



INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO
Universidade Técnica de Lisboa

Avaliação Económica e Energética do Dimensionamento de Centrais de Cogeração e Trigeração

Alexandre Bernardo de Seabra Geada de Figueiredo Alcântara

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Júri

Presidente: Professor Doutor Mário Manuel Gonçalves da Costa

Orientador: Professor Doutor João Luís Toste de Azevedo

Vogal: Professor Doutor Gabriel Paulo Alcântara Pita

Outubro 2012

Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao Professor João Luís Toste de Azevedo pela ajuda, paciência e apoio ao longo da realização da presente dissertação.

Agradecer também ao Sporting Clube de Portugal e à Galp Energia por me permitirem realizar o estágio que originou este trabalho. Em particular, à Eng^a Helena Reis do Sporting Clube de Portugal e à Dr^a Vera Vicente da Galp Energia.

Aos meus amigos, em especial ao Caio Pereira e ao Frederico Lopes, companheiros de luta ao longo de todo o curso e na realização da presente dissertação.

À minha família por me ter permitido a oportunidade de estudar e por me acompanhar diariamente.

Resumo

A gestão dos recursos de energia é, actualmente, um dos principais desafios a enfrentar a nível mundial. O aumento do consumo energético, o preço cada vez mais elevado dos combustíveis fósseis e uma preocupação crescente com o ambiente a nível global têm vindo a conferir uma importância cada vez maior à eficiência energética e à racionalização da energia.

A presente dissertação centrou-se no estudo do dimensionamento de centrais de cogeração e trigeração num ponto de vista económico e energético. Para tal, foi desenvolvida uma aplicação que permite ensaiar diferentes potências de equipamentos de cogeração e de trigeração com base nos diagramas de carga das necessidades de energia térmica calorífica e frigorífica. Esta aplicação tem a finalidade de produzir uma série de resultados energéticos e económicos que permitam avaliar cada uma das soluções ensaiadas.

Foram avaliados dois casos de estudo na presente dissertação. O primeiro correspondeu às instalações do Sporting Clube de Portugal e concluiu que uma central de trigeração com um motor de combustão interna com produção de vapor de 900 kW_e e um *chiller* de absorção de efeito duplo de 600 kW_f seria a melhor solução, apresentando um valor actual líquido de 635.176€ e uma poupança de energia primária efectiva de 15,7%. O segundo caso de estudo centrou-se num edifício típico de escritórios e revelou que, para um edifício com este perfil de necessidades, uma central de cogeração ou de trigeração não é um investimento economicamente nem energeticamente viável.

PALAVRAS-CHAVE: Cogeração, Trigeração, Poupança de energia primária efectiva, Eficiência energética, Diagramas de carga.

Abstract

Nowadays, the management of energy resources is one of the main challenges to be faced worldwide. The increase in energy consumption, the rising price of fossil fuels and a greater environmental concern on a global scale have led to a significant importance of energy efficiency and energy usage.

The present dissertation focuses on the study of cogeneration and trigeneration dimensioning from an economic and energetic point of view. Therefore, a program was developed that allows the testing of different powers of cogeneration and trigeneration equipments based on the heat and cooling load diagrams of the thermal needs. The aim of this program is to produce a series of economic and energetic results that allow the evaluation of each tested solution.

Two cases studies were evaluated in the present dissertation. The first concerns the facilities of *Sporting Clube de Portugal* and concluded that a trigeneration plant with a 900 kW_e internal combustion engine allowing steam production associated with a 600 kW_f double effect lithium bromide absorption *chiller* would be the best solution enabling a net present value of 635.176€ and an effective primary energy saving of 15,7%. The second cases study focused on a typical office building and concluded that a building with this kind of energy profile is not suited for a cogeneration or trigeneration investment either in an economic or energetic way.

KEYWORDS: Cogeneration, Trigeneration, Effective primary energy saving, Energy efficiency, Load diagrams.

Índice

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	ii
Abstract	iii
Índice.....	iv
Índice de Figuras	vi
Índice de Tabelas	viii
Abreviaturas e Simbologia	viii
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento e Motivação	1
1.2. Objectivo.....	3
1.3. Revisão Bibliográfica	4
1.4. Contribuição	9
1.5. Organização.....	10
2. Tecnologias de Cogeração e Trigeração	11
2.1. Cogeração.....	11
2.1.1. Turbina a Vapor.....	11
2.1.2. Turbina a Gás	12
2.1.3. Motor alternativo de Combustão Interna.....	13
2.1.4. Micro-turbina	15
2.1.5. Pilhas de Combustível	15
2.1.6. Motores Stirling	16
2.1.7. Comparação entre Tecnologias de Cogeração.....	17
2.2. Trigeração.....	18
2.2.1. Chillers de Absorção	18
2.2.2. Chillers de Adsorção	19
2.3. Escolha de Tecnologias.....	20
2.3.1. Cogeração	20
2.3.2. Trigeração	20
3. Metodologia de Análise	21
3.1. Centrais de Cogeração/Trigeração Consideradas.....	21
3.1.1. Central de Cogeração – Motor de Combustão Interna	21
3.1.2. Central de Trigeração – Motor de Combustão Interna e <i>Chiller</i> de Absorção de Efeito Simples	22
3.1.3. Central de Trigeração – Motor de Combustão Interna e <i>Chiller</i> de Absorção de Duplo Efeito	23
3.1.4. Central de Cogeração – Turbina a Gás	24

3.1.5.	Central de Trigeriação – Turbina a Gás e <i>Chiller</i> de Absorção de Duplo Efeito	25
3.2.	<i>Parâmetros de Avaliação da Cogeração/Trigeriação</i>	26
3.2.1.	Parâmetros Energéticos	26
3.2.2.	Parâmetros Económicos.....	29
3.3.	<i>Análise dos Consumos Energéticos e dos Diagramas de Carga</i>	32
3.4.	<i>Algoritmo de Cálculo</i>	33
3.4.1.	<i>Inputs</i> e Funcionamento da Aplicação	33
3.4.2.	Regime de Funcionamento dos Equipamentos de Cogeração e de Trigeriação	37
3.4.3.	Cálculo de Parâmetros	38
4.	Casos de Estudo	45
4.1.	<i>Sporting Clube de Portugal</i>	45
4.1.1.	Motor de Combustão Interna – Carga Máxima	51
4.1.2.	Motor de Combustão Interna – Controlo de Carga	53
4.1.3.	Motor de Combustão Interna – Vapor.....	55
4.1.4.	Turbina a Gás	57
4.1.5.	Comparação entre Cenários Estudados	58
4.1.6.	Discussão de Resultados	62
4.2.	<i>Edifício de Escritórios</i>	63
4.2.1.	Motor de Combustão Interna – Carga Máxima	68
4.2.2.	Motor de Combustão Interna – Controlo de Carga	68
4.2.3.	Motor de Combustão Interna – Produção de Vapor	69
4.2.4.	Turbina a Gás	71
4.2.5.	Discussão de Resultados	71
5.	Conclusões	72
6.	Referências Bibliográficas	74
7.	Anexos	
I.	Construção das necessidades térmicas utilizadas pela aplicação desenvolvida	I-1
II.	Dados de Motores de Combustão Interna	II-1
III.	Dados de Turbinas a Gás.....	III-1
IV.	Dados de <i>chillers</i> de absorção de efeito simples e duplo	IV-1
V.	Resultados obtidos na análise às Instalações do Sporting Clube de Portugal no horário de Pontas e Cheias sem activar a caldeira de apoio ao <i>chiller</i> de absorção	V-1
VI.	Dados de referência da aplicação desenvolvida.....	VI-1
VII.	Análise do Isolamento	VII-1

Índice de Figuras

FIGURA 1 – DISTRIBUIÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA PRIMÁRIA E FINAL EM PORTUGAL EM 2011 [1]	1
FIGURA 2 – DEPENDÊNCIA ENERGÉTICA DO EXTERIOR [1]	1
FIGURA 3 – PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉCTRICA EM 2011 E 2010 [2]	2
FIGURA 4 – CURVA DAS NECESSIDADES TÉRMICAS PARAMETRIZADAS “REGRA DO RECTÂNGULO MÁXIMO” [6]	6
FIGURA 5 – CURVA DAS NECESSIDADES TÉRMICAS PARAMETRIZADAS [8]	7
FIGURA 6 – ESTRATÉGIAS PROPOSTAS COMO ALTERNATIVA À REGRA DO RECTÂNGULO MÁXIMO [9]	7
FIGURA 7 – FUNCIONAMENTO ELÉCTRICO DA CENTRAL TÉRMICA PROPOSTA [10]	8
FIGURA 8 – FUNCIONAMENTO TÉRMICO DA CENTRAL TÉRMICA PROPOSTA [10]	9
FIGURA 9 – ESQUEMA TÍPICO DE UMA CENTRAL DE COGERAÇÃO COM TURBINA A GÁS [11]	12
FIGURA 10 – ESQUEMA TÍPICO DE UMA CENTRAL DE COGERAÇÃO COM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA [11]	13
FIGURA 11 – ESQUEMA TÍPICO DE UMA CENTRAL DE COGERAÇÃO COM PRODUÇÃO DE ÁGUA QUENTE E VAPOR DE BAIXA PRESSÃO [12]	14
FIGURA 12 – FUNCIONAMENTO TÍPICO DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA COM CARGA VARIÁVEL [13]	14
FIGURA 13 – ESQUEMA DA CENTRAL DE COGERAÇÃO COM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA	21
FIGURA 14 – ESQUEMA DA CENTRAL DE TRIGERAÇÃO COM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA	22
FIGURA 15 – ESQUEMA DA CENTRAL DE TRIGERAÇÃO COM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA COM PRODUÇÃO DE VAPOR ...	23
FIGURA 16 – ESQUEMA DA CENTRAL DE COGERAÇÃO COM TURBINA A GÁS	24
FIGURA 17 – ESQUEMA DA CENTRAL DE TRIGERAÇÃO COM TURBINA A GÁS	25
FIGURA 18 – SEQUÊNCIA DE INPUTS DA APLICAÇÃO	33
FIGURA 19 – JANELA DAS OPÇÕES DE COGERAÇÃO CONSIDERADAS PELA APLICAÇÃO	34
FIGURA 20 – JANELA ONDE SE INSERE O INTERVALO DE POTÊNCIA DE COGERAÇÃO A ENSAIAR	34
FIGURA 21 – JANELA DAS OPÇÕES DE TRIGERAÇÃO CONSIDERADAS PELA APLICAÇÃO	35
FIGURA 22 – JANELA ONDE SE INSERE O INTERVALO DE POTÊNCIA DE TRIGERAÇÃO A ENSAIAR	35
FIGURA 23 – JANELA DE ESCOLHA DO HORÁRIO DE FUNCIONAMENTO DA CENTRAL A ENSAIAR	35
FIGURA 24 – JANELA DE ESCOLHA DOS RESULTADOS GERADOS PELA APLICAÇÃO	36
FIGURA 25 – VARIAÇÃO DO RENDIMENTO ELÉCTRICO COM A POTÊNCIA ELÉCTRICA DO MOTOR	39
FIGURA 26 – VARIAÇÃO DO RENDIMENTO TÉRMICO COM A POTÊNCIA ELÉCTRICA DO MOTOR	39
FIGURA 27 – VARIAÇÃO DA CARGA DO MOTOR COM O RÁCIO POTÊNCIA TÉRMICA/POTÊNCIA TÉRMICA NOMINAL	40
FIGURA 28 – DIMINUIÇÃO DO RENDIMENTO ELÉCTRICO COM A CARGA DO MOTOR	40
FIGURA 29 – AUMENTO DO RENDIMENTO TÉRMICO COM A CARGA DO MOTOR	41
FIGURA 30 – DECOMPOSIÇÃO DO RENDIMENTO TÉRMICO EM MOTORES	42
FIGURA 31 – VARIAÇÃO DO PREÇO POR kW_e COM A POTÊNCIA ELÉCTRICA DO MOTOR	42
FIGURA 32 – VARIAÇÃO DO RENDIMENTO ELÉCTRICO E TÉRMICO COM A POTÊNCIA ELÉCTRICA DA TURBINA	43
FIGURA 33 – VARIAÇÃO DO PREÇO DE TURBINAS COM A POTÊNCIA ELÉCTRICA	43
FIGURA 34 – VARIAÇÃO DO PREÇO DE CHILLERS DE EFEITO SIMPLES E DUPLO COM A POTÊNCIA FRIGORÍFICA	44
FIGURA 35 – ESQUEMA REPRESENTATIVO DO CIRCUITO DE ÁGUA QUENTE	45
FIGURA 36 – ESQUEMA REPRESENTATIVO DO CIRCUITO DE ÁGUA FRIA	46
FIGURA 37 – DIAGRAMA DE CARGA DA NECESSIDADE TÉRMICA CALORÍFICA NOS DIAS ÚTEIS	47
FIGURA 38 – DIAGRAMA DE CARGA DA NECESSIDADE TÉRMICA CALORÍFICA NOS SÁBADOS	47
FIGURA 39 – DIAGRAMA DE CARGA DA NECESSIDADE TÉRMICA CALORÍFICA NOS DOMINGOS OU FERIADOS	48
FIGURA 40 – DIAGRAMA DE CARGA DA NECESSIDADE TÉRMICA FRIGORÍFICA NOS DIAS ÚTEIS	48
FIGURA 41 – DIAGRAMA DE CARGA DA NECESSIDADE TÉRMICA FRIGORÍFICA NOS SÁBADOS	49
FIGURA 42 – DIAGRAMA DE CARGA DA NECESSIDADE TÉRMICA CALORÍFICA NOS DOMINGOS OU FERIADOS	49
FIGURA 43 – POTÊNCIA CALORÍFICA NECESSÁRIA EM FUNÇÃO DO Nº DE HORAS	50
FIGURA 44 – POTÊNCIA FRIGORÍFICA NECESSÁRIA EM FUNÇÃO DO Nº DE HORAS	50
FIGURA 45 – POUPANÇA NA FACTURA ENERGÉTICA PARA UMA CENTRAL COM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA À CARGA MÁXIMA	52

FIGURA 46 – VALOR ACTUAL LÍQUIDO PARA UMA CENTRAL COM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA À CARGA MÁXIMA	52
FIGURA 47 – POUPANÇA DE ENERGIA PRIMÁRIA PARA UMA CENTRAL COM MOTOR À CARGA MÁXIMA	53
FIGURA 48 – POUPANÇA DE ENERGIA PRIMÁRIA EFECTIVA PARA UMA CENTRAL COM MOTOR À CARGA MÁXIMA	53
FIGURA 49 – POUPANÇA NA FACTURA ENERGÉTICA PARA UMA CENTRAL COM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA COM CONTROLO DE CARGA	54
FIGURA 50 – VALOR ACTUAL LÍQUIDO PARA UMA CENTRAL COM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA COM CONTROLO DE CARGA.....	54
FIGURA 51 – POUPANÇA DE ENERGIA PRIMÁRIA EFECTIVA PARA UMA CENTRAL COM MOTOR COM CONTROLO DE CARGA ...	55
FIGURA 52 – POUPANÇA DE ENERGIA PRIMÁRIA EFECTIVA PARA UMA CENTRAL COM MOTOR COM CONTROLO DE CARGA ...	55
FIGURA 53 – POUPANÇA NA FACTURA ENERGÉTICA PARA UMA CENTRAL COM MOTOR COM PRODUÇÃO DE VAPOR	56
FIGURA 54 – VALOR ACTUAL LÍQUIDO PARA UMA CENTRAL COM MOTOR COM PRODUÇÃO DE VAPOR.....	56
FIGURA 55 – POUPANÇA DE ENERGIA PRIMÁRIA PARA UMA CENTRAL COM MOTOR COM PRODUÇÃO DE VAPOR	57
FIGURA 56 – POUPANÇA DE ENERGIA PRIMÁRIA EFECTIVA PARA UMA CENTRAL COM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA COM PRODUÇÃO DE VAPOR.....	57
FIGURA 57 – FUNCIONAMENTO DA CENTRAL PROPOSTA NOS DIAS ÚTEIS DO MÊS DE JANEIRO.....	60
FIGURA 58 – FUNCIONAMENTO DA CENTRAL PROPOSTA NOS DIAS ÚTEIS DO MÊS DE JANEIRO.....	60
FIGURA 59 – FUNCIONAMENTO DA CENTRAL PARA OS DIAS ÚTEIS DO MÊS DE JULHO	61
FIGURA 60 – FUNCIONAMENTO DA CENTRAL PARA OS DIAS ÚTEIS DO MÊS DE JULHO	61
FIGURA 61 – DIAGRAMA DE CARGA DA NECESSIDADE TÉRMICA CALORÍFICA NOS DIAS ÚTEIS	63
FIGURA 62 – DIAGRAMA DE CARGA DA NECESSIDADE TÉRMICA CALORÍFICA NOS SÁBADOS	64
FIGURA 63 – DIAGRAMA DE CARGA DA NECESSIDADE TÉRMICA CALORÍFICA NOS DOMINGOS OU FERIADOS.....	64
FIGURA 64 – DIAGRAMA DE CARGA DA NECESSIDADE TÉRMICA FRIGORÍFICA NOS DIAS ÚTEIS.	65
FIGURA 65 – DIAGRAMA DE CARGA DA NECESSIDADE TÉRMICA FRIGORÍFICA NOS SÁBADOS	65
FIGURA 66 – DIAGRAMA DE CARGA DA NECESSIDADE TÉRMICA FRIGORÍFICA NOS DOMINGOS OU FERIADOS.....	66
FIGURA 67 – POTÊNCIA CALORÍFICA NECESSÁRIA EM FUNÇÃO DO Nº DE HORAS	66
FIGURA 68 – POTÊNCIA FRIGORÍFICA NECESSÁRIA EM FUNÇÃO DO Nº DE HORAS	67
FIGURA 69 – POUPANÇA NA FACTURA ENERGÉTICA PARA UMA CENTRAL COM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA COM CONTROLO DE CARGA	68
FIGURA 70 – POUPANÇA DE ENERGIA PRIMÁRIA PARA UMA CENTRAL COM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA COM CONTROLO DE CARGA	69
FIGURA 71 – POUPANÇA DE ENERGIA PRIMÁRIA EFECTIVA PARA UMA CENTRAL COM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA COM CONTROLO DE CARGA	69
FIGURA 72 – POUPANÇA NA FACTURA ENERGÉTICA PARA UMA CENTRAL COM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA COM PRODUÇÃO DE VAPOR.....	70
FIGURA 73 – POUPANÇA DE ENERGIA PRIMÁRIA PARA UMA CENTRAL COM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA COM PRODUÇÃO DE VAPOR.....	70
FIGURA A. 1 – VALOR ACTUAL LÍQUIDO PARA UMA CENTRAL COM MOTOR À CARGA MÁXIMA	V-1
FIGURA A. 2 – POUPANÇA DE ENERGIA PRIMÁRIA PARA UMA CENTRAL COM MOTOR À CARGA MÁXIMA.....	V-1
FIGURA A. 3 – POUPANÇA DE ENERGIA PRIMÁRIA EFECTIVA PARA UMA CENTRAL COM MOTOR À CARGA MÁXIMA.....	V-1
FIGURA A. 4 – VALOR ACTUAL LÍQUIDO PARA UMA CENTRAL COM MOTOR COM CONTROLO DE CARGA	V-2
FIGURA A. 5 – POUPANÇA DE ENERGIA PRIMÁRIA PARA UMA CENTRAL COM MOTOR COM CONTROLO DE CARGA.....	V-2
FIGURA A. 6 – POUPANÇA DE ENERGIA PRIMÁRIA EFECTIVA PARA UMA CENTRAL COM MOTOR COM CONTROLO DE CARGA. V-2	
FIGURA A. 7 – VALOR ACTUAL LÍQUIDO PARA UMA CENTRAL COM MOTOR COM PRODUÇÃO DE VAPOR	V-3
FIGURA A. 8 – POUPANÇA DE ENERGIA PRIMÁRIA PARA UMA CENTRAL COM MOTOR COM PRODUÇÃO DE VAPOR	V-3
FIGURA A. 9 – POUPANÇA DE ENERGIA PRIMÁRIA EFECTIVA PARA UMA CENTRAL COM MOTOR COM PRODUÇÃO DE VAPOR V-3	

Índice de Tabelas

TABELA 1 – VALORES DE REFERÊNCIA DAS DIVERSAS TECNOLOGIAS DE COGERAÇÃO [11]	17
TABELA 2 – VALORES DE REFERÊNCIA PARA CHILLERS DE ABSORÇÃO [15]	19
TABELA 3 – RESULTADOS DE FUNCIONAMENTO DA CENTRAL CONVENCIONAL	51
TABELA 4 – COMPARAÇÃO DAS MELHORES SOLUÇÕES ECONÓMICAS PARA CADA CENÁRIO EM HORÁRIO TOTAL	58
TABELA 5 – COMPARAÇÃO DAS MELHORES SOLUÇÕES ECONÓMICAS PARA CADA CENÁRIO EM PONTAS E CHEIAS.....	59
TABELA 6 – RESULTADOS PARA A CENTRAL CONVENCIONAL DO EDIFÍCIO DE ESCRITÓRIOS CONSIDERADO	67
TABELA A. 1 – NECESSIDADES DE ENERGIA TÉRMICA CALORÍFICA NO MÊS DE JANEIRO	I-1
TABELA A. 2 – NECESSIDADES DE ENERGIA TÉRMICA CALORÍFICA NO MÊS DE JULHO.....	I-1
TABELA A. 3 – DADOS UTILIZADOS PARA DEFINIÇÃO DO RENDIMENTO ELÉCTRICO, TÉRMICO E DO PREÇO DOS MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA	II-1
TABELA A. 4 – DADOS UTILIZADOS PARA EXPRESSAR AS VARIAÇÕES DE PARÂMETROS COM A CARGA	II-1
TABELA A. 5 – DADOS UTILIZADOS PARA DEFINIÇÃO DA QUANTIDADE DE VAPOR PRODUZIDA EM MOTORES.....	II-1
TABELA A. 6 – DADOS PARA DEFINIÇÃO DO RENDIMENTO TÉRMICO E ELÉCTRICO DE TURBINAS A GÁS.....	III-1
TABELA A. 7 – DADOS UTILIZADOS PARA DEFINIÇÃO DO PREÇO DE TURBINAS A GÁS	III-1
TABELA A. 8 – DADOS UTILIZADOS PARA DEFINIÇÃO DO PREÇO DE CHILLERS DE ABSORÇÃO DE EFEITO SIMPLES.....	IV-1
TABELA A. 9 – DADOS UTILIZADOS PARA DEFINIÇÃO DO PREÇO DE CHILLERS DE ABSORÇÃO DE EFEITO DUPLO	IV-1
TABELA A. 10 – DADOS DE REFERÊNCIA RELATIVOS AO GÁS NATURAL	VI-1
TABELA A. 11 – DADOS DE REFERÊNCIA RELATIVOS À ELECTRICIDADE.....	VI-1
TABELA A. 12 – DADOS DE REFERÊNCIA RELATIVOS A CONVERSÕES	VI-1
TABELA A. 13 – DADOS DE REFERÊNCIA RELATIVOS A EQUIPAMENTOS	VI-1
TABELA A. 14 – ESPESSURA DA TUBAGEM PRESENTE NO COMPLEXO ALVALADE XXI.....	VII-1
TABELA A. 15 – ESPESSURAS PROPOSTAS PARA O ISOLAMENTO DA TUBAGEM	VII-1
TABELA A. 16 – RESULTADOS OBTIDOS PARA A TOTALIDADE DO CIRCUITO DE ÁGUA QUENTE	VII-1

Abreviaturas e Simbologia

COP – Coeficiente de Performance

CO_{2,eq} – Dióxido de Carbono Equivalente

ENE 2020 – Estratégia Nacional para a energia 2020

GEE – Gases com Efeito de estufa

kW_e – kilo-Watt eléctrico

kW_f – kilo-Watt frigorífico

kW_t – kilo-Watt térmico

MW_e – Mega –Watt eléctrico

PEP – Poupança de Energia Primária

PEP_{Absoluta} – Poupança de Energia Primária Absoluta

PEP_{Efectiva} – Poupança de Energia Primária Efectiva

PFE – Poupança na Factura Energética

PRI – Período de Retorno do Investimento

REE – Rendimento Eléctrico Equivalente

TIR – Taxa Interna de Rentabilidade

VAL – Valor Actual Líquido

1. Introdução

1.1. Enquadramento e Motivação

Portugal é um país com escassos recursos energéticos endógenos, nomeadamente, aqueles que asseguram a generalidade das necessidades energéticas da maioria dos países desenvolvidos como o petróleo, o carvão e o gás natural. A partir da Figura 1, que representa a distribuição do consumo de energia primária e final do País em 2011, verifica-se que 76,1% da energia primária é de origem fóssil, bem como 63,7% da energia final.

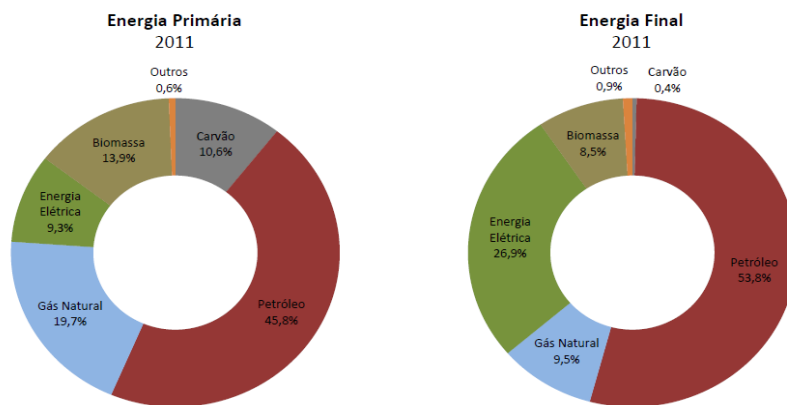


Figura 1 – Distribuição do Consumo de Energia Primária e Final em Portugal em 2011 [1]

Deste modo verifica-se através da Figura 2 que Portugal apresenta uma elevada dependência energética do exterior, 77,1% em 2011, resultante nomeadamente das importações de fontes primárias de origem fóssil.

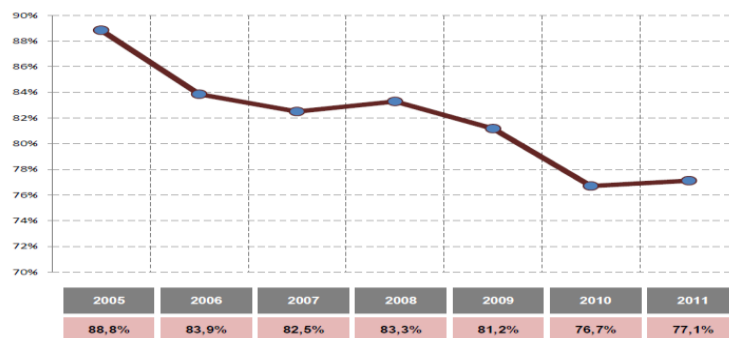


Figura 2 – Dependência energética do exterior [1]

No que diz respeito à produção de energia eléctrica, tem sido feito um grande esforço em Portugal de modo a investir-se cada vez mais em tecnologias renováveis. Pode-se observar que o incremento destas tecnologias diminuiram a dependência energética do exterior como ilustrado na Figura 2. Da Figura 3 pode observar-se a produção de energia eléctrica pelas diferentes tecnologias, bem como verificar-se que em 2010 a produção de energia eléctrica por fontes renováveis foi de 52%,

enquanto que em 2011 foi de 46%. Esta diminuição deve-se sobretudo à energia eléctrica produzida por centrais hídricas depender da pluviosidade, menor em 2011.



Figura 3 – Produção de Energia eléctrica em 2011 e 2010 [2]

A diminuição das reservas de recursos de origem fóssil a nível mundial associada ao conhecido impacto ambiental provocado pela utilização destes recursos e à cessação do Protocolo de Kyoto em 2012, levou a que fosse aprovado em Dezembro de 2008 pela União Europeia o denominado “Pacote Energia-Clima” que consiste em conseguir, até 2020, uma redução de 20% da emissão de gases com efeito de estufa, um aumento para 20% da quota das energias renováveis e uma melhoria da eficiência energética em 20% [3].

A nível nacional foi aprovada em 15 de Abril de 2010 pelo XVIII Governo Constitucional a Estratégia Nacional para a Energia com horizonte em 2020 (ENE 2020). Este programa foi aprovado com o intuito de Portugal liderar a revolução energética, bem como assegurar a posição do País entre os cinco líderes europeus ao nível dos objectivos em matéria de energias renováveis em 2020 e afirmar Portugal na liderança global na fileira industrial das energias renováveis de forte capacidade exportadora. A ENE 2020 assenta sobre cinco eixos principais que traduzem um conjunto focado de prioridades e um enunciado de medidas a tomar. O Eixo 3 aborda a promoção da eficiência energética e neste destaca-se a seguinte medida: “Será promovida a racionalização do uso da energia pela indústria e

pela agricultura e a utilização da cogeração de elevada eficiência visando a redução do consumo de energia primária.” [4]

A cogeração de elevada eficiência assume-se assim como uma das medidas importantes para cumprir os objectivos tanto do Pacote Energia Clima como da ENE 2020, pelo que será um dos temas a considerar na presente dissertação.

Em termos nacionais a actividade de cogeração conheceu várias legislações. O Decreto de Lei n.º 538/99 alterado pelos Decretos de Lei n.º 312/2001 e 313/2001 estabeleceu as regras aplicáveis à produção combinada de calor e electricidade, vulgarmente conhecida como cogeração. Desde então, contudo, o sector energético, de uma forma geral, e o sector eléctrico, de uma forma particular, conheceram novos desafios organizacionais e ambientais. Por um lado, o desenvolvimento do mercado interno da energia levou à aprovação da Directiva n.º 2003/54/CE que aprofundou as reformas liberalizadoras na operação do mercado do sector e conduziu à reforma do seu enquadramento legal principalmente traduzida no Decreto de Lei n.º 29/2006 que define as bases gerais da organização e funcionamento do Sistema Eléctrico Nacional, e no Decreto -Lei n.º 172/2006, de 23 de Agosto, que desenvolve estas bases. Por outro lado, as crescentes preocupações com a defesa do ambiente tornaram necessário um maior estreitamento das políticas ambiental e energética, de forma a viabilizar o cumprimento dos compromissos assumidos internacionalmente, em particular quanto à limitação das emissões dos gases que provocam o efeito de estufa, objecto da Convenção Quadro das Nações Unidas para as Alterações Climáticas, do Protocolo de Quioto dela decorrente e recentemente do Acordo de Copenhaga. A entrada em vigor da Directiva n.º 2004/8/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, relativa à promoção da cogeração com base na procura de calor útil no mercado interno da energia e que altera a Directiva n.º 92/42/CEE tornam necessária a adaptação do regime da actividade de cogeração. [5]

Assim surge o Decreto de Lei n.º 23/2010 que estabelece o regime jurídico e remuneratório aplicável à energia eléctrica e mecânica e de calor útil produzidos em cogeração. Após a publicação do Decreto de Lei n.º 23/2010 surge a Lei n.º 19/2010 que dá nova redacção aos artigos 4º, 5º, 6º e 18º do Decreto de Lei. Finalmente foi publicada a Portaria n.º 140/2012 que estabelece os termos de referência do regime remuneratório aplicável às instalações de cogeração.

É neste enquadramento que a presente dissertação incide no estudo da actividade de cogeração e também de trigeriação.

1.2. Objectivo

O objectivo da presente dissertação consiste em estudar o dimensionamento de centrais de cogeração e trigeriação no sector terciário de modo a avaliar a viabilidade económica e energética das mesmas.

1.3. Revisão Bibliográfica

Seguidamente são referenciados alguns trabalhos desenvolvidos no âmbito do dimensionamento de uma central de cogeração/trigeração no sector terciário e da estratégia de funcionamento adoptada para as mesmas.

Arcuri, Florio e Fragiacomio [6] desenvolveram um método que, partindo dos diagramas de carga horários, permite a optimização do dimensionamento de uma central de trigeração bem como da estratégia de operação, utilizando um método de programação inteira mista e aplicaram-no ao caso de um complexo hospitalar através do software LINGO 8.0 que usa o método Branch & Bound. O complexo hospitalar em questão tem necessidades de vapor e água quente que são satisfeitas por caldeiras convencionais. A satisfação das necessidades frigoríficas é assegurada por equipamentos locais, não havendo produção centralizada de frio. Como alternativa, os autores propõem a implementação de uma central térmica com um equipamento de cogeração apoiado por caldeiras, bem como *chillers* de absorção e de compressão. O motor de combustão interna e a turbina a gás são as opções consideradas para o equipamento de cogeração. Enquanto para a produção de frio são considerados *chillers* de absorção de efeito simples ou duplo em paralelo com *chillers* de compressão. O estudo efectuado apresenta uma comparação entre o funcionamento da central em cogeração ou trigeração. As necessidades de vapor não são abordadas tendo sido apenas considerado o circuito de baixa temperatura.

São feitas duas análises para o problema em questão. A primeira é uma análise a curto prazo, realizada para um ano, na qual se define a função objectivo como sendo o lucro anual da instalação, ou seja a poupança no custo de operação da central. A segunda análise é feita a longo prazo, para o período de vida da instalação, e a função objectivo é o valor actual líquido (VAL). Após definidas as funções objectivo são estabelecidos os vários critérios de decisão para descrição do funcionamento. O estudo é efectuado representando a variação dos parâmetros a otimizar em função das potências dos equipamentos que são considerados a funcionar sempre à carga total.

Com este estudo concluíram que, num contexto energeticamente complexo como o de um hospital, um sistema de trigeração oferece um potencial de redução de custos superior a um de cogeração. Isto deve-se ao facto das necessidades de arrefecimento no verão permitirem um aumento da potência da central. Concluiu-se também que para estes casos o motor de combustão interna é mais viável que as turbinas a gás devido à sua razão electricidade/calor mais elevada. A configuração óptima corresponde àquela em que o valor actual líquido é maximizado uma vez que, ao contrário do lucro anual, este critério contempla o custo do investimento inicial.

Além da análise técnico-económica foi também realizada uma análise ambiental. A referência para esta análise seria a poupança de energia primária (PEP) que define a percentagem entre a quantidade de energia poupada entre uma central de cogeração e uma convencional. Contudo, para melhor estimar a poupança de energia primária os autores propõem avaliar a poupança de energia

primária absoluta ($PEP_{Absoluta}$), ou seja a energia que se poupa em utilizar a cogeração em vez dos meios convencionais e dividi-la pela totalidade da energia necessária ao funcionamento da central convencional. Conclui-se que de acordo com este novo parâmetro as centrais de trigerção com motores de combustão interna podem atingir valores de $PEP_{Absoluta}$ na ordem dos 35%, descendo para 23% nas centrais de turbina a gás. Estes valores seriam alcançados quando cerca de 85% das necessidades térmicas fossem satisfeitas. Esta análise energética foi baseada nas eficiências elétrica e térmica de referência Italianas de 2005 que eram respectivamente 38% e 80%.

Kavvadias, Tosios e Maroulis [7] abordaram também o problema do dimensionamento óptimo de centrais de trigerção avaliando uma nova estratégia de operação da central térmica em comparação com outras três para o caso de um hospital em território grego. Como tecnologias a implementar consideraram um motor de combustão interna, para cogeração, e *chillers* de absorção e compressão para produção de frio com uma caldeira de apoio na instalação. Partindo dos diagramas de carga de aquecimento, arrefecimento e eléctrico para um dia típico de verão e de inverno e tendo em conta as tarifas eléctricas aplicadas na Grécia, propuseram a avaliação de quatro estratégias de operação para o caso em estudo. São elas:

- Operação contínua – Equipamento de cogeração funcionando sempre para 8, 16 ou 24 horas pretendendo-se simular 1,2 ou 3 turnos.
- Corte de Pico – Com o funcionamento do equipamento de cogeração programado para entrar em funcionamento quando se atinge $PS_{set} = 70\%$, 80% ou 90% da carga eléctrica diária.
- Carga Parcial – O equipamento de cogeração satisfaz as necessidades eléctricas do edifício até às potências estabelecidas 50%, 100% e 150% da carga eléctrica mínima requerida.
- Seguimento da carga eléctrica equivalente – Pressupõe um mínimo de electricidade comprada da rede de 0%, 50% ou 100% da carga eléctrica mínima requerida.

Esta última estratégia de operação foi proposta pelos autores e baseia-se no seguimento da carga eléctrica equivalente necessária para cobrir as necessidades eléctricas e as necessidades frigoríficas que não são cobertas pelo *chiller* de absorção. A principal suposição desta estratégia é que a energia frigorífica será produzida com o calor remanescente da cogeração, não se utilizando a caldeira de apoio para a absorção. Deste modo a carga eléctrica equivalente depende do equipamento de cogeração, sendo menor à medida que este aumenta.

A PEP foi também tida em conta. Esta deve ser superior a 10% para equipamentos com potência eléctrica superior a 1MW de modo a poder-se usufruir do prémio de eficiência energética. As estratégias de corte de pico e de operação contínua para 8 horas foram assim descartadas para essas potências.

Da análise económica ao período de retorno do investimento e tendo também em conta o lucro anual da instalação chegou-se à conclusão que a estratégia de seguimento da carga eléctrica equivalente se mostra com um potencial superior às restantes.

Cardona e Piacentino [8], através da análise dos consumos energéticos de vários hotéis no Mediterrâneo, propuseram um método de dimensionamento de uma central de trigeração com base numa estratégia de funcionamento que visa a maximização da PEP. Este método foi comparado com o método tradicional baseado na estratégia de maximização da energia térmica fornecida sem desperdício. As duas estratégias foram comparadas utilizando-se a curva cumulativa das necessidades térmicas uma vez que se tinha acesso às diferentes cargas horárias.

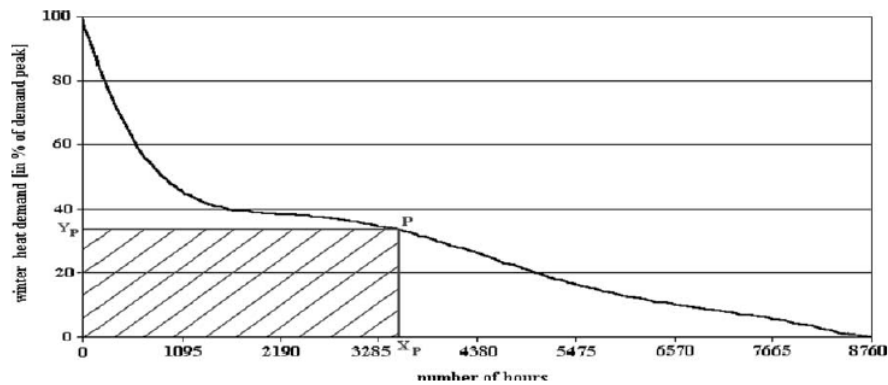


Figura 4 – Curva das necessidades térmicas parametrizadas “Regra do rectângulo máximo” [6]

A Figura 4 mostra a parametrização da curva das necessidades térmicas (sem arrefecimento) dos vários hotéis em função do número de horas a que essas necessidades ocorrem. A estratégia de maximização da energia térmica fornecida sem desperdício prevê a maximização da área a sombreado que corresponde ao máximo de energia fornecida a carga máxima. Quanto à estratégia proposta pelos autores, esta prevê que o equipamento funcione a carga máxima desde que as necessidades térmicas sejam tais que assegurem uma poupança de energia primária positiva apesar de poder existir em certas horas do seu funcionamento desperdício de energia térmica calorífica. A central proposta deve assim funcionar sempre que se verifique a seguinte condição:

$$P_{term} \geq \frac{P_{input\ max} \cdot \eta_{t,boiler} \cdot (\eta_{el,power\ plant} - \eta_{el,cog})}{\eta_{el,power\ plant}} = P^*_{term} \quad (1.1)$$

P_{term} corresponde à carga térmica requerida e $P_{input\ max}$ à potência do combustível a carga máxima. Para a escolha do *chiller* de absorção foi feita uma análise recorrendo também à curva cumulativa das necessidades frigoríficas que revelou que o *chiller* ideal possuiria uma potência igual a 70% do pico das necessidades frigoríficas. Com esta informação constrói-se a curva das necessidades térmicas conjuntas.

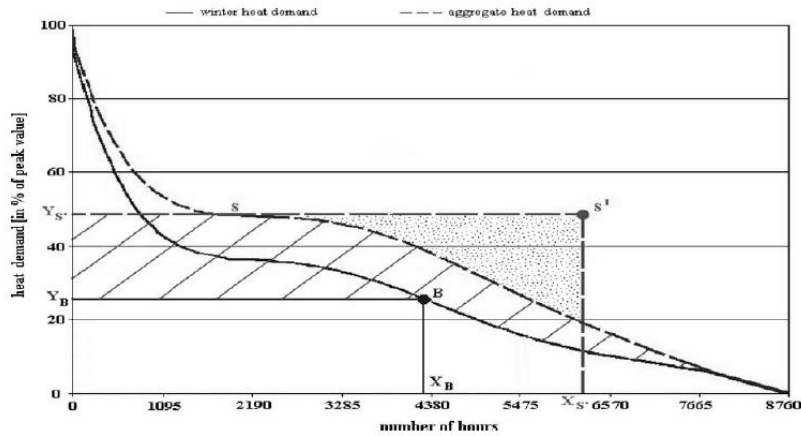


Figura 5 – Curva das necessidades térmicas parametrizadas [8]

Da análise da Figura 5 conclui-se que uma potência de 48% do pico das necessidades térmicas para o equipamento de cogeração é a melhor solução. De acordo com este critério a PEP da instalação situar-se-ia entre os 25% e os 35%.

Voorspools e D’haeseleer [9] estudaram o perfil das necessidades térmicas típicas de edifícios de serviços na Bélgica e propuseram-se estudar o dimensionamento de uma central de cogeração. Os resultados que obtiveram são demonstrativos da totalidade do sector representando uma unidade de cogeração fictícia, funcionando com os dados de um motor de combustão interna. À semelhança de Cardona e Piacentino, utilizam as curvas de necessidade cumulativa de energia térmica propondo várias alternativas à maximização da área de um único rectângulo que conduz a uma utilização de 3760h por ano. A Figura 6 apresenta duas alternativas à utilização da cogeração segundo a regra do “rectângulo máximo”..

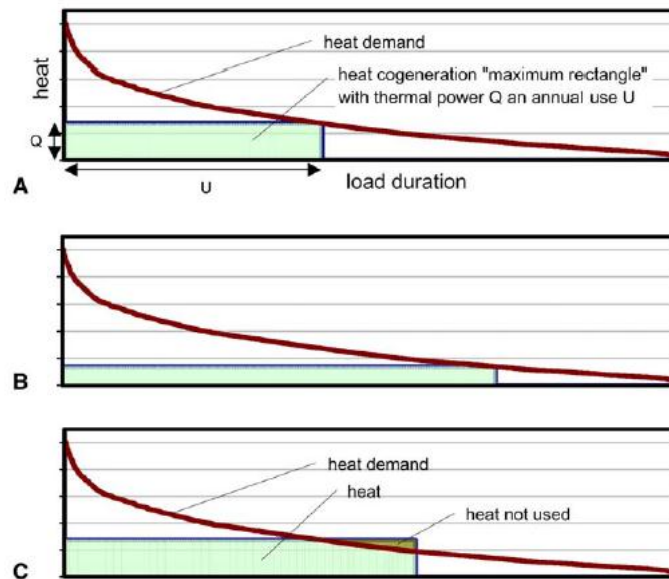


Figura 6 – Estratégias propostas como alternativa à regra do rectângulo máximo [9]

A primeira alternativa (Figura 6.B) consiste em reduzir o tamanho do motor de tal modo que pudesse ter uma utilização anual maior, ou seja a escala reduzida, melhorando o retorno do investimento. A segunda possibilidade (Figura 6.C) consiste em aumentar a utilização anual do motor sem diminuir a sua potência de tal maneira que parte da energia térmica seja perdida, ou seja um funcionamento a utilização térmica parcial. Os autores referenciaram ainda outras opções, que não estudaram, para aumentar a utilização anual de cogeração sendo elas: o armazenamento térmico, cogeração com múltiplas unidades e cogeração a carga parcial.

Tal como Arcuri, Florio e Fragiacom, também Voorspools e D'haeseleer utilizaram o conceito de poupança de energia primária absoluta para avaliar os resultados obtidos. No entanto, consideraram uma eficiência térmica de referência de 90% e uma eficiência eléctrica de referência de 55%. Este estudo concluiu que utilizando a regra do rectângulo máximo se consegue atingir uma $PEP_{Absoluta}$ de 12,6%. A melhor solução para um cenário de cogeração em escala reduzida permite atingir uma $PEP_{Absoluta}$ de 16%. Já num cenário de utilização térmica parcial do motor é possível chegar-se a 19,3%.

Beihong e Weiding [10] desenvolveram um método de optimização do dimensionamento de uma central de trigerção, bem como da sua estratégia de funcionamento através de programação mista inteira não linear. O método desenvolvido foi então aplicado ao caso real de um hospital em Shangai onde se considera uma turbina a gás como equipamento de cogeração. Partindo dos perfis horários das necessidades de vapor, electricidade e arrefecimento definiram como função objectivo, a maximizar, a poupança anual que se verifica entre operar a central de trigerção e uma central convencional. As Figuras 7 e 8 apresentam os resultados obtidos para o dimensionamento óptimo da central e para a sua estratégia de funcionamento óptima. Pode-se verificar que a estratégia de operação óptima passa pelo desperdício de energia térmica em muitas horas do funcionamento da turbina.

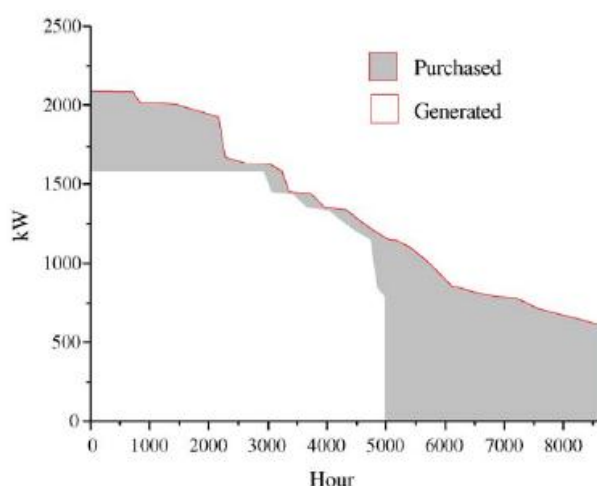


Figura 7 – Funcionamento eléctrico da central térmica proposta [10]

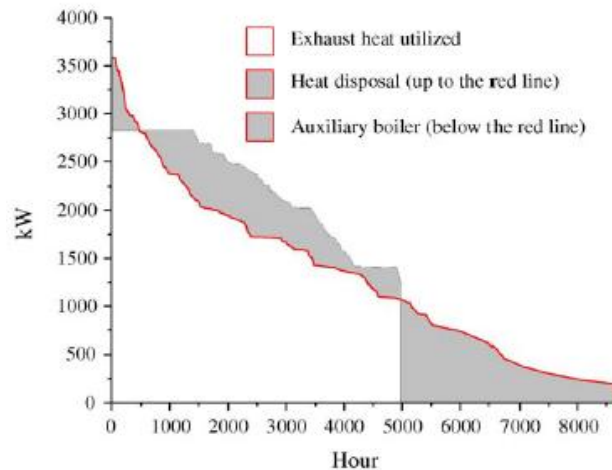


Figura 8 – Funcionamento térmico da central térmica proposta [10]

O dimensionamento óptimo da central juntamente com a estratégia de funcionamento óptimo permitem uma redução de cerca de 9,4% dos custos anuais de operação quando comparados com uma central convencional. Neste estudo os autores compararam ainda esta solução às estratégias de funcionamento de seguimento térmico e eléctrico com um dimensionamento não óptimo dos equipamentos. Verificaram que a estratégia de seguimento térmico permitia apenas uma poupança de 2,2% nos custos de operação enquanto a estratégia de seguimento eléctrico acarretava um acréscimo nos custos de operação de 8,7%.

1.4. Contribuição

De modo a cumprir o objectivo proposto pela presente dissertação foi desenvolvida uma aplicação, na linguagem de programação Visual Basic, que auxilia na análise do dimensionamento de centrais de cogeração e trigeração.

Em relação aos trabalhos efectuados na área e descritos na secção acima, a presente dissertação, por meio da aplicação desenvolvida, apresenta as seguintes contribuições:

- Estudo da variação dos parâmetros com a potência do equipamento de cogeração – Ao aumentar-se a potência de um equipamento de cogeração verifica-se que o rendimento eléctrico tende a aumentar e o rendimento térmico a diminuir. Esta variação é extremamente importante uma vez que altera a razão electricidade/calor de um determinado equipamento de cogeração.
- Avaliação do controlo de carga em motores de combustão interna – Em muitas análises a centrais de cogeração/trigeração o controlo de carga é apenas sugerido como alternativa a estudar, optando-se em alternativa pela associação de diversos motores em paralelo. A aplicação desenvolvida permite realizar o controlo de carga num motor contemplando a variação dos rendimentos térmico e eléctrico e, por conseguinte, a variação da razão electricidade/calor ao longo da carga considerada.

- Produção de vapor em motores de combustão interna – A produção de vapor por parte de motores de combustão interna é muitas vezes desprezada em análises de trigerção. Contudo, este vapor produzido permite accionar *chillers* de absorção de efeito duplo que apresentam um COP mais elevado que os de efeito simples.
- Alteração do horário de funcionamento de acordo com a tarifa eléctrica – O horário de funcionamento de uma central de cogeração/trigerção é um factor importante uma vez que o preço da energia eléctrica, bem como a remuneração da energia eléctrica produzida variam de acordo com o horário da tarifa eléctrica em vigor.
- Avaliação da poupança de energia primária efectiva ($PEP_{Efectiva}$) – O parâmetro de poupança de energia primária previsto na legislação de cogeração e a poupança de energia primária absoluta utilizada em [6] e em [9] não traduzem a poupança de energia primária que efectivamente se verifica ao implementar uma solução de trigerção relativamente à situação anterior. Deste modo, é introduzido com a presente dissertação o conceito de poupança de energia primária efectiva que prevê cobrir precisamente este ponto.

1.5. Organização

No capítulo 1 é efectuado um enquadramento energético abordando a dependência de combustíveis fósseis a nível nacional e a actividade de cogeração. Realizou-se uma revisão bibliográfica, tendo-se ainda estabelecido o objectivo e a contribuição da presente dissertação.

No capítulo 2 são avaliadas as tecnologias de cogeração e de trigerção presentes no mercado, identificando-se no final do capítulo quais as tecnologias consideradas na presente dissertação.

No capítulo 3 é explicada a metodologia de análise utilizada para se atingir o objectivo proposto. Começou-se por definir quais os cenários de cogeração e de trigerção a considerar tendo em vista os equipamentos escolhidos. Explicitou-se quais os parâmetros energéticos e económicos mais relevantes na análise da viabilidade de uma central de co/trigerção. Explicou-se a construção dos diagramas de carga das necessidades de energia térmica calorífica e frigorífica e as diferentes formas de reunir os dados necessários. Por fim, explicou-se o algoritmo de cálculo da aplicação desenvolvida concretizando os *inputs* da aplicação, o funcionamento dos equipamentos, os parâmetros que descrevem os equipamentos e a forma de obtenção dos resultados.

No capítulo 4 são considerados dois casos de estudo. O primeiro referente às instalações do Sporting Clube de Portugal e o segundo a um edifício de escritórios típico. Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos pela aplicação e que se apresentem mais relevantes, procedendo-se a uma discussão dos mesmos após cada caso.

No capítulo 5 apresentam-se as conclusões da presente dissertação.

2. Tecnologias de Cogeração e Trigeriação

Nas secções que se seguem são descritos equipamentos e tecnologias de cogeração e de trigeriação que são actualmente utilizados em centrais desse tipo.

2.1. Cogeração

Os sistemas de cogeração podem ser classificados como sistemas *topping* ou *bottoming*. Nos sistemas *topping*, a energia térmica para produção de electricidade é extraída no nível mais alto de temperatura enquanto o calor útil é extraído no nível mais baixo. Nos sistemas *bottoming* a energia útil resulta da recuperação de calor de um processo que utiliza temperaturas mais elevadas. No presente relatório considerou-se apenas os sistemas de cogeração *topping*. Existem vários equipamentos para estes sistemas de cogeração que são brevemente descritos de seguida.

2.1.1. Turbina a Vapor

A turbina a vapor funciona segundo o ciclo de Rankine podendo apresentar dois tipos de configuração dependendo da sua pressão de saída:

- **Contrapressão** – na qual o vapor sai da turbina a uma pressão superior à atmosférica permitindo obter vapor a uma temperatura com múltiplas aplicações.
- **Extracção/Condensação** – na qual o vapor é extraído da turbina por sub-tiragens intermédias e final a pressões inferiores à pressão atmosférica de modo a maximizar o rendimento.

Vapor de alta pressão é produzido numa caldeira e alimenta uma turbina para produção de electricidade. A turbina está desenhada de tal maneira a que haja vapor suficiente à saída para alimentar um processo industrial. Tipicamente este tipo de sistemas produz cinco vezes mais energia térmica do que eléctrica pelo que deve ser utilizado em centrais térmicas considerando a electricidade como subproduto.

Vantagens

- Tecnologia madura
- Versatilidade do combustível
- Capacidade de fornecer vapor a alta pressão e/ou pressão atmosférica

Desvantagens

- Arranque lento
- Baixo rendimento eléctrico
- Baixa eficiência a carga parcial

2.1.2. Turbina a Gás

As turbinas a gás são frequentemente utilizadas em instalações de cogeração de larga escala devido à sua elevada fiabilidade e gama de potência grande. A turbina a gás funciona de acordo com o ciclo de Brayton com a saída dos gases de escape a uma temperatura considerável de cerca de 540°C.

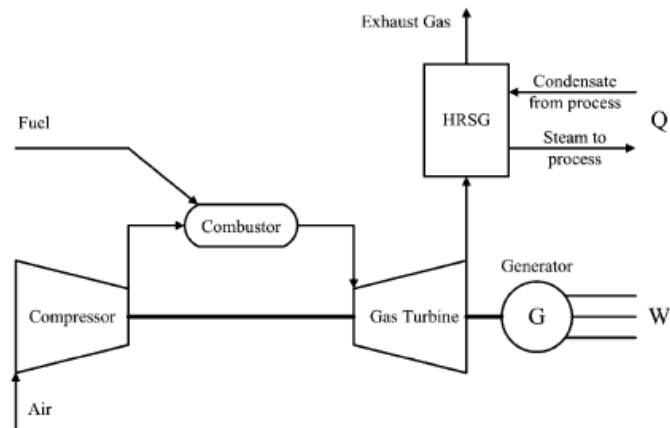


Figura 9 – Esquema típico de uma central de cogeração com turbina a gás [11]

A Figura 9 mostra uma central típica de cogeração com turbina a gás. Neste tipo de centrais os produtos da combustão são utilizados para gerar electricidade e a energia térmica recuperada no escape destes é utilizada para produzir vapor para diversas aplicações numa caldeira de recuperação de calor. A turbina a gás pode ser associada a uma turbina a vapor criando uma central de ciclo combinado. Este tipo de central é utilizado nas grandes centrais de produção eléctrica e permite um aumento da eficiência eléctrica numa gama entre 35-45% com um rácio electricidade calor entre 0,6 – 2,0.

Vantagens

- Arranque rápido e manutenção simples
- Não necessita de arrefecimento
- Elevada fiabilidade
- Baixa poluição ambiental (emissões reduzidas)
- Disponibiliza calor a elevada temperatura

Desvantagens

- Baixa eficiência a carga parcial
- Requer longas horas de operação
- Tempo de vida útil curto
- Custo do combustível elevado

2.1.3. Motor alternativo de Combustão Interna

Um motor alternativo de combustão interna é uma máquina térmica que transforma energia proveniente de uma reacção química em energia mecânica. Estes motores podem ter dois tipos de configuração - ciclo Otto ou ciclo Diesel - de acordo com o seu modo de ignição. Num motor de ciclo Otto a mistura de ar e combustível é comprimida em cada cilindro e a ignição é provocada por uma faísca. Num motor de ciclo Diesel apenas ar é comprimido no cilindro sendo o combustível injectado na fase final do ciclo de compressão e dando a sua ignição espontânea devido à alta temperatura do ar comprimido.

Um motor de combustão interna em cogeração permite produzir água quente, a 85-90°C, ou ainda vapor de baixa pressão a 130°C. A Figura 10 apresenta o esquema típico de uma central de cogeração de produção de água quente onde a energia proveniente do arrefecimento do óleo de lubrificação, da água de arrefecimento do motor e dos gases de escape aquece o circuito de água.

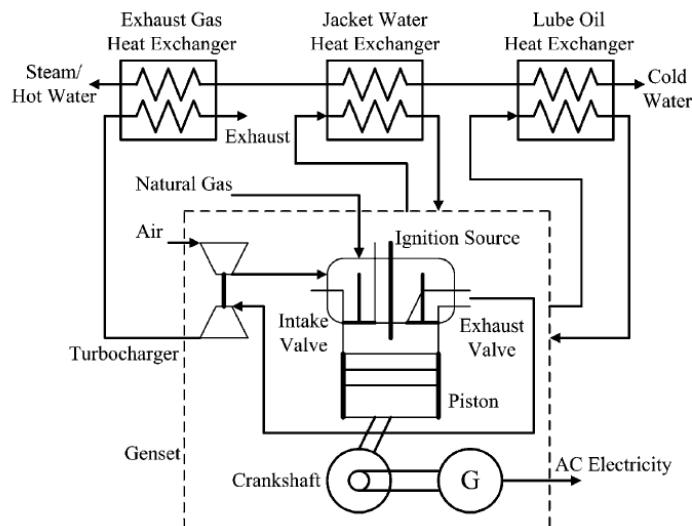


Figura 10 – Esquema típico de uma central de cogeração com motor de combustão interna [11]

A Figura 11 apresenta o esquema típico de uma central de cogeração que produza água quente e vapor de baixa pressão. Neste caso o circuito de água é aquecido apenas pela água proveniente do arrefecimento do motor e do arrefecimento do óleo de lubrificação. O vapor só pode ser produzido por meio de uma caldeira de recuperação de gases de escape uma vez que os outros circuitos não têm temperatura suficiente para a produção de vapor.

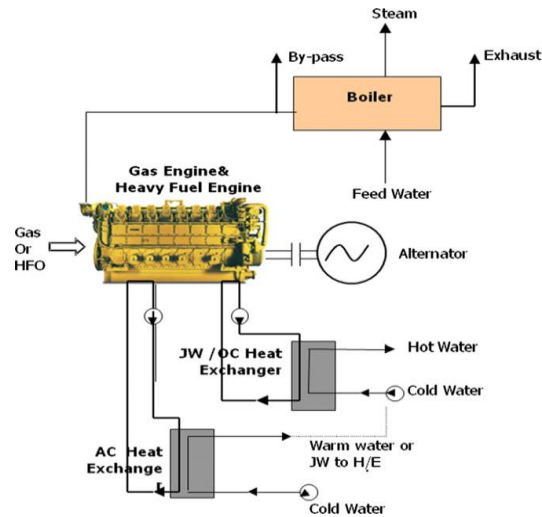


Figura 11 – Esquema típico de uma central de cogeração com produção de água quente e vapor de baixa pressão [12]

O funcionamento típico de grupos geradores eléctricos é projectado para a carga máxima à qual debitam a maior potência eléctrica. Contudo, uma das grandes vantagens destes motores é a elevada eficiência que o equipamento apresenta a carga variável. Como se pode verificar na Figura 12 a eficiência eléctrica do equipamento mantém-se razoavelmente constante até 75% da carga máxima, decrescendo a partir daí. Também da Figura 12 se pode verificar que à medida que a eficiência eléctrica decresce aumenta a fracção da energia térmica gerada pelo óleo de lubrificação, pela água de arrefecimento do motor e pelos gases de escape.

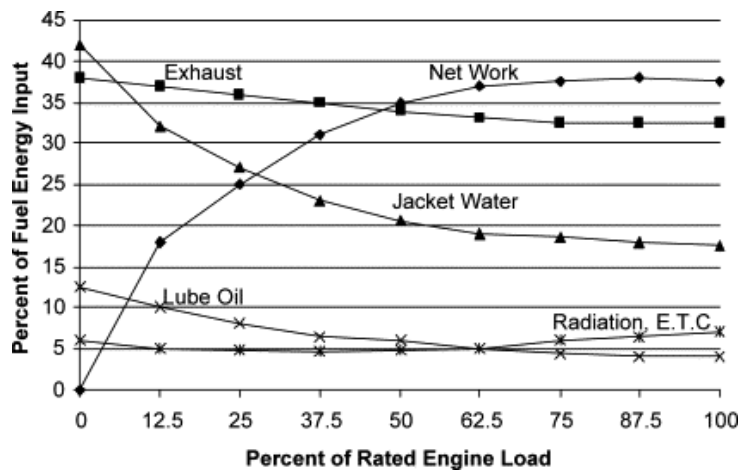


Figura 12 – Funcionamento típico de um motor de combustão interna com carga variável [13]

Vantagens

- Bom rendimento em regime de carga variável
- Custo de investimento relativamente baixo
- Arranque rápido
- Fácil adaptação a variações nas necessidades térmicas

Desvantagens

- Tempo de vida útil curto
- Limitado a aplicações com baixas temperaturas
- Necessita de refrigeração mesmo que o calor recuperado não seja utilizado
- Custos de manutenção elevados

2.1.4. Micro-turbina

O termo micro-turbina refere-se em geral a um sistema de dimensões relativamente reduzidas com uma potência total disponível não superior a 300 kW_e. O funcionamento da micro-turbina é em tudo semelhante ao de uma turbina a gás de ciclo aberto. Contudo, com o objectivo de aumentar o rendimento da micro-turbina é usual integrar no sistema um recuperador de calor que permite aproveitar o calor disponível nos gases de escape para aquecer o ar novo antes de este entrar na câmara de combustão.

Por serem leves, compactas e com poucas peças móveis, o veio turbo-compressor roda a uma elevada velocidade de rotação, pode atingir as 120.000 rotações por minuto. Apesar da elevada velocidade de rotação não necessita de óleo para lubrificação uma vez que utiliza rolamentos a ar.

Vantagens

- Emissões reduzidas
- Leves e compactas
- Não necessita de refrigeração
- Tempos de arranque muito rápidos, necessitando de pouca manutenção

Desvantagens

- Custos elevados
- Eficiência relativamente reduzida
- Limitado a aplicações de cogeração com baixa temperatura (água quente ou vapor de baixa pressão)

2.1.5. Pilhas de Combustível

Uma pilha de combustível é um conversor de energia electroquímico composto por um ânodo e um cátodo porosos e por um electrólito. A tecnologia de uma pilha de combustível envolve a reacção do hidrogénio com oxigénio na presença do electrólito para produzir electricidade. Água e calor são os produtos resultantes desta reacção.

Existem cinco tipos de pilhas de combustíveis que se podem agrupar em três de baixa temperatura de operação:

- Pilha de combustível alcalina, 90 a 250°C.
- Pilha de combustível de ácido fosfórico, 400°C.
- Pilha de combustível de electrólito de membrana polimérica, 65 a 85°C.

E duas de alta temperatura:

- Pilha de combustível de óxido sólido, 1100°C.
- Célula de combustível de carbonato fundido, 1100°C.

Vantagens

- Emissões reduzidas
- Rendimento elevado
- Baixo ruído
- Requerem menor manutenção

Desvantagens

- Esta tecnologia não está ainda totalmente desenvolvida, encontra-se ainda numa fase de demonstração
- Tempo de vida reduzido
- Custo actual elevado

2.1.6. Motores Stirling

O motor stirling é um motor de combustão externa que consiste em duas câmaras a diferentes temperaturas que aquecem e arrefecem um gás de forma alternada, provocando expansões e contracções cíclicas, o que faz movimentar dois êmbolos ligados a um eixo comum. Esse gás nunca abandona o motor pelo que se trata de um equipamento de ciclo fechado no qual o combustível usado como fonte de calor pode ser muito diverso desde combustíveis líquidos ou gasosos até energia nuclear ou solar.

Vantagens

- Níveis de vibração e de ruído menores comparativamente aos dos motores alternativos de combustão interna, bem como menores emissões poluentes
- Bom desempenho a carga parcial
- Flexibilidade no combustível

Desvantagens

- Esta tecnologia não está ainda totalmente desenvolvida, encontra-se ainda numa fase de investigação
- Não há aplicação em larga escala
- Problemas de selagem

2.1.7. Comparação entre Tecnologias de Cogeração

Na Tabela 1 são apresentados os valores de referência para as várias tecnologias de cogeração acima descritas.

Tabela 1 – Valores de referência das diversas tecnologias de cogeração [11]

Tecnologia	Potência (MW _e)	Rendimento Eléctrico (%)	Rendimento Global (%)	Tempo de Vida (anos)	Custo (€/kW _e)	Combustível
Turbina a Vapor	0,05-500	7 - 20	60 - 80	25 - 35	800 - 1600	Qualquer
Turbina a Gás	0,25 - 50	25 - 42	60 - 87	15 - 20	400 - 800	Gás Natural, Propano, Biogás
Motor – Ciclo Otto	0,003 - 6	25-43	70 - 92	20	650 - 1300	Gás natural, propano, butano, biogás
Motor – Ciclo Diesel	0,005 - 20	35 - 45	65 - 90	20	300 - 800	De vários tipos de fuelóleo ao gasóleo
Micro-turbina	15-300	15-30	60-85	20	800-1300	Gás Natural, Diesel, Gasolina ou semelhante
Pilha de Combustível	5 - 2000	37 - 60	85 - 90	10 - 20	2000 - 3000	Hidrogénio ou hidrocarbonetos
Motor Stirling	1 - 1500	40	65 - 85	10	1000 - 1600	Qualquer

2.2. Trigeração

2.2.1. Chillers de Absorção

Os *chillers* de absorção permitem produzir água a uma temperatura de 7°C a partir de uma fonte de calor utilizando uma solução de um sal que varia a sua concentração e com isso a temperatura de mudança de fase. Os ciclos de absorção foram inicialmente desenvolvidos com amoníaco que funciona como fluido refrigerante. Actualmente para o sector da climatização utilizam-se maioritariamente os *chillers* funcionando com brometo de lítio. Os *chillers* de absorção dividem-se, relativamente ao tipo de ignição, em:

- Ignição Directa – O calor necessário ao processo é obtido queimando directamente um combustível.
- Ignição Indirecta – O calor necessário é fornecido na forma de vapor de baixa pressão, água quente ou purga quente.

De acordo com o seu funcionamento podem tratar-se ainda de *chillers* de efeito simples ou de duplo efeito. O *chiller* de absorção de efeito simples apresenta quatro zonas principais de funcionamento:

- Evaporador – Zona onde é arrefecida a água a refrigerar. O fluido refrigerante evapora em contacto com os tubos onde circula a água a refrigerar.
- Absorvedor - Zona onde o vapor do fluido refrigerante é absorvido pela substância absorvente. O calor libertado no processo de absorção é dissipado através da passagem dos tubos de água do condensador ao atravessarem o absorvedor.
- Gerador – Zona onde é fornecido o calor pela fonte quente, de forma a separar o fluido refrigerante sob a forma de vapor da substância absorvente e a concentrar novamente a solução.
- Condensador – Zona onde o fluido de trabalho condensa antes de ser expandido para o evaporador. O condensador é arrefecido em geral pelo circuito de arrefecimento que passou no absorvedor.

No caso do *chiller* de absorção de duplo efeito ter-se-á dois geradores, onde o vapor do primeiro gerador condensará a temperatura mais elevada permitindo gerar mais vapor no segundo. O *chiller* de duplo efeito permite coeficientes de performance (COP) mais elevados que os de efeito simples. O COP nestes *chillers* é definido como a razão entre o calor retirado no evaporador e o fornecido no gerador de vapor, sendo em geral a energia eléctrica consumida nas bombas muito pequena. Em ambos os tipos de *chillers* existe ainda um permutador de calor para recuperar energia térmica de arrefecimento do fluido absorvedor para aquecer a mistura que vai para o gerador de vapor.

Na Tabela 2 apresentam-se valores de referência para os *chillers* de absorção com solução de amoníaco e de brometo de lítio.

Tabela 2 – Valores de referência para chillers de absorção [15]

Índices	NH ₃ - Absorção	LiBr - Absorção	
<i>Efeito</i>	Simple	Simple	Duplo
<i>Capacidade de Refrigeração (kW)</i>	20 - 2500	300 - 5000	300 – 5000
<i>COP</i>	0.6 – 0.7	0.5 – 0.6	0.9 – 1.1
<i>Custo (€/kW)</i>	355 - 500	245 - 260	265 - 280

Vantagens

- Vida útil longa e manutenção reduzida uma vez que não existem componentes móveis no sistema (para além das bombas hidráulicas necessárias).
- Consumo eléctrico muito baixo quando comparado com um *chiller* de compressão.
- Baixo nível de ruído e vibrações.

Desvantagens

- Baixo coeficiente de performance (máximo de 1,1) quando comparado com *chillers* de compressão.
- Custo elevado

2.2.2. Chillers de Adsorção

Tal como um *chiller* de absorção, um *chiller* de adsorção é uma instalação térmica que converte calor em frio utilizando como combustível uma fonte de calor, geralmente água quente de 70 a 90°C. A adsorção é um fenómeno de adesão reversível, da qual resulta a acumulação de uma substância gasosa ou dissolvida na superfície de um corpo. Quando as moléculas da substância são fixadas, libertam energia, ou seja a adsorção é um processo exotérmico.

Um *chiller* de adsorção é composto por um evaporador, que se encontra a pressão mais baixa, por um gerador e por um adsorvedor, que são duas câmaras com uma substância adsorvente a pressão intermédia e por um condensador a pressão mais elevada. A substância adsorvente mais utilizada neste tipo de *chillers* é o gel de sílica.

Num *chiller* de adsorção o fluido refrigerante é a água. O gerador é aquecido e o vapor de água presente na substância adsorvente é libertado passando para o condensador onde passa ao estado líquido. A água no estado líquido passa para o evaporador onde evapora e provoca o arrefecimento

desejado. Após passar no evaporador o vapor de água é encaminhado para o adsorvedor onde passa para a substância adsorvente.

Vantagens

- Podem utilizar-se mesmo com fontes de calor de baixa temperatura (55° C) com um Coeficiente de Performance (COP) de 0,5 – 0,6. Assim podem ser utilizados em aplicações de sistemas solares térmicos ou de sistemas de cogeração de baixa temperatura.
- Manutenção reduzida por não terem peças móveis.
- Não apresentam riscos para o ambiente pois o gel de sílica é quimicamente neutro.

Desvantagens

- Elevado custo a rondar os 500 €/kW.

2.3. Escolha de Tecnologias

Nesta secção são apresentadas as tecnologias de cogeração e trigeriação escolhidas que se apresentam à partida como relevantes para uma instalação do sector terciário.

2.3.1. Cogeração

Das tecnologias mais comuns existentes no mercado pode ser descartada a utilização de micro-turbinas e de turbinas a vapor. As micro-turbinas apresentam um custo elevado e uma potência térmica reduzida face às necessidades do sector de comércio e serviços. Por outro lado, devido à sua potência térmica elevada, as turbinas a vapor são utilizadas na indústria e não no sector de comércio e serviços. As pilhas de combustível e os motores stirling ainda não são competitivos em termos comerciais. Deste modo, devem ser consideradas como opções de cogeração as turbinas a gás e os motores de combustão interna que são as tecnologias mais utilizadas e mais maduras em termos de cogeração no sector de comércio e serviços.

2.3.2. Trigeriação

Quanto às tecnologias de trigeriação descarta-se o *chiller* de adsorção e o *chiller* de absorção água-amoníaco por apresentarem um custo muito elevado em relação ao seu *COP*. Os *chillers* de absorção de água-brometo de lítio são aqueles que apresentam uma melhor relação entre o custo e o coeficiente de performance.

3. Metodologia de Análise

De modo a cumprir o objectivo proposto pela presente dissertação foi construída uma aplicação em Visual Basic que permite ensaiar várias gamas de equipamentos de cogeração e trigerção produzindo uma série de resultados, económicos e energéticos, que visam avaliar cada uma das soluções consideradas e assim escolher o melhor dimensionamento para o caso em questão.

3.1. Centrais de Cogeração/Trigerção Consideradas

De seguida apresenta-se as diferentes configurações estudadas para substituição da central convencional que tanto podem ser centrais de cogeração como de trigerção. Nestas configurações considerou-se que a satisfação das necessidades de energia térmica calorífica seria atingida pela elevação da temperatura de água num circuito de 70 para 85°C, este seria o circuito de água quente. As necessidades de energia térmica frigorífica seriam atingidas pelo arrefecimento de água de 12 para 7°C, no circuito de água fria. Em ambos os circuitos uma vez aquecida ou arrefecida a água, esta iria para um colectador onde seria enviada para as fracções onde fosse necessária

3.1.1. Central de Cogeração – Motor de Combustão Interna

A Figura 13 apresenta a configuração de uma central de cogeração que utiliza como equipamento principal um motor de combustão interna a gás natural.

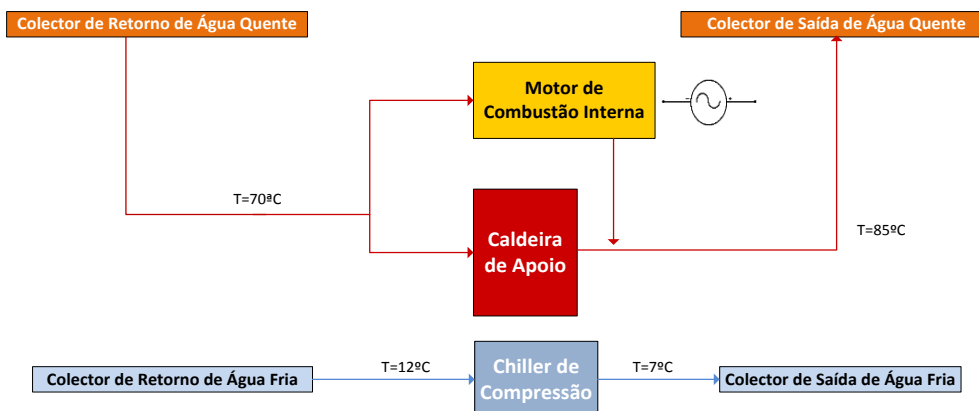


Figura 13 – Esquema da central de cogeração com motor de combustão interna

Neste tipo de configuração as necessidades de energia térmica calorífica são asseguradas pelo motor e pela caldeira de apoio a gás natural, enquanto as necessidades térmicas de energia frigorífica são completamente satisfeitas por *chillers* de compressão. A caldeiras de apoio funcionará sempre que as necessidades caloríficas não sejam satisfeitas pelo motor de combustão interna. Esta configuração será estudada com o motor de combustão interna funcionando à carga máxima e com controlo de carga, opções explicadas na secção 3.1.4.

3.1.2. Central de Trigeração – Motor de Combustão Interna e *Chiller* de Absorção de Efeito Simples

A Figura 14 apresenta a configuração de uma central de trigeração que utiliza um motor de combustão interna associado a um *chiller* de absorção de efeito simples.

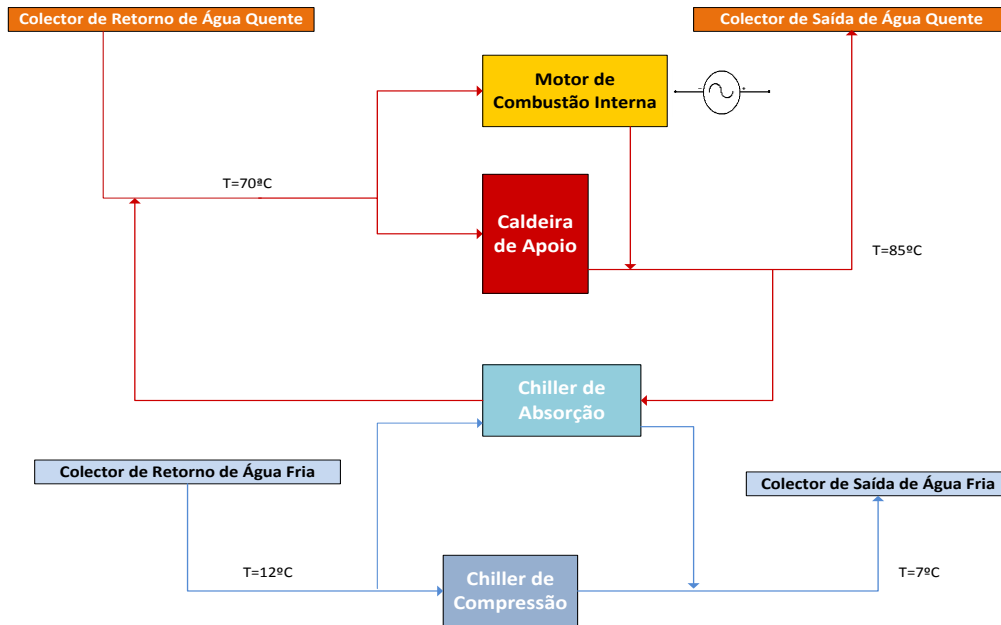


Figura 14 – Esquema da central de trigeração com motor de combustão interna

Neste tipo de centrais as necessidades de energia térmica calorífica são satisfeitas pelo motor e por caldeiras de apoio a gás natural. Quanto às necessidades de energia térmica frigorífica são satisfeitas utilizando o calor remanescente do equipamento de cogeração para activar um *chiller* de absorção de efeito simples. Se as necessidades frigoríficas não forem completamente satisfeitas desta maneira é activado o *chiller* de compressão. Esta configuração será também estudada com o motor de combustão interna funcionando à carga máxima e com controlo de carga.

3.1.3. Central de Trigeração – Motor de Combustão Interna e *Chiller* de Absorção de Duplo Efeito

A Figura 15 apresenta a configuração considerada para uma central de trigeração composta por um motor de combustão interna e por um *chiller* de absorção de duplo efeito.

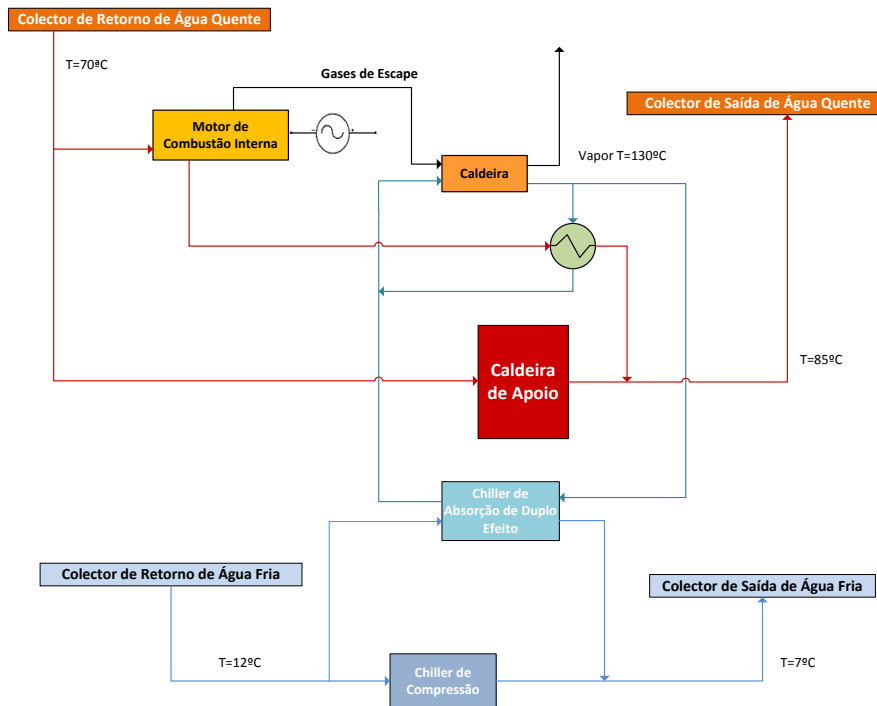


Figura 15 – Esquema da central de trigeração com motor de combustão interna com produção de vapor

Neste tipo de configuração a energia presente nos gases de escape da combustão é utilizada para gerar vapor de baixa pressão. Esse vapor é utilizado para aquecer o circuito de água quente e caso haja vapor em excesso é utilizado para accionar um *chiller* de absorção de duplo efeito. Além da contribuição do vapor gerado na caldeira, o circuito de água quente aproveita a energia gerada no arrefecimento do motor e do óleo de lubrificação. Caso a energia gerada pelo motor não seja suficiente para satisfazer as necessidades de energia calorífica é accionada uma caldeira de apoio. As necessidades térmicas de energia frigorífica são assim satisfeitas pelo *chiller* de duplo efeito e caso este não seja suficiente é activado o *chiller* de compressão.

Poder-se-ia pensar que ao considerar um *chiller* de absorção de duplo efeito o vapor produzido devesse ser primeiro encaminhado para o *chiller* e só depois, caso fosse em excesso, ser aproveitado para aquecer o circuito de água quente. Contudo, prova-se na secção 3.2.1 que é mais eficiente satisfazer as necessidades térmicas caloríficas do que as frigoríficas.

3.1.4. Central de Cogeração – Turbina a Gás

A Figura 16 apresenta a configuração de uma central de cogeração utilizando uma turbina a gás como equipamento principal.

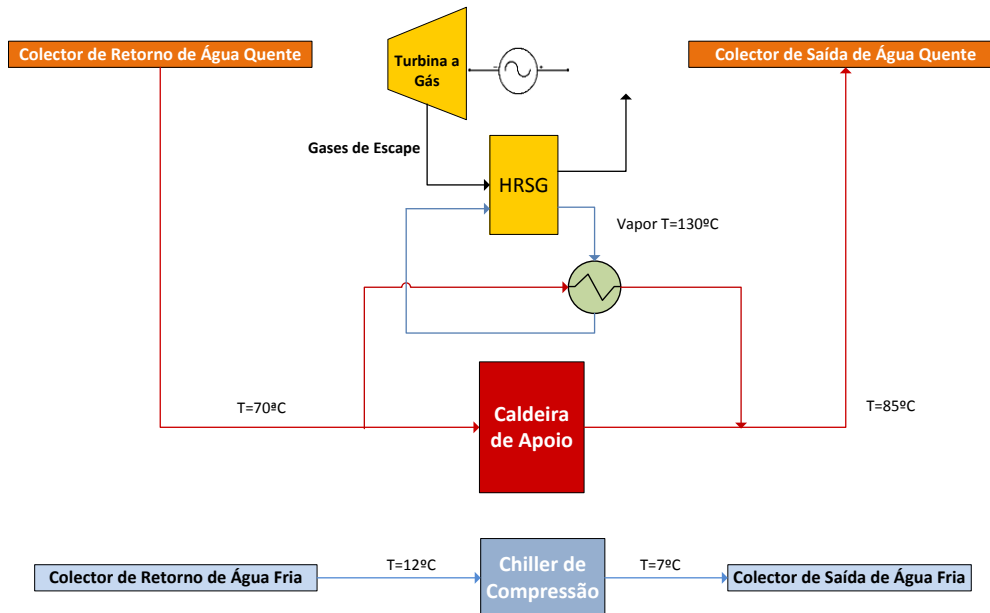


Figura 16 – Esquema da central de cogeração com turbina a gás

Este tipo de configuração requer associada à turbina a gás uma caldeira de recuperação de calor que permite produzir vapor através do aproveitamento da energia térmica contida nos gases de escape. As necessidades térmicas de energia calorífica são satisfeitas aquecendo o circuito de água quente com o vapor gerado. As necessidades de energia frigorífica são satisfeitas por *chillers* de compressão.

3.1.5. Central de Trigeração – Turbina a Gás e *Chiller* de Absorção de Duplo Efeito

A Figura 17 apresenta a configuração de uma central de trigeração composta por uma turbina a gás e por um *chiller* de absorção de duplo efeito.

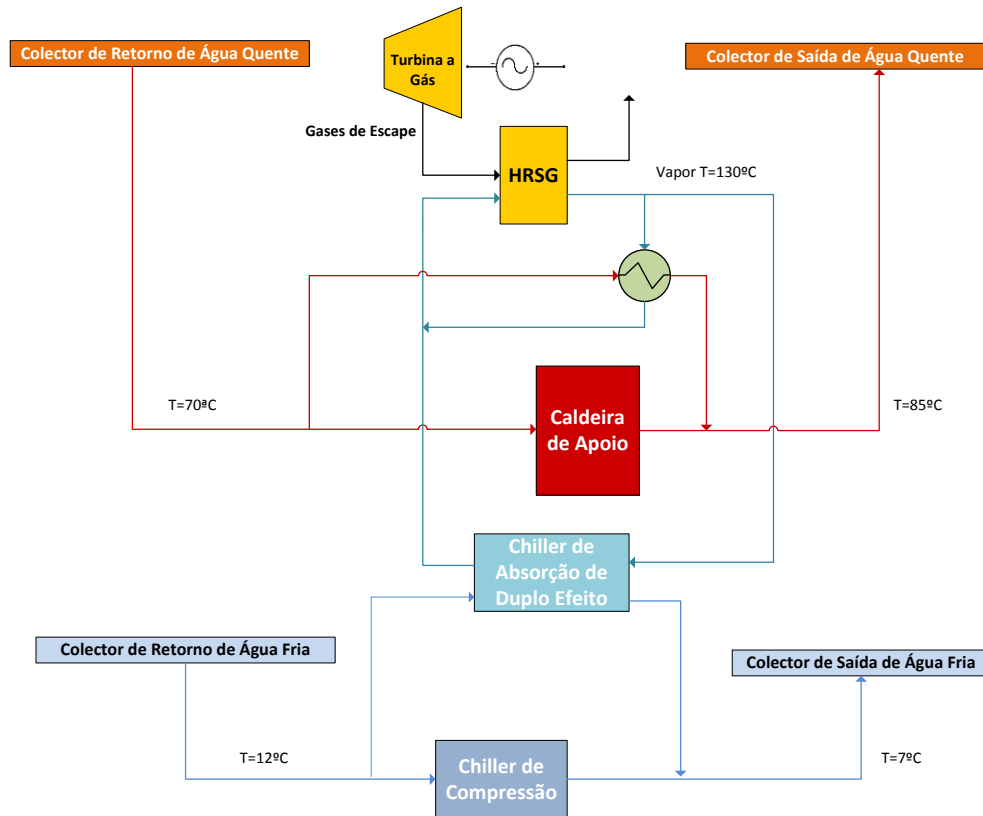


Figura 17 – Esquema da central de trigeração com turbina a gás

Neste tipo de configuração, à semelhança do cenário anterior, é produzido vapor na caldeira de recuperação de calor pelo aproveitamento da energia térmica contida nos gases de escape. Este vapor é primeiramente utilizado para aquecer o circuito de água quente e caso haja excesso de vapor é utilizado para accionar um *chiller* de absorção de duplo efeito. Caso as necessidades térmicas de energia calorífica não sejam satisfeitas pela turbina a gás é accionada uma caldeira de apoio. As necessidades de energia frigorífica são satisfeitas pelo *chiller* de absorção de duplo efeito e pelo *chiller* de compressão, se necessário.

3.2. Parâmetros de Avaliação da Cogeração/Trigeração

De seguida são referidos os parâmetros mais importantes na avaliação de uma central de co/trigeração. Estes parâmetros são tanto energéticos como económicos.

3.2.1. Parâmetros Energéticos

Poupança de Energia Primária (PEP)

A poupança de energia primária da actividade de cogeração relativamente à produção separada de calor e de electricidade é medida de acordo com a seguinte fórmula:

$$PEP = 1 - \frac{1}{\frac{\eta_{t,cog}}{\eta_{t,ref}} + \frac{\eta_{e,cog}}{\eta_{e,ref}}} \quad (3.1)$$

- $\eta_{t,cog}$ – Eficiência térmica do processo definida como a produção anual de calor útil dividida pelo combustível utilizado na produção total de calor e electricidade.
- $\eta_{t,ref}$ – Valor de referência da eficiência para a produção separada de calor, que toma o valor de 90%.
- $\eta_{e,cog}$ – Eficiência eléctrica definida como a produção total anual de electricidade dividida pelo combustível utilizado na produção total de calor útil e de electricidade num processo de cogeração.
- $\eta_{e,ref}$ – Valor de referência da eficiência para a produção separada de electricidade, que toma o valor de 55%.

Poupança de Energia Primária Efectiva (PEP_{Efectiva})

A poupança de energia primária, como referida anteriormente, permite avaliar o desempenho do equipamento de cogeração face à situação em que meios convencionais forneceriam a mesma quantidade de calor e de electricidade.

A poupança de energia primária absoluta foi introduzida através de estudos realizados em [6] e em [9] quanto ao dimensionamento de centrais de co/trigeração com o objectivo de permitir comparar as várias soluções apresentadas para uma mesma aplicação, como por exemplo um edifício. O princípio base é o mesmo de analisar a poupança entre o que um equipamento de cogeração consome e o que uma central convencional consumiria, mas neste caso a poupança é comparada com a energia consumida pela totalidade das necessidades:

$$PEP_{Absoluta} = \frac{\frac{C_{Cog}}{\eta_{t,ref}} + \frac{E_{Cog}}{\eta_{e,ref}} - F_{Cog}}{\frac{C_{Total}}{\eta_{t,ref}} + \frac{E_{Total}}{\eta_{e,ref}}} \quad (3.2)$$

- C_{Cog} – Calor gerado em cogeração.
- E_{Cog} – Electricidade gerada em cogeração.
- F_{Cog} – Combustível consumido em cogeração.
- C_{Total} – Necessidades totais de de energia térmica calorífica.
- E_{Total} – Necessidades totais de electricidade para alimentar o *chiller* de compressão mais electricidade gerada em cogeração.

Esta expressão permite comparar várias soluções com potências diferentes uma vez que tem em conta os consumos totais de calor e electricidade da instalação numa situação convencional.

Para centrais de trigeração parte do calor gerado é utilizado no funcionamento de um *chiller* de absorção sendo esta energia térmica quantificada nas Equações 3.1 e 3.2. No entanto, contrariamente ao expresso nestas equações, se esse *chiller* não fosse accionado a energia primária gasta seria electricidade e não calor. Sendo assim o calor gerado em cogeração divide-se em calor útil e calor de absorção:

$$C_{Cog} = C_{Útil} + C_{Abs} \quad (3.3)$$

- $C_{Útil}$ – Parte do calor gerado em cogeração utilizado na satisfação das necessidades de energia térmica calorífica.
- C_{Abs} – Parte do calor gerado em cogeração utilizado para accionar o *chiller* de absorção.

Separando as contribuições do calor de cogeração é agora possível definir a energia primária consumida por meios convencionais. Esta corresponderá à energia que é necessário para que uma caldeira possa gerar o calor útil:

$$Energia\ Primária\ Calor\ Útil = \frac{C_{Útil}}{\eta_{t,ref}} \quad (3.4)$$

E à energia que é necessário fornecer a uma central eléctrica de modo a gerar a electricidade necessária para alimentar um *chiller* de compressão que gerasse a mesma quantidade de frio gerada por um *chiller* de absorção que é alimentado pelo calor de absorção:

$$Energia\ Primária\ Calor\ de\ Absorção = \frac{C_{Abs} \cdot COP_{CA}}{\eta_{e,ref} \cdot COP_{CC}} \quad (3.5)$$

- COP_{CA} – Coeficiente de performance do *chiller* de absorção
- COP_{CC} – Coeficiente de performance do *chiller* de compressão

A poupança de energia primária e a poupança de energia primária absoluta consideram que a energia primária correspondente ao calor de absorção seria aquela necessária ao funcionamento de uma caldeira convencional enquanto que na poupança de energia primária efectiva se considera que essa energia é calculada de acordo com a Equação 3.5 Deste modo como para valores típicos dos COP_{CA} e COP_{CC} se verifica a condição:

$$\frac{1}{\eta_{t,ref}} > \frac{COP_{CA}}{\eta_{e,ref} \cdot COP_{CC}} \quad (3.6)$$

A poupança de energia primária e a poupança de energia primária absoluta estão a considerar energia que efectivamente não está a ser poupada. A condição 3.6 permite também concluir que a energia térmica produzida por um equipamento de cogeração deverá procurar satisfazer primeiramente as necessidades térmicas caloríficas e só posteriormente ser utilizada para accionar um *chiller* de absorção.

É possível agora definir a poupança de energia primária que verdadeiramente ocorrerá entre uma central de trigeração e uma central convencional. Surge assim o conceito de poupança de energia primária efectiva introduzido pela presente dissertação:

$$PEP_{Efectiva} = \frac{\frac{C_{\acute{u}til}}{\eta_{t,ref}} + \frac{C_{Abs} \cdot COP_{CA}}{\eta_{e,ref} \cdot COP_{CC}} + \frac{E_{cog}}{\eta_{e,ref}} - F_{cog}}{\frac{C_{Total}}{\eta_{t,ref}} + \frac{E_{Total}}{\eta_{e,ref}}} \quad (3.7)$$

No denominador da Equação 3.7 considerou-se a energia primária correspondente às necessidades a serem satisfeitas por meios convencionais pois permite uma melhor comparação entre soluções com diferentes capacidades dentro da mesma aplicação.

Rendimento Eléctrico Equivalente (REE)

O rendimento eléctrico equivalente deve ser superior a um valor de referência de produção de electricidade, de tal modo que a eficiência do processo de cogeração seja superior à da produção separada de energia. Em Portugal esse valor é de 55%.

$$REE = \frac{E_{cog}}{F_{cog} - \frac{C_{cog}}{\eta_{t,ref}}} > \eta_e \quad (3.8)$$

3.2.2. Parâmetros Económicos

Da análise económica pretende-se quantificar a poupança na factura energética (PFE). Além disso é interessante conhecer os indicadores mais importantes na análise de um investimento, são eles: o Valor Actual Líquido (VAL), a Taxa Interna de Rendibilidade (TIR) e o Período de Retorno do Investimento (PRI).

Poupança na Factura Energética (PFE)

A poupança na factura energética é obtida comparando-se o custo de operar uma central convencional e o custo de operação de uma central de trigeração. Esta diferença entre custos corresponde à poupança anual na factura energética da central térmica e será considerada como o *cash flow* que permitirá avaliar os indicadores económicos.

O custo de operar uma central convencional é calculado da seguinte maneira:

$$C_{Convencional} = C_{Caldeira} + C_{f_{GN}} + C_{C.Compressão} + C_{P.Pontas} \quad (3.9)$$

- $C_{Convencional}$ – É o custo de operação de uma central convencional [€].
- $C_{Caldeira}$ – É o custo anual respeitante ao consumo de gás natural por parte da caldeira [€].
- $C_{f_{GN}}$ – Esta parcela diz respeito aos custos fixos do gás natural. Engloba o termo fixo, o de capacidade, de capacidade de entrada e a taxa de ocupação do subsolo [€].
- $C_{C.Compressão}$ – Custo do consumo de energia eléctrica activa por parte do *chiller* de compressão [€].
- $C_{P.Pontas}$ – Custo que traduz a penalização por utilizar o *chiller* de compressão nas horas de pontas [€].

O custo fixo do consumo de gás natural mensal é calculado da seguinte forma:

$$C_{f_{GN}} = Dias_{Mês} * T_{fixo} + Cons_{Máx} * (T_{Cap Entr} + T_{Entr}) + Cons_{Mensal} * T_{energia} + Taxa_{Ocupação} \quad (3.10)$$

- $Dias_{Mês}$ – Nº de dias do Mês em análise.
- T_{fixo} – Termo fixo da factura de gás natural [€/dia].
- $Cons_{Máx}$ – Consumo Máximo diário para o período de um ano anterior à data da factura [kWh].
- $T_{Cap Entr}$ – Termo de Capacidade de Entrada da factura energética [€/kWh].
- T_{Entr} – Termo de entrada da factura energética [€/kWh].
- $Cons_{Mensal}$ – Consumo Mensal de gás natural [kWh].
- $T_{energia}$ – Termo de energia da factura energética [€/kWh].
- $Taxa_{Ocupação}$ – Taxa de Ocupação de Subsolo do Município [€].

O custo da penalização de utilização do *chiller* de compressão nas horas de ponta é calculado da seguinte forma:

$$C_{P.Pontas} = \frac{Energia_{Pontas}}{Dias \acute{U}teis_{M\acute{e}s} * Horas \acute{U}teis_{Dia}} * Penaliza\c{c}\tilde{a}o \quad (3.11)$$

- $Energia_{Pontas}$ – Energia eléctrica consumida pelo *chiller* de compressão no horário de ponta [kWh].
- $Dias \acute{U}teis_{M\acute{e}s}$ – Nº de dias úteis do mês em análise.
- $Horas \acute{U}teis_{Dia}$ – Nº de horas de ponta nos dias úteis. Serão 5 horas nos dias úteis no tarifário de Inverno e 3 horas nos dias úteis no tarifário de Verão.
- $Penaliza\c{c}\tilde{a}o$ – Penalização presente na factura energética para a utilização de energia eléctrica em horas de ponta [€/kW_e].

No caso das centrais de cogeração/trigeração o custo de operação é calculado da seguinte forma:

$$C_{Co/Trigera\c{c}\tilde{a}o} = C_{Cogera\c{c}\tilde{a}o} + C_{Caldeira} + C_{f_{GN}} + C_{C.Compress\tilde{a}o} + C_{P.Pontas} - VR_{Cogera\c{c}\tilde{a}o} \quad (3.12)$$

- $C_{Co/Trigera\c{c}\tilde{a}o}$ – Custo de operar uma central e cogeração ou de trigeração.
- $C_{Cogera\c{c}\tilde{a}o}$ – É o custo respeitante ao consumo de gás natural por parte do equipamento de cogeração.
- $VR_{Cogera\c{c}\tilde{a}o}$ – É o valor da remuneração resultante da venda de energia eléctrica à rede por parte do equipamento de cogeração abrangido pelo regime especial de bonificação.

O valor de remuneração da actividade de cogeração é calculado pela Portaria n.º 140/2012 de acordo com a remuneração em regime especial, na qual se estabelece o valor da tarifa de referência $Tref_m$, expressa em €/MWh, para diferentes combustíveis e para diferentes potências de ligação à rede. É estabelecido também que a tarifa de referência aplicável durante as horas de ponta e cheias será $Tref_{mpc} = 1,10 * Tref_m$ e que a tarifa de referência aplicável durante as horas de vazio e super vazio será $Tref_{mpc} = 0,87 * Tref_m$. [17]

Ao valor da tarifa pode ainda acrescer um prémio de eficiência contemplado no Decreto de Lei n.º 23/2010 e calculado da seguinte maneira:

$$PE_m = PC * PEP(1 - PEP) * EEPL_m * K * \left(\frac{EP}{EE}\right) \quad (3.13)$$

- PE_m – Prémio de eficiência no mês m
- PC – Custo de referência para valorização da energia primária

- *PEP* – Poupança de energia primária certificada pela Entidade Emissora das Garantias de Origem (EEGO)
- *EEPL_m* – Energia eléctrica produzida pela instalação do mês *m*
- *K* – É o factor adimensional que distingue cogeração eficiente e de elevada eficiência
- *EP/EE* – Relação entre a energia primária consumida e a energia eléctrica produzida no ano civil anterior ao mês *m*, certificada pela EEGO

Pode ainda acrescer um prémio de energia renovável contemplado também no mesmo Decreto de Lei calculando-se por:

$$PR_m = Tref_m * R * CR/C * EEPL_m \quad (3.14)$$

- *PR_m* – Prémio de energia renovável no mês *m*
- *R* – Factor que toma o valor de 10%
- *CR/C* – Fração de combustíveis renováveis consumidos na instalação no ano civil anterior ao mês *m*

Tem-se então que o valor da poupança na factura energética ao passar-se de uma central convencional para uma central de cogeração/trigeração será:

$$Poupança \text{ na Factura Energética} = C_{Convencional} - C_{Co/Trigeração} \quad (3.15)$$

Valor Actual Líquido (VAL)

O Valor Actual Líquido (VAL) tem como objectivo avaliar a viabilidade de um projecto de investimento através do cálculo do valor actual de todos os seus cash flows. Por valor actual entende-se o valor hoje de um determinado montante a obter no futuro.

$$VAL = \sum_{i=0}^n \frac{CF_i}{(1+t)^i} - I \quad (3.16)$$

- *CF_i* – Cash flow no ano *i*
- *t* – Taxa de actualização
- *I* – Investimento Inicial
- *n* – nº de anos avaliados

Na presente dissertação foi considerada uma taxa de actualização de 10% e o VAL foi avaliado para o período de vida do investimento.

Período de Retorno do Investimento (PRI)

O período de retorno do investimento simples consiste no período de tempo que decorre até que o investimento inicial seja igualado.

$$I = \sum_{i=0}^{PRI} CF_i \quad (3.17)$$

Taxa Interna de Rendibilidade (TIR)

É a taxa de retorno que o projecto deveria ter para que o investimento inicial fosse recuperado ao fim de um número n de anos. Neste tipo de projectos a TIR é calculada para o tempo de vida do equipamento.

$$0 = \sum_{i=0}^n \frac{CF_i}{(1 + TIR)^i} - I \quad (3.18)$$

Trata-se de um indicador muito importante na análise de investimentos pois pode ser comparada com a Taxa Mínima de Atractividade (TMA) que representa o mínimo que um investidor se propõe a ganhar quando faz um investimento. Um negócio considera-se atractivo se a TIR for maior que a TMA.

3.3. Análise dos Consumos Energéticos e dos Diagramas de Carga

Antes de se poder correr a aplicação desenvolvida é necessário fazer o enquadramento energético da instalação a estudar, nomeadamente dos seus consumos energéticos e dos diagramas de carga da instalação.

Os consumos energéticos são avaliados a partir da análise das facturas eléctricas e de gás natural. Esta análise além dos consumos da central térmica convencional permite também ficar a conhecer os seus custos de operação.

A aplicação desenvolvida parte do diagrama de carga horário das necessidades caloríficas e frigoríficas para realizar a sua análise. A correcta construção destes diagramas de cargas é de importância vital pois contrariamente ao sector da indústria onde na realização de um determinado processo as necessidades térmicas não apresentam grande variação, no sector dos edifícios e do comércio a satisfação do aquecimento local, do arrefecimento dos espaços e das águas quentes sanitárias, entre outros, apresenta uma grande variação ao longo do mesmo dia.

Procurou-se assim construir um perfil horário das necessidades de energia calorífica e frigorífica para um dia típico de cada mês. Na sua construção houve a preocupação em separar esses dias em úteis, sábados e domingos ou feriados.

Os diagramas de carga das necessidades térmicas podem ser obtidos de diversas formas. Uma delas será pela existência de contadores entálpicos na central térmica que, ligados a um sistema de gestão técnica centralizada, permitam fazer o registo da energia consumida. Outra forma de obter os diagramas de carga será como resultado da simulação dinâmica do edifício. Por fim a existência de registo das tomadas horárias do consumo de gás natural e de electricidade e o conhecimento das eficiências e coeficientes de performance dos equipamentos permitirá também a construção dos diagramas de carga acima referidos.

No Anexo I está representado um exemplo das tabelas utilizadas para construção dos diagramas de carga das necessidades térmicas, tabelas essas que consideram os diferentes horários de funcionamento da tarifa eléctrica.

3.4. Algoritmo de Cálculo

Uma vez construídos os diagramas de carga das necessidades horárias é então possível iniciar-se a aplicação onde serão escolhidas as opções segundo as quais se irá fazer o dimensionamento da central.

3.4.1. Inputs e Funcionamento da Aplicação

Como *inputs* da aplicação teremos a opção do equipamento de cogeração e o seu respectivo intervalo de potência a ensaiar, a opção do equipamento de trigeriação e o seu intervalo de potência a ensaiar e, finalmente, o horário de funcionamento da central térmica. A Figura 18 apresenta a sequência dos *inputs* da aplicação até à obtenção dos resultados.



Figura 18 – Sequência de inputs da aplicação

A aplicação é iniciada com a escolha da opção de cogeração entre as quatro consideradas pela aplicação: motor de combustão interna à carga máxima, motor de combustão interna com controlo de carga, motor de combustão interna com produção de vapor e turbina a gás, como mostra a Figura 19. Na secção 3.4.2. será explicada em detalhe cada uma destas opções.

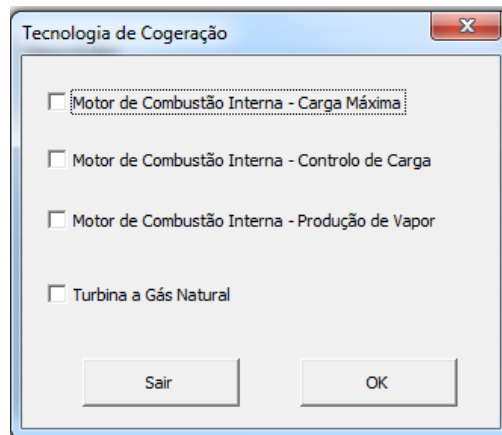


Figura 19 – Janela das opções de cogeração consideradas pela aplicação

Após escolhida a opção de cogeração insere-se o intervalo de potência a ensaiar, definindo-se a potência mínima, a potência máxima e o passo entre potências a considerar de acordo com a Figura 20.

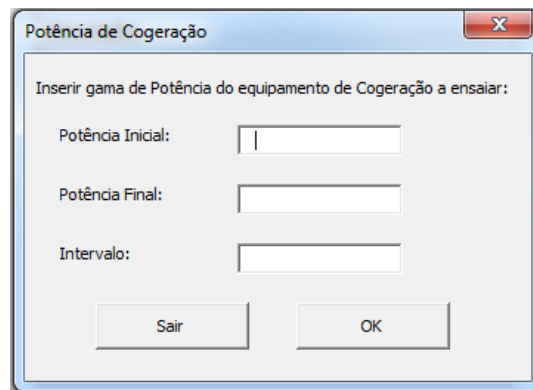


Figura 20 – Janela onde se insere o intervalo de potência de cogeração a ensaiar

Quanto à opção de trigerção, a aplicação permite ensaiar uma central sem equipamento de trigerção, ou seja uma central apenas de cogeração, ou ainda associar um *chiller* de absorção de efeito simples ou duplo ao equipamento de cogeração. Adicionalmente neste passo foi desenvolvida a opção de se accionar a caldeira de apoio de forma a impedir a entrada em funcionamento do *chiller* de compressão, como mostra a Figura 21.

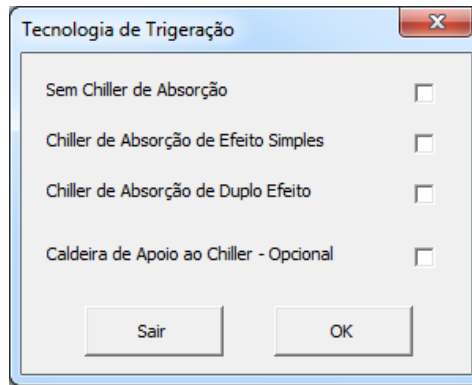


Figura 21 – Janela das opções de trigeração consideradas pela aplicação

Após escolhida a opção de trigeração insere-se o intervalo de potência a ensaiar, definindo-se a potência mínima, a potência máxima e o passo entre potências a considerar de acordo com a Figura 22.

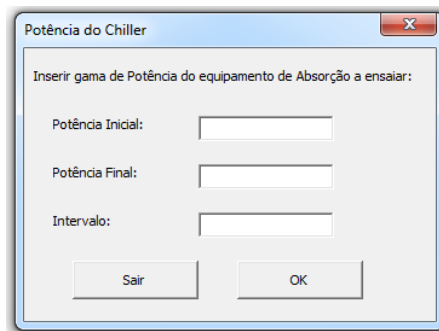


Figura 22 – Janela onde se insere o intervalo de potência de trigeração a ensaiar

Por fim, o último input da aplicação diz respeito ao horário de funcionamento do equipamento de cogeração. Esta opção foi desenvolvida com o objectivo de simular o funcionamento do equipamento de cogeração de acordo com os diferentes horários da tarifa eléctrica. Deste modo, é possível escolher qualquer combinação de funcionamento entre os horários de ponta, cheias, vazio e super vazio como mostra a Figura 23.

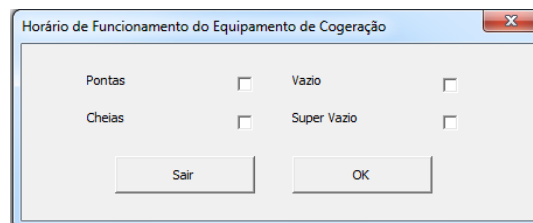


Figura 23 – Janela de escolha do horário de funcionamento da central a ensaiar

Após escolhidos os diversos *inputs* da aplicação são testadas as diversas potências inseridas para o equipamento de cogeração e de trigeração. Para cada conjugação de equipamentos testatada e em relação ao diagrama de carga das necessidades de calor e de frio, a aplicação quantifica a energia

térmica proveniente do equipamento de cogeração que é aproveitada para satisfazer as necessidades de calor, a energia térmica que é fornecida pela caldeira de apoio, a energia frigorífica gerada pelo equipamento de absorção e a energia frigorífica gerada pelo equipamento de compressão. Caso aconteça é também quantificada a energia que é desperdiçada.

A quantificação das diferentes formas de energia e o conhecimento dos equipamentos que lhes deram origem permite calcular os parâmetros económicos e energéticos presentes na secção 3.2. Além desses parâmetros, foram ainda produzidos resultados respeitantes à redução de emissões de gases com efeito de estufa (GEE) e à percentagem das necessidades térmicas totais satisfeita. Finalmente, de modo a que se possa ter noção do funcionamento da solução proposta ao longo do ano são mapeadas as necessidades térmicas caloríficas e frigoríficas da instalação, em separado, e calculada a contribuição de cada equipamento para as satisfazer. Esta contribuição é separada nos dias úteis, sábados e domingos e feriados de cada mês. A Figura 24 apresenta a janela de escolha dos resultados a partir da qual se poderá visualizar os resultados da análise económica, energética ou do funcionamento da central.

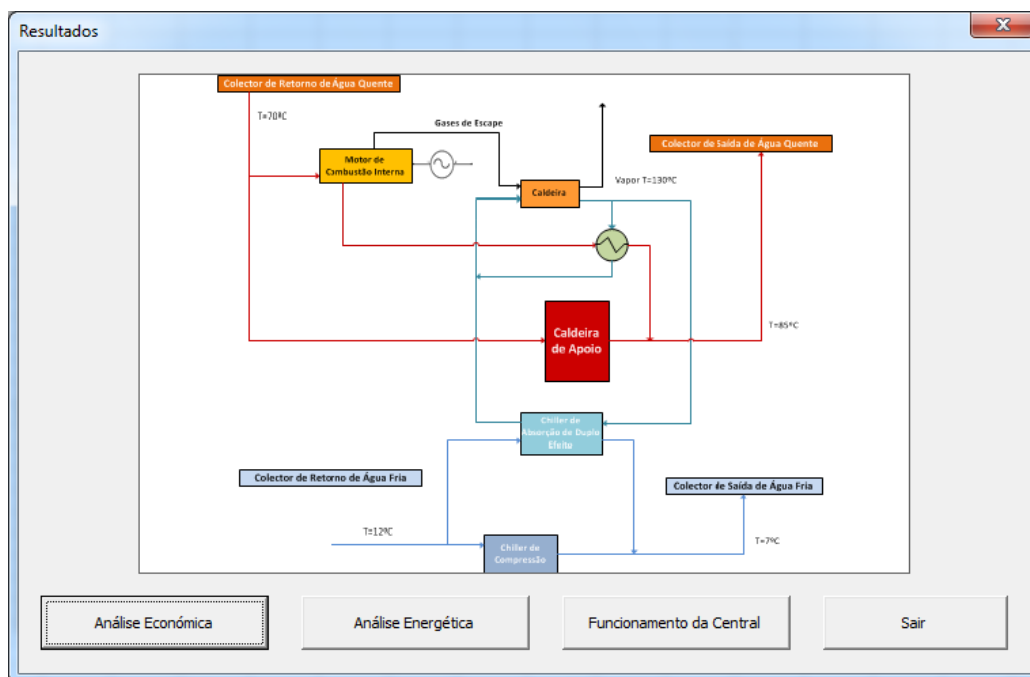


Figura 24 – Janela de escolha dos resultados gerados pela aplicação

3.4.2. Regime de Funcionamento dos Equipamentos de Cogeração e de Trigeração

De seguida serão apresentados os regimes de funcionamento para as diversas opções de cogeração e de trigeração consideradas.

Motor de Combustão Interna – Carga Máxima

Neste caso o motor de combustão interna funcionará sempre à carga máxima quaisquer que sejam as necessidades térmicas do edifício. Tendo em vista uma política energética de combate ao desperdício foi considerado que o motor não funcionará nos períodos em que as necessidades térmicas do edifício seja inferiores a 30% da potência térmica nominal do motor considerado. De referir que este parâmetro pode ser alterado pelo utilizador.

Motor de Combustão Interna – Controlo de Carga

Esta opção foi desenvolvida de modo a testar o funcionamento de motores que se adaptem às necessidades térmicas do edifício variando assim a carga do motor. O motor funciona apenas para cargas iguais ou superiores a 50% da carga total, uma vez que para cargas inferiores ocorre uma grande degradação do rendimento eléctrico, prejudicial ao objectivo da solução proposta. Se as necessidades térmicas, num dado momento, forem inferiores a 85% da potência térmica fornecida à carga de 50% então o motor não funcionará nesse período. Este último critério pretende apenas que potências térmicas inferiores mas muito próximas daquelas que se verificam à carga de 50% não levem à paragem do motor por períodos muito curtos. O critério de 85% utilizado pode ser alterado pelo utilizador.

Tanto neste caso como no anterior a potência térmica fornecida pelo motor apenas aquece um circuito de água não havendo produção de vapor.

Motor de Combustão Interna – Produção de Vapor

Esta opção foi desenvolvida com o objectivo de permitir accionar um *chiller* de absorção de duplo efeito a partir de um motor de combustão interna, *chiller* este que requer vapor para o seu funcionamento. Considerou-se o funcionamento do motor de combustão interna à carga máxima com produção de vapor a partir do aproveitamento da energia térmica dos gases de escape. Este vapor produzido irá aquecer o circuito de água quente e caso haja vapor em excesso é utilizado para accionar o *chiller* de absorção.

Turbina a Gás

A opção da turbina a gás foi desenvolvida de modo a testar o funcionamento desta tecnologia sempre a carga máxima uma vez que não apresenta um bom comportamento a carga parcial e não necessita de arrefecimento. A turbina a gás, em cogeração, está associada a uma caldeira de recuperação de calor (HRSG) que permite a produção de vapor a ser utilizado para aquecimento de água ou activação de um *chiller* de duplo efeito.

Por não ter necessidades de arrefecimento obrigatório não se impôs na turbina uma limitação quanto à energia desperdiçada.

Chillers de Absorção de Efeito Simples e Duplo

O funcionamento do *chiller* assenta na utilização da energia térmica excedente do processo de cogeração, ou seja a energia que anteriormente seria desperdiçada é agora utilizada de modo a accionar um *chiller* de absorção para arrefecimento de água.

Em ambos os tipos de *chiller* e através de informação recolhida junto de fornecedores, estes só deverão ser accionados se puderem gerar uma potência de arrefecimento que seja no mínimo 20% da sua potência nominal. Ou seja se não houver energia calorífica suficiente ou se as necessidades térmicas do edifício não forem suficientes para que este critério seja cumprido então o *chiller* não deverá funcionar.

3.4.3. Cálculo de Parâmetros

Foi objectivo da presente dissertação avaliar a variação de vários parâmetros dos equipamentos de cogeração de acordo com a sua capacidade e carga de funcionamento. Deste modo foram construídas várias correlações que traduzem a variação do comportamento destes equipamentos ao longo do intervalo de potência considerado. Foram também construídas correlações a explicar parâmetros referentes aos *chillers* de absorção.

Para motores de combustão interna considerou-se que as correlações obtidas seriam válidas entre potências de 50 a 4000 kW_e. Para turbinas a gás considerou-se que as correlações obtidas seriam válidas entre potências de 250 e 17000 kW_e. Para *chillers* tanto de efeito simples como duplo considerou-se que as correlações construídas seriam válidas para potências entre os 100 e os 1800 kW_f.

Variação dos Rendimentos Térmico e Eléctrico Nominais com a Potência do Motor

Com o aumento da potência do motor de combustão interna verifica-se, através da recolha de dados presente no Anexo II, que há uma tendência para que o rendimento eléctrico nominal seja maior. Esta tendência é acompanhada por uma diminuição do rendimento térmico, mantendo-se o rendimento

global aproximadamente constante. Este comportamento dos motores leva a que haja um aumento da razão electricidade/calor com o aumento da potência do motor.

A Figura 25 apresenta os dados recolhidos que dizem respeito ao rendimento eléctrico nominal para diferentes potências do motor de combustão interna e a correlação obtida para a sua descrição.

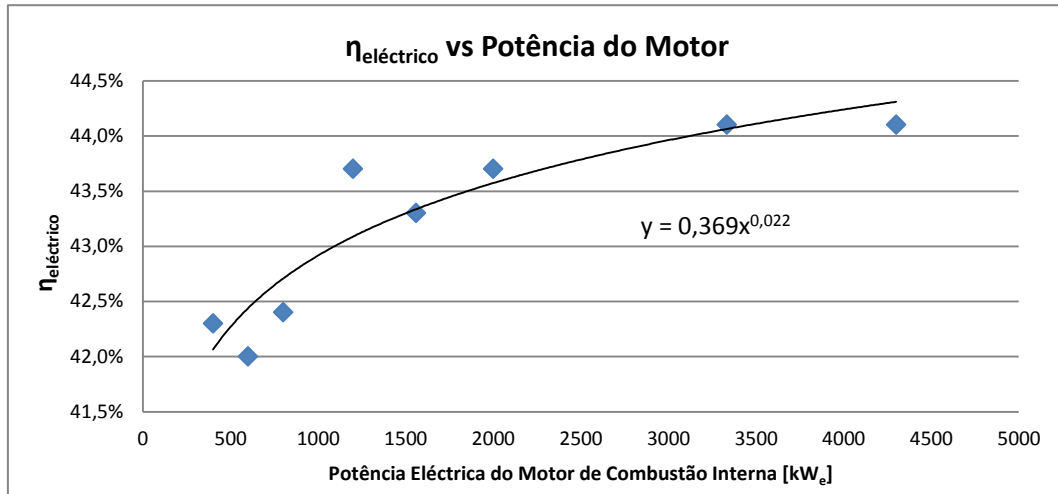


Figura 25 – Variação do rendimento eléctrico com a potência eléctrica do motor

A Figura 26 apresenta os dados recolhidos que dizem respeito ao rendimento térmico nominal para diferentes potências do motor de combustão interna, bem como a correlação que se obteve a partir dos mesmos.

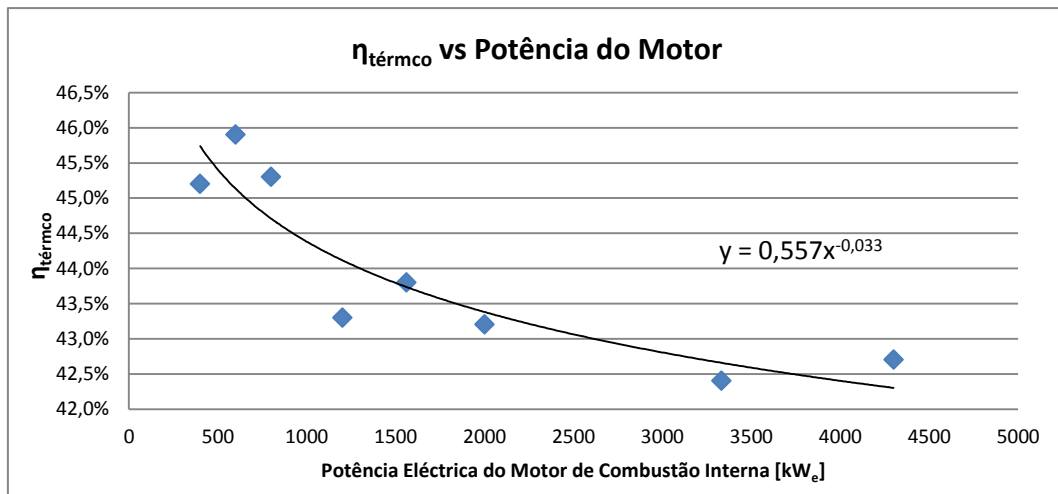


Figura 26 – Variação do rendimento térmico com a potência eléctrica do motor

Varição da Carga do Motor de Combustão Interna

De modo a descrever-se o comportamento do motor de combustão interna à medida que a sua carga varia foram construídas três correlações com base nos dados indicados no Anexo II com características de 14 motores. A Figura 27 apresenta a variação da carga do motor com o rácio médio entre a potência térmica fornecida num dado momento pelo motor e a sua potência nominal.

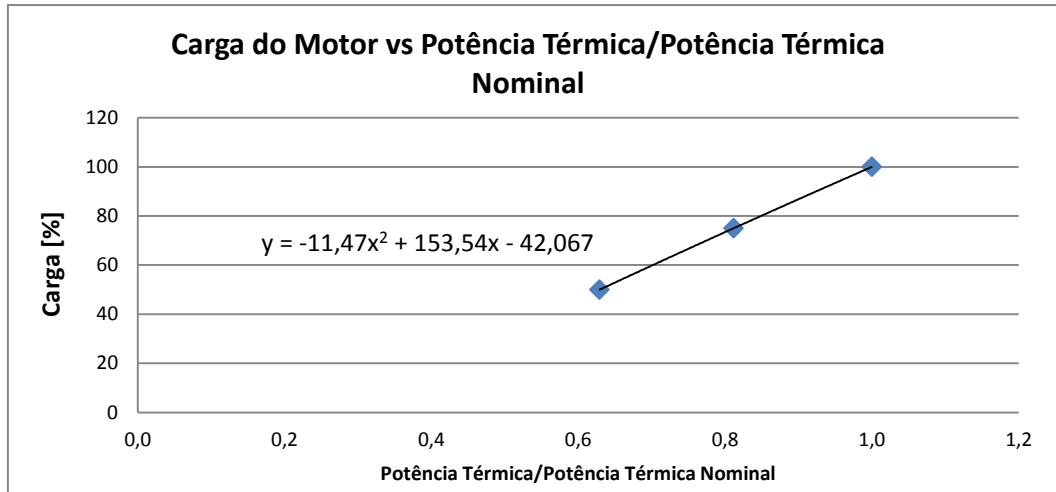


Figura 27 – Variação da carga do motor com o rácio potência térmica/potência térmica nominal

A Figura 28 apresenta a diminuição do rendimento eléctrico de acordo com a carga do motor.

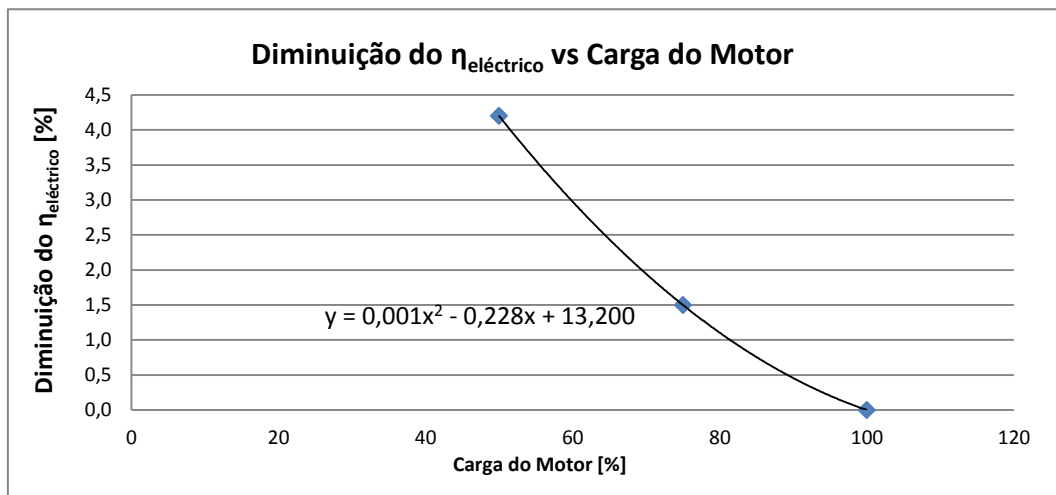


Figura 28 – Diminuição do rendimento eléctrico com a carga do motor

A Figura 29 apresenta o aumento do rendimento térmico à medida que se varia a carga do motor de combustão interna.

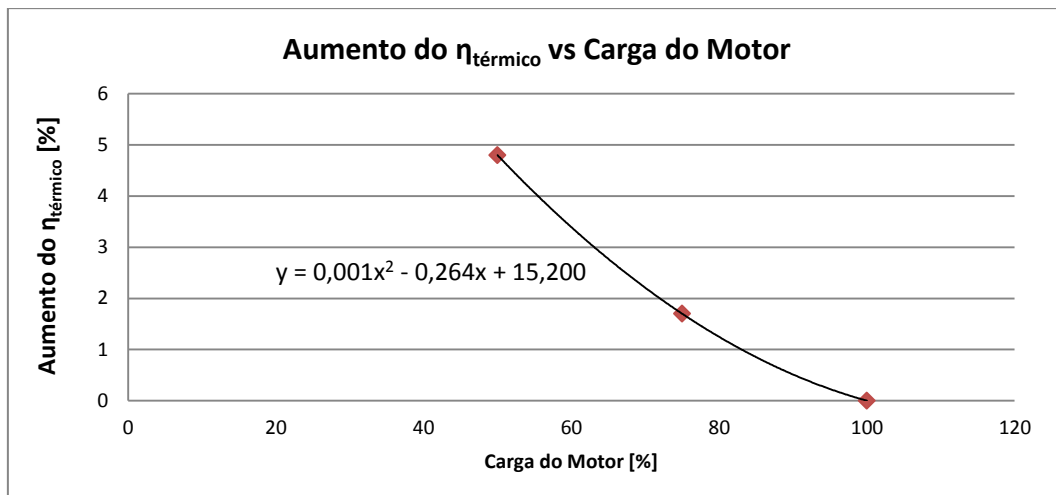


Figura 29 – Aumento do rendimento térmico com a carga do motor

Através da correlação estabelecida na Figura 27 é possível, a partir do rácio entre a potência térmica e a potência térmica nominal, ficar a conhecer a carga a que o motor está a trabalhar. Este rácio entre potências é conhecido, pois no caso do motor de combustão com controlo de carga a potência térmica de funcionamento diz respeito às necessidades térmicas da instalação, enquanto a potência térmica nominal é aquela que se verifica a uma carga de 100%. Conhecendo-se então a carga de funcionamento do motor é possível ficar a conhecer a diminuição do rendimento eléctrico através da Figura 28 e o aumento do rendimento térmico através da Figura 29.

De referir que em todos os gráficos apenas foram considerados valores entre a carga de 50% e 100%. Isto deve-se não só aos dados recolhidos serem apenas para essa gama de cargas, mas também ao aconselhamento por parte do fabricante em não utilizar o motor com uma carga abaixo de 50%.

Decomposição do Rendimento Térmico em Motores de Combustão Interna

A análise aos dados do Anexo II revelou que da potência térmica total fornecida por um motor de combustão interna, em média 52%, é proveniente dos gases de escape, enquanto os restantes 48% dizem respeito aos circuitos de água de arrefecimento, óleo de lubrificação e, se o motor for sobrealimentado, do primeiro estágio do aftercooler. Este resultado é relevante uma vez que permite quantificar para os motores qual a energia disponível para produção de vapor. A Figura 30 apresenta os valores recolhidos para diversos motores.

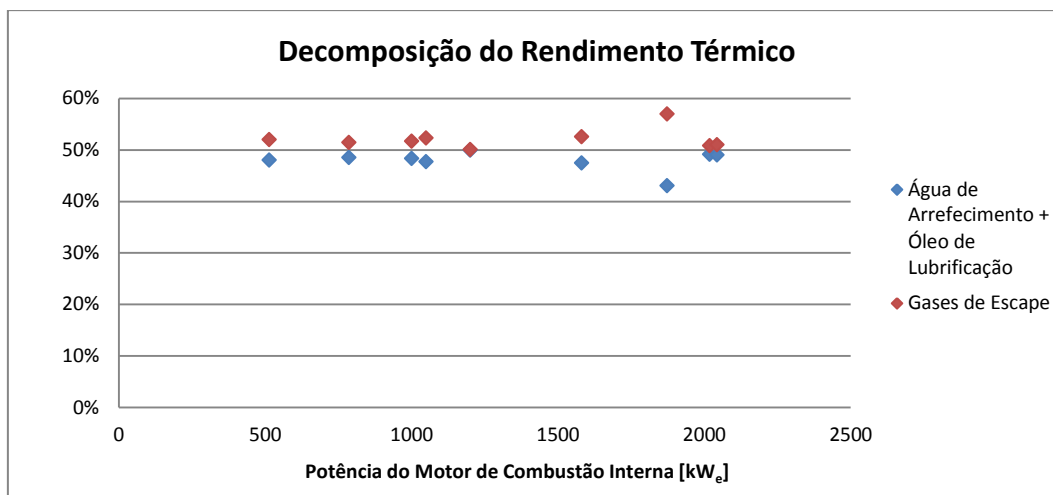


Figura 30 – Decomposição do rendimento térmico em motores

Preço do Motor de Combustão Interna

Com base na informação do Anexo II foi possível construir uma correlação entre o preço por kW_e e a potência do motor de combustão interna. A Figura 31 apresenta a correlação obtida para os preços dos motores de combustão interna.

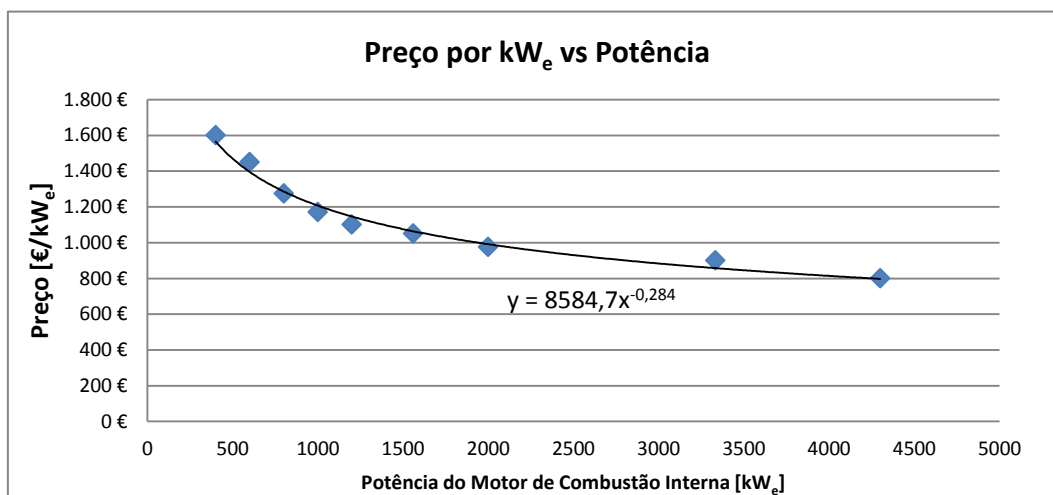


Figura 31 – Variação do preço por kW_e com a potência eléctrica do motor

Este preço calculado incluirá, além do motor, equipamentos necessários ao seu funcionamento como torres de arrefecimento, aeroarrefecedores e permutadores de calor.

Variação dos Rendimentos Térmico e Eléctrico Nominais com a Potência da Turbina a Gás

Com o aumento da potência da turbina a gás verifica-se um aumento do seu rendimento eléctrico nominal a partir dos dados do Anexo III. No caso do rendimento térmico verifica-se que este sofre uma ligeira redução, redução essa inferior ao aumento do rendimento eléctrico. Este

comportamento das turbinas com a potência leva a que haja um aumento da razão electricidade/calor à medida que se aumenta a dimensão e potência das turbinas.

A Figura 32 apresenta os dados recolhidos que dizem respeito aos rendimentos térmico e eléctrico nominais para diferentes potências eléctricas da turbina a gás interna, bem como as correlações que os descrevem.

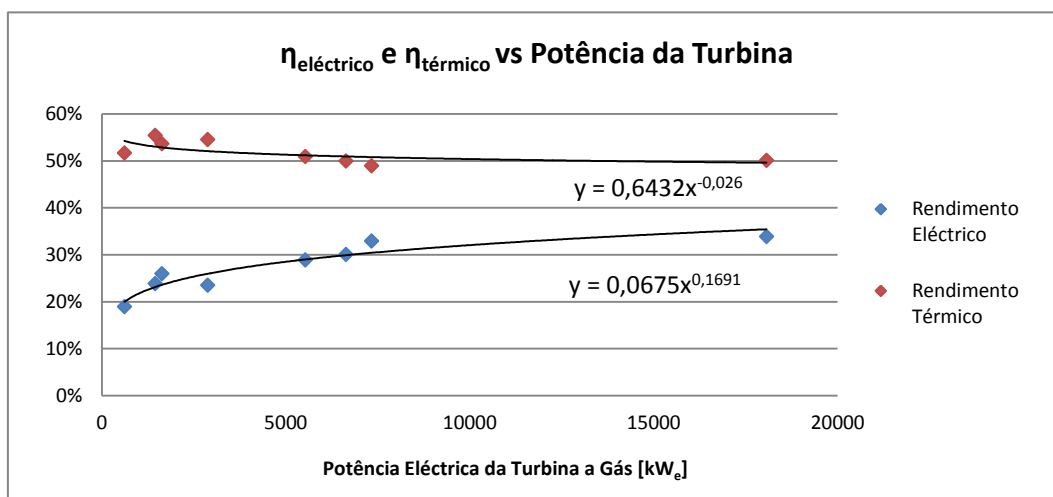


Figura 32 – Variação do rendimento eléctrico e térmico com a potência eléctrica da turbina

Preço da Turbina a Gás

Através da recolha de dados presente no Anexo III foi possível construir uma correlação entre o preço e a potência eléctrica de uma turbina a gás típica. A Figura 33 apresenta a análise deste parâmetro.

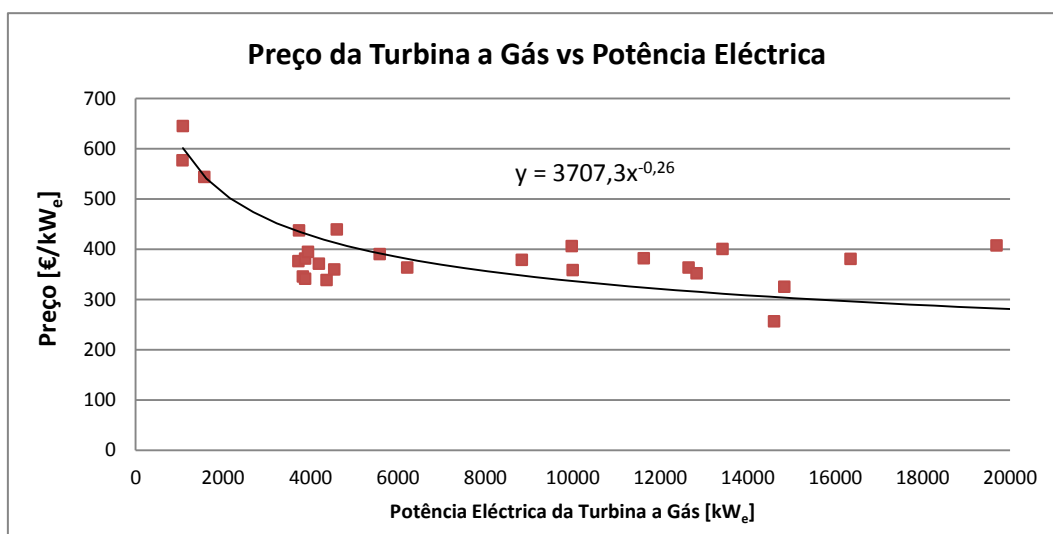


Figura 33 – Variação do preço de turbinas com a potência eléctrica

Preço de *Chillers* de Efeito Simples e Duplo

Através da informação presente no Anexo IV, informação essa recolhida junto de fornecedores, foi possível estabelecer correlações que traduzissem o preço de *chillers* de absorção, tanto de efeito simples como duplo, com o andamento da potência frigorífica dos mesmo. A Figura 34 apresenta a informação recolhida e as correlações obtidas.

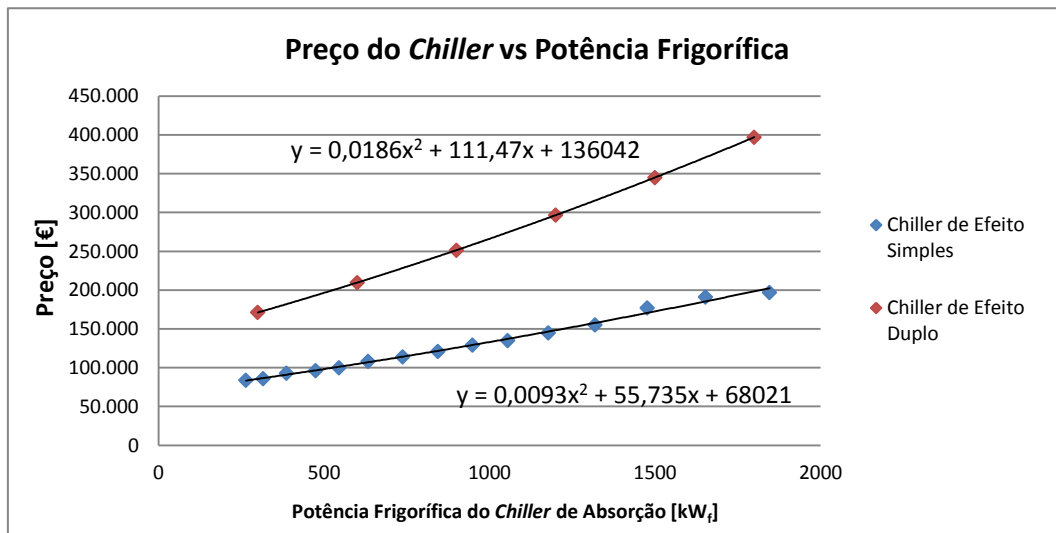


Figura 34 – Variação do preço de chillers de efeito simples e duplo com a potência frigorífica

4. Casos de Estudo

A aplicação desenvolvida foi considerada para o caso das instalações do Sporting Clube de Portugal e de um edifício de escritórios. Em ambos os casos o procedimento consistiu na recolha das necessidades energéticas do edifício e na simulação dos diversos cenários possíveis pela aplicação.

4.1. Sporting Clube de Portugal

O Sporting Clube de Portugal apresenta-se inserido no Complexo Alvalade XXI e é a entidade responsável pela operação e manutenção da central térmica existente para satisfação das necessidades de calor e frio das diferentes fracções que compõem o Complexo Alvalade XXI.

A central térmica é composta por três caldeiras a gás natural e cinco *chillers* de compressão do tipo parafuso com condensação a ar. A climatização das diferentes fracções do complexo faz-se por meio do aquecimento ou do arrefecimento de água que circula, respectivamente, nos circuitos de água quente e de água fria. Os circuitos de distribuição de água aquecida ou arrefecida, para as diferentes fracções, tem origem e chegada nos respectivos colectores instalados na central térmica. As unidades terminais dos circuitos podem ser unidades de tratamento de ar, ventiloconvectores ou ainda termo-accumuladores no caso das águas quentes sanitárias. As Figuras 35 e 36 apresentam um esquema representativo da central térmica para os circuitos de água quente e fria, respectivamente.

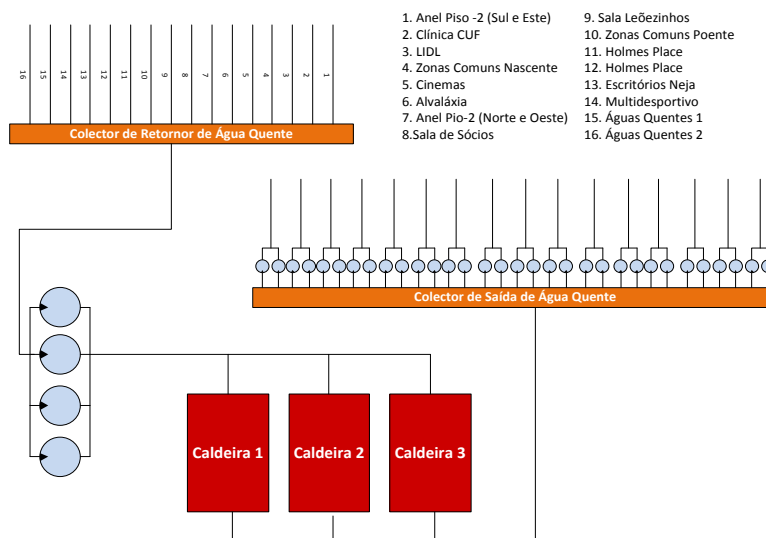


Figura 35 – Esquema representativo do circuito de água quente

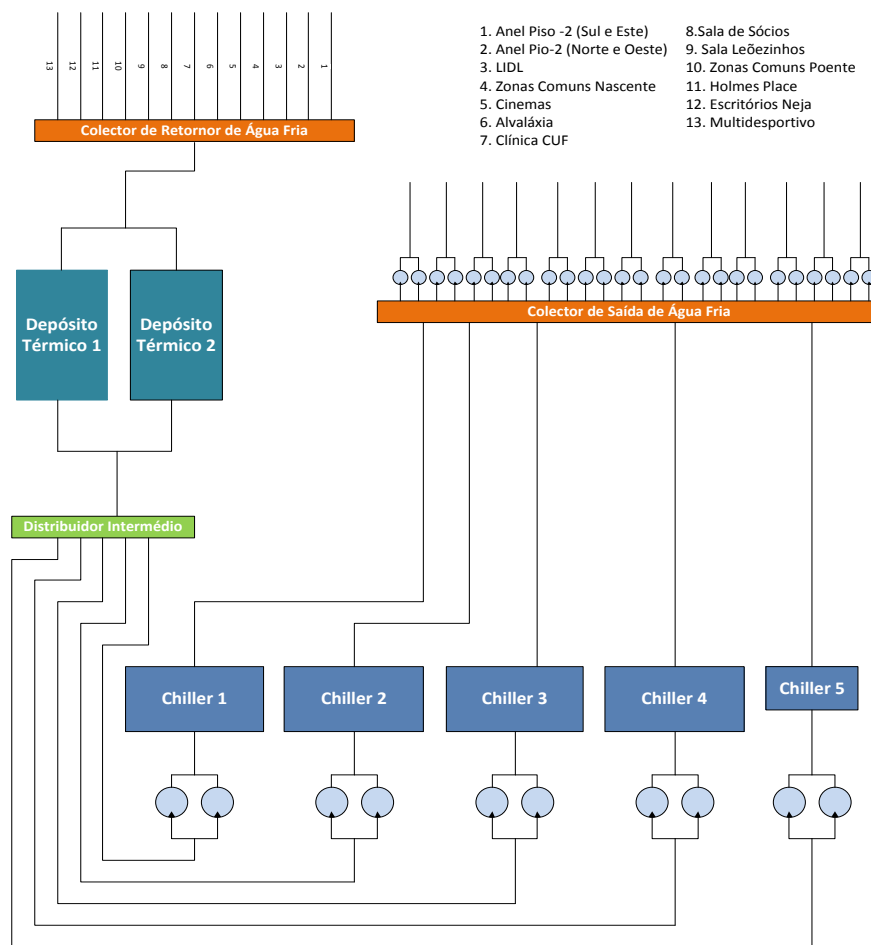


Figura 36 – Esquema representativo do circuito de água fria

No caso das instalações do Sporting Clube de Portugal e no que diz respeito ao perfil horário das necessidades de calor, este foi obtido analisando-se as tomadas horárias do consumo de gás natural e aplicando-se um rendimento médio de funcionamento das caldeiras de 0,89 [18]. Apenas foi possível obter as tomadas horárias de gás natural para os meses de Janeiro, Fevereiro, Abril, Agosto e Outubro. Assumiu-se que o mês de Dezembro teria um perfil semelhante ao de Janeiro, o mês de Março seria semelhante ao de Fevereiro, o mês de Maio seria semelhante a Abril e os meses de Junho, Julho e Setembro seriam semelhantes ao mês de Agosto. Nas Figuras 37, 38 e 39 mostram-se as necessidades de calor para os vários meses do ano apresentando-se as necessidades em dias úteis, sábados e domingos ou feriados respectivamente. Pode constatar-se que estas necessidades podem variar desde uma potência calorífica inferior a 500 kW no Verão, a uma potência calorífica superior a 2000 kW no Inverno.

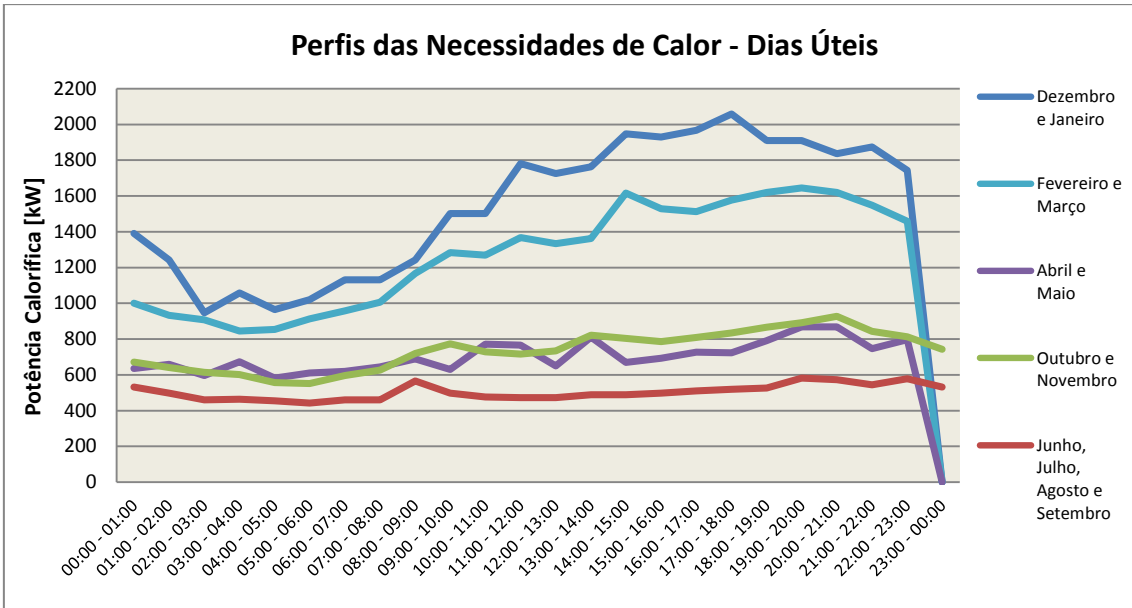


Figura 37 – Diagrama de carga da necessidade térmica calorífica nos dias úteis

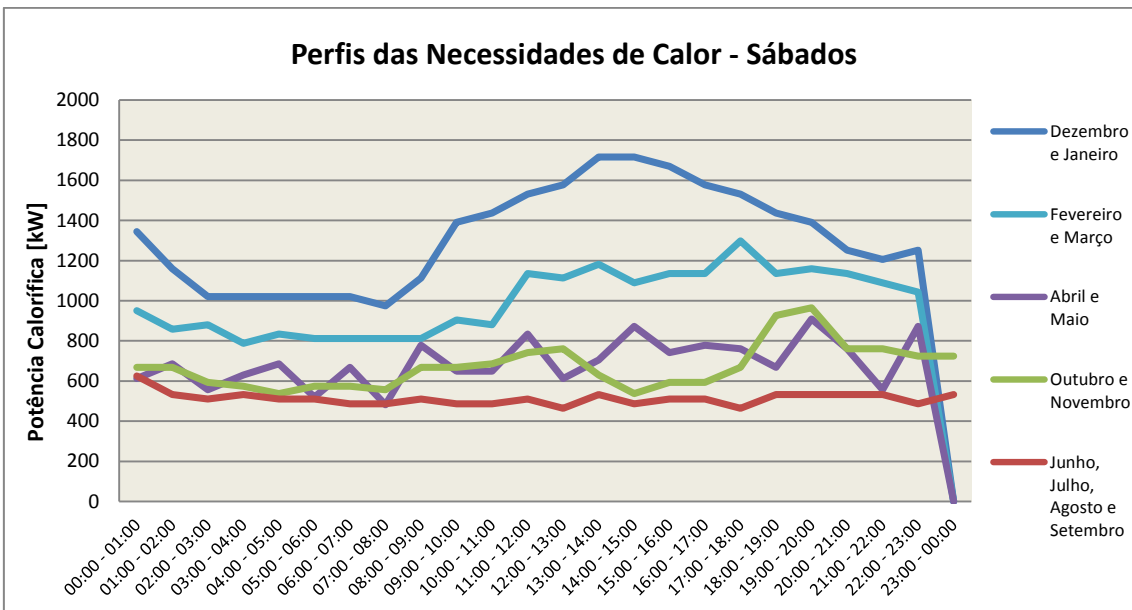


Figura 38 – Diagrama de carga da necessidade térmica calorífica nos sábados

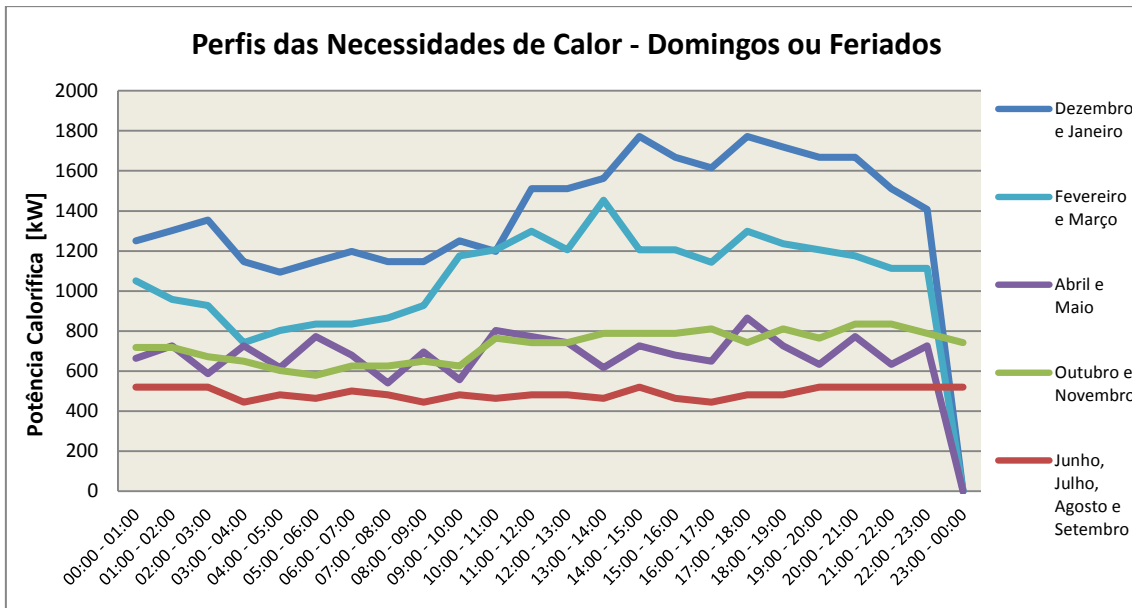


Figura 39 – Diagrama de carga da necessidade térmica calorífica nos domingos ou feriados

Através da montagem de analisadores de rede, no âmbito da auditoria energética realizada, medi-se que o consumo dos *chillers* de compressão é cerca de 35% do consumo eléctrico total, descendo este valor para 15% nos períodos antes, durante e após a realização de um jogo. Conhecendo-se estes valores, bem como o *COP* do *chiller* de 2,9 [19] e tendo acesso às tomadas a cada 15 min do consumo total eléctrico em média tensão, é possível a construção do perfil horário das necessidades de frio para os dias úteis, sábados e domingos e feriados de cada mês.

As Figuras 40, 41 e 42 apresentam os perfis das necessidades de frio nos dias úteis, sábados e domingos ou feriados dos vários meses, respectivamente. Estas necessidades serão maiores nos meses de Verão do que nos de Inverno, podendo variar desde 200 kW até cerca 1400 kW ao longo de um ano.

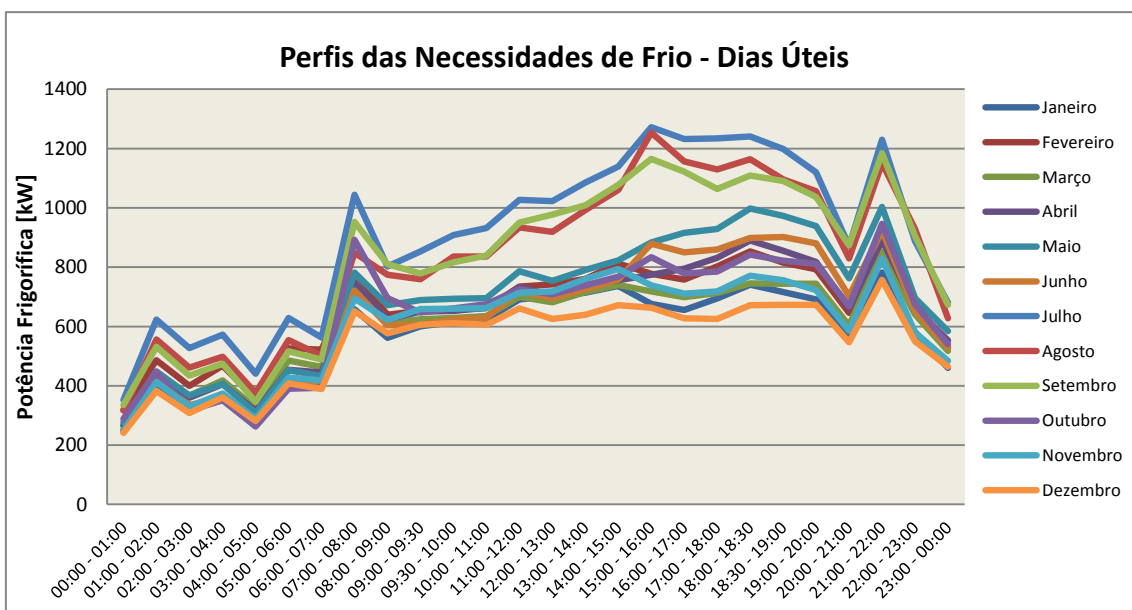


Figura 40 – Diagrama de carga da necessidade térmica frigorífica nos dias úteis

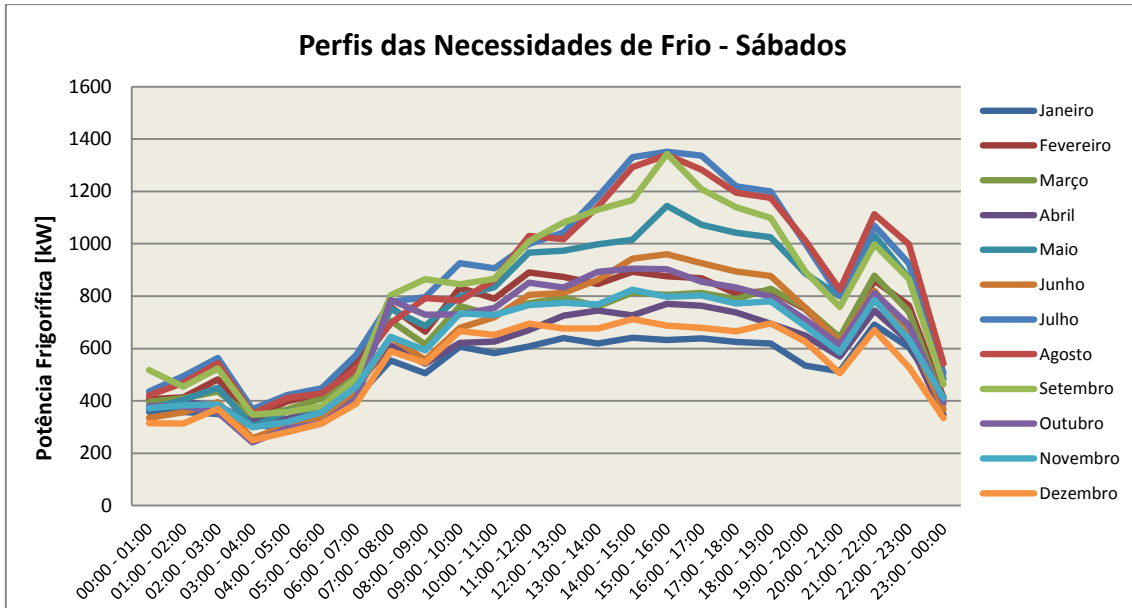


Figura 41 – Diagrama de carga da necessidade térmica frigorífica nos sábados

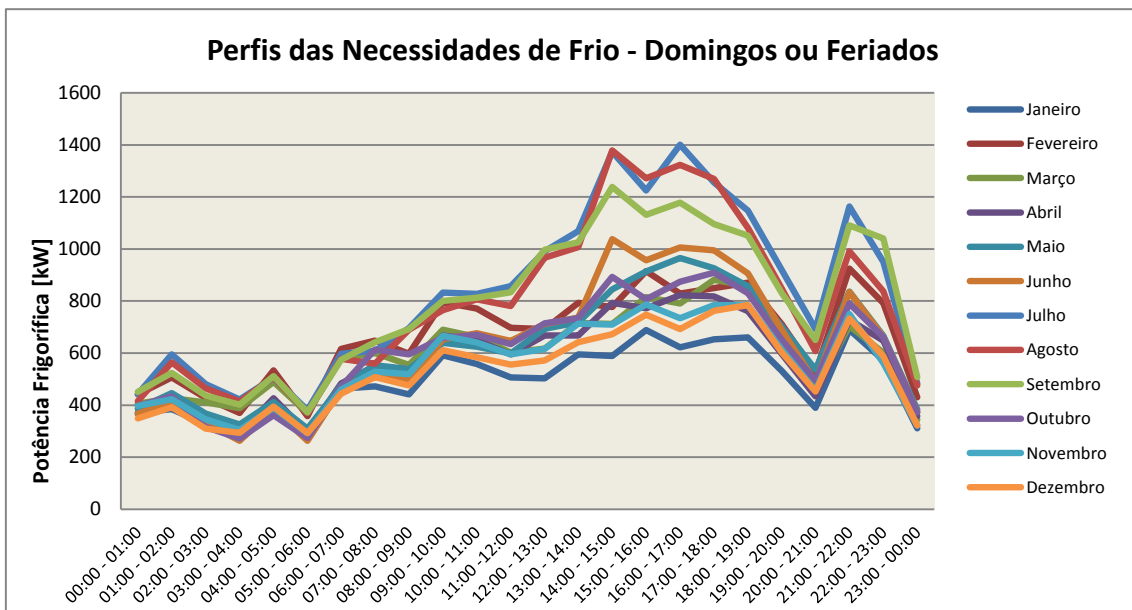


Figura 42 – Diagrama de carga da necessidade térmica calorífica nos domingos ou feriados

Após construção dos diagramas de carga acima referidos de modo a que estes possam ser considerados pela aplicação desenvolvida foram construídas as tabelas das necessidades térmicas de acordo com o Anexo I.

As Figuras 43 e 44 representam a potência calorífica e frigorífica necessárias em função do número de horas, respectivamente.

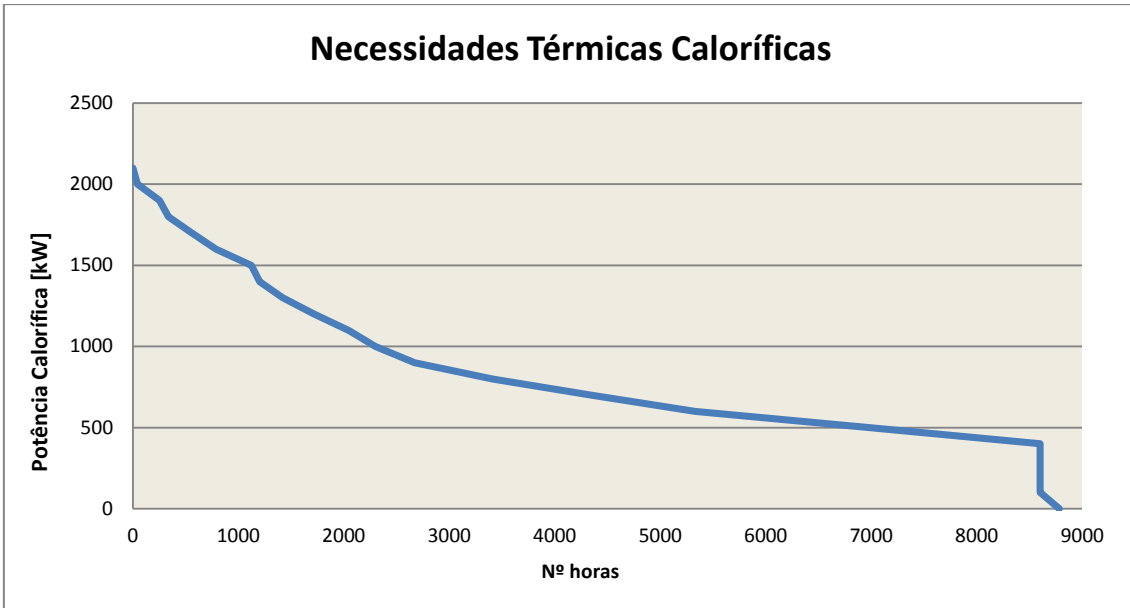


Figura 43 – Potência calorífica necessária em função do nº de horas

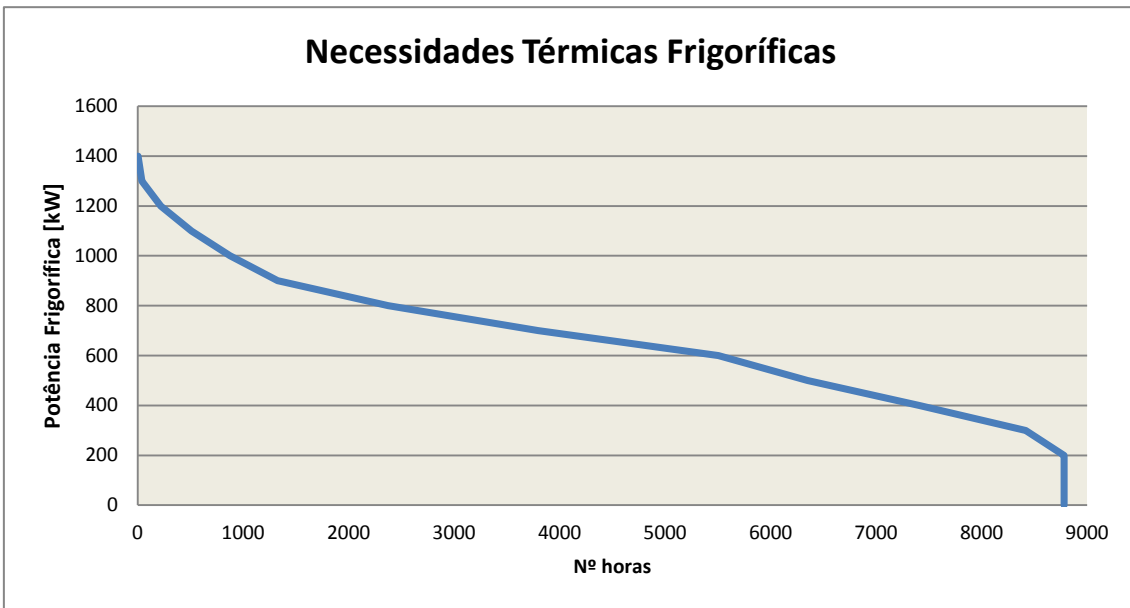


Figura 44 – Potência frigorífica necessária em função do nº de horas

A Tabela 3 mostra os resultados obtidos para a central convencional presente nas instalações do Sporting Clube de Portugal.

Tabela 3 – Resultados de funcionamento da central convencional

Factura Energética [€/ano]	719.108
Energia Primária [tep/ano]	1.134
Emissões de Dióxido de Carbono Equivalente [ton CO₂eq/ano]	2.827
Consumo de Gás Natural	779.727
Consumo Eléctrico – Chillers de Compressão	2.024.442

Um dos objectivos da aplicação passa por permitir o teste de equipamentos de cogeração e de trigerção numa gama tal que seja possível satisfazer desde pequenas percentagens das necessidades energéticas até à sua totalidade. Sendo assim foram testados equipamentos de cogeração com potências eléctricas a variar entre 300 e 2800 kW_e com um passo de 100 kW_e e *chillers* de absorção com potências frigoríficas entre 0 e 1800 kW_f com um passo de 300 kW_f tanto para o caso de efeito simples como de efeito duplo.

A aplicação desenvolvida permite testar diversas opções quanto ao horário de funcionamento e quanto ao funcionamento da caldeira de apoio ao *chiller* de absorção. De modo a que a análise de resultados não seja muito extensa optou-se por apresentar apenas os gráficos que traduzem os resultados económicos e energéticos mais significantes.

Nas secções abaixo apresenta-se os resultados obtidos para os vários cenários testados para o caso do Sporting Clube de Portugal. Os resultados economicamente e energeticamente mais significativos revelaram-se para a totalidade do horário de funcionamento e sem activar a caldeira de apoio ao *chiller*. Contudo, é de interesse avaliar também o comportamento da central com o horário de pontas e cheias. Deste modo no Anexo V serão apresentados para os diversos cenários os resultados com o horário de funcionamento em pontas e cheias e sem accionar caldeira de apoio ao *chiller*.

Na análise económica foi apresentada a Poupança na Factura Energética e o Valor Actual Líquido do Investimento. Já na análise energética foi apresentada a Poupança de Energia Primária e a Poupança de Energia Primária Efectiva.

4.1.1. Motor de Combustão Interna – Carga Máxima

Nesta secção foi testado simultaneamente uma central de cogeração a funcionar com um motor de combustão interna à carga máxima e uma central de trigerção funcionado com o mesmo motor acoplado a um *chiller* de absorção de efeito simples na totalidade do horário e sem accionar a caldeira de apoio ao *chiller* de absorção.

As Figuras 45, 46, 47 e 48 apresentam os resultados obtidos para esse caso. Importa referir que nos gráficos seguintes o eixo das abcissas representa a potência eléctrica do equipamento de cogeração

considerado e à direita na figura está indicada a correspondência de cores para as potências do *chiller* de absorção a ser ensaiado.

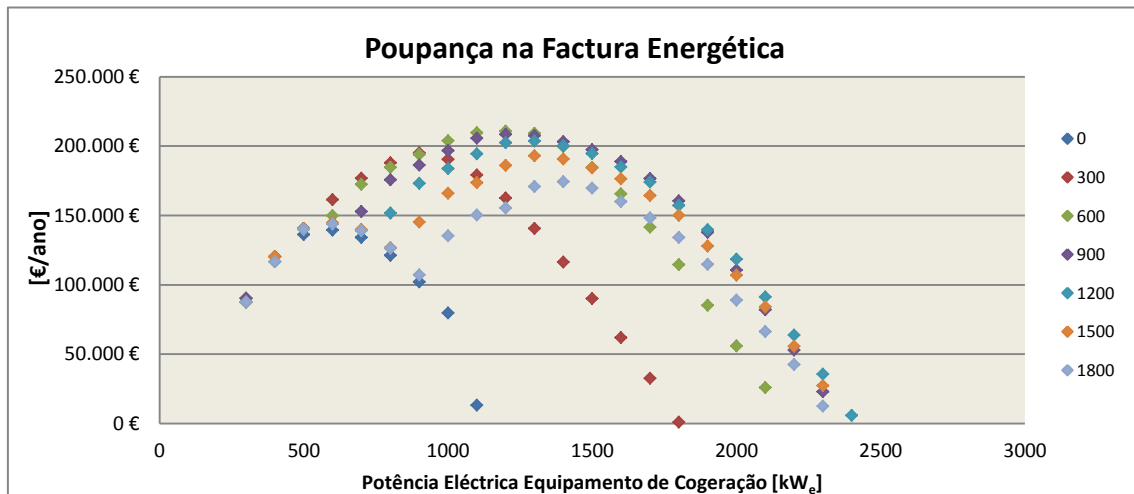


Figura 45 – Poupança na Fatura Energética para uma central com Motor de Combustão Interna à carga máxima

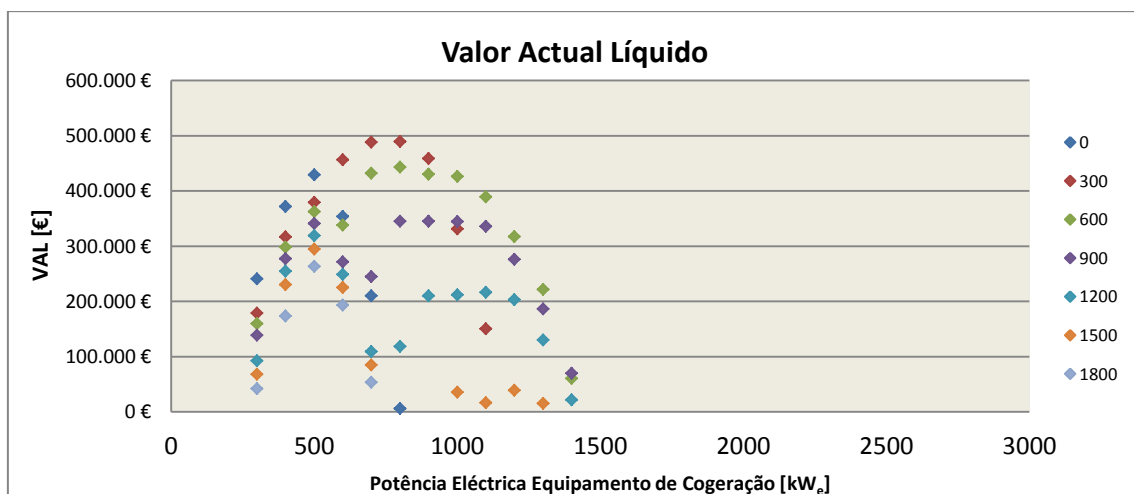


Figura 46 – Valor Actual Líquido para uma central com Motor de Combustão Interna à carga máxima

A PFE máxima toma o valor de 210.881€/ano e é atingida para um motor de combustão interna de 1200 kW_e e um *chiller* de absorção de efeito simples de 600 kW_f. Já o máximo valor do VAL ocorrerá para uma central de trigeração com um motor de combustão interna de 800 kW_e e um *chiller* de absorção de efeito simples de 300 kW_f e terá o valor de 489.972 €.

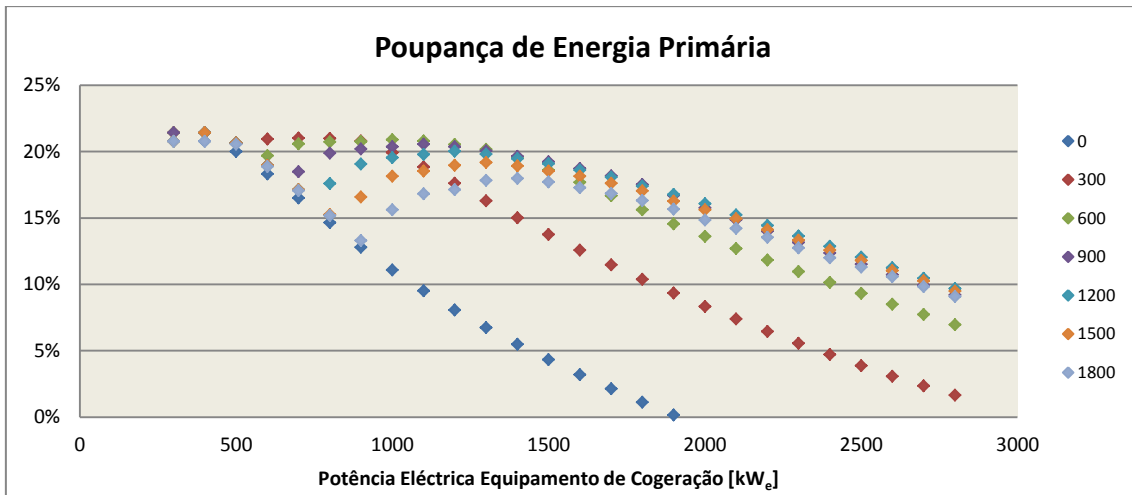


Figura 47 – Poupança de Energia Primária para uma central com motor à carga máxima

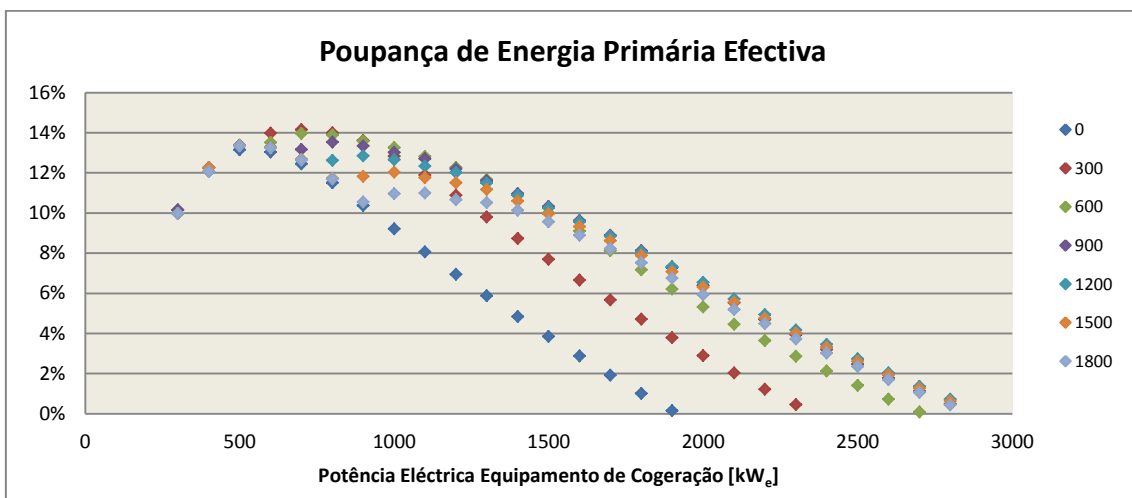


Figura 48 – Poupança de Energia Primária Efectiva para uma central com motor à carga máxima

Em termos energéticos, neste cenário é possível obter uma poupança de energia primária de 21,4% para motores de 300 kW_e e chillers entre os 300 e os 900 kW_f. A poupança de energia primária efectiva é 14,1% para uma central de trigerção com um motor de combustão interna de 700 kW_e e um *chiller* de absorção de efeito simples de 300 kW_f.

4.1.2. Motor de Combustão Interna – Controlo de Carga

Nesta secção testou-se uma central de cogeração a funcionar com um motor de combustão interna com controlo de carga e uma central de trigerção funcionado com o mesmo motor acoplado a um *chiller* de absorção de efeito simples na totalidade do horário e sem accionar a caldeira de apoio ao *chiller* de absorção. As Figuras 49, 50, 51 e 52 apresentam os resultados obtidos para esse caso.

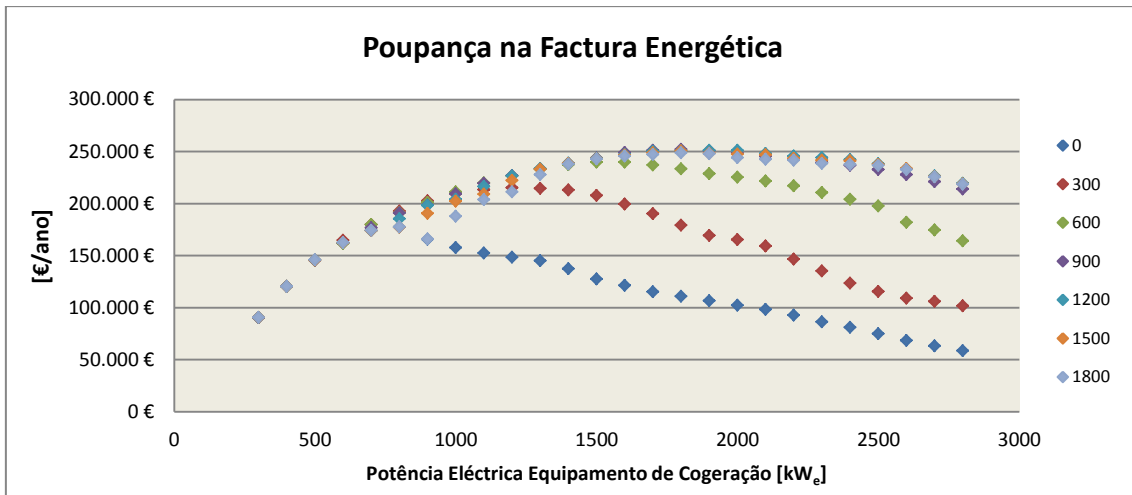


Figura 49 – Poupança na Factura Energética para uma central com Motor de Combustão Interna com controlo de carga

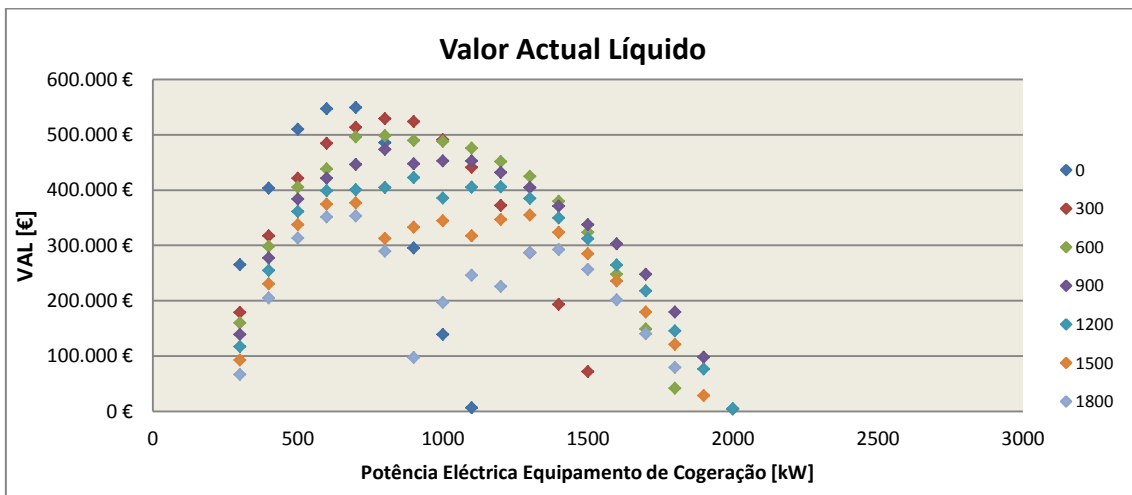


Figura 50 – Valor Actual Líquido para uma central com Motor de Combustão Interna com controlo de carga

A análise económica deste cenário revelou um máximo para a PFE de 251.937€/ano atingido para uma solução de trigerção com um motor de 1800 kW_e e um *chiller* de 900 kW_f. O VAL máximo ocorreria para uma central de cogeração com um motor de combustão interna de 700 kW_e e apresentaria o valor de 549.174€.

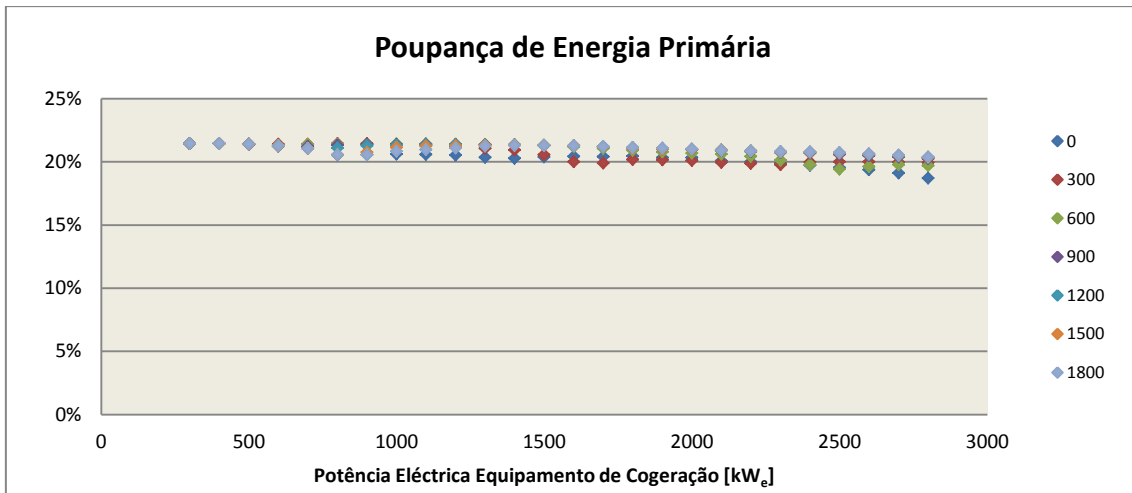


Figura 51 – Poupança de Energia Primária Efectiva para uma central com motor com controlo de carga

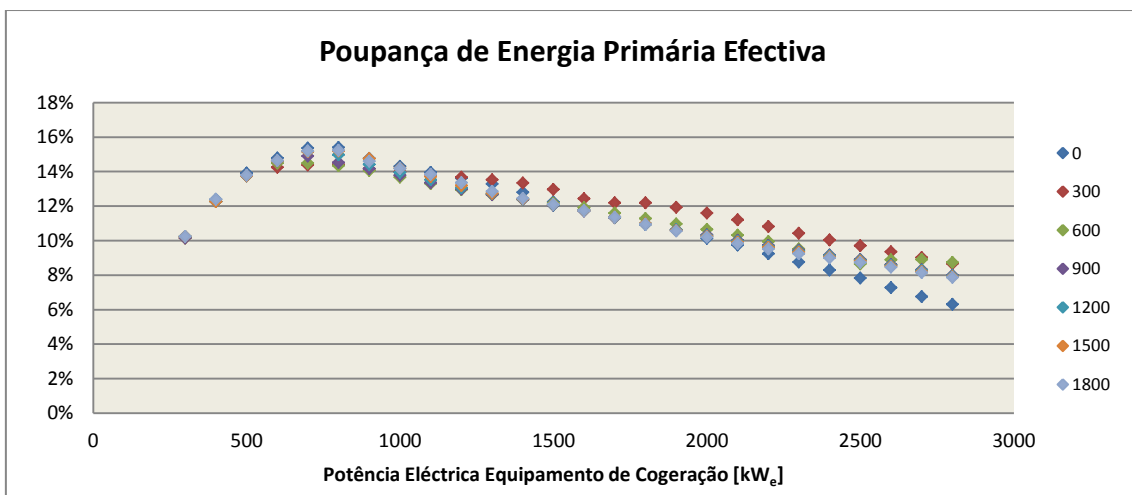


Figura 52 – Poupança de Energia Primária Efectiva para uma central com motor com controlo de carga

Por sua vez a análise energética deste cenário revelou que a poupança de energia primária se manteria próximo dos 20% para todas as soluções ensaiadas. Uma solução de cogeração com um motor de combustão interna de 800 kW_e conseguiria atingir uma poupança de energia primária efectiva de 15,4%.

4.1.3. Motor de Combustão Interna – Vapor

Nesta secção testou-se um motor de combustão interna à carga máxima com produção de vapor para o caso de estar ou não acoplado a um *chiller* de absorção de duplo efeito na totalidade do horário e sem accionar a caldeira de apoio ao *chiller* de absorção. As Figuras 53, 54, 55 e 56 apresentam os resultados obtidos para esse caso.

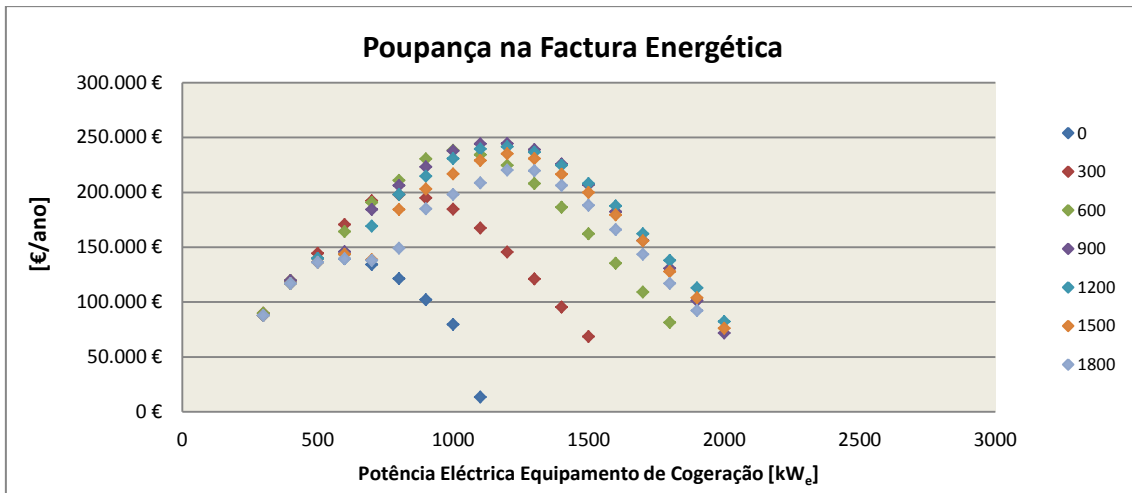


Figura 53 – Poupança na Factura Energética para uma central com motor com produção de vapor

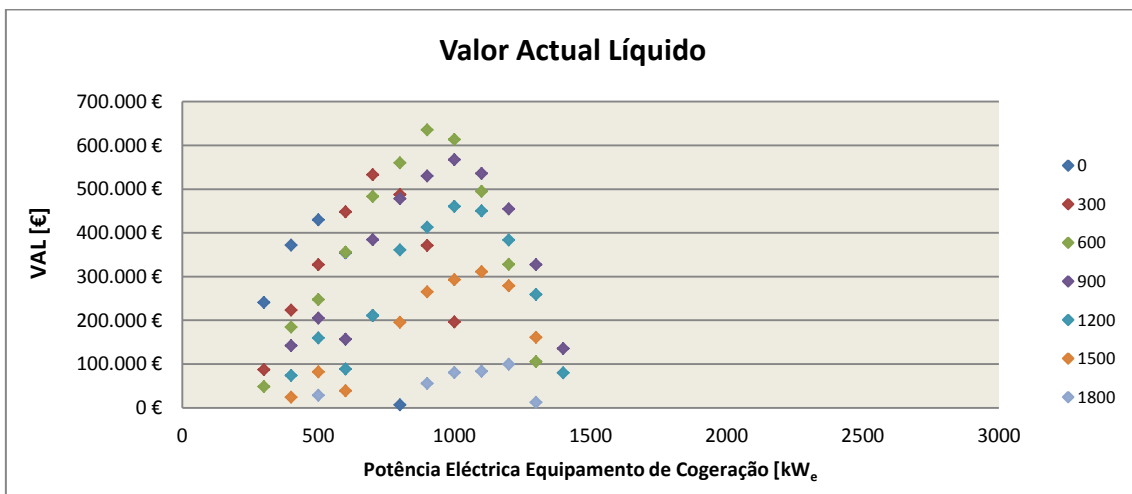


Figura 54 – Valor Actual Líquido para uma central com motor com produção de vapor

A análise económica realizada revelou que a PFE máxima era atingida para uma solução de trigerção com um motor de 1200 kW_e e um *chiller* de 600 kW_f e tomaria o valor de 244.320€/ano. Quanto ao VAL máximo seria de 635.176€ para uma solução de trigerção com um motor de 900 kW_e e um *chiller* de 600 kW_f.

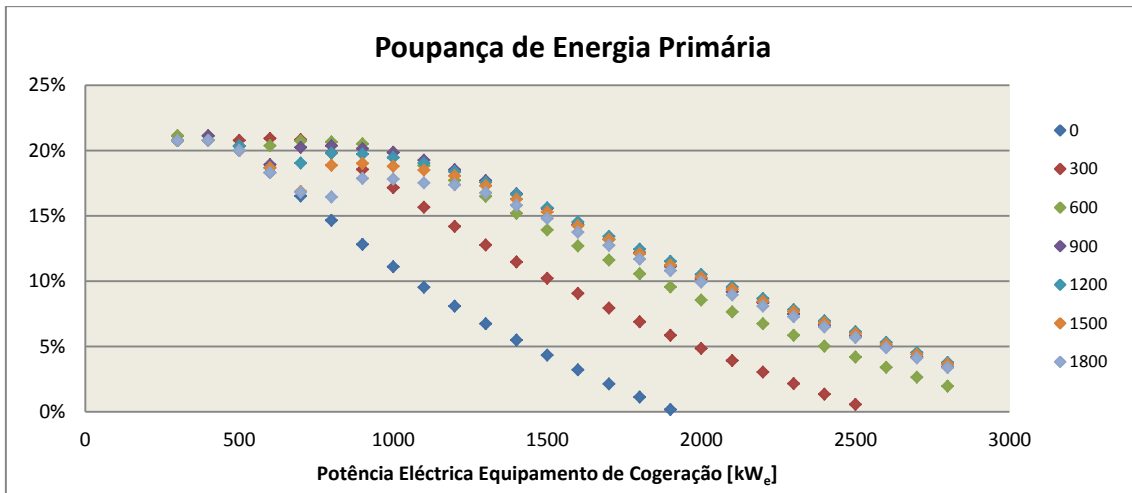


Figura 55 – Poupança de Energia Primária para uma central com motor com produção de vapor

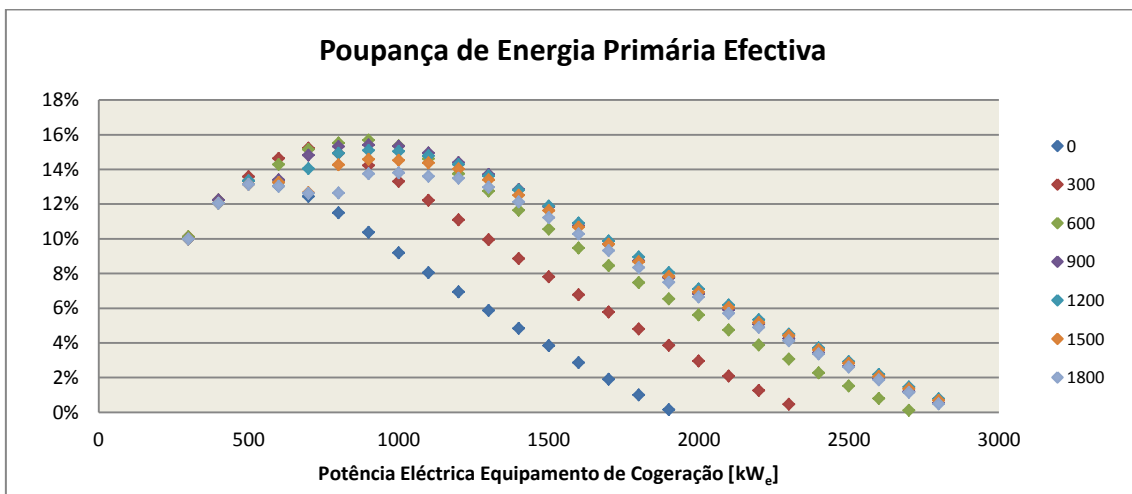


Figura 56 – Poupança de Energia Primária Efectiva para uma central com Motor de Combustão Interna com produção de vapor

No que diz respeito à análise energética, a poupança de energia máxima atingida é de 21,1% para motores de 400 kW_e e *chillers* entre 300 e 900 kW_f. Verifica-se também que a solução que permite uma maior poupança de energia primária efectiva corresponde também a um motor de combustão interna de 900 kW_e e um *chiller* de absorção de 600 kW_f permitindo atingir valores de 15,7%.

4.1.4. Turbina a Gás

A análise de uma central de cogeração/trigeração utilizando uma turbina a gás como equipamento principal e um *chiller* de absorção de duplo efeito foi realizada demonstrando-se que em nenhuma das opções permitidas pela aplicação seria possível atingir com esta tecnologia resultados economicamente viáveis nem energeticamente favoráveis..

4.1.5. Comparação entre Cenários Estudados

Na Tabela 4 encontram-se as soluções que apresentam a melhor viabilidade económica para cada cenário estudado, correspondente ao maior VAL. Importa referir que o cenário proposto pela turbina a gás não permite obter resultados economicamente viáveis pelo que não é considerado na tabela abaixo.

Tabela 4 – Comparação das melhores soluções económicas para cada cenário em horário total

Horário de Funcionamento	Total		
	I. Motor – Carga Máxima	II. Motor – Controlo de Carga	III. Motor – Produção de Vapor
<i>Solução [kW_e/kW_f]</i>	800/300	700	900/600
<i>Poupança na Factura Energética [€]</i>	188.004	173.855	230.354
<i>Investimento Inicial [€]</i>	1.196.305	930.950	1.325.958
<i>Período de Retorno do Investimento [anos]</i>	5,9	5,4	5,8
<i>VAL [€]</i>	489.972	549.174	635.176
<i>TIR [%]</i>	19,8	22,6	20,5
<i>PEP [%]</i>	21	21	21
<i>PEP_{Efectiva} [%]</i>	14,1	15,4	15,7
<i>Redução de GEE [ton CO_{2,eq}]</i>	1164	993	1383
<i>Necessidades térmicas totais satisfeitas [%]</i>	46	35	65
<i>REE [€]</i>	84	85	82

Da análise à Tabela 4 verifica-se que, em termos económicos, a solução proposta pelo cenário II apresenta o menor PRI e a maior TIR. Isto deve-se a esta solução ser apenas de cogeração e por isso ter um investimento inicial mais reduzido. Em termos energéticos e por ser um caso apenas de cogeração a satisfação das necessidades térmicas, a PEP Absoluta e a redução nas emissões de CO_{2,eq} serão reduzidas em comparação com os outros cenários. Ao invés, o REE apresenta-se como sendo o maior dos três cenários devido ao controlo de carga por parte do motor que se adapta às necessidades térmicas da instalação.

O cenário I por contemplar uma solução de trigerção permite um aumento dos parâmetros energéticos com excepção do REE. Contudo, e apesar de apresentar uma maior PFE que o cenário II, o aumento do investimento inicial faz com que a solução proposta por este cenário seja a menos atractiva em termos de TIR, PRI e VAL.

Finalmente, a solução proposta pelo cenário III é aquela que apresenta um maior VAL e por isso é considerada com a solução economicamente mais viável. Apesar de perder ligeiramente para o cenário II em termos de TIR e PRI, a PFE apresentada permite alcançar o maior VAL. Em termos

energéticos esta é também a solução mais vantajosa. Apresenta a maior $PEP_{Efectiva}$, a maior percentagem das necessidades satisfeitas e a maior redução em termos de emissões de CO_2eq . Apresenta uma ligeira diminuição no REE face às restantes soluções, mas com um valor muito acima dos 55% exigidos.

A Tabela 5 apresenta as soluções economicamente mais viáveis para os cenários testados em horário de pontas e cheias.

Tabela 5 – Comparação das melhores soluções económicas para cada cenário em pontas e cheias

Horário de Funcionamento	Pontas e Cheias		
	I. Motor – Carga Máxima	II. Motor – Controlo de Carga	III. Motor – Produção de Vapor
<i>Solução [kW_e/kW_f]</i>	1200/600	1300/600	1200/900
<i>Poupança na Factura Energética [€]</i>	186.317	198.373	218.512
<i>Investimento Inicial [€]</i>	1.477.904	1.559.477	1.625.545
<i>Período de Retorno do Investimento [anos]</i>	7,9	7,9	7,4
<i>VAL [€]</i>	108.320	129.830	234.768
<i>TIR [%]</i>	13,2	13,4	14,5
<i>PEP [%]</i>	21,1	21,4	20,1
<i>$PEP_{Efectiva}$ [%]</i>	9,9	10,1	12
<i>Redução de $CO_2 eq$ [ton]</i>	806	847	925
<i>Necessidades térmicas totais satisfeitas [%]</i>	36	38	45
<i>REE [€]</i>	83	84	81

Comparando os resultados presentes nas Tabelas 4 e 5 verifica-se que tanto em termos económicos como energéticos as soluções que funcionam na totalidade do horário são mais viáveis. Apenas a PEP nas soluções do cenário I e II se revelou ligeiramente superior neste horário. Quanto à dimensão dos equipamentos constata-se que esta aumenta nos horários de pontas e cheias relativamente ao horário total. Isto deve-se às maiores necessidades térmicas ocorrerem nesses períodos.

Segundo a análise realizada pela presente aplicação, das soluções propostas pelos vários cenários uma central de trigeração com um motor de combustão interna com produção de vapor de 900 kW_e e um *chiller* de absorção de efeito duplo de 600 kW_f é a solução que se apresenta mais viável para as instalações do Sporting Clube de Portugal funcionando na totalidade do horário e sem accionar a caldeira de apoio ao *chiller*. Apresenta-se nas Figuras 53, 54, 55 e 56 o funcionamento da central escolhida para os dias úteis do mês de Janeiro e de Julho de modo a que se possa ter uma percepção do funcionamento desta central na estação de Inverno e de Verão.

Na figura 57 a linha a laranja representa as necessidades caloríficas da instalação que podem ser satisfeitas pela potência calorífica fornecida pelo equipamento de cogeração (a verde) ou pela caldeira de apoio (a vermelho). A linha azul representa as necessidades totais que não são mais que a soma do calor útil e de absorção necessários para suprimir as necessidades de frio e de calor da instalação. Na Figura 58 a linha azul representa as necessidades frigoríficas da instalação que podem ser satisfeitas recorrendo ao *chiller* de absorção activado pelo equipamento de cogeração (a verde), pelo *chiller* de absorção activado pela caldeira de apoio (a laranja) ou pelo *chiller* de compressão de apoio (a vermelho).

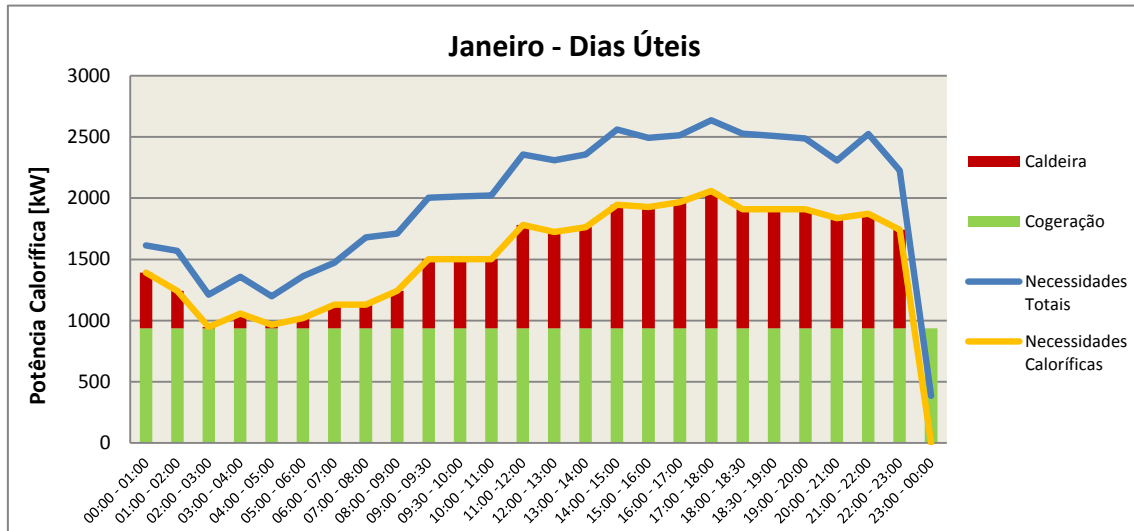


Figura 57 – Funcionamento da central proposta nos dias úteis do mês de Janeiro

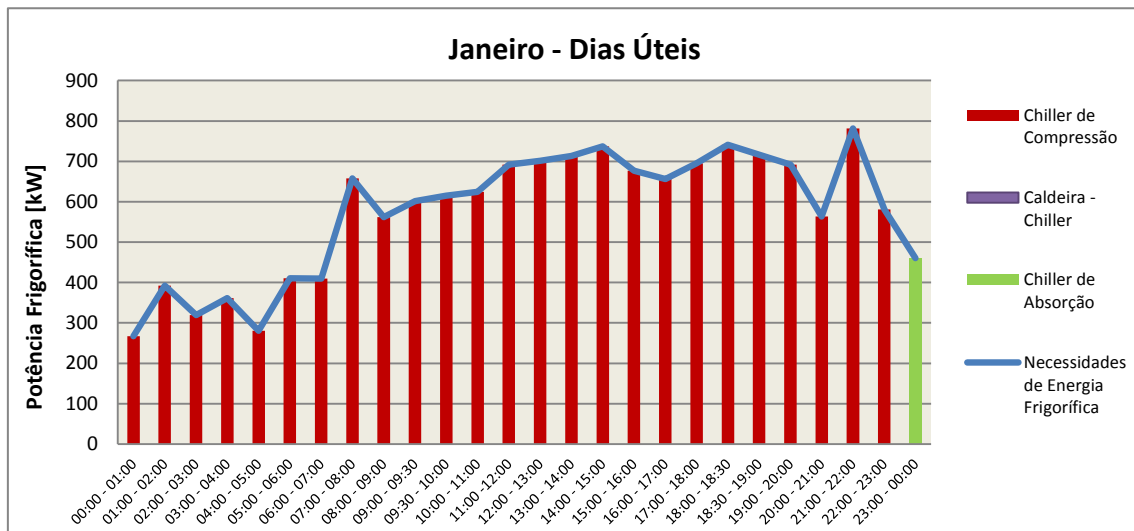


Figura 58 – Funcionamento da central proposta nos dias úteis do mês de Janeiro

Na Figura 57 verifica-se que para os dias úteis do mês de Janeiro as necessidades de energia térmica calorífica serão parcialmente satisfeitas pelo equipamento de cogeração, sendo a restante energia fornecida pela caldeira de apoio. Quanto às necessidades de energia térmica frigorífica, Figura

58, estas serão satisfeitas pelo *chiller* de compressão à excepção da última hora do dia, onde por não haver necessidades de energia calorífica é possível activar o *chiller* de absorção de duplo efeito e satisfazer as necessidades frigoríficas nesse período.

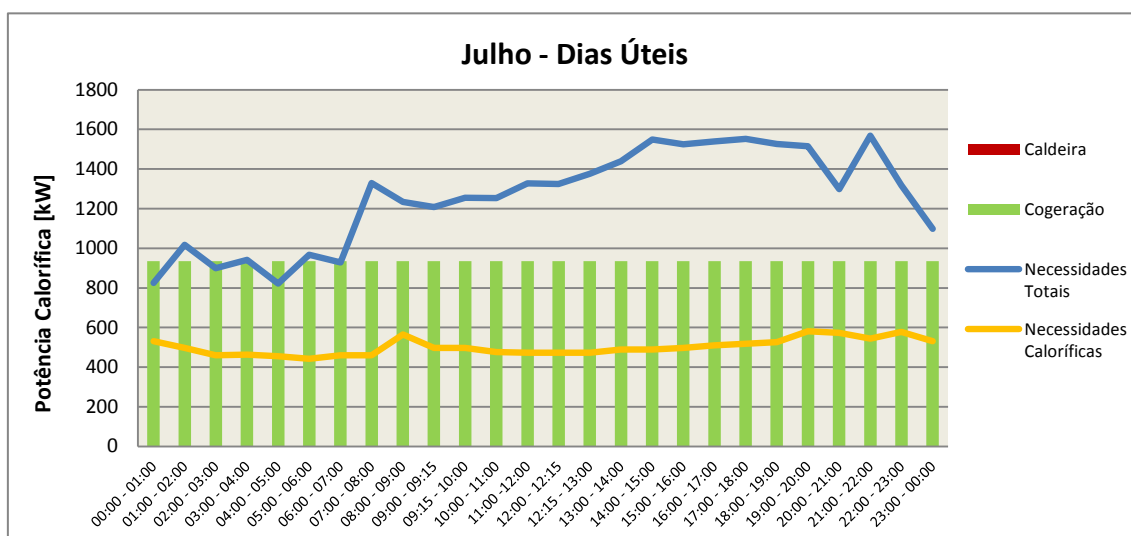


Figura 59 – Funcionamento da central para os dias úteis do mês de Julho

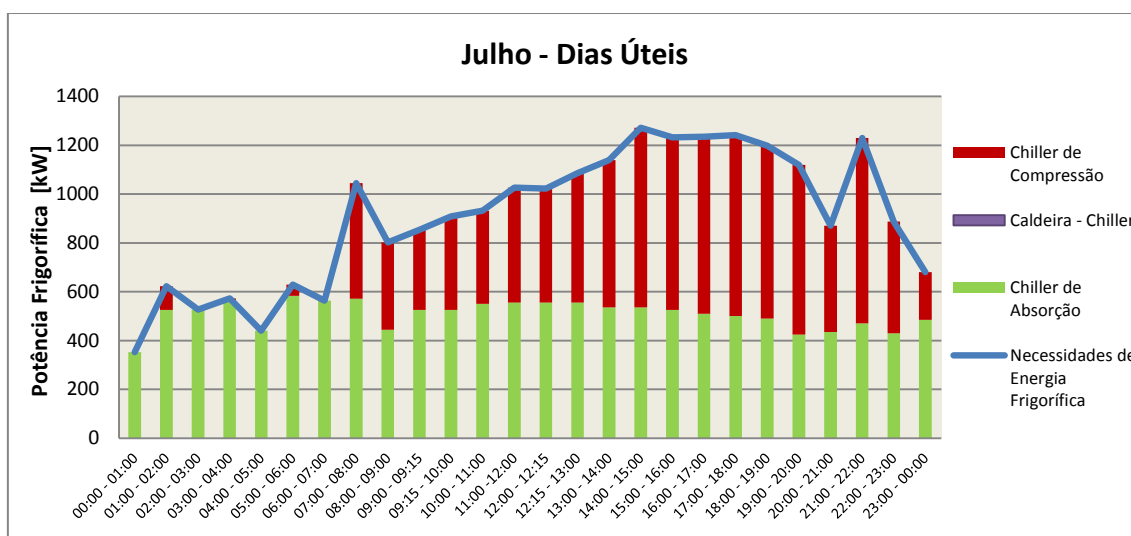


Figura 60 – Funcionamento da central para os dias úteis do mês de Julho

No caso dos dias úteis do mês de Julho é possível verificar na Figura 59 que as necessidades de energia calorífica são completamente satisfeitas pelo equipamento de cogeração. O excesso de energia térmica calorífica fornecida é aproveitado para activar o *chiller* de absorção de duplo efeito. Na Figura 60 verifica-se que o *chiller* de absorção apenas satisfaz parte das necessidades de energia térmica frigorífica sendo a restante satisfeita pelo *chiller* de compressão.

A aplicação desenvolvida não considera restrições para a entrada em funcionamento de equipamentos durante um curto espaço de tempo, nem consumos de arranque pelo que os resultados da análise são optimistas.

4.1.6. Discussão de Resultados

Para uma instalação com um perfil de necessidades térmicas semelhante às do Sporting Clube de Portugal podem ser retiradas diversas conclusões do estudo efectuado.

A primeira diz respeito à comparação entre motores de combustão interna e turbinas a gás natural. Os motores revelaram-se melhores que as turbinas tanto na análise económica como na análise energética. Este resultado deve-se à reduzida razão electricidade/calor apresentada pelas turbinas, cerca de 0,5, enquanto nos motores pode ascender até 0,8. Esta razão é especialmente importante pois aumenta o valor da remuneração da electricidade vendida para uma dada energia térmica fornecida.

Verificou-se que para os cenários dos motores de combustão interna o horário de funcionamento deveria ser total. Poder-se-ia pensar inicialmente que a central funcionando apenas nos períodos de ponta e cheias obteria melhores resultados económicos. Contudo, a máxima utilização dos equipamentos permite um retorno do investimento mais rápido prevalecendo assim em termos económicos. Verificou-se, no entanto, que para o horário de pontas e cheias a capacidade dos equipamentos que produzem as melhores soluções é maior uma vez que é nestes períodos que as necessidades térmicas têm o seu pico, permitindo a equipamentos de maior capacidade gerar uma PFE mais elevada.

Quanto à opção de accionar a caldeira de apoio ao *chiller* de absorção verificou-se que esta nunca deveria ser accionada, nem sequer no caso de se utilizar *chillers* de absorção de efeito duplo.

Um factor comum a todos os cenários que permitiram obter resultados económicos positivos foi o facto de o valor máximo da PFE ser obtido para unidades maiores, tanto de cogeração como de trigerção, do que aquelas que maximizam o valor do VAL. Este resultado permite confirmar a influência do investimento inicial no dimensionamento deste tipo de centrais.

Quando se compara centrais de cogeração e de trigerção verifica-se que o PRI tende a ser menor nas de cogeração uma vez que estas apresentam um menor investimento inicial. Contudo, centrais de trigerção permitem uma PFE tal que o VAL é maior nestas últimas, apesar do aumento do investimento inicial.

Em termos energéticos verificou-se que as centrais de trigerção eram aquelas que produziam uma maior $PEP_{Efectiva}$, uma maior redução de CO_2eq e permitiam uma maior satisfação das necessidades térmicas totais ao mesmo tempo que mantinham a viabilidade económica do investimento. Entre as melhores soluções de cada cenário a $PEP_{Efectiva}$ permite visualizar em qual é que ocorre a maior poupança energética uma vez que, ao invés da PEP, considera a poupança obtida face às necessidades totais do edifício.

As soluções que permitiram obter resultados economicamente e energeticamente mais favoráveis foram centrais de co/trigerção utilizando como equipamento principal motores de combustão interna a carga máxima, com controlo de carga ou com produção de vapor. Entre estas três

soluções aquela que permitiu obter melhores soluções económicas e energéticas foi o motor com produção de vapor. Isto leva a concluir que a produção de vapor, mesmo a carga máxima, e o consequente accionamento de um *chiller* de absorção de efeito duplo conduz a melhores do que as outras soluções de motores acoplados a *chillers* de absorção de efeito simples. Importa também salientar que de entre o motor a carga máxima e o motor com controlo de carga foi o último que permitiu a obtenção de melhores soluções para uma central de co/trigeração. Assim consegue provar-se que a adaptação do motor às necessidades térmicas da instalação permanece aquando da diminuição do rendimento eléctrico com a carga e consequentemente da razão electricidade/calor.

A solução de dimensionamento óptima para o caso das instalações do Sporting Clube de Portugal apresenta uma potência térmica de cogeração equivalente a 45% do pico das necessidades térmicas caloríficas e uma potência frigorífica de trigeração de 43% do pico das necessidades térmicas frigoríficas. Este resultado está próximo do valor apresentado em [6] para o equipamento de cogeração, cerca de 48%, mas apresenta-se longe do valor de 70% considerado pelos autores para o equipamento de trigeração.

Apresentou-se no Anexo VII uma análise feita ao isolamento dos circuitos de água quente e água fria do Complexo Alvalade XXI.

4.2. Edifício de Escritórios

No caso do edifício de escritórios os dados obtidos relativos às necessidades térmicas caloríficas e frigoríficas foram obtidos como resultado da simulação dinâmica das cargas térmicas aplicadas ao edifício.

Nas Figuras 61, 62 e 63 são apresentados os diagramas de carga das necessidades de energia térmica calorífica para os dias úteis dos vários meses do ano.

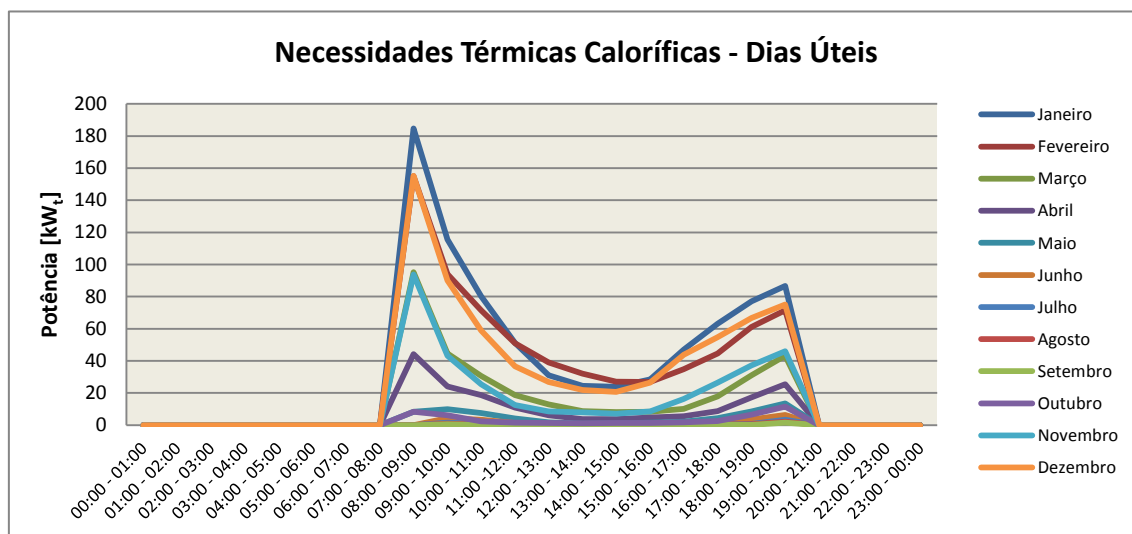


Figura 61 – Diagrama de carga da necessidade térmica calorífica nos dias úteis

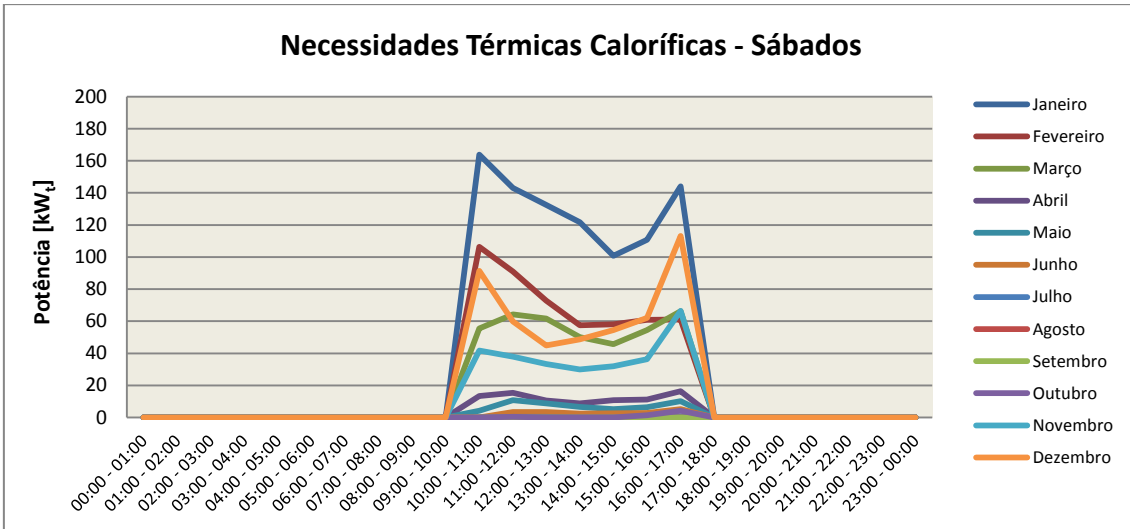


Figura 62 – Diagrama de carga da necessidade térmica calorífica nos sábados

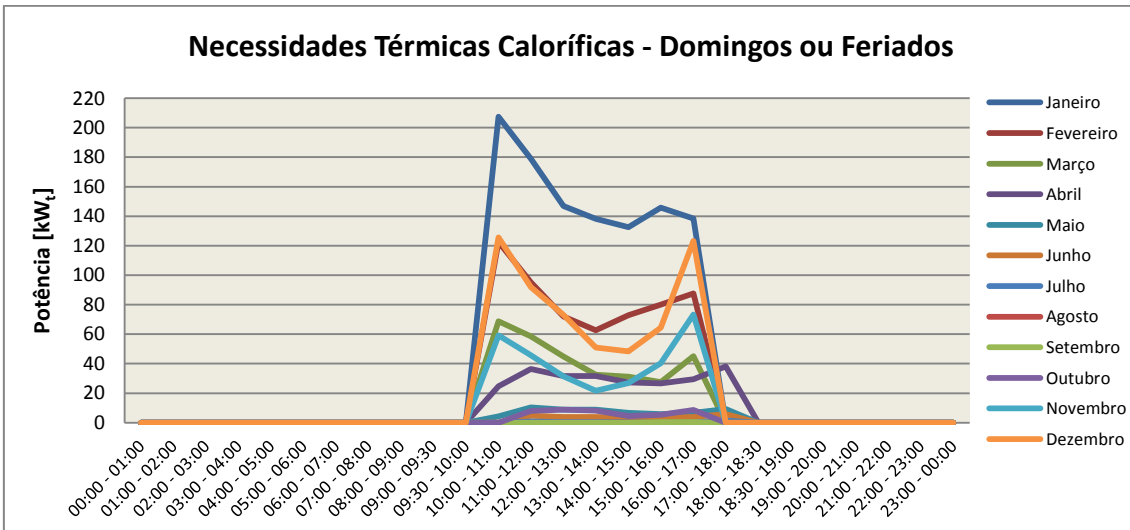


Figura 63 – Diagrama de carga da necessidade térmica calorífica nos domingos ou feriados

Como seria de esperar as necessidades de energia calorífica são maiores nos meses de Inverno do que de Verão, ultrapassando os 180 kW_t no mês de Janeiro. O horário deste tipo de necessidades corresponde ao horário laboral.

As Figuras 64, 65 e 66 apresentam as necessidades de energia térmica frigorífica nos dias úteis, sábados e domingos ou feriados nos vários meses do ano, respectivamente.

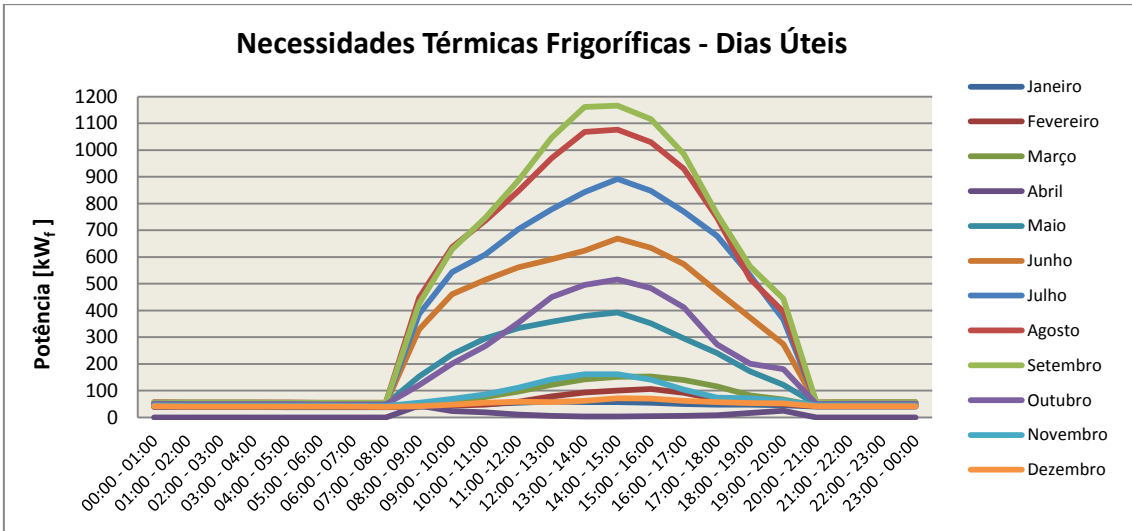


Figura 64 – Diagrama de carga da necessidade térmica frigorífica nos dias úteis.

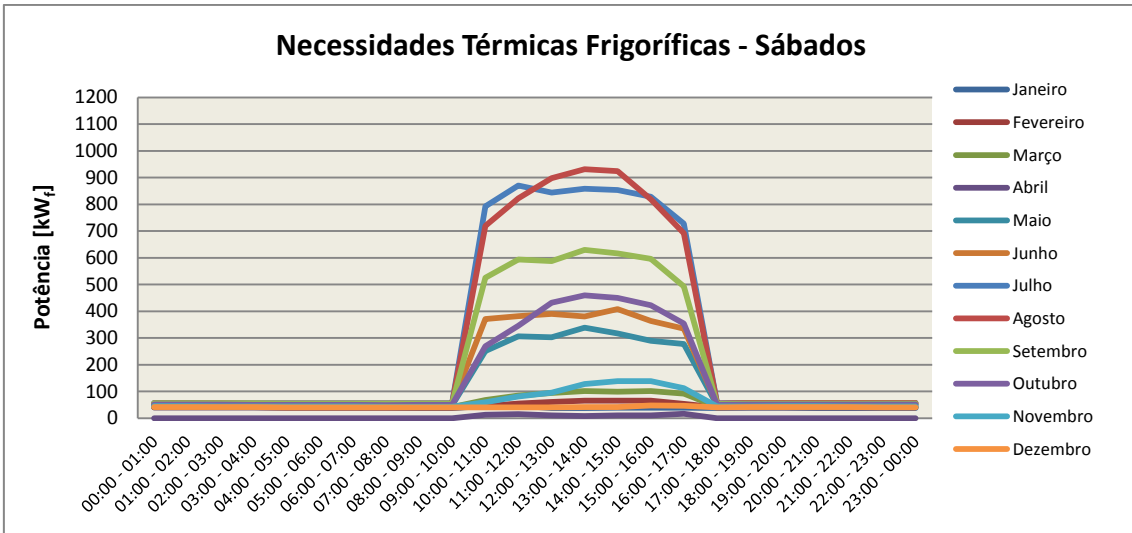


Figura 65 – Diagrama de carga da necessidade térmica frigorífica nos sábados

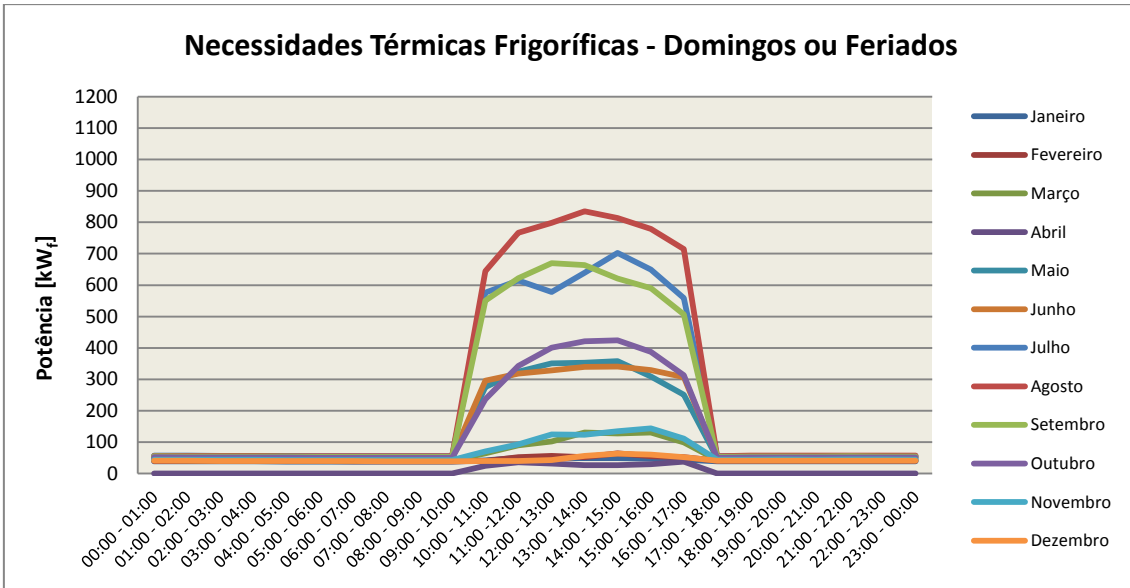


Figura 66 – Diagrama de carga da necessidade térmica frigorífica nos domingos ou feriados

As necessidades de energia frigorífica são superiores nos meses de Verão relativamente aos de Inverno, podendo chegar próximo dos 1200 kW_f no mês de Setembro. Ao contrário da energia calorífica, este tipo de necessidades encontra-se presente ao longo de todo o dia sendo, no entanto, muito reduzido fora do horário laboral. Ao comparar-se os diagramas de carga das necessidades caloríficas e frigoríficas pode verificar-se que, neste tipo de instalações, as necessidades de energia térmica frigorífica são muito superiores às caloríficas.

As Figuras 67 e 68 representam a potência calorífica e frigorífica necessárias em função do número de horas, respectivamente.

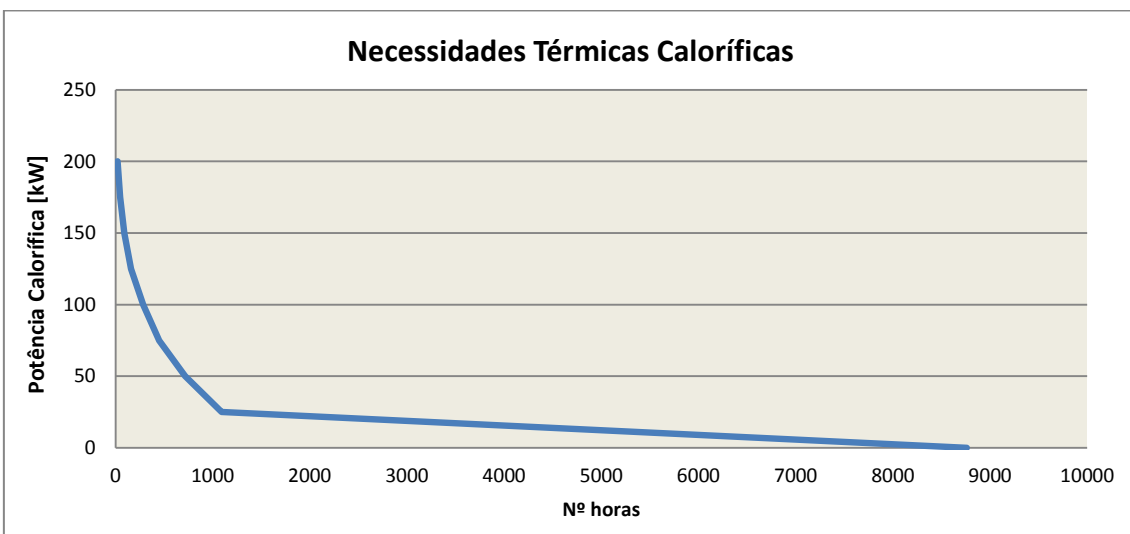


Figura 67 – Potência calorífica necessária em função do nº de horas

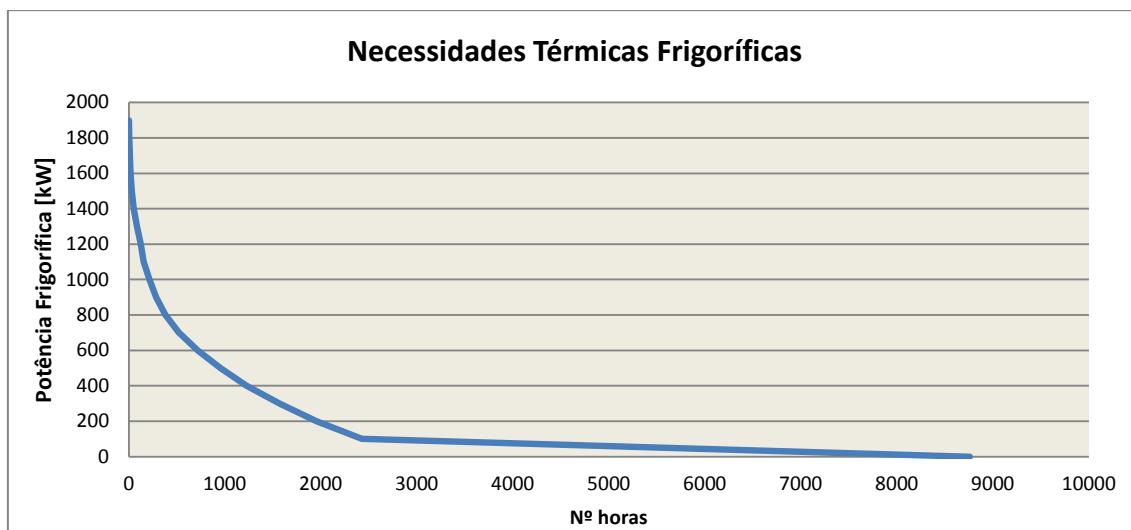


Figura 68 – Potência frigorífica necessária em função do nº de horas

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos para a central convencional do edifício de escritórios. Considerou-se que esta central seria composta por caldeiras a gás natural com eficiência de 90% e *chillers* de compressão com COP de 2,9.

Tabela 6 – Resultados para a central convencional do edifício de escritórios considerado

Factura Energética [€/ano]	79.789
Energia Primária [tep/ano]	114
Emissões de Dióxido de Carbono Equivalente [ton CO_{2,eq}/ano]	253
Consumo de Gás Natural [N.m³/ano]	10.254
Consumo Eléctrico – Chillers de Compressão [kWh_e/ano]	485.469

Neste caso de estudo foram testados equipamentos de cogeração com potências eléctricas a variar entre 50 e 2000 kW_e com um passo de 50 kW_e e *chillers* de absorção com potências frigoríficas entre 0 e 1200 kW_f com um passo de 100 kW_f tanto para o caso de efeito simples como de efeito duplo.

Ao contrário do caso de estudo anterior não é apresentado em anexo uma análise separada com um horário de funcionamento diferente. Neste caso de estudo são apresentados os diversos cenários ensaiados apresentando-se os cenários cujas opções relativas à caldeira de apoio ao *chiller* e ao horário de funcionamento permitiram obter os resultados economicamente mais viáveis.

4.2.1. Motor de Combustão Interna – Carga Máxima

Nesta secção foi testado simultaneamente uma central de cogeração a funcionar com um motor de combustão interna à carga máxima e uma central de trigeração funcionado com o mesmo motor acoplado a um *chiller* de absorção de efeito simples. Foram testadas as várias opções permitidas pela aplicação. Contudo, tanto para o caso da central de cogeração como para o caso da central de trigeração não se obteve resultados economicamente viáveis nem energeticamente favoráveis.

4.2.2. Motor de Combustão Interna – Controlo de Carga

Nesta secção testou-se uma central de cogeração a funcionar com um motor de combustão interna com controlo de carga e uma central de trigeração funcionado com o mesmo motor acoplado a um *chiller* de absorção de efeito simples. Foram testadas as várias opções permitidas pela aplicação, verificando-se que aquelas que apresentavam melhores resultados tanto ambientais como económicos correspondiam ao funcionamento do motor na totalidade do horário e sem accionar a caldeira de apoio ao *chiller* de absorção. As Figuras 69, 70 e 71 apresentam os resultados obtidos para esse caso.

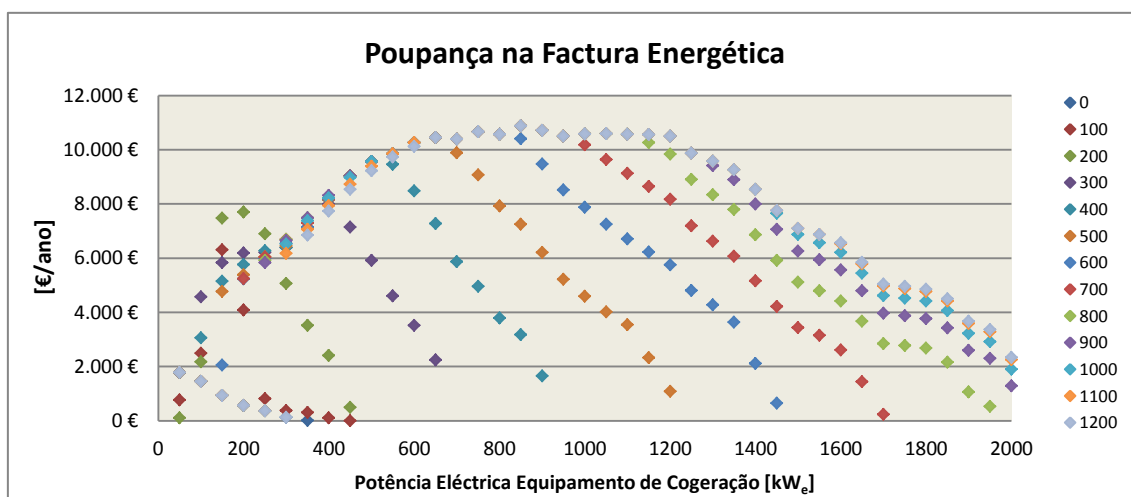


Figura 69 – Poupança na Fatura Energética para uma central com Motor de Combustão Interna com controlo de carga

A análise económica verificou que a PFE máxima era de 10.882€, atingida para um motor de 850 kW_e e para *chillers* com potências iguais ou superiores a 700 kW_f. Para este cenário o VAL das diversas soluções testadas foi sempre negativo demonstrando a inviabilidade económica do investimento.

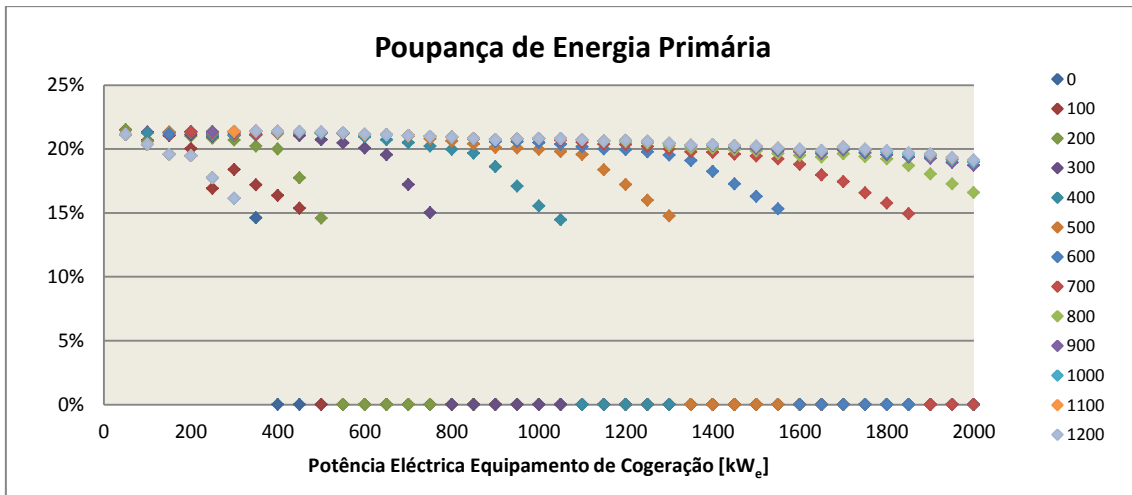


Figura 70 – Poupança de Energia Primária para uma central com Motor de Combustão Interna com controlo de carga

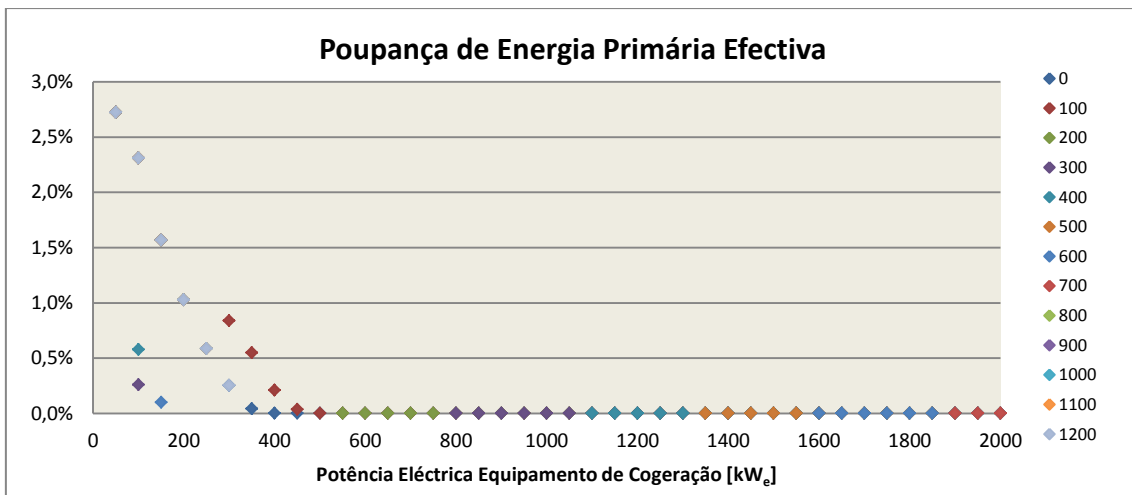


Figura 71 – Poupança de Energia Primária Efectiva para uma central com Motor de Combustão Interna com controlo de carga

O controlo de carga permite, para algumas soluções, manter a PEP próximo dos 20% ao longo da gama ensaiada. A PEP máxima ocorre para motores de 50 kW_e a funcionar em cogeração e tem o valor de 21,2%. Também para estes motores se verifica uma PEP_{Efectiva} máxima de 2,7%.

4.2.3. Motor de Combustão Interna – Produção de Vapor

Nesta secção testou-se um motor de combustão interna à carga máxima com produção de vapor para o caso de estar ou não acoplado a um *chiller* de absorção de duplo efeito. Foram testadas as várias opções permitidas pela aplicação, verificando-se que aquelas que apresentavam melhores resultados tanto ambientais como económicos correspondiam ao funcionamento do motor no horário de ponta e cheias e sem accionar a caldeira de apoio ao *chiller* de absorção. As Figuras 72 e 73

apresentam os resultados obtidos para esse caso. Denotar que nestas figuras a potência do equipamento de cogeração varia entre 0 e 200 kW_e.

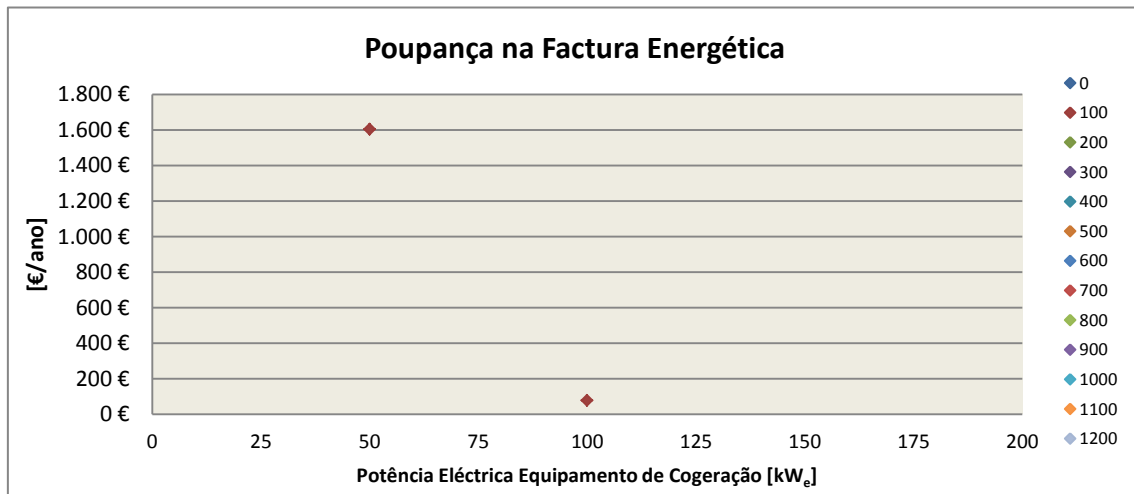


Figura 72 – Poupança na Fatura Energética para uma central com Motor de Combustão Interna com produção de vapor

A análise económica revelou que conseguiria obter-se uma PFE de 1.604€ para um motor de 50 kW_e e um *chiller* de 100 kW_f. Não é possível obter valores positivos do VAL demonstrando-se assim a inviabilidade económica deste cenário.

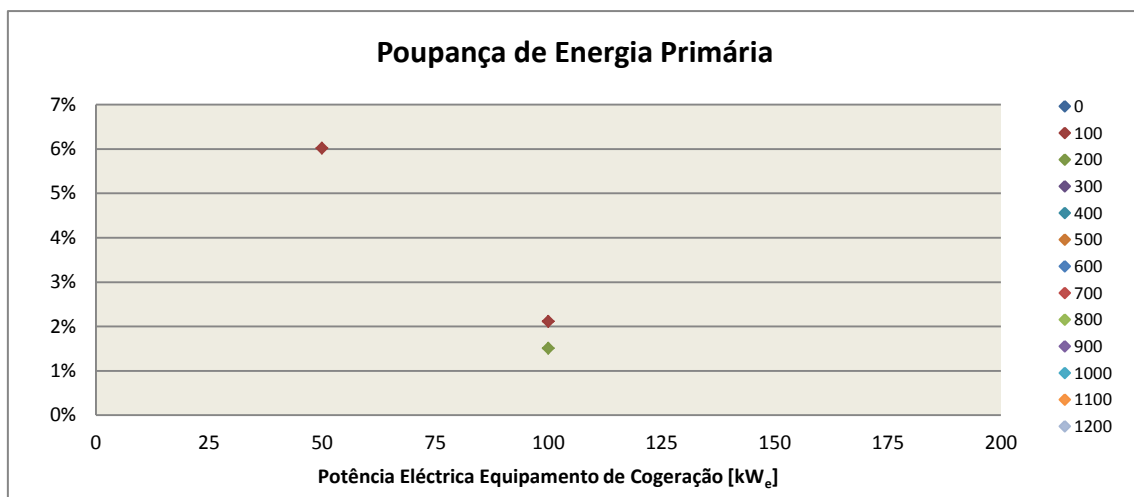


Figura 73 – Poupança de Energia Primária para uma central com Motor de Combustão Interna com produção de vapor

Em termos energéticos este cenário permite uma PEP de 6% para um motor de 50 kW_e e um *chiller* de 100 kW_f. Não é possível obter valores positivos quanto à PEP_{Efectiva}.

4.2.4. Turbina a Gás

A análise de uma central de cogeração/trigeração utilizando uma turbina a gás como equipamento principal e um *chiller* de absorção de duplo efeito foi realizada demonstrando-se que em nenhuma das opções permitidas pela aplicação seria possível atingir com esta tecnologia resultados economicamente viáveis nem energeticamente favoráveis.

4.2.5. Discussão de Resultados

A grande conclusão que se pode tirar quanto ao investimento numa central de co/trigeração para um edifício de escritórios simples é que se trata de um negócio altamente inviável economicamente e com benefícios energéticos muito reduzidos ou até negativos.

Ao nível da análise económica este tipo de edifícios apresenta uma factura energética muito inferior ao investimento inicial necessário. Deste modo, qualquer que fosse a poupança na factura energética seria demasiado pequena comparada com os custos do investimento que se pretende suplantar, originando assim grandes períodos de retorno do investimento e conduzindo à inviabilidade do negócio.

Em termos energéticos verifica-se uma grande disparidade entre as necessidades de energia térmica calorífica e frigorífica. Enquanto as primeiras ascendem apenas até 180kW_t nos meses de Inverno, as segundas podem atingir os 1200kW_f nos meses de Verão. Foi possível verificar que apenas em centrais onde a satisfação das necessidades caloríficas fosse prioritário seria possível atingir poupanças de energia primária efectiva positivas, mas muito reduzidas. Ao aumentar a potência dos equipamentos de cogeração e trigeração de modo a gerar energia térmica calorífica que possibilitasse a acção de um *chiller* de absorção e satisfizesse as necessidades de energia frigorífica verificou-se que a poupança de energia primária efectiva diminuía passando inclusivamente a ser negativa. Este resultado vem provar a inviabilidade energética de possuir um sistema de trigeração que vise apenas a satisfação das necessidades de energia frigorífica, quando as necessidades de energia calorífica são inexistentes ou muito reduzidas.

5. Conclusões

A presente dissertação teve como objectivo o estudo do dimensionamento de centrais de cogeração e de trigeração no sector terciário de modo a avaliar a viabilidade económica e energética do seu investimento.

Para esse efeito foi construída uma aplicação que, baseada nos diagramas de carga das necessidades de energia térmica calorífica e frigorífica, permite ensaiar uma gama de equipamentos de cogeração (Motores de Combustão Interna e Turbinas a Gás) e uma gama de equipamentos de trigeração (*Chillers* de Absorção de Brometo de Lítio – Efeito Simples e Duplo) de modo a produzir resultados económicos e energéticos que permitam avaliar qual o dimensionamento que se apresenta mais favorável para o caso em questão.

Sob a aplicação desenvolvida foram avaliados dois casos de estudo. O primeiro foi o caso das instalações do Sporting Clube de Portugal enquanto o segundo foi um edifício típico de escritórios.

Para o caso do Sporting Clube de Portugal verificou-se que o cenário ideal corresponde a uma central de trigeração com um motor de combustão interna com produção de vapor de 900 kW_e e por um *chiller* de absorção de efeito duplo de 600 kW_f funcionando na totalidade do horário da tarifa eléctrica e nunca activando a caldeira de apoio ao *chiller* de absorção. Esta solução permite um investimento economicamente viável apresentando um VAL de 635.176€ ao mesmo tempo que permite uma poupança de energia primária efectiva de 15,7%.

Neste estudo verificou-se que, não só no cenário proposto, mas em todos os cenários considerados os melhores resultados, tanto económicos como energéticos, foram obtidos na totalidade do horário de funcionamento da tarifa eléctrica e sem activar a caldeira de apoio ao *chiller* de absorção.

Concluiu-se também que a adaptação às necessidades térmicas da instalação prevalece em relação à degradação da razão electricidade/calor uma vez que os cenários com motores com controlo de carga se apresentaram mais favoráveis do que aqueles com motores a carga máxima.

Ao nível das turbinas a gás, tanto em cogeração como em trigeração, verificou-se que esta tecnologia se apresenta economicamente e energeticamente inviável como solução para a satisfação das necessidades térmicas no sector terciário.

Em relação às tecnologias de geração de energia frigorífica concluiu-se que embora mais caros, o aumento do COP nos *chillers* de absorção de duplo efeito prevalece em relação aos de efeito simples.

Comparando centrais de cogeração a centrais de trigeração, verificou-se que as primeiras permitiam obter períodos de retorno do investimento mais reduzidos devido ao seu menor investimento inicial. Contudo, centrais de trigeração permitem uma valorização económica maior, atingindo-se benefícios energéticos e ambientais superiores.

Em termos energéticos verificou-se que as centrais de trigeriação produzem os melhores resultados energéticos e ambientais ao mesmo tempo que mantinham a viabilidade económica do investimento. Comparando a PEP com a PEP_{Efectiva} verificou-se que a primeira não se revelou como um factor de decisão uma vez que as melhores de solução de cada cenário apresentam valores de PEP muito semelhantes. Por sua vez a PEP_{Efectiva}, por comparar a poupança obtida com as necessidades totais do edifício permite diferenciar as várias soluções consideradas.

Para o caso do edifício de escritórios considerado a análise efectuada concluiu que uma central quer de cogeração quer de trigeriação seria uma solução extremamente inviável para satisfação das suas necessidades térmicas. Ao nível económico este tipo de edifícios apresenta uma factura energética muito reduzida pelo que qualquer poupança na factura energética atingida seria muito diminuta quando comparada com os custos do investimento inicial necessários. Ao nível energético a disparidade apresentada entre as necessidades de energia térmica calorífica e frigorífica com elevada incidência das últimas não permite atingir valores consideráveis na poupança de energia primária efectiva.

A aplicação desenvolvida deve ser considerada para aplicação em indústrias, nomeadamente as que incluem uma zona com edifícios de serviços onde se pode utilizar a componente de frio de sistemas de trigeriação. A aplicação pode ainda ser melhorada incluindo uma análise da sequência de utilização dos equipamentos introduzindo outras restrições ao seu funcionamento.

Como trabalho futuro propõe-se a realização de uma análise de sensibilidade ao preço do gás natural e da electricidade uma vez que o sector energético está sujeito a fortes mudanças que fazem variar o preço dos combustíveis.

6. Referências Bibliográficas

- [1] DGEG, “Balço Energético 2011”, Maio 2012.
- [2] REN, “Dados Técnicos 2011”.
- [3] *Climate Change and Energy*, European Union, EUfocus July 2008.
- [4] Presidência do Conselho de Ministros, Resolução do Conselho de Ministros n.º 29/2010, Diário da República, 1.ª série — N.º 73 — 15 de Abril de 2010, pp 1289-1296.
- [5] Ministério da Economia, da Inovação e do Desenvolvimento, Decreto-Lei nº 23/2010, Diário da República, 1ª série – Nº 59 – 25 de Março de 2010, pp. 934-946.
- [6] P.Arcuri, G. Florio, P. Fragiaco, A mixed integer programming model for optimal design of trigeneration in a hospital complex, *Energy*, 32 (2007) 1430-1447.
- [7] K.C. Kavvadias, A.P. Tosios, Z.B. Maroulis, Design of a combined heating, cooling and power system: Sizing, operation strategy selection and parametric analysis, *Energy Conversion and Management*, 51 (2010) 833-845.
- [8] E. Cardona, A. Piacentino, A methodology for sizing a trigeneration plant in mediterranean areas, *Applied Thermal Engineering*, 23 (2003) 1665-1680
- [9] Kris R. Voorspools, William D. D’haeseleer, Reinventing hot water? Towards optimal sizing and management of cogeneration: A case study for Belgium, *Applied Thermal Engineering*, 26 (2006) 1972-1981.
- [10] Zhang Beihong, Long Weiding, An optimal sizing method for cogeneration plants, *Energy and Buildings*, 38 (2006) 189-195.
- [11] D.W. Wu, R.Z. Wang, Combined cooling, heating and power: A review, *Progress in Energy and Combustion Science*, 32 (2006) 459-965
- [12] Uğur Çakir, Kemal Çomaklı, Fikret Yüksel, The role of cogeneration systems in sustainability of energy, *Energy and Conversion Management*, 63 (2012) 196-202.
- [13] H.I. Onovwiona, V.I. Ugursal, Residential cogeneration systems: review of the current technology, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10 (2006) 389-431.
- [14] Wikipedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_cell>, consultado em Maio de 2012
- [15] Ana Tavares França, Luís Costa Caseiro, *Cogeração e Trigeriação*, 2008
- [16] GBU, Adsorption *Chiller* NAK, 1999
- [17] Portaria nº 140/2012, Diário da República, 1ª série – Nº 93 – 14 de Maio de 2012
- [18] Galp Energia Serviços Técnicos GN & Power, “Análise aos gases de combustão das caldeiras – Sporting Clube de Portugal”, Abril 2012
- [19] Efacec, “Memória Descritiva AVAC – Estádio José Alvalade”
- [20] Assembleia da República, Lei nº 19/2010, Diário da República, 1ª série – Nº 163 – 23 de Agosto de 2010

7. Anexos

I. Construção das necessidades térmicas utilizadas pela aplicação desenvolvida

As Tabelas A.1 e A.2 apresentam um exemplo do que seria o perfil horário das necessidades de energia calorífica de uma instalação para um dia útil, para um sábado e para um domingo ou feriado típicos nos meses de Janeiro e de Julho.

Tabela A. 1 – Necessidades de energia térmica calorífica no mês de Janeiro

Necessidades Caloríficas - Janeiro						
	Semana	Sábado	Dom e Fer			
	[kW]	[kW]	[kW]			
00:00 - 01:00	1391	1345	1113	11:00 - 12:00	1781	1530 1345
01:00 - 02:00	1243	1159	1159	12:00 - 13:00	1725	1577 1345
02:00 - 03:00	946	1020	1206	13:00 - 14:00	1762	1716 1391
03:00 - 04:00	1057	1020	1020	14:00 - 15:00	1947	1716 1577
04:00 - 05:00	964	1020	974	15:00 - 16:00	1929	1669 1484
05:00 - 06:00	1020	1020	1020	16:00 - 17:00	1966	1577 1437
06:00 - 07:00	1131	1020	1066	17:00 - 18:00	2059	1530 1577
07:00 - 08:00	1131	974	1020	18:00 - 18:30	1910	1437 1530
08:00 - 09:00	1243	1113	1020	18:30 - 19:00	1910	1437 1530
09:00 - 09:30	1502	1391	1113	19:00 - 20:00	1910	1391 1484
09:30 - 10:00	1502	1391	1113	20:00 - 21:00	1836	1252 1484
10:00 - 11:00	1502	1437	1066	21:00 - 22:00	1873	1206 1345
				22:00 - 23:00	1743	1252 1252
				23:00 - 00:00	0	0 0

Tabela A. 2 – Necessidades de energia térmica calorífica no mês de Julho

Necessidades Caloríficas - Julho						
	Semana	Sábado	Dom e Fer			
	[kW]	[kW]	[kW]			
00:00 - 01:00	531	626	519	11:00 - 12:00	472	510 482
01:00 - 02:00	497	533	519	12:00 - 12:15	472	464 482
02:00 - 03:00	459	510	519	12:15 - 13:00	472	464 482
03:00 - 04:00	464	533	445	13:00 - 14:00	489	533 464
04:00 - 05:00	455	510	482	14:00 - 15:00	489	487 519
05:00 - 06:00	443	510	464	15:00 - 16:00	497	510 464
06:00 - 07:00	459	487	501	16:00 - 17:00	510	510 445
07:00 - 08:00	459	487	482	17:00 - 18:00	518	464 482
08:00 - 09:00	565	510	445	18:00 - 19:00	527	533 482
09:00 - 09:15	497	487	482	19:00 - 20:00	582	533 519
09:15 - 10:00	497	487	482	20:00 - 21:00	573	533 519
10:00 - 11:00	476	487	464	21:00 - 22:00	544	533 519
				22:00 - 23:00	578	487 519
				23:00 - 00:00	531	533 519

A partir das tabelas acima pode verificar-se que há uma divisão às 9h e às 18h no mês de Janeiro e uma divisão às 9h e às 12h no mês de Julho. Esta divisão juntamente com a separação dos perfis em dias úteis, sábados e domingos ou feriados foi feita de modo a que se possa explicitar claramente as necessidades térmicas de acordo com o seu horário de funcionamento se em ponta, cheias, vazio ou super vazio. Para as necessidades de energia térmica frigorífica foi feita uma análise equivalente. De referir que o perfis construídos para os dias típicos se consideram constantes ao longo do mês.

II. Dados de Motores de Combustão Interna

Tabela A. 3 – Dados utilizados para definição do rendimento eléctrico, térmico e do preço dos motores de combustão interna

Modelo	η_e	η_t	P_e [kW _e]	Preço [€]
CG132-8	0,423	0,452	400	640.000 €
CG132-12	0,420	0,459	600	870.000 €
CG132-16	0,424	0,453	800	1.020.000 €
CG170-12	0,437	0,433	1200	1.170.000 €
CG170-16	0,433	0,438	1560	1.320.000 €
CG170-20	0,437	0,432	2000	1.638.000 €
CG260-12	0,441	0,424	3333	1.950.000 €
CG260-16	0,441	0,427	4300	2.999.700 €

Tabela A. 4 – Dados utilizados para expressar as variações de parâmetros com a carga

Modelo	100%				75%				50%			
	P_e [kW _e]	P_t [kW _t]	η_e	η_t	P_e [kW _e]	P_t [kW _t]	η_e	η_t	P_e [kW _e]	P_t [kW _t]	η_e	η_t
G 3306	119	209	0,318	0,558	89	176	0,298	0,59	59	137	0,27	0,627
G 3412	330	546	0,338	0,559	248	465	0,316	0,593	165	382	0,277	0,642
G 3412	397	510	0,358	0,46	297	420	0,343	0,485	197	405	0,279	0,573
G 3508	514	566	0,374	0,412	385	466	0,36	0,436	255	362	0,333	0,473
G 3512	786	932	0,371	0,44	588	779	0,354	0,469	389	612	0,325	0,511
G 3512 E	1000	1027	0,408	0,419	750	816	0,397	0,432	500	619	0,373	0,462
G 3516	1049	1198	0,373	0,426	786	1021	0,355	0,461	522	780	0,334	0,499
G 3516 B	1152	1458	0,384	0,486	864	1157	0,368	0,493	604	877	0,345	0,501
G 3512 E+	1200	1212	0,413	0,417	907	941	0,402	0,417	603	692	0,379	0,435
G3516 C	1581	1777	0,404	0,454	1217	1414	0,395	0,459	811	999	0,383	0,472
G 3516 E	1616	1647	0,419	0,427	1210	1330	0,404	0,444	830	1008	0,376	0,457
G3520 C	1873	2192	0,394	0,461	1405	1723	0,38	0,466	982	1295	0,361	0,476
G 3520 E	2018	2089	0,424	0,439	1513	1653	0,412	0,45	1003	1232	0,386	0,474
G 3520 E+	2043	2153	0,427	0,45	1531	1694	0,414	0,458	1022	1251	0,392	0,48

Tabela A. 5 – Dados utilizados para definição da quantidade de vapor produzida em motores

P_e [kW _e]	514	786	1000	1049	1200	1581	1873	2018	2043
Parcial do η_t - Calor	48%	49%	48%	48%	50%	47%	43%	49%	49%
Parcial do η_t - Vapor	52%	51%	52%	52%	50%	53%	57%	51%	51%

III. Dados de Turbinas a Gás

Tabela A. 6 – Dados para definição do rendimento térmico e eléctrico de turbinas a gás

P_e [kW _e]	η_e	η_t	P_t
611	0,19	0,52	1670
1446	0,24	0,55	3368
1631	0,26	0,54	3368
2875	0,24	0,55	6668
5534	0,29	0,51	9766
6639	0,30	0,50	11046
7332	0,33	0,49	10911
18070	0,34	0,50	26739

Tabela A. 7 – Dados utilizados para definição do preço de turbinas a gás

P_e [kW _e]	Preço [€]				
		21800	7.387.250	106200	18.118.414
1080	622.083	22216	7.387.252	106800	17.185.166
1086	699.845	24630	7.853.829	109200	19.051.409
1575	855.362	25250	8.631.337	109350	17.884.592
3725	1.399.685	25600	8.553.705	119355	18.507.450
3740	1.632.978	26785	5.832.090	121300	19.440.070
3830	1.321.916	27240	8.942.388	125940	19.051.608
3880	1.321.915	28337	5.987.568	126200	22.395.103
3880	1.477.447	29810	4.432.325	133750	20.606.444
3945	1.555.207	33350	10.575.529	138520	21.384.429
4200	1.555.208	33700	10.731.065	139000	25.660.956
4370	1.477.441	39325	8.164.983	148000	24.105.816
4550	1.632.976	40410	9.797.697	148800	23.484.019
4610	2.021.768	41020	9.409.082	151300	23.639.743
5590	2.177.275	42300	8.553.744	152700	26.826.991
6215	2.255.040	46300	11.430.628	154000	23.483.204
8840	3.343.733	47660	10.109.034	161650	26.438.448
9980	4.043.530	48500	12.130.657	163530	26.827.313
10000	3.576.983	49200	10.886.361	164300	27.993.603
11630	4.432.332	51500	11.897.461	173680	25.039.092
12650	4.587.838	52600	12.441.577	200360	31.881.545
12835	4.510.115	60650	14.385.746	214000	32.659.129
13430	5.365.525	71750	14.385.708	217870	31.026.992
14610	3.732.480	81600	15.941.188	219000	34.992.317
14845	4.821.162	83880	15.941.114	228195	34.992.266
16360	6.220.871	84920	15.007.596	235720	36.547.598
19700	8.009.291	100500	17.496.065		
20260	4.432.308	103200	18.273.462		

IV. Dados de *chillers* de absorção de efeito simples e duplo

Tabela A. 8 – Dados utilizados para definição do preço de chillers de absorção de efeito simples

P_f [kW_f]	Preço [€]
264	84.000
316	86.000
387	93.000
475	96.000
545	100.000
633	108.000
738	114.000
844	121.000
949	129.000
1055	135.000
1178	145.000
1319	155.000
1477	177.000
1653	191.000
1846	197.000

Tabela A. 9– Dados utilizados para definição do preço de chillers de absorção de efeito duplo

P_f [kW_f]	Preço [€]
300	171157
600	209620
900	251431
1200	296590
1500	345097
1800	396952

V. Resultados obtidos na análise às Instalações do Sporting Clube de Portugal no horário de Pontas e Cheias sem activar a caldeira de apoio ao *chiller* de absorção

Motor de Combustão Interna – Carga Máxima

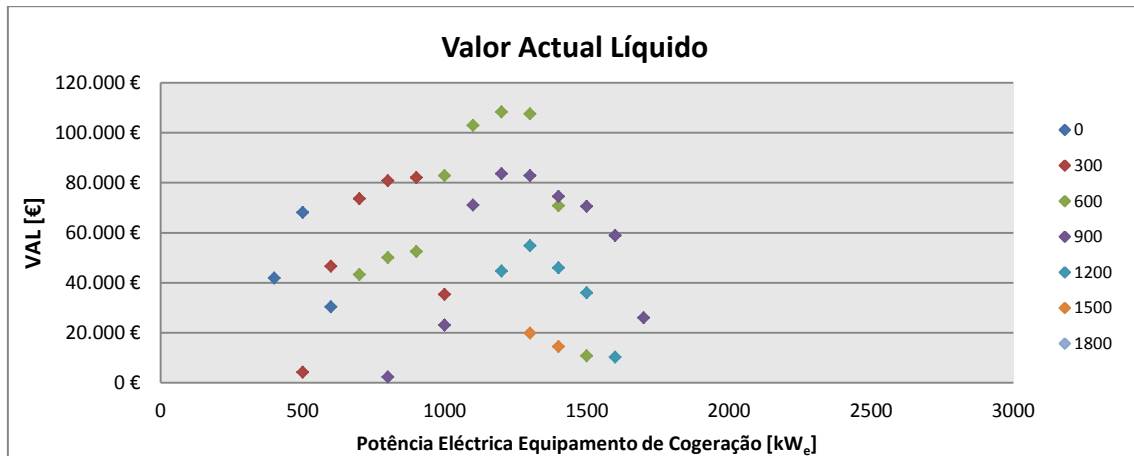


Figura A. 1 – Valor actual líquido para uma central com motor à carga máxima

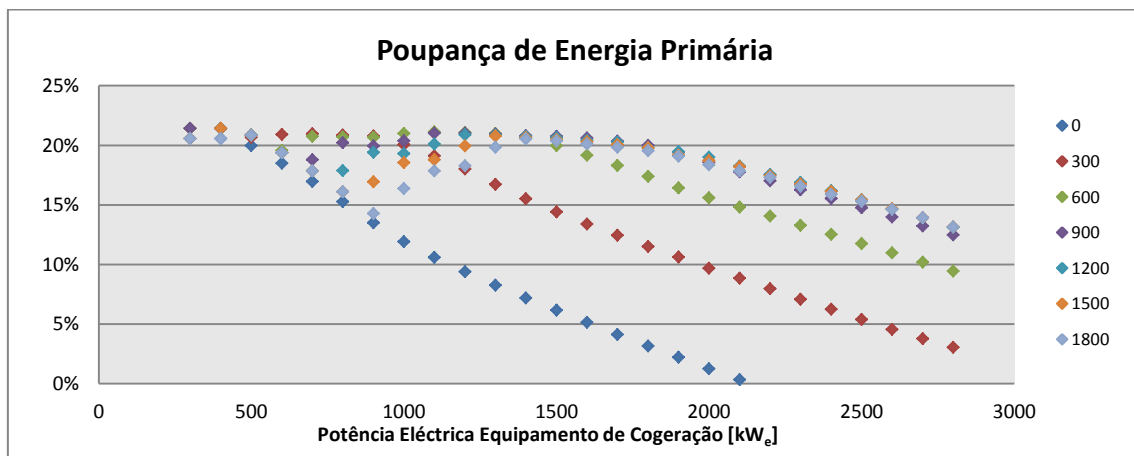


Figura A. 2 – Poupança de energia primária para uma central com motor à carga máxima

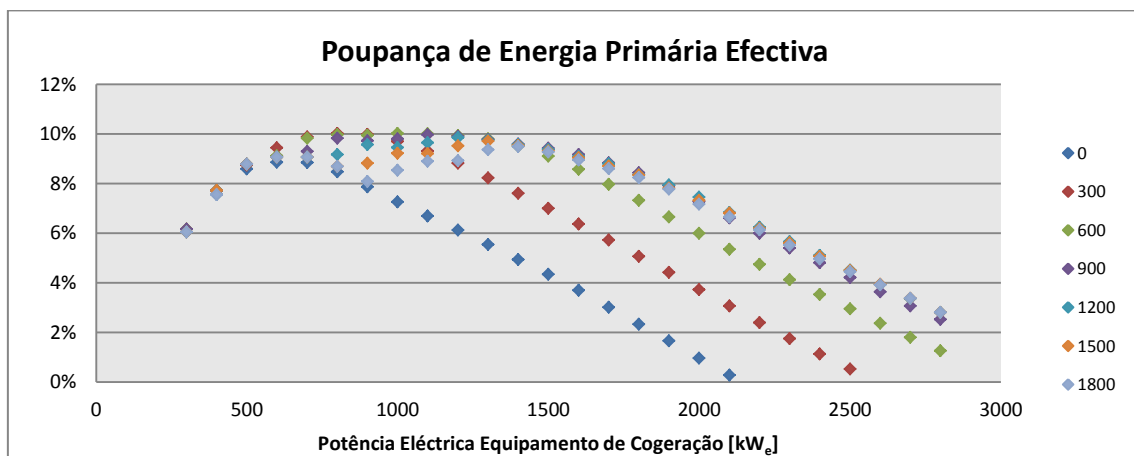


Figura A. 3 – Poupança de energia primária efectiva para uma central com motor à carga máxima

Motor de Combustão Interna – Controlo de Carga

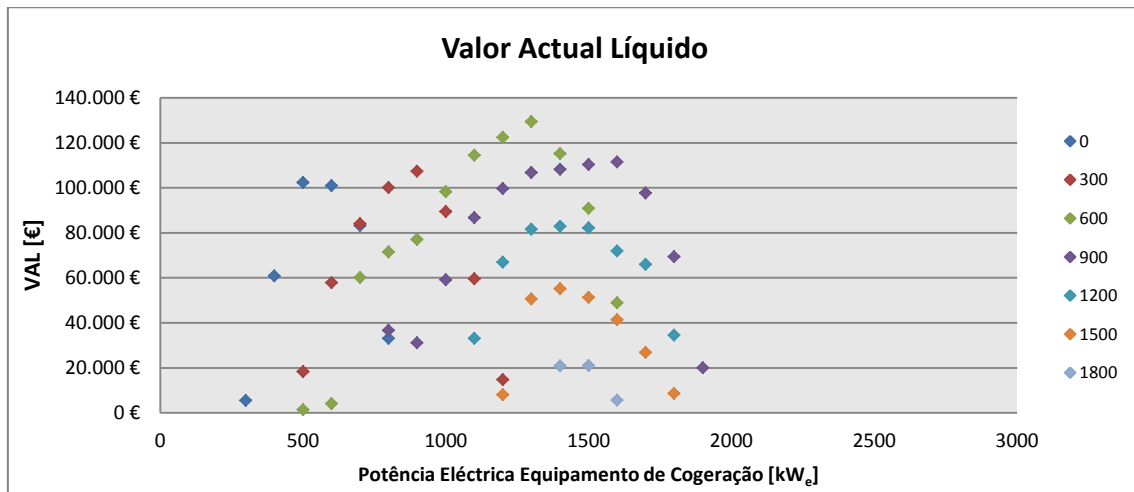


Figura A. 4 – Valor actual líquido para uma central com motor com controlo de carga

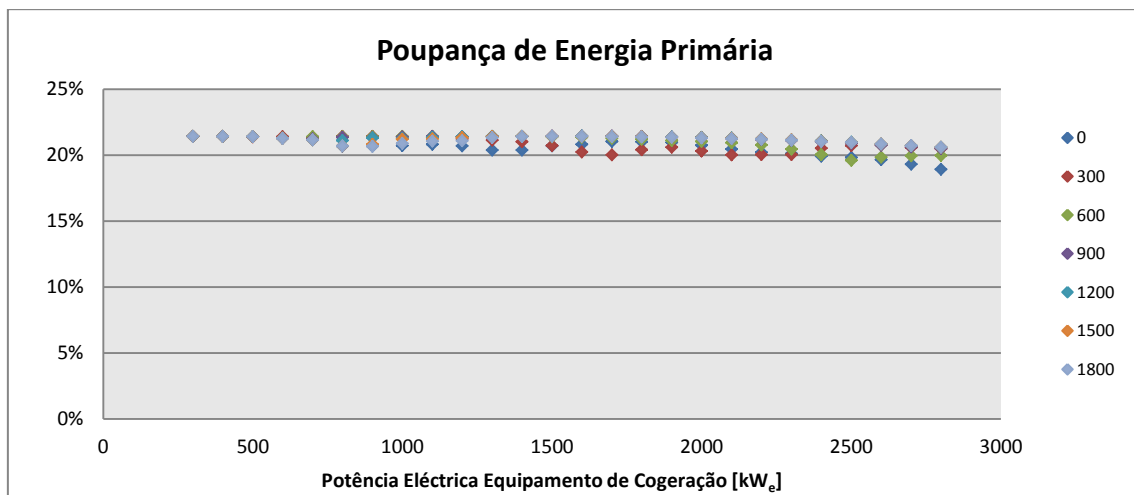


Figura A. 5 – Poupança de energia primária para uma central com motor com controlo de carga

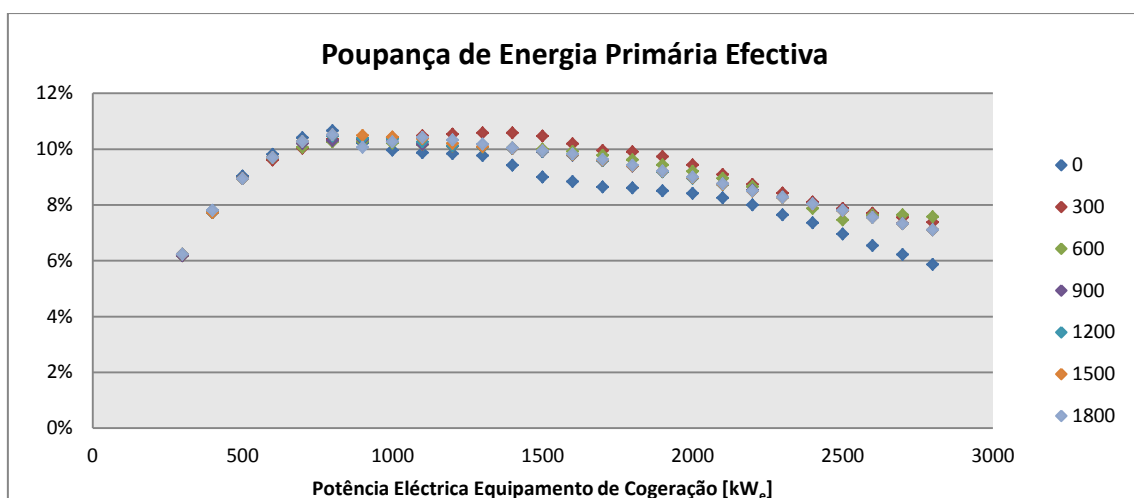


Figura A. 6 – Poupança de energia primária efectiva para uma central com motor com controlo de carga

Motor de Combustão Interna – Produção de Vapor

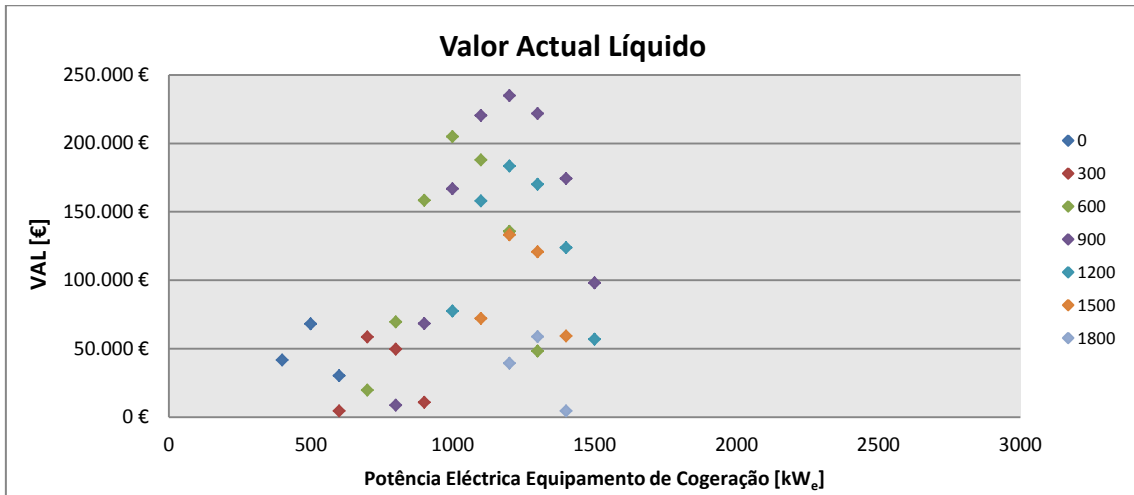


Figura A. 7 – Valor actual líquido para uma central com motor com produção de vapor

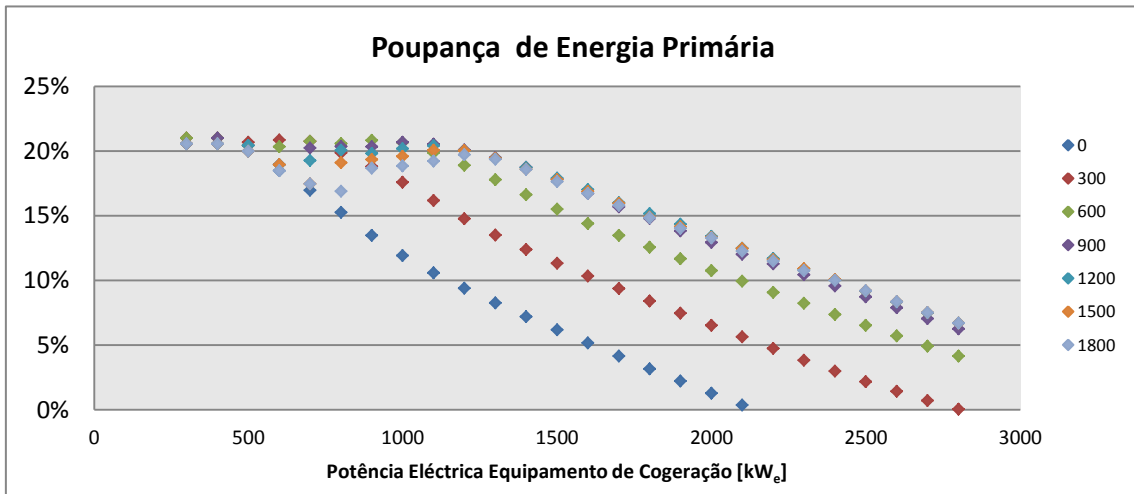


Figura A. 8 – Poupança de energia primária para uma central com motor com produção de vapor

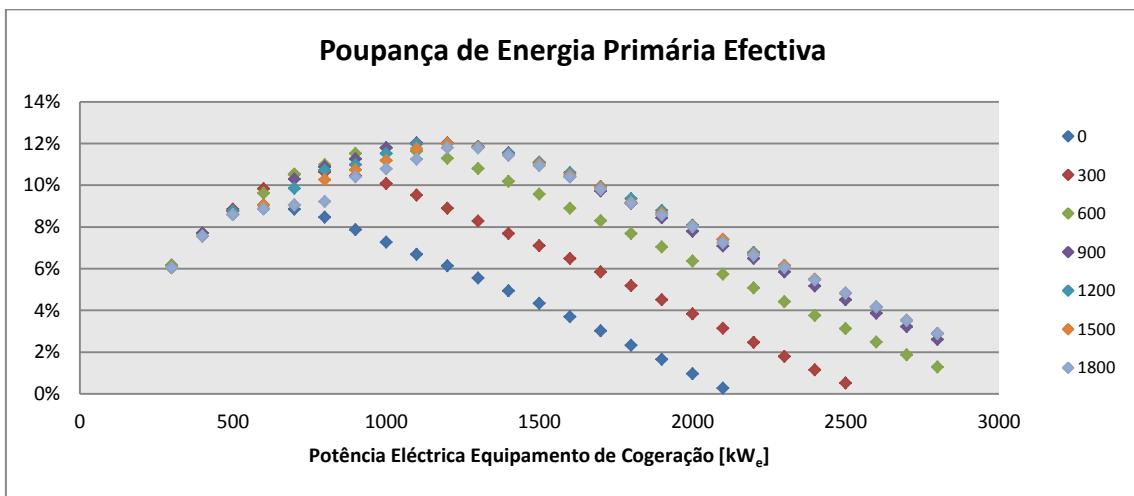


Figura A. 9 – Poupança de energia primária efectiva para uma central com motor com produção de vapor

VI. Dados de referência da aplicação desenvolvida

Tabela A. 10 – Dados de referência relativos ao gás natural

Poder Calorífico Inferior	kWh/N.m ³	10,42
Poder Calorífico Superior	kWh/N.m ³	11,98
Densidade	kg/ N.m ³	0,832
Consumo Máximo Diário 2010/2011	N.m ³	4240
Termo Fixo	€/dia	3,4281
Termo de Capacidade de Entrada	€/kWh	0,008721
Temp de Capacidade	€/kWh	0,0458016
Termo de Energia	€/kWh	0,039563
Taxa de Ocupação do Subsolo	€	342,77

Tabela A. 11 – Dados de referência relativos à electricidade

Energia Activa Pontas	€/kWh	0,0702
Energia Activa Cheias	€/kWh	0,0675
Energia Activa Vazio	€/kWh	0,0564
Energia Activa Super vazio	€/kWh	0,0558
Redes de Energia Activa Pontas	€/kWh	0,0281
Redes de Energia Activa Cheias	€/kWh	0,0264
Rede de Energia Activa Vazio	€/kWh	0,0235
Redes de Energia Activa Super vazio	€/kWh	0,0228
Penalização em Horas de Ponta	€/kW	7,553
Potência Contratada	€/kW	0,877

Tabela A. 12 – Dados de referência relativos a conversões

tep/kwh eléctrico	0,000215
tep/ton gás natural	1,077
kg CO ₂ /(kWh) _e	0,47
kg CO ₂ /tep gás natural	2684

Tabela A. 13 – Dados de referência relativos a equipamentos

COP do Chiller de Absorção de Efeito Simples	-	0,7
COP do Chiller de Absorção de Duplo Efeito	-	1,2
Tempo de Vida	anos	20

VII. Análise do Isolamento

No caso das instalações do Sporting Clube de Portugal, 16 circuitos de água quente e 13 circuitos de água fria são responsáveis pela condução de energia térmica às diversas fracções do Complexo Alvalade XXI. Esses circuitos apresentam os diâmetros especificados na Tabela A.14.

Tabela A. 14 – Espessura da tubagem presente no Complexo Alvalade XXI

Diâmetro da Tubagem	Até DN 50	DN 65 a DN 250
Espessura do isolamento (mm)	13	19

De modo a diminuir as perdas térmicas na tubagem foi proposto que o isolamento fosse alterado para as espessuras presentes na Tabela A.15.

Tabela A. 15 – Espessuras propostas para o isolamento da tubagem

Diâmetro da Tubagem	Até DN 25	DN 32 a DN 80	DN 90 a DN 250
Espessura do isolamento (mm)	19	32	40

Foram avaliadas as perdas térmicas nos diversos circuitos na situação actual e comparou-se com as perdas térmicas que ocorreriam com o isolamento proposto. Após esta análise concluiu-se que apenas seria economicamente viável a substituição do isolamento no circuito de água quente. A Tabela A.16 apresenta os resultados obtidos para a totalidade do circuito de água quente.

Tabela A. 16 – Resultados obtidos para a totalidade do circuito de água quente

Investimento Inicial (€)	201.817
Poupança na Factura Energética (€/ano)	37.980
Período de Retorno do Investimento (anos)	5,3
Poupança de Energia Primária (tep)	71,6
Redução de emissões de CO₂eq (kg CO₂eq)	192.266