INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO

MESTRADO EM ENGENHARIA QUÍMICA

Análise e Otimização de um Projeto de Micro-Cogeração

ALZIRA CATARINA FERREIRA DA COSTA

Outubro de 2021

POLITÉCNICO
DO PORTO

Análise e Otimização de um Projeto de Micro-Cogeração

Alzira Catarina Ferreira Costa

Dissertação submetida como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Química, ramo de Energia e Biorrefinaria

Realizada em:

Filotipo, LDA – Engenharia e Energia

Orientador da Filotipo: Eng.° Jorge Roxo

Orientadoras do ISEP: Eng.ª Albina Ribeiro e Eng.ª Paula Neto

Agradecimentos

Na realização deste projeto no âmbito da dissertação de mestrado recebi apoio de diversas pessoas, as quais de certa forma tiveram grande importância para a sua realização e finalização.

Em primeiro lugar agradeço à Filotipo, por me ter aceite neste estágio curricular, a todos os colegas que trabalharam comigo, de realçar o meu orientador o Eng. Jorge Roxo, mas sem esquecer de todos os outros colegas que foram de grande ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço às minhas orientadoras do Instituto Superior de Engenharia, a Dra. Paula Neto e a Dra. Albina Ribeiro que me ajudaram a desenvolver este projeto e estiveram sempre presentes para tirar dúvidas do que fosse necessário.

Agradeço imenso aos meus colegas e amigos, por me ajudarem em momentos de distração e quando necessitei de apoio emocional. Agradeço ao meu namorado, por todas as palavras e todo o apoio proporcionado, além de todos os momentos que abdicou em estar comigo para que eu pudesse trabalhar neste projeto.

E por último lugar, mas bastante importante agradeço aos meus pais por estarem comigo em todos os momentos, pela força que me deram, pelas distrações que proporcionaram, por todas as palavras que disseram e por tudo que sacrificaram por mim.

Resumo

Nos dias de hoje, a cogeração pode ser vista como uma instalação muito importante no que toca à produção de energia, sendo vista como alternativa às centrais convencionais. A produção de energia em cogeração apresenta rendimentos bastante superiores quando comparado com a produção separada de eletricidade e calor além de uma poupança de energia primária significativa.

Considerando-se a micro-cogeração como uma alternativa energeticamente eficiente em relação a outros métodos de produção de energia, a presente dissertação teve como principal objetivo o estudo do dimensionamento de uma micro-cogeração a ser implantada num ginásio da região de Vila Nova de Gaia pela empresa Filotipo.

A instalação proposta é um motor designado por G-box20, com potência elétrica de 20 kW e térmica de 44 kW. Esta opção é escolhida através do levantamento energético do ginásio em causa relativamente aos consumos de eletricidade e de gás natural do ano de 2018, tendo sempre como foco o autoconsumo.

No que diz respeito à análise económica, esta cogeração irá permitir ao cliente uma poupança anual de 14 930 € conseguindo um retorno de investimento de 3,7 anos.

Por fim, realizou-se uma análise das perdas térmicas da tubagem do sistema de água da piscina, onde se conclui que as perdas térmicas são pequenas e que a colocação de um isolamento não seria viável.

Palavras-chave: Cogeração, Micro-Cogeração, Energia Térmica, Energia Elétrica, Potência, Autoconsumo, Eficiência

Abstract

Nowadays the cogeneration can be seen as a very important installation regarding the production of energy, seen as an alternative to the conventional plants. The production of energy in cogeneration represents far superior levels of efficiency compared to the split production of electricity and heat , saving a vast amount of primary energy.

Considering the micro-cogeneration as an energetically efficient alternative in relation to the other energy production methods, this dissertation had as a main objective of the study of the sizing of a micro-cogeneration in a gymnasium in Vila Nova de Gaia by the company Filotipo.

The proposed installation is an engine called G-box20, with an electrical power of 20 kWh and 44kWh thermal. This option is chosen through the energy survey of the gym in question regarding the consumption of electricity and natural gas in the year 2018, always focusing on self-consumption.

As far as economic analysis is concerned, this cogeneration will allow the customer an annual savings of 14 930€, achieving a return on investment of 3.7 years.

Finally, an analysis of the thermal losses of the piping of the swimming pool water system was carried out, which concludes that the thermal losses are small and that the placement of insulation would not be feasible.

Keywords: Cogeneration, Micro-Cogeneration, Thermal Energy, Electric Energy, Power, Self-Consumption, Efficiency

Índice

1. Introdução 1
1.1. Enquadramento e Objetivos 1
1.2. Apresentação da Empresa 2
1.3. Organização da Tese 3
2. Revisão Bibliográfica 5
2.1. A cogeração 5
2.1.1. Enquadramento legal 10
2.1.2. Fornecimento de Energia Elétrica 11
2.2. Micro-Cogeração em motores a gás natural 13
2.2.1. Parâmetros para análise do desempenho da cogeração 16
2.3. Caldeiras 18
2.4. Permutador de Placas 21
3. Análise do Projeto 25
3.1. Introdução 25
3.2. Características do ginásio – Projeto da Instalação 25
3.3. Revisão do Dimensionamento 28
3.3.1. Energia Elétrica 28
3.3.2. Energia Térmica 32
3.4. Validação da Cogeração 34
4. Avaliação Económica da Cogeração 37
4.1. Custos Energéticos Atuais 37
4.2. Instalação da Cogeração: custos de operação, benefícios e investimento 40
4.3. Avaliação Económica – Conclusão 45
4.4. Validação de Parâmetros 47
5. Análise da tubagem do sistema 49
5.1. Análise da tubagem sem isolamento 50
5.2. Análise à tubagem com isolamento 53
5.3. Avaliação Económica ao Isolamento 55
6. Conclusões e Sugestões de Trabalhos Futuros 57
Anexo A – Dimensionamento da cogeração 61
A.1 Dados Técnicos G-box 20 61
A.2 Análise Elétrica 61

A.3 Cálculo das Tarifas Médias de Eletricidade 62
Anexo B – Análise á Tubagem..... 63
B.1 Análise à tubagem sem isolamento..... 63
B.2 Análise à tubagem com isolamento 65

Índice de Figuras

Figura 2.1: Comparação da produção de energia entre uma central convencional e a cogeração [1] 5
Figura 2.2: Evolução da potência instalada de cogeração desde 2005 até 2019 [1]..... 6
Figura 2.3:Potência instalada de cogeração mensal no ano de 2020 comparativamente a 2019 [1] 6
Figura 2.4: Mercado europeu da micro-cogeração desde 2008 até 2015 [1] 8
Figura 2.5: Fluxo energético desde a produção até ao consumidor [10]..... 12
Figura 2.6: Desenho esquemático de um motor de explosão e etapas do seu funcionamento (adaptado) [7] 14
Figura 2.7: Diagramas (P,v) e (T,s) do ciclo Otto [7] 15
Figura 2.8: Cogeração a partir de um motor de combustão interna [1]..... 15
Figura 2.9: Esquema de uma caldeira de tubos de fumos [23]..... 19
Figura 2.10: Esquema de uma caldeira aquatubular [23] 19
Figura 2.11: Comparação entre uma caldeira convencional e uma caldeira de condensação [25] 20
Figura 2.12: Representação de uma caldeira de condensação (adaptado) [25]..... 21
Figura 2.13: Exemplo de um permutador de placas [28] 22
Figura 3.1: Projeto Inicial sem a Instalação da Cogeração..... 26
Figura 3.2: Esquema do projeto com a instalação da cogeração 27
Figura 3.3: Gráfico comparativo da energia térmica produzida pela cogeração e da energia térmica necessária, em kWh 35
Figura 4.1: Gráfico circular comparativo dos consumos energéticos, em kWh, de eletricidade dos períodos de ponta, cheia, vazio e super vazio e consumo de gás natural 39
Figura 4.2: Gráfico circular comparativo dos custos, em euros (€), de energia elétrica dos períodos de ponta, cheia, vazio e super vazio e custo de gás natural..... 40
Figura 5.1: Sistema de tubagem da piscina atual 49

Figura B. 1: Tabela com propriedades do ar [38]..... 63

Índice de Tabelas

Tabela 2.1. Vantagens e Desvantagens das Principais Tecnologias de Cogeração [7].... 9
Tabela 3.1: Distribuição de horas por período, num ciclo diário [14]..... 29
Tabela 3.2: Períodos de consumo e consumos elétricos (kWh), durante o ano de 2018 30
Tabela 3.3: Valores de potência elétrica para cada mês, por período horário..... 31
Tabela 3.4: Valores do consumo de combustível (kWh) e do período de faturação, em cada mês do ano..... 32
Tabela 3.5: Valores de potência térmica (kW) e potência térmica necessária (kW) para os diferentes meses do ano 33
Tabela 3.6:Produção Térmica (kWh), pela cogeração, em cada período ao longo do ano 35
Tabela 3.7: Valor de energia em excesso (%) e horas a reduzir nos meses de verão..... 36
Tabela 4.1: Tarifas médias (€/kWh) e (€/kW) de eletricidade para cada período do mês 38
Tabela 4.2: Custos (€) de eletricidade e gás natural sem a cogeração instalada para o ano de 2018 39
Tabela 4.3: Custos operacionais anuais (€), de gás natural e manutenção..... 41
Tabela 4.4:Produção elétrica mensal (kWh)..... 42
Tabela 4.5: Valores dos proveitos operacionais anuais de eletricidade 43
Tabela 4.6: Valor do proveito operacional de energia térmica..... 43
Tabela 4.7: Valor Total dos proveitos anuais de energia elétrica e térmica..... 44
Tabela 4.8: Investimento total da instalação da cogeração (€)..... 44
Tabela 4.9: Tabela resumo dos dados da avaliação económica 46
Tabela 4.10: Características do Motor de Cogeração G-box20 [34]..... 47
Tabela 5.1: Valores das temperaturas de entrada (T_e) e saída (T_s),da água e da temperatura média (T) em (°C). 50

Tabela A. 1: Dados Técnicos do modelo de cogeração G-box 20[34]..... 61
Tabela A. 2: Número de horas que cada mês apresenta em cada período, num ciclo diário..... 61
Tabela A. 3: Mapa de Cargas da Análise Elétrica..... 62
Tabela A. 4: Valores do consumo elétrico mensal (kWh), tarifas do termo de redes e energia ativa (€/kWh), custo da potência de ponta (€) e tarifa média (€/kWh) para o mês de janeiro 62

Nomenclatura

Símbolos:

Letras gregas:

ε – Emissividade do isolamento

η_E – Rendimento Elétrico

η_C – Rendimento Térmico

η_G – Rendimento Global

η_{cald} – Rendimento de uma caldeira de produção térmica

η_{te}- Rendimento de uma central termoelétrica

σ – Constante de Stefan–Boltzmann, no valor de 5,68E10^{-8} Wm^{-2}K^{-4}

ρ - Massa Volúmica em g/cm3

μ_{ar} – viscosidade do ar em N.s/m^2

ΔC – Economia do combustível

Letras romanas

A_e – Área exterior da tubagem em m^2

AR- Água da rede

B – Balneários

C – Energia primária consumida por queima do combustível, em kWh

CP – Consumo elétrico em horas de ponta, em kWh

cp – Calor específico em kJ/(kg.K)

Custo P.P – Custo da Potência de Ponta em €

CC1- Conjunto de caldeiras 1

CC2 – Conjunto de caldeiras 2

CF_i – *Cash-Flow* no ano i

COG- Cogeração

CL1 – Coletor 1

CR – equivalente energético dos recursos renováveis ou resíduos industriais, agrícolas ou urbanos consumidos anualmente na instalação de cogeração, em kWh

E – Energia elétrica produzida, em kWh

EE- Energia Elétrica

F – Filtro de partículas

g – Aceleração da gravidade, 9,8 m.s^{-2}

Gr – Número de Grashoft

h_{cn} – Coeficiente de transferência de calor por convecção natural em W/(m^2.K)

k – Condutividade térmica em W/(m.K)

L – Comprimento da tubagem em metros

NP – Número de horas no período de ponta, h

Nu – Número de Nusselt

P – Pressão

Pr - Número de Prandtl

PM – Potência do motor, 62kW

P1 – Permutador de placas 1

P3 – Permutador 3

P2 – Permutador 2

PP – Piscinas

PEP – Produção separada de energia térmica e elétrica

Q – Energia térmica produzida, em kWh

$Q_{convecção\ natural}$ – Calor perdido por convecção natural, em kW

$Q_{radiação}$ – Calor perdido por radiação, em kW

Ra – Número de Rayleigh

RCE – Relação Calor /energia elétrica da cogeração

RI – Retorno de Investimento

s – entropia especifica

t - taxa de desconto

T – Temperatura em °C

$\bar{T}$ -Temperatura média da tubagem, em °C

$\bar{T}_{filme}$ – Temperatura média do filme exterior, em °C

T_e–Temperatura à entrada da tubagem, em °C

T_s– Temperatura à saída da tubagem, em °C

T_{pe} – Temperatura da parede exterior da tubagem com isolamento, em °C

T_{ar} – Temperatura ambiente do ar, em °C

T1 – Tanque de água 1

TL1 – Tanque de Latentes 1

T.R – Tarifa do Termo de Redes em €/kWh

T.A – Tarifa da Energia Ativa em €/kWh

Siglas:

AQS- Águas Quentes Sanitárias

AT- Alta Tensão

BT – Baixa Tensão

BTE – Baixa Tensão Especial

BTN – Baixa Tensão Norma

CPD – Cogeradores de pequena dimensão

CUR - Comercializador de último recurso

DGEG - Direção-Geral de Energia e Geologia

EEGO - Entidade Emissora de Garantias de Origem

FUE – Fator de utilização de energia

IEE – Índice de Economia de Energia

MAT – Muito alta tensão

MT – Média tensão

OMIE - Operador do mercado elétrico

PEP – Poupança de energia primária

PME'S – pequenas e médias indústrias

REE – Rendimento Elétrico Equivalente

REN – Rede de Transporte Nacional

TIR – Taxa Interna de Rentabilidade

VAL – Valor Atual Líquido

1. Introdução

1.1. Enquadramento e Objetivos

Nos dias de hoje, o uso de energia é progressivamente maior e para satisfazer esta necessidade energética recorre-se, ainda, às energias convencionais, que têm como fontes o carvão, petróleo e gás natural (combustíveis fósseis).

Esta necessidade excessiva de energia tem cada vez mais implicações a nível político, ambiental e económico, o que tem levado a várias ações para economizar energia e reduzir o impacto dos combustíveis fósseis, como a adoção de formas alternativas de produção de energia elétrica mais limpa e eficiente.

Desta forma, um dos objetivos principais é o aumento da eficiência energética na indústria em geral, já que a maioria das atividades industriais como, por exemplo, a química, indústria do papel, produção e refinação de óleos, processamento de comida e indústria têxtil, são as atividades responsáveis pelo grande consumo de energia elétrica e térmica. A utilização de sistemas que produzem energia elétrica e que possam permitir um maior aproveitamento de energia térmica gerada, serão sistemas que podem oferecer alternativas economicamente viáveis e sustentáveis. Portanto, de um ponto de vista económico, utilizar o calor existente para a produção de energia é mais vantajoso do que a sua perda para o ambiente. Uma solução/alternativa possível é a utilização da cogeração em vez das centrais convencionais. Estas baseiam-se no princípio da produção combinada de calor e eletricidade. Apresentam uma elevada eficiência energética e ajudam na diminuição das emissões de gases de efeito de estufa e nas perdas de transporte, uma vez que aumentam o rendimento do uso dos combustíveis através da produção simultânea e local de calor e eletricidade. As tecnologias de cogeração em pequena escala denominam-se de micro-cogeração, com capacidades inferiores a 50 kWh [1].

Apesar da sua capacidade, a micro-cogeração ainda não alcançou todo o seu potencial, já que ainda é uma tecnologia recente e não existe uma relação de confiança com os futuros clientes; precisa ainda de conquistar mercados. Existem também alguns obstáculos a nível burocrático. No entanto, a aposta e o desenvolvimento desta nova tecnologia poderá vir a ser a base na mudança do sistema energético nacional e internacional.

O tema desta dissertação é análise e otimização de um projeto de micro-cogeração em implementação num ginásio, pela empresa Filotipo – Engenharia e Energia.

O objetivo principal deste trabalho baseia-se na análise do sistema a implementar, estudando os aspetos técnicos, económicos e legais da micro-cogeração e de todo o sistema, com o principal objetivo da sua otimização.

1.2. Apresentação da Empresa

A Filotipo é uma empresa criada em 2009, que conta, nos dias de hoje, com 3 sócios licenciados em áreas distintas da Engenharia. Desde o ano da sua criação teve um crescimento significativo e sustentado, aumentando a sua oferta de serviços e produtos. No ano de 2014, abriram o primeiro *showroom*, focado essencialmente em iluminação LED e Eficiência Energética. Neste momento, tem no seu portfolio soluções inovadoras para o autoconsumo (micro-cogeração a gás e/ou H_2, paineis solares híbridos e sistemas de biomassa) e contam com diversos clientes, incluindo a Super Bock Group, RAR, Cerealis, Grupo Pestana, Brisa, Ikea e as Câmaras Municipais de Porto, Matosinhos, Maia e Vila Pouca de Aguiar [2].

A missão da empresa consiste no estudo de soluções alternativas de redução dos custos e consumos da água e energia dos seus clientes. Para isso têm diversas soluções inovadoras e diversificadas onde se destacam os chuveiros ecológicos de 6 litros, a micro-cogeração, os paineis solares híbridos (produção em simultâneo de eletricidade e água quente), sistemas a biomassa e sistemas de monitorização em tempo real de consumos de eletricidade, gás e água [2].

A empresa trabalha tanto para clientes particulares como para empresas, analisando as necessidades do cliente/empresa e estabelecendo um plano de negócio. [2]

A Filotipo trabalha em conjunto com diversas marcas, como a 2G, a Abora e a Compte-R para apresentar soluções personalizadas para a produção de eletricidade e/ou energia térmica [2].

1.3. Organização da Tese

A presente dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos.

No capítulo 1 são expostos os objetivos e o enquadramento do trabalho.

No capítulo 2 é abordado o conceito de cogeração apresentando-se as diferentes tecnologias que podem ser utilizadas, assim como vantagens e desvantagens de cada uma delas. Apresenta-se ainda uma breve explicação sobre o fornecimento de energia elétrica e térmica. Neste capítulo é também explicado o funcionamento das caldeiras e permutadores de placas.

No capítulo 3 expõe-se uma revisão ao dimensionamento da cogeração, pela parte elétrica e térmica.

No capítulo 4 é apresentado uma avaliação económica da vantagem de instalar uma cogeração.

No capítulo 5 realizou-se uma análise à tubagem do sistema da piscina e a possibilidade de colocação de isolamento nas zonas de maiores perdas de calor.

Por fim, resume-se as principais conclusões e propostas para trabalhos futuros.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. A cogeração

Entende-se por cogeração processos em que há produção de duas formas de energia, sendo neste processo a produção de energia elétrica e térmica, a partir de um combustível que pode ser biomassa, fuelóleo, gás natural, resíduos industriais, etc [1, 3].

A cogeração começou a ser utilizada no século XX, quando se começou a dar importância à necessidade de aquecimento, em instalações residenciais e comerciais. No entanto, tem sido no presente século que este processo tem vindo a aumentar de dimensão, provando que é economicamente muito atrativo, resultando na montagem de cada vez mais instalações [1, 3].

Como se pode entender analisando a figura 2.1, a cogeração é o processo mais eficiente para produzir energia, comparando com uma central convencional [1].

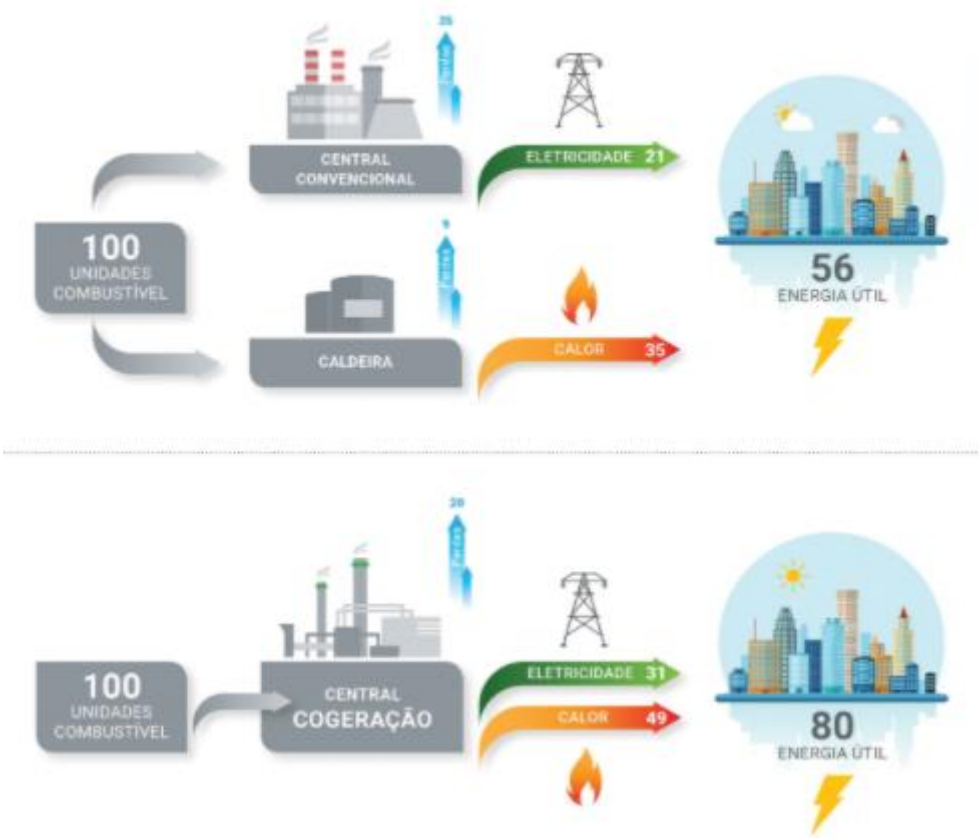

Figura 2.1: Comparação da produção de energia entre uma central convencional e a cogeração [1]

Em Portugal, as primeiras cogerações começaram a ser instaladas na primeira metade do século XX. Em 1995 foi publicado o Decreto-Lei nº. 186/95 e em 1999 o Decreto-Lei nº 38/99, sendo que estes diplomas ajudaram a valorizar a tecnologia. Em 2015, houve um desinvestimento das unidades de exploração, devido ao Decreto-Lei nº. 68-A/2015, impondo novos constrangimentos ao setor, como a diminuição dos apoios do Estado. A partir desse momento houve um decréscimo do ritmo da instalação deste processo como se pode perceber analisando a figura 2.2 [1].

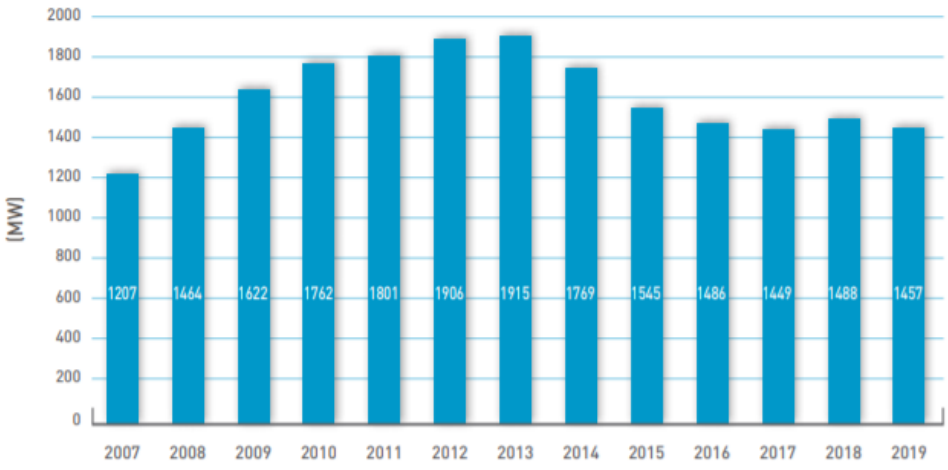

Figura 2.2: Evolução da potência instalada de cogeração desde 2005 até 2019 [1]

Os últimos dados apresentados pela Cogen, referem-se ao primeiro semestre do ano de 2020. Analisando o gráfico presente na figura 2.3, pode-se perceber que o ano iniciou com uma redução de 34 MW comparativamente com o início do ano anterior.

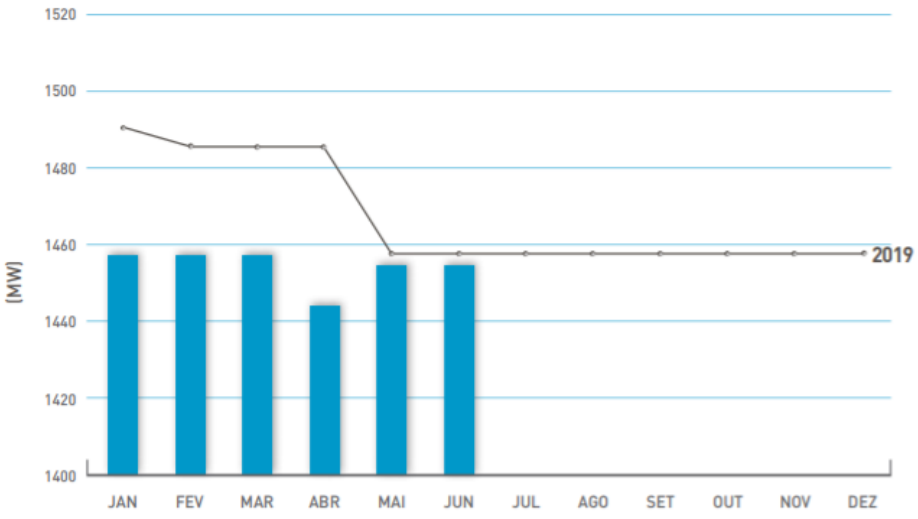

Figura 2.3:Potência instalada de cogeração mensal no ano de 2020 comparativamente a 2019 [1]

A cogeração, assim como qualquer sistema, tem as suas vantagens e desvantagens. Este processo tem o benefício de ser bastante eficiente, consumindo menos combustível para a mesma quantidade de energia produzida. É uma tecnologia mais amiga do ambiente, dado que, havendo reduções no consumo de combustível, existe uma redução nas emissões de poluentes para a atmosfera. Leva também a uma poupança económica, traduzindo-se na diminuição dos custos de eletricidade quando se compara com as centrais convencionais [4].

Quando se fala nas desvantagens desta tecnologia, pode-se indicar que os maiores problemas são o custo de investimento e as questões com a poluição sonora [4].

A eletricidade produzida na cogeração pode ser apenas para auto-consumo, ou auto-consumo com venda do excedente ou para venda à rede. No entanto, esta última opção nos dias de hoje não é muito utilizada, ou seja, instalar uma cogeração com o único objetivo de vender eletricidade tornou-se economicamente inviável. Contudo, existem certas instalações que, por questões técnicas, vendem a energia excedente. Apesar de tudo, as indústrias, com solução de cogeração, mantêm a sua ligação à rede de forma a compensar o diferencial entre a produção pela cogeração e o consumo pela fábrica [5, 6].

A micro-cogeração oferece as vantagens da cogeração numa escala reduzida, compatível para as necessidades energéticas de pequenos serviços (hotelarias, ginásios, pavilhões gimnodesportivos, etc) e PMES's, pequenas e médias empresas (agroaliementar, têxtil, etc)

Na micro-cogeração existe uma menor produção de energia elétrica, devido aos motores e turbinas utilizados, que apresentam um menor rendimento quando comparado com a cogeração de maiores dimensões. Todavia, teoricamente, é possível recuperar uma maior percentagem de energia térmica nas unidades de micro-cogeração, dado que apresentam menores perdas.

No mercado europeu este tipo de tecnologia tem aumentado a sua procura. Na figura 2.4, podemos analisar um gráfico do crescimento da micro-cogeração até 2015 [1].

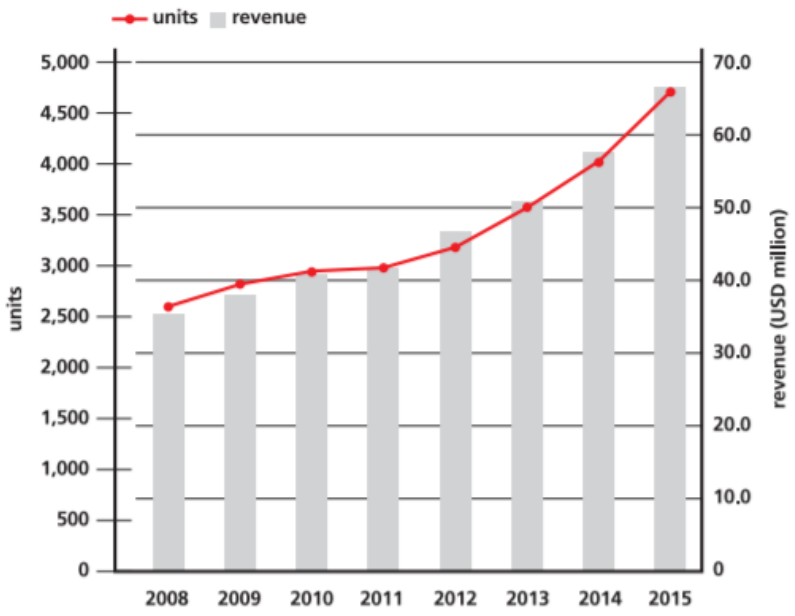

Figura 2.4: Mercado europeu da micro-cogeração desde 2008 até 2015 [1]

Na cogeração, a produção de energia térmica pode ser obtida a partir de diversas formas, desde o calor proveniente do alternador, o arrefecimento do óleo lubrificante, do carter e das temperaturas elevadas dos gases de escape. A energia térmica útil pode ser produzida sobre a forma de óleo térmico, água quente ou ar quente. Estas formas térmicas podem também promover a produção de frio, através da utilização de um *chiller* de absorção. Nesta situação, a partir da mesma forma de energia primária produzem-se, em simultâneo, três utilidades: eletricidade, calor e frio. Este processo designado por trigeração, surgiu na década de oitenta, do século passado, tendo sido aplicado principalmente no setor terciário, em edifícios de serviços e centros comerciais [1].

Os sistemas de cogeração podem ser divididos em 3 tipos de tecnologias: motores alternativos, sendo estes em ciclo a diesel (alimentados com fuelóleo ou gasóleo) e em ciclo Otto (alimentados com combustíveis gasosos, como gás natural ou propano), turbinas a gás natural e turbinas a vapor. As centrais de cogeração podem ser classificadas quanto ao tipo de ciclo que utilizam: simples, quando é instalado apenas um tipo de equipamento ou combinado, quando se combina um ciclo de motor alternativo ou turbina a gás com uma turbina a vapor [1].

Em Portugal, os processos mais utilizados são a turbina a gás natural e o motor a gás natural. Porém, a seleção da tecnologia depende da especificidade dos consumos térmicos de cada processo e da disponibilidade dos combustíveis [1].

Na tabela 2.1 apresenta-se uma síntese das principais vantagens e desvantagens de cada um dos tipos de tecnologias da cogeração [7].

Além dos motores, uma unidade de cogeração é constituída por permutadores de calor e caldeiras, que serão detalhados nos capítulos seguintes.

Tabela 2.1. Vantagens e Desvantagens das Principais Tecnologias de Cogeração [7]

Tecnologia	Vantagens	Desvantagens
Turbinas a Gás	Fiabilidade elevada; Emissões poluentes baixas; Calor a temperaturas elevadas (500-600 °C); Não necessita de refrigeração.	Operação com gás a alta pressão; Rendimento reduzido a carga parcial; Potência de saída diminui com o aumento da temperatura ambiente; Ineficiente em processos com poucas necessidades térmicas.
Motores de Explosão Motores de compressão interna	Rendimento elétrico elevado; Bom desempenho com carga parcial; Arranque rápido; Energia térmica a dois níveis de temperatura – gases de escape e arrefecimento do motor; Manutenção no local com pessoal não especializado; Operação com gás a baixa pressão.	Custos de manutenção elevados; Calor de baixa Temperatura; Emissões poluentes relativamente elevadas; Necessita de refrigeração; Ruído de baixa frequência.
Turbinas a Vapor	Rendimento global elevado; Operação com diversos tipos de combustível; Grandes quantidades de calor disponíveis; Vida útil e fiabilidade elevadas; Vapor a alta pressão.	Arranque lento; Rendimento elétrico baixo.
Microturbinas	Dimensões compactas; Peso reduzido; Emissões poluentes baixas; Não necessita de refrigeração.	Custos Elevados; Calor de baixa Temperatura; Tecnologia em maturação.
Pilhas de combustível (*Fuel Cells*)	Emissões poluentes baixas; Ruído baixo; Não tem peças rotativas;	Custos Elevados; Fiabilidade incerta; Tecnologia em maturação; Necessidade de pré-processamento do combustível.

2.1.1. Enquadramento legal

Uma unidade para ser considerada micro-cogeração deve ter uma potência elétrica inferior a 50 kWh, segundo a diretiva 2004/8/CE.

O decreto de lei nº 23/2010 de 25 de março procedia ao enquadramento da atividade de produção em cogeração, estabelecendo o respetivo regime jurídico e remuneratório. Este decreto referia que uma cogeração devia apresentar uma poupança de energia primária de 10% em relação à produção separada de eletricidade e calor, para ser considerada de elevada eficiência. As centrais que não atingissem este valor seriam consideradas apenas eficientes [8].

O regime remuneratório assentava em duas modalidades, acessíveis a cogerações eficientes ou de elevada eficiência. A modalidade geral era acessível a todas as cogerações sem restrições de potência instalada e a remuneração da energia térmica e elétrica produzida fazia-se primordialmente, no âmbito das regras de mercado.

A modalidade especial era acessível somente a cogerações com capacidade instalada igual ou inferior a 100 MW, e a remuneração da energia térmica processava-se em condições de mercado, mas a energia elétrica era entregue à rede, que correspondia ao comercializador de ultimo recurso (CUR) [8].

No entanto, o Decreto-Lei n.º 23/2010, de 25 de Março, foi alterado pelo Decreto-Lei n.º 68-A/2015, de 30 de abril, que procedeu à adaptação do regime da atividade da Cogeração em Portugal, estabelecendo, entre outras, as regras para a emissão das garantias e certificados de origem da eletricidade produzida em cogeração bem como a definição das competências relativas à EEGO, Entidade Emissora de Garantias de Origem.

Segundo o novo Decreto-Lei, o regime remuneratório geral passa a dividir -se em duas submodalidades: uma que permite a injeção total ou parcial da energia produzida na rede elétrica de serviço público (submodalidade B) e outra que possibilita o autoconsumo da referida energia, beneficiando, nas instalações de cogeração com potência elétrica de injeção inferior ou igual a 20 MW, de compra garantida do excedente pelo comercializador de último recurso (submodalidade A). O regime remuneratório especial aplicável à energia produzida em cogeração passa a aplicar -se às instalações de cogeração com potência elétrica instalada inferior ou igual a 20 MW, as quais podem ainda

beneficiar de prémios de elevada eficiência e renovável, consoante a poupança de energia primária verificada e a fonte primária de energia utilizada [9].

O Decreto-Lei n.º 68.º-A/2015, de 30 de abril, na sua atual redação, remete para regulamentação posterior, a aprovar por portaria, um conjunto de normas associadas ao licenciamento, à operacionalização, à realização e à remuneração da atividade de produção em cogeração, em especial de cogeradores em modo de autoconsumo, micro-cogeradores (Micro) e de cogeradores de pequena dimensão (CPD). Foi neste âmbito que a Portaria n.º 173/2016, foi publicada [10].

No que respeita à compra pelo CUR do excedente de produção de cogeradores no regime geral de remuneração, com potência de injeção igual ou inferior a 20MW, que operam em modo de autoconsumo (submodalidade A), a remuneração desta energia elétrica prevista nesta Portaria será efetuada ao preço médio (aritmético) mensal do OMIE (operador do mercado elétrico) multiplicada por: [10]

- $\alpha = 1$ nos períodos de ponta e cheio;
- $\alpha = 0{,}85$ nos períodos de vazio.

Os contratos entre os cogeradores e o comercializador de último recurso (CUR) têm um prazo máximo de 10 anos, renováveis por período máximo de 5 anos. O artigo 27.º da portaria refere que a DGEG (Direção-Geral de Energia e Geologia) pode determinar que estes contratos não sejam renovados por razões relacionadas com a sustentabilidade ou com política energética [10].

O exercício da atividade de produção em cogeração é livre e pode ser exercida por pessoas singulares ou coletivas, de direito público ou privado. No entanto é necessário a atribuição de uma licença de produção e exploração [8].

2.1.2. Fornecimento de Energia Elétrica

O fornecimento de energia elétrica é realizado pelo distribuidor, atualmente E-redes. A forma como esta é contabilizada depende de diversas variáveis, que vão ser explicadas no presente subcapítulo.

A eletricidade é transportada em grandes distâncias pela rede de transporte nacional (REN), em muito alta tensão (MAT), como se pode verificar na figura 2.5. É

depois entregue à rede de distribuição para que haja uma transformação através de subestações e de centros produtores para a condução da energia em alta, média, e baixa tensão (AT, MT e BT) até às instalações consumidoras dos clientes. As ligações de baixa tensão podem ainda ser divididas em baixa tensão normal (BTN) e baixa tensão especial (BTE). A maioria das pequenas e médias empresas são abastecidas em BTE ou em MT [11, 12].

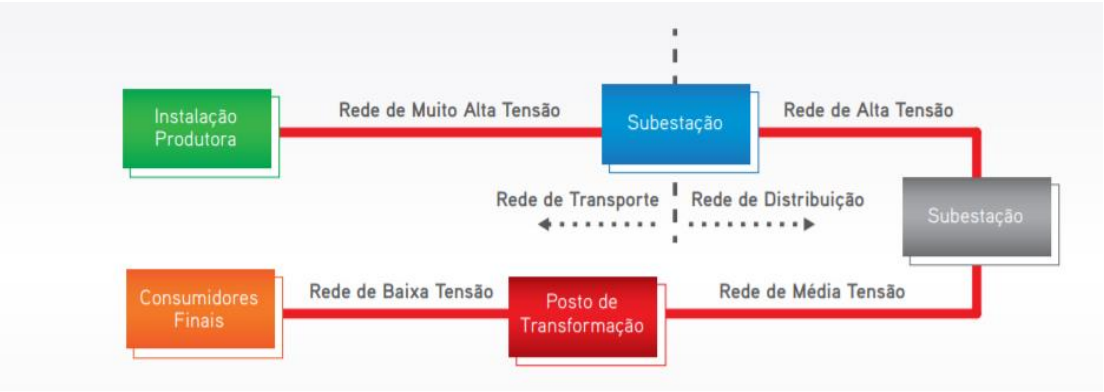

Figura 2.5: Fluxo energético desde a produção até ao consumidor [10]

Além do nível de tensão, a instalação é também caracterizada pela potência contratada. Esta define o valor instantâneo máximo de energia elétrica que uma instalação de consumo pode receber. A potência contratada é atualizada pelo máximo valor de potência tomada ocorrida nos últimos 12 meses (incluindo o mês de faturação), sendo o maior valor de potência ativa média verificada na instalação em períodos de 15 minutos, durante todo o período de medição. Por exemplo, se num certo mês a potência tomada atinge um valor muito elevado, a potência contratada vai atualizar e vai apresentar esse valor durante esse mês e nos 11 meses seguintes [5, 13].

No entanto, a potência contratada apresenta valores mínimos dependendo do nível de tensão. Em instalações com tensões de MT ou superior, a potência contratada não pode ser inferior a 50% da potência instalada. Em instalações abastecidas em BTE, a potência contratada não pode ser inferior a 41,41 kW.

A forma como o consumo de eletricidade se distribui, durante a semana, corresponde ao ciclo horário. Existem 3 ciclos distintos: [14]

- Ciclo Diário – onde os períodos horários são iguais em todos os dias do ano;
- Ciclo Semanal – onde os períodos horários diferem entre dias úteis, sábados e domingos, assim como entre Inverno e Verão;
- Ciclo Semanal Opcional - semelhante ao ciclo semanal, mas com distribuição diferente do número de horas por período.

Cada ciclo possui períodos horários que se dividem em horas de pontas, cheias, vazio e super-vazio dependendo dos hábitos dos consumidores. As horas de ponta e as de super-vazio são, respetivamente, as que apresentam maior e menor ocupação da rede de distribuição. Esta distribuição está relacionada com os níveis de tensão, dado que nem todos os níveis apresentam o mesmo número de períodos horários [5, 13, 14].

2.2.Micro-Cogeração em motores a gás natural

No corrente projeto, a tecnologia de micro-cogeração usa um motor a gás natural e o presente capítulo servirá para aprofundar este tema.

Existem dois tipos de motores de combustão interna: os chamados de combustão, que usam normalmente gasóleo e os de explosão, que usam normalmente o gás natural como combustível. A principal diferença consiste na forma como o combustível é queimado [5].

A unidade de micro-cogeração instalada neste projeto apresenta um motor de combustão de explosão, que tem por base o ciclo Otto, ou seja, a combustão não se dá de forma espontânea. O ar e o combustível são misturados antes de entrarem no cilindro e a ignição dá-se por meio de uma faísca [4, 5, 7].

Estes motores são os mais utilizados em instalações de cogeração, dado que possuem mais que uma fonte de recuperação de calor: gases de exaustão, circuitos de refrigeração do óleo e do motor [7].

Na figura 2.6, apresenta-se um desenho esquemático de um motor de explosão e as etapas do seu funcionamento.

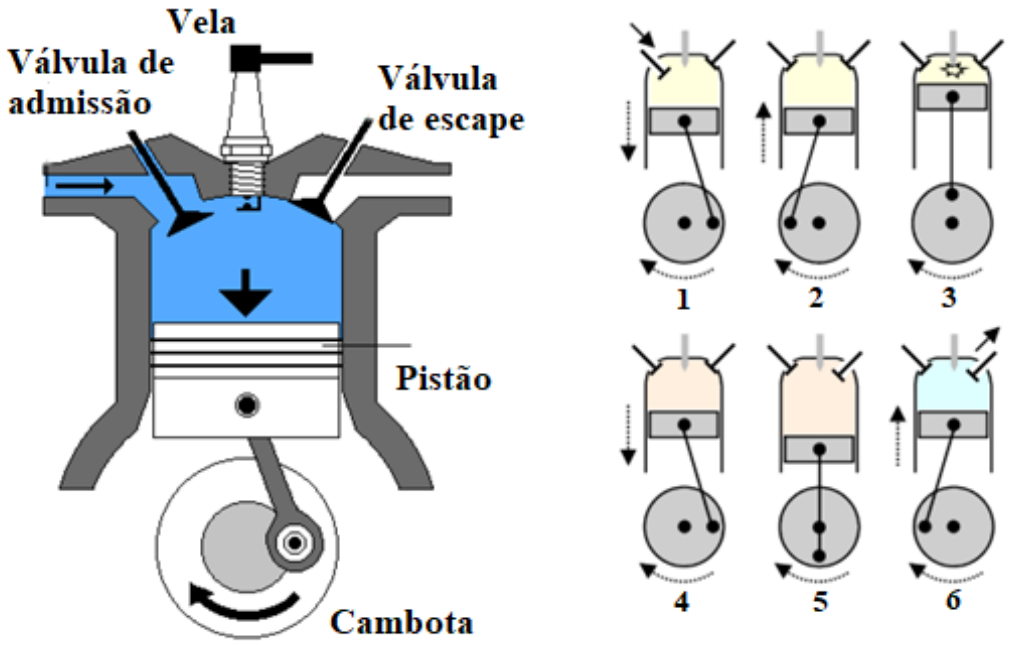

Figura 2.6: Desenho esquemático de um motor de explosão e etapas do seu funcionamento (adaptado) [7]

A câmara de combustão contém um cilindro, duas válvulas (uma de admissão e outra de escape) e uma vela de ignição. No interior do cilindro, existe um pistão ligado a uma biela que se encontra articulada com a cambota, que transforma o movimento reto do conjunto pistão-biela num movimento rotativo [4].

Este tipo de motor é muitas vezes chamado de motor a quatro tempos, ou seja, neste motor ocorrem 4 etapas, conhecidas por admissão, compressão, expansão e escape. Em primeiro lugar, a válvula de admissão abre e injeta-se no cilindro (câmara de combustão) uma mistura de combustível e ar, aqui a cambota roda meia-volta. De seguida a válvula fecha e a mistura é comprimida. Nesta etapa a vela provoca uma faísca, aqui a cambota roda mais meia-volta. Na terceira etapa, a mistura incendeia-se e explode, os gases expandem e fazem com que o pistão desça e a cambota rode mais meia-volta. Por último, ocorre a exaustão dos gases de combustão e a cambota perfaz mais meia-volta. A cambota realiza duas voltas que caracterizam um ciclo de trabalho. O movimento que ocorre nos pistões promove trabalho ao veio através da biela. A energia mecânica do veio é depois transformada em energia elétrica através de um alternador [5, 7].

Como escrito anteriormente, este motor tem por base o ciclo Otto, ciclo termodinâmico ideal, e na figura 2.7 apresentam-se os diagramas (P,v) (pressão, volume) e (T,s) (temperatura, entropia), correspondentes a este ciclo. Os pontos referidos na imagem correspondem aos 4 tempos do motor. De 0-1 ocorre a aspiração da mistura ar-combustível, sucede a compressão isentrópica da mistura em 1-2 , em 2-3 consequência da adição de calor a volume constante através da ignição e explosão, existe um aumento de pressão, em 3-4 acontece a expansão isentrópica e por último na transformação 4-1 existe a rejeição de calor, quando a válvula de escape é aberta [7].

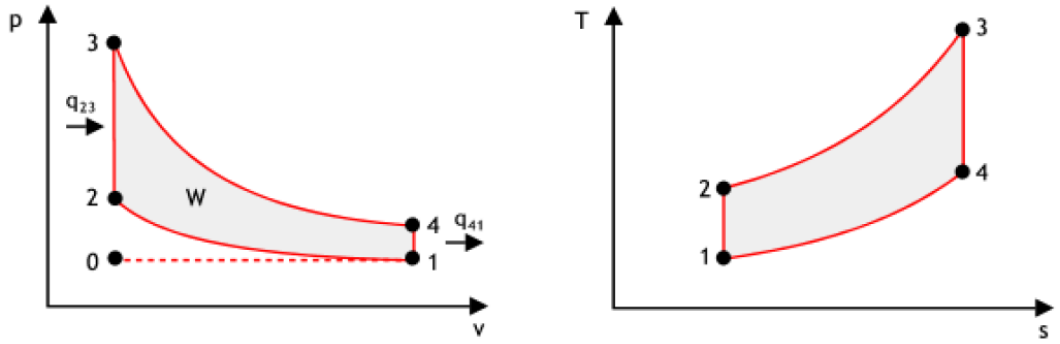

Figura 2.7: Diagramas (P,v) e (T,s) do ciclo Otto [7]

Os sistemas de cogeração que utilizam este tipo de equipamento são constituídos por um motor de combustão interna, uma caldeira de recuperação de calor e um permutador de calor, usado na refrigeração do circuito do motor, representados na figura 2.8 [4].

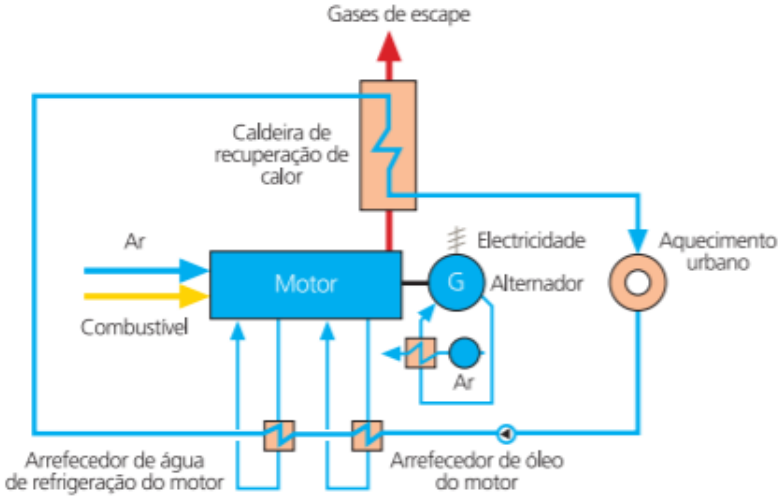

Figura 2.8: Cogeração a partir de um motor de combustão interna [1]

2.2.1. Parâmetros para análise do desempenho da cogeração

Existe uma série de parâmetros que podem caracterizar o sistema de cogeração. Considerando a produção de energia elétrica e térmica separadamente, existem dois tipos de rendimentos [15]:

$$Rendimento\ Elétrico = \eta_E = \frac{E}{C} \times 100 \qquad \text{Equação 1}$$

$$Rendimento\ Térmico = \eta_t = \frac{Q}{C} \times 100 \qquad \text{Equação 2}$$

Em que:

E – Energia elétrica produzida, em kWh;

Q – Energia térmica disponível, em kWh;

C – Energia primária consumida por queima do combustível, em kWh.

Contudo, como o sistema de cogeração envolve a produção das duas formas de energia, o rendimento global ou fator de utilização de energia, FUE, é expresso como [15, 16]:

$$\eta_G = FUE = \frac{E + Q}{C} \times 100 \qquad \text{Equação 3}$$

Um outro parâmetro utilizado na caracterização das instalações de cogeração é a relação calor / energia elétrica, RCE, dado pela equação 4 [15]:

$$RCE = \frac{Q}{E} \qquad \text{Equação 4}$$

Esta relação apresenta valores típicos dependendo da tecnologia utilizada, 1-4 para turbinas de contrapressão, 0,5-1,5 para turbinas de gás, 0,2-0,8 para motores a diesel e 1,1-2,5 para motores de combustão interna que funcionam de acordo com o ciclo de Otto.

Para comparar os sistemas de cogeração com a produção separada das energias, calcula-se também o rendimento elétrico equivalente, REE.

$$REE = \frac{E}{C - \frac{Q}{\eta_C}} \qquad \text{Equação 5}$$

Este rendimento deve ser superior a um valor de referência do rendimento de produção de eletricidade. Segundo a legislação portuguesa, DL 538/99 de 13 de dezembro, o valor deveria ser superior a 55%, que correspondia na época, ao rendimento mais elevado de produção de energia elétrica numa central em Portugal. No entanto, em 2001, devido ao Decreto-Lei 313/2001 de 10 de Dezembro, a expressão aparece agora com um formato mais elaborado, equação 6, para ter em conta o consumo de combustíveis de origem renovável [15, 17].

$$REE = \frac{E}{C - \frac{Q}{0{,}9 - 0{,}2 \times \frac{CR}{C}}} \qquad \text{Equação 6}$$

Em que:

- CR – equivalente energético dos recursos renováveis ou resíduos industriais, agrícolas ou urbanos consumidos anualmente na instalação de cogeração, em kWh.

De acordo com o Decreto de 2001, o *REE* de uma instalação de cogeração portuguesa deve ser: superior a 0,55 para instalações utilizando como combustível gás natural, gases de petróleo liquefeitos ou combustíveis líquidos, à exceção do fuelóleo; superior a 0,50 para instalações utilizando como combustível fuelóleo, isoladamente ou em conjunto com combustíveis residuais; superior a 0,45 utilizando como combustível biomassa ou combustíveis residuais [16, 17].

Um outro parâmetro muito importante é designado por Índice de Economia de Energia, IEE, em que se compara a potência do combustível da instalação de cogeração, usada na satisfação das necessidades elétricas e térmicas, com a que seria necessária para a mesma produção usando centrais convencionais: uma central termoelétrica com rendimento, $\eta_{te,}$ e uma caldeira de produção de energia térmica com rendimento, η_{cald} [18].

Para o cálculo deste índice é necessário determinar em primeiro lugar a economia do combustível, que se obtém com a instalação de uma cogeração em comparação com duas centrais a funcionar separadamente [18].

Essa economia de combustível pode ser definida como ΔC e é dada por:

$$\Delta C = \frac{Q}{\eta_{cald}} + \frac{E}{\eta_{te}} - C \qquad \text{Equação 7}$$

Então:

$$IEE = \frac{\Delta C}{\left(\frac{Q}{\eta_{cald}} + \frac{E}{\eta_{te}}\right)} \qquad \text{Equação 8}$$

Para efeitos de cálculo pode-se considerar que $\eta_{te} = 0{,}5$ e $\eta_{cald} = 0{,}9$, valores típicos para estes rendimentos.

Este índice é talvez o mais relevante na avaliação do desempenho económico das instalações de cogeração, na medida em que é utilizado regularmente na avaliação económica da instalação de uma cogeração. Na legislação portuguesa este índice é definido como poupança de energia primária, PEP. Segundo o Decreto de Lei nº68-A/2015 de 30 de abril, uma unidade de cogeração apenas é considerada de elevada eficiência quando apresenta um PEP superior a 10%.

2.3. Caldeiras

Entende-se por caldeira, um equipamento pressurizado, que transforma água líquida em água quente ou em vapor a alta pressão, através de uma fonte de energia.

As caldeiras são de uma forma geral constituídas por um vaso alimentado por água ou outro fluido, por um queimador, que permita a queima de um combustível cuja energia é posta ao serviço da água, permitindo a sua vaporização a alta pressão ou o seu aquecimento. Um projeto de uma caldeira, na prática deve ser confiável e robusto.

Os combustíveis utilizados podem variar entre madeira, biomassa, carvão, gás ou diesel. Existem também equipamentos elétricos que usam resistências para o aquecimento ou então geradores com fissão nuclear [19, 20].

A grande parte das caldeiras produz vapor saturado. No entanto, existem algumas de vapor sobreaquecido, que apesar de fornecerem vapor a uma temperatura mais alta, podem apresentar menores eficiências térmicas, porque requerem uma temperatura de gases de exaustão mais elevada, perdendo-se aqui bastante calor. Existem várias formas de contornar este dilema, como a utilização de um permutador para pré-aquecer a água-fria ou um aquecedor de ar que aproveita o calor dos gases de exaustão [20].

Podem ser divididas em dois grandes grupos, segundo o modo como a água é exposta à ação do calor: de gás tubulares ou tubos de fumos e de tubos de água ou aquotubulares [21].

As caldeiras de tubos de fumos, como a representada na figura 2.9, possuem os gases de combustão a circular pelo interior dos tubos enquanto a água/vapor se encontra no exterior. Nas aquotubulares, como na figura 2.10, os gases de combustão circulam pelo exterior dos tubos enquanto a água/vapor circula pelo interior dos tubos [22, 23].

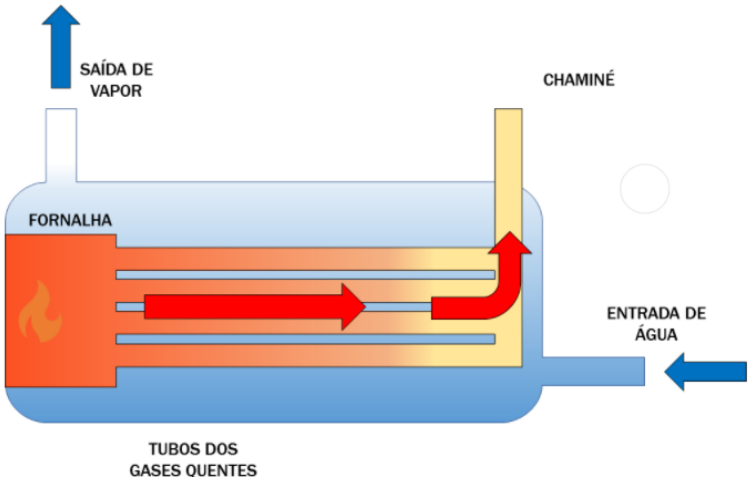

Figura 2.9: Esquema de uma caldeira de tubos de fumos [23]

Comparando com as de tubos de fumo, estas possuem um menor volume de água proporcionalmente à quantidade de vapor que produzem e uma maior superfície de aquecimento, o que permite que tenham uma menor dimensão para a mesma vaporização [21].

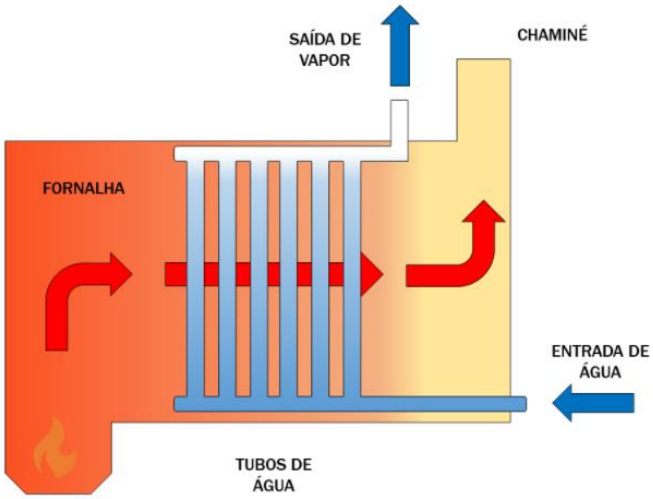

Figura 2.10: Esquema de uma caldeira aquatubular [23]

Quanto aos métodos de circulação, podem-se subdividir em caldeiras de circulação natural e de circulação forçada. Na primeira, a circulação da água através dos tubos depende inteiramente da diferença de densidades entre uma massa de água fria com movimento descendente e outra de massa de água com bolhas de vapor e de movimento ascendente. A circulação forçada da água através dos tubos é realizada por meio de uma eletrobomba. Neste tipo de caldeira a tubagem é de menor diâmetro e, consequentemente, tem maiores velocidades de circulação e vaporização da água [24].

As caldeiras de condensação são caldeiras que produzem água quente. Ao contrário das caldeiras que fornecem vapor e que libertam os gases de combustão livremente para a atmosfera, as caldeiras de condensação permitem a utilização da energia contida nestes gases. Isto traduz-se num maior rendimento energético do equipamento, visto que aproveitam quase integralmente o poder calorífico do combustível utilizado. Numa caldeira convencional o aproveitamento de energia é aproximadamente de 90%, enquanto numa caldeira de condensação o aproveitamento de energia é acima dos 100% (a caldeira emite mais energia do que a que necessita para funcionar), como visto na figura 2.11 [25, 26].

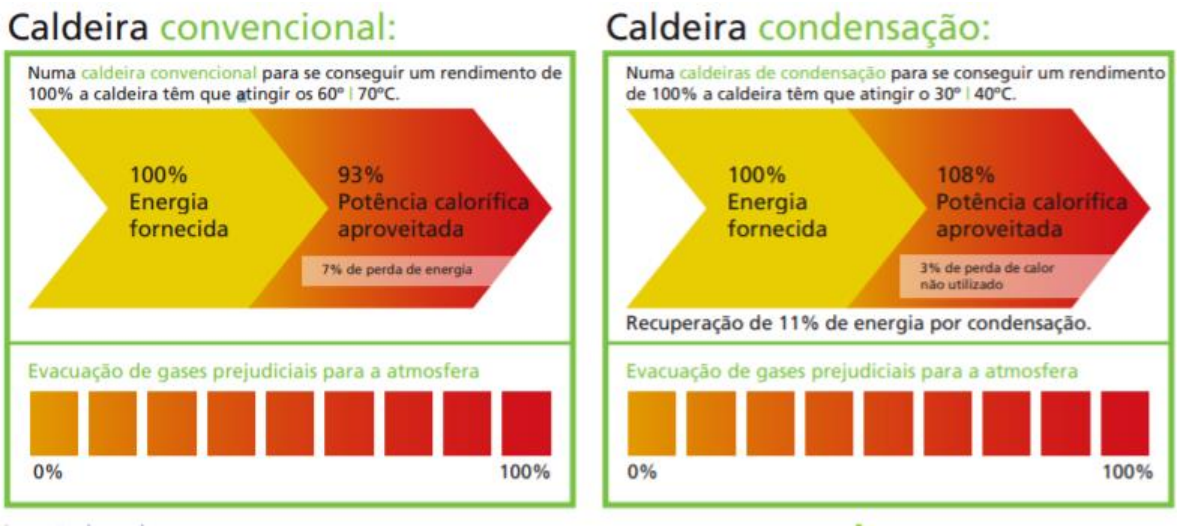

Figura 2.11: Comparação entre uma caldeira convencional e uma caldeira de condensação [25]

O combustível é injetado no queimador da caldeira de modo a aquecer a água circulante na rede de tubos do permutador primário, figura 2.12. Após a queima do combustível os gases de escape gerados passam pelo permutador secundário aproveitando-se o calor latente de condensação do vapor de água contido nos gases de escape, isto explica o aumento da eficiência na ordem dos 10-12%, quando comparada com uma caldeira convencional.

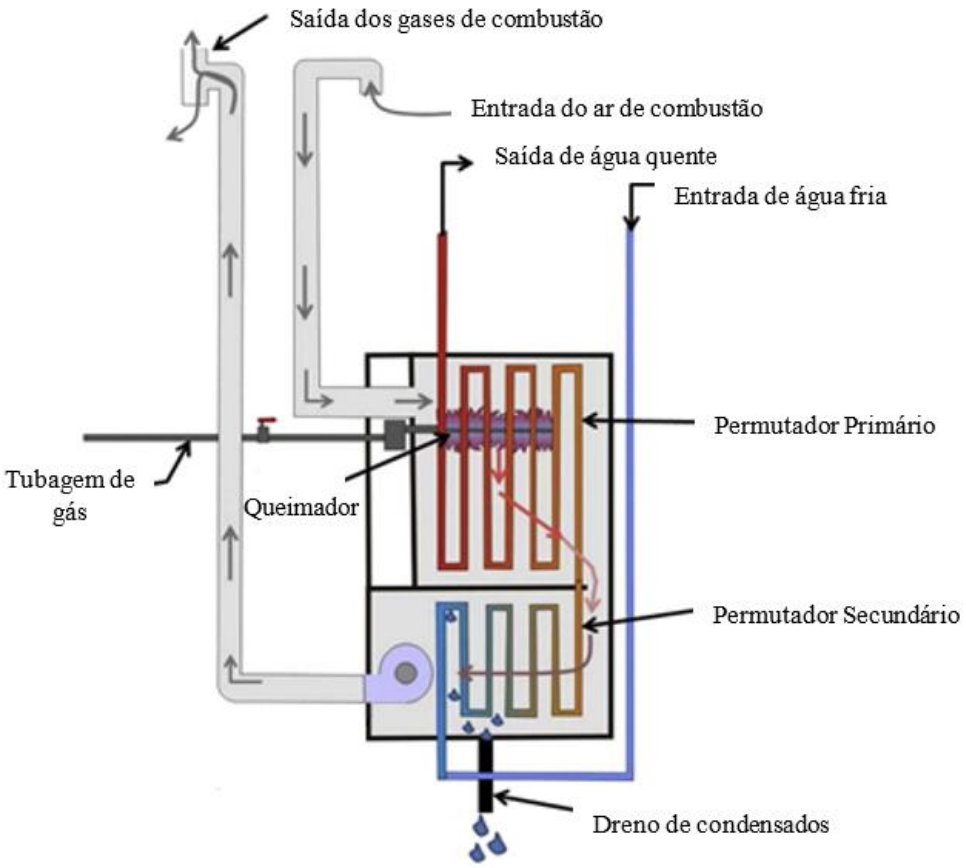

Figura 2.12: Representação de uma caldeira de condensação (adaptado) [25]

2.4. Permutador de Placas

Um permutador de calor é um equipamento que permite realizar a transferência de calor entre dois ou mais fluidos a temperaturas diferentes. São projetados por empresas para processos específicos, mas podem ser construídos em várias configurações, tipos e tamanhos [27, 28].

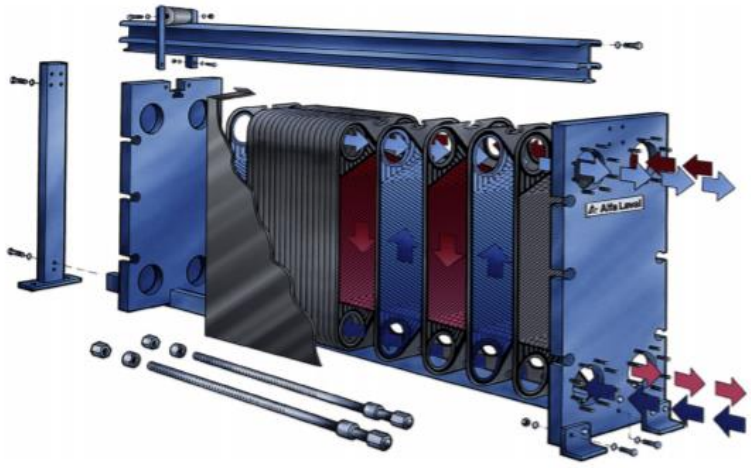

Figura 2.13: Exemplo de um permutador de placas [28]

Um permutador de placas, como o representado na figura 2.13, consiste num conjunto de placas de metal finas com orifícios para entrada e saída de fluido, mantido entre duas placas de aço inoxidável utilizando um sistema de fixação adequado. Cada par de placas forma um canal através do qual escoa um dos fluidos. Os fluidos frio e quente escoam em passagens alternadas e o calor é transferido do fluido quente para o frio através da placa metálica que os separa [27, 29, 30].

Assim, ao longo do permutador a temperatura dos fluidos altera-se no caso de não haver mudança de fase de nenhum deles. Pode acontecer que a temperatura do fluido quente se mantenha inalterada, quando acontece condensação, ou seja, entra como vapor saturado e sai como líquido saturado, enquanto a temperatura do fluido frio vai aumentando desde a entrada à saída, pois recebe o calor cedido pelo fluido quente. Por outro lado, pode acontecer que a temperatura do fluido frio se mantenha constante, quando sofre ebulição, é alimentando ao permutador como líquido saturado e sai como vapor saturado [27–30].

Estes permutadores são aplicados em diversas indústrias químicas, podem ser utilizados numa grande gama de fluidos e condições de operação com temperaturas até os 250 °C, e pressões até 25 atm. Podem ser usados para sistemas líquido-líquido, gás-líquido ou líquido-vapor [27–30].

Apresentam algumas vantagens dado que são permutadores muito compactos e ocupam áreas de instalação muito pequenas, além disso podem ser facilmente desmontáveis. Apresentam coeficientes de transferência de calor elevados, pelo que conseguem utilizar fluidos com diferenças de temperaturas baixas. Além disso são permutadores muito baratos (têm um custo inferior quando comparados com outros) e permitem a adição e remoção de placas térmicas caso se pretenda alterar algum parâmetro do projeto. A maior desvantagem que apresentam é referente aos limites de pressão e temperatura e às fugas que pode haver através das vedações [27–30].

As placas utilizadas podem apresentar diferentes tipos de ondulações, sendo esta rugosidade que permite aumentar a resistência mecânica e a turbulência do escoamento dos fluidos nos canais, conferindo maior eficiência térmica quando comparado com os permutadores de carcaça e tubos.

3. Análise do Projeto

3.1. Introdução

O projeto a ser analisado, consiste na avaliação de um sistema de micro-cogeração em implementação num ginásio com piscina, na área metropolitana do Porto. O objetivo da cogeração instalada, é o fornecimento de energia elétrica, para auto-consumo, ao mesmo tempo que produz energia térmica, diminuindo os gastos existentes nas caldeiras.

É possível dividir o projeto em etapas distintas:

- Produção de energia elétrica;
- Aquecimento da água da piscina;
- Aquecimento das águas quentes sanitárias -AQS;

3.2. Características do ginásio – Projeto da Instalação

O ginásio fica localizado mais precisamente em Vila Nova de Gaia, funcionando de segunda à sexta das 07h00 às 21h00, aos sábados das 09h00 às 14h00 e aos domingos e feriados das 10h00 à 13h00.

O ginásio apresenta uma necessidade elétrica de 304 552 kWh/ano e térmica 642 570 kWh/ano, tendo em conta o ano de 2018. As necessidades térmicas são satisfeitas recorrendo a 6 caldeiras de condensação.

A instalação de uma cogeração surgiu no intuito de que é uma instalação mais eficiente e que permite atingir uma poupança ano elevada, como se irá analisar.

O projeto atual apresenta-se na figura 3.1, onde estão representadas as várias caldeiras, e outros equipamentos de transferência de calor. Existem dois conjuntos de 3 caldeiras, um para aquecimento de água da piscinas e outro para águas quentes sanitárias.

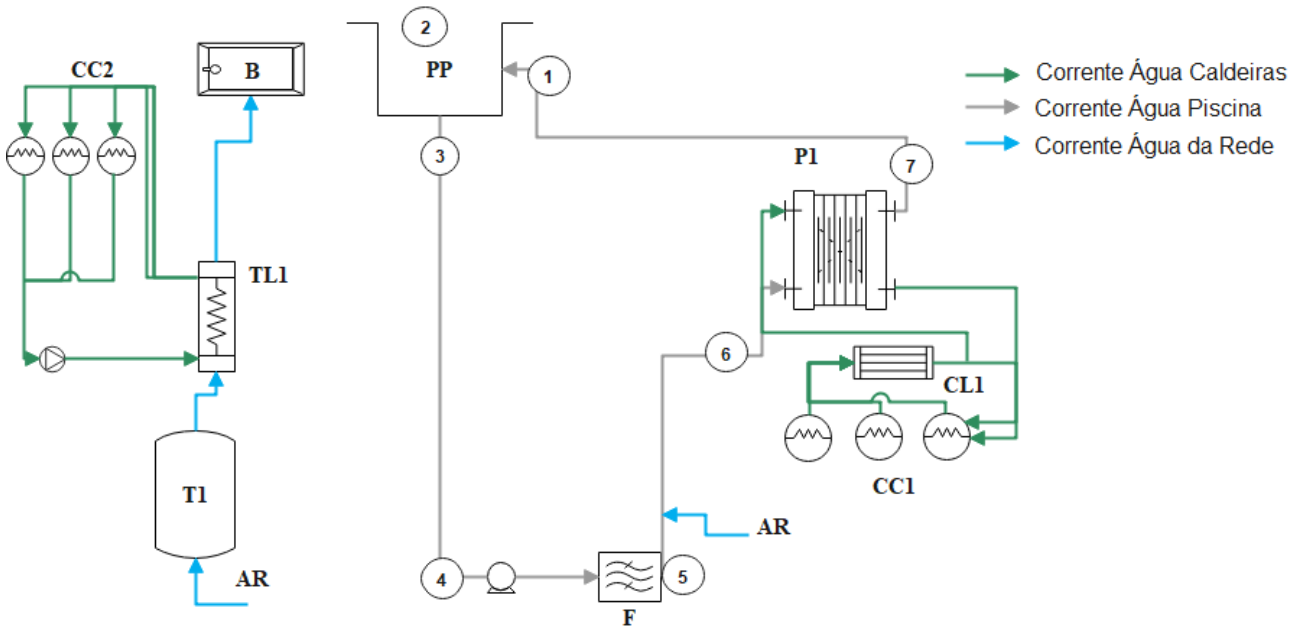

Figura 3.1: Projeto Inicial sem a Instalação da Cogeração

Legenda:

- CC1 e CC2 – Conjunto de caldeiras 1 e 2, respetivamente
- T1 – Tanque de água 1
- TL1 – Tanque de Latentes 1
- P1 – Permutador de placas 1
- PP – Piscinas
- CL1 – Coletor 1
- F – Filtro de partículas
- B – Balneários
- AR- Água da rede

O novo projeto inclui a instalação de uma micro-cogeração (figura 3.2), que ainda não se encontra a funcionar devido a questões burocráticas.

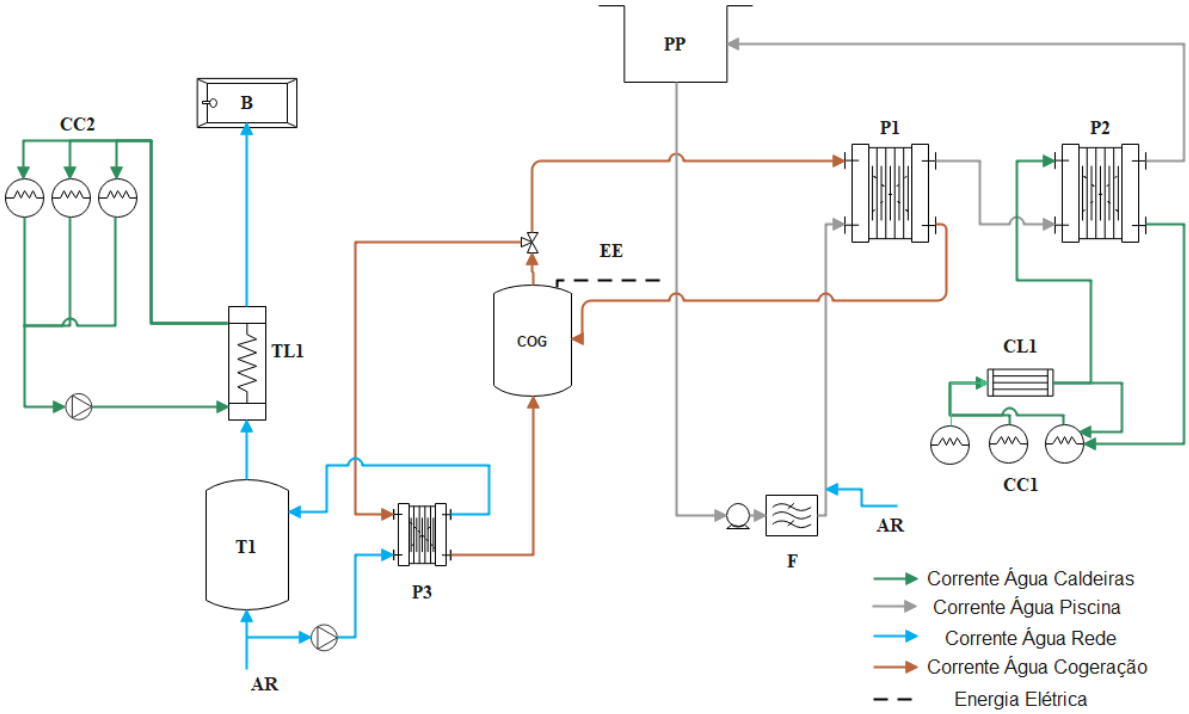

Figura 3.2: Esquema do projeto com a instalação da cogeração

Legenda:

- EE- Energia Elétrica
- P3 e P2 – Permutador 3 e 2, respetivamente
- COG- Cogeração

De acordo com a figura 3.2, o aquecimento da água da piscina inicia-se no permutador 1, havendo troca de calor entre a água quente vinda da cogeração e a água proveniente da piscina. O fluido quente retorna ao motor de cogeração e a água da piscina já aquecida, caso ainda não esteja à temperatura desejável, é aquecida ao passar pelo permutador 2. Neste permutador, o fluido quente é água proveniente de um sistema de três caldeiras de condensação, CC1, alimentadas a gás natural.

O objetivo neste primeiro processo é minimizar a energia necessária fornecida pelas caldeiras ao permutador 2, através da energia térmica produzida pela cogeração.

A segunda etapa vai permitir usar a restante energia térmica da cogeração, ou seja, a energia disponível após o processo de aquecimento da piscina. Esta irá ser utilizada para o aquecimento parcial da água quente sanitária (AQS). A água quente proveniente da cogeração, irá passar pelo permutador 3 e servirá para aquecer água da rede. Esta é mantida no tanque 1, para ser usada nos balneários. Assim, sempre que um chuveiro no balneário é aberto a água do tanque 1 passa no interior de uma serpentina existente no tanque de latentes, TL1. No exterior dessa serpentina circula um fluido quente aquecido por um outro sistema de 3 caldeiras, CC2. O objetivo é mais uma vez otimizar este processo de aquecimento das AQS, aproveitando a energia térmica da cogeração, diminuindo assim o consumo de energia proveniente das caldeiras.

A cogeração também permite obter uma quantidade de energia elétrica, EE, esta foi estudada de forma a existir autoconsumo não havendo excessos para venda à rede.

3.3. Revisão do Dimensionamento

Neste sub-capítulo, irá ser apresentado uma revisão ao dimensionamento da cogeração instalada, com o objetivo de compreender e validar todo o processo.

Através de faturas de eletricidade e de gás, é possível verificar as necessidades energéticas deste projeto.

A revisão será realizada com os dados do ano de 2018, dado que o dimensionamento inicial foi realizado com os elementos desse ano e também porque posteriormente o ginásio sofreu alteração ao seu funcionamento normal devido à pandemia.

3.3.1. Energia Elétrica

Normalmente, o consumo elétrico da maioria das instalações dá-se em períodos de ponta ou de cheia, ou seja, é nestes períodos que há maior necessidade de energia elétrica. Estes são também os de maior custo, quando comparados com os custos em vazio e super-vazio. É importante perceber que a parte elétrica não permite acumulação,

enquanto a parte térmica apresenta essa flexibilidade. Por estas razões inicia-se o dimensionamento pela análise elétrica, dado que vai apresentar maior rentabilidade quando comparado com a análise térmica.

Para a análise da energia elétrica é necessário, em primeiro lugar, aferir se o local se rege por um ciclo diário ou semanal. Este dado pode ser encontrado facilmente na fatura de eletricidade e é relevante na medida que define o tempo de cada período.

Neste caso, o ciclo de fornecimento de eletricidade é o de um ciclo diário, ou seja, não apresenta diferenciação entre dias uteis, sábados e domingos, nem entre o período legal de Verão e Inverno. Na tabela 3.1 apresenta-se o número de horas de cada período referente a este ciclo.

Tabela 3.1: Distribuição de horas por período, num ciclo diário [14]

Período	Horas por dia
Pontas	4
Cheias	10
Vazio	6
Super Vazio	4

De seguida, é essencial que se obtenha o período de faturação e os respetivos consumos elétricos. Para cada um dos doze meses é necessário conhecer o início e o fim do período, para se obter acesso ao total de dias de cada mês, que posteriormente irá ser relevante para o cálculo das potências médias. Os consumos elétricos são obtidos através das faturas e deve-se conhecer o consumo referente ao período de pontas, cheias, vazio e super vazio. Na tabela 3.2 são apresentados os respetivos períodos e os seus consumos elétricos.

Tabela 3.2: Períodos de consumo e consumos elétricos (kWh), durante o ano de 2018

Mês	Período Faturação			Consumo Elétrico (kWh)			
	Início	Fim	Dias	Pontas	Cheias	Vazio	Super Vazio
Janeiro	04/12/2017	03/01/2018	31	4 486	9 970	3 928	2 110
Fevereiro	04/01/2018	03/02/2018	31	5 628	12 184	4 780	2 648
Março	04/02/2018	03/03/2018	28	4 936	11 002	4 443	2 510
Abril	04/03/2018	03/04/2018	31	4 806	11 133	4 514	2 290
Maio	04/04/2018	03/05/2018	30	4 588	10 608	4 510	2 373
Junho	04/05/2018	03/06/2018	31	5 118	11 507	4 387	2 392
Julho	04/06/2018	03/07/2018	30	6 467	14 918	5 009	2 397
Agosto	04/07/2018	03/08/2018	31	8 424	18 064	5 687	2 812
Setembro	04/08/2018	03/09/2018	31	7 818	17 171	5 286	2 576
Outubro	04/09/2017	03/10/2018	30	5 452	13 451	4 968	2 254
Novembro	04/10/2017	03/11/2018	31	5 068	12 010	4 537	2 133
Dezembro	04/11/2017	03/12/2018	30	4 836	10 564	3 795	2 004
Total por período			365	67 627	152 582	55 844	28 499
Total Consumo				304 552			

Após se reunirem estes dados foi necessário calcular a potência elétrica de cada período em cada mês. Esta é calculada através da equação 9, tendo em conta que se conhece o consumo elétrico de cada período, apresentando na tabela 3.2. O número de horas totais é obtido multiplicando o número de dias do mês em questão, pelo número de horas do período para o ciclo em análise, neste caso diário. No Anexo A.2 é apresentado o número de horas para cada mês, distribuído por cada período.

$$Potência\ Elétrica/Térmica = \frac{Consumo\ Energético\ (kwh)}{Número\ de\ horas\ totais\ (h)} \quad \text{Equação 9}$$

Na tabela 3.3 é apresentada a potência elétrica de cada um dos meses analisados, divididas pelo respetivo período horário. A cogeração a ser instalada é escolhida

analisando esta tabela. Não se deve escolher um motor com demasiada potência, sob pena de existir excesso de energia elétrica, sendo que neste caso o objetivo é o auto-consumo.

Tabela 3.3: Valores de potência elétrica para cada mês, por período horário

Mês	Potência (kW)			
	Pontas	**Cheias**	**Vazio**	**Super Vazio**
Janeiro	36,2	32,2	21,1	17,0
Fevereiro	45,4	39,3	25,7	21,4
Março	44,1	39,3	26,4	22,4
Abril	38,8	35,9	24,3	18,5
Maio	38,2	35,4	25,1	19,8
Junho	41,3	37,1	23,6	19,3
Julho	53,9	49,7	27,8	20,0
Agosto	67,9	58,3	30,6	22,7
Setembro	63,0	55,4	28,4	20,8
Outubro	45,4	44,8	27,6	18,8
Novembro	40,9	38,7	24,4	17,2
Dezembro	40,3	35,2	21,1	16,7

Analisando a tabela 3.3, a cogeração escolhida foi a G-box 20, com 20 kW de potência elétrica, cujos dados técnicos são apresentados no Anexo 1. Deste modo, verifica-se que a cogeração irá funcionar durante quase todo o ano a 100%, exceto em alguns períodos do dia que vão corresponder ao tempo de super-vazio, onde a necessidade da energia elétrica é menor

Esta tecnologia apresenta uma capacidade de modelação de 50 %, ou seja, é possível ajustar o seu funcionamento para não trabalhar sempre a 100%, portanto nos casos em que não seja necessário um trabalho a 100% esta irá reduzir. No entanto, pretende-se sempre que a cogeração opere a 100%, dado que o rendimento aumenta com a capacidade de operação.

Por exemplo, caso a cogeração escolhida não fosse a de 20 kW, mas sim uma de 40 kW, verifica-se por análise da tabela 3.3, que acabariam por existir diversos períodos em que a máquina não iria estar a operar a 100%, reduzindo o rendimento.

Apesar de se poder laborar sempre a 100% e vender o excesso de energia à rede, como foi visto anteriormente, não iria compensar o investimento realizado, pois uma cogeração maior implicaria maiores gastos de combustível e um maior investimento e o proveito pela venda não iria ser o suficiente para compensar.

3.3.2. Energia Térmica

Ao motor de cogeração que foi escolhido através da análise elétrica está associada uma dada potência térmica. É então necessário averiguar se esta potência é a correta para o projeto em questão e se não existe um excesso de energia térmica produzida.

Para a análise térmica, é necessário conhecer o período de faturação e os respetivos consumos de combustível, apresentados na tabela 3.4. Não foi possível obter o valor do consumo de combustível de dezembro de 2018. Desta forma, considerou-se para efeitos de cálculo que seria o mesmo de janeiro, já que ambos são meses de Inverno.

Tabela 3.4: Valores do consumo de combustível (kWh) e do período de faturação, em cada mês do ano

Mês	Período faturação			Consumo Combustível kWh
	Início	Fim	Dias	
Janeiro	03/12/2017	02/01/2018	30	70 112
Fevereiro	03/01/2018	01/02/2018	29	71 621
Março	01/02/2018	01/03/2018	28	66 465
Abril	02/03/2018	02/04/2018	31	71 713
Maio	03/04/2018	02/05/2018	29	62 233
Junho	03/05/2018	01/06/2018	29	49 236
Julho	02/06/2018	02/07/2018	30	34 997
Agosto	03/07/2018	01/08/2018	29	34 077
Setembro	02/08/2018	02/09/2018	31	24 205
Outubro	02/09/2018	02/10/2018	30	42 393
Novembro	03/10/2018	02/11/2018	30	45 406
Dezembro	03/11/2018	02/12/2018	31	70 112
Total				642 570

Com os dados apresentados na tabela 3.4, calcula-se a potência térmica a partir da equação 9. Essa potência é multiplicada pelo rendimento do sistema atual, neste caso de 80%, para que se conheça a potência que o sistema necessita efetivamente (tabela 3.5).

Tabela 3.5: Valores de potência térmica (kW) e potência térmica necessária (kW) para os diferentes meses do ano

Mês	Potência Térmica (kW)	Potência Necessária (kW)
Janeiro	97,4	77,9
Fevereiro	102,9	82,3
Março	98,9	79,1
Abril	96,4	77,1
Maio	89,4	71,5
Junho	70,7	56,6
Julho	48,6	38,9
Agosto	49,0	39,2
Setembro	32,5	26,0
Outubro	58,9	47,1
Novembro	63,1	50,5
Dezembro	94,2	75,4

Analisando a tabela 3.5, e tendo em conta que com o motor de cogeração escolhido a produção térmica será de 44 kW (Anexo A.1), é possível prever, juntamente com os dados do dimensionamento elétrico, que a tecnologia poderá funcionar a 100% em quase todos os meses.

No entanto, nos meses de Verão, julho a setembro, (sobretudo em setembro) a potência efetivamente necessária é inferior à potência debitada pela cogeração à carga máxima, devendo existir, para os meses em questão, um ajuste.

3.4. Validação da Cogeração

A validação da cogeração é realizada através da vertente térmica. Como visto anteriormente, a potência térmica necessária nos meses de verão é inferior à potência térmica produzida pela cogeração, sendo então necessário ajustá-la.

Como referido previamente, a tecnologia apresenta capacidade de modulação, podendo reduzir o seu trabalho até 50%. No entanto, como a carga de operação é definida pela vertente elétrica, pelas razões já atrás apresentadas, nestes casos, opta-se por desligar a cogeração nos períodos menos rentáveis, começando pelo super-vazio.

Como a geração de calor é determinada pela vertente elétrica, a redução resultante na energia é proporcional ao tempo pela mesma razão. Portanto, ao calcular a percentagem de energia excedente, o tempo de trabalho pode ser reduzido na mesma proporção.

O primeiro passo consiste em calcular a produção térmica que se vai ter disponível através das horas de trabalho e do mapa de cargas, apresentados no Anexo A. O mapa de cargas constitui uma tabela que apresenta as percentagens de trabalho da cogeração em função da potência elétrica instalada comparando com a potência necessária.

A energia térmica disponível a partir da cogeração, apresentada na tabela 3.6, calcula-se multiplicando as horas de trabalho de cada período de cada mês (Tabela A.2), pela percentagem do respetivo período apresentado no mapa de cargas da eletricidade (Tabela A.3) e pela potência térmica da cogeração (44 kW), como representado na equação 10.

$$Produção\ Térmica = Horas \times Percentagem \times 44\ kW \quad \text{Equação 10}$$

As necessidades mensais são calculadas multiplicando o consumo de combustível, na tabela 3.4 pelo rendimento do sistema (80%). Na Figura 3.3 apresenta-se a comparação entre a energia produzida e necessária, para os vários meses do ano.

Tabela 3.6:Produção Térmica (kWh), pela cogeração, em cada período ao longo do ano

Mês	Produção Térmica (kWh)				Produção Cogeração (kWh)	Necessidade Mensais (kWh)
	Pontas	Cheias	Vazio	Super Vazio		
Janeiro	5 456	13 640	8 184	4 638	31 918	56 090
Fevereiro	5 456	13 640	8 184	5 456	32 736	57 297
Março	4 928	12 320	7 392	4 928	29 568	53 172
Abril	5 456	13 640	8 184	5 456	32 736	57 370
Maio	5 280	13 200	7 920	5 280	31 680	49 786
Junho	5 456	13 640	8 184	5 456	32 736	39 389
Julho	5 280	13 200	7 920	5 280	31 680	27 998
Agosto	5 456	13 640	8 184	5 456	32 736	27 262
Setembro	5 456	13 640	8 184	5 456	32 736	19 364
Outubro	5 280	13 200	7 920	4 963	31 363	33 914
Novembro	5 456	13 640	8 184	4 692	31 972	36 325
Dezembro	5 280	13 200	7 920	4 435	30 835	56 090
Total					382 696	514 056

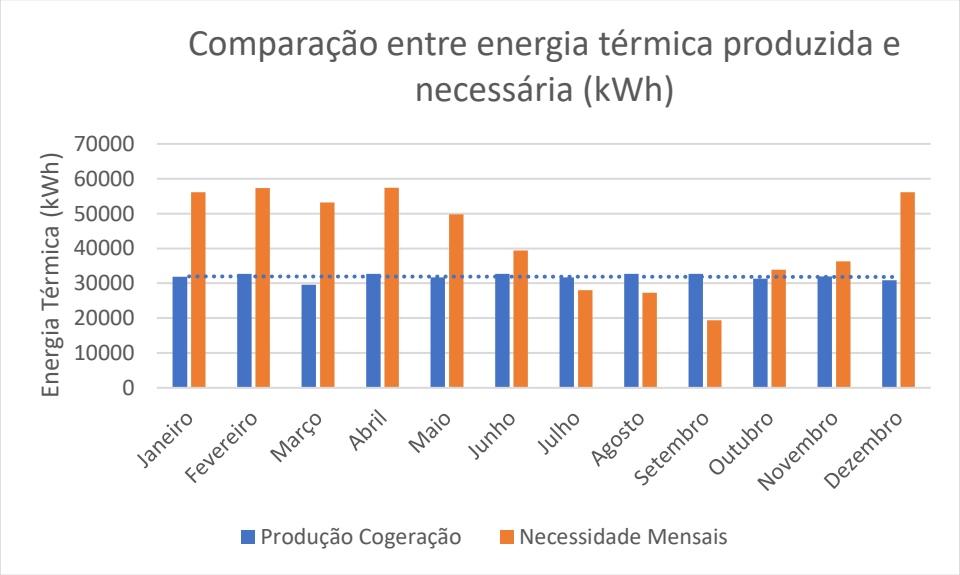

Figura 3.3: Gráfico comparativo da energia térmica produzida pela cogeração e da energia térmica necessária, em kWh

Analisando o gráfico da figura 3.3, também pode verifica-se a produção em excesso nos meses de Verão.

Observando, apenas os meses de verão, julho, agosto e setembro, apresentados na tabela 3.7, calculou-se a percentagem de energia excedente e proporcionalmente obteve-se o número de horas a reduzir, multiplicando essa percentagem pelo número total de horas do mês em questão, apresentado na tabela A.2.

Tabela 3.7: Valor de energia em excesso (%) e horas a reduzir nos meses de verão

Mês	Excesso de energia (%)	Horas a Reduzir
Julho	11,6	84
Agosto	16,7	124
Setembro	40,8	304
Total		512

Comparando o número de horas a reduzir, com o total apresentado na Tabela A.2, conclui-se que nos meses de julho e agosto a cogeração será desligada no período de super vazio, pois é nesse período onde a energia elétrica é mais barata, e no mês de Setembro terá de ser desligada em vazio e super vazio, para se atingir o número total de horas a reduzir.

Desligando a cogeração durante estes períodos, acaba-se por reduzir mais horas do que o necessário. Todavia, é preferível desligar a cogeração por um período fixo do que ter a instalação a modular-se conforme seja ou não necessária energia térmica, devido à perda de eficiência do motor.

4. Avaliação Económica da Cogeração

A avaliação económica refere-se aos custos e proveitos operacionais anuais, que no seu conjunto, constituem o saldo operacional e aos custos de investimento. Com estes dados é possível verificar no final a poupança anual e calcular o *payback* (tempo de retorno do investimento). Conforme o valor encontrado pode-se avaliar a rentabilidade do investimento em causa.

Em primeiro lugar calculam-se os custos de eletricidade e gás natural que o ginásio teve no ano de 2018, para que se possam comparar com os que seriam obtidos com a instalação do motor de cogeração. Assim será possível avaliar a poupança anual obtida com o investimento.

4.1. Custos Energéticos Atuais

Posto isto, é necessário conhecer as tarifas de combustível e de eletricidade. A tarifa de combustível é obtida através da média das tarifas de cada mês do ano de 2018, obtendo-se um valor de 0,0455 €/kWh.

Já a tarifa de eletricidade depende de mais fatores. Previamente, é essencial saber que cada período apresenta uma tarifa diferente, sendo o mais caro o período de pontas e o mais barato o de super vazio. A tarifa é dividida em custos correspondentes a energia ativa e em custos inerentes aos termos de acesso às redes. O custo correspondente ao período de horas de ponta ainda apresenta uma componente para a potência das horas de ponta que é bastante importante já que, com a instalação da cogeração, a potência nas horas de ponta diminui. É importante referir que no decorrer do ano a tarifa de energia ativa mudou, devido à realização de um novo contrato, mas para efeitos de cálculo utilizou-se uma média das duas. A tarifa do termo de acesso às redes também modifica ao longo do ano devido aos períodos de Verão e Inverno, sendo que para efeitos de cálculo também se considera a média das duas novamente, uma vez que este efeito não produz alterações significativas à avaliação económica.

Como referido anteriormente, a tarifa de horas de ponta apresenta um elemento extra, a potência de horas de ponta, tendo, no período em análise, valor de 0,5048 €/kW (valor referido nas faturas consultadas no ano de 2018). Uma vez que não se encontra nas mesmas unidades que as outras tarifas, calculou-se a tarifa total do período de pontas

através de uma média anual com os valores dos termos de acesso às redes, da energia ativa e do custo da potência. A tarifa média mensal para as horas de ponta calcula-se pela equação 11, obtendo-se o valor de 0,2646 €/kWh, como apresentado na tabela 4.1. Apresenta-se no Anexo A.3 um exemplo do cálculo.

$$Tarifa\ Média = \frac{Consumo\ Elétrico\ \times (T.R + T.A) + Custo\ P.P}{Consumo\ Elétrico} \quad \text{Equação 11}$$

Sendo:

- T.R – Tarifa do Termo de Redes em €/kWh;
- T.A – Tarifa da Energia Ativa em €/kWh;
- Custo P.P – Custo da Potência de Ponta em €.

O custo das horas de ponta é calculado multiplicando a potência das horas de ponta pelo número de dias do mês pela tarifa de 0,5048 €/kW. Ou seja, usando a equação 12, obtém-se:

$$Custo\ P.P = \frac{CP}{NP} \times nº\ de\ dias\ do\ mês \times 0{,}5048 \quad \text{Equação 12}$$

Sendo:

- CP – Consumo elétrico em horas de ponta, em kWh;
- NP – Número de horas no período de ponta, h;

Na tabela 4.1 são apresentadas as tarifas totais para cada período, sendo que no período de ponta a tarifa total foi a calculada anteriormente. Nos restantes períodos, a tarifa total é a soma do termo da energia ativa com o termo de redes.

Tabela 4.1: Tarifas médias (€/kWh) e (€/kW) de eletricidade para cada período do mês

Tarifas	Ponta	Cheia	Vazio	Super Vazio
Termo da Energia Ativa (€/kWh)	0,0666	0,0646	0,06018	0,05522
Termo de Redes (€/kWh)	0,0717	0,0610	0,03025	0,02825
Potência Horas Ponta (€/kW)	0,5048	-	-	-
Total	0,2646	0,1256	0,0904	0,0835

O custo de combustível calcula-se multiplicando o consumo anual de combustível pela tarifa correspondente e para a eletricidade multiplica-se o consumo anual de cada período pela tarifa média de cada período. Os consumos totais de energia elétrica no ano

de 2018, são os que vêm apresentados na tabela 3.2, o de gás natural respeitante ao mesmo ano é apresentado na tabela 3.4. Na tabela 4.2 são então apresentados os custos totais de energia elétrica e gás natural, sem o sistema de cogeração instalado.

Tabela 4.2: Custos (€) de eletricidade e gás natural sem a cogeração instalada para o ano de 2018

		Consumos kWh	Tarifas (€/h)	Total (€)
Eletricidade	**Ponta**	67 627	0,2646	17 894
	Cheia	152 582	0,1256	19 164
	Vazio	55 844	0,0904	5 048
	Super Vazio	28 499	0,0835	2 380
Total Eletricidade		304 552		44 486
Gás Natural		642 570	0,0455	29 239
Custos Totais				73 725

Na figura 4.1 apresenta-se em gráfico as percentagens de cada uma das utilidades consumidas em 2018.

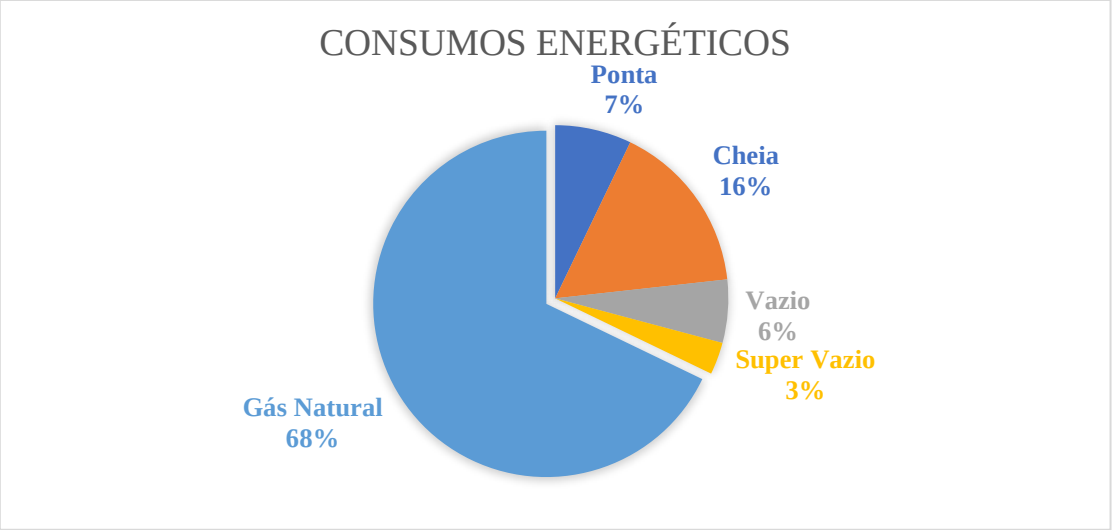

Figura 4.1: Gráfico circular comparativo dos consumos energéticos, em kWh, de eletricidade dos períodos de ponta, cheia, vazio e super vazio e consumo de gás natural

Na figura 4.2 apresentam-se os custos correspondentes ao consumo de energia elétrica e de gás natural.

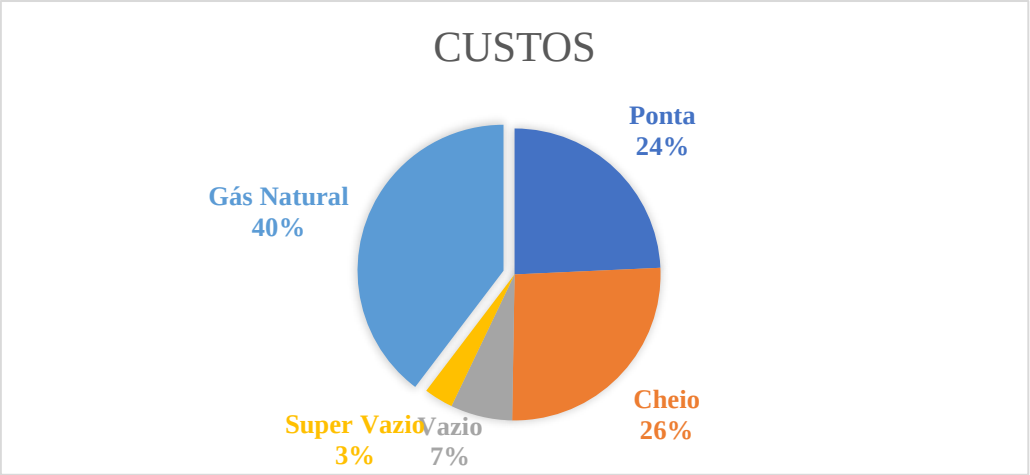

Figura 4.2: Gráfico circular comparativo dos custos, em euros (€), de energia elétrica dos períodos de ponta, cheia, vazio e super vazio e custo de gás natural.

Analisando as figuras 4.1 e 4.2, verifica-se que o maior consumo de energia corresponde ao gás natural, que representa 68% em relação ao total consumido, sendo o seu custo de 40% relativamente aos custos totais. Pelas mesmas figuras também se pode observar, que apesar do consumo de energia elétrica nas horas de ponta representar apenas 7% da energia elétrica total, em termos de custos esta percentagem passa para 24%. Será neste parâmetro que a cogeração terá mais impacto, dado que com a sua instalação se diminui a necessidade de energia da rede neste período, reduzindo também o parâmetro da potência de horas de ponta.

4.2. Instalação da Cogeração: custos de operação, benefícios e investimento

De seguida calculam-se os custos após a cogeração instalada. Os custos de operação são o conjunto dos custos de combustível para o funcionamento do motor de cogeração e do custo de manutenção do mesmo.

Custos de operação

O custo de combustível corresponde ao combustível alimentado à cogeração. Uma vez que o motor de cogeração escolhido tem uma potência de 62 kW (Anexo A.1) o custo anual de gás natural obtém-se a partir da equação 13.

$$Custo\ GN\ ao\ ano = PM \times número\ de\ horas\ ao\ ano \times \frac{0{,}0455€}{kWh} \qquad \text{Equação 13}$$

Sendo:

- PM – Potência do motor, 62 kW;

O custo de manutenção é fixo e tem uma base horária, sendo 0,73 €/h, valor este fornecido pela Filotipo.

Como foi referido previamente, a cogeração irá ter períodos em que se encontrará desligada. Tendo o ano 8760 h e estando a cogeração desligada nos períodos de super-vazio em julho agosto e setembro e em vazio em setembro, somando um total de 554 h, trabalhará teoricamente 8206 horas ao ano. Normalmente considera-se que 5% das horas de trabalho correspondem a períodos de manutenção e consequentemente apenas trabalhará 7796 horas.

Na tabela 4.3 pode-se analisar os custos de operação que o ginásio irá apresentar anualmente, com a instalação da cogeração.

Tabela 4.3: Custos operacionais anuais (€), de gás natural e manutenção

Custos operacionais (ano)	Quantidade	Tarifa	Total (€)
Gás natural	483 352 kWh	0,0455 €/kWh	21 993
Manutenção	7 796 h	0,73 €/h	5 691
Total	-	-	27 684

<u>Benefícios ou proveitos operacionais</u>

Os benefícios ou proveitos operacionais devem ser observados como custos evitados, seja com a eletricidade ou com a energia térmica. A cogeração produz eletricidade e energia térmica para autoconsumo e os seus custos são calculados considerando o seguinte:

- A produção da energia elétrica da cogeração deve ser multiplicada pela tarifa de cada período, sendo depois realizado o somatório de todos os termos e obtendo-se o custo anual evitado.
- A produção de energia térmica deve ser multiplicada pela tarifa do combustível que deve ter em conta o rendimento das caldeiras usadas no

projeto inicial do ginásio. Pois, tendo as caldeiras um rendimento de 80%, para a produção da mesma energia térmica da cogeração o consumo de gás natural seria 20% mais elevado. Assim aplica-se esta correção à tarifa do combustível, obtendo-se uma tarifa corrigida de 0,0569 €/kWh.

A energia elétrica produzida pela cogeração é calculada pela equação 14, usando o mapa de cargas (Tabela A.3), as horas de trabalho (Tabela A.2) e a potência elétrica produzida pelo motor de cogeração escolhido, e que neste caso é de 20 kW. É importante ter atenção aos períodos em que o motor, irá ser desligado. Na tabela 4.4 é apresentada a produção elétrica mensal para todos os períodos, assim como o total de cada um.

$$Produção\ Elétrica = Horas \times Percentagem \times 20\ kW \qquad \text{Equação 14}$$

Tabela 4.4:Produção elétrica mensal (kWh)

Mês	Produção Elétrica (kWh)			
	Ponta	**Cheio**	**Vazio**	**Super Vazio**
Janeiro	2480	6200	3720	2108
Fevereiro	2480	6200	3720	2480
Março	2240	5600	3360	2240
Abril	2480	6200	3720	2480
Maio	2400	6000	3600	2400
Junho	2480	6200	3720	2480
Julho	2400	6000	3600	0
Agosto	2480	6200	3720	0
Setembro	2480	6200	0	0
Outubro	2400	6000	3600	2256
Novembro	2480	6200	3720	2133
Dezembro	2400	6000	3600	2016
Total	**29200**	**73000**	**40080**	**20593**

Com estes dados de produção e as tarifas calculadas anteriormente, já é possível calcular os proveitos operacionais elétricos, apresentados na tabela 4.5.

Tabela 4.5: Valores dos proveitos operacionais anuais de eletricidade

Proveitos operacionais (ano)		Quantidade (kWh)	Tarifa (€/kWh)	Total (€)
Produção eletricidade (autoconsumo)	Ponta	29 200	0,2646	7 726
	Cheio	73 000	0,1256	9 169
	Vazio	40 080	0,0904	3 767
	Super Vazio	20 593	0,0835	1 719
Proveito Total		162 873	-	22 381

A energia térmica produzida pela cogeração anualmente, tem de ter em conta os períodos em que a cogeração estará desligada, por conseguinte o valor total é dado pela diferença entre a produção total e a produção que poderia existir nos períodos que será desligada. Sendo que os valores de produção de cada período apresentam-se na tabela 3.6.

$$\begin{aligned} &Produção\ Total\ de\ Energia\ Térmica\ Anual \\ &\qquad = 382.696 - Vazio\ em\ Julho, Agosto\ e\ Setembro \\ &\qquad - SuperVazio\ em\ Setembro \\ &Produção = 382\ 696 - 5280 - 5456 - 54656 - 8184 = 358\ 320 kWh \end{aligned}$$

Assim, o custo evitado com a energia térmica obtém-se multiplicando a produção de energia térmica total anual no valor de 358 320 kWh, pela tarifa de 0,0569 €/kWh, obtendo-se um valor de 20 388 €. Estes valores estão apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Valor do proveito operacional de energia térmica

Proveitos operacionais (ano)	Quantidade (kWh)	Tarifa (€/kWh)	Total (€)
Produção térmica (autoconsumo)	358 320	0,0569	20 388

Com os valores de proveito de eletricidade e térmico, chega-se ao valor total de proveito anual de 42 769 €, apresentando na tabela 4.7.

Tabela 4.7: Valor Total dos proveitos anuais de energia elétrica e térmica

Proveitos operacionais (ano)	Total (€)
Proveito Eletricidade	22 381
Proveito Térmico	20 388
Total Proveitos	42 769

O saldo operacional é calculado através da subtração dos custos de operação apresentados na tabela 4.3 aos proveitos operacionais:

Saldo operacional = 42 769 -27 684 = 15 085 €/ano

Apresenta assim um valor anual de 15 085 euros/ano

Custos de Investimento

Logo após calcula-se o investimento total apresentado na tabela 4.8.

Tabela 4.8: Investimento total da instalação da cogeração (€)

Investimento	Custo (€)
Modulo integração em edifício (65 dB)	35 430
Arranque por técnico 2G-FILOTIPO	3 000
Transporte	2 000
Comunicação + gestão produção	2 552
Integração no edifício (exclui trabalhos construção civil)	13 000
Total	55 982

4.3. Avaliação Económica – Conclusão

Para concluir, apresenta-se na tabela 4.9 um resumo dos valores obtidos da avaliação económica. O saldo operacional calculado anteriormente também pode ser estimado através do custo atual energético e do custo futuro devido à instalação do motor de cogeração.

A fatura de gás no futuro terá em conta quer a necessidade de gás para o funcionamento do motor de cogeração, 483 352 kWh, apresentada na tabela 4.3, quer a quantidade de gás que será preciso fornecer às caldeiras para superar as necessidades térmicas que a cogeração não conseguir fornecer. Atualmente, como referido na tabela 3.4 a energia térmica necessária ao funcionamento da piscina é de 642 570 kWh e a produção térmica conseguida pela cogeração é de 358 320 kWh. Considerando, como já foi referido, que as caldeiras atuais têm um rendimento de 80% então, pode-se calcular o consumo de gás na situação de cogeração instalada, ou seja:

Consumo de gás pelo motor de cogeração = 483 352 kWh

Consumo de gás para superar o fornecido pela cogeração = $(642\,570 \times 0{,}8 - 358\,320) = 155\,736\ kWh$

Os resultados são os que se apresentam na tabela 4.9 .

Calculou-se ainda a VAL, Valor Atual Líquido, e a TIR , Taxa Interna de Rentabilidade através das funcionalidades do Excel. A VAL representa a soma de todas as entradas e saídas de dinheiro durante a vida útil do projeto atualizada com uma taxa a que se chama taxa de desconto, ou seja, uma taxa de juros.

$$VAL = \sum_{i=0}^{n} \frac{CF_i}{(1+t)^i} \qquad \text{Equação 15}$$

Onde:

- CF_i – *Cash-Flow* no ano i ;
- t - taxa de desconto;

No caso do valor de investimento ser inferior à VAL, significa que o projeto apresenta uma rentabilidade positiva, como é o caso do investimento da cogeração, dado que o valor da VAL calculado a 15 anos com uma taxa de desconto de 4% é de 95 245 € [31–33].

A TIR representa uma taxa de desconto usada como referência para quando um investimento pode ter um retorno igual a zero, ou seja, não dar lucros nem prejuízos.

$$\sum_{i=0}^{n} \frac{CF_i}{(1+TIR)^i} = 0 \qquad \text{Equação 16}$$

Neste caso, o valor de TIR calculado a 15 anos é de 25%. A TIR deve ser superior á taxa de desconto do projeto, neste caso utilizou-se 4%, logo permite concluir que o investimento é economicamente atrativo [31–33].

Tabela 4.9: Tabela resumo dos dados da avaliação económica

ATUAL			
	Consumo (kWh)	Tarifa (€/kWh)	Custo anual (€)
Fatura gás	642 570	0,0455	29 239
Fatura eletricidade	304 552		44 486
Custo total atual			**73 725**
FUTURO			
Fatura gás	483 352 155 736	0,0455 0,0569	21 993 8 861
Fatura eletricidade	141 679		22 250
Manutenção			5 691
Custo total futuro			**58 795**
POUPANÇA ANO			
Poupança ano			**14 930**
INVESTIMENTO			
total (chave-na-mão)			**55 982 €**
PAYBACK			
3,7 anos			
VAL (VALOR ATUAL LÍQUIDO)			
95 245€			
TIR (TAXA INTERNA DE RENTABILIDADE)			
25%			

4.4. Validação de Parâmetros

Para avaliar o desempenho da cogeração, calcularam-se os parâmetros apresentados no capítulo 2.2.1. Para que se possam realizar esses cálculos é preciso ter em atenção alguns detalhes apresentados nas caraterísticas do motor de cogeração referido no anexo A e que se mencionam novamente aqui, na tabela 4.10.

Tabela 4.10: Características do Motor de Cogeração G-box20 [34]

Características	
***Input* Energia Cogeração (kW)**	62
***Output* Elétrico Cogeração (kW)**	20
***Output* Térmico Cogeração (kW)**	44
Rendimento Térmico (%)	70,4
Rendimento Global (%)	102,4
PCI (kWh/Nm^3)	10,5
Volume de gás natural consumido Nm^3/h	5,9
Trabalho Mecânico *Output* (kW)	21,5
Aproveitamento Térmico nos gases de escape(kW)	20
Aproveitamento térmico no circuito de arrefecimento (kW)	12

Analisando estes valores, e, apesar de corresponderem às características referidas pelo fabricante, não será possível na realidade usar uma potência térmica disponível total de 44 kW, dado que isto violaria a 2ª lei da Termodinâmica. Todos os cálculos apresentados foram feitos usando essa potência térmica, no entanto para avaliar os parâmetros de desempenho da cogeração, referidos no capítulo 2, é necessário entrar com os valores de potência térmica disponível que irá corresponder à realidade deste motor de cogeração. Para isso considerou-se que o calor dissipado será de aproximadamente 11% (referência do fabricante). Deste modo a potência térmica disponível será de cerca de 39 kW [34].

Sendo assim, a partir dos valores da tabela 4.10 e das equações 1 a 8 obtêm-se os seguintes parâmetros de desempenho:

$$Rendimento\ Elétrico = \eta_E = \frac{E}{C} = \frac{20}{62} \times 100 = 32{,}2\ \%$$

$$Rendimento\ Térmico = \eta_C = \frac{Q}{C} = \frac{39}{62} \times 100 = 62{,}9\ \%$$

$$\eta_G = FUE = \frac{E+Q}{C} \times 100 = \frac{20+39}{62} \times 100 = 95\ \%$$

$$RCE = \frac{Q}{E} = \frac{39}{20} = 1{,}95$$

O valor calculado de 1,95 está dentro dos valores de referência de 1,1-2,5, para motores de combustão interna que funcionam segundo o ciclo de Otto, conforme evidenciado no capítulo 2.2.1.

$$REE = \frac{E}{C - \frac{Q}{0{,}9 - 0{,}2 \times \frac{CR}{C}}}$$

Para o cálculo deste parâmetro considera-se que CR = 0 e que a potência térmica, Q, corresponde apenas ao aproveitamento térmicos nos gases de escape mais do circuito de arrefecimento, somando 32 kW. Posto isto obtém-se :

REE =0,76

Este valor para motores a gás natural deve ser superior a 0,55, que corresponde ao valor mais alto para centrais termoelétricas. O valor deste parâmetro destina-se a avaliar se o sistema de cogeração é realmente um sistema eficiente no que diz respeito à produção simultânea de trabalho mecânico e calor, e não apenas de energia elétrica. Se assim fosse, o sistema poderia aproveitar indevidamente as vantagens fiscais de venda de energia elétrica à rede que são permitidas, pela legislação vigente, às verdadeiras cogerações [18].

Por último, obtém-se para o índice de economia de energia, IEE, ou poupança de energia primária, PEP.

$$\Delta C = \frac{Q}{\eta_{cald}} + \frac{E}{\eta_{te}} - C = \frac{39}{0{,}9} + \frac{20}{0{,}5} - 62 = 21{,}3$$

Então:

$$IEE = \frac{\Delta C}{\left(\frac{Q}{\eta_{cald}} + \frac{E}{\eta_{te}}\right)} = \frac{21{,}3}{\left(\frac{39}{0{,}9} + \frac{20}{0{,}5}\right)} = 0{,}26$$

Com o valor de IEE de 0,26 podemos concluir que a cogeração é considerada de elevada eficiência dado que o valor é superior a 0,10.

5. Análise da tubagem do sistema

Neste capítulo irá ser analisado o sistema de aquecimento de água da piscina, em termos de tubagens, onde se irá calcular as perdas térmicas e a possibilidade da sua redução através do uso de isolamentos. As tubagens são em PVC com um diâmetro exterior de 110 mm e uma espessura de 1.7 mm e apresentam uma condutividade térmica de 0,2 W/(m.K) e uma emissividade de 0,93. O sistema da piscina atual apresenta-se na figura 5.1. As tubagens apresentam um grande diâmetro para o caudal que existe, além de que a espessura é muito pequena e consequentemente a resistência de condução é pequena. Desde o ponto 7 a 1 existe um comprimento de 10 metros, de 1 a 2 a distância é 1 metro, de 2 a 3 são 2 metros, de 3 a 4 são 7 metros, de 4 a 5 são 3 metros e de 5 a 6 são 4 metros.

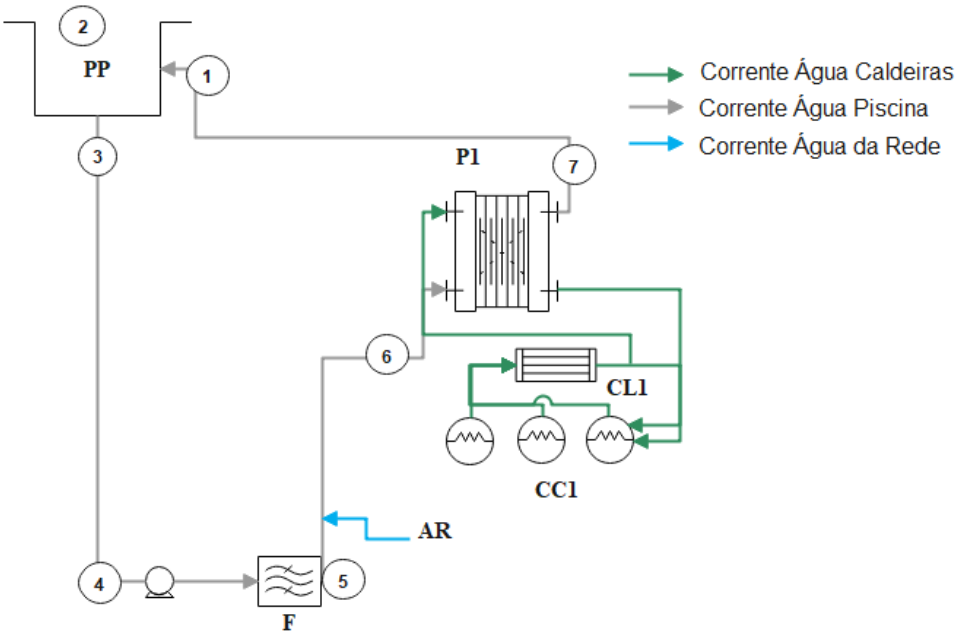

Figura 5.1: Sistema de tubagem da piscina atual

Legenda:

- P1 – Permutador de placas 1
- PP – Piscinas
- F – Filtro de partículas
- AR - Água da Rede
- CC1 – Conjunto de caldeiras 1
- CL1 – Coletor 1

Considera-se, em primeiro lugar, a transferência de calor promovida pelo movimento de um fluido quente, que circula no interior de um tubo e se encontra a uma temperatura superior à do ar que envolve o tubo. Sempre que existir um gradiente de temperatura em meio sólido, o calor fluirá da região de temperatura mais alta para a temperatura mais baixa. Se considerarmos que o fluido quente é aquele que circula no interior do tubo, então o calor vai ser transferido de dentro para fora do tubo.

A transferência de calor através do tubo e do material de isolamento ocorre por condução, enquanto a perda de calor para a atmosfera ocorre por convecção natural e também por radiação para a vizinhança envolvente.

5.1. Análise da tubagem sem isolamento

Começou-se por medir as temperaturas ao longo do circuito, apresentando-se na tabela 5.1 a temperatura entrada e de saída da água de cada tubagem a analisar. O caudal volúmico é considerado sempre o mesmo de 3,77 m^3/h, apesar de existir alguma perda na piscina que é compensada pela água de *make-up*.

Tabela 5.1: Valores das temperaturas de entrada (T_e) e saída (T_s),da água e da temperatura média ($\bar{T}$) em (°C).

Localização	T_e(°C)	T_s(°C)	$\bar{T}$(°C)
Ponto 7→1	31,7	28,1	29,9
Ponto 3→4	27,4	25,6	26,5
Ponto 4→5	25,7	24,5	25,1
Ponto 5→6	24,6	24,0	24,3

Como as diferenças de temperaturas entre o ponto de entrada e saída da tubagem são muito baixas, o cálculo do calor perdido através do balanço de energia global conduzia a valores sem qualquer significado físico. Em vista disso, calcula-se a perda máxima que poderia existir na tubagem do ponto 7 a 1, dado que é a que apresenta temperaturas mais elevadas, considerando que a temperatura da parede exterior será de 30 °C, ou seja, pressupondo que a resistência à convecção interna e a resistência à condução através da parede da tubagem são desprezáveis. Deste modo o valor das perdas térmicas será máximo.

Sabendo que o calor total perdido será a soma do calor de convecção natural e do calor de radiação, como apresentado na equação 17 a 18.

$$Q_{Total} = Q_{condução} = Q_{convecção\ natural} + Q_{radiação} \qquad \text{Equação 17}$$

Onde:

- Q_{Total} – Calor total perdido, em kW;
- $Q_{condução}$ - Calor perdido por condução, em kW;
- $Q_{convecção\ natural}$ – Calor perdido por convecção natural, em kW;
- $Q_{radiação}$ – Calor perdido por radiação, em kW.

O calor de convecção natural e de radiação é dado pelas equações 18 e 19.

$$Q_{convecção\ natural} = h_{cn} \cdot A_e \cdot (T_{pe} - T_{ar}) \qquad \text{Equação 18}$$

Onde:

- h_{cn} – Coeficiente de transferência de calor por convecção natural em W/(m^2.K)
- A_e – Área exterior da tubagem, em m^2;
- T_{pe} – Temperatura da parede exterior, em °C;
- T_{ar} – Temperatura ambiente do ar, em °C.

$$Q_{radiação} = A_e \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{pe}^4 - T_{ar}^4) \qquad \text{Equação 19}$$

Onde:

- ε – Emissividade
- σ – Constante de Stefan–Boltzmann, no valor de 5,68E10^{-8} Wm^{-2}K^{-4}
- T_{pe} – Temperatura da parede exterior, em K;
- T_{ar} – Temperatura ambiente do ar, em L

O coeficiente de transferência de calor é calculado segundo a equação 20.

$$h_{cn} = \frac{Nu \cdot k}{L} \qquad \text{Equação 20}$$

Onde:

- k – Condutividade térmica em W/(m.K)
- L – Comprimento da tubagem, em metros
- Nu – Número de Nusselt

O número de Nusselt, Nu, para convecção natural, em tubos verticais é calculado pela equação 21, correlação utilizada para todo o intervalo do número de Rayleigh, Ra [3].

$$Nu = \left\{ 0{,}825 + \frac{0{,}387 \cdot Ra^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0{,}492}{Pr}\right)^{9/16}\right]^{8/27}} \right\}^2 \qquad \text{Equação 21}$$

Onde Ra é o número de Rayleigh e Pr o número de Prandtl, calculados pela equação 23 e 24, respetivamente [3]. O número de Grashoft é dado pela equação 22.

$$Gr = \frac{L^3 \cdot \rho^2 \cdot g \cdot \beta \cdot (T_{pe} - T_{ar})}{\mu^2{}_{ar}} \qquad \text{Equação 22}$$

$$Ra = Gr \cdot Pr \qquad \text{Equação 23}$$

$$Pr = \frac{cp \cdot \mu_{ar}}{k} \qquad \text{Equação 24}$$

Onde:

- cp – calor específico do ar, em kJ/(kg.K)
- g – Aceleração da gravidade, 9,8 m.s^{-2}
- ρ – Massa volúmica do ar, em kg/m^3
- β - coeficiente de dilatação térmica do fluido, em K^{-1}
- μ_{ar} – viscosidade do ar em N.s/m^2

$$\beta = \frac{1}{\overline{T}_{filme}} \qquad \text{Equação 25}$$

Onde:

- $\overline{T}_{filme}$ – Temperatura média do filme exterior, em K.

Pressupondo então a temperatura da parede exterior de 30 °C e temperatura do ar de 20 °C, chegamos a uma temperatura média do filme exterior de 25 °C. Com as propriedades do ar apresentadas no anexo B e com as equações 20 a 25 conseguiu-se calcular o valor do coeficiente de transferência de calor para convecção natural no valor de 2,82 W/(m^{2}K), os exemplos de cálculo apresentam-se no anexo B. Utilizou-se as propriedades do ar para uma temperatura de 300 K, dado que esta diferença não irá ter grandes efeitos no cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção natural.

Assim, com as equações 17 a 19, chega-se à conclusão de que a perda máxima que poderá existir será de 291,03 W.

$$Q_{convecção\ natural} = h_{cn} \cdot A_e \cdot \left(T_{pe} - T_{ar}\right)$$
$$Q = 2{,}82 \times \pi \times 0{,}110 \times 10 \times (30 - 20)$$
$$Q_{convecção\ natural} = 97{,}45\ W$$

$$Q_{radiação} = A_e \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot \left(T_{pe}^4 - T_{ar}^4\right)$$
$$Q = \pi \times 0{,}110 \times 10 \times 5{,}68 \times 10^{-8} \times 0{,}93 \times ((30 + 273{,}15)^4 - (20 + 273{,}15)^4$$
$$Q_{radiação} = 193{,}58\ W$$

$$Q_{Total} = Q_{convecção\ natural} + Q_{radiação}$$
$$Q_{Total} = 97{,}45 + 193{,}58$$
$$Q_{Total} = 291{,}03\ W$$

5.2. Análise à tubagem com isolamento

Para diminuir este valor, é sugerido colocar um isolamento. Para este cálculo considera-se uma tubagem vertical com comprimento de 10 metros e uma condutividade térmica de 0,2 W/(m.K).

Escolhe-se para isolamento um material tipo espuma da marca Armacell, o Armaflex XG-09X110, para tubos até 110mm de diâmetro, com 9mm de espessura. É um material isolante térmico flexível, de célula fechada, resistente à difusão do vapor de água e de baixa condutibilidade térmica, de valor 0,035 W/(m.K). Considera-se também que a emissividade desta espuma é 1 dado que, atua como um corpo negro [35–37].

Tem várias aplicações desde isolamento e proteção de tubagens, condutas de ar, depósitos (incluindo curvas, acessórios, válvulas, etc.), instalações de ar condicionado, refrigeração e equipamentos, para impedir a formação de condensação e favorecer a poupança energética. Também pode ser utilizado em aplicações de aquecimento de água quente sanitária [35, 37].

Para calcular o calor que irá ser perdido com a colocação do isolamento, considera-se agora que a temperatura da parede exterior será de 23 °C e utilizando novamente as propriedades do ar para 300 K, e as equações 20 a 25 calcula-se o valor do coeficiente de transferência de calor para convecção natural no valor de 1,91 W/(m^{2}K), os exemplos de cálculo apresentam-se no anexo B.

Assim, com as equações 17 a 19, chega-se à conclusão de que a perda que poderá existir com isolamento será de 92,28 W.

$$Q_{convecção\ natural} = h_{cn} \cdot A_e \cdot \left(T_{pe} - T_{ar}\right)$$
$$Q = 1{,}92 \times \pi \times (0{,}110 + 0{,}018) \times 10 \times (23 - 20)$$
$$Q_{convecção\ natural} = 23{,}16\ W$$

$$Q_{radiação} = A_e \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot \left(T_{pe}^4 - T_{ar}^4\right)$$
$$Q = \pi \times 0{,}128 \times 10 \times 5{,}68 \times 10^{-8} \times 1 \times ((23 + 273{,}15)^4 - (20 + 273{,}15)^4$$
$$Q_{radiação} = 70{,}1\ W$$

$$Q_{Total} = Q_{convecção\ natural} + Q_{radiação}$$
$$Q_{Total} = 23{,}16 + 70{,}12$$
$$Q_{Total} = 92{,}28\ W$$

5.3. Avaliação Económica ao Isolamento

Com os cálculos anteriores, determinou-se que com a colocação do isolamento a tubagem poderá apenas perder calor no valor de 92,28 W em vez de 291,03 W, ou seja, uma diferença de 198,75W.

Como visto no capítulo 4, o preço do gás natural é de 0,0455 €/kWh, assim com a colocação de isolamento consegue-se uma poupança no valor de 0,009 €/h, ou seja, um mês a trabalhar 24h diárias indica uma poupança de 0,22€ mensal e 2,60 € anuais.

O isolamento proposto Armaflex XG-09X110, apresenta um custo de 8,61€/m, sendo que o comprimento da tubagem são 10 metros, isto implica um investimento de 86,10€.

Com o valor de investimento inicial e com o valor da poupança anual, é possível agora calcular o retorno de investimento, RI, dividindo um valor pelo outro. Obtendo-se assim:

RI= 33,1 anos.

O que indica que o investimento não é viável, dado que o *payback* é muito alto devido às poupanças existentes com a colocação de isolamento serem baixas.

6. Conclusões e Sugestões de Trabalhos Futuros

Esta dissertação teve como objetivo a análise de um sistema de cogeração a ser implantando num ginásio, em Vila Nova de Gaia.

Após uma revisão ao dimensionamento em termos de vertente elétrica e térmica conclui-se que a máquina de cogeração ideal a ser instalada seria a G-box 20 da marca 2G, com uma potência de 20 kW elétricos e 44 kW térmicos.

Com este equipamento consegue-se satisfazer parte das necessidades térmicas e elétricas, sendo que nos meses de Verão existe um excesso de produção de energia térmica sendo que nos meses de julho e agosto a cogeração será desligada no período de super vazio e no mês de Setembro terá de ser desligada em vazio e super vazio para não existir excessos de energia que seria dissipada.

No que diz respeito à análise económica, conclui-se que com um investimento total de 55 982€ o projeto apresenta potencial para ser economicamente viável e rentável, uma vez que se obtém um proveito anual de 42 769 €. E ainda, se consegue recuperar o capital investido com um *payback* de 3,7 anos.

Assim sendo, os sistemas de cogeração têm um papel importante na racionalização do consumo de energia. Permitindo a produção simultânea de eletricidade e calor numa unidade integrada, a partir de um combustível. Sistemas deste tipo apresentam maior eficiência, relativamente, às tradicionais soluções centralizadas de produção elétrica. Assim, e sempre que exista uma procura economicamente justificável de energia térmica e elétrica, a cogeração deve ser ponderada pois, além de maior eficiência, pode advir vantagens económicas e ambientais.

Por fim realizou-se a análise à tubagem do sistema da água da piscina, onde se calculou as perdas máximas que poderão existir na tubagem e as perdas com a colocação de um isolamento. Conclui-se que não é viável a colocação de um isolamento, dado que como se trata de temperaturas muito baixas, as perdas são muito pequenas e a poupança que poderia existir com a colocação de um isolamento não compensa a execução do investimento.

No futuro, aconselha-se a realizar um estudo às caldeiras de condensação existentes e verificar se será possível baixar a temperatura de *setpoint*, de forma a reduzir

os gastos com o gás natural, mas tendo o cuidado de não colocar em causa a eficiência da caldeira.

Bibliografia

[1] Cogen Portugal, «Cogen». https://www.cogenportugal.com/eficiencia-energetica/ (acedido Jan. 06, 2021).

[2] «Filotipo». http://www.filotipo.com (acedido Dez. 28, 2020).

[3] A. M. Çengel, A. Yunus; Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach*, 5º edição. .

[4] A. F. Pereira, «Produção de frio num Sistema de Trigeração», 2018.

[5] P. Ferreira, «Criação de Algoritmo para Escolha Automática de Tecnologias de Produção de Energia Térmica e Elétrica», 2020.

[6] J. C. Barbosa, «Cálculo de electricidade de cogeração de alta eficiência», pp. 1–101, 2012.

[7] R. Castro, «Introdução à Cogeração», vol. 2009, pp. 1–42, 2009.

[8] M. da Economia, «Decreto-Lei nº 23/2010», *Diário da República*, vol. 1, pp. 934–946, 2010.

[9] O. do T. e E. Ministério do Ambiente, «Decreto-Lei n.º 68-A/2015 de 30 de Abril», *Diário da República*, vol. 1, n. 84, pp. 2–52, 2015.

[10] «Portaria nº173/2016 de 21 de Junho», *Diário da República*, pp. 1912–1923, 2016.

[11] ERSE, «Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos». https://www.erse.pt/consumidores-de-energia/eletricidade (acedido Mar. 18, 2021).

[12] EDP Distribuição, «Manual de Ligações à rede elétrica de serviço público - Guia técnico e logístico de boas práticas», p. 231, 2018.

[13] Iberdrola, «Manual de Boas Práticas Energéticas», *Iberdrola*, pp. 1–94, 2012.

[14] E. R. dos S. E. ERSE, «Periodos Horários na Energia Elétrica em Portugal», 2020.

[15] J. Azevedo, «Apontamentos sobre Cogeração», 2001.

[16] B. F. da S. Teixeira, «Análise da viabilidade económica da implementação de uma central de micro-cogeração no setor da agropecuária», 2011.

[17] M. da Economia, «Decreto-Lei n.º 313/2001», *Diário da República*, vol. 1, n. 284, pp. 8024–8027, 2001.

[18] C. Pinho, «Sebenta de Gestão de Energia Térmica», 2018.

[19] M. Campos Botelho e H. Bifano, *Operação de caldeiras: gerenciamento, controle e manutenção*, 2º edição. Blucher, 2015.

[20] A. Bahadori, «Steam boilers», *Essentials Oil Gas Util.*, pp. 81–157, 2016, doi: 10.1016/b978-0-12-803088-2.00004-3.

[21] V. A. Bizzo e J. Nhambiu, «Geração, distribuição e utilização de vapor», *Geradores Vap.*, p. 15, 2003.

[22] M. Alberichi, «Uma indústria de produtos químicos do estado do paraná, sob ótica da NR-13 e NR-28», n. 13, 2013.

[23] V. Togawa, «Os Principais Tipos de Caldeiras». https://togawaengenharia.com.br/blog/os-principais-tipos-de-caldeiras/ (acedido Mar. 15, 2021).

[24] E. Bazzo, *Geração de Vapor*, 2º Edição. DA UFSC, 1995.

[25] L. Merlin, «Caldeiras de Condensação». http://az274650.vo.msecnd.net/cmsroot/lmp/media/media-produtos/03/pdf/aquecimento_central_funcionamento_didatico.pdf.

[26] H. Satyavada e S. Baldi, «Monitoring energy efficiency of condensing boilers via hybrid first-principle modelling and estimation», *Energy*, vol. 142, pp. 121–129, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2017.09.124.

[27] J.-P. Duroudier, «Tubular Heat Exchangers and Flat-plate Heat Exchangers», *Heat Transf. Chem. Food Pharm. Ind.*, pp. 55–87, 2016, doi: 10.1016/b978-1-78548-188-8.50002-0.

[28] Robert W. Serth; Thomas G. Lestina, «Heat Exchangers», em *Process Heat Transfer*, 2º Edição., 2014, pp. 67–100.

[29] S. M. Walas, «Heat Transfer and Heat Exchangers», em *Chemical Process Equipment*, 2.ª ed., 2005, pp. 165–224.

[30] M. N. Özisik, *Transferência de Calor - Um Texto Básico*. Editora Guanabara Koogan S.A, 1990.

[31] «Análise Financeira». https://analise-financeira.com (acedido Out. 05, 2021).

[32] «Knoow.net». https://knoow.net/cienceconempr/gestao (acedido Out. 05, 2021).

[33] «Portal Gestão». https://www.portal-gestao.com/ (acedido Out. 05, 2021).

[34] «2G Energy». https://www.2g-energy.com/ (acedido Set. 25, 2021).

[35] Pecomark, «Pecomark». https://www.pecomark.pt/pt/c/p/241460 (acedido Set. 14, 2021).

[36] R. C. Weast, *Handbook of Chemistry and Physics*, Ed 64. CRC press, 1984.

[37] Armacell, «Catálogo Armacell». https://local.armacell.com/fileadmin/cms/portugal/downloads/Pricelist_product/Armaflex_XG.pdf (acedido Set. 19, 2021).

[38] F. P. Incropera, D. P. Dewitt, T. L. Bergman, e A. S. Lavine, «Incropera». p. 643, 2008.

Anexo A – Dimensionamento da cogeração

A.1 Dados Técnicos G-box 20

Na tabela A.1 apresenta-se os dados técnicos do modelo de cogeração da G-box 20.

Tabela A. 1: Dados Técnicos do modelo de cogeração G-box 20[34]

Modelo	G-box 20
***Input* Energia (kW)**	62
***Output* Elétrico (kW)**	20
***Output* Térmico (kW)**	44
Custo Investimento (€)	55 982
Custo Manutenção (€/h)	0,73
Rendimento Elétrico (%)	32
Rendimento Térmico (%)	70,4
Rendimento Global (%)	102,4

A.2 Análise Elétrica

Na tabela A.2 apresenta-se o número de horas que cada mês apresenta tendo em conta que se trata de um ciclo diário.

Tabela A. 2: Número de horas que cada mês apresenta em cada período, num ciclo diário

Mês	Horas			
	Ponta	**Cheia**	**Vazio**	**Super Vazio**
Janeiro	124	310	186	124
Fevereiro	124	310	186	124
Março	112	280	168	112
Abril	124	310	186	124
Maio	120	300	180	120
Junho	124	310	186	124
Julho	120	300	180	120
Agosto	124	310	186	124
Setembro	124	310	186	124
Outubro	120	300	180	120
Novembro	124	310	186	124
Dezembro	120	300	180	120

Na tabela A.3 apresenta-se o mapa de cargas da análise elétrica. O mapa de cargas constitui uma tabela que apresenta as percentagens de trabalho da cogeração em função da potência instalada comparando com a potência necessária.

Tabela A. 3: Mapa de Cargas da Análise Elétrica

Mês	Mapa de Cargas			
	Ponta	**Cheio**	**Vazio**	**Super Vazio**
Janeiro	100%	100%	100%	**85%**
Fevereiro	100%	100%	100%	100%
Março	100%	100%	100%	100%
Abril	100%	100%	100%	100%
Maio	100%	100%	100%	100%
Junho	100%	100%	100%	100%
Julho	100%	100%	100%	100%
Agosto	100%	100%	100%	100%
Setembro	100%	100%	100%	100%
Outubro	100%	100%	100%	94%
Novembro	100%	100%	100%	86%
Dezembro	100%	100%	100%	84%

A.3 Cálculo das Tarifas Médias de Eletricidade

Como exemplo, recorreu-se aos dados do mês de janeiro e utilizaram-se as equações 11 e 12. Os resultados obtidos estão na tabela A.4.

Tabela A. 4: Valores do consumo elétrico mensal (kWh), tarifas do termo de redes e energia ativa (€/kWh), custo da potência de ponta (€) e tarifa média (€/kWh) para o mês de janeiro

Mês	Consumo Elétrico (KWh)	Tarifas (€/kWh)		Custo Potência Ponta (€)	Tarifa média (€/kWh)
	Ponta	**Redes**	**Ativa**		
Janeiro	4486	0,0717	0,0667	566,13	0,2646

$$Tarifa\ Média = \frac{4486\ \times (0{,}0717 + 0{,}0667) + \left(\frac{4486}{31 \times 4} \times 0{,}5048\right)}{4486}$$

$$= 0{,}2646\ €/kWh$$

Para os meses seguintes o cálculo é realizado da mesma forma, apresentando sempre o valor de 0,2646 €/kWh.

Anexo B – Análise á Tubagem

B.1 Análise à tubagem sem isolamento

Na figura B.1 apresenta-se uma tabela com as propriedades do ar em função da temperatura.

TABLE A.4 Thermophysical Properties of Gases at Atmospheric Pressure[a]

T (K)	ρ (kg/m^3)	c_p (kJ/kg · K)	$\mu \cdot 10^7$ (N · s/m^2)	$\nu \cdot 10^6$ (m^2/s)	$k \cdot 10^3$ (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m^2/s)	Pr
Air, $\mathcal{M}$ = 28.97 kg/kmol							
100	3.5562	1.032	71.1	2.00	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.590	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	15.9	0.720
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.9950	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.686
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.690
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98.0	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120	0.709
850	0.4097	1.110	384.3	93.80	59.6	131	0.716
900	0.3868	1.121	398.1	102.9	62.0	143	0.720
950	0.3666	1.131	411.3	112.2	64.3	155	0.723
1000	0.3482	1.141	424.4	121.9	66.7	168	0.726
1100	0.3166	1.159	449.0	141.8	71.5	195	0.728

Figura B. 1: Tabela com propriedades do ar [38]

<u>Exemplos de cálculo</u>

- Coeficiente de dilatação térmica

$$\beta = \frac{1}{\overline{T}_{filme}} = \frac{1}{300} = 3{,}33 \times 10^{-3}\ K^{-1}$$

- Número de Grashoft para tubos verticais

$$Gr = \frac{L^3 \cdot \rho^2 \cdot g \cdot \beta \cdot (T_{pe} - T_{ar})}{\mu^2}$$

$$Gr = \frac{10^3 \times 1{,}16^2 \times 9{,}8 \times 3{,}33 \times 10^{-3} \times (30 - 20)}{(1{,}85 \times 10^{-5})^2}$$

$$Gr = 1{,}29 \times 10^{12}$$

- Número de Prandtl para convecção natural no exterior do tubo

$$Pr = \frac{cp \cdot \mu}{k} = \frac{1{,}01 \times 1{,}85 \times 10^{-5}}{2{,}63 \times 10^{-5}} = 0{,}707$$

- Número de Rayleigh

$$Ra = Gr \cdot Pr = 1{,}29 \times 10^{12} \times 0{,}707 = 9{,}14 \times 10^{11}$$

- Número de Nusselt para convecção natural no exterior do tubo

$$Nu = \left\{ 0{,}825 + \frac{0{,}387 \cdot Ra^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0{,}492}{Pr}\right)^{9/16}\right]^{8/27}} \right\}^2$$

$$Nu = \left\{ 0{,}825 + \frac{0{,}387 \times (9{,}14 \times 10^{11})^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0{,}492}{0{,}707}\right)^{9/16}\right]^{8/27}} \right\}^2 = 1{,}07 \times 10^3$$

- Coeficiente de Transferência de calor para convecção natural

$$h_{cn} = \frac{1{,}07 \times 10^3 \times 2{,}63 \times 10^{-5}}{10} = 2{,}82 \times 10^{-3} \frac{kW}{m^2 \cdot K} = 2{,}82 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

B.2 Análise à tubagem com isolamento

Exemplos de cálculo

- Coeficiente de dilatação térmica

$$\beta = \frac{1}{\bar{T}_{filme}} = \frac{1}{300} = 3{,}33 \times 10^{-3}\ K^{-1}$$

- Número de Grashof para tubos verticais

$$Gr = \frac{L^3 \cdot \rho^2 \cdot g \cdot \beta \cdot (T_{pe} - T_{ar})}{\mu^2}$$

$$Gr = \frac{10^3 \times 1{,}16^2 \times 9{,}8 \times 3{,}33 \times 10^{-3} \times (23 - 20)}{(1{,}85 \times 10^{-5})^2}$$

$$Gr = 3{,}88 \times 10^{11}$$

- Número de Prandtl para convecção natural no exterior do tubo

$$Pr = \frac{cp \cdot \mu}{k} = \frac{1{,}01 \times 1{,}85 \times 10^{-5}}{2{,}63 \times 10^{-5}} = 0{,}707$$

- Número de Rayleigh

$$Ra = Gr \cdot Pr = 3{,}88 \times 10^{11} \times 0{,}707 = 2{,}74 \times 10^{11}$$

- Número de Nusselt para convecção natural no exterior do tubo

$$Nu = \left\{ 0{,}825 + \frac{0{,}387 \cdot Ra^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0{,}492}{Pr}\right)^{9/16}\right]^{8/27}} \right\}^2$$

$$Nu = \left\{ 0{,}825 + \frac{0{,}387 \times (2{,}74 \times 10^{11})^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0{,}492}{0{,}707}\right)^{9/16}\right]^{8/27}} \right\}^2 = 7{,}27 \times 10^2$$

- Coeficiente de Transferência de calor para convecção natural

$$h_{cn} = \frac{7{,}27 \times 10^2 \times 2{,}63 \times 10^{-5}}{10} = 1{,}91 \ \times 10^{-3} \frac{kW}{m^2 \cdot K} = 1{,}91 \ \frac{W}{m^2 \cdot K}$$