do arabian light breakeven ou ao valor do brent (conforme o fornecedor).

Desta forma, apesar do preço de venda de energia elétrica não estar diretamente indexado ao custo do gás natural, é de esperar que se processe algum equilíbrio entre estes dois parâmetros constituindo assim alguma segurança para o investidor.

Atendendo à importância dos três fatores acima referidos (preço de venda de eletricidade, custo de combustível e investimento), foi elaborada uma análise de sensibilidade tendo como objetivo determinar a influência que a variação destes três fatores poderá ter nos indicadores principais que medem a rentabilidade do projeto (TIR, VAL e PAYBACK).

Na Tabelas 2, 3 e 4 apresentam-se as variações introduzidas no estudo de viabilidade real realizado, originados pela variação de 10 pontos percentuais dos fatores de produção (preço de eletricidade, custo combustível) e investimento, relativamente ao cenário base calculado. Finalmente, tendo por base as tabelas 2, 3 e 4 apresenta-se na Tabela 5 a variação dos indicadores económicos em função dos fatores de produção, comparativamente com os seus valores iniciais (caso 0%).

Tabela 2 - Variação dos indicadores em função do preço de venda de energia elétrica

Variação preço kWh	TIR (%)	VAL (€)	PAYBACK (anos)
+ 10%	14,97	374 943	5,2
+ 5%	12,03	230 092	5,9
0 %	8,90	85 241	6,8
- 5 %	5,60	-59 610	8,1
-10 %	1,97	-204 461	9,8

Tabela 3 - Variação dos indicadores em função do custo do combustível

Variação custo gás	TIR (%)	VAL (€)	PAYBACK (anos)
+ 10%	2,38	-188 826	9,6
+ 5%	5,79	-51 792	8,0
0 %	8,90	85 241	6,8
- 5 %	11,87	222 275	6,0
-10 %	14,66	359 309	5,3

Tabela 4 - Variação dos indicadores em função do investimento

Variação investimento	TIR (%)	VAL (€)	PAYBACK (anos)
+ 10%	6,96	-1 759	7,5
+ 5%	7,91	41 741	7,2
0 %	8,90	85 241	6,8
- 5 %	10,00	128 741	6,5
-10 %	11,20	172 241	6,1

Tabela 5 - Variação dos indicadores em função do investimento

	Variação fator produção	Variação TIR	Variação VAL	Variação PAYBACK
Preço do kWh	+10 %	+ 68%	+ 336%	- 24%
	+ 5 %	+ 35%	+ 170%	- 13%
	0 %	-	-	-
	- 5 %	- 37%	- 170%	+ 19%
	-10 %	-77%	- 336%	+ 44%
Custo combustível	+10 %	- 73%	- 322%	+ 41%
	+ 5 %	- 35%	- 161%	+ 18%
	0 %	-	-	-
	- 5 %	+ 33%	+ 161%	- 12%
	-10 %	+ 65%	+ 322%	- 22%
Investimento	+10 %	- 22%	- 102%	+ 10%
	+ 5 %	- 11%	- 51%	+ 6%
	0 %	-	-	-
	- 5 %	+ 12%	+ 51%	- 4%
	-10 %	+ 26%	+ 102%	- 10%

REFERÊNCIAS

Afonso, C. Termodinâmica para Engenharia. FEUP edições (2012). ISBN. 978-972-752-143-2

COGEN, 2013, Cogeração [online], disponível em:
<http://www.cogenportugal.com/ficheirosupload/brochura%20cogeração.pdf>

PLMJ, 2010, Cogeração: Nova remuneração e regime legal, Porto.

Decreto-Lei n.º 23/2010, de 25 de Março, Diário da República, I Série.

Decreto-Lei n.º 78/2004 de 3 de Abril, Diário da República, I Série-A.

Decreto-Lei n.º 312/2001 de 10 de Dezembro, Diário da República, I Série-A.