

Avaliação Energética de uma Unidade de Cogeração

Mestrado em Energias Sustentáveis

Paulo Jorge Lopes Amado

Dissertação submetida para a obtenção do grau de
Mestre em Energias Sustentáveis

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica

novembro de 2016

Relatório da Unidade Curricular de Dissertação do 2º ano do
Mestrado em Energias Sustentáveis

Candidato: Paulo Jorge Lopes Amado, Nº 1130002, 1130002@isep.ipp.pt

Empresa: Unidade Cogeração de uma Unidade Hospitalar

Orientação Científica: Rosa Pilão, rmp@isep.ipp.pt

Mestrado em Energias Sustentáveis
Departamento de Engenharia Mecânica



novembro de 2016

Só sonha aquele que tem a expectativa de concretizar algo no futuro – Julien Campodonico

Agradecimentos

À Professora, Doutora Nídia Caetano, Diretora do Curso de Energias Sustentáveis, pelo acolhimento, disponibilidade, dedicação e profissionalismo, que demonstrou desde o primeiro dia que iniciei o presente mestrado.

À Professora, Doutora Rosa Pilão, pela capacidade demonstrada na orientação do trabalho, pelo acolhimento e disponibilidade sempre verificada. Pela atenção, apoio e orientações prestadas, que representaram um suporte grandioso para a execução do trabalho.

Resumo

O presente trabalho, tem por finalidade efetuar a avaliação energética de uma unidade de cogeração, que tem como propósito a produção combinada de energia elétrica e térmica. A energia elétrica é exportada para a Rede Elétrica de Serviço Público, sendo a energia térmica fornecida na forma de água quente, água fria e vapor a uma unidade hospitalar do grande Porto. A análise à unidade de cogeração, implica o seu estudo e compreensão, o entendimento da composição e modo de interligação dos equipamentos. Para avaliar a unidade de cogeração, foi necessário proceder à recolha de informação, obtendo valores da produção elétrica, da produção de energia térmica útil e do consumo de energia primária, associada ao combustível gás natural. O estudo concentrou a sua avaliação em dois períodos do ano de 2016, estação de aquecimento e estação de arrefecimento, tendo sido avaliado o comportamento da unidade de cogeração, nos meses de janeiro e julho, respetivamente. O objetivo principal foi validar as exigências legais, permitindo operar a unidade de cogeração como instalação de cogeração de elevada eficiência. Esta validação requer que seja calculado o valor da eficiência térmica e elétrica da instalação, bem como a eficiência total e obtido o valor da Poupança de Energia Primária (PEP), obter um resultado superior a dez por cento e em função da potência instalada, seja efetuada a sua classificação. É igualmente exigido, o cumprimento legal da determinação do Rendimento Elétrico Equivalente (REE) da instalação.

Para o mês de janeiro, foi obtido para o rendimento térmico o valor de 32,4%, para o rendimento elétrico o valor de 41,1% e para o rendimento global o valor de 73,4%. Os resultados obtidos para o mês de julho, foram de 33,3%, 40,9% e 74,2%, respetivamente. Face à constatação de que o rendimento global é inferior ao valor de eficiência global mínimo exigido, 75%, e de acordo com metodologia definida pela Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG), foi recalculada a eficiência térmica, mantendo o valor da eficiência global mínimo e o valor da eficiência elétrica. O desenvolvimento das operações associadas à metodologia definida pela DGEG, permitiu obter resultados de produção energia elétrica da cogeração inferiores aos verificados através da contagem dos contadores. Os valores obtidos, pela aplicação do

método, referente à energia elétrica produzida pela cogeração foi de 2.521.194 kWh e de 3.341.389 kWh, respectivamente para janeiro e julho. Os valores verificados para validar a eficiência mínima de 75%, referente à produção de energia térmica útil, são de 2.170.913 kWh e de 2.852.056 kWh, respectivamente para janeiro e julho. O consumo de energia primária, associada ao gás natural, foi considerado com o mesmo valor, de 6.403.876 kWh para janeiro e de 8.363.802 kWh para julho.

O valor contabilizado para o cálculo da Poupança de Energia Primária foi de 15,98% para o mês de janeiro e de 16,40% para o mês de julho. Para ambos os meses, a instalação foi classificada como Cogeração de Elevada Eficiência.

Foram determinadas as emissões estimadas de CO₂ associada à produção exclusiva de energia elétrica, com o valor de 306,47 g CO₂ /kWh e de 307,04 g CO₂ /kWh, respectivamente para janeiro e julho.

As emissões de CO₂ evitadas por kWh Produzido de Energia Elétrica no processo de cogeração, quando comparadas com produção separada de calor e eletricidade, foram de 97,56 g CO₂ /kWh e 99,42 g CO₂ /kWh, respectivamente para janeiro e julho.

Por fim, foi calculado o Rendimento Elétrico Equivalente, tendo sido obtido um valor de 0,61 para janeiro e 0,63 para julho, superior ao mínimo exigido de 0,55.

Pelos resultados obtidos, verifica-se que é vantajoso para a unidade hospitalar a existência da instalação de cogeração, que cumpre as exigências legais, com valores de REE acima do mínimo exigido e com classificação de Cogeração de Elevada Eficiência.

Palavras-Chave

Cogeração, Eficiência, Emissões evitadas de CO₂, Rendimento Elétrico Equivalente.

Abstract

This work aims to make the energy assessment of a cogeneration unit, which has as its purpose the combined production of electrical and thermal energy. The electricity is exported to the Grid Public Service, and the thermal energy supplied in the form of hot water, cold water and steam at a hospital of Oporto.

The analysis of the cogeneration unit, implies the study and understanding of the composition and equipment interconnection mode.

To evaluate the cogeneration unit, it is necessary to collect information, obtaining values of electricity production, the useful thermal energy production and primary energy consumption associated with fuel natural gas. The study focuses its assessment on two periods of the 2016 heating and cooling seasons, by evaluating the behavior of the cogeneration unit, in January and July, respectively.

The main objective is to validate the legal requirements, allowing to operate the cogeneration unit as installation of high-efficiency cogeneration. This validation requires that the calculated thermal efficiency, the electrical efficiency, the global efficiency and the Primary Energy Saving (PEP), get a result greater than 10% and depending on the installed, the classification is made.

It is also required, the legal compliance of determining Electrical Performance Equivalent (EER) of the installation.

For the month of January, it was obtained for the thermal efficiency a value of 32.4% for the electrical efficiency a value of 41.1% and the overall yield value of 73.4%. The results for the month of July were 33.3%, 40.9% and 74.2%, respectively. Given the fact that the total income is below the minimum overall efficiency value required, 75%, and according to the methodology defined by the Portuguese Directorate General for Energy and Geology (DGEG), the thermal efficiency, keeping the value of the overall efficiency minimum and the value of electrical efficiency. The development of activities associated with the methodology defined by DGEG, yielded results of electricity

production from cogeneration lower than verified by the real count. The values obtained by applying the method relating to electricity produced by cogeneration were 2,521,194 kWh and 3,341,389 kWh, respectively in January and July. The values recorded to validate the minimum efficiency of 75%, related to the useful thermal energy production, are 2,170,913 kWh and 2,852,056 kWh, respectively in January and July. The primary energy consumption associated with the natural gas, was considered with the same value, previously used for each month.

The amount recorded for the calculation of primary energy savings was 15.98% for the month of January and 16.40% for the month of July. For both months, the facility was classified as high-efficiency cogeneration.

They determined the estimated emissions of CO₂ associated with the exclusive production of electricity, with the value of 306.47 g CO₂ /kWh and 307.04 g CO₂ /kWh, respectively in January and July.

The avoided CO₂ emissions avoided per kWh Produced Electricity in the cogeneration process, as compared with separate production of heat and electricity, were 97.56 CO₂ /kWh and 99.42 CO₂ /kWh, respectively in January and July.

Finally, the calculated equivalent electrical efficiency was war of 0.61 in January and 0.63 in July, both values higher than the required minimum of 0.55.

From the results, it appears that it is advantageous to the hospital the existence of cogeneration installation, which complies with legal requirements, with REE values above the required minimum and High Efficiency Cogeneration rating.

Keywords

Cogeneration, efficiency, emissions avoided CO₂ equivalent electrical yield.

Declaração

Paulo Jorge Lopes Amado, declara, sob compromisso de honra, que este trabalho é original e que todas as contribuições não originais foram devidamente referenciadas, com identificação da fonte.

4 de novembro de 2016

Assinatura

Índice

AGRADECIMENTOS	V
RESUMO.....	VI
ABSTRACT.....	VIII
DECLARAÇÃO.....	X
ÍNDICE.....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
ÍNDICE DE TABELAS.....	XIV
NOMENCLATURA	XV
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVO.....	3
1.2. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	4
2. ENQUADRAMENTO REGULAMENTAR.....	6
3. DESCRIÇÃO DAS INSTALAÇÃO.....	12
3.1. DESCRIÇÃO DE EQUIPAMENTOS	13
3.1.1. MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA.....	14
3.1.2. ALTERNADOR.....	16
3.1.3. TRANSFORMADOR SECO.....	17
3.1.4. CALDEIRA DE RECUPERAÇÃO VAPOR	18
3.1.5. ECONOMIZADOR.....	19
3.1.6. DESGASEIFICADOR	20
3.1.7. DEPÓSITO DE CONDENSADOS	21
3.1.8. UNIDADE DE PRODUÇÃO DE ÁGUA REFRIGERADA	21
3.1.9. TORRE DE ARREFECIMENTO EM CIRCUITO ABERTO	25
3.1.10. AEROARREFECEDOR	26
3.1.11. TORRE DE ARREFECIMENTO EM CIRCUITO FECHADO.....	27
3.2. DESCRIÇÃO DOS CIRCUITOS	28
3.2.1. CIRCUITO DE ALTA TEMPERATURA.....	29
3.2.2. CIRCUITO DE BAIXA TEMPERATURA	30
3.2.3. CIRCUITO DE GASES DE ESCAPE.....	31
3.2.4. CIRCUITO DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA -ÁGUA QUENTE- PRODUÇÃO	32
3.2.5. CIRCUITO DE PRODUÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA - ÁGUA FRIA.....	33

3.2.6.	CIRCUITO DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA - CONSUMO	34
3.2.7.	CIRCUITO DE ENERGIA ELÉTRICA	34
3.2.8.	CIRCUITO DE ENERGIA PRIMÁRIA - GÁS NATURAL.....	35
4.	RECOLHA DA INFORMAÇÃO.....	36
4.1.	REGISTO DO CONSUMO DE GÁS NATURAL	37
4.2.	REGISTO DOS VALORES DE ENERGIA TÉRMICA - ÁGUA QUENTE E VAPOR.....	37
4.1.	REGISTO DOS VALORES DE ENERGIA TÉRMICA - ÁGUA FRIA	38
4.1.	REGISTO DOS VALORES DE ENERGIA ELÉTRICA.....	39
5.	TRATAMENTO DE INFORMAÇÃO	40
5.1.	COMBUSTÍVEL CONSUMIDO	40
5.2.	EFICIÊNCIA TÉRMICA	41
5.3.	EFICIÊNCIA ELÉTRICA	42
5.4.	EFICIÊNCIA GLOBAL DA INSTALAÇÃO.....	42
5.5.	CALCULO DE ENERGIA ELÉTRICA PRODUZIDA ATRAVÉS DO PROCESSO DE COGERAÇÃO	43
5.6.	POUPANÇA DE ENERGIA PRIMÁRIA E CLASSIFICAÇÃO DA COGERAÇÃO.....	47
5.7.	EMISSÕES DE CO ₂	54
5.7.1.	CALCULO DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL ASSOCIADO À PRODUÇÃO ÚTIL E DE ELETRICIDADE EM COGERAÇÃO	54
5.7.2.	EMISSÕES DE CO ₂ ASSOCIADO À PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	55
5.7.3.	EMISSÕES DE CO ₂ EVITADAS POR ENERGIA ELÉTRICA PRODUZIDA KWH.....	56
5.8.	CALCULO DO RENDIMENTO ELÉTRICO EQUIVALENTE	57
6.	CONCLUSÃO.....	58
	BIBLIOGRAFIA	60
	REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS	61

Índice de Figuras

Figura 1	Esquema simplificado da Unidade de Cogeração	13
Figura 2	Motor de cogeração, vista lateral e frontal[8]	15
Figura 3	Alternador trifásico	16
Figura 4	Transformador seco.....	17
Figura 5	Caldeira de recuperação de vapor	18
Figura 6	Imagem de um desgaseificador com acessórios	20
Figura 7	Chiller de Absorção de Simple Efeito[10].....	22
Figura 8	Ciclo de Absorção simplificado[10].....	23
Figura 9	Chiller de Absorção de Duplo Efeito[10]	24
Figura 10	Circuitos Principais da Cogeração	28
Figura 11	Circuito de Alta Temperatura.....	29
Figura 12	Circuito de Baixa Temperatura	30
Figura 13	Circuito de Gases de Escape	31
Figura 14	Circuitos de Distribuição de Energia Térmica Calorífica - Produção.....	32
Figura 15	Circuitos de Distribuição de Energia Térmica Frigorífica - Produção.....	33

Índice de Tabelas

Tabela 1	Valor de referência harmonizada em matéria de eficiência para produção separada de calor em conformidade com a diretiva 200/8/CE do Parlamento Europeu e do Conselho [5]	7
Tabela 2	Características técnicas do motor de cogeração [8]	15
Tabela 3	Características técnicas do alternador [8].....	16
Tabela 4	Características técnicas do transformador	17
Tabela 5	Características técnicas da caldeira de recuperação de vapor [9].....	19
Tabela 6	Características técnicas do economizador [9]	19
Tabela 7	Características técnicas do desgaseificador.....	21
Tabela 8	Características técnicas do CHAS[10]	24
Tabela 9	Características técnicas do CHAD [10].....	25
Tabela 10	Características técnicas da Torre de Arrefecimento em circuito aberto	26
Tabela 11	Características técnicas do aeroarrefecedor	26
Tabela 12	Características técnicas do Torre de Arrefecimento em circuito fechado	27
Tabela 13	Consumo de Gás Natural da Unidade de Cogeração.....	37
Tabela 14	Registo da energia fornecida, referente à vertente vapor e água quente utilizada pelo cliente, Indicação do número de horas de funcionamento dos motores da cogeração	38
Tabela 15	Valores de Energia Térmica – Água fria- Entregue	38
Tabela 16	Produção Elétrica	39
Tabela 17	Análise conjunta do Anexo I e II do Decreto-Lei n.º 23/2010[3]	44
Tabela 18	Valor de referência harmonizada em matéria de eficiência para produção separada de eletricidade em conformidade com a diretiva 2004/8/CE do Parlamento Europeu e do Conselho [5]	49
Tabela 19	Fatores de correção relativo às perdas da rede evitadas para aplicação de valores de referência harmonizados em matéria de eficiência para a produção separada de eletricidade [5].....	49
Tabela 20	Valores utilizado para cálculo do indicador PEP - Janeiro	50
Tabela 21	Valores utilizado para cálculo do indicador PEP - Julho	51
Tabela 22	Classificação da Produção de Cogeração [3]	53

Nomenclatura

Caracteres Romanos

AT	– Alta temperatura	(°C)
BT	– Baixa Temperatura	(°C)
C	– Rácio eletricidade/calor	
$E\eta$	– Eficiência elétrica do processo de cogeração	(%)
E_{CHP}	– Energia elétrica de cogeração	(kWh)
E_{CHPi}	– Energia elétrica de cogeração produzida pelo combustível i	(kWh)
$E_{cons.no\ local}$	– Energia elétrica utilizada para satisfação de auto-consumos ou de consumidores que estejam ligados à instalação de cogeração	(kWh)
$(E_{CO_2})_i$	– Emissão de CO ₂ para o combustível i	(gCO ₂ /kWh)
$(E_{CO_2})_{CHPi}$	– Emissões de CO ₂ por kWh produzido de energia elétrica no processo de cogeração pelo combustível i	(gCO ₂ /kWh)
E_{Elec}	– Energia elétrica produzida pela instalação de cogeração, no período de referência	(kWh)
E_{eca}	– Energia Elétrica Consumida pelos Auxiliares	(kWh)
E_{Mec}	– Energia mecânica fornecida pelo processo de cogeração. Para efeitos do cálculo termodinâmico, o fator de conversão da energia mecânica em energia elétrica é igual a 1;	(kWh)
E_{TOTAL}	– Energia elétrica total produzida através do processo de	(kWh)

	cogeração, E_{Elec} , adicionada da energia mecânica fornecida pelo processo de cogeração, E_{Mec} ;	
$E_{Exp.Redex}$	– Energia elétrica entregue à RESP, Rede Elétrica de Serviço Público, no nível de tensão i , no período de referência	(kWh)
$E_{Exp.Redex}$	– Energia elétrica entregue à RESP, no período de referência	(kWh)
$E_{\eta\text{ CHP}}$	– Energia elétrica “não de cogeração”, parte de energia elétrica produzida pela instalação de cogeração que corresponde à parte do calor produzido não considerado útil. Obtem-se pela diferença entre a energia elétrica produzida através do processo de cogeração (E_{Elec}) e a energia de cogeração (E_{CHP})	(kWh)
F_{CHP}	– Energia primária, associada ao combustível, gás natural, consumida no processo de cogeração para a produção de calor útil, energia elétrica e energia mecânica, no período de referência.	(kWh)
$F_{n\text{ CHP}}$	– Energia primária, associada ao combustível, gás natural, consumida por uma instalação de cogeração, não associado à produção de energia elétrica de cogeração.	(kWh)
F_{TOTAL}	– Energia primária, associada ao combustível, gás natural, consumida na produção de calor e de eletricidade no processo de cogeração, no período de referência	(kWh)
H_{CHP}	– Energia térmica útil produzido em cogeração, no período de referência	(kWh)
PEP	– Valor absoluto da Poupança de Energia Primária de cogeração relativamente à produção separada de calor e eletricidade	(kWh)
PEP (%)	– Poupança de energia primária, em percentagem, da	(%)

atividade de cogeração relativamente à produção separada de calor e eletricidade

- $\theta_{cons.no\ local\ i}$ – Fator de correção relativo às perdas da rede evitadas pela energia elétrica utilizada para satisfação de auto-consumos ou de consumidores que estejam ligados à instalação de cogeração no mesmo ponto de recepção da RESP, que são abastecidos pelo nível de tensão i ;
- $\theta_{Exp.Redex\ i}$ – Fator de correção relativo às perdas da rede evitadas pela energia entregue à RESP no nível de tensão i ;
- Ref E η – Valor de referência da eficiência para a produção (%) separada de eletricidade
- Ref H η – Valor de referência da eficiência para a produção (%) separada de calor
- T z. c. – Temperatura média anual da zona climática (°C)

Caracteres Gregos Romanos

- β – Coeficiente de perdas
- η – Rendimento (%)
- θ – Fator de correção

Abreviaturas

- CHAS – *Chiller de Absorção de Simple Efeito*
- CHAD – *Chiller de Absorção de Duplo Efeito*

- DGEG – *Direção Geral de Energia e Geologia*
- IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*
- PEP – *Poupança de Energia Primária*
- PRM – *Posto de Redução de Medida*
- REE – *Rendimento Elétrico Equivalente*
- RESP – *Rede Elétrica de Serviço Público*
- UPAR – *Unidade Produtora de Água Refrigerada*

1. Introdução

A unidade de cogeração em estudo é responsável pela garantia de produção de energia térmica, destinada para fins de climatização e fornecimento de vapor a uma Unidade Hospitalar, na cidade do Porto. A garantia para uma unidade hospitalar das satisfações climáticas do ar ambiente no interior do edifício é essencial para a implementação das atividades a desenvolver. Os blocos operatórios, as salas de urgência, a pediatria, as salas de tratamento de doentes com queimaduras, os espaços comuns, entre outros, exigem a garantia de controlo de temperatura e humidade requerida para os espaços em questão. Para assegurar estes elementos, para além de um controlo localizado, a garantia de energia térmica disponível que possa assegurar a satisfação destas necessidades é preponderante para a normal funcionamento da unidade hospitalar.

A cogeração toma nesta unidade hospitalar um lugar de foco, é responsável pela produção centralizada de energia térmica. Na central de cogeração é garantida a produção de água quente e água fria, para climatização, e de vapor saturado usado para a lavandaria, esterilização, cozinha e também em aquecimento ambiente.

Por definição de cogeração, e de acordo com o Decreto-Lei n.º 186/95 [1], existe a seguinte descrição:

“ O processo de produção combinada de energia elétrica e térmica, destinando-se ambas a consumo próprio ou de terceiros, com respeito pelas condições previstas na lei,”

O cumprimento da lei em vigor, requer uma elevada importância, pois associada à permissão de funcionamento da unidade de cogeração, está inerente o correto funcionamento de uma unidade, neste caso hospital, que representa um serviço de elevada necessidade para a sociedade.

O estudo do trabalho, visa assegurar a garantia de funcionamento da central de cogeração de acordo com a lei em vigor, avaliando o desempenho e validação do

cumprimento das exigências requeridas pelos Decretos de Lei, que regulamentam este setor de atividade.

Tendo por base que o edifício hospitalar manteve a sua estrutura base nos últimos cinco anos, isto significa, que não se verificaram implementação de novos serviços ou compartimentos adicionais que pudessem alterar o histórico de consumos térmicos, bem como considerar que as alterações climáticas exteriores neste período não foram significativas, o estudo a realizar irá focar no levantamento de dados numéricos de produção e consumo de energia primária, energia elétrica e energia térmica, para analisar em dois períodos de referencia anual, a validação do cumprimento das exigência legais. Foram selecionados os meses de janeiro de julho, para análise dos resultados a calcular, um dos meses relativo ao inverno e o outro relativo ao verão.

Pela interpretação da definição da cogeração, verifica-se que para além da vertente da energia térmica, coexiste a produção de energia elétrica. A complementaridade da produção destas duas energias, assegura a racionalização de utilização de energia primária, reduzindo os consumos de gás natural em comparação com produções independentes destas duas formas de energia. A cogeração tem como vantagens para o cliente a centralização da produção das energias, maximizando no nível da operação ganhos na eficiência da distribuição de energia, racionalização dos consumos de energia primária e redução das emissões gasosas para a atmosfera comparativamente com centrais tradicionais, com produções independentes e com utilização de combustíveis mais poluentes, como sejam o gasóleo, o carvão e a nafta [2].

A produção de energia elétrica, essencialmente perto dos meios com maior índice de habitabilidade, também contribui para uma maior estabilidade da qualidade da energia disponível na rede nacional de eletricidade. Representa igualmente para o país um complemento na diversidade das centrais produtoras de energia elétrica.

1.1. Objetivo

O funcionamento de uma central de cogeração requer o cumprimento da lei em vigor, que regula a implementação e manutenção de licença de exploração.

O objetivo do presente trabalho, é validar as condições de manutenção de licenciamento da central de cogeração.

Para tal efeito, e visando a permanência de classificação da unidade de cogeração como de elevada eficiência, serão determinadas a Poupança de Energia Primária (PEP), a Classificação da Cogeração; as emissões de CO₂ produzidas pelo processo de cogeração e as evitadas. Será calculado o Rendimento Elétrico Equivalente (REE), que verificando o cumprimento dos valores, garante a permanência da Classificação da Cogeração e continuidade da licença de exploração por entidade Inspeccionadora.

O conhecimento das variáveis calculadas, transmitem à entidade de exploração da Central de Cogeração um elemento fundamental para a continuidade do funcionamento da instalação e asseguram à Unidade Hospitalar uma garantia da continuidade dos serviços prestados.

1.2. Organização do Texto

Este trabalho surgiu da necessidade de avaliar energeticamente uma unidade de cogeração, verificar as suas produções, a sua eficiência energética e o cumprimento da legislação em vigor para validar a instalação e permitir o seu funcionamento como unidade de cogeração.

O relatório pretende apresentar de um modo claro uma abordagem real a uma instalação de cogeração. No presente capítulo, é efetuada a introdução do trabalho a desenvolver, com a referência da mais-valia da execução deste estudo, com indicação do objetivo a atingir e validar. A unidade de cogeração está obrigada a cumprimento da legislação em vigor para este setor de atividade. No Capítulo 2, abordam-se os decretos de lei que regulam este tipo de instalações. São apresentados os decretos-lei com referência aos requisitos a cumprir e validar.

A unidade de cogeração, pela sua complexidade é alvo de explicação. É efetuada a apresentação simplificada da instalação, sendo que para maior compreensão e enquadramento, é apresentada a descrição da instalação, com referência aos principais equipamentos que a constituem e á sua interligação, abordando os circuitos correspondentes. Esta apresentação é exposta no Capítulo 3.

Para validar os requisitos legais a cumprir, é necessário primeiramente realizar um levantamento dos principais consumos e produções. No Capítulo 4, procede-se à recolha dos consumos mensais para os meses em estudo, janeiro de julho de 2016, referentes à energia primária consumida, tendo como combustível o gás natural. São igualmente apresentados os valores de produção de energia elétrica para os mesmos períodos e da energia térmica entregue pela cogeração à unidade hospitalar.

No Capítulo 5, os valores recolhidos anteriormente, são trabalhados e inseridos nas fórmulas matemáticas, que apresentam os parâmetros a calcular. São verificadas as eficiências da instalação, apresentadas e calculadas as fórmulas que permitem definir a classificação da unidade de cogeração e o valor do rendimento elétrico equivalente. Para cálculo das incógnitas principais, foram previamente calculados valores intermediários. Todas as fórmulas e resultados são apresentados neste ponto.

O Capítulo 6, apresenta a conclusão da análise efetuada à unidade de cogeração, com referência dos principais resultados, do cumprimento pelos decretos-lei que regulamentam a cogeração e da importância da unidade de cogeração para a continuidade de garantia da satisfação das energias térmicas necessárias para uso da unidade hospitalar.

2. Enquadramento regulamentar

Para garantir o cumprimento da legislação em vigor, é necessário aferir o valor da Poupança de Energia Primária (PEP), conforme Decreto-Lei nº 23/2010 [3], e respetivas alterações dispostas no Decreto-Lei 68/A-2015 [4].

De acordo com o Decreto-Lei nº 23/2010 [3], calculando o PEP, e em função da Potência Instalada, que para a presente instalação é de 7,2 MW, efetua-se a classificação da cogeração em Eficiente ou de Elevada Eficiência.

$$PEP = \left[1 - \frac{1}{\frac{H\eta}{\text{Ref } H\eta} + \frac{E\eta}{\text{Ref } E\eta}} \right] \times 100(\%) \quad (1)$$

Onde,

$H\eta$ - Eficiência térmica do processo de cogeração (%)

$E\eta$ - Eficiência elétrica do processo de cogeração (%)

Ref $H\eta$ - Valor de referência da eficiência para produção separada de calor (%)

Ref $E\eta$ - Valor de referência da eficiência para a produção separada de eletricidade (%)

Para resolução da PEP, é necessário o cálculo prévio das variáveis descritas na equação (1), neste sentido, apresentamos as seguintes equações:

- Equação da Eficiência térmica do processo de cogeração

$$H\eta = \frac{H_{CHP}}{F_{TOTAL}} \quad (2)$$

- Equação da Eficiência térmica do processo de cogeração

$$E\eta = \frac{E_{elec}}{F_{TOTAL}} \quad (3)$$

H_{CHP} – Energia Térmica útil produzida em cogeração (kWh)

E_{elec} – Energia Elétrica Produzida no processo da cogeração (kWh)

F_{TOTAL} - consumo de energia primária pelo processo da cogeração, proveniente do combustível gás natural (kWh)

- Valor de Ref $H\eta$

Ref $H\eta$ (Tabela 1) corresponde ao valor de referência harmonizada em matéria de eficiência para produção separada de calor em conformidade com a diretiva 2004/8/CE do Parlamento Europeu e do Conselho [5].

Tabela 1- Valor de Referência $H\eta$ [5]

	Tipo de Combustível	Vapor/Água Quente (%)	Utilização Direta de Gases de Escape (%)
Materiais Sólidos	Carvão de Pedra/coque	88	80
	Lenha	86	78
	Biomassa Agrícola	80	72
	Resíduos Biodegradáveis Urbanos	80	72
Líquidos	Petróleo (Gasóleo+fuelóleo residual), GPL	89	81
	Biocombustíveis	89	81
Gasosos	Gás Natural	90	82
	Gás de Refinaria / Hidrogénio	89	81
	Biogás	70	62
	Gases de Fornos	80	72

➤ Equação de cálculo Ref η

$$\text{Ref } \eta = \text{Ref } \eta_{Temp} \left(\sum_i \left[\frac{E_{Exp.Redexi}}{E_{Elec}} \times \theta_{Exp.Redexi} \right] + \sum_i \left[\frac{\frac{E_{Exp.Redexi}}{E_{Exp.Redexi}} \times E_{cons.no local}}{E_{Elec}} \times \theta_{cons.no locali} \right] \right) \quad (4)$$

Onde,

$E_{Exp.Redexi}$	Energia Elétrica entregue à RESP no nível de tensão i (kWh);
$E_{Exp.Redexi}$	Energia Elétrica entregue à RESP(kWh);;
$E_{cons.no local}$	Energia Elétrica utilizada para satisfação de auto-consumo ou de consumidores que estejam ligados à instalação de cogeração (kWh);
$\theta_{Exp.Redexi}$	Fator de correção relativo às perdas da rede evitadas pela energia elétrica entregue à RESP no nível de tensão i;
$\theta_{cons.no locali}$	Fator de correção relativo às perdas da rede evitadas pela energia elétrica utilizada para satisfação de auto-consumo ou de consumidores que estejam ligados à instalação de cogeração que são abastecidos pelo nível de tensão i;

$$\text{Ref } \eta_{Temp} = \text{Ref } \eta_{USO} + 0,1 (15 - T_{Z.C.}) \quad (5)$$

$\text{Ref } \eta_{Temp}$	Valor de referência corrigido (%);
$T_{Z.C.}$	Temperatura média anual da zona climática (°C), 15,4°C para a zona do Porto

Conforme, Decreto-Lei nº 23/2010 [3], para estimar as emissões de CO₂ associadas à produção de energia elétrica num processo de cogeração, é utilizada a seguinte equação:

$$(E \cdot CO_2)_{CHPi} = \frac{(F_{CHP} - \frac{H_{CHP}}{Ref H\eta}) \cdot (E \cdot CO_{2i})}{E_{CHP}} \quad (6)$$

Onde,

$(E \cdot CO_2)_{CHPi}$ - Emissões de CO₂ por kWh produzido de energia elétrica no processo de cogeração pelo combustível i (g. CO₂ /kWh)

$E \cdot CO_{2i}$ - Emissão de CO₂ para o combustível i (g. CO₂ /kWh)

F_{CHP} - Energia primária consumida, associada ao gás natural (G.N.) no processo de cogeração para a produção de calor útil, energia elétrica e energia mecânica (kWh).

$$F_{CHP} = F_{Total} - F_{n\ CHP} \quad (7)$$

$$F_{n\ CHP} = \frac{E_{Total} - E_{CHP}}{\frac{E_{Total} + \beta H_{CHP}}{F_{Total}}} \quad (8)$$

$F_{n\ CHP}$ - Energia primária consumida (G.N.), não associada à produção de energia elétrica de cogeração (kWh)

F_{Total} - Energia primária consumida (G.N.) total pelo processo de cogeração (kWh).

β - Coeficiente de perdas.

Para cálculo do valor estimado das emissões evitadas de CO₂ por kWh produzido de energia elétrica num processo de cogeração (E.E.CO₂)_{CHPi}, quando comparado com a produção separada de calor e eletricidade utilizando os mesmos combustíveis, será aplicada a seguinte equação:

$$(E.E.CO_2)_{CHPi} = \frac{PEP_{absoluto}}{E_{CHP}} \times (E.CO_2) \quad (9)$$

Onde,

PEP_{absoluto} - Valor absoluto da poupança de energia primária da atividade de cogeração relativamente à produção separada de calor e eletricidade (kWh)

De acordo com o artigo 4º do Decreto-Lei n.º 538/99 [6], de 13 de Dezembro, com a redação dada pelo Decreto-Lei n.º 313/2001 [7], de 10 de Dezembro, o Rendimento Elétrico Equivalente (R.E.E.) deve ser calculado pela seguinte expressão

$$R.E.E = \frac{E}{C - \frac{T}{0,9 - 0,2 \times \frac{CR}{C}}} \quad (10)$$

E - Energia elétrica produzida pelo cogrador, excluindo os consumos nos sistemas auxiliares internos de produção de energia elétrica (kWh);

T - Energia térmica útil consumida a partir da energia térmica produzida pelo cogrador, excluindo os consumos nos sistemas auxiliares internos de produção de energia (kWh);

C - Energia primária consumida na instalação de cogeração, avaliada a partir do poder calorífico inferior (PCI) dos combustíveis e outros recursos utilizados (kWh);

CR - O equivalente energético dos recursos renováveis ou resíduos industriais, agrícolas ou urbanos consumidos na instalação de cogeração, não aplicável (kWh);

De acordo com o estabelecido na alínea ii), do ponto n.º1, do artigo 4º do Decreto-Lei n.º 313/2001 [7], para as instalações utilizando como combustível gás natural, o R.E.E, deverá ser superior a 0,55.

3. Descrição da Instalação

A unidade de cogeração em estudo tem como elemento principal o grupo eletrogéneo, também designado por motor de ciclo Otto. A esquematização simplificada dos principais equipamentos e circuitos são apresentados na figura 1.

O equipamento é alimentado a gás natural, sendo que produz energia elétrica que é exportada para a rede pública. Os gases de escape resultantes da combustão, são encaminhados para uma caldeira recuperativa de vapor, que após passagem num economizador, são libertados para o exterior através de uma chaminé.

A caldeira recuperativa de vapor é o equipamento destinado à produção de vapor saturado, que é utilizado para consumo ou encaminhado para uma unidade produtora de água refrigerada (UPAR), designado por Chiller de Absorção de Duplo Efeito (CHAD), para produção de água fria.

O grupo eletrogéneo, durante o seu funcionamento, protagoniza um acréscimo de temperatura no fluido térmico, água quente, que dissipa a energia contida em dois equipamentos, um na UPAR, designada por Chiller de Absorção de Simples Efeito (CHAS) e num permutador de placas de alto rendimento. O primeiro produz água fria, para uso no arrefecimento do edifício e o segundo, através do circuito secundário, é utilizado para aquecimento ambiente do edifício. Ambas as situações são verificadas em simultâneo.

Todos os circuitos de fluidos térmicos em estado líquido, são do tipo fechado, isto é, não existem trocas de massa com o ambiente exterior, a pressão atmosférica não interfere na pressão do fluido.

3.1.1. Motor de combustão interna

O motor a gás natural a 4 tempos, é um motor refrigerado a água de 16 cilindros com carga mista por meio de um turbocompressor dos gases de escape. Na Figura 2 é apresentada a vista frontal e lateral do grupo eletrogéneo. Este motor funciona de acordo com o ciclo Otto, motor de inflação por faísca, e tem como característica de funcionamento, a existência de uma mistura pobre, o que corresponde a uma alimentação de combustível de gás natural com excesso de ar para minimizar as emissões gasosas, desde o início da combustão do motor [8].

O motor arranca por início dos motores de arranque, que possuem baterias, ao acionar o veio, o motor é colocado em modo de funcionamento com a mistura gás/ar, respeitando um ciclo de funcionamento Otto. O veio do motor transmite energia mecânica ao alternador, através de um acoplamento elástico.

Aquando de uma rotação de 1500 rpm, uma produção de tensão de 6300 V e uma frequência de 50 Hz, o sistema efetua automaticamente o sincronismo com a tensão da rede elétrica, iniciando a partir desse momento a injeção de energia na rede, subindo a potência elétrica até um máximo de 2430 kWe. Na tabela 2 são apresentadas as principais características do motor.

O motor de cogeração, tendo como combustível o gás natural, transmite rotação ao rotor do alternador trifásico de alta tensão, pela transmissão de energia mecânica produzida no funcionamento do grupo. Utiliza a energia térmica da água de refrigeração do motor, do óleo do motor, da mistura e do gás de escape, promovida pelo funcionamento do motor de cogeração, para, através de permuta de calor, fornecer energia térmica à Unidade Hospitalar.

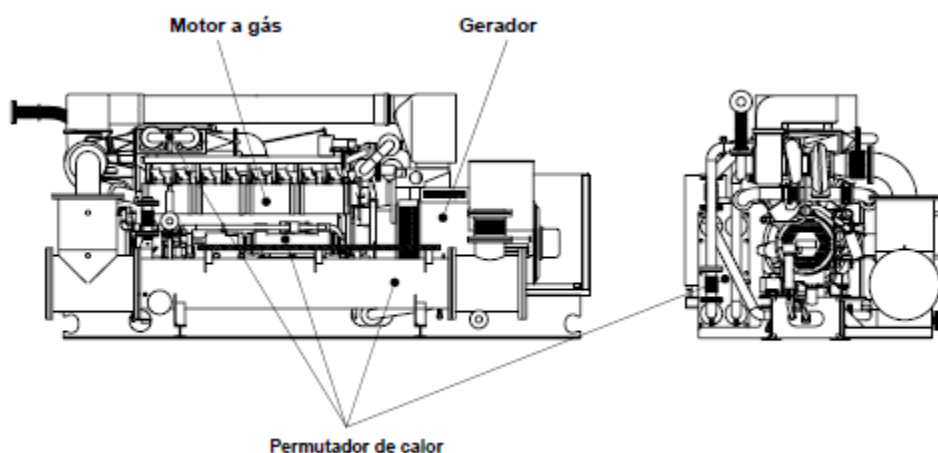


Figura 2- Motor de cogeração vista lateral e frontal [8]

Tabela 2- Características técnicas do motor de cogeração [8]

MOTOR	
Item	Descrição
Fabricante	GE Jenbacher
Modelo	JMS 616 GS N.L.
Potência Mecânica	2945 kW
Potência Elétrica	2430 kW
Número de cilindros	16
Circuito Gases de Escape	1020 kW
Circuito Alta Temperatura	Bloco + 1ª etapa óleo + 1ª etapa Aftercooler
Potência Térmica	994 kW
Circuito Baixa Temperatura	2ª etapa Aftercooler + 2ª etapa óleo
Potência Térmica	306 kW
Combustível	Gás Natural
Unidades	3

3.1.2. Alternador

O alternador é um equipamento que possui um rotor e um estator. Através da energia mecânica proveniente do funcionamento do motor de cogeração, os seus componentes exercem um campo magnético, o que dá origem à produção de energia elétrica. Na figura 3 mostra-se o veio do rotor e o corpo do alternador, com a caixa de ligações elétricas. O alternador produz corrente alterada induzida. Na tabela 3 são referidas as principais características do equipamento.

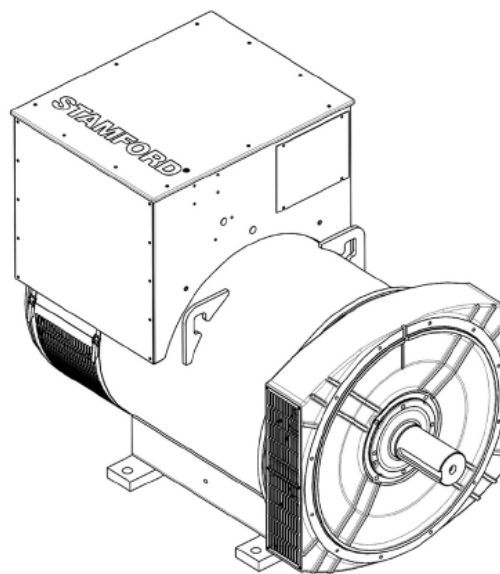


Figura 3- Alternador trifásico

Tabela 3- Características técnicas do alternador [8]

ALTERNADOR	
Item	Descrição
Marca/Modelo	AVK
Tipo	DIG 140 h/4
Potência, Tensão e Frequência	3000 kVA; 6300 V ; 50 Hz
Unidades	3

3.1.3. Transformador Seco

Equipamento de elevação de tensão de 6,3kV para 15kV. Transformador trifásico de distribuição do tipo seco, capsulado em resina. Visualização de um transformador seco típico, representado na figura 4. A tabela 4 apresenta as principais características do transformador



Figura 4- Transformador seco

Tabela 4- Características técnicas do transformador

TRANSFORMADOR SECO	
Item	Descrição
Marca/Modelo	EFACEC
Potência	3 MVA
Tensão	6,3 / 15 kV
Unidades	3

3.1.4. Caldeira de recuperação de vapor

Caldeira de recuperação de vapor, é do tipo tubular horizontal, composta por dois circuitos no seu interior (figura 5). O circuito da água/vapor e o circuito dos gases de escape, proveniente da combustão do motor da cogeração, que é o responsável pela emissão de energia térmica à caldeira [9]. O sistema é controlado através do funcionamento de uma eletroválvula de três vias, que consoante a insatisfação do valor da pressão de vapor pretendido, permite a passagem da energia térmica dos gases de escape para o corpo da caldeira. Em caso de valor elevado da pressão do vapor, a eletroválvula de 3 vias, encaminha o fluido para o exterior, através de uma chaminé. O sistema possui uma bomba de alimentação de água, que alimenta a caldeira, para garantir o correto funcionamento do equipamento. As características da caldeira de recuperação de vapor são apresentadas na tabela 5.



Figura 5- Caldeira de recuperação de vapor

Tabela 5- Características técnicas da caldeira de recuperação de vapor [9]

CALDEIRA DE RECUPERAÇÃO	
Item	Descrição
Marca	Energest
Modelo	995 RB-TL-GV
Produção de Vapor	1500 kg/h a 184 °C
Pressão de Serviço	8 bar (rel.)
Temperatura mínima/máxima de Serviço	20/184°C
Caudal de Gases	13444 kg/h a 400 °C
Unidades	3

3.1.5. Economizador

O economizador tem como objetivo rentabilizar o funcionamento da caldeira de recuperação de vapor. Este equipamento permite um acréscimo da temperatura de água de alimentação à caldeira, através do aproveitamento da energia térmica disponível nos gases de escape, após passagem inicial no corpo da caldeira de recuperação de vapor. As dimensões e características são apresentadas na tabela 6.

Tabela 6- Características técnicas do economizador [9]

ECONOMIZADOR	
Item	Descrição
Marca	Energest
Modelo	1475/11/10 TA ACAC
Superfície de aquecimento	182,3 m ²
Volume	110 litros
Temperatura Máxima Admissível	171°C
Unidades	3

3.1.6. Desgaseificador

O desgaseificador (figura 6) é um equipamento que tem de possuir um nível de água permanente, dentro dos limites definidos. O fluido deverá permanecer a uma temperatura na ordem dos 105 °C e a uma pressão relativa de 0,3 bar. Restantes características apresentadas na tabela 7. Para esse efeito, possui um sistema de entrada de vapor saturado, controlado por uma válvula de diferencial de pressão, que permite a passagem de vapor, sempre que a pressão no interior do equipamento desça abaixo do valor definido. O desgaseificador, como o nome refere, efetua a desgaseificação do condensado, permitindo o seu reaproveitamento e garantido as propriedades químicas do fluido para a sua reutilização.

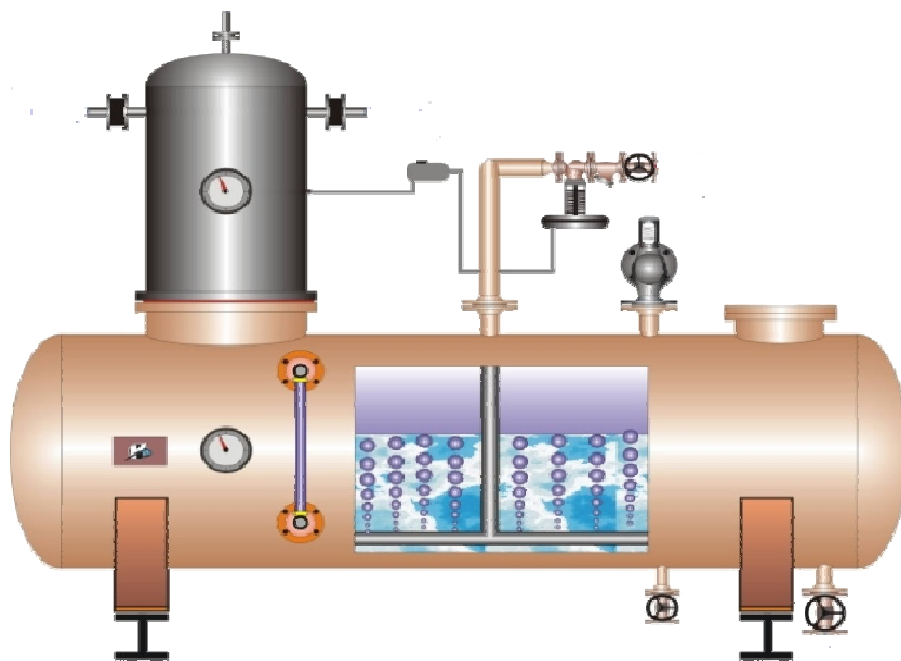


Figura 6- Imagem de um desgaseificador com acessórios

Tabela 7- Características técnicas do desgaseificador

DESGASEIFICADOR	
Item	Descrição
Marca	Babcock Wanson
Modelo	DT 7000/3
Volume total	4720 litros
Volume útil	2960 litros
Temperatura Máxima Admissível	144 °C
Unidades	1

3.1.7. Depósito de Condensados

O depósito de condensados é um equipamento que permite a acumulação de condensados reaproveitados da utilização de vapor saturados em equipamentos ou circuitos. O condensado formado, após passagem em um purgador de vapor, é encaminhado para o depósito de condensados, para aproveitamento da energia térmica que possui e da quantidade de água que economiza, por detrimento da utilização de água da rede pública. O depósito de condensados tem um volume de quatro mil litros e existem duas unidades na instalação

3.1.8. Unidade de Produção de Água Refrigerada (U.P.A.R.)

A instalação possui duas Unidade de Produção de Água Refrigerada [UPAR], que diferem uma da outra pelo fluido térmico que fornece calor ao equipamento. Estas unidades são também designadas por chiller de absorção, que para o caso da unidade que recebe água quente como fonte de calor, tem a designação de Simple Efeito (CHAS), representado na figura 7 e para a unidade que recebe vapor, a designação é de

Duplo Efeito (CHAD), apresentado na figura 9. Características dos equipamentos apresentados na tabela 8 e 9, respectivamente.

No CHAD a primeira passagem que fornece energia térmica à máquina é efetuada pelo vapor, e o condensado resultante, efetua uma segunda passagem, reaproveitando a energia térmica ainda disponível, para alimentar a máquina, daí se designa o segundo efeito. Acrescente referir, que ambas as unidades, para além do circuito de alimentação, energia térmica quente, possuem mais dois circuitos. O circuito de água fria, que é o responsável por garantir a climatização ambiente arrefecimento e o circuito de condensação, que efetua recirculação em torre de arrefecimento aberta.

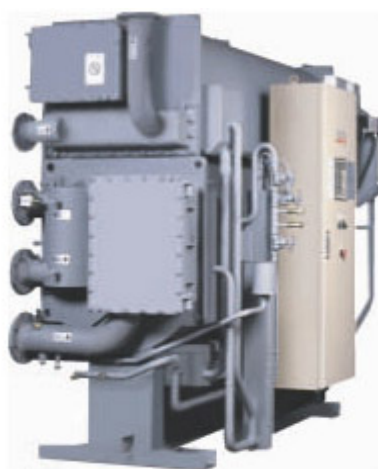
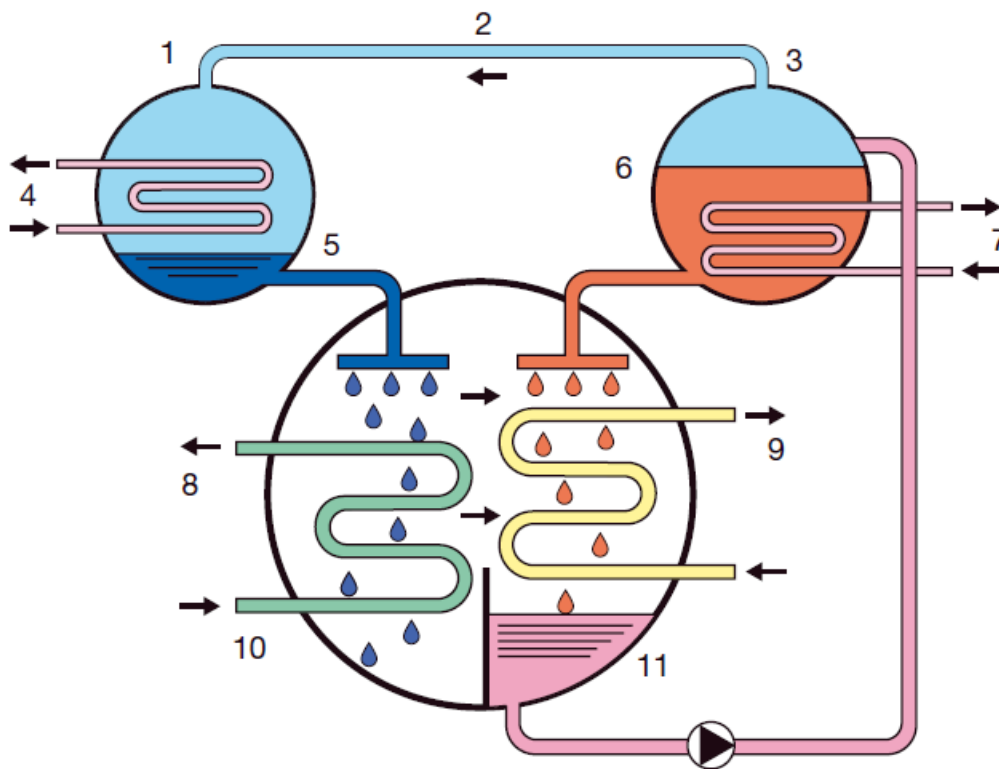


Figura 7- Chiller de Absorção de Simples Efeito [10]

O ciclo de refrigeração por absorção [10], tal como o ciclo de refrigeração mecânica de compressão de vapor, utiliza o calor latente da evaporação de um fluido refrigerante para eliminar o calor da água fria que entra. Os sistemas de refrigeração de compressão de vapor usam um refrigerante com cloro e um compressor para transportar o vapor do refrigerante que sai do evaporador para o processo de condensação no condensador. Já o ciclo de absorção, utiliza a água como refrigerante e uma solução de brometo de lítio absorvente para absorver o refrigerante evaporado. Posteriormente, é aplicado calor à solução para libertar o vapor refrigerante do absorvente. O vapor refrigerante nesta fase, é condensado, através do componente condensador. O ciclo de absorção básico de

simples efeito (figura 8) é composto pelo gerador, condensador, evaporador e absorvedor com refrigerante (líquido) e brometo de lítio como solução de trabalho. O gerador utiliza a fonte de calor (água quente) para vaporizar a solução de brometo de lítio diluído. O vapor de água separado é encaminhado para o condensador, onde volta a sofrer o processo de condensação, transformando-se em líquido, transferindo o calor à água da torre de refrigeração. Uma vez condensado, o refrigerante líquido circula pelos tubos do evaporador, dissipando o calor da água fria e evaporando-se o refrigerante líquido. A solução de brometo de lítio concentrada do gerador passa ao absorvedor, absorve a solução de vapor refrigerante do evaporador e é diluída. A solução de brometo de lítio diluída é bombada de novo ao gerador, onde se volta a reiniciar o ciclo.



Legenda: 1- Condensador; 2 -Vapor refrigerante; 3- Gerador; 4- Água de refrigeração; 5- Refrigerante líquido; 6- Solução concentrada; 7- Fonte de calor; 8 – Água fria; 9-Água de refrigeração; 10-Evaporador; 11 – Absorvedor

Figura 8- Ciclo de Absorção simplificado [10]

Tabela 8- Características técnicas do CHAS [10]

Unidade Produção Água refrigerada – Chiller de Absorção simples efeito (CHAS)	
Item	Descrição
Fabricante	Carrier
Tipo	TSA-16-LJ-53
Potência Frigorífica	1900 kW
Água Gelada	Temperatura de entrada: 11°C Temperatura de saída: 6°C Caudal: 321,6 m³/h
Água Refrigeração	Temperatura de entrada: 28°C Temperatura de saída: 34°C Caudal: 644,5 m³/h
Unidades	1



Figura 9- Chiller de Absorção de Duplo Efeito [10]

Tabela 9- Características técnicas do CHAD [10]

Unidade Produção Água refrigerada – Chiller de Absorção duplo efeito	
Item	Descrição
Fabricante	Carrier
Tipo	TSA-16-NK-62
Potência Frigorífica	2400 kW
Água Gelada	Temperatura de entrada: 11°C Temperatura de saída: 6°C Caudal: 413 m³/h
Água Refrigeração	Temperatura de entrada: 29°C Temperatura de saída: 35°C Caudal: 614 m³/h
Vapor	Pressão: 900 kPa Consumo: 2750 kg/h Vapor Saturado
Unidades	1

3.1.9. Torre de Arrefecimento em circuito aberto

A torre de arrefecimento em circuito aberto é composta por um sistema em contracorrente entre o ar e a água do circuito de condensação das UPAR. O fluido líquido circula através do auxílio de eletrobombas de circulação em sentido descendente e o ar é ventilado com o auxílio de ventiladores em sentido ascendente. A permuta entre os fluidos provoca a redução da temperatura da água de condensação, esta, é encaminhada para a UPAR, com a temperatura desejada de entrada. O sistema possui um circuito de alimentação de água para o reservatório da torre, em virtude de o processo provocar perdas de água pelo método evaporativo. Face às produções verificadas, o equipamento apresenta dimensão e características consideráveis, ver tabela 10.

Tabela 10- Características técnicas da Torre de Arrefecimento em circuito aberto

TORRE DE ARREFECIMENTO EM CIRCUITO ABERTO	
Item	Descrição
Marca	EVAPCO
Modelo	AT 420-736 SLSF
Potência Térmica (Capacidade máxima)	19.386,52 kW
Número de Módulos	4
Número de Ventiladores	8
Potência absorvida por ventilador	22 kW

3.1.10. Aeroarrefecedor

O aeroarrefecedor é caracterizado pela existência de uma área significativa de permuta de calor, formado com placas de alumínio, que no seu interior possuem tubagem de cobre, onde circula o fluido térmico, que tem por objetivo a perda de energia térmica. O equipamento, possui ventiladores, que promovem a circulação do fluido, o ar, que em contato com a área de permuta, sofre aquecimento. O fluido térmico, água quente, que circula no interior da tubagem de cobre, conseqüentemente perde energia térmica, sendo esse o propósito a atingir na utilização do aeroarrefecedor. As trocas de calor verificadas são do tipo por condução e convecção. A tabela 11 apresenta as características do aeroarrefecedor.

Tabela 11- Características técnicas do aeroarrefecedor

AEROARREFECEDORES	
Item	Descrição
Marca	GEA - Nema
Modelo	NEG HZ 1000/1,8-2x3/4-12PD-112V
Potência térmica	1015,9 kW
Caudal de água	60 m ³ /h
Potência elétrica absorvida	8x0,86 kW
Unidades	3

3.1.11. Torre de Arrefecimento em circuito fechado

A torre de arrefecimento é composta por um ventilador e uma bomba de recirculação. O sistema de funcionamento é efetuado através de uma contracorrente entre os fluidos, o ar e a água. O fluido em estado líquido, é armazenado num tanque do próprio equipamento, e deve ser mantido ao nível requerido, existindo a reposição sempre que necessário. Estes dois fluidos, são os elementos que provocam a redução de temperatura do fluido térmico primário, água de refrigeração, que circula na tubagem interior do equipamento, em circuito fechado. Na tabela 12, são apresentadas as características do equipamento.

Tabela 12- Características técnicas da Torre de Arrefecimento em circuito fechado

TORRE DE ARREFECIMENTO EM CIRCUITO FECHADO	
Item	Descrição
Marca	EVAPCO
Modelo	LSWA 20A-2
Potência térmica	371 kW
Caudal de água	28,8 m ³ /h
Potência elétrica absorvida	8,06 kW
Água Refrigeração	Temperatura de Entrada: 50°C Temperatura de Saída: 40°C
Unidades	3

3.2. Descrição dos Circuitos

O funcionamento de uma central de cogeração é assegurado pela implementação de circuitos de fluidos térmicos, que garantem a permuta de calor resultante do funcionamento do motor em ciclo Otto. A permuta térmica, é essencial para garantir que sejam cumpridos os parâmetros de funcionamento do motor de cogeração, no que se refere à entrada e à saída de fluidos com as temperaturas desejadas. A energia térmica que tem de ser dissipada pelo processo de funcionamento do motor de cogeração, é utilizada em equipamentos específicos, para fins de climatização e produção de vapor. O motor de ciclo Otto usa como combustível o gás natural e tem como função principal a produção de energia elétrica. A figura 10 apresenta de um modo simplificado os principais circuitos do ciclo da cogeração, seguidamente se descrevem.

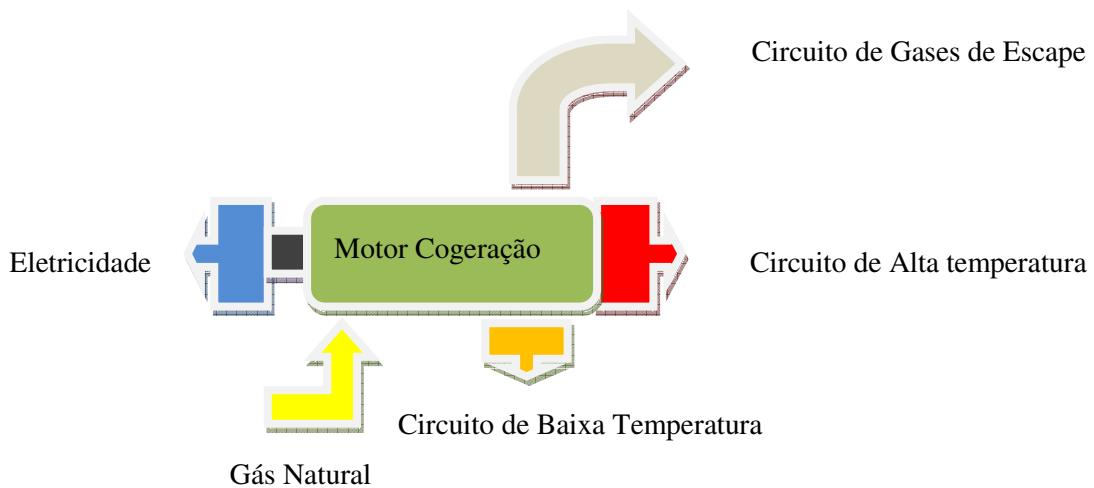


Figura 10- Circuitos Principais da Cogeração

3.2.1. Circuito de Alta Temperatura (AT)

O circuito de AT é composto pelas seguintes partes do motor: bloco do motor, arrefecedor de óleo de lubrificação e arrefecedor de 1º estágio do intercooler. A energia térmica extraída deste circuito, permite o aquecimento do fluido térmico em 15 °C, que é utilizado na forma de energia calorífica.

O fluido térmico, possui à entrada do motor de cogeração uma temperatura de 77 °C, elevando este valor para 92°C. Este circuito é do tipo fechado, dispõe de uma bomba de circulação por motor, um depósito de acumulação e uma bomba de circulação que permite o escoamento de caudal. O circuito de AT encontra-se ligado a um aroarrefecedor (figura 11) de forma a permitir a dissipação térmica do excesso de energia que exista no circuito por não utilização das unidades consumidoras, quer seja o permutador de placas, quer seja o chiller de absorção.

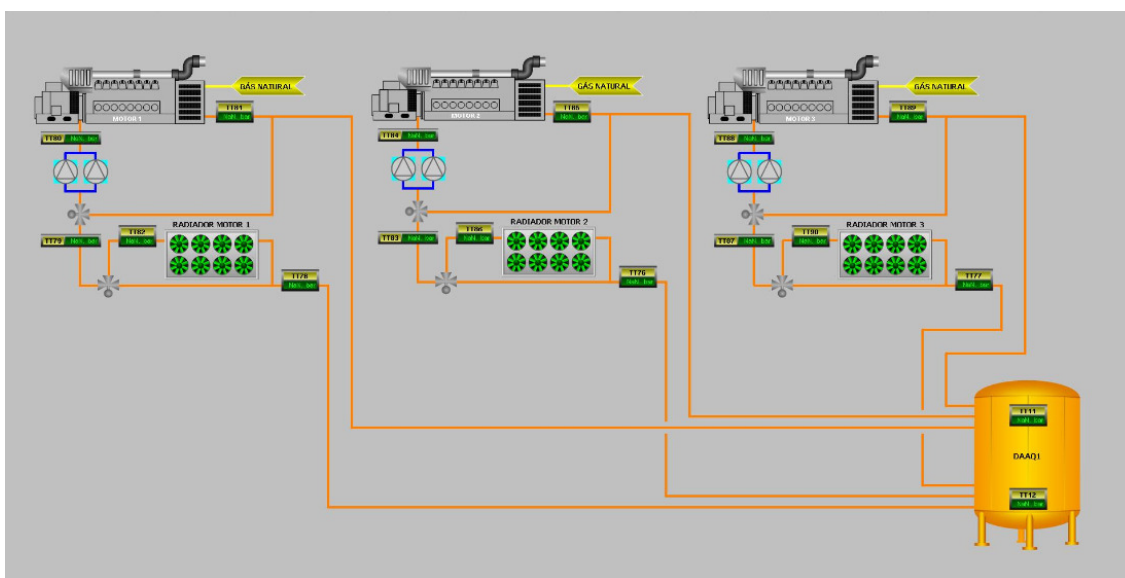


Figura 11- Circuito de Alta Temperatura

3.2.2. Circuito de Baixa Temperatura (BT)

A energia térmica extraída no circuito de Baixa Temperatura do motor, é obtida através da passagem do fluido térmico no circuito mistura ar/gás e após passagem no turbocompressor.

O fluido térmico, designado por água quente de baixa temperatura, circuito primário, obtém um acréscimo da temperatura em cerca de 10 °C, entrando no motor a 40°C e tendo temperatura de saída de 50°C.

A energia obtida será dissipada num permutador de placas, que transfere para o circuito secundário do permutador a energia térmica disponível. Esta energia é utilizada para o pré-aquecimento de água quente sanitária e o pré-aquecimento de água de alimentação ao degaseificador.

O circuito possui uma eletrobomba que promove a circulação do fluido térmico do circuito primário, pelo permutador de placas (lado primário) e pela torre de arrefecimento.

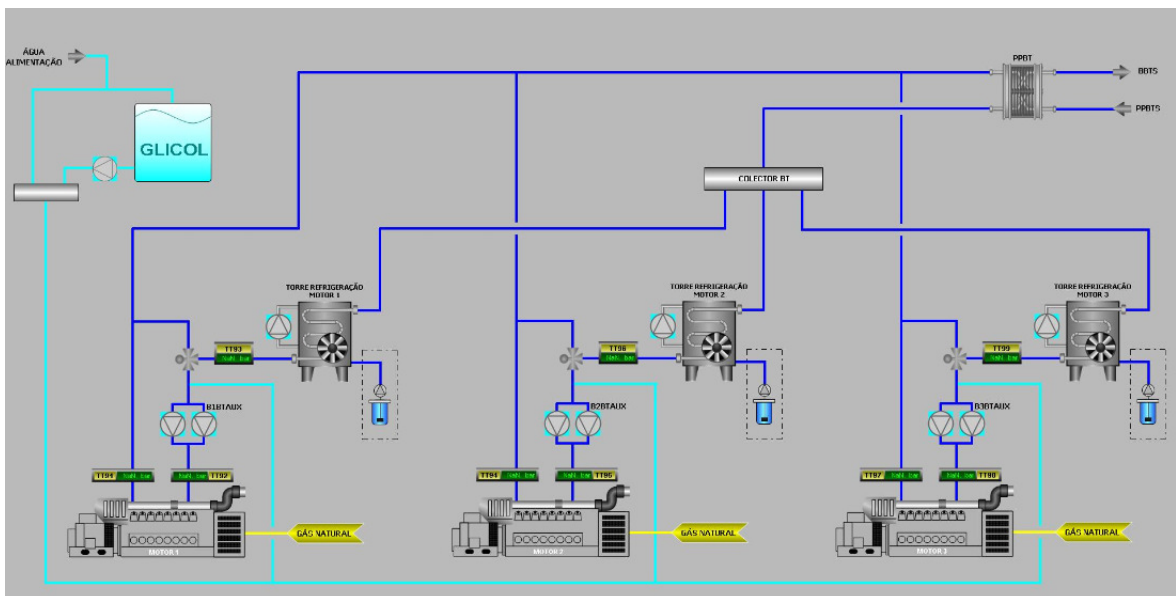


Figura 12- Circuito de Baixa Temperatura

3.2.3. Circuito de Gases de Escape

Aproveitamento da energia térmica dos gases de escape dos motores, para produção de vapor, através de caldeira recuperativa de vapor, que são alimentadas por água proveniente do desgaseificador, com pré alimentação dos depósitos de condensados e água da rede. A água de alimentação, antes de entrar na caldeira recuperativa, circula por um economizador. Este sistema permite rentabilizar a energia ainda disponível dos gases de escape após passagem no corpo da caldeira, elevando a temperatura de água de alimentação. Por inerência, aumenta a produção de vapor da caldeira. A figura 13 representa a implementação dos equipamentos e ligação dos circuitos.

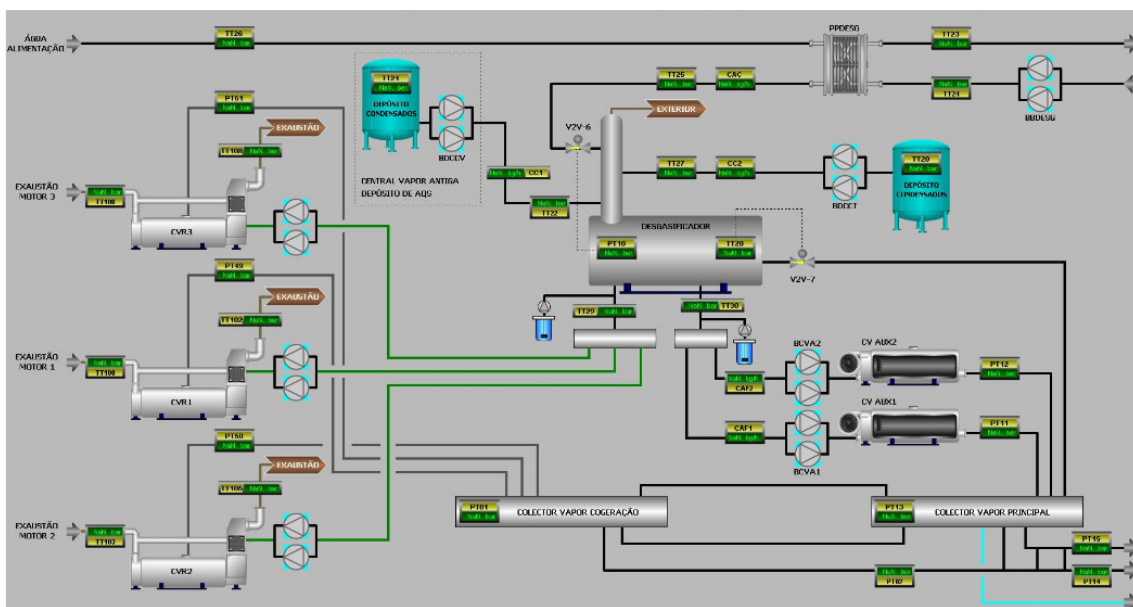


Figura 13- Circuito de Gases de Escape

3.2.4. Circuito de Distribuição de Energia Térmica –Água Quente - Produção

A energia térmica disponível do ciclo da cogeração, respetivamente do circuito AT, é acumulada no depósito superior da figura 14. O fluido térmico circula através de eletrobomba, por um permutador vapor/água, só utilizado somente se necessário, continua o escoamento pelo CHAS e por um permutador de placas, designado por permutador AT. Este equipamento, dissipa calor para o lado secundário, que por sua vez representa a energia térmica disponível da cogeração, água quente para distribuição ao utilizador. Em caso de necessidade, existe ainda a possibilidade de efetuar aquecimento do circuito secundário de água quente, por utilização de dois permutadores de vapor/água. Por fim, referir que em caso de necessidade, por falha da cogeração, a instalação possui caldeiras de água quente alimentadas a gás natural, que podem ser utilizadas.

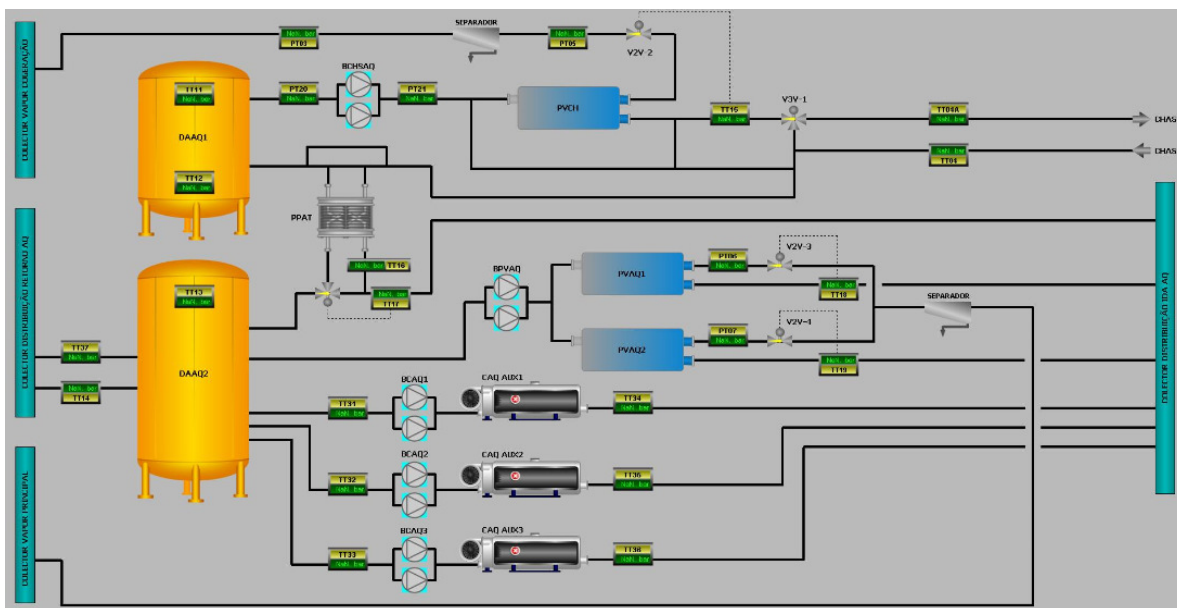


Figura 14- Circuitos de Distribuição de Energia Térmica – Água Quente – Produção

3.2.5. Circuito de Produção de Energia Térmica- Água Fria

O circuito de produção de energia térmica frio, é constituído por duas unidades associadas à cogeração, isto é, que possuem como fonte de calor a energia disponibilizada pelo processo de cogeração. Estas unidades são UPAR, designadamente o CHAS e CHAD. Estes equipamentos possuem três circuitos de fluidos: circuito de água fria; circuito de condensação; circuito de alimentação de energia térmica, que é água quente para o CHAS e vapor para o CHAD. Complementarmente, estas unidades também são alimentadas por um circuito elétrico, que alimenta os equipamentos auxiliares necessários para o seu funcionamento. A água fria produzida é acumulada em depósitos de acumulação, existindo do depósito de ida e o de retorno. Os circuitos de condensação das UPAR estão ligados a uma torre de arrefecimento em ciclo aberto. Complementarmente, existem equipamentos de produção de água fria tradicionais, designadamente o chiller elétrico centrífugo. Na figura 15 são apresentados os equipamentos e circuitos de ligação.

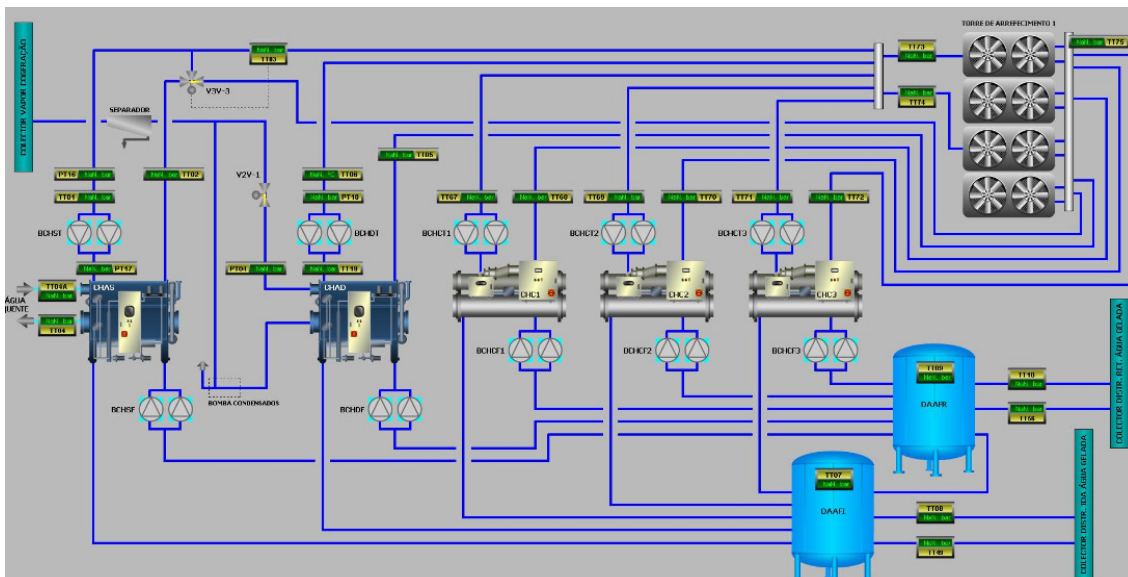


Figura 15- Circuitos de Distribuição de Energia Térmica – Água Fria – Produção

3.2.6. Circuitos de Distribuição de Energia Térmica - Consumo

A energia térmica disponibilizada pela Unidade de Cogeração é repartida por três vertentes, o vapor, a água quente e a água fria. Estes termos permitem de um modo simplificado explicar as utilidades disponibilizadas e que tem como objetivo a satisfação das necessidades energéticas da unidade hospitalar. O vapor é distribuído para consumo por parte do cliente sobre a forma de vapor saturado a uma pressão relativa de 8 bar. O vapor tem como meio de distribuição as condutas existentes, que alimentam um coletor principal para repartir pelos vários utilizadores da unidade hospitalar.

Os circuitos de fluidos térmicos, tanto para a água quente, como para a água fria, são disponibilizados à unidade hospitalar através de circulação forçada por eletrobombas centrífugas, que forçam o fluido a passar em permutadores de calor com placas, que disponibilizam a energia primária térmica para utilização nos equipamentos de climatização do hospital.

3.2.7. Circuito de Energia Elétrica

A energia elétrica é produzida no alternador a 6,3 kV com uma frequência de 50Hz, que posteriormente é elevada para 15 kV na mesma frequência, com o auxílio de um transformador seco de elevação. A instalação possui um relé de proteção no circuito elétrico de interligação, que em caso de oscilações da rede ou sobrecarga, é acionado de modo a abrir o circuito e proteger os equipamentos. O relé de proteção da interligação é um elemento obrigatório na instalação e parametrizado por entidade certificadora.

O processo de exportação de energia elétrica para a rede pública só ocorre quando os valores de tensão e frequência do lado do produtor e do lado da rede pública sejam idênticos. Esta condição é preponderante para o fecho do disjuntor de interligação, em

caso de existirem parâmetros diferenciados, as seguranças dos equipamentos abortam o processo.

3.2.8. Circuito de Energia Primária – Gás Natural

A instalação de gás natural, possui um posto de redução de medida (PRM) dedicado à cogeração, que assegura a redução da pressão do gás natural de 15 bar (rel.) para 6 bar (rel.). O gás natural abastece o motor de cogeração, que por sua vez, incorpora mais equipamentos de redução de pressão, que reduzem a pressão para cerca de 100 mbar (rel.). A instalação possui seguranças ao nível de valores excessivos de pressão e sistema de corte em caso de incêndio ou de fuga de gás natural. O circuito possui filtros na rede de gás e contadores de gás dedicados a cada motor de cogeração.

4. Recolha da Informação

O estudo da instalação, a compreensão dos circuitos e a definição das fronteiras de produção com as de consumo, permitem definir uma metodologia para a recolha de informação. Foram recolhidas os valores referente às contagens mensais para os meses de janeiro e julho de 2016, obtendo os consumos mensais, associados ao processo da cogeração. De salientar, que produções energéticas efetuadas através de equipamentos auxiliares de reserva não são contabilizadas para efeitos de cogeração, pelo que não foram recolhidas.

Os meses de análise foram selecionados para verificar o comportamento da instalação em períodos mais críticos, como sejam o período de maiores necessidades térmicas de aquecimento, inverno, mês de janeiro e de maiores necessidades térmicas de arrefecimento, estação de verão, mês de julho. Importa também verificar o comportamento da instalação nas vertentes analisadas para estes dois períodos.

A energia térmica é contabilizada através de contadores entálpicos, que possuem um medido de caudal, que efetua o registo do caudal instantâneo em m^3/h e duas sondas de temperatura, instaladas na tubagem de escoamento do fluido, no sentido ida e de retorno. O equipamento possui uma unidade integradora, permite a visualização das diferentes variáveis, onde indica o valor da energia térmica em kWh.

O contador de vapor, regista o caudal de vapor, a pressão de vapor e temperatura de vapor. Permite a visualização da energia instantânea em kWh, sendo que o equipamento foi alvo de aferição e programação por entidade certificada.

4.1. Registos do consumo de gás natural

Os valores apresentados representam o consumo mensal verificado, pela diferença de valores entre o último dia e o primeiro do mês em questão. Os valores são apresentados com as unidades assinaladas nos contadores de gás natural. De salientar, que a unidade eletrónica do contador está programada com os índices do gás natural para o mercado nacional, efetuando a correção em termos de pressão e temperatura, exprimindo o caudal corrigido em m³, a 0°C a 1 atm. (Tabela 13).

Tabela 13- Consumo de Gás Natural da Unidade de Cogeração

Mês	Quantidade consumida de Gás Natural -Motores (m ³)
Janeiro	608155
Julho	794283

4.2. Registos dos valores de Energia Térmica – Água Quente e Vapor

Na tabela 14 são apresentadas os valores da energia entregue útil de vapor e água quente, correspondendo à soma das duas variáveis a contabilização da energia térmica total/útil (H_{CHP}). Este valor representa a energia que foi utilizada pela unidade hospitalar, resultante do processo de cogeração. Os valores apresentados, representam a diferença dos valores verificados no início e fim do mês em análise, retirados dos contadores de energia específicos. A tabela 14, também regista as horas de funcionamento mensal dos motores de cogeração, valor que expressa o somatório das horas de funcionamento dos três motores de ciclo Otto.

Tabela 14- Registo da energia fornecida, referente à vertente vapor e água quente utilizada pelo cliente. Indicação do número de horas de funcionamento dos motores da cogeração.

Mês	Vapor Entregue (1)	Água Quente Entregue (2)	Energia térmica total/útil – H_{CHP} (3 = 1+2)	Horas de funcionamento
	(kWh)	(kWh)	(kWh)	(h)
Janeiro	1112906	960750	2073656	1157
Julho	1388700	1395792	2784491	1485

4.3. Registos dos valores de Energia Térmica – Água Fria

Os valores apresentados na tabela 15, expressam a energia térmica. Associada à água fria, entregue à unidade hospitalar, correspondendo à diferença dos valores extraídos no contador de entalpia para o último e primeiro dia do mês em causa.

Tabela 15- Valores de Energia Térmica – Água fria- Entregue

Mês	Água Fria Entregue (kWh)
Janeiro	309633
Julho	1251647

4.4. Registos dos valores de Energia Elétrica

No processo de cogeração, a análise à produção de energia elétrica produzida pelo motor de cogeração, é efetuada tendo por base três variáveis: A Energia Elétrica Produzida (E elec), que corresponde à energia contabilizada à saída do alternador do motor de cogeração; a Energia Elétrica Consumida pelos Auxiliares (E eca), que traduz a energia necessária para alimentar eletricamente os equipamentos associados ao funcionamento do motor de cogeração; e a Energia Elétrica Exportada (EEXP.Red), que expressa a diferença entre a Eelec e a Eeca. Na tabela 16, são apresentados os valores destas três variáveis, que expressam a diferença das leituras efetuadas aos contadores elétricos no último e primeiro do mês, representando a produção e consumo verificados no processo da cogeração.

Tabela 16- Produção Elétrica

Mês	Energia Elétrica Exportada (EEXP.Red)	Energia Elétrica Consumida Auxiliares(Eeca)	Energia Elétrica Produzida - E elec
	(kWh)	(kWh)	(kWh)
Janeiro	2484280	145620	2629900
Julho	3310370	112430	3422800

5. Tratamento da informação

Dos valores recolhidos das contagens efetuadas para os meses de janeiro e julho, procede-se aos cálculos, para obtenção de resultados pretendidos para validação da central de cogeração [11].

5.1. Combustível consumido

Dos dados recolhidos, apresentados na tabela 13, foi aferido um consumo de energia nos motores, proveniente do combustível gás natural no valor de 6403876 kWh para o mês de Janeiro e de 8363802 kWh para o mês de Julho de 2016.

$$F \text{ TOTAL (kWh)} = (\text{m}^3) \times \text{PCI} \left(\frac{\text{kcal}}{\text{m}^3} \right) \times \text{Fator de conversão para} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \right) \quad (11)$$

$$F \text{ TOTALJaneiro} = 608155 \times 9054 \times 0,001163 = 6\,403\,876 \text{ kWh}$$

$$F \text{ TOTALJulho} = 794283 \times 9054 \times 0,001163 = 8\,363\,802 \text{ kWh}$$

O valor do fator de conversão, foi obtido pela relação entre unidades, em que 860 kcal correspondem a 1 kWh.

5.2. Eficiência Térmica

A partir da contabilização mensal de energia térmica total útil, H_{CHP} (tabela 14), e do consumo de energia dos motores, calculou-se a eficiência térmica do processo de cogeração ($H\eta$) pela equação (2).

$$H\eta_{\text{Janeiro}} = \frac{2\,073\,656}{6\,403\,876} = 0,324$$

$$H\eta_{\text{Julho}} = \frac{2\,784\,491}{8\,363\,802} = 0,333$$

Os resultados obtidos apresentam um valor ligeiramente abaixo do esperado. Sabendo-se que o rendimento elétrico dos motores de cogeração do ciclo Otto se situam na ordem dos 40%, seria expectável obter rendimento térmico na ordem do 35% , para situar a central de cogeração dentro dos limites definidos pelo Decreto-Lei n.º 23/2010 [3].

5.3. Eficiência Elétrica

No que refere à produção de energia elétrica, foram produzidas as quantidades descritas na Tabela 16, com a designação de E elec.

Para determinar a eficiência elétrica do processo de cogeração ($E\eta$), utiliza-se a equação (3). Os resultados obtidos são:

$$E\eta \text{ Janeiro} = \frac{2\,629\,900}{6\,403\,876} = 0,411$$

$$E\eta \text{ Julho} = \frac{3\,422\,800}{8\,363\,802} = 0,409$$

Os valores obtidos enquadram-se nos valores expectáveis, sabendo que o rendimento elétrico para um motor de cogeração de ciclo Otto, situa-se na ordem dos 40%.

5.4. Eficiência Global da Instalação

O cálculo de eficiência global da instalação de cogeração contempla o somatório da energia total elétrica produzida e energética total térmica útil, verificada nos meses em análise, pela divisão do valor de combustível (da energia consumida) consumido nos motores da cogeração, tendo por base o valor do poder calorífico inferior do gás natural.

$$\eta_{Global} = \frac{E \text{ Elet} + H \text{ CHP}}{F \text{ Total}} \quad (12)$$

Pela aplicação da equação (12), temos os seguintes valores para os meses em estudo:

- Janeiro

$$\eta_{Global} = \frac{2629900+2073656}{6403876} = 0,734$$

- Julho

$$\eta_{Global} = \frac{3422800+2784491}{8\ 363\ 802} = 0,742$$

Os valores obtidos referentes à eficiência global, estão abaixo do esperado, significa isto, que a instalação possui possibilidade de fornecer mais energia térmica útil para a unidade hospitalar, desde que sejam colocados em serviço os sistemas que estão desativados, com a evolução da renovação dos serviços e reabilitação de áreas dos edifícios.

5.5. Cálculo da Energia Elétrica Produzida através do Processo de Cogeração

Segundo o anexo II do Decreto-Lei n.º 23/2010 [3] a eletricidade produzida em cogeração será considerada igual à medição de eletricidade anual da unidade à saída dos geradores principais, se a eficiência anual global for superior ou igual a 75% (para o caso específico de motores de combustão interna segundo anexo I do Decreto-Lei n.º 23/2010 [3], (tabela 17). Caso contrário, são mantidos o valor da eficiência mínima exigida e da eficiência elétrica, calculando um novo valor da eficiência térmica, mantendo o valor da energia primária consumida no processo da cogeração. Abaixo, aplica-se o descrito, de forma mais detalhada.

Tabela 17- Análise conjunta do Anexo I e II do Decreto-Lei n.º23/2010 [3]

Anexo I	Tipo de Cogeração	Eficiência Anual Global (Mínima Exigida) (%)	Rácio Implícito C (*) Anexo II
a	Turbina de Gás em ciclo combinado com recuperação	80	0,95
b	Turbinas a vapor de contrapressão	75	0,45
c	Turbinas de condensação em extração de Vapor	80	0,45
d	Turbinas de gás com recuperação de calor	75	0,55
e	Motor de combustão interna	75	0,75
f	Microturbinas	75	-
g	Motores Stirling	75	-
h	Células de Combustível	75	-
i	Motores a vapor	-	-
j	Ciclos Orgânicos de Rankine	-	-

(*) O rácio implícito deverá ser utilizado apenas se o ratio real não for conhecido, nomeadamente para fins estatísticos

Uma vez que o valor de eficiência global calculado se encontra abaixo do valor referido, esta situação não é aplicável à instalação para o período de referência em análise. De referir, que para o estudo em causa, a análise é mensal e os valores utilizados para cálculo são os indicados nas tabelas apresentadas, que referem uma periodicidade anual.

Assim, de acordo com a metodologia definida pela Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG) para esta situação, para se obter uma eficiência global de, pelo menos, 75%, mantendo fixa a eficiência elétrica, temos para a eficiência térmica:

- Janeiro

$$75\% - E_{\eta} = H_{\eta} \quad (13)$$

$$75\% - 41,1\% = 33,9\%$$

Assumindo, uma eficiência térmica de 33,9%, para o mesmo consumo de energia primária, associada ao consumo de gás natural, o calor útil teria de ser igual a:

$$H_{CHP(\eta \text{ Global min})} = H_{\eta(\eta \text{ Global min})} \times F_{Total} \quad (14)$$

$$H_{CHP(\eta \text{ Global min})} = 0,339 \times 6.403.876 = 2.170.913 \text{ kWh}$$

Onde,

$H_{CHP(\eta_{Global\ min})}$ – Energia Térmica total útil, cumprindo valor de eficiência global da instalação (kWh)

O valor calculado pela equação (14), correspondente a 2.170.913kWh, assume um valor superior ao valor real, de 2.073.656 kWh (tabela 14). Esta verificação era esperada, pois foi assumido um valor de eficiência global superior ao real.

O rácio C, relação entre a energia elétrica produzida pela cogeração e o valor da energia térmica total útil calculado, para cumprimento da eficiência mínima requerida, é obtido, através da seguinte equação:

$$C = \frac{E_{Elec}}{H_{CHP(\eta_{Global\ min})}} \quad (15)$$

Aplicando a equação (15), tem-se:

$$C = \frac{2629900}{2170913} = 1,211$$

Deste modo, o cálculo da energia elétrica produzida pela cogeração (E_{CHP}), assume o valor obtido através da seguinte equação:

$$E_{CHP} = H_{CHP(real)} \times C \quad (16)$$

$$E_{CHP} = 2.073.656 \times 1,211 = 2.511.197 \text{ kWh}$$

Concluí-se, que ao aplicarmos a metodologia definida pela DGEG, o valor obtido de E_{CHP} , é inferior ao valor real de produção de energia elétrica da cogeração, que é de 2.629.900 kWh (Tabela 16).

Aplicação do mesmo método ao mês de julho, cálculo da equação (13).

$$75\% - 40,9\% = 34,1\%$$

Na base de uma eficiência térmica de 34,1%, para o mesmo consumo de combustível, aplicando a equação (14), o calor útil teria de ser igual a:

$$H_{CHP(\eta_{Global\ min})} = 0,341 \times 8.363.802 = 2.852.056,48 \text{ kWh}$$

Cálculo do rácio C, através da equação (15), tem:

$$C = \frac{3422800}{2852056} = 1,200$$

E assim, através da aplicação da equação (16), tem-se que a energia elétrica da cogeração (E_{CHP}), é igual a:

$$E_{CHP} = H_{CHP(real)} \times C = 2.784.491 \times 1,200 = 3.341.389 \text{ kWh}$$

5.6. Poupança de Energia Primária (P.E.P.) e Classificação da Cogeração

A implementação de instalações de cogeração, visam entre outros pontos, a redução de consumo de energia primária e redução das emissões gasosas para atmosfera, nesse sentido, é calculada a Poupança de Energia Primária da atividade de cogeração relativa aos meses em análise em relação aos processos tradicionais de produção separada de calor e de eletricidade, através da equação (1).

Para o cálculo do PEP são utilizados os valores de referência da eficiência para produção separada de calor, $Ref H_{\eta}$, e para produção separada de eletricidade, $Ref E_{\eta}$, definidos no Jornal Oficial da União Europeia, Decisão da Comissão de 19 de Dezembro de 2011 [12], que estabelece valores de referência harmonizados em matérias de eficiência para a produção separada de eletricidade e de calor.

- Valor de referência – Eficiência para produção separada de calor

O valor de referência atribuído para a produção separada de calor será para combustível gás natural e meio de transmissão de calor água quente: $Ref H_{\eta} = 90\%$, de acordo com Tabela 1.

- Valor de referência – Eficiência para produção separada de eletricidade

O valor de referência em matéria de eficiência para a produção separada de eletricidade, ajustado pelos fatores de correção relativos às condições climáticas médias e às perdas da rede evitadas, é dado pela equação (4).

Através da consulta das tabelas 18 e 19 que se seguem, a variável $Ref E_{\eta_{USO}}$ toma um valor de 52,5% para o caso concreto de combustível Gás Natural e início de laboração em 2009. Quanto às variáveis $\theta_{Exp.Redei}$ e $\theta_{cons.no local i}$ assumem o valor de 0,945 e 0,925 para o nível de tensão de interligação de 15 kV respetivamente.

Para cálculo do valor $Ref\ E\eta$, através da aplicação da equação (4), previamente deve-se calcular o valor $Ref\ E\eta_{Temp}$, através da resolução da equação (5).

- Janeiro

$$Ref\ E\eta_{Temp} = 0,525 + 0,001 (15 - 15.4) = 0,5246 = 52,46 \%$$

- Julho

$$Ref\ E\eta_{Temp} = 0,525 + 0,001 (15 - 15.4) = 0,5246 = 52,46 \%$$

Aplicando a equação (4), temos:

- Janeiro

$$Ref\ E\eta = 0,5246 \left(\left[\frac{2484280}{2629900} \times 0,945 \right] + \left[\frac{145620}{2629900} \times 0,925 \right] \right)$$

$$Ref\ E\eta = 49,5\%$$

- Julho

$$Ref\ E\eta = 0,5246 \left(\left[\frac{3310370}{3422800} \times 0,945 \right] + \left[\frac{112430}{3422800} \times 0,925 \right] \right)$$

$$Ref\ E\eta = 49,5\%$$

Tabela 18- Valor de referência harmonizada em matéria de eficiência para produção separada de eletricidade em conformidade com a diretiva 2004/8/CE do Parlamento Europeu e do Conselho [5].

	Tipo de Combustível	Início de laboração						
		2001 e anterior	2002	2003	2004	2005	2006-2011	2012-2015
Materiais Sólidos	Carvão de Pedra/coque	42,7	43,1	43,5	43,8	44,0	44,2	44,2
	Lenha	30,4	31,1	31,7	32,2	32,6	33,0	33,0
	Biomassa Agrícola	23,1	23,5	24,0	24,4	24,7	25,0	25,0
	Resíduos Biodegradáveis Urbanos	23,1	23,5	24,0	24,4	24,7	25,0	25,0
Líquidos	Petróleo (Gasóleo+fuelóleo residual), GPL	42,7	43,1	43,5	43,8	44,0	44,2	44,2
	Biocombustíveis	42,7	43,1	43,5	43,8	44,0	44,2	44,2
Gasosos	Gás Natural	51,7	51,9	52,1	52,3	52,4	52,5	52,5
	Gás de Refinaria / Hidrogénio	42,7	43,1	43,5	43,8	44,0	44,2	44,2
	Biogás	40,1	40,6	41,0	41,4	41,7	42,0	42,0
	Gases de Fornos	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0

Nota: Valores em (%)

Tabela 19- Fatores de correção relativo às perdas da rede evitadas para aplicação de valores de referência harmonizados em matéria de eficiência para a produção separada de eletricidade [5].

Tensão	Eletricidade Exportada para a rede	Para eletricidade consumida no local
> 200 kV	1	0,985
100-200 kV	0,985	0,965
50-100 kV	0,965	0,945
0,4-50kV	0,945	0,925
< 0,4 kV	0,925	0,86

Poupança de Energia Primária (PEP)

- Janeiro

Obtenção do valor calculado da PEP, utilizando os valores da tabela 20 e aplicando a equação (1), tem:

Tabela 20- Valores utilizado para cálculo do indicador PEP – Janeiro

	Valor
$H\eta$	0,324
$E\eta$	0,411
$Ref H\eta$	0,900
$Ref E\eta$	0,495

$$PEP = \left[1 - \frac{1}{\frac{0,324}{0,900} + \frac{0,411}{0,495}} \right] \times 100(\%)$$

$$PEP = 15,98 \%$$

➤ PEP – Valor Absoluto

$$PEP = \frac{H_{CHP}}{Ref H\eta} + \frac{E_{TOTAL}}{Ref E\eta} - F_{TOTAL} \quad (17)$$

$$PEP = \frac{2073656}{0,900} + \frac{2629900}{0,495} - 6403876 = 1.213.115 \text{ kWh}$$

Nota: E_{TOTAL} assume o valor de E elec

➤ Rácio EP/EE

$$\text{Rácio EP/EE} = \frac{\text{EP}}{\text{EE}} \quad (18)$$

Aplicando a equação (18), temos

$$\text{RácioEP/EE} = \frac{6\,403\,876}{2\,629\,900} = 2,43$$

EP – Energia do combustível consumido pela instalação no mês. (EP = F_{TOTAL})

EE – Energia elétrica total produzida pela instalação no mês.(EE = E_{TOTAL})

- Julho

Obtenção do valor calculado da PEP, aplicando a equação (1) e valores descritos na tabela 21:

Tabela 21- Valores utilizado para cálculo do indicador PEP – Julho

	Valor
H_{η}	0,333
E_{η}	0,409
$Ref\ H_{\eta}$	0,900
$Ref\ E_{\eta}$	0,495

$$\text{PEP} = \left[1 - \frac{1}{\frac{0,333 \cdot 0,409}{0,900 + 0,495}} \right] \times 100(\%)$$

$$\text{PEP} = 16,40 \%$$

➤ PEP – Valor Absoluto

Aplicando a equação (17), temos o valor do PEP absoluto:

$$\text{PEP} = \frac{2784491}{0,900} + \frac{3422800}{0,495} - 8363802 = 1.644.824 \text{ kWh}$$

➤ Rácio EP/EE

Aplicando a equação (18), temos

$$\text{RácioEP/EE} = \frac{8\ 363\ 802}{3\ 422\ 800} = 2,44$$

➤ Classificação da Cogeração

A classificação da cogeração, é efetuada com base no cálculo do PEP e pelo enquadramento com o valor da potência elétrica instalada. O conhecimento destas duas variáveis, permite, através da consulta da tabela 22, efetuar a classificação da cogeração, podendo tomar a designação de Elevada Eficiência ou Eficiente.

Tabela 22- Classificação da Produção de Cogeração [3].

Potência	Requisitos	Classificação
Superior a 25 MW	PEP Igual ou Superior a 10% e Eficiência Global Superior a 70%	Cogeração de Elevada Eficiência
Entre 1 MW e 25 MW	PEP Igual ou Superior a 10 %	Cogeração de Elevada Eficiência
Inferior a 1 MW	PEP Existente	Cogeração de Elevada Eficiência
Superior a 25 MW	PEP Existente	Cogeração Eficiente
Entre 1 MW e 25 MW	PEP Existente	Cogeração Eficiente

De acordo com o Decreto-Lei n.º23/2010 [3], sendo a central de cogeração uma unidade que apresenta para os períodos de janeiro e julho um valor PEP superior a 10%, e Potência situada entre 1 a 25 MW, a central de é designada como cogeração de elevada eficiência.

5.7. Emissões de CO₂

5.7.1. Cálculo da energia primária consumida associada à produção de energia térmica útil e de eletricidade em cogeração

A determinação da energia primária consumida, associada à utilização de gás natural no processo de cogeração, não associado à produção de energia elétrica de cogeração, é calculada pela aplicação da equação (8), sendo que o valor de β assume o valor de zero, por não se considerarem perdas. Assim, temos:

- Janeiro

$$F_{n\text{ CHP}} = \frac{2629900 - 2511197,42}{\frac{2629900 + 0 \times 2073656}{6403876}} = 289.043 \text{ kWh}$$

É possível concluir que a energia primária associada ao combustível consumido no processo de cogeração, não associado à produção de energia elétrica de cogeração é de 289 043,92 kWh, conseqüentemente, o valor de energia associado à produção de energia elétrica no processo de cogeração é dado pela equação (7):

$$F_{\text{CHP}} = 6\,403\,876 - 289\,043,92 = 6.114.832 \text{ kWh}$$

Aplicação das mesmas equações, para o mês de:

- Julho

$$F_{n\text{ CHP}} = \frac{3422800 - 3341389.20}{\frac{3422800 + 0 \times 2784491}{8363802}} = 198.931 \text{ kWh}$$

É possível concluir que o combustível consumido no processo de cogeração, não associado à produção de energia elétrica de cogeração é de 189.931 kWh, e conseqüentemente, a energia associada à produção de energia elétrica será:

$$F_{\text{CHP}} = 836.3802 - 189.931 = 8.173.870 \text{ kWh}$$

5.7.2. Emissões de CO₂ associada à produção de energia elétrica

No que refere às emissões de CO₂ associadas à produção de Energia Elétrica num processo de cogeração, a partir dos valores estipulados no âmbito do IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change* [13], para cálculo, foi utilizado um fator de emissão de CO₂ para o gás natural de 201,96 g CO₂/kWh. Para cálculo é usada a equação (6).

De assinalar, que o valor a calcular, expressa as emissões de CO₂ associada à produção exclusiva de energia elétrica, em que toma em consideração o consumo de energia primária, associada ao gás natural, exclusivamente determinado para a produção de energia elétrica, equação (7)

- Janeiro

$$(E \cdot \text{CO}_2)_{\text{CHPi}} = \frac{(6114832,08 - \frac{2073656}{0,90}) \cdot (201,96)}{2511197,42} = 306,47 \text{ g CO}_2 / \text{kWh}$$

- Julho

$$(E \cdot \text{CO}_2)_{\text{CHPi}} = \frac{(8173870,18 - \frac{2784491}{0,90}) \cdot (201,96)}{3341389,20} = 307,04 \text{ g CO}_2 / \text{kWh}$$

5.7.3. Emissões de CO₂ Evitadas por Energia Elétrica Produzida (kWh)

Para estimar as emissões evitadas de CO₂ por kWh produzido de energia elétrica num processo de cogeração, quando comparado com a produção separada de calor e eletricidade utilizando o mesmo combustível, será aplicada a equação (9), pelo que temos:

- Janeiro

$$(E. E. CO_2)_{CHPi} = \frac{1213115,5}{2511197,42} \times 201,96 = 97,56 \text{ g CO}_2 / \text{kWh}$$

- Julho

$$(E. E. CO_2)_{CHPi} = \frac{1644824,4}{3341389,20} \times 201,96 = 99,42 \text{ g CO}_2 / \text{kWh}$$

5.8. Cálculo do Rendimento Elétrico Equivalente (R.E.E.)

De acordo com o artigo 4º do Decreto – Lei n.º 538/99 [6], com a redação dada pelo Decreto-Lei n.º 313/2001 [7], o R.E.E. é calculado através da equação (10).

Sendo o R.E.E. um coeficiente adimensional e sendo E, T, R e CR expressos nas mesmas unidades de energia. De referir que o CR não é aplicável para cálculos na presente instalação.

De acordo como estabelecido na alínea ii), do ponto n.º1, do artigo 4.º do Decreto-Lei n.º 313/2001 [7], para as instalações utilizando como combustível gás natural, o R.E.E. deverá ser superior a 0,55.

- Janeiro

$$R. E. E = \frac{2484280}{6403876 - \frac{2073656}{0,9 - 0,2 \times \frac{CR}{6403876}}} = 0,61$$

- Junho

$$R. E. E = \frac{3310370}{8363802 - \frac{2784491}{0,9 - 0,2 \times \frac{CR}{8363802}}} = 0,63$$

Os valores obtidos do cálculo da equação (10), determina para o Rendimento Elétrico Equivalente o valor de 0,61 e 0,63, respetivamente para janeiro e julho de 2016.

Concluimos que os valores superam o mínimo exigido, tendo uma margem significativa de conforto. Os valores agora calculados, como os anteriores, validam o cumprimento das exigências legais, permitindo continuar a operar a instalação de cogeração e servir a unidade hospitalar associada.

6. Conclusão

A avaliação efetuada à instalação de cogeração, permite em primeiro lugar expor a composição da mesma, com identificação dos principais equipamentos e descrição do princípio simplificado de funcionamento. Permite a compreensão da interligação dos equipamentos, dando a entender as energias consumidas e produzidas, associadas ao processo da cogeração. O objetivo principal da implementação de uma cogeração é a satisfação das necessidades requeridas pelo utilizador, neste caso uma unidade hospitalar. Acoplado ao fornecimento das energias térmicas entregues à unidade hospitalar, está a produção inerente de energia elétrica. À união destas duas vertentes, designa-se a instalação por cogeração.

O validação e cumprimento dos requisitos legais para garantir o funcionamento da unidade como cogeração, são fundamentais. O estudo efetuado, permite após o levantamento das produções e consumos energéticos mensais para os meses de janeiro e julho de 2016, avaliar a instalação de acordo com o Decreto-Lei nº 23/2010 [3], e respetivas alterações dispostas no Decreto-Lei 68/A-2015 [4]. Segundo este Decreto-Lei, com o cálculo da Poupança de Energia Primária, e em função da potência elétrica produzida, é possível efetuar a classificação da cogeração em Eficiente ou de Elevada Eficiência.

A obtenção de valores de PEP de 15,98% e 16,40% para janeiro e julho respetivamente, cumprem o regulamento, pois o valor calculado situa-se acima do valor de referência, que é de 10%. Sabendo que a potência instalada situa-se entre 1 a 25 MW, a instalação de cogeração foi classificada de Elevada Eficiência. A classificação determinada, para ambos os meses, situa-se no enquadramento de valores esperados. Os resultados verificados, enquadram-se nas elevadas necessidades térmicas que a unidade hospitalar requer para o seu funcionamento, tanto ao nível da climatização, como dos serviços de esterilização, cozinha e lavandaria. Refira-se, que a instalação da cogeração permite um acréscimo no fornecimento de energias térmicas, pelo que a colocação de serviços hospitalares com recurso à produção da unidade de cogeração, é aconselhável e recomendado para melhor utilização, racionalização e rácios de produção. Consequentemente tal aumentará a

eficiência da instalação e levará a ganhos nas reduções de emissões gasosas para a atmosfera.

Refira-se que a instalação de cogeração, por junção das produções da energia elétrica com a térmica, trás benefícios ambientais ao nível das emissões de CO₂ evitadas, em comparação com a produção separadas das energias referidas. De sublimar, que estes valores correspondem a 97,56 g CO₂ / kWh e de 99,42 g CO₂ / kWh, para janeiro e julho respetivamente.

Acrescenta-se aos valores calculados e exigidos por Decreto-Lei, a validação do valor de 0,55 para o Rendimento Elétrico Equivalente,

O Rendimento Elétrico Equivalente (R.E.E.), foi de 0,61 e 0,63 para janeiro e julho respetivamente, cumprindo as exigências legais.

De acordo com os valores calculados, podemos concluir que a instalação garante o aproveitamento das energias térmicas e elétricas produzidas, a sua utilização representa ganhos de conforto térmico e funcional para a unidade hospitalar, ganhos de estabilidade da rede elétrica e de proximidade da produção com o consumo, evitando perdas na linha de distribuição da rede elétrica. Representa, também ganhos na redução das emissões gasosas de CO₂, o que a torna ecologicamente mais enquadrada com as exigências atuais, com as preocupações ambientais existentes.

Bibliografia

Clementino, Luiz Donizeti. (2001). *A Conservação de Energia por Meio da Co-Geração de Energia Elétrica* (Edição 1). Brasil; Erica

Costa, Jorge Mendonça. (2011). *A Conservação em Portugal*. Desafios e Oportunidades
Local de publicação; Lisboa; COGEN/ISEL

Referências Documentais

- [1] DECRETO-LEI n.º 186/95 de 27 de Julho de 1995.
- [2] COGEN PORTUGAL – Curso de Sistemas e equipamentos para a produção térmica de calor e de eletricidade, Porto, Maio de 2013.
- [3] DECRETO-LEI n.º 23/2010 de 25 de Março de 2010.
- [4] DECRETO-LEI n.º 68-A/ 2015 de 30 de Abril de 2015.
- [5] Diretiva 2004/8/CE do Parlamento Europeu e do Conselho.
- [6] DECRETO-LEI n.º 538/99 de 13 de Dezembro de 1999.
- [7] DECRETO-LEI n.º 313/2001 de 10 de Dezembro de 2001.
- [8] DESCRIÇÃO / FUNCIONAMENTO MANUTENÇÃO - *Jenbacher, Grupo JMS 616 GS-N.L.*
- [9] MANUAL DE FUNCIONAMENTO – *Energest, Gerador de vapor por recuperação de calor.*
- [10] MANUAL DO CHILLER DE ABSORÇÃO – *Carrier/Sanyo, Modelo 16*
- [11] MANUAL DE PROCEDIMENTO DE ENTIDADE EMISSORA DE GARANTIA DE ORIGEM – Novembro de 2011, versão 2.4
- [12] JORNAL OFICIAL DA UNIÃO EUROPEIA, Decisão da Comissão de 19 Dezembro 2011
- [13] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE

