

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



FEUP

Cálculo de Electricidade de Cogeração de Alta Eficiência

José Carlos da Costa Barbosa

VERSÃO FINAL

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Major Energia

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Monteiro

Julho de 2009

© José Carlos da Costa Barbosa, 2009

Resumo

A presente dissertação aborda o cálculo de electricidade de cogeração de elevada eficiência segundo a directiva 2004/8/CE. A directiva referida abrange diferentes tecnologias de cogeração que estão definidas no seu anexo I. Para o cálculo de electricidade de cogeração de elevada eficiência tem que se seguir o processo de cálculo existente no anexo II da já referida directiva. O cálculo de electricidade de cogeração de elevada eficiência tem como base a PES (poupança de energia primária) sendo o método de cálculo apresentado no anexo III. Actualmente a Directiva 2004/8/CE não está implementada em Portugal. Para o cálculo de electricidade de elevada eficiência de cogeração é necessário o cálculo do PES. Este baseia-se em valores de referência harmonizados de produção de calor e electricidade que foram publicados na decisão de comissão de 21 de Dezembro de 2006. Outra decisão de comissão que saiu foi a 19 de Novembro de 2008 que estabelece orientações para a aplicação do anexo II da directiva.

Na presente dissertação realizou-se o cálculo de electricidade de cogeração de elevada eficiência para vários casos segundo a directiva e as decisões de comissão referidas anteriormente.

Palavras-chave: Cogeração, Directiva 2004/8/CE, Cálculo de Electricidade de Cogeração de Elevada Eficiência, Poupança de Energia primária

Abstract

This dissertation deals with the calculation of electricity for high-efficiency cogeneration in the Directive 2004/8/EC. The directive refers to various cogeneration technologies which are defined in its Annex I. For the calculation of electricity for high-efficiency cogeneration, one has to follow the calculation procedure in the Annex II of the aforementioned directive. The calculation of electricity for high-efficiency cogeneration is based on the PES (primary energy savings) and the method of calculation presented in Annex III. Currently the Directive 2004/8/EC is not implemented in Portugal. For the calculation of electricity from high efficiency cogeneration it is necessary to calculate the PES. This is based on harmonized reference values of heat and electricity which were published in the committee decision of the 21st of December, 2006. Another committee decision that was published on the 19th of November, of 2008, established guidelines for the implementation of Annex II.

In this dissertation was carried out the calculation of electricity from high efficiency cogeneration in several cases, according to the directive and the decisions of the committee referred above.

Keywords: Cogeneration, Directive 2004/8/EC, Calculation of electricity for high-efficiency cogeneration, Primary energy savings (PES)

Agradecimentos

Ao orientador: Cláudio Monteiro.

À minha família: Pais e Irmão.

A minha namorada: Ana Lisa Rodrigues.

Aos amigos do Porto e de Paredes.

Índice

Resumo	iii
Abstract.....	v
Agradecimentos	vii
Índice.....	ix
Lista de figuras	xi
Lista de tabelas	xv
Abreviaturas e Símbolos	xvi
Definições	xviii
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Motivação	2
1.3 OBJECTIVOS	3
1.4 Estrutura da Dissertação	3
Capítulo 2	5
Estado da arte de cogeração.....	5
2.1 Conceitos de cogeração	5
2.2 Tecnologias	6
2.3 Aplicações.....	17
Capítulo 3	21
Cálculo de electricidade de cogeração de elevada eficiência e metodologia adoptada	21
3.1 Apresentação da Directiva 2004/8/CE	21
3.2 Processo de Cálculo segundo a Directiva 2004/8/CE e Decisão da Comissão de 19 de Novembro de 2008	25
3.3 Metodologia de Cálculo	29
Capítulo 4	31
Aplicação da metodologia a casos de estudo	31
4.1 Introdução	31
4.2 Turbina a Vapor em Contra Pressão	33

4.3 Motor de Combustão Interna com Recuperação de Calor	45
4.4 Turbina de Gás em Ciclo Simples com Recuperação de Calor	54
4.5 Turbina de Gás em Ciclo Combinado.....	63
Capítulo 5	77
Conclusões	77
5.1 Conclusão de casos de estudo	77
5.2 Descrição de como foram atingidos os objectivos	78
5.3 Trabalhos futuros.....	79
Referências	80

Lista de figuras

Figura 2.1- Exemplo de uma unidade de cogeração com turbina a gás e seus constituintes[11]	7
Figura 2.3 - Turbina de gás[11].....	8
Figura 2.4 - Exemplo de uma unidade de cogeração com turbina a vapor e seus constituintes[11]	9
Figura 2.5 - Motor de combustão interna de ciclo Otto[14]	10
Figura 2.6 - Motor de combustão interna de ciclo diesel[15]	11
Figura 2.7 - Célula de combustível[10]	12
Figura 2.8 - Motor Stirling[16]	15
Figura 2.9 - Esquema de uma Micro-turbina[11]	16
Figura 2.10 - Instalação de cogeração com Micro-turbinas[10].....	16
Figura 3.1 - Fluxograma para o cálculo de electricidade de elevada eficiência	25
Figura 3.2 - Separação Virtual de uma unidade de cogeração da parte que é considerada cogeração[7]	27
Figura 4.1 - Área da unidade de cogeração[7].....	31
Figura 4.2 - Delimitação do sistema quando existem caldeiras auxiliares ou de reserva[7] ...	32
Figura 4.3 - Delimitação da unidade de cogeração quando existem turbinas a vapor secundárias[7]	32
Figura 4.4 - Delimitação da unidade de cogeração, com geradores de força motriz ligados em série[7]	33
Figura 4.5 - Esquema de uma turbina em contrapressão[24]	33
Figura 4.6 - Variação do calor considerado CHP com a variação da produção total de vapor .	36
Figura 4.7 - Variação do calor considerado CHP com a variação do autoconsumo da unidade de cogeração	37

Figura 4.8 - Variação do rácio electricidade/calor com o aumento da produção total de electricidade	37
Figura 4.9 - Variação do rácio electricidade/calor com a variação da produção total de vapor	38
Figura 4.10 - Variação do rácio electricidade/calor com a variação do autoconsumo da unidade de cogeração	38
Figura 4.11 - Variação da Electricidade que é considerada de Cogeração com a variação da produção total de electricidade	39
Figura 4.12 - Variação da poupança de energia primária com a variação da produção total de electricidade	40
Figura 4.13 - Variação da poupança de energia primária com a variação da produção total de vapor	40
Figura 4.14 - Variação da poupança de energia primária com a variação do autoconsumo da unidade de cogeração	41
Figura 4.15 - Variação do PES com a variação do consumo de combustível.....	41
Figura 4.16 - Variação do rácio electricidade/calor com a variação da percentagem da totalidade de energia térmica recuperada no período de referência	42
Figura 4.17 - Variação da electricidade de cogeração com a variação da percentagem da totalidade de energia térmica recuperada no período de referência	42
Figura 4.18 - Variação da electricidade de cogeração com a variação da percentagem da totalidade de energia térmica recuperada no período de referência	43
Figura 4.19 - Variação da poupança de energia primária com a variação do rácio electricidade/calor (C).....	44
Figura 4.20 - Esquema de uma unidade de cogeração com motor de combustão interna com recuperação de calor[24]	45
Figura 4.21 - Variação do calor considerado de cogeração com a variação da produção total de vapor.....	48
Figura 4.22 - Variação do calor considerado de cogeração com a variação do autoconsumo da unidade de cogeração	49
Figura 4.23 - Variação do rácio electricidade/calor com a variação da produção total de electricidade.....	49
Figura 4.24 - Variação do rácio electricidade/calor com a variação da produção total de vapor	50
Figura 4.25 - Variação do rácio electricidade/calor com a variação do autoconsumo de vapor da unidade de cogeração	50
Figura 4.26 - Variação da electricidade de cogeração com a variação da produção bruta de electricidade.....	51
Figura 4.27 - Variação da poupança de energia com a variação da produção bruta de electricidade.....	52

Figura 4.28 - Variação da poupança de energia primária com a variação da produção total de vapor.....	52
Figura 4.29 - Variação da poupança de energia primária com a variação do autoconsumo de vapor.....	53
Figura 4.30 - Variação da poupança de energia primária com a variação do consumo de combustível	53
Figura 4.31 - Esquema de uma unidade de cogeração a turbina a gás em ciclo simples com recuperação de calor[24]	54
Figura 4.32 - Variação do calor que é considerado de cogeração com a variação da produção total de vapor	57
Figura 4.33 - Variação do calor que é considerado de cogeração com a variação do autoconsumo de vapor da unidade de cogeração	57
Figura 4.34 - Variação do calor considerado de cogeração com a variação do combustível post-combustão.....	58
Figura 4.35 - Variação do rácio electricidade/calor com a variação da produção total de electricidade	58
Figura 4.36 - Variação do rácio electricidade/calor com a variação da produção total de vapor	59
Figura 4.37 - Variação do rácio electricidade/calor com a variação do autoconsumo de vapor da unidade de cogeração	59
Figura 4.38 - Variação do rácio electricidade/calor com a variação do combustível post-combustão	60
Figura 4.39 - Variação da electricidade que é considerada de cogeração com a variação da produção total de electricidade	60
Figura 4.40 - Variação da poupança de energia primária com a variação da produção total de electricidade	61
Figura 4.41 - Variação da poupança de energia primária com a variação da produção total de vapor.....	61
Figura 4.42 - Variação da poupança de energia primária com a variação do autoconsumo de vapor da unidade de cogeração.....	62
Figura 4.43 - Variação da poupança de energia primária com a variação do consumo de combustível	62
Figura 4.44 - Variação da poupança de energia primária com a variação do combustível post-combustão.....	63
Figura 4.45 - Esquema de uma unidade de cogeração com turbina a gás em ciclo combinado[24]	63
Figura 4.46 - Variação do calor considerado de cogeração com a variação da produção total de vapor	66
Figura 4.47 - Variação do calor considerado de cogeração com a variação do autoconsumo de vapor da central co-geradora	67

Figura 4.48 - Variação do rácio electricidade/calor com a variação da produção total de electricidade	67
Figura 4.49 - Variação do rácio electricidade/calor com a variação total de vapor	68
Figura 4.50 - Variação do rácio electricidade/calor com variação do autoconsumo de electricidade da unidade de cogeração	68
Figura 4.51 - Variação da electricidade considerada de cogeração com a variação da produção total de electricidade	69
Figura 4.52 - Variação da PES com a variação da produção total de electricidade	69
Figura 4.53 - Variação da poupança de energia primária com a variação da produção total de vapor	70
Figura 4.54 - Variação da poupança de energia primária com a variação do autoconsumo de vapor da central co-geradora	70
Figura 4.55 - Variação da poupança de energia primária com a variação do consumo de combustível da central co-geradora	71
Figura 4.56 - Variação da poupança de energia primária com a variação da temperatura média anual de cada estado membro da União Europeia	72
Figura 4.57 - Variação da poupança de energia primária com a variação do ano de construção da central co-geradora	73
Figura 4.58 - Variação da poupança de energia primária com a variação da tensão eléctrica de ligação	74
Figura 4.59 - Variação da poupança de energia primária com a variação da fracção de electricidade consumida no local	75

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Características das pilhas de combustíveis[11]	13
Tabela 2.2 - Tabela com diferentes tecnologias de cogeração e seus custos [18]	17
Tabela 2.3 - Potencial da micro-cogeração em Portugal[19]	19
Tabela 3.1 - Rácio implícito electricidade/calor (C)[6]	22
Tabela 3.2 - Tabela com os requisitos da Directiva aos Estados Membros[21]	24
Tabela 4.1 - Várias tecnologias e suas características[10]	29
Tabela 4.1 - Poupança de Energia Primária para diferentes consumos de electricidade e calor	43
Tabela 4.2 - Valores de referência harmonizados em matéria de eficiência para a produção separada de electricidade[6]	74

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas

CHP	<i>Combined Heat and Power</i>
EPS	Primary Energy Savings (Proposta de Portugal/Espanha não adoptada)
PES	<i>Primary Energy Savings</i>
REE	<i>Rendimento Eléctrico Equivalente</i>

Lista de símbolos

C	Rácio Electricidade/Calor
E_{CHP}	Quantidade de electricidade produzida em cogeração
H_{CHP}	Quantidade de calor útil produzido em cogeração
CHP $H\eta$	Eficiência térmica de 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
CHP $E\eta$	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
Ref $H\eta$	valor de referência da eficiência para a produção separada de calor
Ref $E\eta$	Valor de referência da eficiência para a produção separada de electricidade
E	Energia eléctrica produzida anualmente pelo co-gerador, excluindo os consumos nos sistemas auxiliares internos de produção energética
T	Energia térmica útil consumida anualmente a partir da energia térmica produzida pelo co-gerador, excluindo os consumos nos sistemas auxiliares internos de produção energética
C	Energia primária consumida anualmente na instalação de cogeração, avaliada a partir do poder calorífico inferior dos combustíveis e outros recursos utilizados (Para o cálculo do REE)

CR	Equivalente energético dos recursos renováveis ou resíduos industriais, agrícolas ou urbanos consumidos anualmente na instalação de cogeração
PEletr	Potência Eléctrica usada antes da implementação do sistema de cogeração
PE	Produção de energia

Definições

Energia de Alimentação CHP	Energia usada para a produção de cogeração, ou seja, calor útil e electricidade CHP
Energia de Alimentação não CHP	Energia usada para a produção da electricidade não CHP e calor não considerado útil
Parte CHP	Produção de cogeração, ou seja, electricidade CHP e calor útil (HCHP)
Parte não CHP	Produção de electricidade não CHP e calor que não é considerado útil
Electricidade CHP	Electricidade produzida num processo ligado à produção de calor útil e calculada de acordo com a metodologia estabelecida no anexo II da Directiva 2004/8/CE
Calor útil	Calor produzido num processo de cogeração a fim de satisfazer uma procura economicamente justificável de calor ou frio
Electricidade não CHP	Electricidade produzida num processo onde não esteja ligado à produção de calor útil
Calor	Calor que não é considerado de calor útil
Rácio Electricidade/calor	Rácio entre a electricidade produzida em cogeração e calor útil produzido em modo exclusivamente em modo de cogeração e utilizando dados operacionais da unidade em causa
Eficiência global	Total da produção de energia eléctrica e/ou mecânica e da produção de calor útil, dividido pelo consumo de combustível utilizado num processo de cogeração, no mesmo período de tempo, para produzir esse mesmo calor e a mesma quantidade de energia eléctrica e/ou mecânica
Período de referência	Período em que analisam as eficiências da cogeração e que não pode ser inferior a uma

Modo de cogeração integral

hora

Situação de funcionamento de uma unidade de cogeração em que a recuperação do calor gerado é a máxima tecnicamente possível

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento

A legislação de cogeração actual rege-se pelo Decreto de Lei nº 538/99 de 13 de Dezembro que posteriormente foi alterado em alguns artigos pelo Decreto de Lei nº 313/2001 de 10 de Dezembro. Os decretos referidos anteriormente tratam das condições de exploração. O princípio remunerativo da cogeração está dividido em quatro tarifários, definidos pelas seguintes portarias:

- Portaria n.º 57/2002 - Remuneração pelo fornecimento da energia entregue à rede, das instalações licenciadas ao abrigo do Decreto-Lei n.º 538/99 e suas alterações especificadas pelo Decreto de Lei nº 313/2001, cuja potência de ligação seja inferior a 10 MW.[1]
- Portaria n.º 58/2002 - Remuneração pelo fornecimento da energia entregue à rede, das instalações licenciadas ao abrigo do Decreto-Lei n.º 538/99 e suas alterações especificadas pelo Decreto de Lei nº 313/2001, cuja potência de ligação seja superior ou igual a 10 MW.[2]
- Portaria n.º 59/2002 - Remuneração pelo fornecimento da energia entregue à rede, das instalações licenciadas ao abrigo do Decreto-Lei n.º 538/99 e suas alterações especificadas pelo Decreto de Lei nº 313/2001, utilizando como combustível fuelóleo.[3]
- Portaria n.º 60/2002 - Estabelece o tarifário aplicável a instalações de co-geração licenciadas ao abrigo do Decreto-Lei n.º 538/99 e suas alterações especificadas pelo Decreto de Lei nº 313/2001, bem como as disposições relativas ao período de urgência das modalidades do mesmo tarifário.[4]

De seguida saiu uma directiva da União Europeia (Directiva 2004/8/CE) com o objectivo de aumentar a eficiência energética e a segurança do abastecimento mediante a criação de um quadro para a promoção e o desenvolvimento da cogeração de elevada eficiência de calor e de electricidade com base na procura de calor útil e na poupança de

energia primária no mercado interno da energia, tendo em conta as condições específicas nacionais, nomeadamente em matéria de condições climáticas e económicas. [5]

Mais recentemente saiu uma decisão da comissão (Decisão da comissão de 21 de Dezembro de 2006) que estabeleceu os valores de referência harmonizados em matéria de eficiência de produção separada de electricidade e de calor necessários para o cálculo de electricidade de cogeração de elevada eficiência, cujo cálculo está exposto na directiva referida anteriormente[6]. Foi publicado também uma nova decisão da comissão posterior à anteriormente referida (Decisão da Comissão de 19 de Novembro de 2008) que estabelece orientações para a implementação e aplicação do anexo II da directiva 2004/8/CE.[7]

1.2 Motivação

Para dinamizar o sector de cogeração, o governo está a preparar uma nova legislação para o sector referido de modo a transpor a directiva europeia 2004/8/CE e ao mesmo tempo avançar com a nova política energética tendo em conta o papel da cogeração.

Países como a Finlândia e a Holanda a cogeração tem 40% da potência instalada enquanto na Dinamarca chegam à marca dos 50% fazendo do último país referido o mais eficiente a nível energético da União Europeia. Actualmente Portugal tem instalados 1200 MW de potência de cogeração o que corresponde a 12% do consumo anual de electricidade do país. As perspectivas de Portugal em termos de cogeração são que a potência referida possa duplicar até 2015.

A cogeração é um processo de produção e utilização combinada de calor e electricidade que proporciona um aproveitamento de mais de 70% da energia consumida para o processo, com isto e dado que Portugal é um país importador de combustíveis fósseis a cogeração, permite uma poupança dessa mesma energia reduzindo assim a quantidade de combustíveis importados. Apesar do referido e da actual legislação que define a renumeração da cogeração o preço da electricidade não reflecte o verdadeiro custo da produção o que dificulta uma maior penetração da cogeração no sistema eléctrico. Para ultrapassar isso é necessário actualizar o actual sistema de renumeração de modo a fazer a indexação adequada e permanente do preço da energia eléctrica ao preço dos combustíveis e tudo indica que vai ser implementada esta medida no próximo pacote legislativo para a cogeração. Outra grande oposição para uma maior implementação da cogeração é a disponibilidade de pontos de interligação à rede pública visto os pontos interessantes para tal estarem a ser implementados sistemas de energia renovável que apesar de tudo não é mau devido à redução de importação de combustíveis tal como a cogeração.[8]

1.3 OBJECTIVOS

Um dos objectivos da presente dissertação é criar uma ferramenta de cálculo de electricidade de elevada eficiência segundo a directiva 2004/8/CE. O outro objectivo é fazer uma análise de sensibilidade do cálculo de electricidade CHP para os seguintes pontos expostos:

- Diferentes tecnologias de cogeração,
- Diferentes padrões de consumo de calor e electricidade
- Diferentes eficiências de tecnologias
- Diferentes níveis de dimensionamento (nível definido para cogeração integral).
- Diferentes períodos de referência
- Maximização do PES

1.4 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação está dividida em seis capítulos, sendo que no capítulo 1 faz-se uma pequena introdução à cogeração do ponto de vista legal, quanto à sua motivação e os objectivos desta.

No capítulo 2 pode-se encontrar o estado actual da cogeração, englobando conceitos, tecnologias e suas aplicações.

No capítulo 3 fez-se uma análise dos aspectos mais importantes da directiva 2004/8/CE, bem como a descrição do processo de cálculo de electricidade de elevada eficiência e a metodologia adoptada para a realização da análise de sensibilidade aos casos de estudo.

No capítulo 4 são apresentados casos de estudo que foram submetidos ao processo de cálculo de electricidade de cogeração de elevada eficiência bem como a respectiva análise de sensibilidade.

Por fim o capítulo 5 é onde estão descritas as conclusões que se retiraram ao longo do trabalho realizado para os diferentes casos (tecnologias de cogeração), descrição de como foram atingidos os objectivos e algumas sugestões de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Estado da arte de cogeração

2.1 Conceitos de cogeração

A directiva 2004/8/CE contém conceitos de cogeração necessários para o entendimento do que é a cogeração. A cogeração é um processo único de produção simultânea de energia térmica e de energia eléctrica e/ou mecânica. Na produção de calor parte dele é aproveitado e o restante é expelido. O calor que é aproveitado denomina-se por calor útil, este calor é considerado útil se satisfazer uma procura economicamente justificável, ou seja, procura que não excede as necessidades de calor ou frio e que se não fosse utilizada a cogeração, seria satisfeita nas condições do mercado mediante outros processos de produção de energia.

A electricidade produzida em cogeração é a electricidade produzida num processo ligado à produção útil de calor e calculada de acordo com a metodologia estabelecida no anexo II da directiva 2004/8/CE. Apesar de se produzir electricidade no processo de cogeração normalmente existe um processo de obtenção de electricidade de reserva para o fornecimento de electricidade em casos de manutenção, de avaria ou algum tipo de perturbação no sistema, normalmente sendo esta electricidade obtida através da rede eléctrica. Existe ainda outra denominação de electricidade designada por electricidade de reforço, que é a electricidade fornecida ao consumidor pela rede eléctrica caso a quantidade de electricidade consumida seja superior à electricidade produzida em cogeração.

Outra característica importante é a eficiência global de uma central co-geradora, que se obtém através da divisão do total anual da produção de energia eléctrica e/ou mecânica e da produção de calor útil pelo consumo de combustível, utilizado na produção de calor num processo de cogeração e na produção bruta de energia eléctrica e mecânica.

Para além da eficiência global também existe o conceito eficiência que é calculada com base no poder calorífico líquido dos combustíveis (também denominado por poder calorífico inferior).

Um processo de cogeração para ser considerado de elevada eficiência tem que corresponder aos critérios do anexo III da já referida directiva.

No processo de cálculo de electricidade de cogeração são necessários valores de referência da eficiência para a produção separada de calor e electricidade que o processo de cogeração destina a substituir. Outro aspecto importante para o cálculo de electricidade de cogeração é o rácio electricidade/calor, que é calculado dividindo a electricidade produzida em cogeração pelo calor útil produzido exclusivamente em modo de cogeração e utilizando dados operacionais em causa.

Uma unidade de cogeração é uma unidade capaz de operar em modo de cogeração e uma unidade de micro-cogeração é uma unidade capaz de operara na mesma em modo de cogeração mas cuja sua potência seja inferior a 50kW.

O rácio electricidade/calor é o rácio entre a electricidade produzida em cogeração e o calor útil produzido exclusivamente em modo de cogeração e utilizando dados operacionais da unidade em causa.

À energia eléctrica e mecânica e de calor útil produzida em cogeração designa-se por produção de cogeração.

2.2 Tecnologias

Existem várias tecnologias que podem ser usadas para a prática de cogeração, desde simples turbinas a vapor acopladas a caldeiras convencionais, até sistemas mais complexos como utilização de gaseificadores em conjunto com turbinas a gás. O nome das tecnologias usadas em centrais de cogeração recebe os respectivos nomes de acordo com os constituintes que usam, o tipo de combustíveis que consomem, os arranjos que efectuam para adaptar os recursos existentes às centrais e algumas modificações de maneira a elevar a eficiência global.[9]

De seguida serão apresentadas vários tipos de tecnologias, convencionais e emergentes, que podem ser implementadas em cogeração. As tecnologias convencionais englobam a turbina a gás, turbinas a vapor, motores alternativos de combustão interna, enquanto as tecnologias emergentes aqui expostas são as células de combustíveis, motores stirling e micro-turbinas.[10]

Turbinas a gás

Através da figura seguinte pode-se observar como é constituída uma unidade de cogeração com turbinas a gás (ciclo de Brayton).

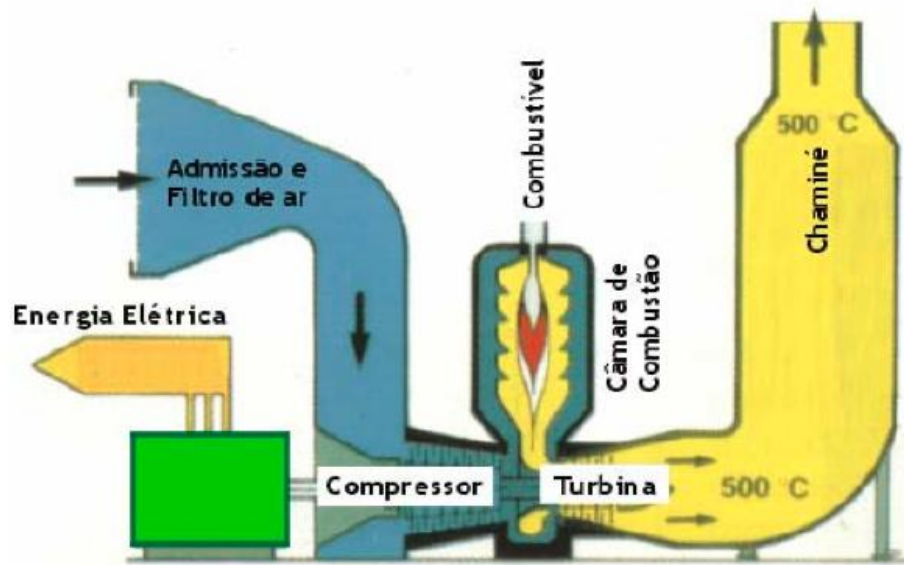


Figura 2.1- Exemplo de uma unidade de cogeração com turbina a gás e seus constituintes[11]

Uma central de cogeração com turbina a gás é basicamente composta por um sistema de admissão de ar, sistema de compressor de ar, uma câmara de combustão, uma turbina e por fim um sistema de exaustão.

O funcionamento deste tipo de central co-geradora começa por admitir o ar atmosférico através do sistema de admissão de ar, orientando esse ar para o compressor onde este é comprimido a alta pressão e de seguida o ar é direccionado para a câmara de combustão onde este é misturado com o combustível que a unidade de cogeração usa. Depois de se dar a mistura esta é queimada e os gases de combustão resultantes da queima são dirigidos para a turbina onde se expandem extraíndo assim a sua energia intrínseca, esta expansão na turbina acciona o compressor e geralmente um gerador eléctrico. Os gases resultantes do processo ainda podem ser aproveitados para um processo em que seja necessário calor, ou frio usando a trigerção.

Na figura seguinte pode-se observar uma turbina de gás usada em cogeração com mais pormenor.

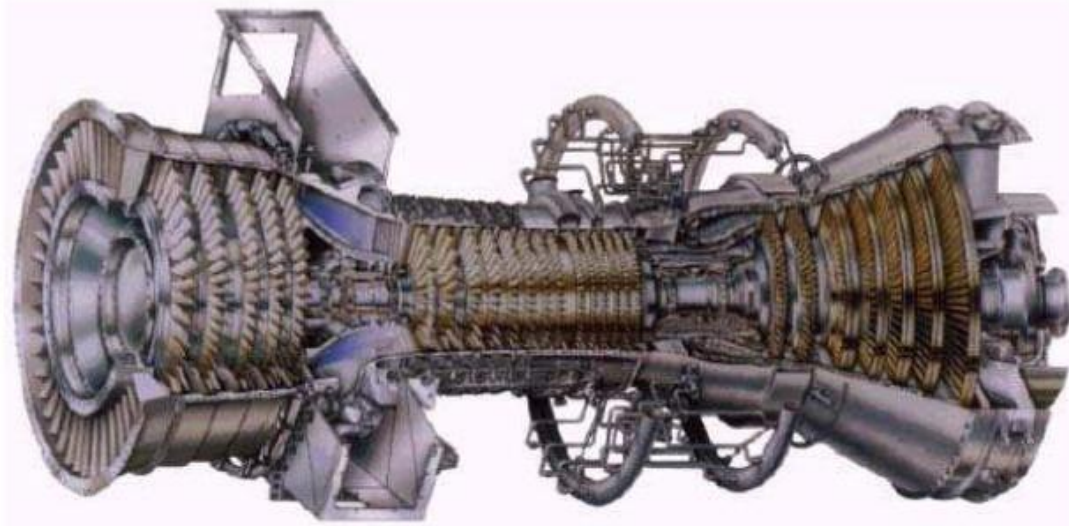


Figura 2.2 - Turbina de gás[11]

É de referir que este tipo de turbina apresenta uma elevada eficiência, na ordem dos 75%. O processo de cogeração com turbinas a gás oferece vantagens como uma simples manutenção, elevada eficiência, baixa poluição ambiental em relação a outras tecnologias, não existe a necessidade de vigilância permanente, disponibiliza energia térmica a altas temperaturas (500-600°C), um tempo de arranque pequeno, baixo nível de vibrações, proporciona às instalações uma grande flexibilidade o que é importante devido às necessidades de calor nos processos oscilarem. Tem como desvantagens um número limitado de tipos de combustíveis, necessidade de utilizar dispositivos anti-poeira, anti-corrosão nas paragens mais prolongadas e o tempo de vida da turbina é reduzido em relação às outras tecnologias.[10-13]

Turbinas a vapor

A cogeração com turbina a vapor é utilizada em locais que necessitem de mais potência (superior a 20MW), e em indústrias que necessitem de grandes quantidades de vapor. A aplicação de turbinas a vapor é a melhor opção para sistemas de rede de calor. O vapor encontra-se num intervalo entre 15 a 20 bar de pressão e este é utilizado para o accionamento das turbinas para a geração de electricidade. O vapor restante, ou seja, vapor de escape ou extracção encontra-se entre a gama de 2 a 20 bar e é utilizado num processo em que necessite de calor. A cogeração com este tipo de turbina é aplicada em unidades indústrias que necessitem de uma potência acima dos 10 MW, ou de elevadas necessidades de vapor. Sistema de cogeração com este tipo de turbina está representado na seguinte figura:

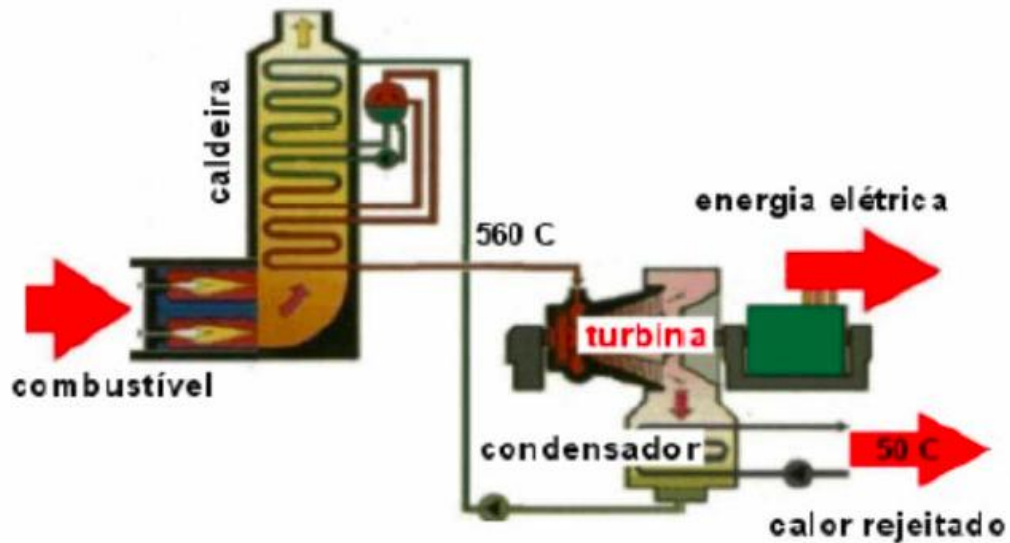


Figura 2.3 - Exemplo de uma unidade de cogeração com turbina a vapor e seus constituintes[11]

Como se pode observar na caldeira a água é transformada em vapor de alta pressão através da queima de combustível. O vapor é conduzido para uma turbina de vários andares onde este se expande gerando assim movimento mecânico e consequentemente electricidade. Depois de passar a turbina, já a baixa pressão, o vapor entra para um condensador de vácuo e aí o vapor sofre condensação. Depois de condensado o vapor liquefeito retorna à caldeira através de bombeamento.

Este tipo de tecnologia tem como vantagens tempo de vida útil elevado, não necessita de vigilância constante, é um equipamento seguro, tem uma eficiência global elevada, tem a capacidade de fornecer vapor a alta pressão e à pressão atmosférica. Como desvantagens este tipo de sistema tem um número reduzido de aplicações, baixo rendimento eléctrico, arranque lento, problemas de controlo de emissões de poluentes, dependência de um tipo de combustível no seu dimensionamento, tempo entre manutenções elevado e por fim um elevado investimento inicial.[10-13]

Motores alternativos de combustão interna

Os motores de combustão interna têm potências que podem variar desde alguns quilowatts até 100 MW, podem utilizar vários combustíveis líquidos e gasosos, têm também uma elevada eficiência em ciclo simples e um bom factor de disponibilidade.

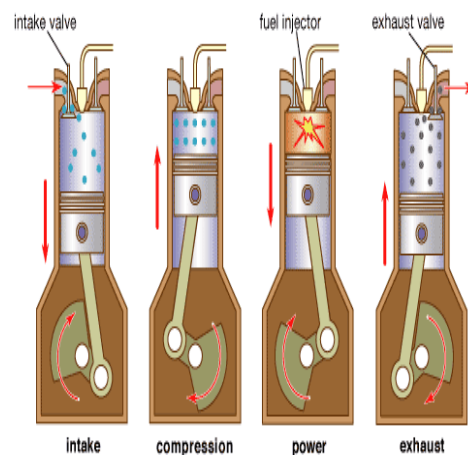
Os dois principais motores usados em unidades de cogeração são os motores com ciclo a diesel e o de ciclo Otto. A principal diferença entre os dois tipos de motores referidos está no modo da queima do combustível. Ambos os motores geralmente funcionam a 4 tempos (o motor ciclo de Otto pode funcionar também a dois tempos).

Pode-se comparar os tempos do motor ciclo de Otto com um motor a gasolina. Um motor a gasolina aspira uma mistura de gasolina e ar, comprime-a e faz a ignição com uma centelha. Um motor a diesel puxa o ar, comprime-o e então injecta o combustível no ar comprimido, o calor do ar comprimido faz com que o combustível se inflame espontaneamente.

Um motor a gasolina comprime a uma taxa de 8:1 a 12:1, enquanto um motor a diesel comprime de 14:1 a 25:1. A taxa de compressão mais alta do motor a diesel leva a uma eficiência maior.

Motores a gasolina geralmente usam carburação, na qual o ar e o combustível são misturados bem antes do ar entrar no cilindro, ou injeção de combustível no duto de admissão, no qual o combustível é injectado imediatamente antes do tempo de aspiração (fora do cilindro). Os motores a diesel usam injeção directa de combustível o óleo diesel é injectado directamente no cilindro.[10-14]

Nas imagens seguintes podemos observar os 4 tempos dos motores de combustão interna.



© 2007 Encyclopædia Britannica, Inc.

Figura 2.4 - Motor de combustão interna de ciclo Otto[14]

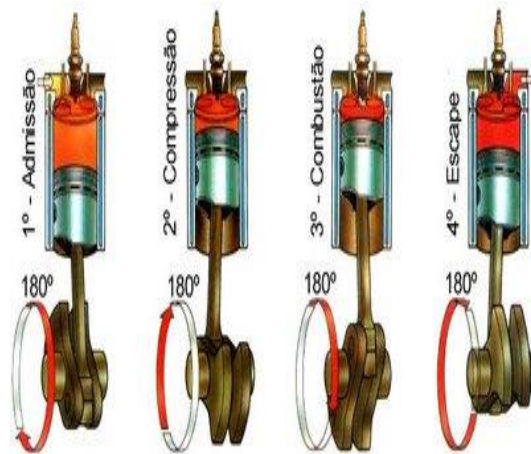


Figura 2.5 - Motor de combustão interna de ciclo diesel[15]

Como podemos observar e como referido anteriormente as principais diferenças neste tipo de motores é o combustível consumido e no terceiro tempo dos ciclos de cada tipo de motor.

As principais vantagens deste tipo de motores é o seu arranque rápido, fácil adaptação e variações das necessidades térmicas, elevada eficiência mecânica e não necessita de vigilância constante. Como desvantagens temos o tempo de vida útil curto, o rendimento térmico é baixo e os seus custos de manutenção são elevados.[10-13]

Pilhas de combustíveis

Uma pilha de combustível é um dispositivo electroquímico que tem a capacidade de converter energia química do combustível em energia eléctrica, sem processos intermédios de combustão e processos mecânicos.

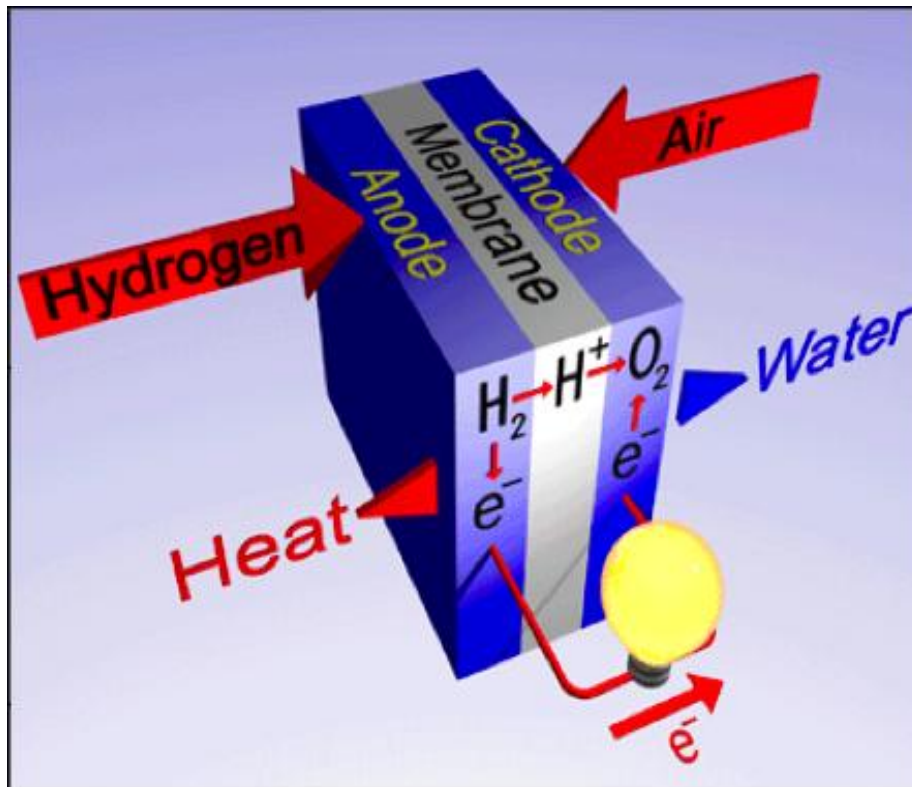


Figura 2.6 - Célula de combustível[10]

Como podemos observar pela figura anterior uma pilha de combustível é basicamente constituída por dois eléctrodos e uma membrana catalisadora electrolítica. O modo de funcionamento destes dispositivos rege-se pela entrada de hidrogénio do lado no ânodo e de ar pelo lado do cátodo. Ao dar-se a reacções químicas expostas mais à frente neste documento, existe libertação de calor, água e electrões.

O hidrogénio (H₂) ao entrar na célula de combustível é pressurizado para o terminal negativo do eléctrodo sendo assim forçado a atingir a membrana catalisadora, ao atingir esta membrana a molécula de hidrogénio separa-se dando origem a iões de Hidrogénio (H⁺) e dois electrões. Estes electrões migram para o cátodo através de um circuito eléctrico gerando assim corrente eléctrica. O processo do oxigénio é o mesmo que o do hidrogénio só que ocorre do lado do cátodo. O oxigénio ao chegar à membrana combina-se com os iões de hidrogénio e dois electrões formando assim moléculas de água (H₂O). A reacção que ocorre é exotérmica produzindo calor que pode ser usado.



As maiores dificuldades desta tecnologia vingar no mercado deve-se ao seu custo elevado e à dificuldade de armazenamento de hidrogénio. Para a obtenção do hidrogénio pode-se realizar electrólise da água ou pelo processo de reforma de hidrocarbonetos (em geral gás natural), existem ainda mais processos de obter hidrogénio mas não são economicamente viáveis.

Uma única célula gera uma tensão eléctrica à volta de 1 volt, para uma aplicação com mais voltagem pode-se associar varias células de combustível em série passando a denominar-se como pilhas de combustíveis. Existem vários tipos de células de combustíveis:

- AFC – Alkaline Fuel Cell
- PEFC/FEM – Polymer Electroly Fuel Cell/Proton Exchange Membrane
- PAFC – Phosphoric Acid Fuel Cell
- MCFC – Molten Carbonate Fuel Cell
- SOFC – Solid Oxid Fuel Cell

Para mais características dos tipos de células de combustíveis descritos anteriormente pode-se observar a seguinte tabela.[11-13]

Tabela 2.1 - Características das pilhas de combustíveis[11]

	Pilhas de combustível de baixa temperatura	Pilhas de combustível de alta temperatura
Tecnologias aplicáveis	<ul style="list-style-type: none"> • AFC • PAFC • PEFC / PEM 	<ul style="list-style-type: none"> • MCFC • SOFC
Dimensão típica	<ul style="list-style-type: none"> • Os produtos disponíveis no mercado e em desenvolvimento têm potências até 250kW 	<ul style="list-style-type: none"> • A maioria dos equipamentos em desenvolvimento têm potências na ordem de 2 MW, mas existem planos para desenvolver unidades com menos de 1 MW
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Rendimento elevado • Emissões reduzidas • Arranque rápido (especialmente as PEMFC) • Potencial para redução significativa do custo resultante de produção em larga escala se for alcançado sucesso na área dos transportes 	<ul style="list-style-type: none"> • Rendimento muito elevado • Emissões reduzidas • Processamento de combustível mais simples • Não existe a necessidade de utilizar catalisadores de metais preciosos • Não são danificadas pelo CO • Potências mais elevadas
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Potencial de cogeração limitado • Processamento de combustível relativamente complexo • Mais sensível ao CO • Requer catalisadores de metais preciosos • Custo elevado (PAFC) 	<ul style="list-style-type: none"> • Mercado limitado inicialmente à produção de electricidade (o que reduz o potencial para redução do custo) • Complexidade dos sistemas híbridos

Motores Stirling

Em teoria os motores Stirling são as máquinas mais eficientes pois a sua combustão é contínua ao contrário dos motores convencionais. Alguns protótipos construídos na década de

50 e 60 chegaram a índices de eficiência de 45% superando assim os motores convencionais a gasolina e diesel. Para diminuir as perdas térmicas este tipo de motores usam um regenerador entre as câmaras quente e fria, este regenerador armazena calor (que seria rejeitado pela câmara fria) para a fase seguinte de aquecimento aumentando assim a eficiência termodinâmica. Existem três configurações para este tipo de motor, alfa para cilindros em V, beta com êmbolos co-axiais num mesmo cilindro e gama com cilindros em linha.

Este tipo de motores tem a vantagem de ser pouco poluente pois a combustão é contínua como já referido, o que permite uma queima mais completa do combustível o que o torna também um motor mais silencioso e funciona com poucas vibrações. Estes motores têm outra grande vantagem pois podem usar qualquer tipo de combustível.

Apesar das vantagens referidas este motor tem como desvantagens a impossibilidade de variar a velocidade de rotação, logo é complicado aplicar estes motores a veículos motorizados, são mais caros tanto na manutenção como na sua aquisição.

O motor Stirling funciona com um ciclo termodinâmico composto por 4 fases e funciona a 2 tempos regendo-se pelo ciclo de Carnot. Este motor é composto por duas câmaras em diferentes temperaturas que aquecem e arrefecem um gás de forma alternada, provocando assim expansão e contração física gerando assim movimento de dois êmbolos ligados e um eixo comum. O gás utilizado nos modelos mais simples é o ar, enquanto para potências superiores o gás usado é o hidrogénio pressurizado ou hélio, estes gases são empregues porque apresentam grande condutividade térmica e pouca viscosidade o que implica uma maior velocidade na condução de calor e tem menor resistência no escoamento.[10-13]

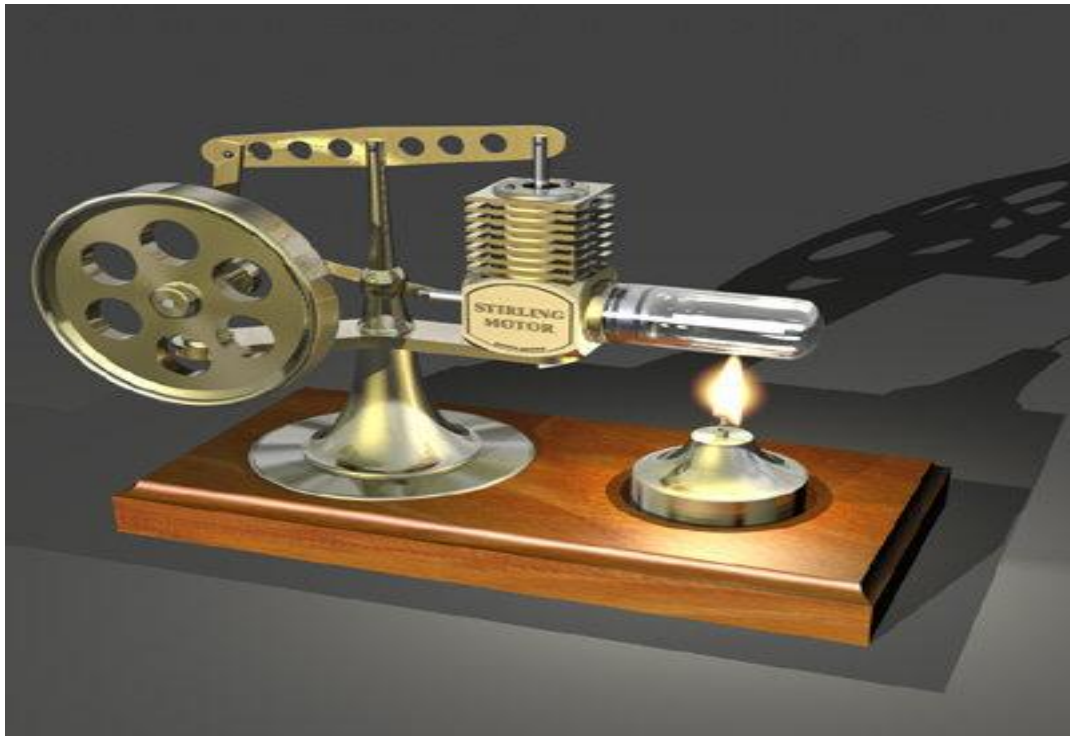


Figura 2.7 - Motor Stirling[16]

Micro-turbinas

Uma micro-turbina tem geralmente dimensões reduzidas em relação às outras tecnologias e conseqüentemente menos potência. A gama de potência deste tipo de sistemas de cogeração situa-se entre 250kW a 1 MW e é constituída por um compressor, câmara de combustão, turbina e gerador eléctrico.

As micro-turbinas existentes no mercado têm como principal função a produção de electricidade e para funcionar em modo de cogeração necessitam de equipamento auxiliar. As micro-turbinas são geralmente turbinas a gás, estas têm um andar de expansão. O ar admitido é conduzido ao compressor onde a pressão é elevada até cerca de 70 psig. Para aumentar o rendimento as micro-turbinas costumam ter integrado um recuperador de calor, também designado por regenerador, que permite aproveitar o calor proveniente dos gases de escape para aquecer o ar antes de entrar na câmara de combustão como podemos observar na seguinte figura.

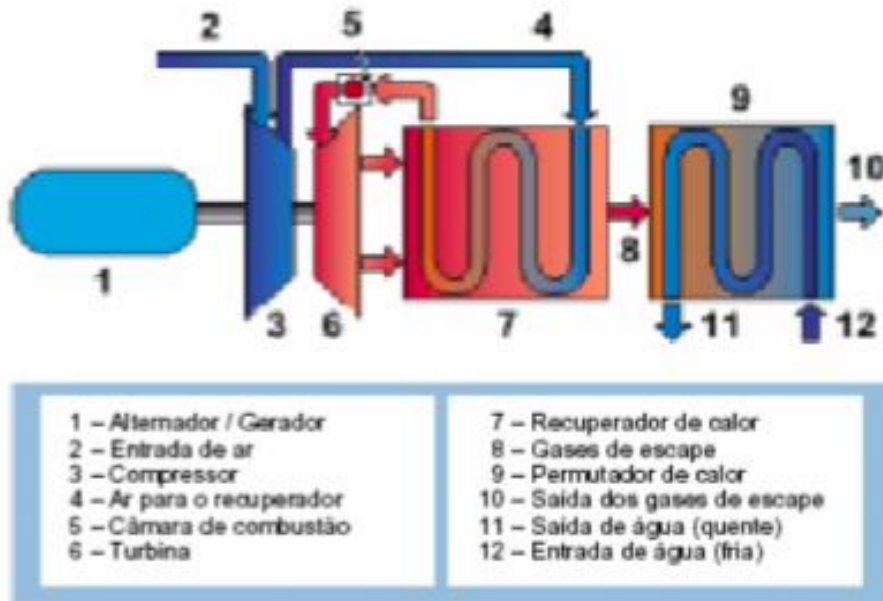


Figura 2.8 - Esquema de uma Micro-turbina[11]

O calor resultante da combustão elevada a temperatura da mistura do ar com o combustível e conseqüentemente a sua pressão. Os gases da combustão ao passar na turbina expandem-se fazendo gerar energia mecânica de rotação ao veio accionando assim o gerador e o compressor. O rendimento eléctrico deste tipo de tecnologia com recuperador de calor anda no patamar dos 30% e o rendimento global na ordem dos 80%. Actualmente os fabricantes de micro-turbinas optam pela utilização de materiais cerâmicos nas secções quentes que permite atingir temperaturas mais elevadas e conseqüentemente rendimentos mais altos.

Esta tecnologia pode usar vários combustíveis tais como gás natural, gasolina sem chumbo, gasóleo, propano. No entanto alguns combustíveis podem não gerar pressão suficiente, caso isso aconteça pode-se usar um compressor adicional.



Figura 2.9 - Instalação de cogeração com Micro-turbinas[10]

Na figura 9 podemos ver uma aplicação de 6 micro-turbinas de de 60kW cada, as micro-turbinas em relação a motores de combustão interna da mesma gama de potência tem menores custos de manutenção e para além disso têm uma alta taxa de disponibilidade.[10, 12, 13, 17]

Tabela 2.2 - Tabela com diferentes tecnologias de cogeração e seus custos [18]

P (kW _e , MW _e)	c _T (€/kW)	c _{OM} (c€/kWh)	η _{CHP-E} (%)	η _{CHP-O} (%)
<i>Micro internal combustion engines (MICE)</i>				
1 kW _e	7000	1.2	21.3	85.0
4.7 kW _e	2500	1.2	25.0	90.0
5.5 kW _e	2360	1.2	27.0	90.0
10 kW _e	2150	1.1	28.1	85.0
20 kW _e	1230	1.1	37.4	87.4
30 kW _e	1000	1.1	33.1	84.3
<i>Stirling engines (SE)</i>				
1 kW _e	9000	1	12.0	92.0
9.5 kW _e	2600	1	26.0	98.0
<i>Micro gas turbines (MGT)</i>				
30 kW _e	2028	1.5	25.5	74.4
70 kW _e	1482	1.2	27.8	67.7
80 kW _e	1486	1	26.6	69.9
100 kW _e	1361	1.2	28.7	68.8
<i>Fuel cells (FC)</i>				
8 kW _e	4231	2.5	33.3	76.6
200 kW _e	4000	2.2	40.0	79.9
250 kW _e	3846	3.3	47.7	72.2
2000 kW _e	2500	2.5	51.1	77.7
<i>Internal combustion engines (ICE)</i>				
100 kW _e	1038	1.4	33.0	86.6
300 kW _e	892	1	34.0	85.5
1 MW _e	727	0.7	38.0	78.8
3 MW _e	719	0.7	39.0	76.6
5 MW _e	685	0.6	41.0	81.3
<i>Gas turbines (GT)</i>				
1 MW _e	1469	0.8	24.3	72.2
5 MW _e	788	0.5	30.1	74.4
10 MW _e	714	0.5	32.2	76.6
25 MW _e	615	0.4	38.0	77.7
40 MW _e	540	0.3	41.0	79.9
<i>Combined cycles (CC)</i>				
35 MW _e	662	0.4	47.0	90.0
75 MW _e	592	0.4	49.5	90.0
100 MW _e	462	0.4	53.0	90.0

2.3 Aplicações

São muitos os processos que necessitam de calor a uma determinada temperatura. A cogeração pode ser aplicada no sector industrial, sector primário e no sector terciário. Dentro do sector industrial a cogeração pode ser aplicada na pasta e papel, têxtil, madeiras e refinarias de petróleo. No sector primário pode ser aplicado em aquecimento de estufas, secagem de madeira e produção de etanol, e por fim no sector terciário em hospitais, centro comerciais, piscinas, centros de lazer e edifícios de escritórios. Para aplicar a cogeração nos sítios anteriormente referidos deve-se fazer um estudo que englobe a disponibilidade e preço do combustível a ser usado, uma análise da actual situação energética, estimativa das necessidades futuras, uma análise técnica e económica bem com a quantidade necessário de calor.

A necessidade de calor segundo a CogenEurope pode ser divididas de acordo com os seguintes pontos:

- Processos de baixa temperatura (abaixo de 100°C) para água quente para uso doméstico, condicionamento de ar e secagem de produtos agrícolas.
- Processos de média temperatura (100-300°C) para produção de açúcar, indústrias de papel e celulose, têxtil, química. Neste tipo de processos o calor geralmente é usado sob forma de vapor.
- Processos de alta temperatura (300-700°C) para indústrias químicas que necessitem de uma maior temperatura do que no caso anterior.
- Processos de muito alta temperatura (maiores que 700°C) para indústrias siderúrgicas, de cerâmica e de cimento.[10]

Alguns subsectores da cogeração no mercado português contêm bom potencial de desenvolvimento tendo em conta condições como o gás natural e da tarifa de electricidade. O sector dos edifícios tem um mercado estimado de cerca de 500MW de sistemas de cogeração com uma potência de menos de 150kW de potência, caso esta potência seja aproveitada para aplicar sistemas de cogeração pode-se reduzir 290000 toneladas de CO₂ por ano. Os pedidos em Portugal para a prática de cogeração inclui centros comerciais, centros desportivos, hotéis, pequenas instalações industriais e blocos de apartamentos.

O sector comercial e público oferece potencial interessante para aplicações de sistemas de cogeração, no entanto o que oferece melhores condições para acolher unidades de cogeração são os hotéis, centros de lazer, grandes edifícios corporativos, e hospitais.[17, 19]

Na tabela seguinte podemos observar o potencial da micro-cogeração em vários sectores.

Tabela 2.3 - Potencial da micro-cogeração em Portugal[19]

Establishment	Classification	Units
Hotels	5 star	52
	4 star	204
	3 star	263
	2 star	91
Apartment hotel	5 star	1
	4 star	74
	3 star	49
	2 star	10
Tourist apartment	5 star	3
	4 star	30
	3 star	144
	2 star	23
Tourism in the country		706
Motel	3 star	12
	2 star	4
Quality inn	5 star	19
	4 star	81
Tourist village	5 star	2
	4 star	18
	3 star	22
Boarding house		153
Rural Hotel		32
Casino		8
Golf course		56
SPA		37
Fairs and congresses		20
Hospitals		217
Clinics		213
Public administration		354
Small industries		223
Habitation communities		1974
Commercial communities		750
Indoor municipal swimming pool		152
Total		5997

De acordo com os dados das tabelas (Tabela 2.2 e Tabela 2.3) pode-se seleccionar a tecnologia a usar de acordo com as necessidades térmicas e eléctricas do local a instalar. A Tabela 2.3 contém os locais a instalar unidades de cogeração e a Tabela 2.2 a tecnologias a usar.

Capítulo 3

Cálculo de electricidade de cogeração de elevada eficiência e metodologia adoptada

3.1 Apresentação da Directiva 2004/8/CE

A cogeração é reconhecida como uma das principais tecnologias para alcançar o objectivo da UE para melhorar a eficiência energética, e para ajudar a implementar e promover a cogeração nos estados membros o Parlamento Europeu redigiu a presente directiva. A cogeração está subaproveitada nos estados membros da União Europeia. Os maiores benefícios em usar a cogeração são a diminuição das perdas nas redes de energia, a redução de emissões de gases de efeito de estufa e a poupança de energia primária (PES). Com o uso da cogeração aumenta a eficiência energética e consequentemente contribui para a segurança do abastecimento energético e para a posição competitiva da União Europeia e dos seus estados membros.

A directiva 2004/8/CE entrou em vigor em Fevereiro de 2004 e tem também como objectivo estabelecer um método harmonizado de cálculo da electricidade produzida em cogeração e as orientações necessárias para a sua execução. Os estados membros tinham até 21 de Fevereiro de 2006 para aplicar a directiva e apresentar os valores de referência harmonizados para separar a produção de electricidade e calor, estes valores harmonizados saíram na decisão da comissão de 21 de Dezembro de 2006.

A directiva requisita aos estados membros que promovam a cogeração de elevada eficiência sempre que o potencial seja identificado e economicamente justificado. Devem também disponibilizar um relatório a cada 4 anos com o potencial de cogeração existente país e suas barreiras bem como acompanhar e apresentar os progressos realizados anualmente.

As tecnologias de cogeração abrangidas pela directiva encontram-se expostas de seguida:

- Turbinas de gás em ciclo combinado com recuperação de calor
- Turbinas a vapor de contrapressão
- Turbinas de condensação com extracção de vapor
- Turbinas de gás com recuperação de calor
- Motores de combustão interna
- Microturbinas
- Motores Stirling
- Células de combustível
- Motores a vapor
- Ciclos orgânicos de Rankine
- Qualquer outro tipo de tecnologia ou combinação de tecnologias que correspondam às definições da alínea a) do artigo 3

O anexo II da directiva dá-nos a informação de como calcular a electricidade produzida em cogeração. No caso das unidades de micro-cogeração o cálculo pode basear-se em valores certificados. A electricidade produzida em cogeração será considerada igual à produção de electricidade anual total da unidade medida à saída dos geradores principais quando as unidades são do tipo turbinas de gás em ciclo combinado com recuperação de calor e turbinas de condensação com extracção de vapor com uma eficiência global anual de pelo menos 80%. Para as outras tecnologias a electricidade é considerada totalmente CHP se pelo menos a eficiência global anual seja superior ou igual 75%.

Caso as unidades de cogeração não atinjam os limites de eficiência anual respectivos para cada tecnologia, referidos anteriormente, a electricidade de cogeração de elevada eficiência pode ser calculada da seguinte maneira,

$$E_{CHP} = H_{CHP} \times C \quad (3.1)$$

O cálculo de electricidade de cogeração deve basear-se o rácio efectivo de electricidade/calor. Caso o rácio não seja conhecido deve usar-se o rácio electricidade/calor da seguinte tabela de acordo com a tecnologia em utilização.

Tabela 3.1 - Rácio implícito electricidade/calor (C)[6]

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

O anexo III da directiva baseia-se na poupança de energia primária. Para a unidade co-geradora ser considerada de alta eficiência a poupança de energia primária tem que ser superior a 10%. As centrais de cogeração consideradas de micro-cogeração (potência inferior a 50kW) para serem consideradas centrais de cogeração de elevada eficiência necessitam de uma poupança de energia primária superior a 0%. O cálculo da poupança de energia primária efectua-se pela seguinte fórmula.

$$PES = 1 - \frac{1}{\left(\frac{CHPH\eta}{RefH\eta} + \frac{CHPE\eta}{RefE\eta}\right)} \times 100\% \quad (3.2)$$

O artigo 12 da directiva dá a oportunidade do estado membro criar e utilizar um método de cálculo alternativo do que aquele que a directiva apresenta até ao final de 2010, podendo ou não ser calculados da mesma maneira que o anexo II, sendo depois submetido para a comissão de maneira a obterem aprovação. Podem também criar um método sem data limite determine a electricidade de cogeração sem recorrer ao anexo II, no entanto se aplicar um método neste fundamento os critérios de eficiência do anexo III têm que ser respeitados, tendo na mesma calcular electricidade de cogeração pelo anexo II para fim estatísticos. Por fim podem escolher outro tipo de método para o cálculo de electricidade de elevada eficiência sendo este método obrigatoriamente submetido para a comissão para aprovação até fins de 2010, sem o critério do anexo III se garantir que a nível nacional, a produção em cogeração identificada por esse método de cálculo alternativo satisfaz em média os critérios da alínea a) do anexo III, no entanto a electricidade de cogeração de elevada eficiência deve ser calculada pelo método inicial para fins estatísticos.[20, 21]

Portugal em conjunto com a Espanha e outros países propuseram uma alternativa ao cálculo do PES. Essa alternativa vai ser exposta de seguida através do tratamento de fórmulas.

$$RE = \frac{E}{C} \quad (3.3)$$

$$RT = \frac{T}{C} \quad (3.4)$$

$$REE = \frac{E}{C - \frac{T}{RefH\eta}} \quad (3.5)$$

$$PE = \frac{E}{RefE\eta} + \frac{T}{RefH\eta} \quad (3.6)$$

$$PES = PE - C = \frac{E}{RefE\eta} + \frac{T}{RefH\eta} - C = \frac{E}{RefE\eta} - \frac{E}{REE} \quad (3.7)$$

$$\frac{PES}{PE} = 1 - \frac{C}{\frac{E}{RefE\eta} + \frac{T}{RefH\eta}} = 1 - \frac{1}{\frac{\frac{E}{C}}{RefE\eta} + \frac{\frac{T}{C}}{RefH\eta}} \quad (3.8)$$

$$PES = 1 - \frac{1}{\left(\frac{CHPH\eta}{RefH\eta} + \frac{CHPE\eta}{RefE\eta}\right)} \times 100\% \quad (3.9)$$

$$\frac{PES}{PElectr} = \frac{\frac{PES}{RefE\eta}}{\frac{E}{REE}} = 1 - \frac{RefE\eta}{REE} \quad (3.10)$$

$$EPS = \left(1 - \frac{RefE\eta}{REE}\right) \times 100\% \quad (3.11)$$

A última fórmula exposta foi a alternativa exposta por Portugal, Espanha e mais alguns países à União Europeia.[22]

A directiva contém requerimentos aos estados membros, esses requerimentos foram expostos anteriormente e encontram-se expostos de seguida em forma de tabela.

Tabela 3.2 - Tabela com os requisitos da Directiva aos Estados Membros[21]

Reporting obligations of Cogeneration Directive 2004/8/EC (situation up to 12/03/2009)				
MS	Progress Report	Analysis of National Potential	Barriers for CHP / administrative - procedural situation	Guarantees of Origin Scheme
	[Art 10(2) - Art 6(3)]	[Art 10(1) - Art 6(1)]	[Art 10(1) - Art 9(1&2)]	[Art 10(1) - Art 5(3)]
	due on 21/02/2007 and then each 4 years	due on 21/02/2006	due on 21/02/2006	due on 21/02/2006; due on 21/06/2007 (6 months after adoption of harmonised reference values - Commission Decision 2007/74/EC of 21/12/2006)
BE	received	received	received	received
BG	received	not received	received	received
CZ	received	not received	not received	not received
DK	received	received	received	received
DE	received	received	received	received
EE	received	received	received	not received
IE	not received	not received	not received	not received
EL	received	received	received	not received
ES	received	received	received	not received
FR	received	not received	received	received
IT	not received	not received	not received	received
CY	received	not received	not received	not received
LV	received	not received	not received	not received
LT	received	received	not received	not received
LU	not received	not received	not received	not received
HU	received	not received	not received	received
MT	not received	not received	not received	not received
NL	received	received	received	not received
AT	received	received	not received	received
PL	received	received	received	received
PT	not received	not received	not received	not received
RO	received	received	received	received
SI	received	received	received	received
SK	received	received	received	received
FI	not received	not received	not received	not received
SE	not received	not received	not received	not received
UK	received	received	received	received

Como podemos observar Portugal não entregou os requisitos da directiva até à data de 12/3/2009.[21] O reino unido adoptou um processo alternativo de acordo com o ponto 2 do artigo 12 da directiva[23]

3.2 Processo de Cálculo segundo a Directiva 2004/8/CE e Decisão da Comissão de 19 de Novembro de 2008

O cálculo de electricidade de cogeração de elevada eficiência está dividido em 5 etapas que vêm descritas na decisão da comissão de 19 de Novembro de 2008 e que estão representadas no fluxograma exposto na Figura 3.1.

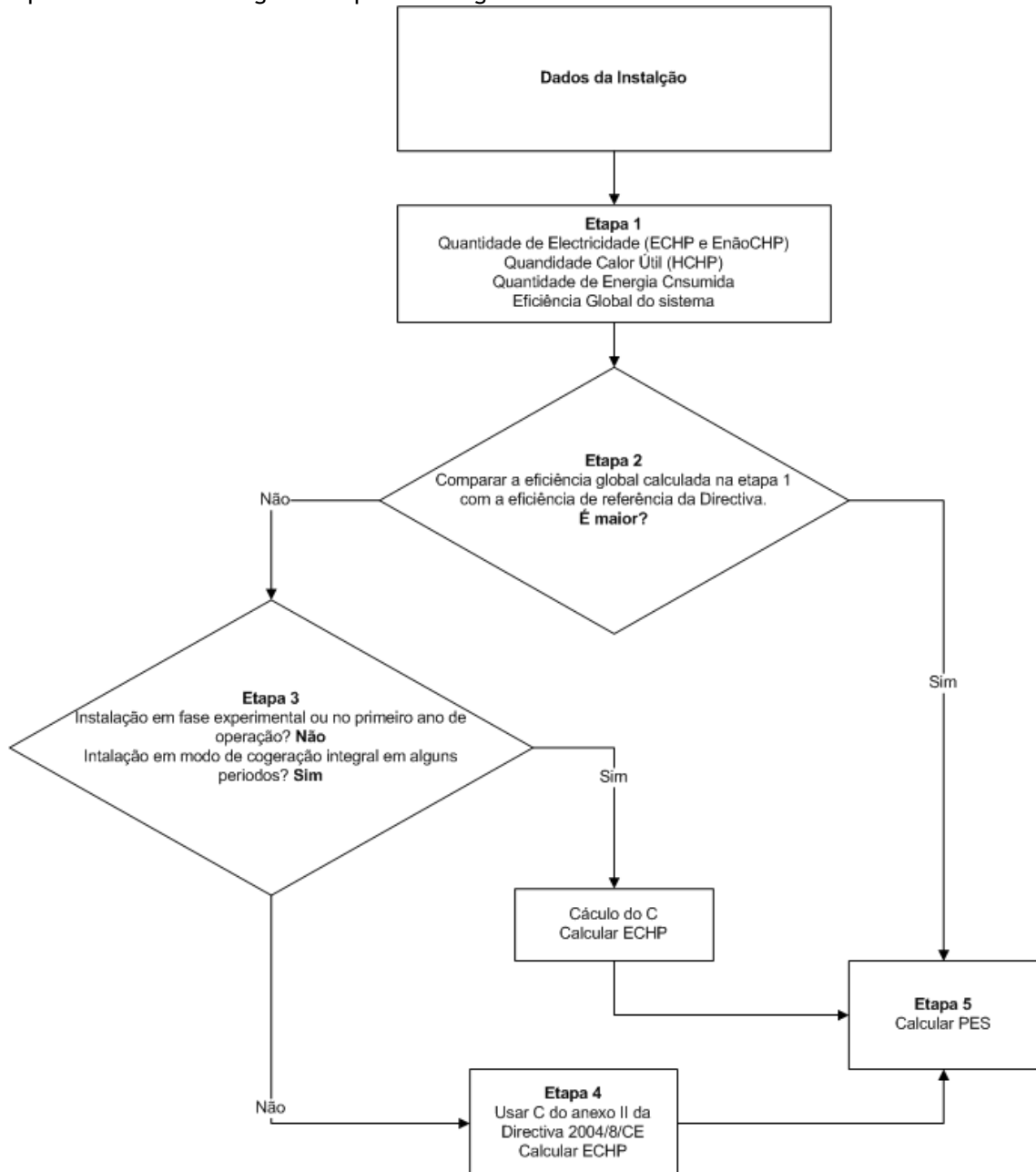


Figura 3.1 - Fluxograma para o cálculo de electricidade de elevada eficiência

A primeira etapa consiste no cálculo da eficiência global do sistema de cogeração que devem ser baseados nos dados operacionais, ou seja, nos dados registos durante o período de referência para o qual se está a calcular a eficiência. A eficiência global calcula-se através da seguinte fórmula.

$$Eficiência\ Global = \frac{Energia\ Produzida}{Energia\ Consumida} \quad (3.12)$$

O período de referência anteriormente referido para o cálculo da eficiência global pode variar desde 1 hora até um ano, sendo normalmente usado o período de 1 ano. Ainda nesta etapa é necessário definir o que é considerado calor útil e o que não é considerado calor útil. O calor útil é o calor usado para aquecimento de processos ou espaços e/ou utilizado para refrigeração, para distribuição de calor para consumo urbano afim de climatização, e gases de exaustão provenientes de um processo de cogeração utilizados em processos de aquecimento ou secagem directos.

O calor considerado não útil é quando este é libertado para o meio ambiente sem o aproveitamento do mesmo como por exemplo calor que se perde em chaminés e exaustores, calor rejeitado por equipamentos como condensadores e dissipadores de calor, é considerado calor não útil também o que é usado para desgasificação e para aquecimento de condensados, de água de compensação, alimentação de caldeiras no interior dos limites da unidade de cogeração, retorno de condensados como por exemplo calor proveniente de climatização urbana ou processos industriais (este calor usado no retorno de condensados tem que ser retirado ao calor associado à produção de vapor).

Neste método de cálculo pode existir electricidade que é considerada não CHP, esta electricidade é produzida quando não é realizada produção simultânea de electricidade e calor. A electricidade produzida em cogeração pode ser considerada não CHP quando a procura de calor útil é insuficiente, quando não gera energia térmica útil ou em processos com evacuação de calor no período de referência.

A energia de alimentação engloba a energia de alimentação da parte que não é considerada CHP e a parte que é considerada CHP. A energia de alimentação é considerada também energia total de entrada do sistema. A energia de entrada pode ser um combustível, vapor ou outras formas de calor ou ainda calor residual utilizado de um processo utilizado no sistema de cogeração à excepção do retorno de condensados visto serem considerados produção de vapor.

Como já referido anteriormente para o cálculo de cogeração de elevada eficiência é preciso separar virtualmente o que realmente é cogeração do que não é, logo a energia de entrada também deve ser separada, assim sendo a energia de alimentação CHP é a energia utilizada pela unidade de cogeração para gerar electricidade CHP e calor útil no período de referência. A energia de alimentação para a parte nãoCHP é a energia utilizada pela unidade de cogeração para gerar calor não considerado útil e/ou electricidade não CHP no período de

referência. Na figura seguinte pode-se observar a separação fictícia na unidade de cogeração.

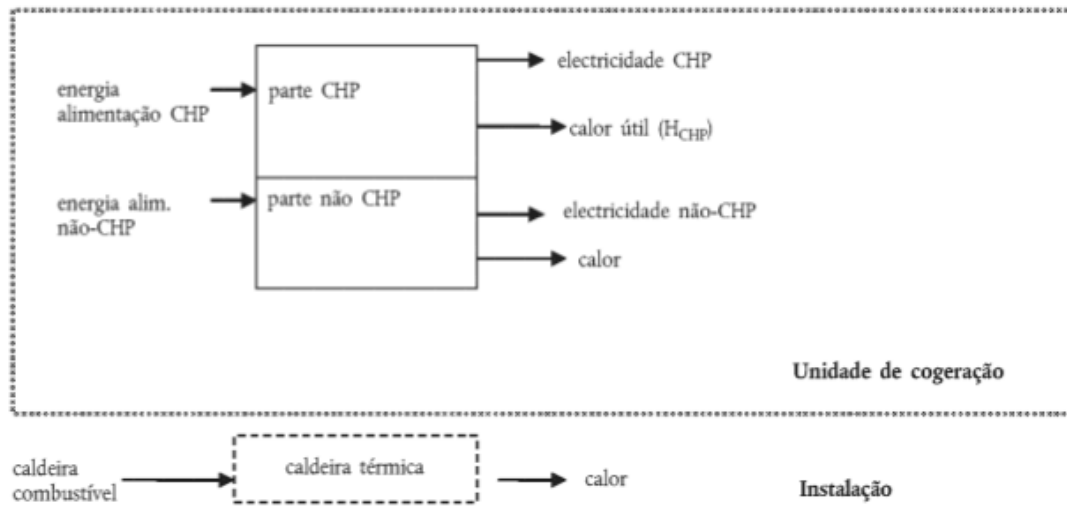


Figura 3.2 - Separação Virtual de uma unidade de cogeração da parte que é considerada cogeração[7]

A segunda etapa para o cálculo de electricidade de elevada eficiência resume-se na comparação da eficiência global calculada na etapa 1 com a eficiência de referência existente no anexo II da Directiva 2004/8/CE. As eficiências globais que se encontram no anexo da directiva são de 80%, para turbinas de gás em ciclo combinado com recuperação de calor e para turbinas de condensação com extracção de vapor, e de 75% para as restantes tecnologias. Caso a eficiência global seja superior à eficiência de referência toda a electricidade gerada pela unidade de cogeração é considerada CHP e não é necessário assim efectuar as etapas 3 e 4. As unidades de cogeração que são consideradas de micro-cogeração (potências nominais até 50 kW) bastam terem um PES superior a 0% para serem consideradas unidades de cogeração de elevada eficiência.

A terceira etapa consiste em realizar o cálculo do rácio electricidade/calor, para esse efeito é necessário saber se a unidade de cogeração funciona em modo integral ou se encontra no primeiro ano de funcionamento. Caso a unidade de cogeração não esteja a funcionar em modo integral, a etapa 3 não se aplica, sendo assim necessário avançar para a etapa 4. Para o cálculo do rácio electricidade/calor efectivo (C_{actual}) deve-se determinar a produção real de energia térmica e energia eléctrica da unidade de cogeração nos períodos em que o modo é de cogeração integral. Depois de obter o C_{actual} podemos então determinar a quantidade de electricidade que é considerada CHP através da seguinte fórmula.

$$E_{CHP} = H_{CHP} \times C_{actual} \quad (3.13)$$

Caso a unidade de cogeração se encontrar no primeiro ano de funcionamento ou em fase experimental, ou seja ausência dos dados de contagem, pode-se utilizar o rácio

electricidade/calor (C_{design}) em modo de cogeração integral. Com isto pode-se determinar a electricidade considerada CHP através da fórmula que se encontra apresentada de seguida.

$$E_{CHP} = H_{CHP} \times C_{design} \quad (3.14)$$

Caso o sistema de cogeração não funcionar em modo de cogeração integral há possibilidade na mesma de determinar o rácio electricidade/calor com base na potência eléctrica CHP (PCHP) e na potência térmica CHP (QCHP) através da seguinte fórmula

$$C = \frac{P_{CHP}}{Q_{CHP}} \quad (3.15)$$

A etapa 4 surge para as situações em que é impossível determinar o rácio electricidade/calor, e para estas situações usa-se o rácio implícito ($C_{default}$) que vem especificado para as diferentes tecnologias de cogeração no anexo II da directiva 2004/8/CE. Com isto, assim é possível determinar a electricidade que é considerada CHP.

$$E_{CHP} = H_{CHP} \times C_{default} \quad (3.16)$$

Contudo apesar de poder utilizar o $C_{default}$ é necessário comunicar à autoridade nacional do respectivo Estado-Membro os motivos pelos quais não é conhecido o rácio electricidade/calor e o que pretende realizar para remediar a situação.

Por fim chega-se à etapa 5 em que se tem que calcular a poupança de energia primária (PES) do processo de cogeração tem em conta a quantidade de electricidade que é considerada de cogeração que é calculada na etapa 3 ou 4 através da equação (3.9). Determina-se também nesta etapa a energia de alimentação CHP. [7, 24, 25]

3.3 Metodologia de Cálculo

Para transpor a estrutura de cálculo descrita no ponto 3.1, foi utilizada uma folha de cálculo com o software Excel do pacote do Microsoft Office. As tecnologias escolhidas para o estudo foram a turbina de vapor em contrapressão, motor de combustão interna com recuperação de calor, turbina a gás em ciclo simples com recuperação de calor e por fim turbina a gás em ciclo combinado. Estas tecnologias foram submetidas a uma produção de electricidade e calor diferentes.

Tabela 3.3 - Várias tecnologias e suas características[10]

Sistema de cogeração	Potência elétrica	Fator de disponibilidade	Eficiência elétrica (%)		Eficiência total	Electricidade / calor
	MW		carga 100%	Carga 50%		
Turbina a vapor	0,5-100*	90-95	14-35	12-28	60-85	0,1-0,5
Turbina a gás	0,1-100	90-95	25-40	18-30	60-80	0,5-0,8
Ciclo combinado	4-100*	77-85	35-45	25-35	70-88	0,6-2,0
Motor Diesel	0,07-50	80-90	35-45	32-40	60-85	0,8-2,4
Micro-sistema com motor alternativo	0,015-2	80-85	27-40	25-35	60-80	0,5-0,7
Célula a combustível	0,04-50	90-92	37-45	37-45	85-90	0,8-1,0

Os dados da instalação foram alterados, um a um, mantendo os restantes iguais ao caso base, com o auxílio de uma macro que contem um ciclo para alterar os dados referidos, de maneira a realizar uma análise de sensibilidade às variáveis de saída que estão referidas nos anexos da directiva 2004/8/CE. Algumas das variáveis da directiva não são sensíveis à mudança de certos dados da instalação, logo não se representou esses gráficos na análise de sensibilidade. É de referir que na análise de sensibilidade as variáveis da directiva estão submetidas a limites, sendo um deles definidos pelo REE e o outro pela eficiência global indicada na Tabela 3.3.

No cálculo de electricidade em cogeração de elevada eficiência a unidade em funcionamento no modo de cogeração integral tem influência na poupança de energia primária verificando esse comportamento no primeiro caso do capítulo seguinte. Para o primeiro caso foi efectuada uma análise à poupança de energia primária para diferentes padrões de consumo de electricidade e calor.

Para além do já referido foram também mantidos o ano de construção, a temperatura média dos estados membros, tensão de ligação à rede eléctrica, e a fracção de electricidade consumida no local, para o último caso de estudo realizou-se uma análise de sensibilidade para retirar informação da influência destas na poupança de energia primária. O tipo de combustível usado para a tecnologia com turbina a vapor em contrapressão foi o fuelóleo sendo que para as restantes foi usado o gás natural.

Capítulo 4

Aplicação da metodologia a casos de estudo

4.1 Introdução

As tecnologias usadas nas secções posteriores a estas no capítulo 5 foram escolhidas devido a estas serem as mais típicas em Portugal[24]. Para serem consideradas de cogeração têm que se encontrar de acordo com as delimitações das unidades de cogeração definidas na decisão de comissão 19 de Novembro de 2008. A figura seguinte representa de uma forma geral a área de uma unidade co-geradora.

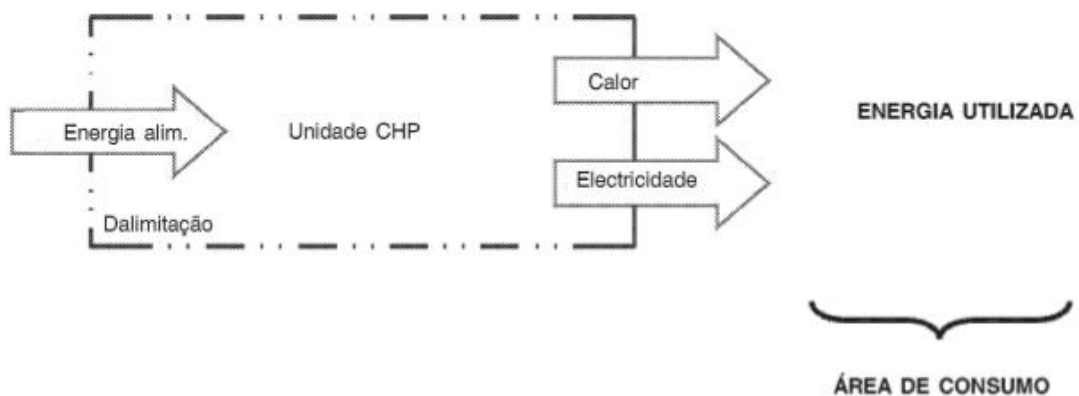


Figura 4.1 - Área da unidade de cogeração[7]

A produção de cogeração serve para alimentar as necessidades de uma área de consumo, podendo ser essa área um processo industrial, um consumidor individual de energia térmica e/ou eléctrica, uma rede de climatização urbana e/ou rede eléctrica. É necessário para o cálculo de electricidade de elevada eficiência medições da produção de electricidade à saída do gerador não excluindo os autoconsumo da unidade.

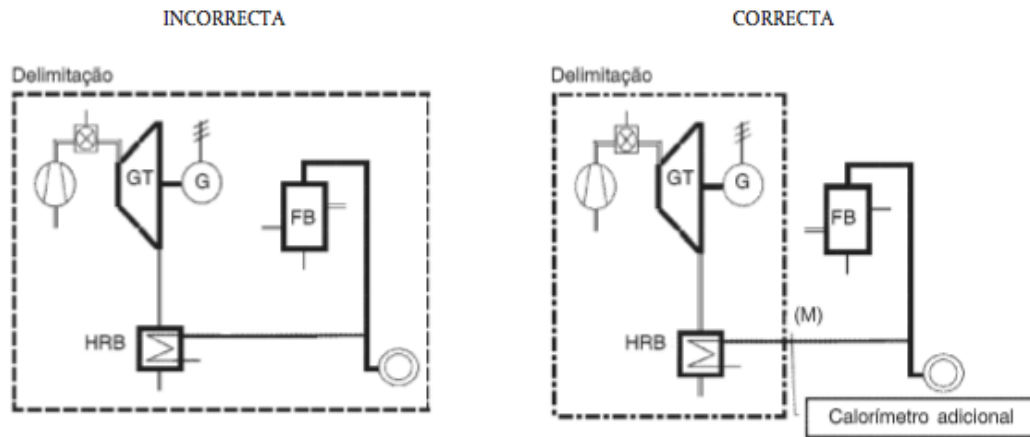


Figura 4.2 - Delimitação do sistema quando existem caldeiras auxiliares ou de reserva[7]

Como indicado na figura anterior o equipamento de produção de electricidade ou calor (caldeiras exclusivamente térmicas ou unidades exclusivamente para produção de electricidade) que não contribui para o processo de cogeração não faz parte da unidade de cogeração.

Outro exemplo de delimitação de um sistema de cogeração é quando existem turbinas a vapor secundárias, sendo estas incluídas no sistema de cogeração como podemos observar na figura seguinte.

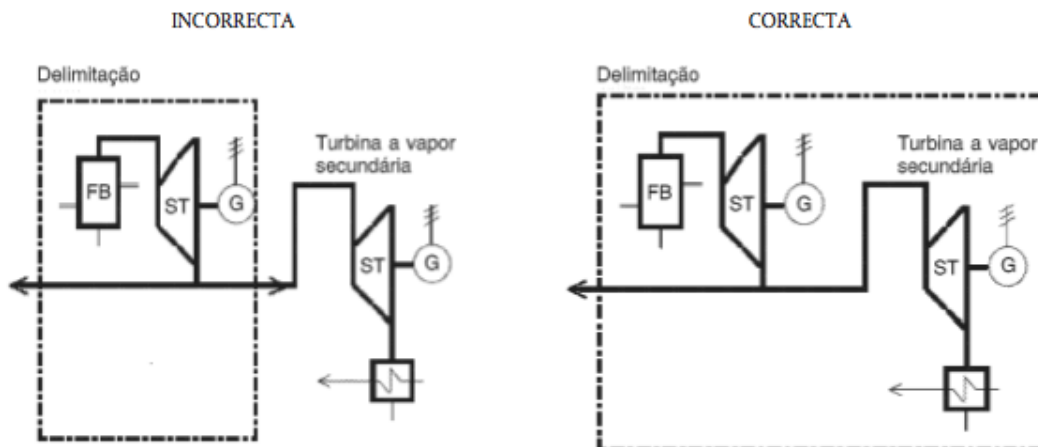


Figura 4.3 - Delimitação da unidade de cogeração quando existem turbinas a vapor secundárias[7]

No entanto a energia térmica utilizada para a produção de electricidade da turbina secundária não entra para o calor útil da unidade de cogeração, visto esse calor não ser aplicado num processo.

Com um processo de cogeração apresenta mais que um gerador de força motriz (turbinas ou motores) ligados em série não podem ser considerados separadamente como mostra a figura seguinte.

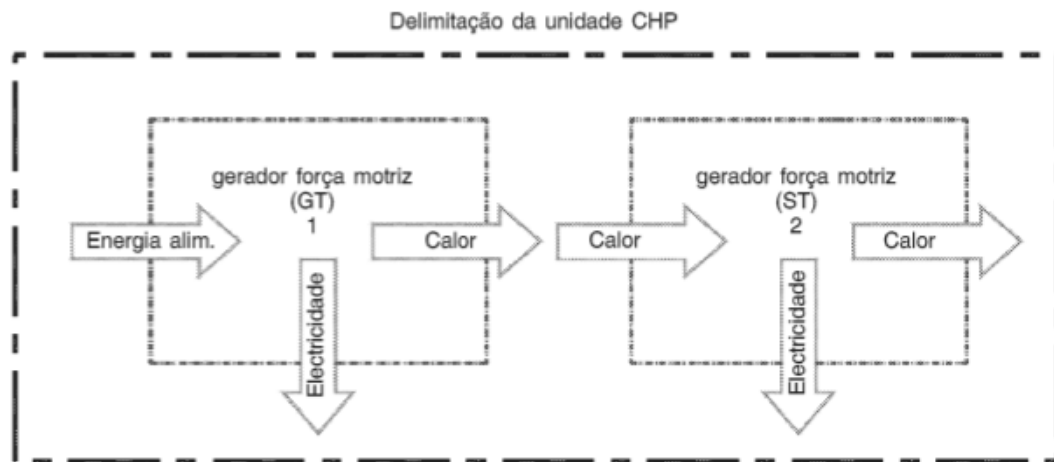


Figura 4.4 - Delimitação da unidade de cogeração, com geradores de força motriz ligados em série[7]

Caso a segunda a primeira unidade não se encontrar em funcionamento, a delimitação do sistema tem que se circunscrever à segunda unidade. [7]

4.2 Turbina a Vapor em Contra Pressão

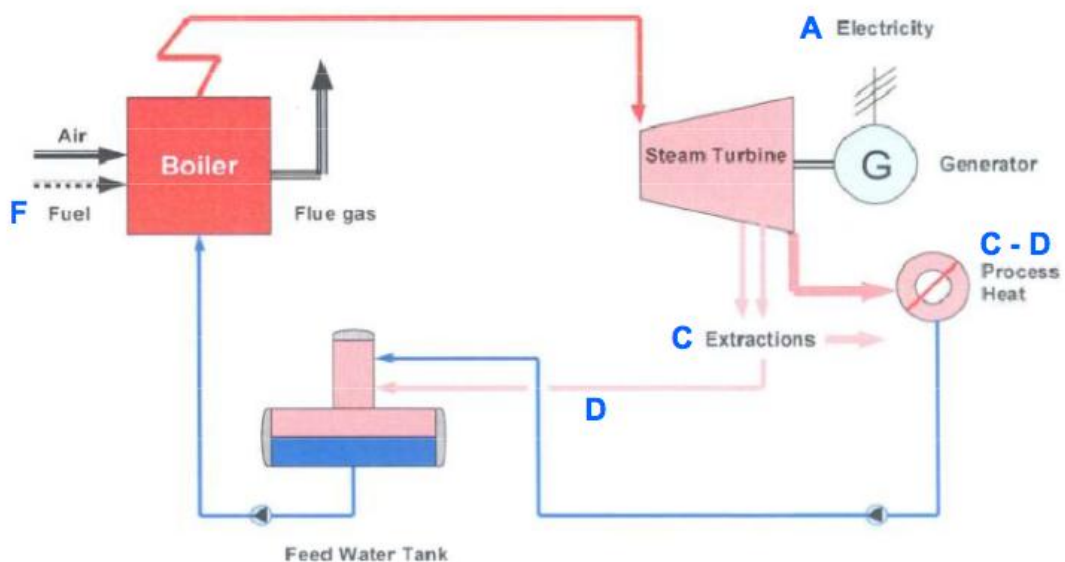


Figura 4.5 - Esquema de uma turbina em contrapressão[24]

As letras que se encontram na Figura 4.5 correspondem aos dados da instalação que se encontram mais à frente.

Cálculo de electricidade de elevada eficiência

A central co-geradora representada na Figura 4.5 tem uma potência instalada de 25 MW com um factor de utilização (f.u.) calculado de seguida.

$$25MW \times 8760 \times f.u. = 170000 \text{ MWh/ano}$$

$$f.u. = 0,78$$

Dados da instalação:

(A) Produção bruta de electricidade: 170000MWh/ano

(B) Autoconsumo de electricidade: 4800MWh/ano

(C) Produção total de vapor: 320000MWh/ano

(D) Autoconsumo de vapor: 32000MWh/ano

(F) Combustível consumido: 650000MWh/ano

Rendimento Eléctrico equivalente:

$$REE = \frac{E}{C - \frac{T}{0,9 - 0,2 \times \frac{CR}{C}}} = \frac{170000 - 4800}{650000 - \frac{320000 - 32000}{0,9}} = 50\%$$

Para calcular a poupança de energia primária é necessário efectuar as seguintes etapas:

- Etapa 1 - Cálculo da eficiência global
 - Período de 1 ano
 - Determinação da produção energética da instalação para o período de referência
 - Produção total de Electricidade (EChp e EnãoChp)

$$170000 \text{ MWh/ano}$$
 - Calor útil produzido na instalação para o período de referência, HChp)

$$HChp = \text{Produção Total de Vapor} - \text{Autoconsumo de Vapor}$$

$$= 288000 \text{ MWh/ano}$$

$$HChp = \text{Produção Total de Vapor} - \text{Autoconsumo de Vapor}$$

$$= 288000 \text{ MWh/ano}$$

- Energia Produzida na instalação de cogeração

$$170000 + 288000 = 458000 \text{ MWh/ano}$$

- Energia Consumida

$$650000 \text{ MWh/ano}$$

- Eficiência Global

$$\text{Eficiência Global} = \frac{\text{Energia Produzida}}{\text{Energia Consumida}} = \frac{458000}{650000} = 70,5\%$$

- Etapa 2 – Comparação da eficiência global calculada com os limites definidos da directiva 2004/8/C
 - Verificação do valor mínimo de eficiência global definido no Anexo II da directiva 2004/8/CE
 - Tecnologia de cogeração correspondente a alínea b) do anexo I da directiva: Turbina de vapor em contrapressão
 - Eficiência global mínima definida no anexo II da directiva para a tecnologia em causa: 75%
 - Comparação da eficiência global da instalação com o valor do anexo II

- Eficiência global inferior ao de referência do anexo II da directiva
 - Conclusão
 - Parte da electricidade produzida não é considerada CHP (E-nãoCHP)
 - É necessário realizar as etapas 3 e 4 para determinar a quantidade de electricidade produzida que é considerada CHP
- Etapa 3 – Determinação do rácio electricidade/calor para os casos em que o rendimento global calculado é inferior aos limites definidos na directiva 2004/8/CE
 - Selecção do tipo de rácio electricidade/calor a utilizar
 - A instalação encontra-se em fase experimental ou no primeiro ano de funcionamento?
Não
 - A instalação opera em modo de cogeração integral?
Sim
 - Cálculo do rácio Electricidade/calor
 - Instalação em modo de cogeração integral
 - Produção de electricidade em modo de cogeração integral
 170000 MWh/ano
 - Produção de energia térmica em modo de cogeração integral
 288000 MWh/ano
 - Rácio de electricidade/calor efectivo
$$C = \frac{170000}{288000} = 0,59$$
 - Cálculo da electricidade produzida em cogeração CHP
$$E_{CHP} = H_{CHP} \times C = 288000 \times 0,59 = 170000 \text{ MWh/ano}$$
- Etapa 4 – Utilização do rácio electricidade/calor implícito na directiva já referida para os casos que não for possível calcular na etapa anterior.

Esta etapa não se aplica a este caso

- Etapa 5 – Cálculo da eficiência e da poupança de energia primária
 - Cálculo da energia de alimentação da produção de ECHP
 - Rendimento eléctrico da instalação
$$CHPE\eta = \frac{170000}{650000} \times 100 = 26,2\%$$
 - Energia de alimentação CHP
$$\frac{E_{CHP}}{CHPE\eta} = \frac{170000}{26,2\%} = 650000 \text{ MWh/ano}$$
 - Cálculo da Eficiência térmica de cogeração
 - Eficiência térmica de cogeração
$$CHPH\eta = \frac{\text{Calor útil}}{\text{Energia de Alimentação CHP}} = \frac{288000}{650000} \times 100 = 44,3\%$$
 - Determinação do valor de referência da eficiência da produção separada de electricidade
 - Características da instalação
Ano de construção: 2000
Tipo de combustível: Fuelóleo
Temperatura média do estado membro: 15°C
Tensão no ponto de interligação: 60 kV
Fracção consumida no local: 100%

- Valor de referência base (seleccionada na tabela do anexo I da decisão da comissão de 21 de Dezembro de 2006)
42,30%
- Factor de correcção de temperatura (anexo III da decisão da comissão de 21 de Dezembro de 2006)
0,0%
- Factor de correcção relativo às perdas evitadas na rede (anexo IV da decisão da comissão de 21 de Dezembro de 2006)
Electricidade exportada: 0,965
Electricidade consumida no local: 0,945
- Cálculo do valor de referência
$$RefE\eta = (42,3 + 0,0) \times 0,945 = 39,97\%$$
- Valor de referência da eficiência da produção separada de calor (anexo II da decisão da comissão de 21 de Dezembro)
$$RefH\eta = 89\%$$
- Cálculo da poupança de energia primária
 - $$PES = 1 - \frac{1}{\left(\frac{CHPH\eta}{RefH\eta} + \frac{CHPE\eta}{RefE\eta}\right)} = 13,2\%$$

Conclusão

A central deste caso é considerada de elevada eficiência já que se obteve uma poupança de energia primária (PES) superior a 10%. A electricidade é considerada toda de cogeração já que a unidade se encontra em modo de cogeração integral.

Análise de Sensibilidade

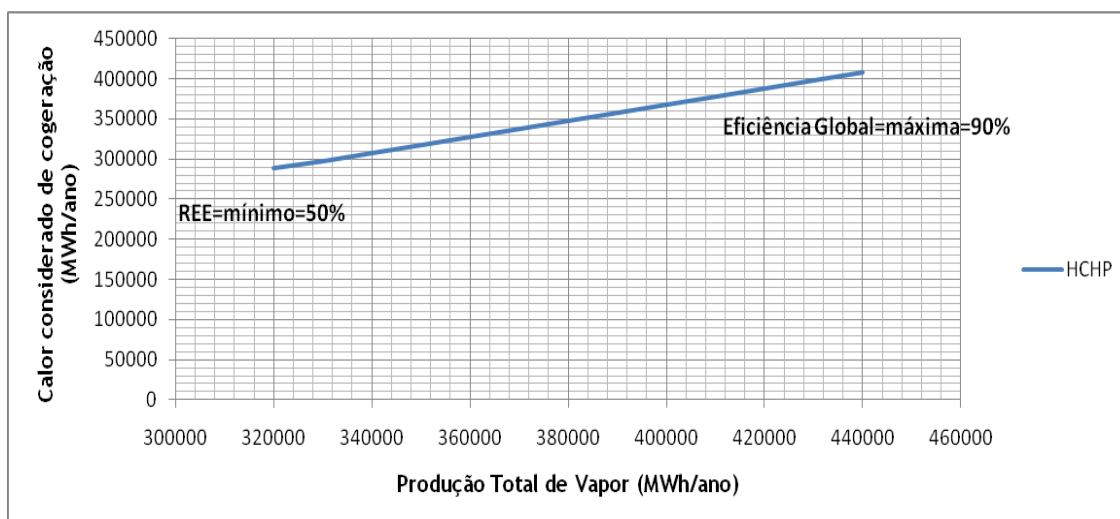


Figura 4.6 - Variação do calor considerado CHP com a variação da produção total de vapor

Como podemos observar na figura a produção total de vapor influencia o calor, que é considerado de cogeração (HCHP), aumenta com o aumento da produção total de vapor. Os limites para a variação da produção são influenciados pelo REE e pela eficiência global

máxima, sendo o limite inferior influenciado pelo REE e o limite superior pela eficiência global como indicado na Figura 4.6.

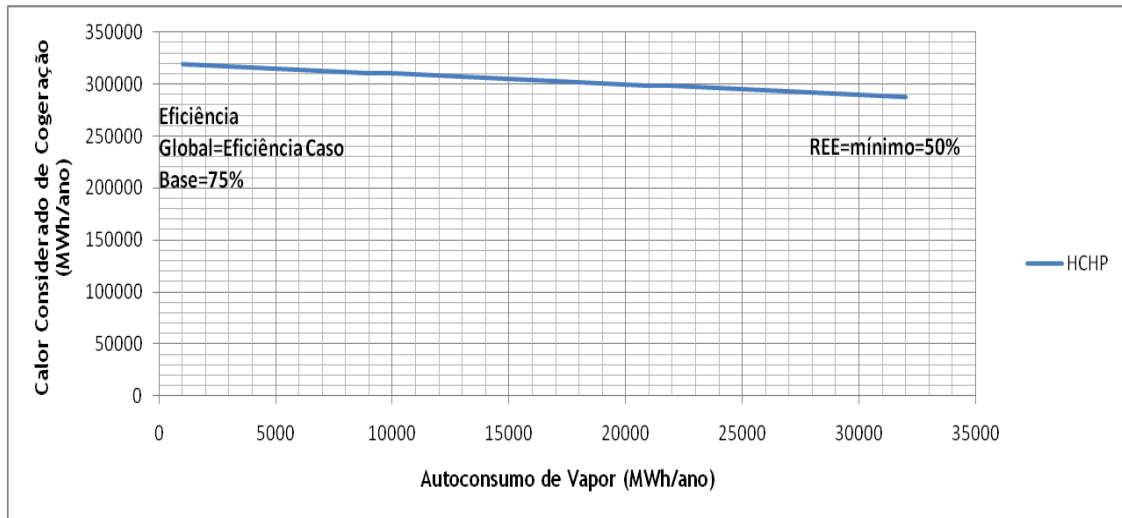


Figura 4.7 - Variação do calor considerado CHP com a variação do autoconsumo da unidade de cogeração

No gráfico da figura anterior pode-se observar que o autoconsumo de vapor da unidade de cogeração que com o seu aumento o calor que é considerado de cogeração (HCHP) diminui. A linha do gráfico também nos indica o intervalo em que o autoconsumo de vapor pode variar.

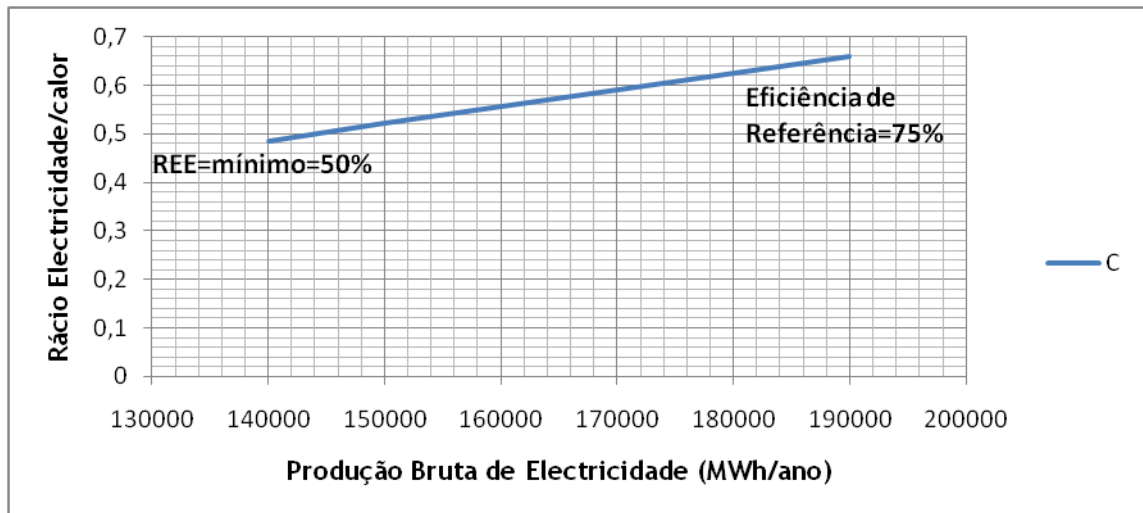


Figura 4.8 - Variação do rácio electricidade/calor com o aumento da produção total de electricidade

Através da Figura 4.8 conclui-se que com o aumento da produção de electricidade o rácio electricidade calor aumenta. A recta indica-nos também o intervalo de variação possível da produção bruta de electricidade, em que esta recta é limitada inferiormente pelo rendimento eléctrico equivalente (REE) e superiormente pela eficiência de referência de 75%.

A unidade co-geradora pode ainda produzir mais electricidade, mas não tendo influência no rácio electricidade/calor (C) pois para uma eficiência acima dos 75% toda a electricidade é toda considerada de cogeração não sendo necessário o C.

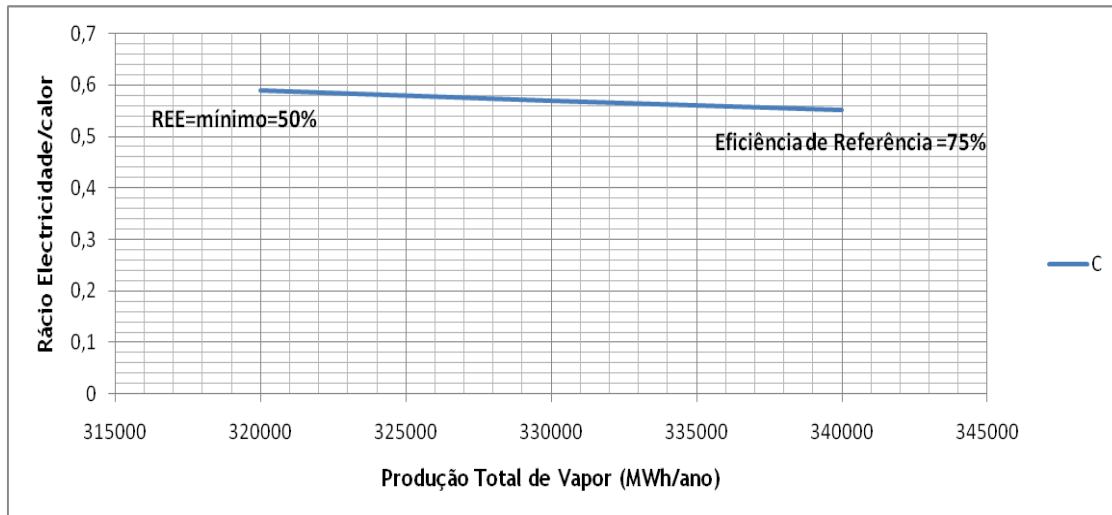


Figura 4.9 - Variação do rácio electricidade/calor com a variação da produção total de vapor

A Figura 4.9 permite retirar informação da variação do rácio (C) com a mudança da produção total de vapor, com o aumento da produção do vapor verificámos que o rácio electricidade/calor diminui. O limite superior da linha é delimitado pelo rendimento eléctrico equivalente (50%), já o limite inferior representado dá-nos a informação neste caso que se atingiu a eficiência global de 75%, o que significa que caso seja possível à unidade de cogeração aumentar a sua produção de vapor o C deixa de ser necessário para o cálculo de cogeração de elevada eficiência pois a eficiência aumenta e com isto toda a electricidade é considerada toda de cogeração.

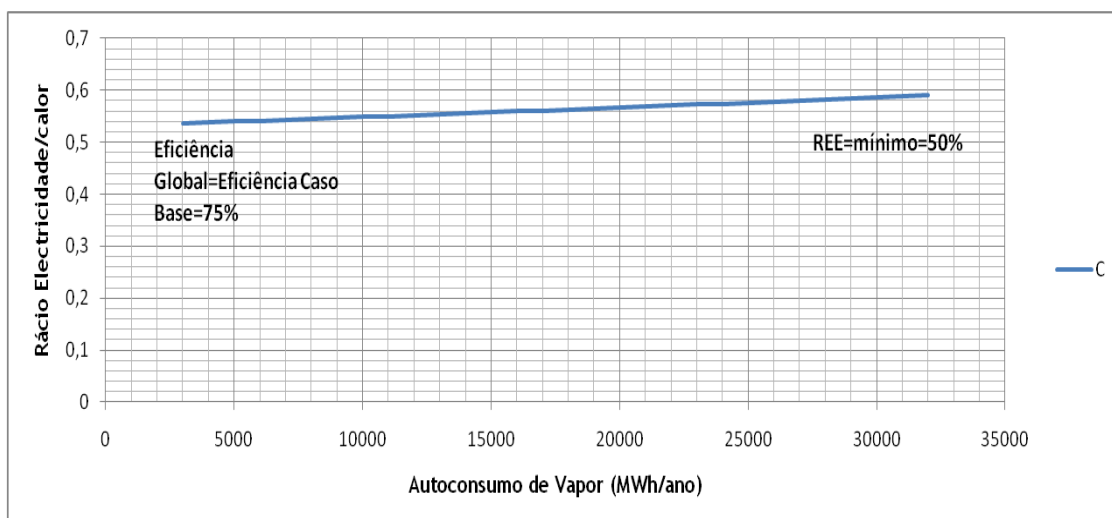


Figura 4.10 - Variação do rácio electricidade/calor com a variação do autoconsumo da unidade de cogeração

O gráfico da Figura 4.10 mostra um comportamento contrário do gráfico da Figura 4.9, isto deve-se ao autoconsumo de vapor ser subtraído à produção total de vapor, pois o autoconsumo não é considerado calor útil. Na Figura 4.10 pode-se observar que o rácio electricidade/calor aumenta com o aumento do autoconsumo da unidade de cogeração. O limite inferior da linha representada no gráfico está limitado à eficiência de referência (75%) pois para autoconsumo de vapor da unidade co-geradora inferiores, a eficiência global é maior. O limite superior da linha está influenciado pelo rendimento eléctrico equivalente (50%). Com isto podemos concluir que o autoconsumo de vapor pode variar de zero até ao limite superior da linha representada no gráfico da Figura 4.10, no entanto quanto menor o autoconsumo melhor, pois a electricidade produzida será maior e assim obtêm-se uma maior eficiência.

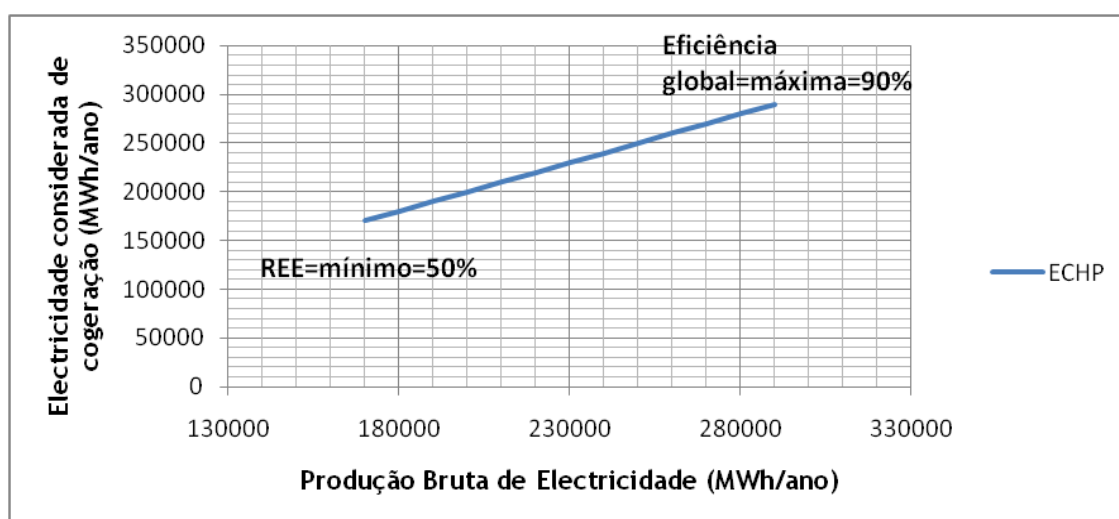


Figura 4.11 - Variação da Electricidade que é considerada de Cogeração com a variação da produção total de electricidade

O único dado da instalação que influencia a electricidade que é considerada de cogeração (ECHP) é a produção bruta de electricidade. Com o aumento desta pode-se verificar no gráfico anterior que aumenta a electricidade de cogeração (ECHP). É de referir que o limite inferior da linha do gráfico representado pela Figura 4.11, é definido pelo rendimento eléctrico equivalente de 50% e o superior definido pela eficiência global máxima do sistema. Neste caso como a simulação efectuada para a unidade de cogeração se encontrar em modo de funcionamento integral toda a electricidade é considerada de cogeração, mesmo que a eficiência global do sistema seja inferior à eficiência de referência da Directiva 2004/8/CE. A eficiência de referência é atingida para uma produção na ordem dos 200.000 MWh/ano.

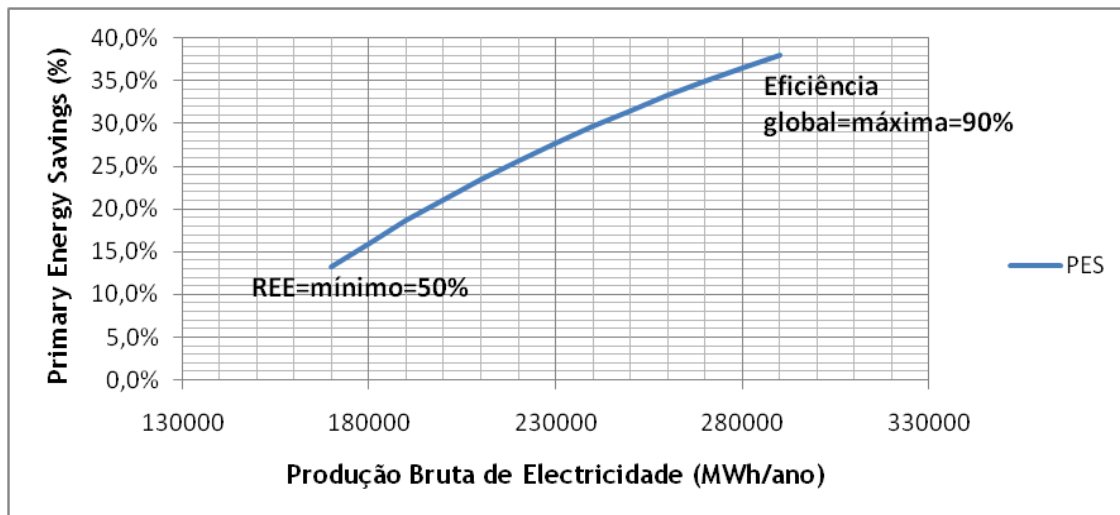


Figura 4.12 - Variação da poupança de energia primária com a variação da produção total de electricidade

Como podemos observar no gráfico da Figura 4.12 a poupança de energia primária aumenta com o aumento da produção de electricidade, no entanto há um limite inferior que corresponde ao rendimento eléctrico equivalente e um limite máximo correspondente à eficiência global da unidade de cogeração na ordem de 90%.

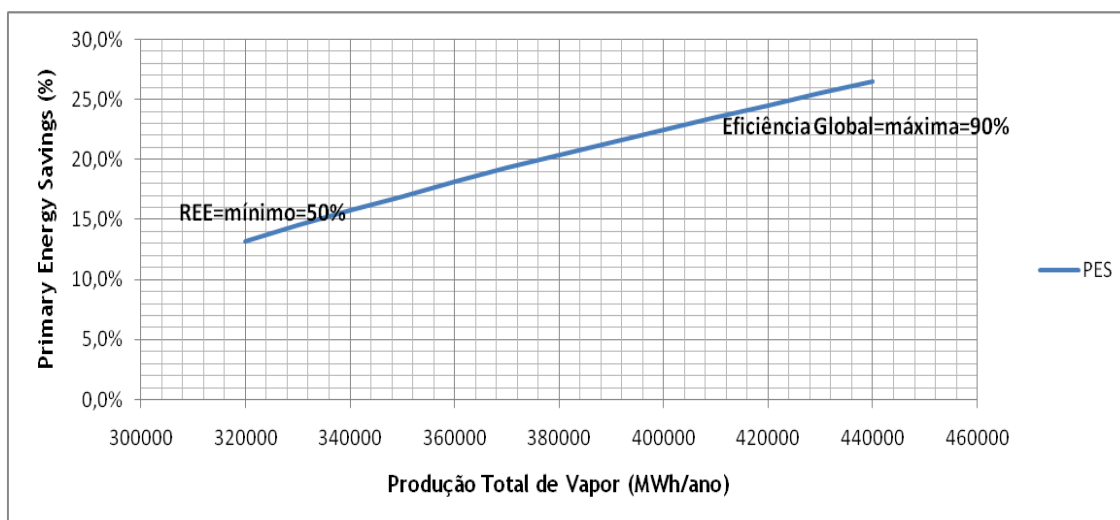


Figura 4.13 - Variação da poupança de energia primária com a variação da produção total de vapor

O gráfico representado na Figura 4.13 revela como varia a poupança de energia primária em relação à produção de vapor, quanto maior a produção de vapor maior é a poupança de energia primária no entanto existe um limite inferior que é definido como valor mínimo, devido do rendimento eléctrico equivalente mínimo para ser co-geradora, e um limite máximo de produção de vapor definido pela eficiência global do sistema em causa, que encontra na ordem dos 90%.

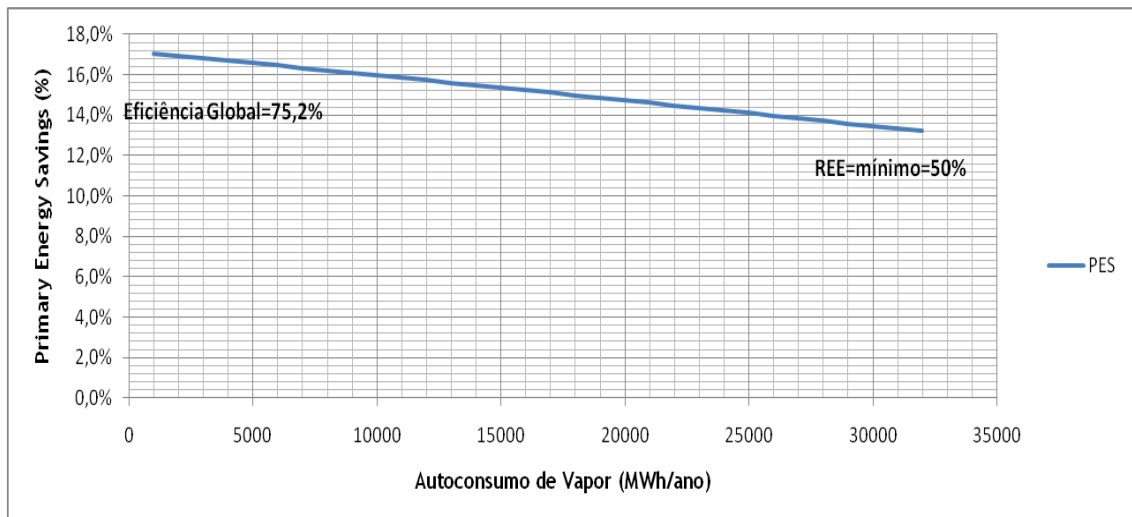


Figura 4.14 - Variação da poupança de energia primária com a variação do autoconsumo da unidade de cogeração

Como se pode observar pelo gráfico anterior a poupança de energia primária decresce com o autoconsumo da central de cogeração. Pode-se observar também através do gráfico que a linha tem um limite inferior definido pelo REE.

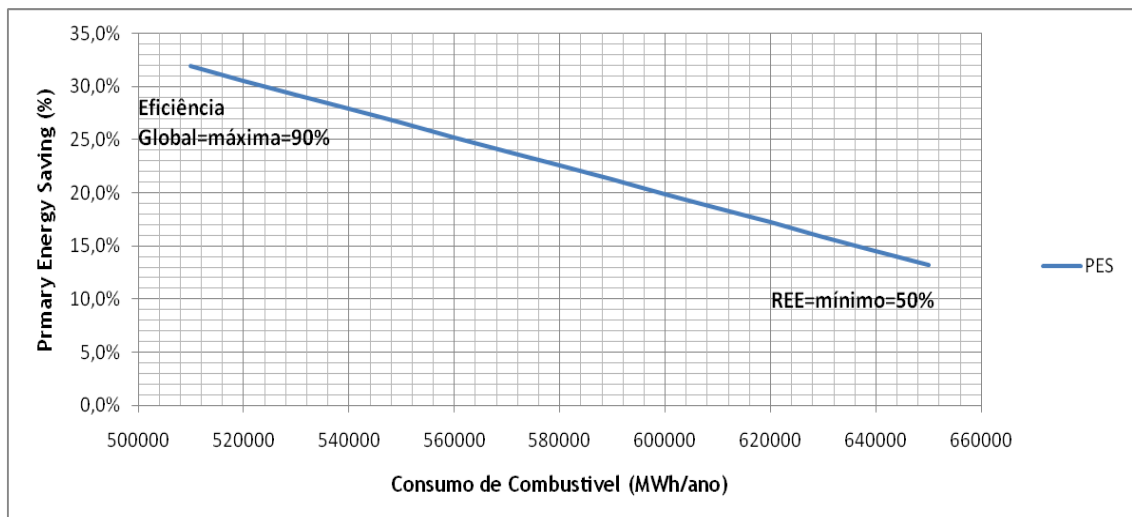


Figura 4.15 - Variação do PES com a variação do consumo de combustível

Tal como no gráfico da Figura 4.14 o PES decresce, só que neste caso é com o aumento do consumo de combustível. A linha do gráfico está limitada superiormente pela eficiência global do sistema e inferiormente pelo REE mínimo.

Diferentes níveis de dimensionamento (nível definido para o modo de cogeração integral)

Variação do tempo do período de referência em que a unidade de cogeração está em funcionamento em modo de cogeração integral, cogeração em modo integral como já foi referida anteriormente é quando a recuperação do calor gerado é a máxima tecnicamente

possível. Para ver a influência do modo de cogeração integral realizou-se uma pequena simulação, que será demonstrada de seguida através de gráficos.

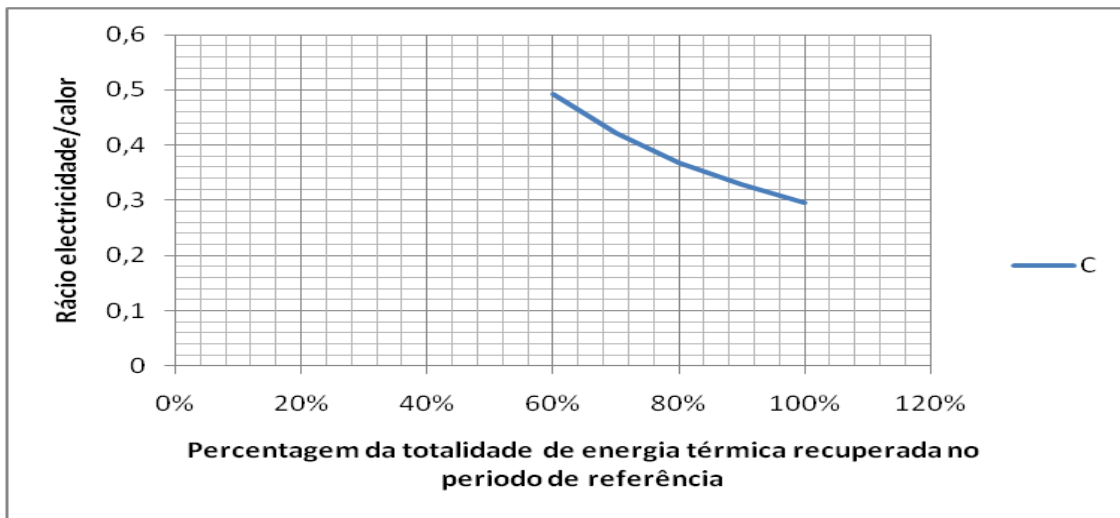


Figura 4.16 - Variação do rácio electricidade/calor com a variação da percentagem da totalidade de energia térmica recuperada no período de referência

Nesta simulação colocou-se a electricidade produzida de cogeração a 50% de percentagem do período de referência em modo de cogeração integral, e variou-se a percentagem do tempo período de referência (1 ano) em que a recuperação de calor é máxima. Pelo gráfico da Figura 4.16 pode-se observar que para variação da percentagem referida faz com que o C diminua.

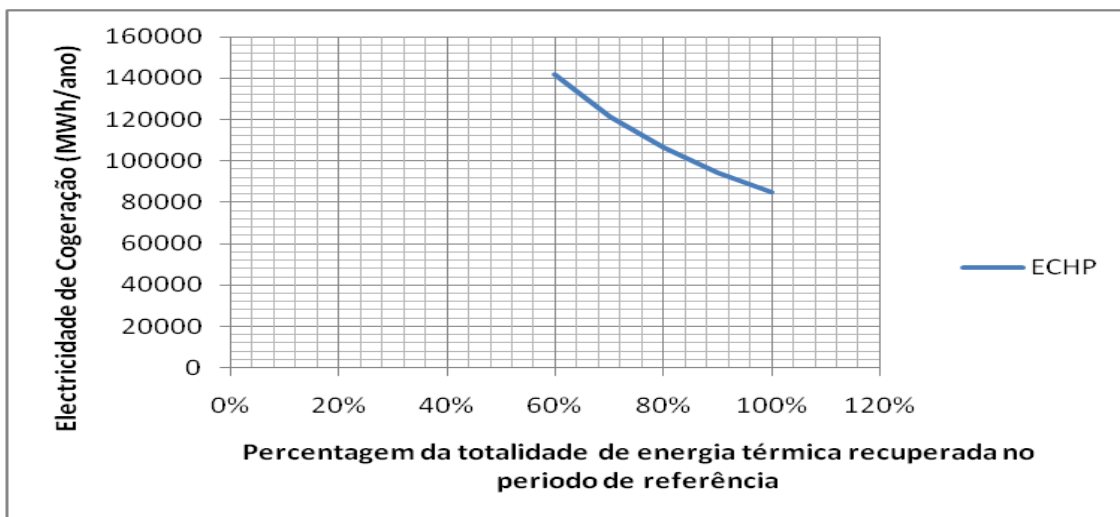


Figura 4.17 - Variação da electricidade de cogeração com a variação da percentagem da totalidade de energia térmica recuperada no período de referência

Pelo gráfico da Figura 4.17 pode-se observar que a electricidade de cogeração baixa com o aumento da percentagem de energia térmica usada, isto deve-se ao comportamento do rácio C como se verificou anteriormente. Como a central de cogeração nesta simulação foi colocada a 50% do tempo do período de referência verifica-se que para a electricidade de cogeração não é igual à electricidade total produzida no caso base (170000MWh/ano).

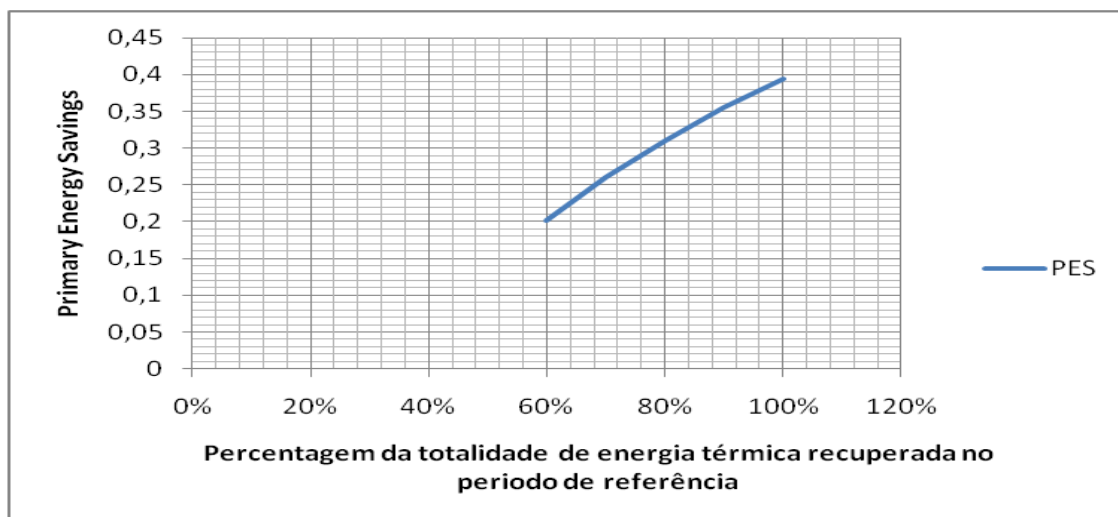


Figura 4.18 - Variação da electricidade de cogeração com a variação da percentagem da totalidade de energia térmica recuperada no período de referência

Como se pode observar pelo gráfico a poupança de energia primária cresce com um maior aproveitamento da energia térmica aproveitada. Sendo máxima quando a central funciona em modo de cogeração integral durante todo o período de referência e quando a energia térmica recuperada totalmente nesse mesmo período.

Diferentes padrões de consumo de electricidade e calor

Foram simulados diferentes padrões de consumos de electricidade e calor para ver a influência dos padrões de consumo na poupança de energia primária. Na tabela seguinte podemos observar a influência dos diferentes padrões na PES.

Tabela 4.1 - Poupança de Energia Primária para diferentes consumos de electricidade e calor

Dados da Instalação	C								
	0,11	0,26	0,46	0,73	1,13	1,76	2,94	5,87	25,66
Produção bruta de Electricidade (MWh/ano)	49000	98000	147000	196000	245000	294000	343000	392000	441000
Autoconsumo de electricidade (MWh/ano)	4800	4800	4800	4800	4800	4800	4800	4800	4800
Produção total de vapor (MWh/ano)	441000	392000	343000	294000	245000	196000	147000	98000	49000
Autoconsumo de vapor (MWh/ano)	32000	32000	32000	32000	32000	32000	32000	32000	32000
Retorno de condensados (MWh/ano)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Combustível consumido (MWh/ano)	650000	650000	650000	650000	650000	650000	650000	650000	650000
Combustível para post-Combustão (MWh/ano)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PES (%)	-11,9%	-0,4%	8,9%	16,6%	23,7%	28,7%	33,6%	37,8%	41,5%

Pela tabela anterior pode-se observar que com o aumento da electricidade e consequentemente a diminuição do calor complementar à produção de cogeração, ou seja, o

aumento do rácio electricidade/calor (C) verifica-se que existe um aumento da poupança de energia primária como se pode observar pelo gráfico representado na imagem seguinte.

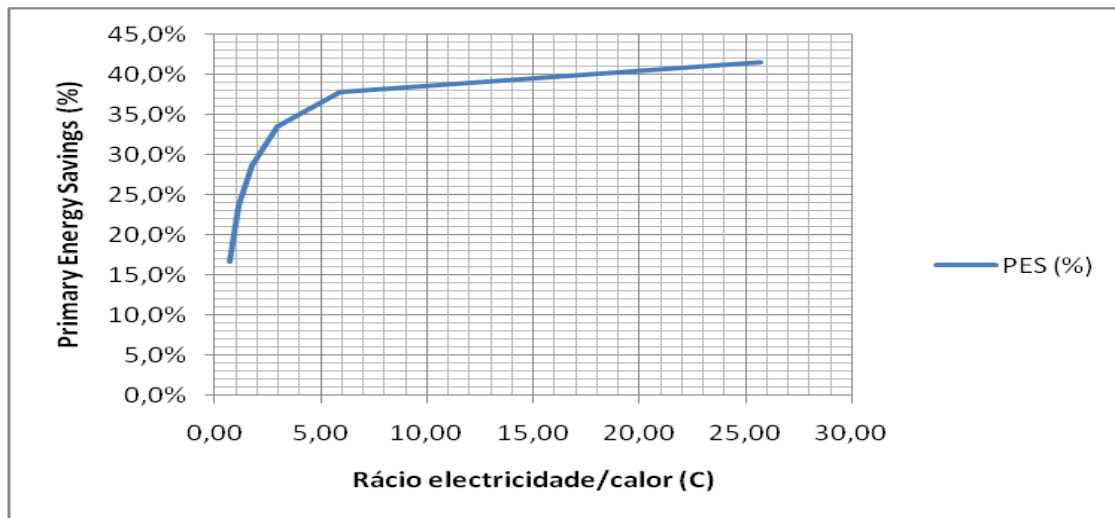


Figura 4.19 - Variação da poupança de energia primária com a variação do rácio electricidade/calor (C)

É de referir que as unidades de cogeração no máximo atingem um rácio de electricidade/calor de 2, sendo que no gráfico se encontram maiores para observar o comportamento da poupança de energia primária (PES). Apesar da tabela ter valores de PES inferiores 16,6%, este não foram considerados no gráfico devido a não atingirem o REE mínimo imposto pela legislação portuguesa.

O que seria de esperar era uma poupança de energia primária máxima para um rácio de electricidade/calor de 1, mas não se sucede devido às eficiências destes processos separados de produção de electricidade e de energia térmica são totalmente diferentes, em que temos, em equipamentos de energia térmica, eficiências que rondam os 90%, enquanto nas centrais convencionais que produzem electricidade, em termos médios, as eficiências atingem os 40/50%. Isto diz-nos exactamente onde está o potencial de poupança: está na electricidade. Quer dizer que se quisermos trabalhar com uma metodologia que identifique claramente quais são os projectos onde poupo de forma mais eficaz a energia primária, devo ter uma metodologia qualquer que tenha em conta a situação de que o potencial de poupança está do lado da electricidade e não do lado da produção térmica. [26]

4.3 Motor de Combustão Interna com Recuperação de Calor

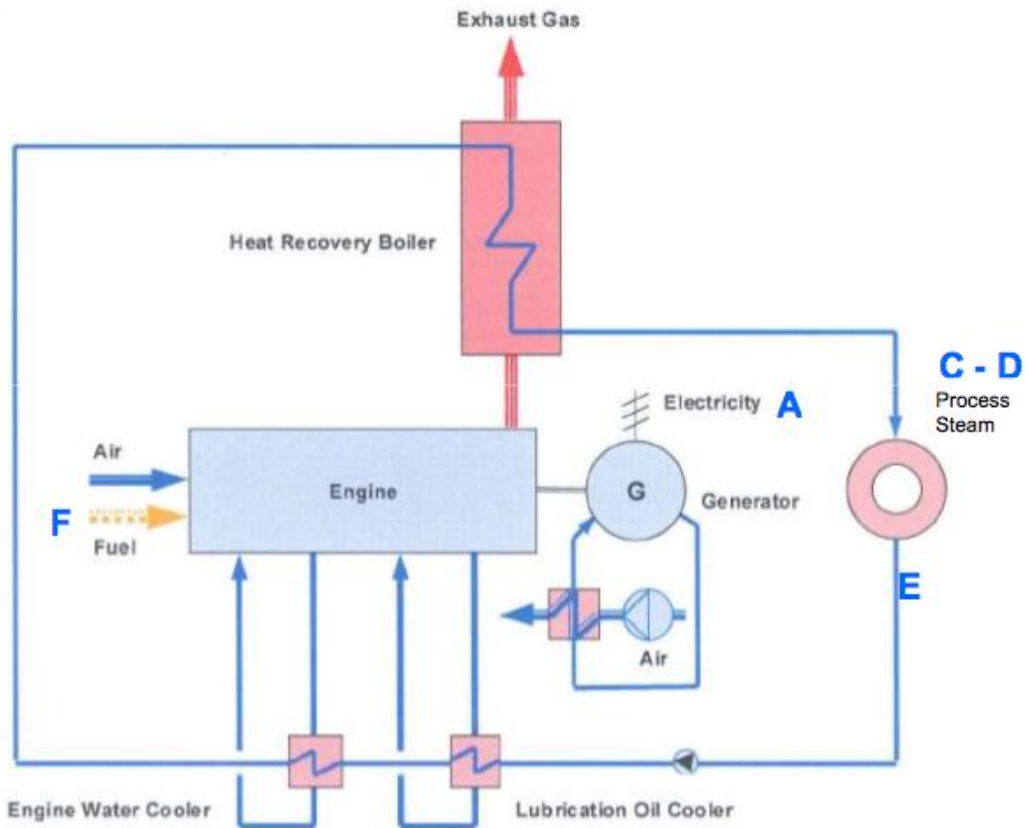


Figura 4.20 - Esquema de uma unidade de cogeração com motor de combustão interna com recuperação de calor[24]

Cálculo de electricidade de elevada eficiência

A central co-geradora representada na figura anterior tem uma potência de 25 kW, foi colocada para a simulação a produzir 170 MWh/ano o que resulta no seguinte factor de utilização da referida central.

$$0,025 \times 8760 \times f.u. = 170 \text{ MWh/ano}$$

$$f.u. = 0,78$$

Dados da instalação:

(A) Produção bruta de electricidade: 170MWh/ano

(B) Autoconsumo de electricidade: 5,1MWh/ano

(C) Produção total de vapor: 320MWh/ano

(D) Autoconsumo de vapor: 16MWh/ano

(E) Retorno de condensados: 1,140MWh/ano

(F) Combustível consumido: 635MWh/ano

Rendimento Eléctrico equivalente:

$$REE = \frac{E}{C - \frac{T}{0,9 - 0,2 \times \frac{CR}{C}}} = \frac{170 - 5,1}{635 - \frac{320 - 16}{0,9}} = 55,2\%$$

Para calcular a poupança de energia primária é necessário efectuar as seguintes etapas:

- Etapa 1 - Cálculo da eficiência global
 - Período de 1 ano
 - Determinação da produção energética da instalação para o período de referência
 - Produção total de Electricidade (EChP e E-nãoChP)

$$170 \text{ MWh/ano}$$
 - Calor útil produzido na instalação para o período de referência, HChP)

$$HChP = \text{Produção Total de Vapor} - \text{Autoconsumo de Vapor}$$

$$= 304 \text{ MWh/ano}$$
 - Energia Produzida na instalação de cogeração

$$170 + 304 = 474 \text{ MWh/ano}$$
 - Energia Consumida

$$635 \text{ MWh/ano}$$
 - Eficiência Global

$$\text{Eficiência Global} = \frac{\text{Energia Produzida}}{\text{Energia Consumida}} = \frac{474}{635} = 74,6\%$$
- Etapa 2 – Comparação da eficiência global calculada com os limites definidos da directiva 2004/8/C
 - Verificação do valor mínimo de eficiência global definido no Anexo II da directiva 2004/8/CE
 - Tecnologia de cogeração correspondente a alínea b) do anexo I da directiva: Motor de Combustão Interna
 - Eficiência global mínima definida no anexo II da directiva para a tecnologia em causa: 75%
 - Comparação da eficiência global da instalação com o valor do anexo II
 - Eficiência global inferior ao de referencia do anexo II da directiva
 - Conclusão
 - Parte da electricidade produzida não é considerada CHP (E-nãoChP)
 - É necessário realizar as etapas 3 e 4 para determinar a quantidade de electricidade produzida que é considerada CHP
- Etapa 3 – Determinação do rácio electricidade/calor para os casos em que o rendimento global calculado é inferior aos limites definidos na directiva 2004/8/CE
 - Selecção do tipo de rácio electricidade/calor a utilizar
 - A instalação encontra-se em fase experimental ou no primeiro ano de funcionamento?

Não
 - A instalação opera em modo de cogeração integral?

Sim
 - Cálculo do rácio Electricidade/calor
 - Instalação em modo de cogeração integral
 - Produção de electricidade em modo de cogeração integral

$$170 \text{ MWh/ano}$$
 - Produção de energia térmica em modo de cogeração integral

$$304 \text{ MWh/ano}$$

- Rácio de electricidade/calor efectivo

$$C = \frac{170}{304} = 0,56$$

- Cálculo da electricidade produzida em cogeração CHP

$$E_{CHP} = H_{CHP} \times C = 304 \times 0,56 = 170 \text{ MWh/ano}$$

- Etapa 4 – Utilização do rácio electricidade/calor implícito na directiva já referida para os casos que não for possível calcular na etapa anterior.

Esta etapa não se aplica a este caso

- Etapa 5 – Cálculo da eficiência e da poupança de energia primária

- Cálculo da energia de alimentação da produção de ECHP

- Rendimento eléctrico da instalação

$$CHPE\eta = \frac{170}{635} \times 100 = 26,8\%$$

- Energia de alimentação CHP

$$\frac{E_{CHP}}{CHPE\eta} = \frac{170}{26,8\%} = 635 \text{ MWh/ano}$$

- Cálculo da Eficiência térmica de cogeração

- Eficiência térmica de cogeração

$$CHPH\eta = \frac{\text{Calor útil}}{\text{Energia de Alimentação CHP}} = \frac{304}{635} \times 100 = 47,9\%$$

- Determinação do valor de referência da eficiência da produção separada de electricidade

- Características da instalação

Ano de construção: 2000

Tipo de combustível: Gás Natural

Temperatura média do estado membro: 15°C

Tensão no ponto de interligação: 60 kV

Fracção consumida no local: 100%

- Valor de referência base (seleccionada na tabela do anexo I da decisão da comissão de 21 de Dezembro de 2006)

51,40%

- Factor de correcção de temperatura (anexo III da decisão da comissão de 21 de Dezembro de 2006)

0,0%

- Factor de correcção relativo às perdas evitadas na rede (anexo IV da decisão da comissão de 21 de Dezembro de 2006)

Electricidade exportada:0,965

Electricidade consumida no local:0,945

- Cálculo do valor de referência

$$RefE\eta = (51,4 + 0,0) \times 0,945 = 48,57\%$$

- Valor de referência da eficiência da produção separada de calor (anexo II da decisão da comissão de 21 de Dezembro)

$$RefH\eta = 90\%$$

- Cálculo da poupança de energia primária

- $PES = 1 - \frac{1}{\left(\frac{CHPH\eta}{RefH\eta} + \frac{CHPE\eta}{RefE\eta}\right)} = 7,7\%$

Conclusão

Como a potência do gerador nesta central de cogeração é de 25 kW, ou seja, considerada de micro-cogeração, é considerada de elevada eficiência. Pois segundo a directiva as centrais de micro-cogeração cuja PES dá superior a 0% é considerada de elevada eficiência. Toda a electricidade é considerada de cogeração devido a esta estar em modo de cogeração integral no tempo de utilização da unidade co-geradora.

Análise de sensibilidade

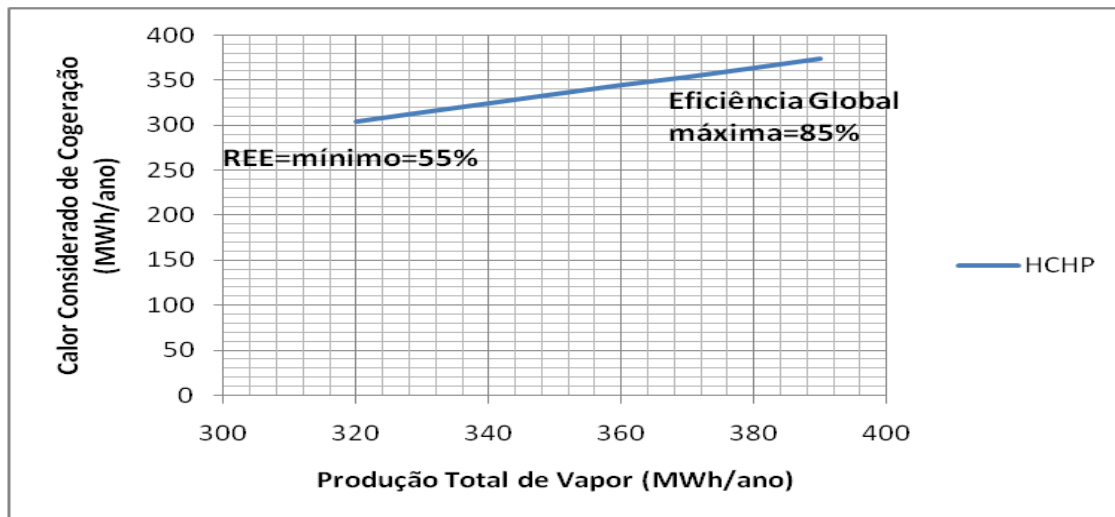


Figura 4.21 - Variação do calor considerado de cogeração com a variação da produção total de vapor

Podemos observar pelo gráfico representado na Figura 4.21 que a variação da produção total de vapor encontra-se limitada pela linha do gráfico, sendo o limite inferior influenciado pelo rendimento eléctrico equivalente e o limite superior pela eficiência global da unidade de cogeração, podendo ir até aos 85%.

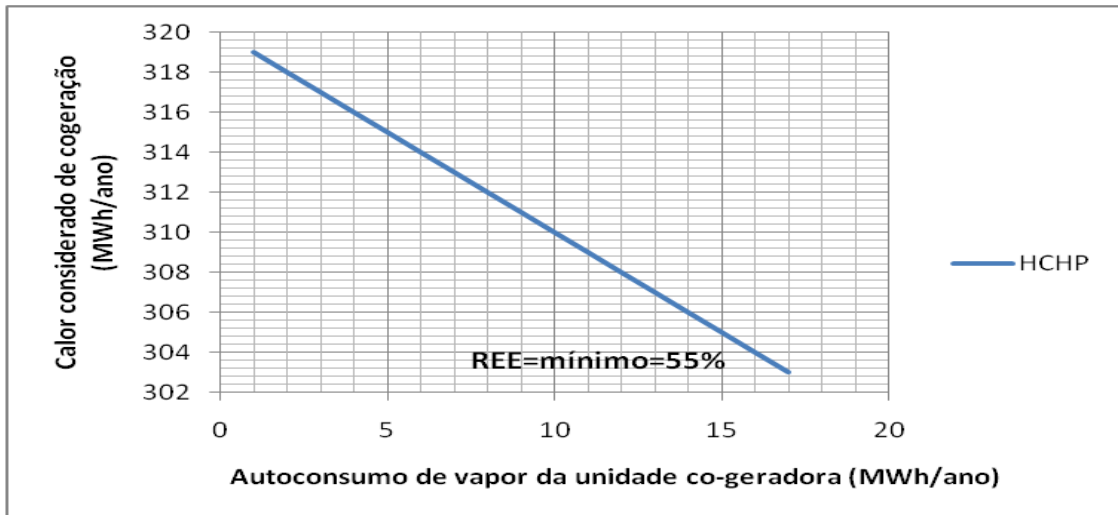


Figura 4.22 - Variação do calor considerado de cogeração com a variação do autoconsumo da unidade de cogeração

Com o aumento do autoconsumo de vapor da unidade de cogeração o calor que é considerado de cogeração diminui, já que o autoconsumo não pode ser considerado para o cálculo de electricidade de elevada eficiência de cogeração, daí ser subtraído à produção total de vapor. Pela linha do gráfico da Figura 4.22, podemos observar que existe um limite inferior para a variação do autoconsumo que é limitado pelo rendimento eléctrico equivalente (55%).

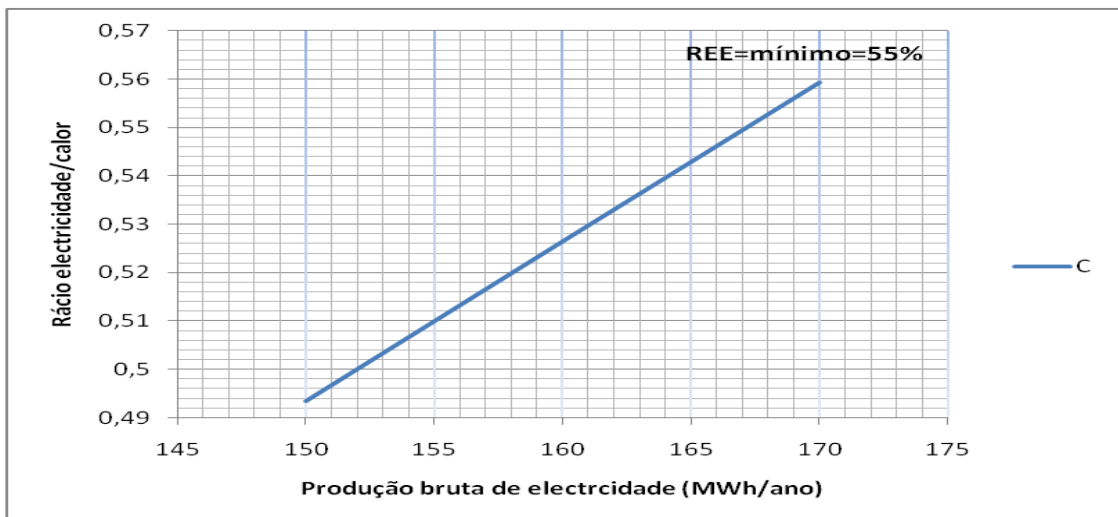


Figura 4.23 - Variação do rácio electricidade/calor com a variação da produção total de electricidade

No gráfico da figura anterior podemos observar que com o aumento da produção bruta de electricidade o rácio electricidade/calor aumenta. Neste caso o rendimento eléctrico equivalente de 55% só é atingido quando a unidade de cogeração produz 170 MWh/ano de electricidade, e ao atingir este patamar de produção, a eficiência global passa dos 75% e com isto toda a electricidade produzida é considerada de cogeração logo não é necessário o C

para o resto do processo de cálculo. A unidade de cogeração pode produzir mais electricidade dentro dos seus limites técnicos.

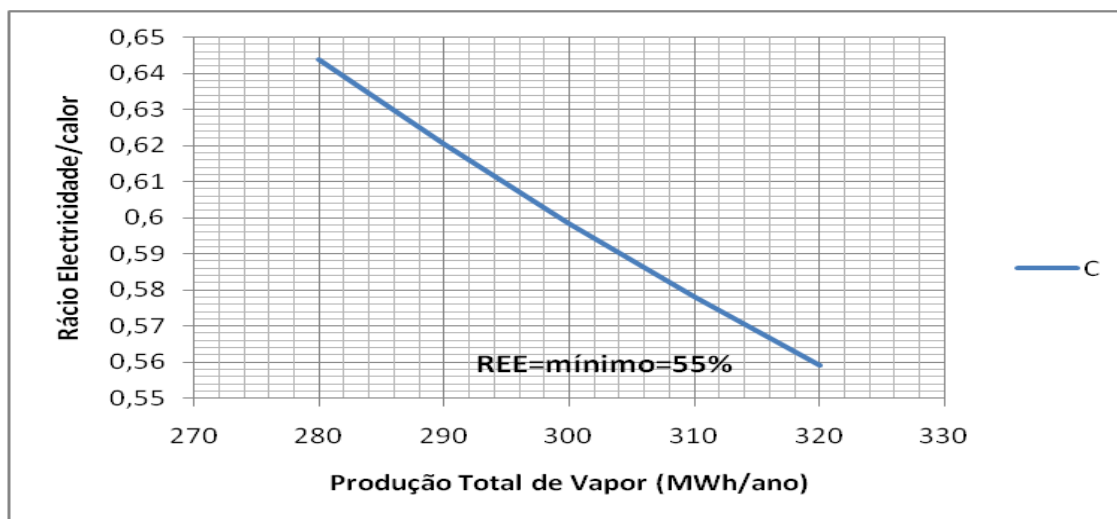


Figura 4.24 - Variação do rácio electricidade/calor com a variação da produção total de vapor

No gráfico da Figura 4.24 podemos observar que o C decresce com a produção total de vapor, atingindo só o rendimento eléctrico equivalente legal, para o combustível da tecnologia em causa (55%), para uma produção de 320MWh/ano. Nesse mesmo ponto a unidade de cogeração supera a eficiência global de referência definida na directiva 2004/8/CE de 75%, daí não ser necessário o C para o resto do cálculo, sendo toda a electricidade considerada de cogeração.

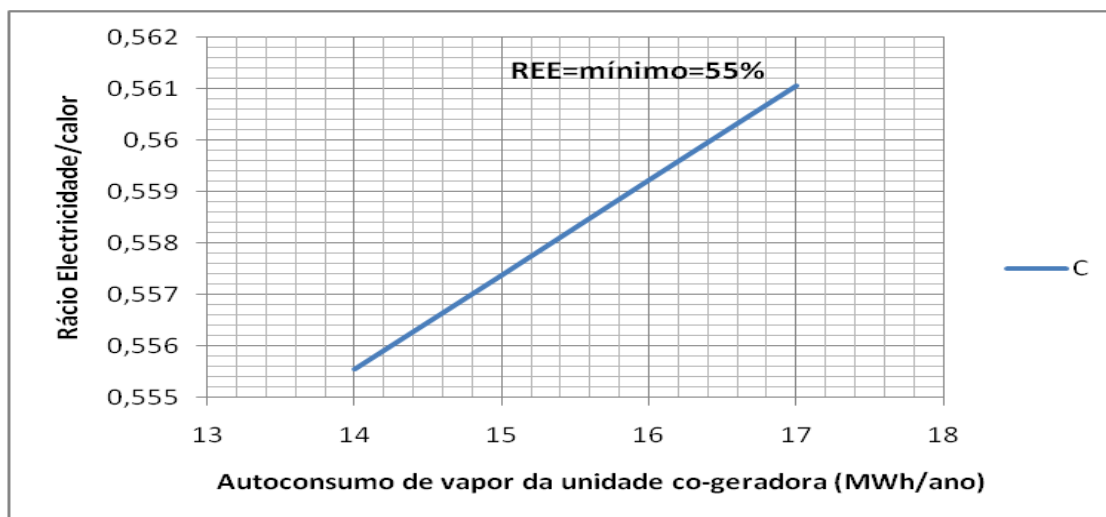


Figura 4.25 - Variação do rácio electricidade/calor com a variação do autoconsumo de vapor da unidade de cogeração

Através do gráfico da Figura 4.25 podemos concluir que o rácio (C) aumenta com o autoconsumo de vapor, no entanto existe um limite para este variar, que está representado pela linha do gráfico, e esse limite é influenciado pelo rendimento eléctrico equivalente (55%). Caso a unidade de cogeração tenha possibilidade de diminuir o seu autoconsumo, pode

faze-lo. Nesse caso se o autoconsumo for menor que 14MWh/ano a eficiência global fica superior à eficiência de referência, sendo depois considerada toda a electricidade de cogeração.

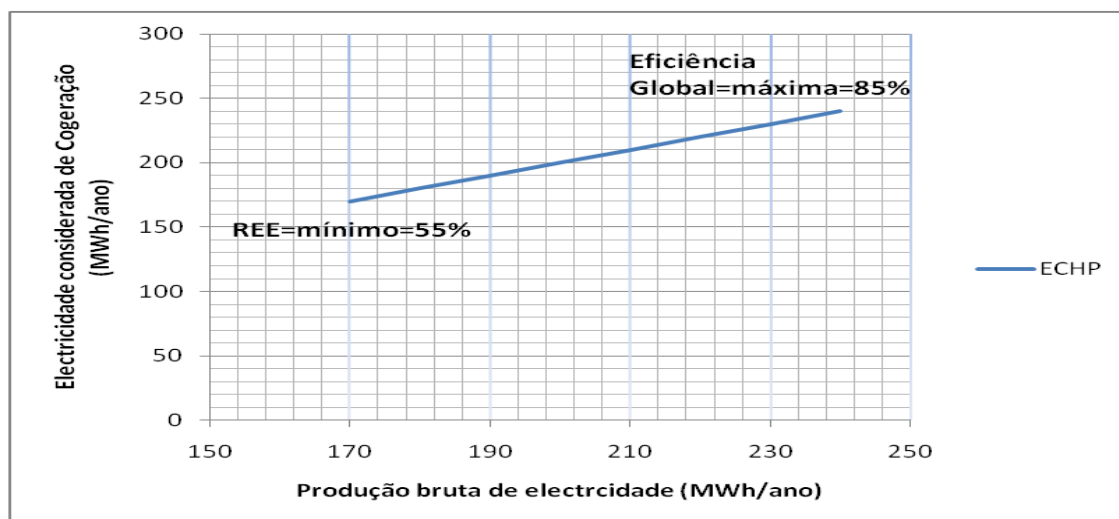


Figura 4.26 - Variação da electricidade de cogeração com a variação da produção bruta de electricidade

Com a variação da produção bruta de electricidade obtém-se o gráfico representado na Figura 4.26, o rendimento eléctrico equivalente necessário só se obteve com uma produção bruta de electricidade de 170MWh/ano, e para esta mesma produção de electricidade atinge-se a eficiência global acima da eficiência de referência (75%), logo pode-se aumentar a produção de electricidade tendo como limite superior a eficiência máxima da tecnologia em causa, cerca de 85% na melhor das hipóteses. Toda a electricidade produzida acima de 170MWh/ano é considerada de cogeração pois a unidade está em modo de cogeração integral e também a eficiência global se encontra acima de 75%.

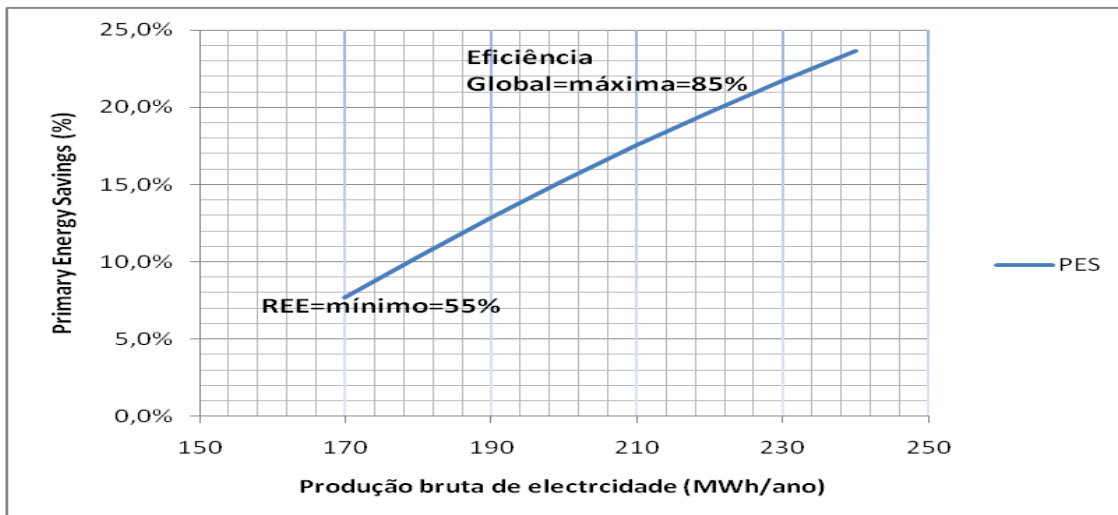


Figura 4.27 - Variação da poupança de energia com a variação da produção bruta de electricidade

No gráfico da Figura 4.27 pode-se observar que com o aumento da produção total de electricidade a poupança de energia primária aumenta (PES). Através da Figura 4.27 pode-se observar que para alguns valores de produção bruta de electricidade a PES dá inferior a 10%, no entanto neste caso é indiferente, pois a central co-geradora em estudo é considerada de micro-cogeração, sendo então o limite inferior dado pelo REE mínimo e o limite superior dado pela eficiência global máxima possível.

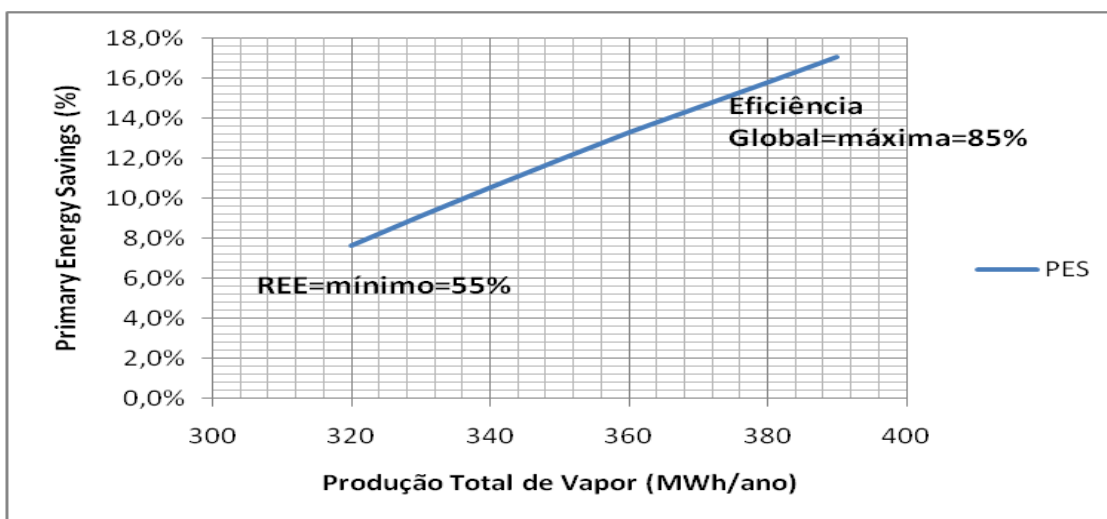


Figura 4.28 - Variação da poupança de energia primária com a variação da produção total de vapor

No gráfico da Figura 4.28 podemos observar que também existe limites, sendo o limite inferior definido pelo REE mínimo já que a central co-geradora em estudo é considerada de micro-cogeração, e um limite superior definido pela eficiência global máxima possível.

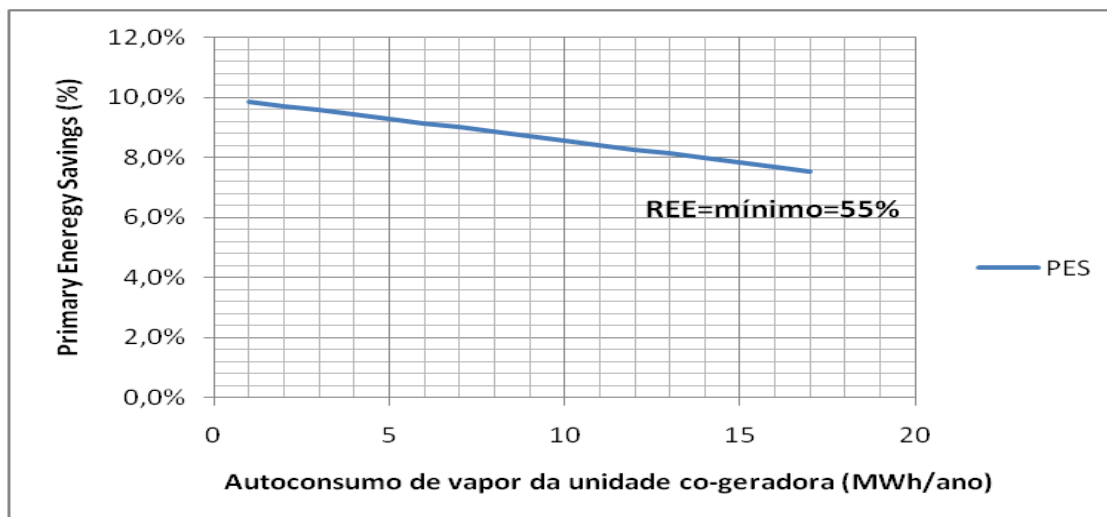


Figura 4.29 - Variação da poupança de energia primária com a variação do autoconsumo de vapor

Como se pode observar no gráfico da Figura 4.29 existe um limite para a variação de autoconsumo da unidade co-geradora, definido pelo rendimento eléctrico equivalente mínimo.

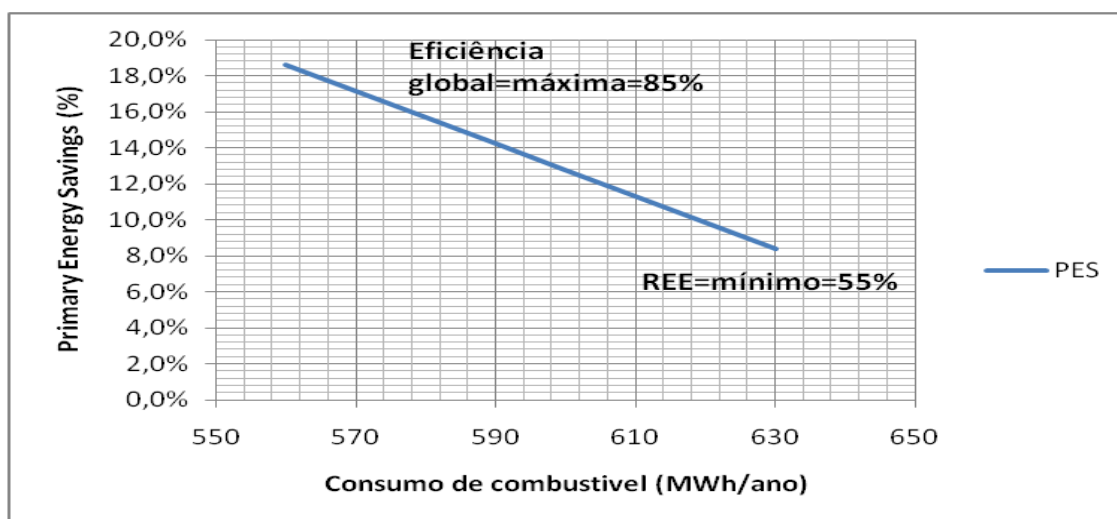


Figura 4.30 - Variação da poupança de energia primária com a variação do consumo de combustível

No gráfico da Figura 4.30 pode-se concluir que existem dois limites definidos para a variação do consumo de combustível. Sendo o limite superior definido pela eficiência global máxima de 85% e o limite inferior é dado pelo REE mínimo imposto pela legislação portuguesa.

4.4 Turbina de Gás em Ciclo Simples com Recuperação de Calor

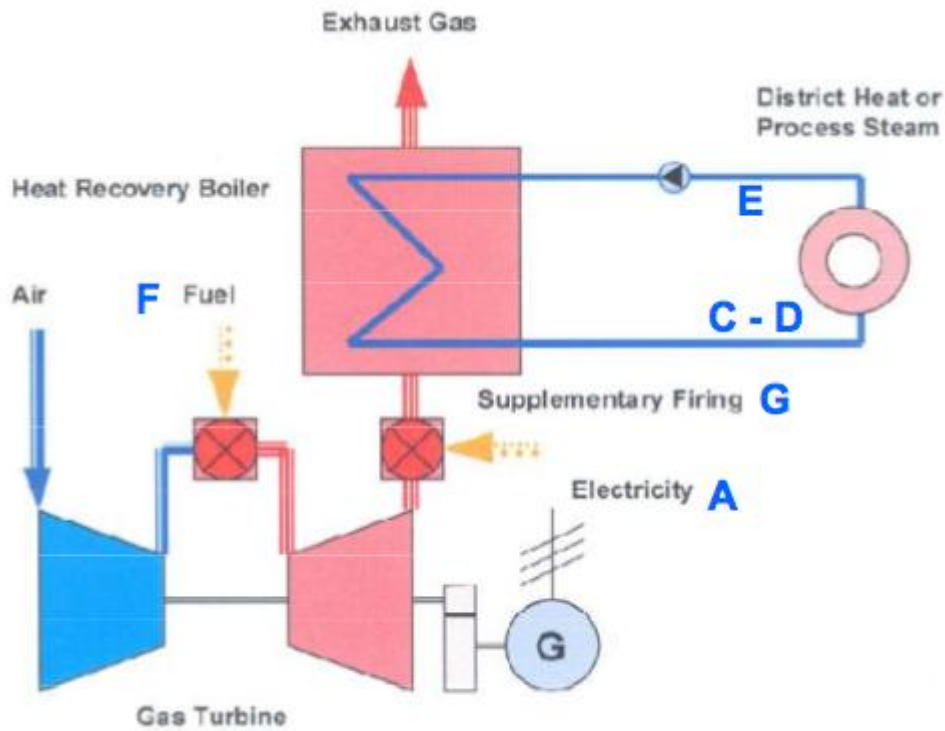


Figura 4.31 - Esquema de uma unidade de cogeração a turbina a gás em ciclo simples com recuperação de calor[24]

Cálculo de electricidade de elevada eficiência

A central representada na Figura 4.31 tem uma potência de 10 MW produzindo 60000 MWh/ano de electricidade cujo seu factor de utilização se encontra calculado de seguida.

$$10 \times 8760 \times f.u. = 60000 \text{ MWh/ano}$$

$$f.u. = 0,68$$

Dados da instalação:

(A) Produção bruta de electricidade: 60000 MWh/ano

(B) Autoconsumo de electricidade: 1800 MWh/ano

(C) Produção total de vapor: 120000 MWh/ano

(D) Autoconsumo de vapor: 6000 MWh/ano

(E) Retorno de condensados: 11400 MWh/ano

(F) Combustível consumido: 200000 MWh/ano

(G) Combustível para post-combustão: 20000 MWh/ano

Rendimento Eléctrico equivalente:

$$REE = \frac{E}{C - \frac{T}{0,9 - 0,2 \times \frac{CR}{C}}} = \frac{60000 - 1800}{(200000 + 20000) - \frac{120000 - 6000 - 11400}{0,9}} = 55\%$$

Para calcular a poupança de energia primária é necessário efectuar as seguintes etapas:

- Etapa 1 - Cálculo da eficiência global
 - Período de 1 ano
 - Determinação da produção energética da instalação para o período de referência
 - Produção total de Electricidade (ECHP e E-nãoCHP)

$$60000 \text{ MWh/ano}$$
 - Calor útil produzido na instalação para o período de referência, HCHP)

$$HCHP = \text{Produção Total de Vapor} - \text{Autoconsumo de Vapor} = 96000 \text{ MWh/ano}$$
 - Energia Produzida na instalação de cogeração

$$60000 + 96000 = 156000 \text{ MWh/ano}$$
 - Energia Consumida

$$200000 \text{ MWh/ano}$$
 - Eficiência Global

$$\text{Eficiência Global} = \frac{\text{Energia Produzida}}{\text{Energia Consumida}} = \frac{156000}{200000} = 78\%$$
- Etapa 2 – Comparação da eficiência global calculada com os limites definidos da directiva 2004/8/C
 - Verificação do valor mínimo de eficiência global definido no Anexo II da directiva 2004/8/CE
 - Tecnologia de cogeração correspondente a alínea b) do anexo I da directiva: Turbina a gás em ciclo combinado com recuperação de calor
 - Eficiência global mínima definida no anexo II da directiva para a tecnologia em causa: 75%
 - Comparação da eficiência global da instalação com o valor do anexo II
 - Eficiência global inferior ao de referencia do anexo II da directiva
 - Conclusão
 - Toda a electricidade é considerada CHP
 - Não é necessário realizar as etapas 3 e 4 para determinar a quantidade de electricidade produzida que é considerada CHP
- Etapa 3 – Determinação do rácio electricidade/calor para os casos em que o rendimento global calculado é inferior aos limites definidos na directiva 2004/8/CE

Esta etapa não se aplica a este caso

- Etapa 4 – Utilização do rácio electricidade/calor implícito na directiva já referida para os casos que não for possível calcular na etapa anterior.

Esta etapa não se aplica a este caso

- Etapa 5 – Cálculo da eficiência e da poupança de energia primária
 - Cálculo da energia de alimentação da produção de ECHP
 - Rendimento eléctrico da instalação

$$CHPE\eta = \frac{60000}{200000} \times 100 = 30\%$$

- Energia de alimentação CHP

$$\frac{E_{CHP}}{CHPE\eta} = \frac{60000}{30\%} = 200000 \text{ MWh/ano}$$

- Cálculo da Eficiência térmica de cogeração

- Eficiência térmica de cogeração

$$CHPH\eta = \frac{\text{Calor útil}}{\text{Energia de Alimentação CHP}} = \frac{96000}{200000} \times 100 = 48\%$$

- Determinação do valor de referência da eficiência da produção separada de electricidade

- Características da instalação

Ano de construção: 2000

Tipo de combustível: Gás Natural

Temperatura média do estado membro: 15°C

Tensão no ponto de interligação: 60 kV

Fracção consumida no local: 100%

- Valor de referência base (seleccionada na tabela do anexo I da decisão da comissão de 21 de Dezembro de 2006)

51,40%

- Factor de correcção de temperatura (anexo III da decisão da comissão de 21 de Dezembro de 2006)

0,0%

- Factor de correcção relativo às perdas evitadas na rede (anexo IV da decisão da comissão de 21 de Dezembro de 2006)

Electricidade exportada: 0,965

Electricidade consumida no local: 0,945

- Cálculo do valor de referência

$$RefE\eta = (51,40 + 0,0) \times 0,945 = 48,57\%$$

- Valor de referência da eficiência da produção separada de calor (anexo II da decisão da comissão de 21 de Dezembro)

$$RefH\eta = 90\%$$

- Cálculo da poupança de energia primária

$$PES = 1 - \frac{1}{\left(\frac{CHPH\eta}{RefH\eta} + \frac{CHPE\eta}{RefE\eta}\right)} = 13,1\%$$

Conclusão

A unidade de cogeração é considerada de elevada eficiência já que conseguiu atingir o patamar de 10% de PES. Toda a electricidade é considerada de cogeração que para estes dados da instalação da unidade de cogeração a eficiência global encontra-se a cima da eficiência de referência (75%).

Análise de sensibilidade

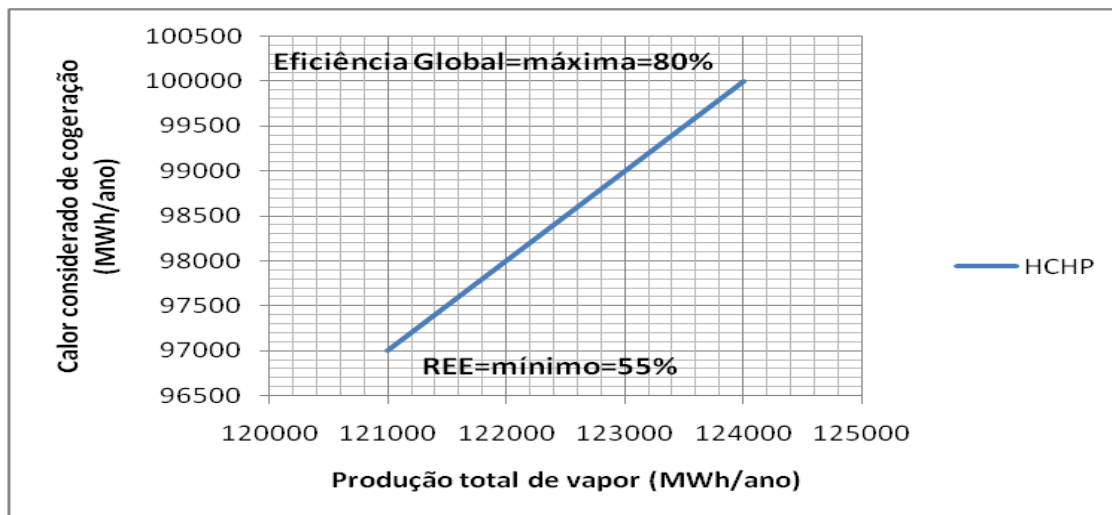


Figura 4.32 - Variação do calor que é considerado de cogeração com a variação da produção total de vapor

Através do gráfico representado na Figura 4.32 podemos através da recta que existe um intervalo em que a produção de vapor pode variar, sendo o limite inferior restringido pelo rendimento eléctrico equivalente de novamente 55% devido ao combustível usado por esta tecnologia e para esta simulação, e um limite superior que anda à volta de 80% para as tecnologias mais eficientes de turbina a gás.

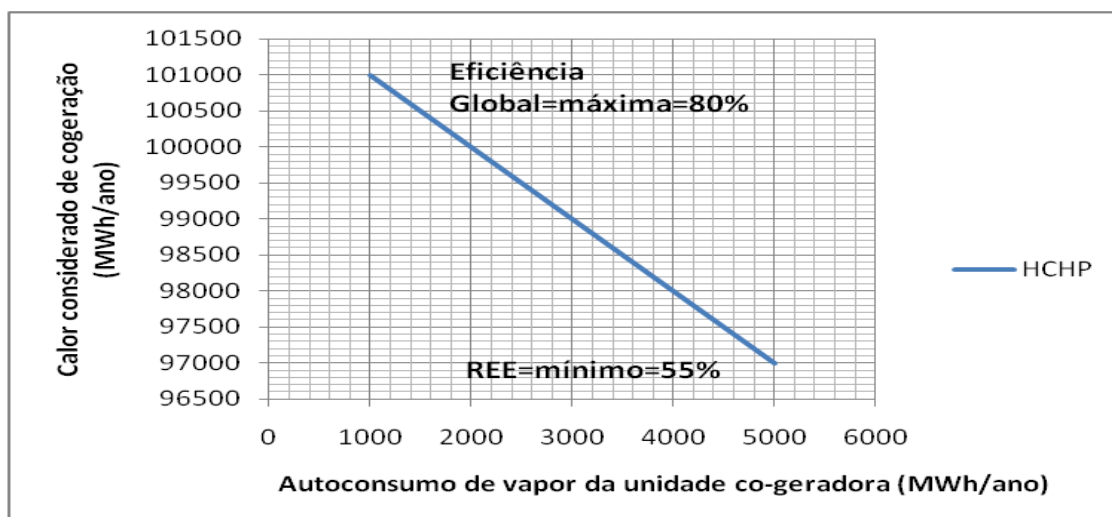


Figura 4.33 - Variação do calor que é considerado de cogeração com a variação do autoconsumo de vapor da unidade de cogeração

Como se pode observar no gráfico da Figura 4.33 existe um intervalo em que a unidade de cogeração pode variar o seu autoconsumo sendo esse intervalo limitado

superiormente pela eficiência global máxima neste tipo de cogeração que é de cerca de 80%, e limitado inferiormente pelo REE.

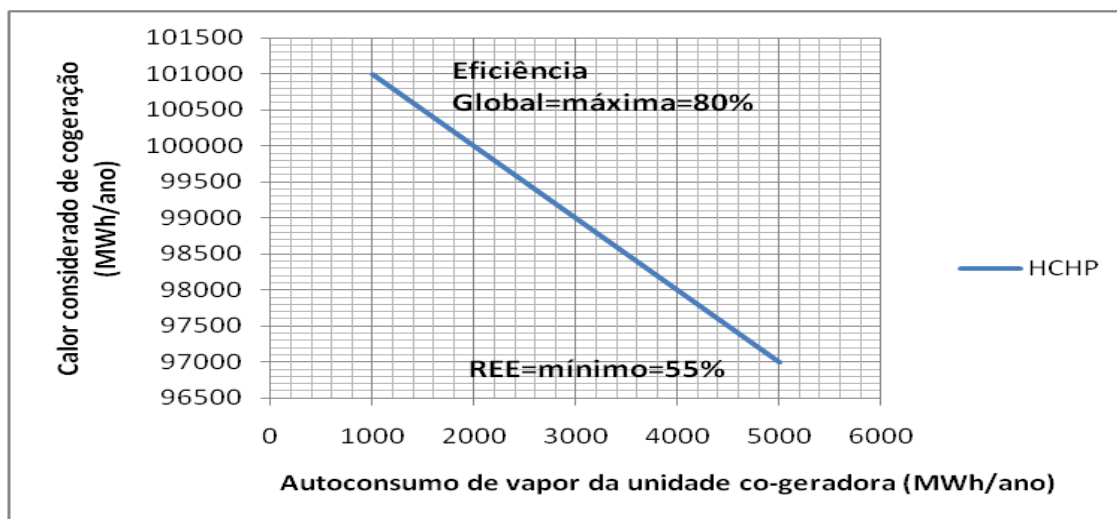


Figura 4.34 - Variação do calor considerado de cogeração com a variação do combustível post-combustão

Como podemos observar existe um intervalo do combustível para post-combustão que é definido pela linha do gráfico da Figura 4.34, o limite superior definido pela eficiência global da tecnologia e o limite inferior pelo rendimento eléctrico equivalente.

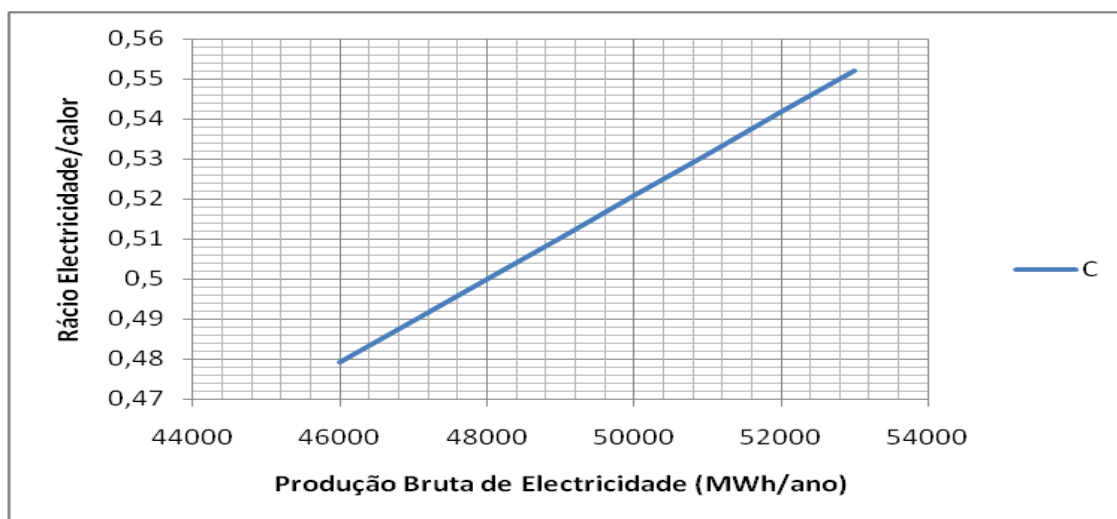


Figura 4.35 - Variação do rácio electricidade/calor com a variação da produção total de electricidade

Através do gráfico da figura anterior pode-se dizer que o limite do rendimento eléctrico equivalente é com uma produção de 53000MWh/ano e que para produções superiores o C não é mais necessário pois a eficiência global do sistema passa a eficiência de referência, do anexo II da directiva2004/8/CE respectiva à tecnologia, que é de 75%. A produção de electricidade com isto pode ser maior, chegando ao 64000MWh/ano para atingir a eficiência típica da tecnologia em causa que é cerca de 80%.

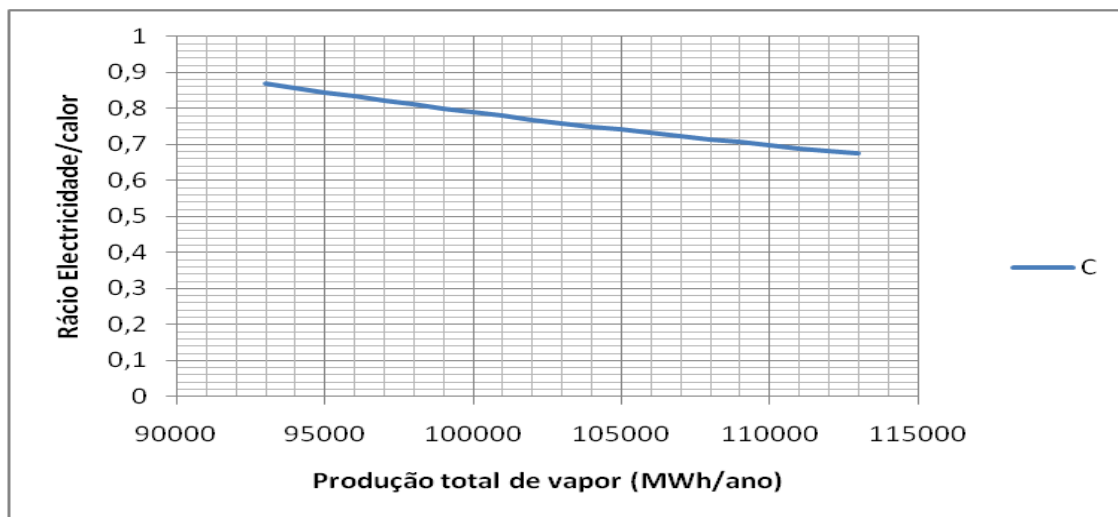


Figura 4.36 - Variação do rácio electricidade/calor com a variação da produção total de vapor

Através do gráfico da Figura 4.36 pode-se retirar que com o aumento da produção total de vapor o rácio electricidade calor (C) aumenta. Neste caso o C só varia neste intervalo de produção de vapor delimitado pela linha do gráfico, no entanto a central só pode ser considerada de cogeração para um intervalo em que a produção total de vapor se encontre no intervalo de 121000 a 124000 MWh/ano, sendo o valor menor delimitado pelo rendimento eléctrico equivalente e o valor maior do intervalo referido limitado pela eficiência de cerca de 80%. Para o intervalo anteriormente referido a eficiência da central é superior à eficiência de referência de 75% que se encontra definida na directiva 2004/8/CE par a tecnologia em causa.

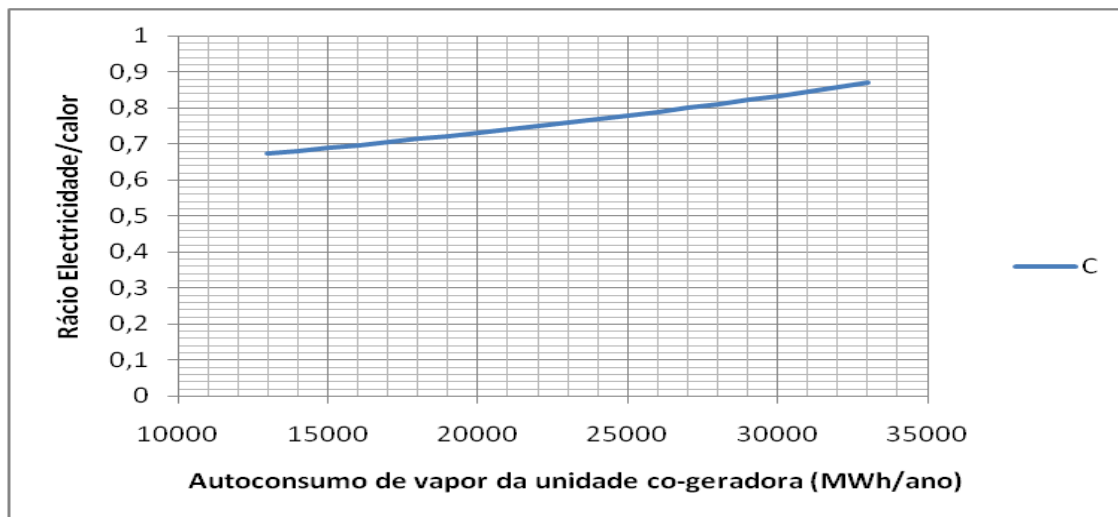


Figura 4.37 - Variação do rácio electricidade/calor com a variação do autoconsumo de vapor da unidade de cogeração

Como se pode observar pelo gráfico da Figura 4.37 com o aumento do autoconsumo de vapor da unidade de cogeração o rácio electricidade/calor aumenta. É de referir que o gráfico anterior tal como no caso do gráfico da Figura 4.36, os valores do autoconsumo de vapor não podem conter os valores delimitados pela recta, pois se assim fosse a central não

poderia ser considerada de cogeração. Sendo o intervalo em que referido pode variar de 2000 a 5000MWh/ano limitados pela eficiência global de 80% e pelo REE de 55% respectivamente.

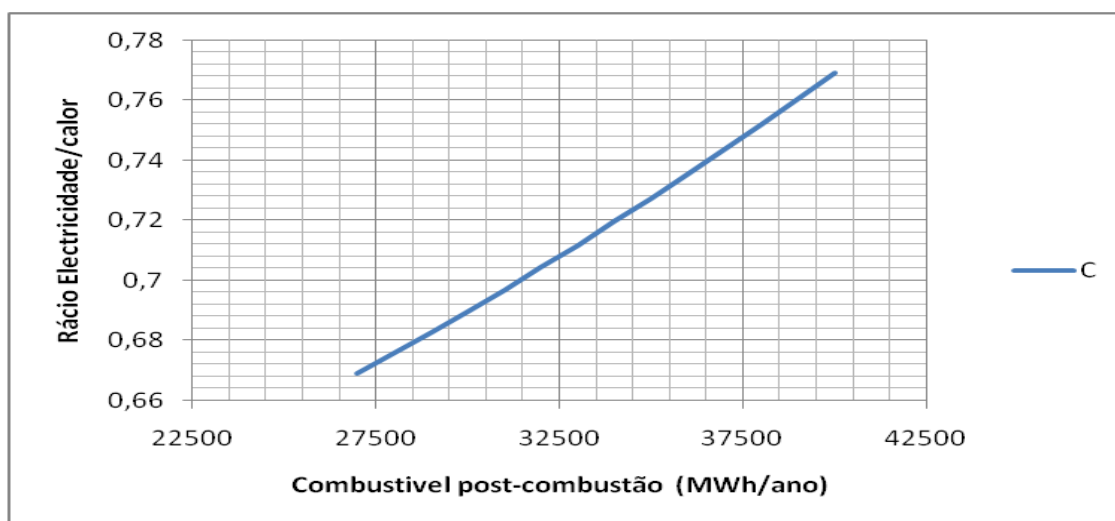


Figura 4.38 - Variação do rácio electricidade/calor com a variação do combustível post-combustão

Mais uma vez o gráfico da figura anterior serve para exemplificar como varia o C com a variação do combustível post-combustão, já que para aquele intervalo a unidade não pode ser considerada de cogeração devido a não atingir o REE mínimo imposto pela legislação. O intervalo de variação para o combustível para post-combustão é de 15000 a 19000MWh/ano e para esse intervalo a eficiência global da central é superior à eficiência de referência.

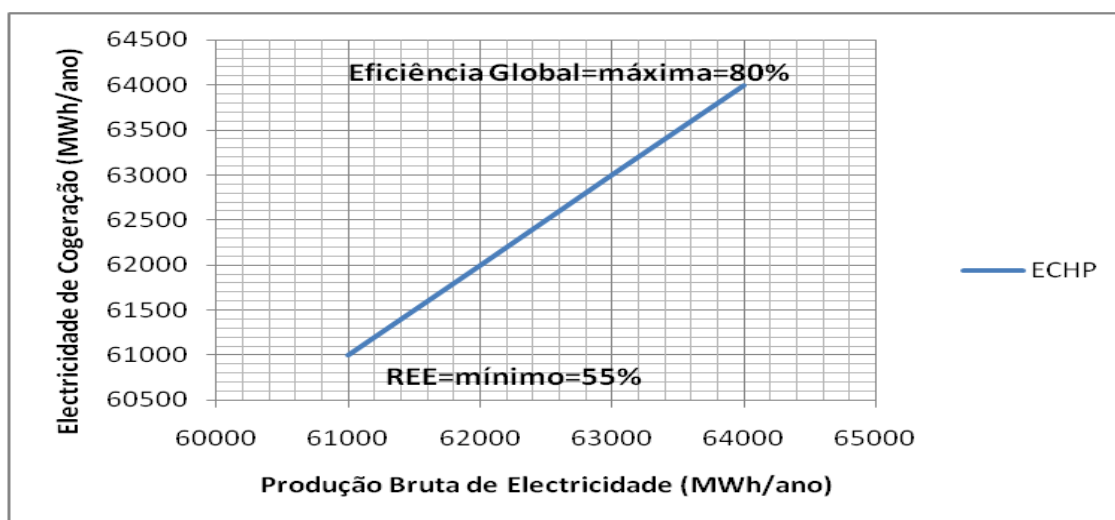


Figura 4.39 - Variação da electricidade que é considerada de cogeração com a variação da produção total de electricidade

No gráfico da figura anterior pode-se observar que a variação da produção da electricidade tem limites que estão definidos pela linha no referido gráfico. O limite inferior é definido pelo rendimento eléctrico equivalente mínimo definido pela legislação portuguesa, enquanto o limite superior é definido pela eficiência global do sistema em causa, cerca de 80%. Para este intervalo de produção bruta de electricidade a eficiência global encontra-se

superior à eficiência de referência daí toda a produção de electricidade é considerada de cogeração.

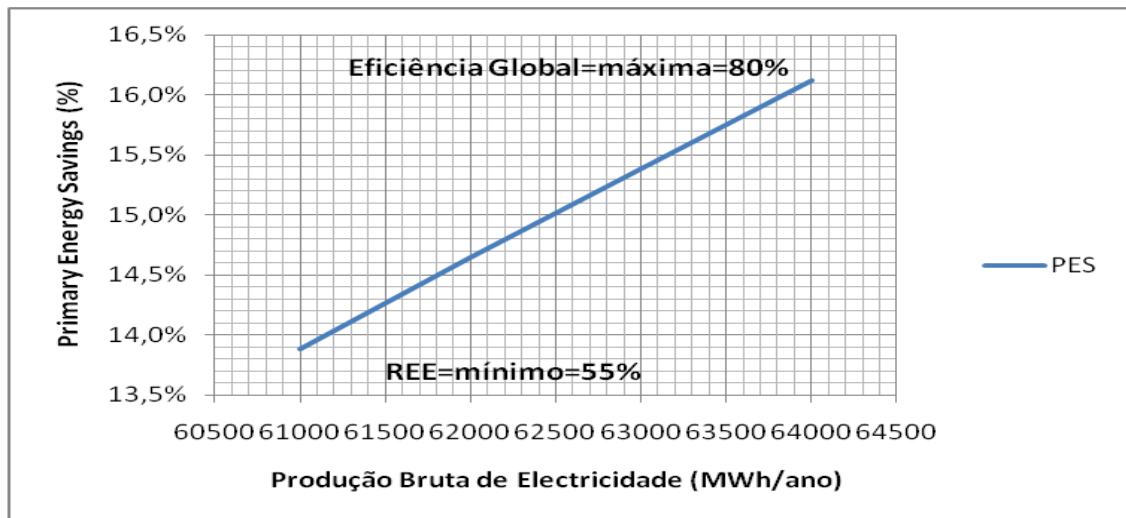


Figura 4.40 - Variação da poupança de energia primária com a variação da produção total de electricidade

Através do gráfico anterior podemos observar que com o aumento da produção de electricidade existe um aumento na poupança de energia primária o que se era de esperar já que todos os outros dados da instalação permanecem inalterados. No entanto existe um limite da variação da produção de electricidade definido pela linha a vermelho, sendo o mínimo através do rendimento eléctrico equivalente e o máximo da eficiência global do sistema, que como já foi referido anteriormente situa-se perto dos 80%.

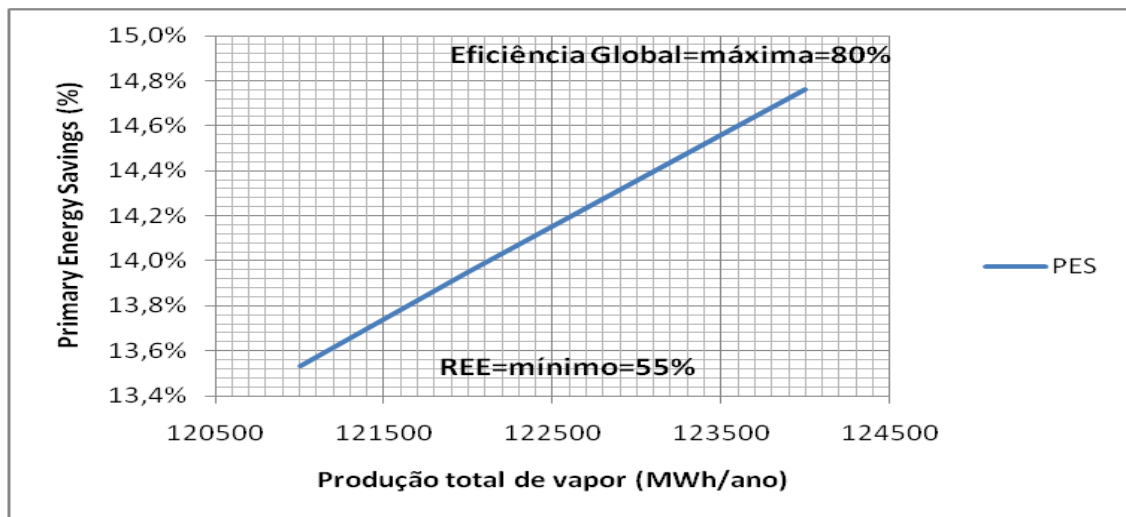


Figura 4.41 - Variação da poupança de energia primária com a variação da produção total de vapor

Através do gráfico da figura anterior pode-se verificar que também a produção total de vapor restringe-se a um intervalo e que está definido pela linha do gráfico, sendo o mínimo mais uma vez influenciado pelo REE e o máximo pela eficiência típica deste tipo de tecnologia de cogeração. É de referir também que os limites referidos escondem o limite da

poupança de energia primária de 10% definido na directiva, como para o intervalo de produção de calor a poupança de energia primária se encontra acima dos 10% a central de cogeração é considerada de elevada eficiência.

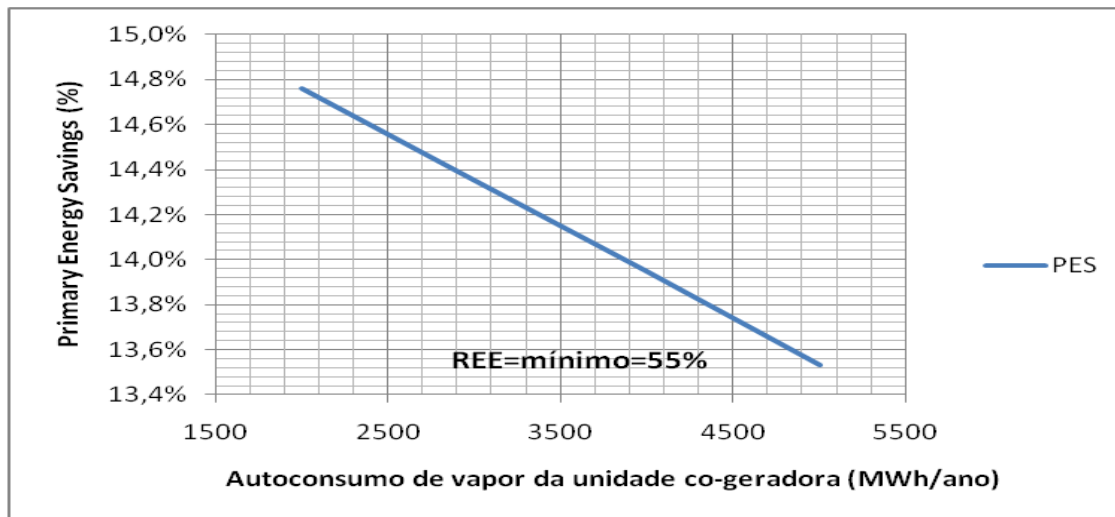


Figura 4.42 - Variação da poupança de energia primária com a variação do autoconsumo de vapor da unidade de cogeração

Novamente pode-se retirar através do gráfico da figura anterior que o autoconsumo de vapor tem um intervalo limite para a sua variação. Esse intervalo está representado no gráfico pela recta, sendo o limite inferior o REE.

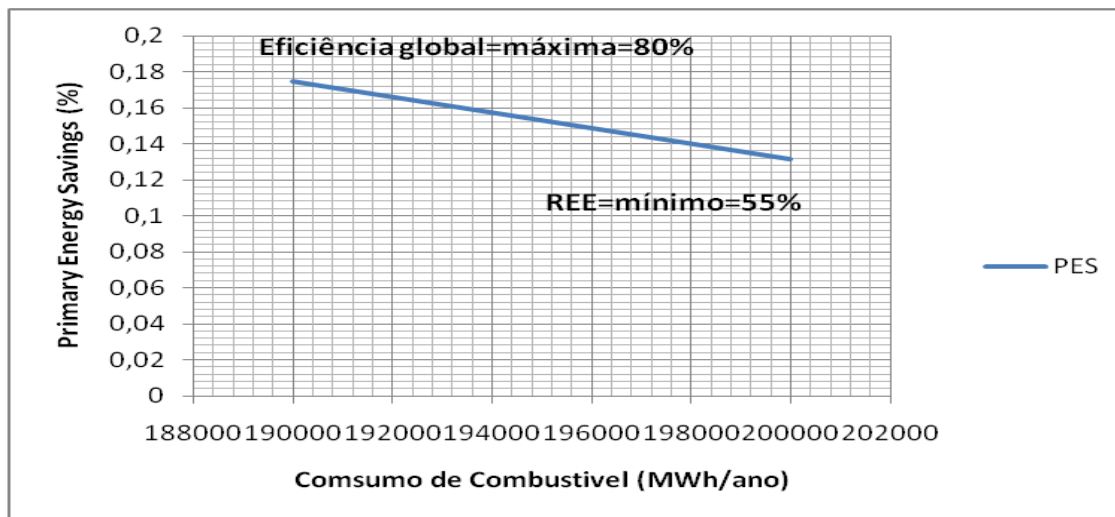


Figura 4.43 - Variação da poupança de energia primária com a variação do consumo de combustível

Para o consumo de combustível existe também um intervalo em que este pode variar de maneira a central ser considerada de cogeração, tendo este um valor mínimo para a eficiência global do sistema que corresponde ao limite superior da linha do gráfico, e um consumo máximo de combustível que corresponde ao rendimento eléctrico equivalente.

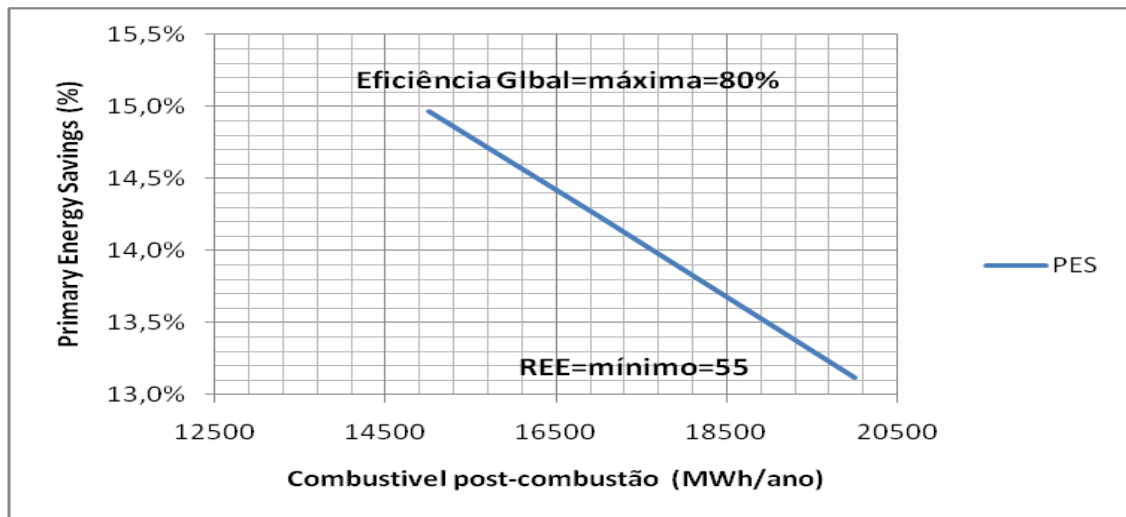


Figura 4.44 - Variação da poupança de energia primária com a variação do combustível post-combustão

Para o consumo de combustível para post-combustão também existe um intervalo em que este pode variar definido mais uma vez pela eficiência total do sistema no limite superior e o limite inferior pelo REE.

4.5 Turbina de Gás em Ciclo Combinado

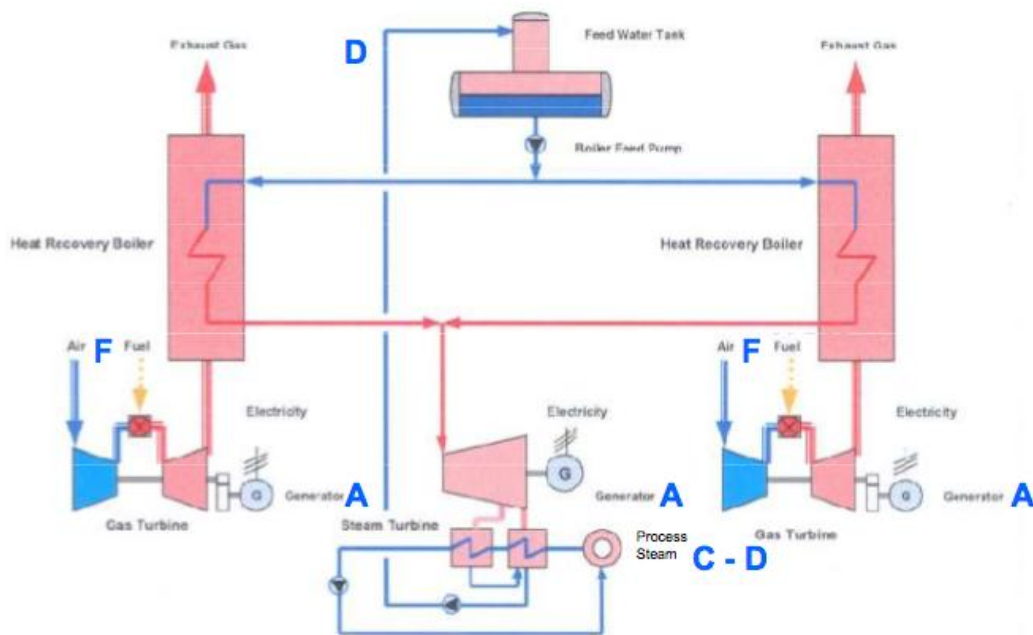


Figura 4.45 - Esquema de uma unidade de cogeração com turbina a gás em ciclo combinado[24]

Cálculo de electricidade de elevada eficiência

A central co-geradora representada na Figura 4.45 contém 3 geradores de electricidade sendo potência total instalada de 25 MW cuja produção anual é de 170000 MWh/ano sendo o seu factor de utilização do conjunto de geradores de 0,78 que se encontra calculado de seguida.

$$25MW \times 8760 \times f.u. = 170000 \text{ MWh/ano}$$

$$f.u. = 0,78$$

Dados da instalação:

- (A) Produção bruta de electricidade: 170000MWh/ano
- (B) Autoconsumo de electricidade: 3000 MWh/ano
- (C) Produção total de vapor: 320000 MWh/ano
- (D) Autoconsumo de vapor: 40000 MWh/ano
- (E) Retorno de condensados: 21000 MWh/ano
- (F) Combustível consumido: 550000 MWh/ano

Rendimento Eléctrico equivalente:

$$REE = \frac{E}{C - \frac{T}{0,9 - 0,2 \times \frac{CR}{C}}} = \frac{170000 - 3000}{550000 - \frac{320000 - 40000}{0,9}} = 63,7\%$$

Para calcular a poupança de energia primária é necessário efectuar as seguintes etapas:

- Etapa 1 - Cálculo da eficiência global
 - Período de 1 ano
 - Determinação da produção energética da instalação para o período de referência
 - Produção total de Electricidade (EChP e E-nãoChP)

$$170000 \text{ MWh/ano}$$
 - Calor útil produzido na instalação para o período de referência, HChP)

$$HChP = \text{Produção Total de Vapor} - \text{Autoconsumo de Vapor}$$

$$= 280000 \text{ MWh/ano}$$

$$HChP = \text{Produção Total de Vapor} - \text{Autoconsumo de Vapor}$$

$$= 280000 \text{ MWh/ano}$$

- Energia Produzida na instalação de cogeração

$$170000 + 280000 = 450000 \text{ MWh/ano}$$

- Energia Consumida

$$550000 \text{ MWh/ano}$$

- Eficiência Global

$$\text{Eficiência Global} = \frac{\text{Energia Produzida}}{\text{Energia Consumida}} = \frac{450000}{550000} = 81,8\%$$

- Etapa 2 – Comparação da eficiência global calculada com os limites definidos da directiva 2004/8/C
 - Verificação do valor mínimo de eficiência global definido no Anexo II da directiva 2004/8/CE

- Tecnologia de cogeração correspondente a alínea b) do anexo I da directiva: Turbina de gás em ciclo combinado com recuperação de calor
 - Eficiência global mínima definida no anexo II da directiva para a tecnologia em causa: 80%
 - Comparação da eficiência global da instalação com o valor do anexo II
 - Eficiência global inferior ao de referencia do anexo II da directiva
 - Conclusão
 - Toda a electricidade é considerada CHP
 - Não é necessário realizar as etapas 3 e 4 para determinar a quantidade de electricidade produzida que é considerada CHP
- Etapa 3 – Determinação do rácio electricidade/calor para os casos em que o rendimento global calculado é inferior aos limites definidos na directiva 2004/8/CE

Esta etapa não se aplica a este caso

- Etapa 4 – Utilização do rácio electricidade/calor implícito na directiva já referida para os casos que não for possível calcular na etapa anterior.

Esta etapa não se aplica a este caso

- Etapa 5 – Cálculo da eficiência e da poupança de energia primária
 - Cálculo da energia de alimentação da produção de ECHP
 - Rendimento eléctrico da instalação

$$CHPE\eta = \frac{170000}{550000} \times 100 = 30,9\%$$
 - Energia de alimentação CHP

$$\frac{ECHP}{CHPE\eta} = \frac{170000}{30,9\%} = 550000 \text{ MWh/ano}$$
 - Cálculo da Eficiência térmica de cogeração
 - Eficiência térmica de cogeração

$$CHPH\eta = \frac{\text{Calor útil}}{\text{Energia de Alimentação CHP}} = \frac{280000}{550000} \times 100 = 50,9\%$$
 - Determinação do valor de referência da eficiência da produção separada de electricidade
 - Características da instalação
 - Ano de construção: 2000
 - Tipo de combustível: Fuelóleo
 - Temperatura média do estado membro: 15°C
 - Tensão no ponto de interligação: 60 kV
 - Fracção consumida no local: 100%
 - Valor de referência base (seleccionada na tabela do anexo I da decisão da comissão de 21 de Dezembro de 2006)
 - 51,4%
 - Factor de correcção de temperatura (anexo III da decisão da comissão de 21 de Dezembro de 2006)
 - 0,0%
 - Factor de correcção relativo às perdas evitadas na rede (anexo IV da decisão da comissão de 21 de Dezembro de 2006)
 - Electricidade exportada:0,965

Electricidade consumida no local:0,945

- Cálculo do valor de referência

$$RefE\eta = (51,4 + 0,0) \times 0,945 = 48,57\%$$

- Valor de referência da eficiência da produção separada de calor (anexo II da decisão da comissão de 21 de Dezembro)

$$RefH\eta = 90\%$$

- Cálculo da poupança de energia primária

- $PES = 1 - \frac{1}{\left(\frac{CHPH\eta}{RefH\eta} + \frac{CHPE\eta}{RefE\eta}\right)} = 16,8\%$

Conclusão

Tal como os outros casos expostos anteriormente esta unidade co-geradora é considerada de elevada eficiência pois passou o patamar de 10% de poupança de energia primária. Também toda a electricidade produzida na unidade é considerada de cogeração já que a eficiência global do sistema passa a eficiência de referência de 80%.

Análise de sensibilidade

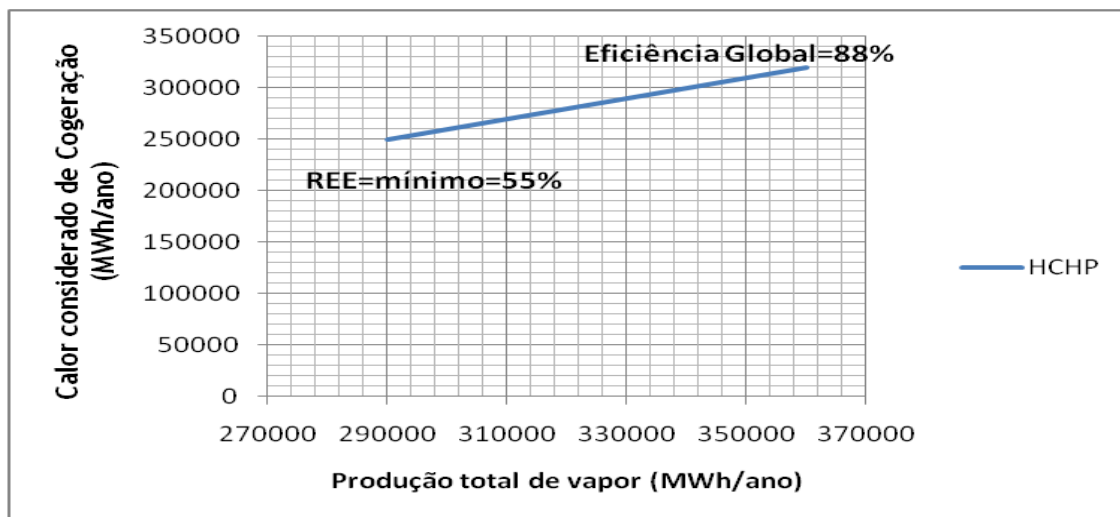


Figura 4.46 - Variação do calor considerado de cogeração com a variação da produção total de vapor

Pelo gráfico representado na figura anterior podemos verificar o intervalo em que a produção total de vapor pode variar. Essa variação está representada pela linha do gráfico tendo como limite inferior o REE de 55% de acordo com o tipo de combustível usado (gás

natural) e o limite superior de 88% pela eficiência típica que este tipo de tecnologia pode atingir.

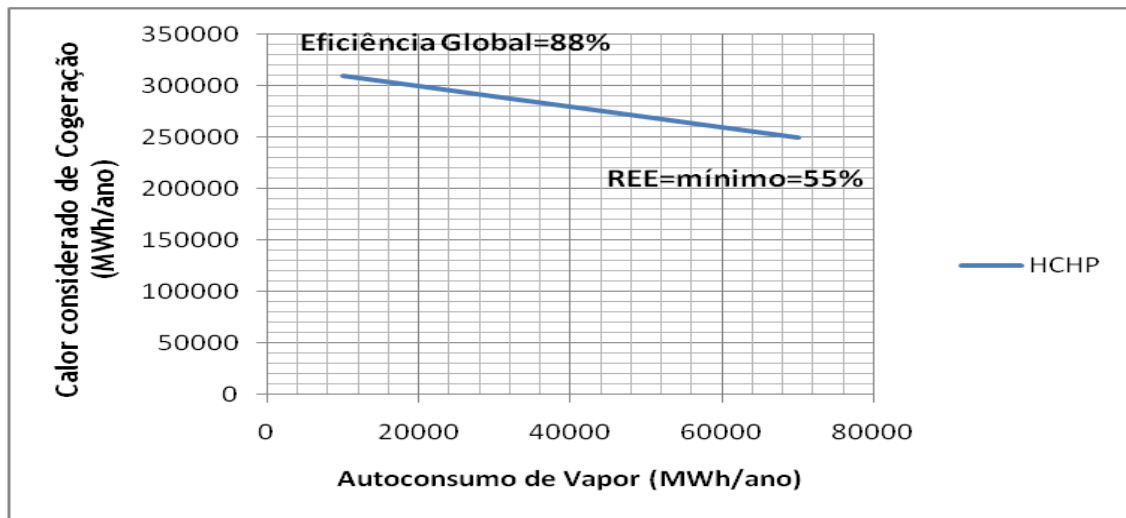


Figura 4.47 - Variação do calor considerado de cogeração com a variação do autoconsumo de vapor da central co-geradora

Mais uma vez a linha do gráfico da Figura 4.47 representa o limite em que este dado da instalação pode variar, que neste caso é o autoconsumo de vapor da própria central. O limite superior está influenciado pela eficiência típica da tecnologia em causa e o limite inferior é influenciado pelo REE.

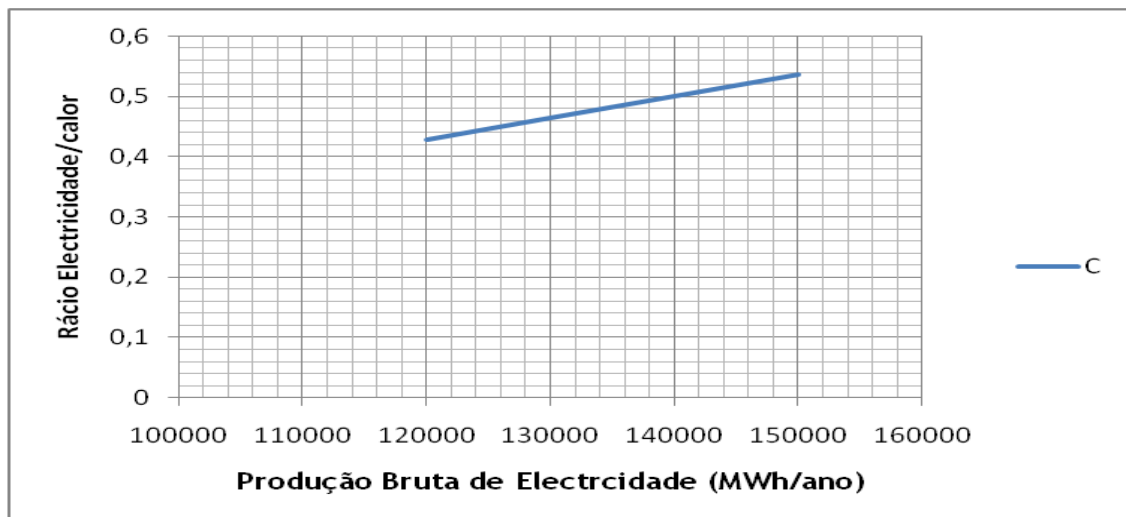


Figura 4.48 - Variação do rácio electricidade/calor com a variação da produção total de electricidade

No gráfico representado na figura anterior pode-se observar que o rácio sobe com o aumento da produção como era de se esperar. No entanto este gráfico não nos dá a informação de qual o limite para esta variação do rácio com a variação da produção de electricidade, isto deve-se a que para um rendimento eléctrico equivalente mínimo de acordo com a legislação portuguesa que é atingido com a produção a 150000MWh/ano, pois para uma produção maior de electricidade a eficiência global deste sistema passa a eficiência

de referência da directiva (80%) o que quer dizer que não se aplica a etapa 3 e 4, daí não ser necessário o C devido a toda a electricidade produzida ser considerada de cogeração de elevada eficiência.

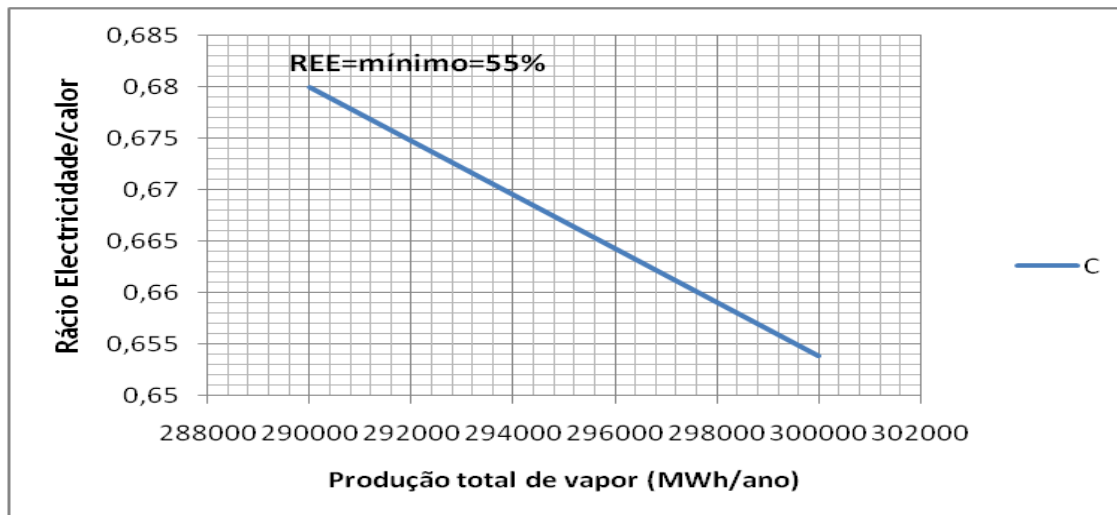


Figura 4.49 - Variação do rácio electricidade/calor com a variação total de vapor

Através do gráfico da figura anterior podemos observar que existe um intervalo para a produção total de vapor, não sendo neste caso os limites representados totalmente pela linha sendo o limite superior o REE mínimo imposto pela legislação, o limite inferior da linha neste caso significa que para uma produção de vapor superior a 300000MWh/ano a eficiência global do sistema passa a eficiência de referência da directiva (80%) o que significa que não é mais necessário o C para o cálculo de electricidade de elevada eficiência. A eficiência típica desta tecnologia é atingida para uma produção de vapor de 350000MWh/ano.

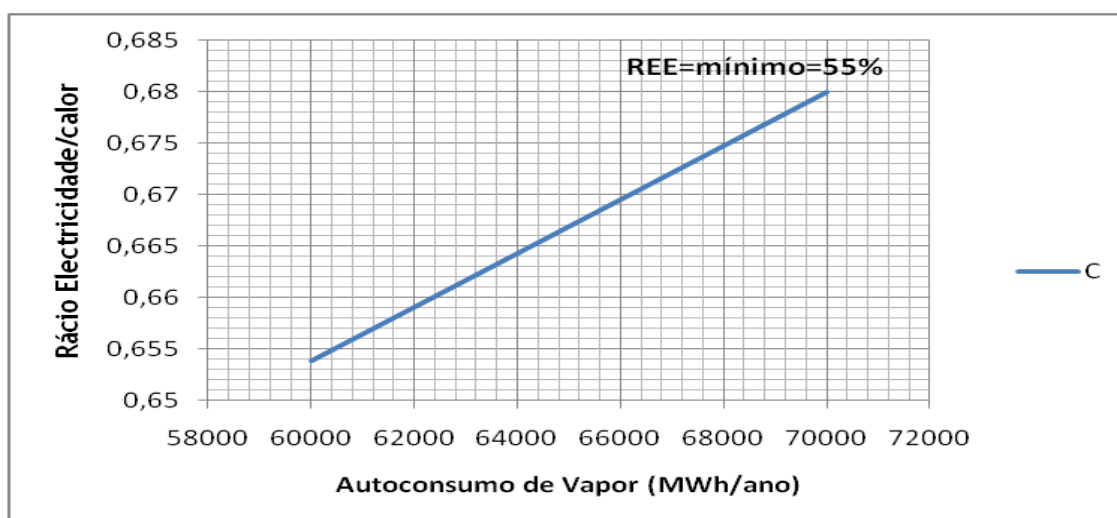


Figura 4.50 - Variação do rácio electricidade/calor com variação do autoconsumo de electricidade da unidade de cogeração

No gráfico da Figura 4.50 pode-se observar através da linha do gráfico que o intervalo do autoconsumo de vapor da central co-geradora que tem influência no C. Sendo que para

uma eficiência típica desta tecnologia o autoconsumo é de 10000MWh/ano. O limite superior da linha do gráfico é influenciado pelo REE de 55%.

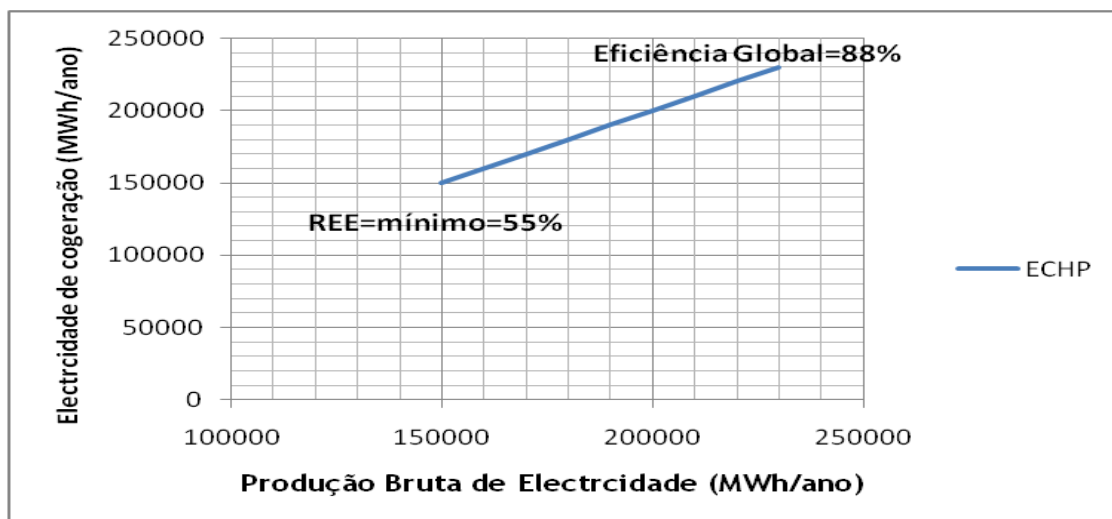


Figura 4.51 - Variação da electricidade considerada de cogeração com a variação da produção total de electricidade

Através do gráfico da Figura 4.51 pode-se retirar o intervalo que a produção total de electricidade pode variar está definido pela recta. O limite inferior da referida recta é influenciado pelo REE e o superior pela eficiência típica (88%). É de referir que para uma produção de 170000MWh/ano de electricidade a central atinge um nível de eficiência acima de 80% (eficiência de referência da directiva) e toda a electricidade produzida é considerada de cogeração. Mesmo para o intervalo de produção de 150000 a 170000MWh/ano a electricidade produzida é considerada de cogeração mas devido a central a funcionar em modo de cogeração integral.

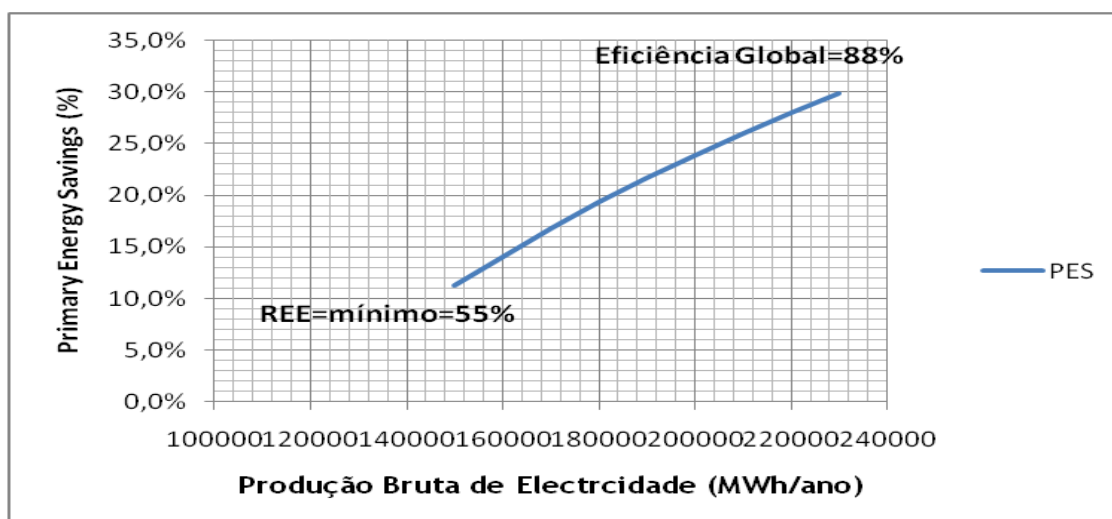


Figura 4.52 - Variação da PES com a variação da produção total de electricidade

Pelo gráfico da figura anterior pode-se observar a variação possível e a sua influência na PES da produção total de electricidade, sendo o limite inferior definido pelo REE (55%) e o

limite superior pela eficiência típica da tecnologia em causa (88%). Sendo que para a variação registada não há influência no mínimo da PES pois não passa o limiar de 10% que está definido na directiva.

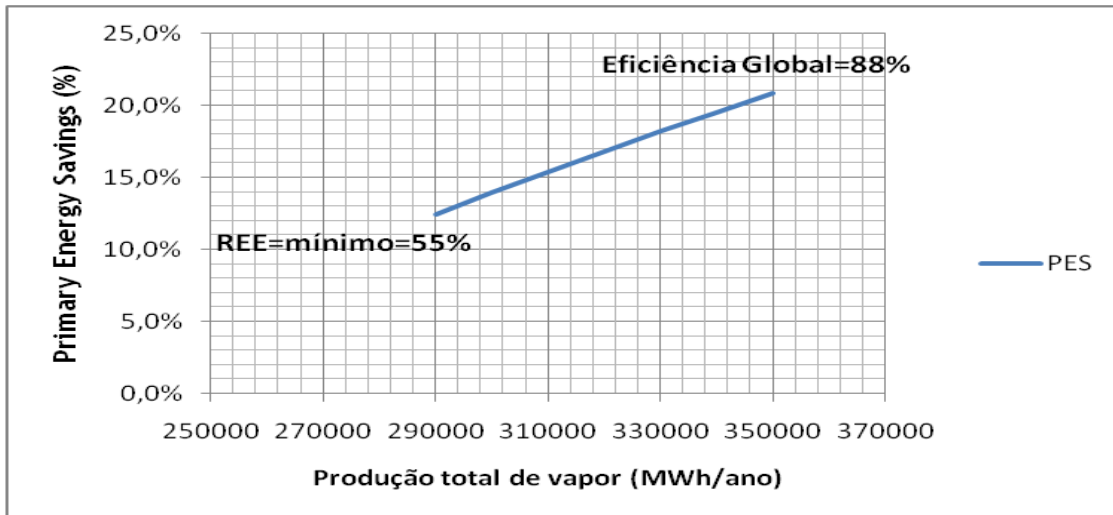


Figura 4.53 - Variação da poupança de energia primária com a variação da produção total de vapor

Tal como no gráfico anterior o gráfico da Figura 4.53 permite retirar um intervalo em que a produção de vapor pode variar sem passar dos limites definidos pelo REE, pela eficiência típica da central co-geradora e o limite imposto pela directiva de 10% da poupança de energia primária.

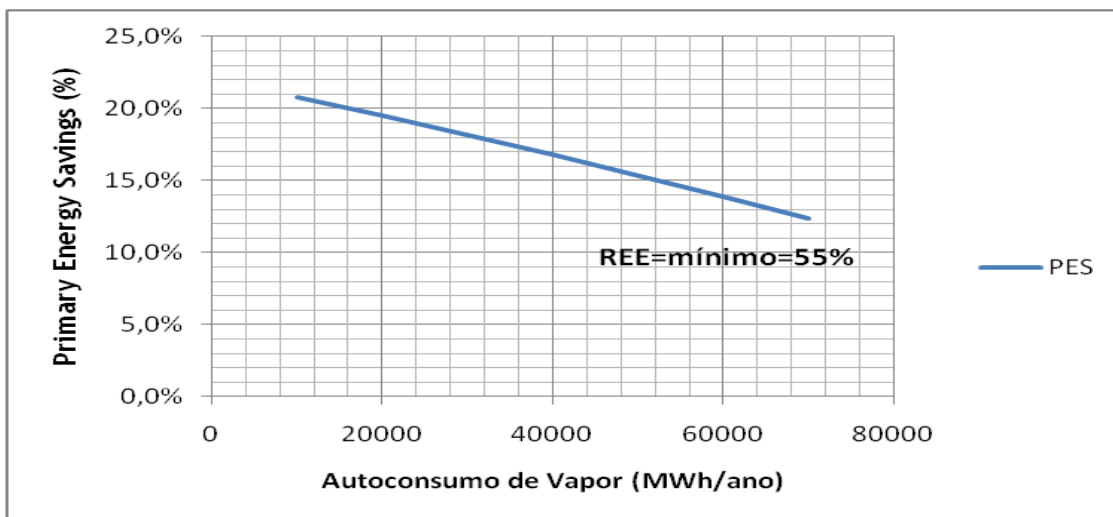


Figura 4.54 - Variação da poupança de energia primária com a variação do autoconsumo de vapor da central co-geradora

Pela figura anterior pode-se retirar o intervalo do autoconsumo de vapor pela linha do gráfico, sendo o limite inferior o REE mínimo imposto pela legislação.

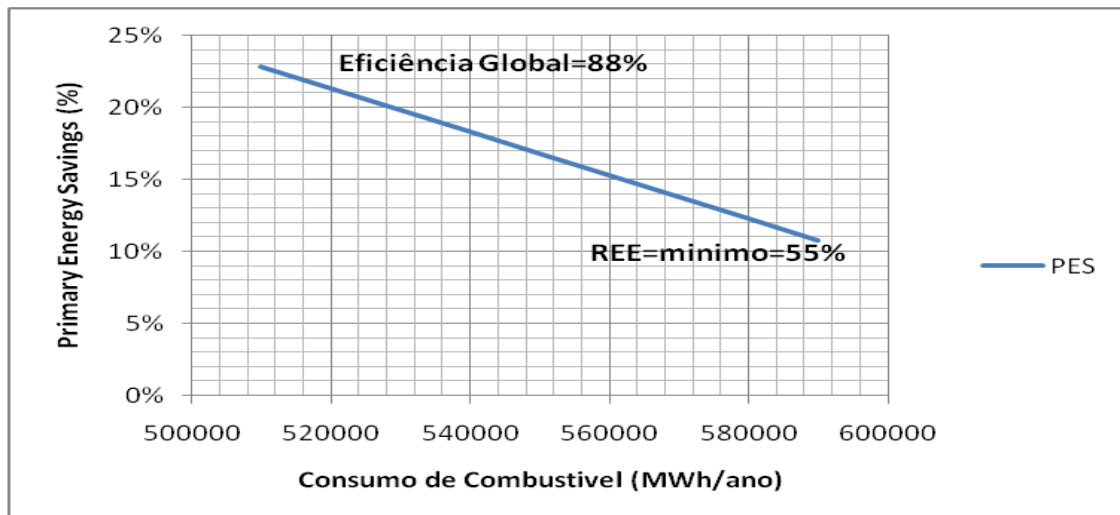


Figura 4.55 - Variação da poupança de energia primária com a variação do consumo de combustível da central co-geradora

Tal como nos gráficos das imagens anteriores o consumo de combustível ontém um intervalo em que pode variar que está representado no gráfico da Figura 4.55. Este intervalo é delimitado pelo REE e pela eficiência global máxima possível para este tipo de tecnologia.

Maximização da PES de acordo com o valor de referência harmonizado para a produção separada de electricidade

Esta análise de sensibilidade para a maximização do PES tendo em conta dos valores de referência harmonizados de eficiência para a produção separada de electricidade que é feita de seguida foi efectuada só para este caso devido ao comportamento nos outros casos ser idêntica. As variáveis que influenciam o valor de referência já referido são a temperatura média do estado membro da Europa onde a unidade de cogeração está instalada, o ano em que a central foi construída, tensão eléctrica do ponto de interligação entre a unidade co-geradora e a rede eléctrica e por fim a quantidade de energia eléctrica que é consumida no local da instalação.

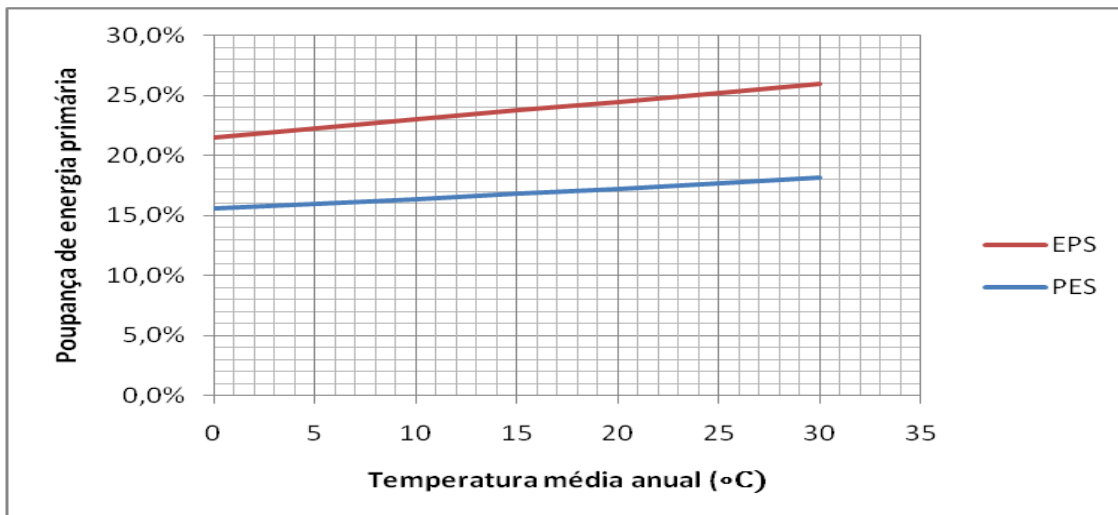


Figura 4.56 - Variação da poupança de energia primária com a variação da temperatura média anual de cada estado membro da União Europeia

O aumento do PES verifica-se com o aumento da temperatura média. A temperatura influencia o PES através do valor de referência que está a negrito na fórmula seguinte. O valor de referência, conforme vem descrito no anexo III da decisão de comissão de 21 de Dezembro de 2006, desce 0,1 pontos percentuais de eficiência por cada grau acima de 15°C e sobe 0,1 pontos percentuais de eficiência por cada grau abaixo de 15°C.

$$PES = 1 - \frac{1}{\left(\frac{CHPH\eta}{RefH\eta} + \frac{CHPE\eta}{\mathbf{RefE\eta}} \right)} \times 100\% \quad (4.1)$$

O que indica o gráfico da Figura 4.56 é que as centrais são mais eficientes em países mais quentes. Quanto à proposta de Portugal e Espanha também é influenciada pela temperatura devido ao valor de referência eléctrica ser o mesmo, no entanto existe uma maior variação com o aumento da temperatura da EPS (linha superior) e atinge valores mais altos.

Como já referido anteriormente outra variável que afecta o valor de referência é o ano de construção da unidade de cogeração.

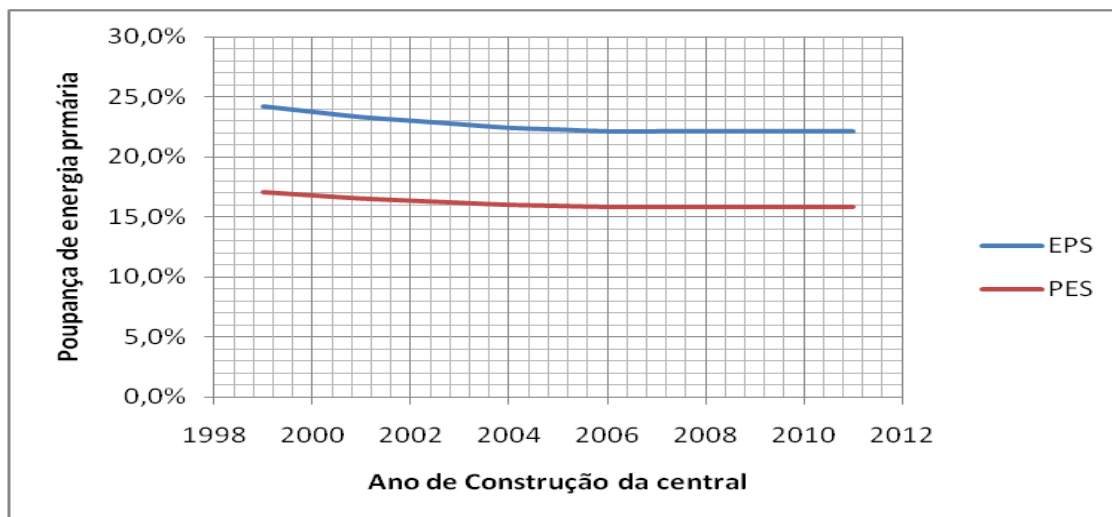


Figura 4.57 - Variação da poupança de energia primária com a variação do ano de construção da central co-geradora

Como se pode observar no gráfico da Figura 4.57 o aumento do ano de construção provoca uma diminuição da poupança de energia primária. Podemos observar também a partir do ano 2006 existe uma estagnação nos valores do PES e EPS, essa estagnação referida deve-se aos valores de eficiência serem constantes a partir do ano 2006 até ao ano de 2011 como podemos observar na tabela seguinte na última coluna. Uma possibilidade de a poupança de energia primária ser maior para anos de construções menores é de proteger as centrais mais antigas, de maneira a que caso a futura renumeração tenha em conta o PES, sejam renumeradas.

Tabela 4.2 - Valores de referência harmonizados em matéria de eficiência para a produção separada de electricidade[6]

	Ano de construção: Tipo de combustível:	1996 e anterio- res	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006- -2011
Sólidos	Carvão de pedra/coque	39,7 %	40,5 %	41,2 %	41,8 %	42,3 %	42,7 %	43,1 %	43,5 %	43,8 %	44,0 %	44,2 %
	Lignite/briquetes de lignite	37,3 %	38,1 %	38,8 %	39,4 %	39,9 %	40,3 %	40,7 %	41,1 %	41,4 %	41,6 %	41,8 %
	Turfa/briquetes de turfa	36,5 %	36,9 %	37,2 %	37,5 %	37,8 %	38,1 %	38,4 %	38,6 %	38,8 %	38,9 %	39,0 %
	Lenha	25,0 %	26,3 %	27,5 %	28,5 %	29,6 %	30,4 %	31,1 %	31,7 %	32,2 %	32,6 %	33,0 %
	Biomassa agrícola	20,0 %	21,0 %	21,6 %	22,1 %	22,6 %	23,1 %	23,5 %	24,0 %	24,4 %	24,7 %	25,0 %
	Resíduos biodegradáveis (municipais)	20,0 %	21,0 %	21,6 %	22,1 %	22,6 %	23,1 %	23,5 %	24,0 %	24,4 %	24,7 %	25,0 %
	Resíduos não renováveis (municipais e industriais)	20,0 %	21,0 %	21,6 %	22,1 %	22,6 %	23,1 %	23,5 %	24,0 %	24,4 %	24,7 %	25,0 %
	Xisto betuminoso	38,9 %	38,9 %	38,9 %	38,9 %	38,9 %	38,9 %	38,9 %	38,9 %	38,9 %	38,9 %	38,9 %
Líquidos	Petróleo (gasóleo + fuelóleo residual), GPL	39,7 %	40,5 %	41,2 %	41,8 %	42,3 %	42,7 %	43,1 %	43,5 %	43,8 %	44,0 %	44,2 %
	Biocombustíveis	39,7 %	40,5 %	41,2 %	41,8 %	42,3 %	42,7 %	43,1 %	43,5 %	43,8 %	44,0 %	44,2 %
	Resíduos biodegradáveis	20,0 %	21,0 %	21,6 %	22,1 %	22,6 %	23,1 %	23,5 %	24,0 %	24,4 %	24,7 %	25,0 %
	Resíduos não renováveis	20,0 %	21,0 %	21,6 %	22,1 %	22,6 %	23,1 %	23,5 %	24,0 %	24,4 %	24,7 %	25,0 %
Gases	Gás natural	50,0 %	50,4 %	50,8 %	51,1 %	51,4 %	51,7 %	51,9 %	52,1 %	52,3 %	52,4 %	52,5 %
	Gás de refinaria/hidrogénio	39,7 %	40,5 %	41,2 %	41,8 %	42,3 %	42,7 %	43,1 %	43,5 %	43,8 %	44,0 %	44,2 %
	Biogás	36,7 %	37,5 %	38,3 %	39,0 %	39,6 %	40,1 %	40,6 %	41,0 %	41,4 %	41,7 %	42,0 %
	Gases de fornos de coque, gases de altos fornos, outros gases residuais, calor residual recuperado	35 %	35 %	35 %	35 %	35 %	35 %	35 %	35 %	35 %	35 %	35 %

Pode-se observar no gráfico seguinte que a poupança de energia primária decresce com o aumento da tensão de ligação.

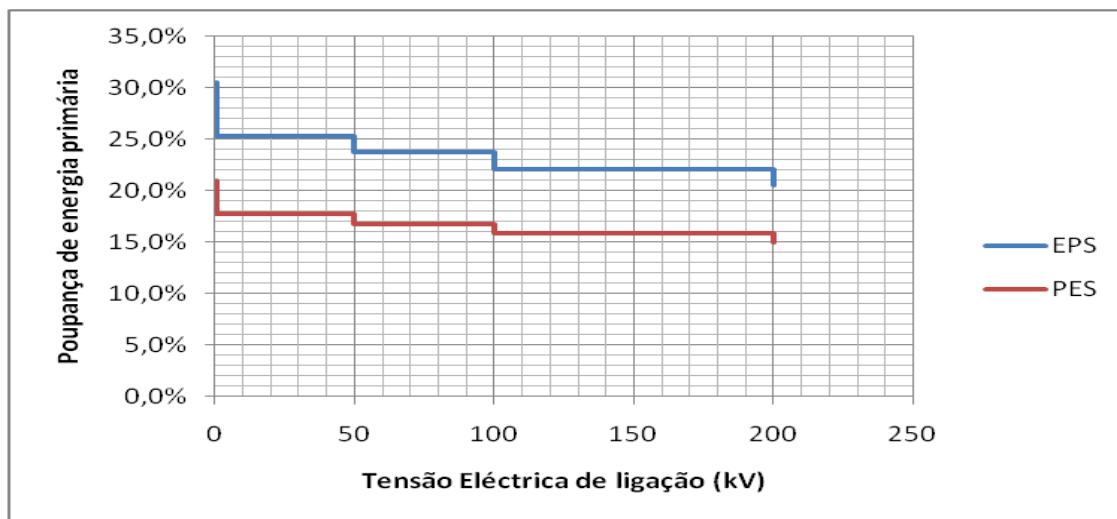


Figura 4.58 - Variação da poupança de energia primária com a variação da tensão eléctrica de ligação

O gráfico encontra-se em degraus devido aos vários níveis de tensão eléctrica que estão expostos na decisão da comissão de 21 de Dezembro de 2006. Existe uma maior

variação da proposta conjunta de alguns países para o cálculo da poupança de energia primária (linha superior)

Por fim outra variável que influencia a PES é a parte de energia que é consumida no local. Com o aumento da parte de energia que é consumida no local o valor a poupança de energia primária aumenta linearmente como podemos observar no gráfico seguinte. Os valores obtidos para a EPS são maiores que a PES, sendo também a variação maior com o aumento da fracção de energia primária.

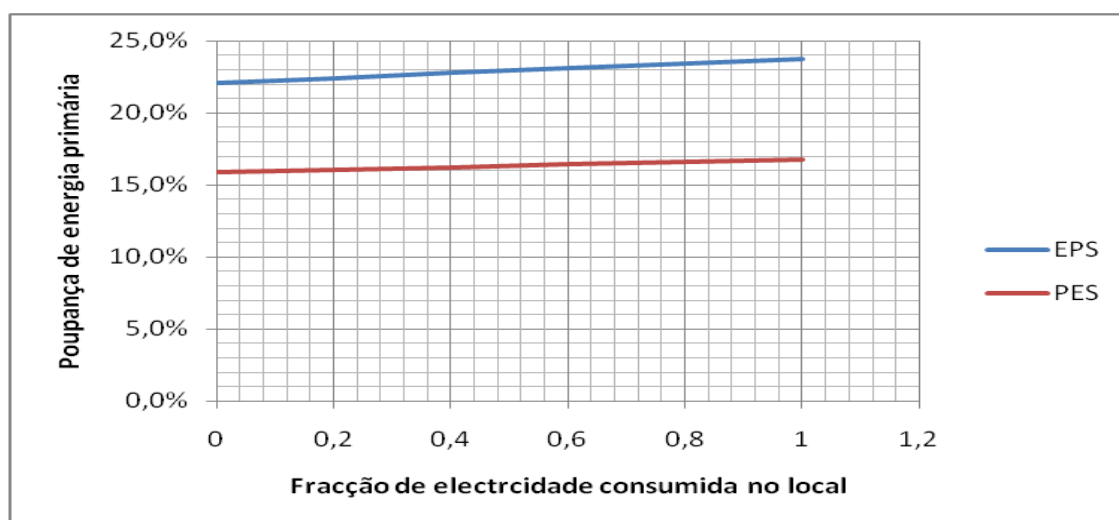


Figura 4.59 - Variação da poupança de energia primária com a variação da fracção de electricidade consumida no local

Este aumento deve-se à diminuição de perdas evitadas nas linhas de distribuição ou de transporte, mas no entanto a renumeração é menor.

Capítulo 5

Conclusões

5.1 Conclusão de casos de estudo

Verificou-se ao longo do processo de cálculo de electricidade de cogeração de elevada eficiência que para diferentes tecnologias, adoptam-se diferentes valores de eficiência global de referência de forma a poder comparar a eficiência da central dentro da sua classe de tecnologia. Para melhorar mais o processo de cálculo de cogeração de elevada eficiência deve-se adoptar um processo de cálculo de acordo com o artigo 12 da directiva 2004/8/CE que englobe mais parâmetros (maior importância à necessidade de calor e electricidade) e que seja mais específico para a tecnologia em causa.

Pode-se concluir que caso a unidade de cogeração estiver a operar durante todo o período de referência em modo de cogeração integral toda a electricidade é considerada de cogeração mesmo que a eficiência global do sistema seja inferior ao valor de referência do anexo II da directiva 2004/8/CE.

Através da análise realizada para o caso da turbina a gás em ciclo combinado variando a temperatura média anual, o ano de construção da unidade co-geradora, tensão eléctrica de ligação e por fim a fracção de electricidade consumida no local conclui-se que a poupança de energia primária será maior quanto mais cedo se construiu a unidade até ao ano de 2006, pois para anos posteriores a este não têm influência, quanto maior a temperatura média anual do estado membro, menor a tensão de ligação à rede eléctrica e por fim quanto maior a quantidade de electricidade consumida no local.

A maior variação da poupança de energia primária com a variação dos dados da instalação é maior para o caso da secção 4.2 devido aos limites serem mais restritos pois o REE mínimo necessário de 50% e a eficiência global de cerca de 80% para este tipo de tecnologia. O caso de estudo em que a variação da poupança de energia primária é menor é o

caso da secção 4.4 e deve-se ao às variáveis que limitam essa variação, que são o REE e a eficiência global, de 55% e 80% respectivamente.

Conclui-se também que o cálculo de electricidade de cogeração de elevada eficiência segundo a directiva 2004/8/CE dá uma maior importância à produção de electricidade. Caso num futuro seja implementado uma nova renumeração tendo em conta a PES do cálculo de electricidade de elevada eficiência, uma melhor escolha para uma central de cogeração é uma tecnologia que tenha rácio electricidade/calor o maior possível já que o processo de cálculo de electricidade de elevada eficiência dá uma importância maior à produção de electricidade (como foi visto na secção 4.2), não excluindo as necessidades de calor já que à produção de electricidade de cogeração tem que estar associado calor útil. Uma outra possibilidade, mas mais remota para o regime de renumeração é para centrais que não atinjam o patamar de 10% de PES ou um PES superior a 0% para centrais de micro-cogeração não sejam renumeradas.

Uma das soluções caso a unidade de cogeração esteja no limite de não ser considerada uma central de cogeração de elevada eficiência, esta pode diminuir o consumo de parte da electricidade produzida em vez de a vender à rede.

5.2 Descrição de como foram atingidos os objectivos

O objectivo da criação da ferramenta de cálculo foi atingido no capítulo 4 para vários casos de estudo através das cinco etapas descritas na secção 3.2.

A análise de sensibilidade efectuada para o processo de cálculo englobando diferentes tecnologias que estão descritas nas diferentes secções do capítulo 4 da presente dissertação. Para diferentes padrões de produção de cogeração foi simulada em cada caso da secção 4 a variação da produção de cogeração e ver a influência na PES. A variação dos dados da instalação dá para determinar o método de como maximizar a PES, secção 4.5, e como se comportam as variáveis da directiva 2004/8/CE.

A variação dos dados da instalação permite também cumprir o objectivo de ver a influência da eficiência, pois ao alterar cada dado da instalação permite realizar o cálculo para diferentes eficiências.

Para observar a influência do modo de cogeração integral no cálculo de electricidade de elevada eficiência realizou-se uma análise na secção 4.2.

Quanto ao período de referência não se alterou ao longo do trabalho, pois para o cálculo do REE tem que ser calculado anualmente. No entanto para um período de referência de 1 ano pode-se jogar na produção de cogeração, ou seja, produzir só electricidade não aproveitando o calor, sendo só parte dessa electricidade produzida, sem o aproveitamento do calor, não ser considerada de cogeração.

5.3 Trabalhos futuros

Um trabalho futuro a realizar dentro do tema da presente dissertação é tentar realizar um método de cálculo de electricidade de elevada eficiência mais específico, à tecnologia usada no sistema de cogeração, tendo em conta a sua gama de potência instalada.

Outros trabalhos futuros podem ser a realização de documentos que estão em falta, e que foram requisitados pela directiva a Portugal e que estão indicados na Tabela 3.2.

Referências

- [1] Portaria n.º 57/2002. D.R. n.º 12, Série I-B de 2002-01-15. 2002.
- [2] Portaria n.º 58/2002. D.R. n.º 12, Série I-B de 2002-01-15. 2002.
- [3] Portaria n.º 59/2002. D.R. n.º 12, Série I-B de 2002-01-15. 2002.
- [4] Portaria n.º 60/2002. D.R. n.º 12, Série I-B de 2002-01-15. 2002.
- [5] Directiva 2004/8/CE do Parlamento Europeu e do Conselho. 2004.
- [6] Decisão da Comissão, de 21 de Dezembro de 2006 , que estabelece valores de referência harmonizados em matéria de eficiência para a produção separada de electricidade e de calor em conformidade com a Directiva 2004/8/CE do Parlamento Europeu e do Conselho [notificada com o número C(2006) 6817] (Texto relevante para efeitos do EEE). 2006.
- [7] 2008/952/CE: Decisão da Comissão, de 19 de Novembro de 2008 , que estabelece orientações circunstanciadas para a implementação e aplicação do anexo II da Directiva 2004/8/CE do Parlamento Europeu e do Conselho [notificada com o número C(2008) 7294] (Texto relevante para efeitos do EEE). 2008.
- [8] Cogeração é uma medida de eficiência energética. Available from: http://www.revistaperspectiva.info/index.php?option=com_content&task=view&id=477&Itemid=69 Acedido em Maio e Junho
- [9] Clementino, L.D., *A Conservação de Energia por meio da Co-Geração de Energia Elétrica*. 9 ed. 2004: Érica Editora.
- [10] Barja, G.d.J.A., *A cogeração e sua inserção ao sistema elétrico*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2006, Universidade de Brasília: Brasília.
- [11] Brandão, S.d.S., *Cogeração*. 2004, Universidade de Coimbra: Coimbra.
- [12] França, A.F.R.T. and L.P.V.d.C. Caseiro, *Cogeração e Trigerção*. 2008.
- [13] Smit, R., *Distribution Generation and Renewables - Cogeneration*. 2006.
- [14] *Ciclo Otto*. Available from: http://pt.wikipedia.org/wiki/Ciclo_otto. Acedido em Maio e Junho
- [15] *Ciclo do motor a diesel*. Available from: http://blogdoprofessorcarlao.blogspot.com/2008_11_01_archive.html.
- [16] *Stirling Motor*. Available from: <http://www.turbosquid.com/FullPreview/Index.cfm/ID/331851>. Acedido em Maio e Junho
- [17] (CEEETA), C.d.E.e.E.d.E.d.T.e.d.A., *Estudo do Mercado Potencial para Aplicação das Tecnologias de Micro-Cogeração em Portugal*. 2001.
- [18] Loncar, D., N. Duic, and Z. Bogdan, *An analysis of the legal and market framework for the cogeneration sector in Croatia*. *Energy*, 2009. **34**(2): p. 134-143.
- [19] Moreira, N.A., E. Monteiro, and S. Ferreira, *Transposition of the EU cogeneration directive: A vision for Portugal*. *Energy Policy*, 2007. **35**(11): p. 5747-5753.

- [20] *Directiva 2004/8/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 11 de Fevereiro de 2004, relativa à promoção da cogeração com base na procura de calor útil no mercado interno da energia e que altera a Directiva 92/42/CEE.* 2004.
- [21] Abu-Ebid, M., *CHP Directive Guidelines Background and Implementation.* 2009.
- [22] Pinto, Á.B., *O Futuro da Cogeração.* 2004: Porto.
- [23] *The CHPQA Standard,* Defra, Editor. 2007.
- [24] Pinto, Á.B., *Linhas de orientação para o cálculo de electricidade de cogeração de elevada eficiência.* 2009.
- [25] Protermo, *Manual for Calculating CHP Electricity and Heat.* 2000.
- [26] Pinto, Á.B. *Défice na rede eléctrica limita Cogeração em Portugal.* 2009; Available from: <http://www.construir.pt/2009/04/24/dfice-na-rede-elctrica-limita-cogerao-em-portugal/>. Acedido em Maio e Junho