

João Baptista dos Santos

Análise e Controlo de Sistemas de Aquecimento Residenciais

**Tese de Mestrado**

Engenharia Eletrotécnica - Energia e Automação Industrial

Professor Doutor Paulo Moisés Almeida da Costa





Posso ter defeitos, viver ansioso e ficar irritado algumas vezes,  
Mas não esqueço de que minha vida  
É a maior empresa do mundo...  
E que posso evitar que ela vá à falência.  
Ser feliz é reconhecer que vale a pena viver  
Apesar de todos os desafios, incompreensões e períodos de crise.  
Ser feliz é deixar de ser vítima dos problemas e  
Se tornar um autor da própria história...  
É atravessar desertos fora de si, mas ser capaz de encontrar  
Um oásis no recôndito da sua alma...  
É agradecer a Deus a cada manhã pelo milagre da vida.  
Ser feliz é não ter medo dos próprios sentimentos.  
É saber falar de si mesmo.  
É ter coragem para ouvir um “Não”!!!  
É ter segurança para receber uma crítica,  
Mesmo que injusta...  
  
Pedras no caminho?  
Guardo todas, um dia vou construir um castelo...

“Fernando Pessoa”



## RESUMO

A presente dissertação procura contribuir para a divulgação e melhor integração do conceito de microgeração ( $\mu$ CHP) nos sistemas de aquecimento central residenciais

O trabalho começa com a exposição das principais motivações e dos objetivos que se pretendem alcançar. De seguida, são apresentados conceitos relativos ao aquecimento central residencial e às tecnologias mais promissoras da  $\mu$ CHP.

A contribuição mais importante deste trabalho consiste na definição de um modelo que permite simular o comportamento de uma unidade de  $\mu$ CHP quando aplicada com o objetivo de satisfazer as necessidades térmicas típicas de uma habitação. Este modelo permite efetuar simulações considerando que a unidade de  $\mu$ CHP satisfaz as necessidades de energia térmica de forma direta (produção térmica feita no momento do consumo) ou indireta, utilizando um depósito de armazenamento térmico (produção térmica não é necessariamente feita no momento do consumo).

A modelização desenvolvida é aplicada a casos de estudo realistas, baseados numa unidade de  $\mu$ CHP específica aplicada numa habitação localizada em Viseu e com consumos de energia térmica bem definidos. Os resultados obtidos permitem retirar conclusões interessantes sobre o comportamento elétrico e térmico da unidade  $\mu$ CHP utilizada. Adicionalmente, os resultados permitem inferir conclusões sobre a influência que a utilização de depósitos de armazenamento de energia térmica e a otimização do funcionamento da unidade de  $\mu$ CHP podem produzir.



## ABSTRACT

This dissertation aims to contribute for the dissemination and better integration of the concept of micro cogeneration ( $\mu$ CHP) in residential central heating systems.

The work begins with the exposition of the main motivations and goals to be achieved. Afterwards, the concepts related to residential heating systems and the most promising technologies of  $\mu$ CHP are presented.

The most important contribution of this work consists on the definition of a model devoted to the simulation of the behavior of a  $\mu$ CHP unit applied with the purpose of satisfying typical thermal needs of a house.

The model allows performing simulations considering that the  $\mu$ CHP unit satisfies the needs for thermal energy directly (thermal production made at the moment of consumption) or indirectly using a thermal storage tank (heat production does not necessarily occur at the moment of consumption).

The developed model was applied to real case studies based on a specific  $\mu$ CHP unit running on a typical residence located in Viseu, whose consumption of thermal energy is well known (defined through typical profiles). The results of the simulations allow to draw interesting conclusions about the electrical and thermal behavior of the used  $\mu$ CHP unit. Moreover, the results permit inferring conclusions about the influence that the use of thermal energy storage produces, as well as the optimization of the operation of the  $\mu$ CHP unit.



## **PALAVRAS CHAVE**

Aquecimento residencial

Microcogeração

Armazenamento térmico

Controlo

Poupança de energia



## KEY WORDS

Residential heating  
Micro-CHP  
Thermal storage  
Controlling  
Energy savings



## **AGRADECIMENTOS**

A todos os que contribuíram de alguma maneira para a realização da presente dissertação gostaria de louvar, em especial – Deus e meus pais.

Gostaria de, humildemente, expressar a minha profunda gratidão ao Professor Doutor Paulo Moisés Almeida da Costa, meu orientador, pelo tempo despendido, pela disponibilidade, pelo apoio, pela orientação, e pelas importantíssimas contribuições e correções realizadas ao longo da elaboração deste trabalho.

À minha família de uma forma geral e em particular à Manuela, minha esposa, e filhos Anita, Filipe e Francisco pelo tempo hipotecado nestes três anos, o meu “Bem-hajam”.

A todos aqueles que fazem o favor de ser meus amigos, em especial ao Ferraz e Brazete e aos que fazem o favor de não querer ser, os meus agradecimentos.



# ÍNDICE GERAL

<b>ÍNDICE GERAL</b> .....	<b>xiii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>xvi</b>
<b>ÍNDICE DE QUADROS</b> .....	<b>xx</b>
<b>ABREVIATURAS E SIGLAS</b> .....	<b>xxii</b>
<b>1. Introdução</b> .....	<b>1</b>
1.1 Enquadramento .....	1
1.2 Motivação e objetivos .....	2
1.3 Organização da dissertação .....	4
<b>2. Revisão da literatura</b> .....	<b>5</b>
2.1 Caraterização do setor energético Português .....	5
2.2 Sistemas de aquecimento para edifícios residenciais.....	9
2.2.1. Aquecimento central .....	10
2.2.2. Formas de implementação.....	11
2.3 Fontes de calor .....	12
2.3.1. Aquecimento elétrico .....	12
2.3.2. Sistemas solares térmicos.....	13
2.3.3. Bomba de calor.....	13
2.3.4. Caldeiras a gás/gasóleo .....	14
2.3.5. Caldeiras a biomassa .....	15
2.4 Vantagens, inconvenientes e controlabilidade .....	15
2.5 Curvas de rendimento das caldeiras.....	17
2.6 Microcogeração.....	17
2.6.1 Tecnologias de sistemas de microcogeração.....	19
2.6.1.1 Motor de combustão interna .....	20
2.6.1.2 Microturbinas.....	21
2.6.1.3 Motor Stirling .....	22
2.6.1.4 Ciclo orgânico de Rankine .....	23

2.6.1.5	Pilhas de Combustível.....	24
2.6.2	Comparação entre tecnologias $\mu$ CHP .....	25
2.6.3	Controlabilidade das tecnologias de $\mu$ CHP .....	28
2.6.4	Modos de funcionamento .....	29
2.7	Armazenamento térmico .....	29
<b>3.</b>	<b>Modelização do sistema térmico .....</b>	<b>33</b>
3.1	Introdução.....	33
3.2	Sistema sem armazenamento térmico .....	34
3.2.1	Sistema com armazenamento térmico.....	37
<b>4.</b>	<b>Casos de estudo.....</b>	<b>42</b>
4.1	Generalidades .....	42
4.2	Dados utilizados .....	43
4.2.1	Perfis de consumo de energia térmica.....	43
4.2.2	Características da unidade de $\mu$ CHP .....	45
4.2.3	Características do depósito de armazenamento térmico .....	46
4.2.4	Aproximações efetuadas .....	46
4.3	Caso de estudo 1 - Sistema sem armazenamento e sem otimização .....	47
4.3.1	Resultados obtidos e análise .....	48
4.4	Caso de estudo 2 – Sistema com armazenamento e sem otimização .....	53
4.4.1	Resultados obtidos e análise .....	54
4.5	Caso de estudo 3 - Sistema com armazenamento e otimização .....	61
4.5.1	Resultados obtidos e análise .....	62
4.6	Comparação de resultados.....	68
4.6.1	Comparação entre os casos de estudo 1 e 2 .....	68
4.6.2	Comparação entre os casos de estudo 1 e 3 .....	71
4.6.3	Comparação entre os casos de estudo 2 e 3 .....	75
<b>5.</b>	<b>Conclusões e trabalhos futuros .....</b>	<b>79</b>
5.1	Conclusões.....	79
5.2	Trabalhos futuros.....	80
	<b>Referências.....</b>	<b>82</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Dependência energética portuguesa e europeia .....	5
Figura 2-2: Consumo de energia por sector em Portugal – 2010.....	6
Figura 2-3: Consumo de energia no sector residencial em Portugal-2010 .....	6
Figura 2-4: Emissões de GEE por sector em Portugal – 2010.....	8
Figura 2-5: Distribuição do consumo de energia – edifícios residenciais .....	8
Figura 2-6: Evolução da produção em $\mu$ CHP em Portugal.....	9
Figura 2-7: Sistema de aquecimento central moderno.....	12
Figura 2-8: Princípio de funcionamento de uma BC .....	14
Figura 2-9: Eficiência caldeira em função da carga.....	17
Figura 2-10: Princípio da cogeração .....	18
Figura 2-11: Eficiência energética com a $\mu$ CHP.....	19
Figura 2-12: Esquema dos fluxos de energia de um sistema de $\mu$ CHP .....	19
Figura 2-13: Processos de conversão de tecnologias de $\mu$ CHP .....	20
Figura 2-14: Diagrama de microturbina.....	21
Figura 2-15: Exemplo $\mu$ CHP com MS.....	23
Figura 2-16: Princípio de trabalho do COR.....	23
Figura 2-17: Pilha de combustível .....	25
Figura 2-18: Comparação do rendimento elétrico das principais tecnologias de $\mu$ CHP .....	26
Figura 2-19: Comparação do investimento das principais tecnologias de $\mu$ CHP .....	26
Figura 2-20: Armazenamento de energia térmica.....	30
Figura 2-21: Maior depósito de armazenamento de energia térmica do mundo.....	31
Figura 3-1: Esquema do sistema dotado de $\mu$ CHP sem AT.....	34
Figura 3-2: Curva que relaciona as potências elétrica e térmica.....	36
Figura 3-3: Curva que relaciona o rendimento em função da potência térmica .....	37
Figura 3-4: Esquema do sistema de $\mu$ CHP com AT .....	38
Figura 4-1: Diagrama de carga para um dia típico (13-02-2012) .....	43
Figura 4-2: Perfil típico de consumo para uma temperatura exterior de 2°C.....	44
Figura 4-3: Perfil típico de consumo para uma temperatura exterior de 9°C.....	45
Figura 4-4: Perfil típico de consumo para uma temperatura exterior de 16°C.....	45
Figura 4-5: Curva da relação entre as potências elétrica e térmica gerada pela $\mu$ CHP .....	46
Figura 4-6: Curva da relação entre o rendimento e a potência térmica gerada pela $\mu$ CHP .....	46
Figura 4-7: Esquema para o sistema sem AT e sem otimização.....	47
Figura 4-8: Evolução do rendimento total para o perfil 1-Caso de estudo 1 .....	49
Figura 4-9: Evolução do rendimento total para o perfil 7-Caso de estudo 1 .....	49
Figura 4-10: Evolução do rendimento total para o perfil 14-Caso de estudo 1 .....	49
Figura 4-11: Evolução do rendimento médio –Caso de estudo 1 .....	50
Figura 4-12: Evolução da potência elétrica para o perfil 1-Caso de estudo 1.....	50

Figura 4-13: Evolução da potência elétrica para o perfil 7-Caso de estudo 1 .....	51
Figura 4-14: Evolução da potência elétrica para o perfil 14-Caso de estudo 1 .....	51
Figura 4-15: Evolução potência elétrica – Caso de estudo 1 .....	51
Figura 4-16: Evolução das potências-Caso de estudo 1 .....	52
Figura 4-17: Energia elétrica produzida –Caso de estudo 1 .....	52
Figura 4-18: Rendimento elétrico da unidade $\mu$ CHP - Caso de estudo 1 .....	53
Figura 4-19: Evolução das temperaturas na $\mu$ CHP–perfil 1–Caso de estudo 1.....	53
Figura 4-20: Esquema para o sistema com AT e sem otimização.....	54
Figura 4-21: Evolução do rendimento total para o perfil 1-Caso de estudo 2.....	56
Figura 4-22: Evolução do rendimento total para o perfil 7-Caso de estudo 2.....	56
Figura 4-23: Evolução do rendimento total para o perfil 14-Caso de estudo 2.....	56
Figura 4-24: Evolução do rendimento médio-Caso de estudo 2 .....	57
Figura 4-25: Evolução da potência elétrica para o perfil 1-Caso de estudo 2.....	57
Figura 4-26: Evolução da potência elétrica para o perfil 7-Caso de estudo 2.....	58
Figura 4-27: Evolução da potência elétrica para o perfil 14-Caso de estudo 2.....	58
Figura 4-28: Evolução da potência elétrica-Caso de estudo 2.....	59
Figura 4-29: Energia elétrica produzida em função da temperatura-Caso de estudo 2.....	59
Figura 4-30: Rendimento elétrico da unidade de $\mu$ CHP-Caso de estudo 2 .....	59
Figura 4-31: Evolução das temperaturas na $\mu$ CHP e no depósito AT-Caso de estudo 2 .....	60
Figura 4-32: Evolução das potências-Caso de estudo 2 .....	60
Figura 4-33: Esquema para o sistema $\mu$ CHP com AT e otimização .....	61
Figura 4-34: Evolução do rendimento total para o perfil 1-Caso de estudo 3.....	63
Figura 4-35: Evolução do rendimento total para o perfil 7-Caso de estudo 3.....	63
Figura 4-36: Evolução do rendimento total para o perfil 14-Caso de estudo 3.....	63
Figura 4-37: Evolução do rendimento médio – Caso de estudo 3.....	64
Figura 4-38: Evolução da potência elétrica para o perfil 1-Caso de estudo 3 .....	64
Figura 4-39: Evolução da potência elétrica para o perfil 7-Caso de estudo 3 .....	65
Figura 4-40: Evolução da potência elétrica para o perfil 14-Caso de estudo 3 .....	65
Figura 4-41: Evolução da potência elétrica–Caso de estudo 3.....	66
Figura 4-42: Energia elétrica produzida - Caso de estudo 3.....	66
Figura 4-43: Rendimento elétrico da unidade de $\mu$ CHP-Caso de estudo 3 .....	67
Figura 4-44: Evolução das temperaturas na $\mu$ CHP e no depósito AT-Caso de estudo 3 .....	67
Figura 4-45: Evolução das várias potências-Caso de estudo 3.....	68
Figura 4-46: Energia não consumida em função do depósito AT .....	69
Figura 4-47: Comparação do rendimento médio para situações com e sem AT.....	69
Figura 4-48: Energia não consumida em função do depósito AT .....	70
Figura 4-49: Comparação da energia elétrica produzida – Direto–AT .....	70
Figura 4-50: Comparação dos rendimentos elétricos da $\mu$ CHP - Direto–AT.....	71
Figura 4-51: Comparação das potências elétricas produzidas - Direto–AT.....	71
Figura 4-52: Energia não consumida em função do depósito AT_otim.....	72
Figura 4-53: Comparação do rendimento médio para os sistemas – Direto – AT_otim .....	73

Figura 4-54: Energia não consumida em função do depósito AT_otim .....	73
Figura 4-55: Comparação da energia elétrica produzida - Direto - AT_otim.....	74
Figura 4-56: Comparação dos rendimentos elétricos - Direto-AT_otim .....	74
Figura 4-57: Comparação das potências elétricas - Direto-AT_otim.....	75
Figura 4-58: Energia não consumida pela $\mu$ CHP - AT-AT_otim .....	76
Figura 4-59: Comparação do rendimento médio da $\mu$ CHP - AT-AT_otim .....	76
Figura 4-60: Energia não consumida pela $\mu$ CHP - AT-AT_otim .....	77
Figura 4-61: Energia elétrica produzida pela $\mu$ CHP – AT-AT_otim.....	77
Figura 4-62: Rendimento elétrico da $\mu$ CHP - AT-AT_otim .....	78



## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2-1: Vantagens, inconvenientes e controlabilidade do aquecimento central .....	16
Quadro 2-2: Características do MCI .....	21
Quadro 2-3: Características de uma microturbina .....	22
Quadro 2-4: Características do MS .....	22
Quadro 2-5: Características do COR .....	24
Quadro 2-6: Características das diferentes tecnologias de $\mu$ CHP .....	25
Quadro 2-7: Tabela de comparação das diferentes tecnologias de $\mu$ CHP .....	27
Quadro 2-8: Densidade de armazenamento de energia térmica .....	32
Quadro 4-1: Energia térmica consumida em função da temperatura exterior .....	44
Quadro 4-2: Características da unidade de $\mu$ CHP .....	45
Quadro 4-3: Características do sistema de armazenamento térmico .....	46
Quadro 4-4: Resultados para os diferentes perfis de consumo-Caso de estudo 1.....	48
Quadro 4-5: Resultados dos vários perfis de consumo-Caso de estudo 2 .....	55
Quadro 4-6: Resultados dos vários perfis de consumo-Caso de estudo 3 .....	62



## ABREVIATURAS E SIGLAS

AQS	Águas Quentes Sanitárias
AT	Armazenamento Térmico
AT_otim	Armazenamento Térmico Otimizado
BC	Bomba de calor
BT	Baixa Tensão
BTN	Baixa Tensão Normal
CHP	Produção Combinada de Calor e Eletricidade
COP	Coefficiente de Eficácia
COR	Ciclo Orgânico de Rankine
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
DGEG	Direção-Geral de Energia e Geologia
ESTGV	Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu
GEE	Gases com Efeito de Estufa
IPV	Instituto Politécnico de Viseu
kW	Kilo watt
kWh	Kilo watt hora
MW	Mega watt
kWel	Kilo-watt elétrico
l	Litro
l/s	Litro por segundo
MCI	Motor de Combustão Interna
MS	Motor Stirling
Mtep	Mega tonelada equivalente de petróleo
PC	Pilha de Combustível
PCM	Materiais de Mudança de Fase
RCCTE	Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos edifícios
REN	Rede Elétrica Nacional
SOFC	Pilha de Combustível do tipo Oxido Sólido
UE	União Europeia
μCHP	Microcogeração





# 1. Introdução

## 1.1 Enquadramento

O consumo de energia nos edifícios dos países desenvolvidos representa uma percentagem significativa do total de energia consumida. O aquecimento de espaços e de águas sanitárias contribui, significativamente, para este facto, sendo as necessidades térmicas determinadas pelas características térmicas do edifício, renovações de ar, temperatura ambiente exterior, hábitos dos utilizadores e pelo sistema de aquecimento adotado e respetivo controlo [1]. Consequentemente, o dimensionamento e a exploração de sistemas de aquecimento central são assuntos relevantes, visando melhorar o seu desempenho. A seleção da(s) fonte(s) de calor a utilizar é também um aspeto crucial, particularmente porque o crescimento do preço dos combustíveis fósseis tem vindo a aumentar a competitividade de tecnologias como as bombas de calor, as caldeiras a biomassa e os sistemas de microprodução combinada de calor e eletricidade - microcogeração ( $\mu$ CHP) [2].

Os sistemas  $\mu$ CHP apresentam características interessantes que podem contribuir para a redução dos custos de funcionamento e das emissões de gases com efeito estufa (GEE), uma vez que a produção simultânea de calor e eletricidade tende a aumentar o rendimento na utilização da energia primária [3]. Contudo, as fontes de calor que alimentam as instalações de aquecimento central são, geralmente, controladas em função das necessidades térmicas do edifício em cada momento, as quais não são constantes ao longo do tempo. Este facto tende a resultar numa exploração menos eficiente das unidades de produção de calor (incluindo as unidades  $\mu$ CHP), uma vez que estes sistemas tendem a funcionar de forma mais eficiente em regimes específicos de carga (constantes).

Este tipo de controlo (função das necessidades térmicas) não é, contudo, uma inevitabilidade. Efetivamente, o armazenamento de energia térmica através de depósitos de armazenamento térmico (AT) permite flexibilizar os períodos e regimes de operação das fontes de calor e, potencialmente, melhorar o seu desempenho com os benefícios daí inerentes [3]. Estes benefícios incluem:

- menor custo da energia necessária à produção de calor (por exemplo, nas bombas de calor, o funcionamento pode ser desviado para períodos com custo de eletricidade inferior);
- redução na quantidade de energia primária consumida na unidade de produção de calor (por exemplo, um sistema  $\mu$ CHP consome menos energia para satisfazer uma determinada carga se for mantido a operar no ponto de rendimento máximo);
- necessidade de unidade para produção de calor com menor potência instalada (nos períodos de maior consumo o sistema de AT pode compensar o desequilíbrio entre a potência solicitada pelo consumo e a potência que a unidade de produção pode fornecer);
- funcionamento de unidades de  $\mu$ CHP em períodos mais interessantes para o sistema elétrico (horas cheias e de ponta), com eventual melhor valorização da eletricidade produzida;

Nesta dissertação serão analisados alguns dos pontos acima enunciados.

## 1.2 Motivação e objetivos

Ao longo dos últimos anos tem-se assistido a um processo de reestruturação do sector da energia, tanto a nível nacional como internacional. Este processo tem vindo a introduzir importantes alterações na estrutura dos sistemas elétricos, como sejam a introdução de concorrência nas atividades em que tal é possível (produção e comercialização de eletricidade) e o desenvolvimento de novas tecnologias de produção de eletricidade e de controlo da rede.

A sociedade e os governos, com o intuito de darem resposta às crescentes necessidades energéticas com menores impactos ambientais, têm vindo a adotar formas alternativas de produção de eletricidade mais limpas e eficientes. Consequentemente, a estrutura tradicional dos sistemas elétricos, alicerçada na produção de eletricidade em grandes centrais, tem vindo a ser substituída por uma crescente descentralização da produção.

Esta descentralização da produção contribui para uma diminuição da dependência energética de alguns países (Portugal incluído) através da produção de eletricidade em instalações de

pequena escala, por intermédio de processos de elevada eficiência energética e baseados em energias primárias endógenas. Na realidade, o recurso à geração distribuída possibilita uma maior independência, permite uma maior diversificação das fontes energéticas utilizadas, contribui para uma melhor eficiência energética (uma vez que permite reduzir as perdas nas redes de transporte e de distribuição de eletricidade), possibilita o adiamento de investimentos no reforço das infraestruturas das redes e permite ainda aumentar a fiabilidade no fornecimento de eletricidade [2][4]. Ademais, fruto da utilização de recursos renováveis como energia primária e de uma utilização mais eficiente dos recursos fósseis (por exemplo o gás natural em sistemas de cogeração), a produção distribuída contribui para a redução da emissão de GEE, contribuindo desta forma para uma melhoria no desempenho ambiental de todo o sistema energético.

O advento dos conceitos de redes inteligentes e microredes permite que as redes a que se liga esta produção descentralizada possam, através do recurso às novas tecnologias de informação e comunicação, efetuar uma gestão integrada da rede, de forma a obter uma maior eficiência a nível económico e energético, possibilitando mesmo a autonomia local em caso de falha da rede pública.

Entre as tecnologias emergentes de produção distribuída encontra-se a  $\mu$ CHP, a qual, de acordo com a Diretiva Europeia 2004/8/CE [5], consiste na produção combinada de calor e energia elétrica com uma potência elétrica máxima até 50 kW. Apesar de a cogeração ser já uma tecnologia madura, o conceito de  $\mu$ CHP é relativamente recente, embora assentando no mesmo princípio, ou seja, a produção combinada de calor e eletricidade, visando a melhoria da eficiência na utilização da energia primária. O desenvolvimento do conceito de  $\mu$ CHP e das tecnologias que o permitem tem vindo a possibilitar, portanto, o alargamento do conceito de cogeração aos sectores residencial e de serviços. Importa, neste contexto, referir que os sectores residenciais e de serviços distinguem-se do industrial por determinadas particularidades, nomeadamente a sua dimensão e o padrão temporal de consumo.

A utilização dos sistemas  $\mu$ CHP tende a ser vista como mais uma alternativa para a tomada de medidas tendentes ao uso racional de energia nos edifícios de serviços e de habitação [6]. Um sistema de  $\mu$ CHP pode fornecer energia elétrica ao edifício enquanto o calor gerado é utilizado para aquecimento de espaços e de águas quentes sanitárias (AQS). Os sistemas de  $\mu$ CHP alimentados com energias renováveis (biomassa/biocombustíveis) ou com combustíveis fósseis (diesel, a gás natural, etc.) são apenas algumas das possibilidades de aplicação da produção em pequena escala para edifícios residenciais e de serviços. Espera-se que os sistemas de  $\mu$ CHP, aplicados a sistemas de aquecimento central novos ou já existentes, se possam tornar em soluções interessantes e rentáveis num futuro próximo. Contudo, apesar do seu potencial, a  $\mu$ CHP ainda não conseguiu atrair a confiança dos potenciais utilizadores, nomeadamente nos sectores residencial e de serviços. Todavia, a aposta e o desenvolvimento destas tecnologias, aliada a um novo conceito de gestão de redes elétricas, poderá servir de alavanca na mudança de paradigma do sistema energético nacional.

Esta dissertação procura contribuir para uma maior disseminação da tecnologia  $\mu$ CHP, nomeadamente através do estudo do comportamento destas unidades quando dotadas de um sistema de AT. Este estudo pretende ser uma base para futuros trabalhos relacionados com o desenvolvimento de sistemas físicos de controlo e otimização de unidades  $\mu$ CHP que visem uma exploração mais eficiente desta tecnologia, particularmente no que se refere à redução dos custos para os respetivos detentores (nomeadamente custos de energia consumida para produzir energia térmica). Note-se ainda que a eficiência global de um sistema  $\mu$ CHP é condicionada pelo respetivo comportamento elétrico, uma vez que a injeção de energia nas redes elétricas tem benefícios distintos consoante o período temporal em que ocorra (nas horas de ponta o valor da energia tende a ser superior). Consequentemente, esta dissertação procura também apontar caminhos neste âmbito, mostrando a influência que a dimensão do AT pode exercer.

### **1.3 Organização da dissertação**

A presente dissertação está estruturada em cinco capítulos, sendo cada um destes composto por subcapítulos:

No capítulo um faz-se um enquadramento do problema, apresentam-se os objetivos e as motivações;

No capítulo dois, é feita a revisão da literatura referente ao aquecimento central e sistemas de  $\mu$ CHP aplicáveis a locais residenciais;

O capítulo três aborda a modelização do sistema de aquecimento central com recurso a unidades de  $\mu$ CHP, com e sem sistema de armazenamento térmico;

No capítulo quatro são apresentados três casos de estudo e a comparação entre resultados obtidos;

Por último, no capítulo cinco, apresentam-se as principais conclusões e as perspetivas para futuros trabalhos a desenvolver na área do aquecimento residencial com recurso à utilização de unidades de  $\mu$ CHP, com e sem armazenamento térmico.

## 2. Revisão da literatura

### 2.1 Caraterização do setor energético Português

Portugal é um país dotado de escassos recursos energéticos, nomeadamente no que se refere àqueles que garantem a sustentabilidade das necessidades energéticas, como são os casos do petróleo, do carvão ou de gás natural. Esta escassez de recursos conduz o país a uma forte dependência energética do exterior [7].

Segundo dados do Eurostat relativos a 2010 [8], Portugal é um dos países da União Europeia (UE) com uma das maiores taxas de dependência energética, tendo neste ano importado 75,4% do total da energia consumida, face à média da EU a 27 países com 52,7%, conforme se pode constatar pela Figura 2-1.

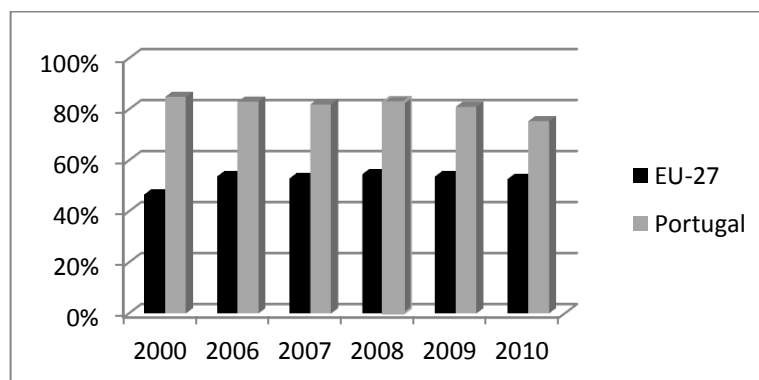


Figura 2-1: Dependência energética portuguesa e europeia [8]

Apesar da dependência portuguesa ter diminuído consideravelmente dos 81% em 2009 para 75,4% em 2010, esta é ainda preocupante e deve ser tida em consideração, no que à definição de políticas energéticas diz respeito, nomeadamente porque assenta essencialmente em importações de fontes de energia primárias de origem fóssil.

A Figura 2-2 mostra a distribuição do consumo final de energia em Portugal, evidenciando que os transportes e a indústria representam os sectores mais importantes em termos de consumo, com um valor próximo dos 3/4 do consumo total.

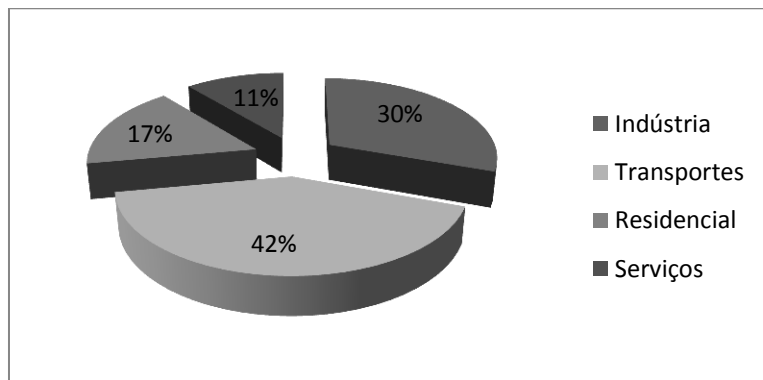


Figura 2-2: Consumo de energia por sector em Portugal – 2010 [8]

A Figura 2-2 mostra ainda que o consumo de energia nos sectores residencial e de serviços representa 27,9% do consumo de energia do país, num valor equivalente a 4,93 Mtep.

As fontes energéticas que satisfazem os consumos, no setor residencial, são variadas, tal como se ilustra na Figura 2-3, mas nota-se uma preponderância para os consumos de eletricidade, que representa 42% do total.

Na última década, assistiu-se a um aumento do consumo de eletricidade de 31% para 42%, segundo dados do Eurostat [8], correspondente a um aumento de 2,80 para 2,98 Mtep e a um decréscimo de utilização de energias renováveis de 41% para 25%.

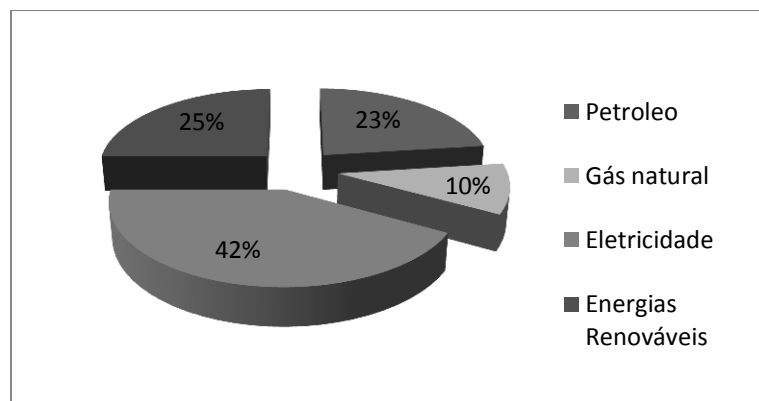


Figura 2-3: Consumo de energia no sector residencial em Portugal-2010

É no sector residencial onde se verificam as maiores taxas de crescimento do consumo de eletricidade. A Figura 2-3 mostra o consumo de energia no setor residencial em Portugal, de acordo com a origem das fontes de energia. Segundo dados da DGEG [9], assiste-se a um aumento do consumo de energia elétrica por unidade de alojamento (2671 kWh/alojamento em 2010 face a 2630 kWh/alojamento em 2009). As razões que podem estar na origem deste aumento prendem-se com o comportamento dos cidadãos, que estão menos sujeitos à disciplina do mercado (devido à existência de tarifas reguladas de fornecimento a clientes finais), em comparação com as empresas, para além da falta de políticas sobre a energia, nomeadamente no que diz respeito ao controlo de custos, eficiência energética e preocupação ambiental [7]. Outras razões podem estar ligadas ao aumento do número de habitações e à melhoria das condições que implicam maiores espaços habitacionais, melhores sistemas de aquecimento e mais eletrodomésticos, o que leva ao aumento do consumo de energia. No entanto, segundo [7] este aumento é considerado marginal dado que as novas habitações e os novos eletrodomésticos são mais eficientes, consumindo menos energia. Ainda outras razões apontadas no trabalho desenvolvido por [10] são as seguintes:

- Maior presença de equipamentos (máquinas de lavar e secar, computadores, equipamentos de ar condicionado);
- Introdução de novos aparelhos, maioritariamente equipamentos eletrónicos, informáticos e de comunicação (descodificadores de televisão por cabo, internet adsl, aparelhos de dvd, telefones sem fio, etc.), muitos com consumos de *stand-by*;
- Utilização mais intensiva de equipamentos tradicionais, designadamente, televisão, computador pessoal, recurso à internet, máquinas de lavar louça e roupa;
- Aumento do número de alguns equipamentos, principalmente televisões e frigoríficos/habitação;
- Aumento do número de casas e apartamentos mais espaçosos, exigindo mais ou melhores meios de climatização;
- A população idosa, que passa mais tempo dentro de casa, necessita em particular de um maior aquecimento no tempo frio.

Relativamente às emissões de GEE, os sectores da energia e dos transportes são os que mais contribuem, atingindo 58,8% das emissões a nível nacional, conforme Figura 2-4.

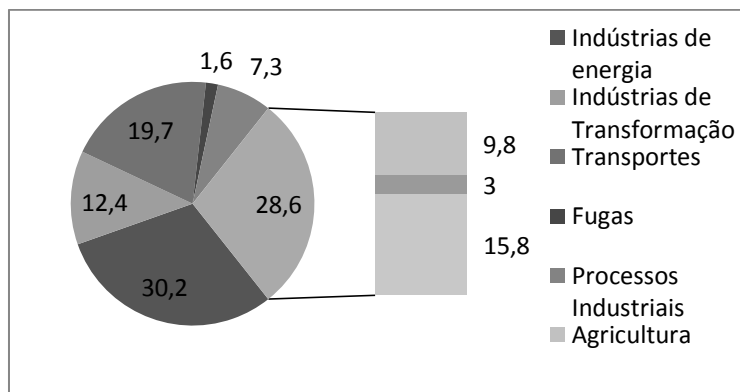


Figura 2-4: Emissões de GEE por sector em Portugal – 2010 [8]

Em termos de utilização final, o consumo de energia nos edifícios residenciais têm a distribuição ilustrada na Figura 2-5 [11], [12]. Pela análise desta figura podemos constatar que 75% da energia gasta é para o aquecimento de águas sanitárias e para aquecimento e arrefecimento de espaços. Estes valores permitem retirar algumas conclusões no sentido de melhorar a eficiência nos sistemas de produção de AQS e de eletricidade:

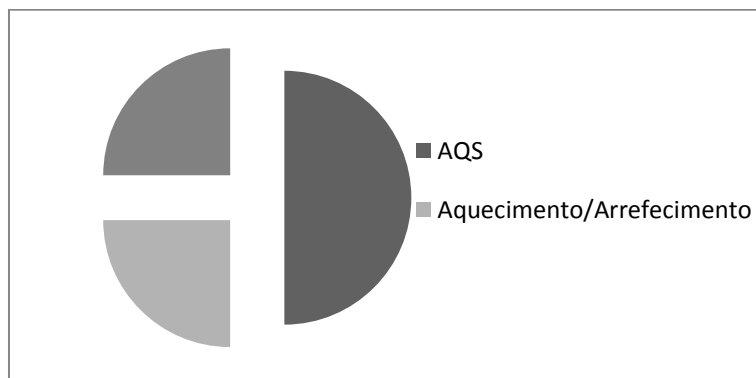


Figura 2-5: Distribuição do consumo de energia – edifícios residenciais

- Os custos elevados associados à produção de AQS, cuja fonte energética se divide entre o gás e a eletricidade, poderão ser minimizados através de uma produção de origem renovável.
- O consumo associado ao conforto térmico (aquecimento de espaços) é também um ponto importante a ter em atenção quanto à poupança de energia primária.

Deste modo, os sistemas de  $\mu$ CHP constituem uma ferramenta interessante para contribuir para a redução do consumo de energia primária e, desta forma, também para a diminuição da emissão de GEE.

A Figura 2-6 mostra a evolução da produção combinada de calor e eletricidade em Portugal de 2005 a 2010, em percentagem, e o peso que tem relativamente à produção bruta de eletricidade. Convém, no entanto, salientar que esta produção se refere a grandes unidades de

CHP e não à produção de sistemas de  $\mu$ CHP. Assim, podemos verificar que esta evolução tem sofrido variações ao longo dos anos, no entanto, em 2010 o valor aproxima-se da média da EU – 27 com 11,8% [8], o que pode constituir um incentivo à divulgação e introdução da  $\mu$ CHP na produção distribuída, nomeadamente, nos sistemas de aquecimento residencial.

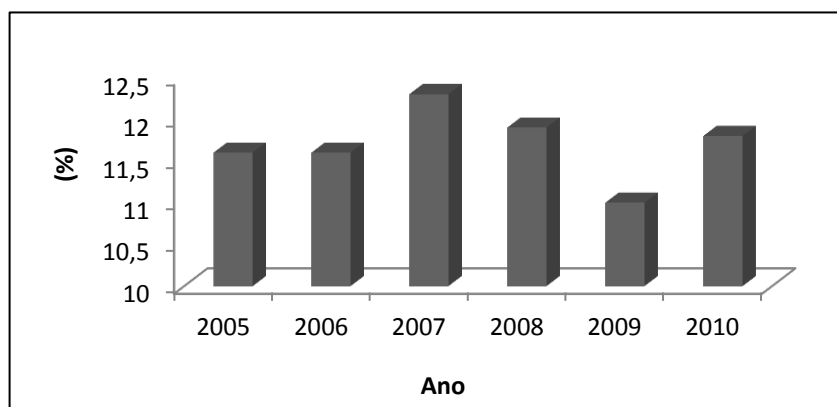


Figura 2-6: Evolução da produção em  $\mu$ CHP em Portugal [8]

## 2.2 Sistemas de aquecimento para edifícios residenciais

O aquecimento residencial está relacionado com o aumento da temperatura de um espaço fechado, com a finalidade de assegurar o conforto das pessoas. Isto pode ser feito de várias formas, entre as quais se podem encontrar o aquecimento direto ou local, aquecimento indireto ou central e aquecimento urbano (district heating)[13].

O aquecimento direto ou local é, em Portugal, o mais usado sistema de aquecimento, através do qual o calor é produzido e utilizado no mesmo espaço que se pretende aquecer. Exemplos de aplicação deste sistema são as lareiras (lenha a gás), fogões (lenha, pellets, carvão, gás, eletricidade) e aquecedores - fixos ou portáteis (elétricos, gás).

O aquecimento central é definido em [14] como sendo um sistema de climatização composto por um aparelho central que aquece ou arrefece o ambiente dependendo do aparelho de climatização. Existem vários sistemas de climatização com aquecimento central, destacando-se o ar condicionado, o aquecimento central a gás/gasóleo e o aquecimento por piso radiante.

O aquecimento urbano é, no fundo, o desenvolvimento do sistema de aquecimento central fornecendo calor a vários edifícios, normalmente, em áreas citadinas. Isso é feito por meio de água quente ou de vapor, que é produzido em centrais de aquecimento ou de cogeração e distribuído através de canalizações subterrâneas devidamente isoladas. O calor pode ser usado de duas maneiras para aquecer um edifício. Nalguns casos, a água quente proveniente da empresa de aquecimento é utilizada diretamente no edifício. Noutros, é usado um permutador de calor para transferir calor da água para um sistema fechado, no interior do edifício.

Os sistemas de aquecimento para edifícios residenciais apresentam diferentes alternativas no que se refere a fontes de produção de calor, configurações e equipamentos. Estes podem servir tanto para aquecimento de águas quentes sanitárias (AQS) como para aquecimento ambiente. No entanto, como os dois sistemas, habitualmente, estão ligados à mesma fonte de calor, ambos estão localizados no mesmo local do edifício e são vulgarmente apelidados de sistemas de aquecimento central e utilizados em edifícios unifamiliares, multifamiliares ou de serviços.

### **2.2.1. Aquecimento central**

Em sistemas de aquecimento central, a produção de calor, geralmente, é feita fora do espaço a aquecer, sendo por isso descrita como método indireto de aquecimento. O calor produzido pode ser distribuído pelo edifício através de água, ar ou vapor [13].

De acordo com [13], um sistema de aquecimento central é constituído, essencialmente, por três elementos principais:

- Um equipamento gerador de calor (fornalha ou caldeira), no qual a energia primária é transformada em calor;
- Um meio de transmissão de calor (ar, água ou vapor) constituído por tubos ou condutas, com a finalidade de transferir o calor para o espaço a ser aquecido;
- Emissores de calor (radiadores, convetores, piso radiante) localizados nos espaços a serem aquecidos.

Os equipamentos geradores de calor mais comuns são as caldeiras murais ou as caldeiras de chão, normalmente utilizadas para potências superiores. As caldeiras murais utilizam, geralmente, o gás natural ou outro como combustível, enquanto as caldeiras de chão podem funcionar com uma maior diversidade de combustíveis, nomeadamente: lenha, pellets, gás, gasóleo, etc. As caldeiras podem ser mistas instantâneas ou mistas de acumulação, consoante permitem fazer o aquecimento central e o aquecimento de águas sanitárias de forma simultânea e instantânea ou permitem fazer o aquecimento central e o aquecimento de águas sanitárias por acumulação, respetivamente. Além destes tipos de caldeira, podemos ainda encontrar as caldeiras de condensação, que permitem recuperar parte do calor contido nos gases da combustão, aumentando desta forma o seu rendimento.

A finalidade da tubagem é levar a água quente desde a caldeira até aos diferentes pontos de utilização. No caso das águas quentes sanitárias, a rede de tubagens de água quente tem, frequentemente, um só sentido (ida). No entanto, existem sistemas com recirculação para manter a água quente junto aos pontos de utilização, sendo necessário uma rede de tubagens com dois sentidos (ida e retorno). No caso do aquecimento ambiente, o sistema de transporte da energia térmica do ponto da respetiva produção para os locais de consumo é constituído

por um par de tubos - um para a ida da água quente e outro para o retorno da mesma a uma temperatura inferior. A forma de ligação dos radiadores pode ser em série ou em paralelo.

Os emissores térmicos ou radiadores são os elementos responsáveis pela troca de calor proveniente da água quente para o meio ambiente. Além dos radiadores, podemos ainda considerar o piso radiante.

Uma parte não menos importante e que deve fazer parte do sistema de aquecimento é a regulação e programação. Esta tem a finalidade de tornar o sistema mais eficiente e aumentar o conforto na habitação. As torneiras termostáticas são instaladas diretamente nos radiadores e, conforme a variação da temperatura ambiente, ajustam o caudal de água que passa através do radiador, permitindo a regulação independente de divisão para divisão da casa. O termóstato ambiente é independente do radiador, sendo colocado num local da casa que servirá de referência para medir a temperatura e comandar o funcionamento da caldeira ou do sistema de circulação. Por fim, podemos encontrar as centrais de regulação, em que o comando da caldeira é efetuado tendo em conta, não só a temperatura ambiente interior, mas também a temperatura ambiente exterior.

O acumulador de AQS, sendo opcional, tem como função armazenar a água quente para fins sanitários, à temperatura de armazenamento, para ser utilizada quando necessário.

### **2.2.2. Formas de implementação**

Um sistema de aquecimento central com AQS pode ser concebido de acordo com a conceção do sistema de tubagens. Em [15] e [16], são referidos sistemas de gravidade, semi-gravidade e apenas com bomba. Os sistemas de gravidade funcionam através da correta disposição das tubagens para que a circulação se faça através da gravidade. Este sistema já não se usa por requerer tubagens de grande diâmetro para levar pequenas quantidades de calor. Nos sistemas de semi-gravidade podemos encontrar instalações monotubo e bitubo. No sistema monotubo, os emissores térmicos estão colocados em série sendo utilizado apenas um tubo para a ida e para o retorno da água quente. Este sistema também já não se usa. Quanto ao sistema bitubo os emissores estão colocados em paralelo, sendo utilizado um tubo para a ida e outro para o retorno da água à caldeira. No sistema que utiliza apenas uma bomba, esta faz a circulação da água pelo circuito da água quente e de aquecimento. No circuito de aquecimento, podemos encontrar sistemas que utilizam o método dos coletores. Este método consiste na utilização de dois coletores, um que recebe a água da caldeira e a distribui pelos emissores e outro que recolhe a água dos emissores e faz o retorno à caldeira. No seu trabalho, Doninelli [17] diz que, usando este método, o maior circuito interno é dimensionado com base em três fatores: calor necessário, diferença de temperatura predefinida (por exemplo, 10 ° C) e a perda linear de pressão por metro de tubulação (por exemplo, 10 mm ca). Em qualquer caso, como não existe recurso à gravidade, o depósito de AQS pode ficar situado abaixo da altura da caldeira.

Este último é o sistema mais comum, com algumas vantagens, como sejam: menores perdas de pressão, redução do número de acessórios e melhor equilíbrio entre pressão e temperatura[16].

A Figura 2-7 ilustra o sistema de aquecimento central, atualmente, mais comum. Assim, a pressão do sistema não é gerada pela bomba circuladora, mas sim pelo peso da coluna de água e pela pressão adicional criada pelo recipiente pressurizado (depósito de expansão) [18].

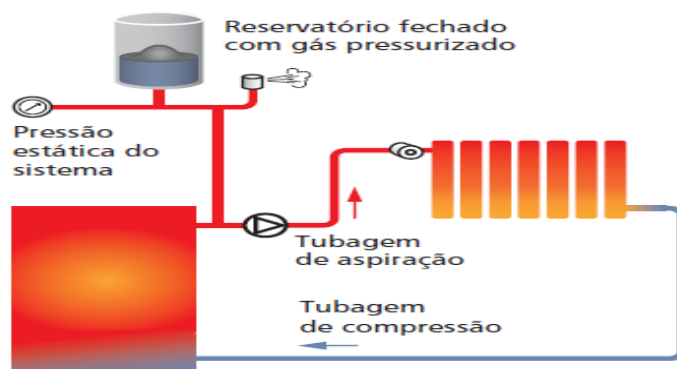


Figura 2-7: Sistema de aquecimento central moderno [18]

## 2.3 Fontes de calor

Quanto à fonte de energia primária, existem vários tipos de aquecimento central. Assim, podemos encontrar sistemas solares térmicos, elétricos, a gás, a gasóleo, a biomassa e bombas de calor.

### 2.3.1. Aquecimento elétrico

Os sistemas elétricos baseiam o seu princípio de funcionamento no efeito de Joule, isto é, transformam energia elétrica em calor através de radiadores distribuídos pelas diferentes divisões da habitação ou edifício, ou podem também utilizar piso radiante. Estes sistemas apresentam um rendimento próximo dos 100%.

Em termos de controlabilidade, são sistemas muito simples de controlar, uma vez que será necessário apenas controlar a temperatura na divisão no caso de aquecimento ambiente, ou do depósito no caso de AQS.

O principal inconveniente prende-se com o preço elevado da eletricidade. Este inconveniente pode, contudo, ser minimizado através da adoção de uma tarifa bi-horária ou tri-horária, aliada à utilização de acumuladores térmicos, capazes de acumular a energia durante as horas de vazio, para a libertar nos períodos fora do vazio, mantendo por isso a casa sempre quente.

No caso das AQS, o processo seria semelhante através da introdução de um depósito termoacumulador para as AQS. Naturalmente, esta solução implica um maior investimento inicial.

### **2.3.2. Sistemas solares térmicos**

Os sistemas solares térmicos captam a energia proveniente da radiação solar para aquecimento de águas quentes sanitárias, para aquecimento ambiente (piso radiante) ou para aquecimento de piscinas. Quanto à tipologia, podemos encontrar dois tipos de sistemas: de circulação natural ou termossifão e de circulação forçada. O sistema de circulação natural funciona utilizando o efeito termossifão, cujo princípio assenta no facto de que um fluido quente é mais leve do que um fluido frio. O fluido que circula dentro do painel é aquecido pela radiação solar, o que faz com que este suba e, passando dentro do depósito, processa-se a troca de calor com a água. Desta permuta resulta o arrefecimento do fluido, fazendo com que volte a descer para a parte inferior do painel, fechando assim o ciclo. Este sistema funciona, normalmente, com o depósito na posição horizontal, na parte superior do painel, e com uma dada inclinação. É a forma mais simples e económica de obter água quente com recurso à energia solar. São sistemas simples e económicos para auxiliar e complementar a produção de água quente sanitária numa habitação.

O sistema de circulação forçada é um sistema modular, quer quanto à sua capacidade, quer quanto à possibilidade de integração com outros sistemas de aquecimento ambiente por piso radiante ou aquecimento de piscinas. Como o depósito acumulador se encontra a um nível inferior, recorre-se a um controlador diferencial de temperatura, com um sensor colocado no painel e outro no depósito e a uma bomba de circulação. Este sistema é mais estético que o termossifão, mas é mais oneroso em termos de investimento inicial.

As vantagens dos sistemas de circulação forçada relativamente aos de circulação natural são a possibilidade de colocação do acumulador em qualquer parte da habitação, o que permite melhorar esteticamente o edifício, e a nível técnico permite um maior controlo da temperatura de acumulação e a possibilidade de integração com vários sistemas de apoio convencionais (esquentador, caldeira, resistência elétrica).

### **2.3.3. Bomba de calor**

Uma bomba de calor (BC) é um aparelho semelhante, na forma e função, a um sistema de ar condicionado ou a um frigorífico, utilizando eletricidade para fazer a transferência de calor de um local para o outro. De forma simples, pode dizer-se que existem três tipos de BC: ar/água (aerotérmicas), solo/água e água/água (geotérmicas), conforme a fonte de calor seja o ar, o solo ou a água, respetivamente. As BC podem ser classificadas em BC de baixa ou de alta

temperatura, consoante a máquina consiga aquecer a água até aos 60°C ou até aos 80°C, respetivamente. A BC é constituída por um circuito fechado, do qual fazem parte um compressor, alimentado eletricamente, um condensador, uma válvula de expansão e um evaporador onde circula o fluido térmico. A BC funciona da seguinte maneira: o compressor bombeia o gás refrigerante a alta temperatura e alta pressão, gerando calor que é transferido para a água através do condensador. Aqui, devido à elevada pressão, o gás torna-se líquido, passa através da válvula de expansão onde perdendo pressão e arrefecendo volta ao estado gasoso. De seguida, passa pelo evaporador a baixa pressão e baixa temperatura, absorvendo o calor do ar ambiente, regressando novamente ao compressor para fechar o ciclo [19]. Na Figura 2-8 podemos observar o princípio de funcionamento de uma BC.

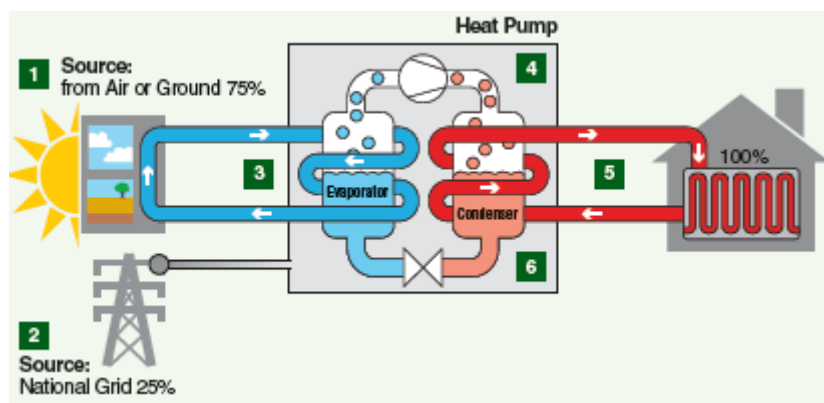


Figura 2-8: Princípio de funcionamento de uma BC [20]

Uma das vantagens da bomba de calor reside no facto da energia produzida sob a forma de calor ser superior à energia consumida sob a forma de eletricidade. Uma bomba de calor com um consumo de 1 kW de eletricidade consegue produzir até 3 a 4 kW de energia térmica, dependendo das condições da fonte de energia, apresentando assim uma elevada eficiência. A eficiência de uma BC é dada pelo Coeficiente de Eficácia (COP) e pode ser calculado pela razão entre a energia que fornece e a energia que absorve [21].

### 2.3.4. Caldeiras a gás/gasóleo

Os sistemas a gás são baseados em caldeiras murais ou de chão, tradicionais ou de condensação, para o aquecimento da água que, posteriormente, circula pelos radiadores das diferentes divisões da habitação/edifício e pelo sistema de aquecimento de AQS.

O sistema a gasóleo é semelhante ao sistema a gás, exceto na fonte de calor utilizada. Quanto à controlabilidade, normalmente, estes sistemas são controlados de forma individual, através de termostatos ou através de um sistema central que comanda a máquina. Neste caso, o arranque ou a paragem da máquina tem resposta quase imediata a partir do momento em que recebe o respetivo sinal.

### **2.3.5. Caldeiras a biomassa**

De acordo com [22], a biomassa é definida como “a fração biodegradável de produtos e resíduos provenientes da agricultura (incluindo substâncias vegetais e animais), da silvicultura e das indústrias conexas, bem como a fração biodegradável de resíduos industriais e urbanos”[22].

A biomassa pode apresentar-se no estado líquido, gasoso e sólido. O mais utilizado é o estado sólido, sob a forma de pellet. Os pellets de madeira são um biocombustível sólido fabricado a partir de partículas de madeira. Têm uma forma cilíndrica, com diâmetros comerciais de 6 ou 8 mm e 15 a 30 mm de comprimento. Devido à sua consistência, a combustão é mais eficiente do que outras formas de combustível que utilizam a madeira, facilitando o projeto de tecnologias que utilizam biomassa como fonte de calor. Nos últimos anos as caldeiras a pellets foram alvo de um acentuado desenvolvimento, estando já largamente difundidas no mercado. Esta solução tem-se tornado uma solução amiga do ambiente e economicamente atrativa, em virtude do relativamente baixo preço do combustível.

Este tipo de caldeira tem um funcionamento semelhante aos sistemas de aquecimento tradicional, diferindo apenas quanto ao modo de alimentação, aos restos da queima de combustível e à controlabilidade.

Quanto à controlabilidade, estes sistemas apresentam uma grande histerese entre o arranque e a paragem da máquina. Assim, o arranque da máquina dá-se quando a temperatura da água for inferior à temperatura programada. Quando isto acontece, os pellets são transportados desde o reservatório até à câmara de combustão, recorrendo, para isso, a um sem fim acionado através de motor elétrico. Ao fim de algum tempo, o sistema dá ordem ao queimador, que faz com que os pellets comecem a arder quando a temperatura atinge os 200 °C, aproximadamente. De seguida, a admissão do ar e do combustível é controlada até se atingir a temperatura da água programada. À medida que a temperatura se aproxima da temperatura programada, a alimentação vai sendo gradualmente reduzida até esta ser atingida. Para que isto aconteça, primeiro corta-se a alimentação dos pellets e só depois é que é fechada a alimentação do ar, entrando então a caldeira em modo de espera. Quando o gradiente de temperatura da água do permutador de calor e a temperatura programada forem inferiores a um determinado valor, que varia de fabricante para fabricante, a máquina voltará a funcionar.

## **2.4 Vantagens, inconvenientes e controlabilidade**

No Quadro 2-1, apresentam-se algumas vantagens e alguns inconvenientes, bem como a controlabilidade, para os diferentes tipos de aquecimento central quanto ao tipo de energia consumida.

Quadro 2-1: Vantagens, inconvenientes e controlabilidade do aquecimento central

<b>Tipos</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Inconvenientes</b>	<b>Controlabilidade</b>
Elétrico	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Não utiliza combustíveis;</li> <li>- Não depende de depósitos;</li> <li>- Não produz, localmente, gases nem fumos;</li> <li>- Manutenção reduzida;</li> <li>- Elevado rendimento.</li> <li>- Não necessita de espaço específico.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elevado consumo elétrico;</li> <li>- Geralmente, necessita de depósito acumulador de AQS.</li> <li>- Necessidade de maior potência elétrica contratada;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pode ser facilmente controlável, através de reguladores de temperatura em cada aparelho (termostatos), independentemente dos restantes;</li> <li>- Resposta do sistema é imediata.</li> </ul>
Caldeiras a Gás ou Gasóleo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Manutenção reduzida;</li> <li>- Integração com sistemas solares térmicos e bomba de calor;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Produção de gases e de fumos na combustão;</li> <li>- Queima de ar;</li> <li>- Preço do combustível;</li> <li>- Requer espaço reservado para o sistema e para o depósito de combustível.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pode ser controlável através de termostatos colocados em cada radiador de forma individual ou de forma centralizada.</li> <li>- Resposta do sistema é imediata.</li> </ul>
Caldeiras a Biomassa	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utiliza um recurso renovável;</li> <li>- Baixo preço do combustível</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Emissão de gases e de fumos;</li> <li>- Necessidade de utilização de depósito para acumulação de AQS.</li> <li>- Necessidade de espaço específico para o sistema e para o armazenamento da biomassa.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Na controlabilidade deve ter-se em conta a existência de histerese.</li> <li>- Resposta do sistema com algum atraso temporal.</li> </ul>
BC	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Possibilidade de interligação fácil de sistemas térmicos solares e outros;</li> <li>- Elevada eficiência;</li> <li>- Reversibilidade.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Necessidade de depósito acumulador de AQS.</li> <li>- Fraca eficiência com baixas temperaturas exteriores.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Facilmente controlável;</li> <li>- Resposta imediata do sistema.</li> </ul>

## 2.5 Curvas de rendimento das caldeiras

Para se determinar o rendimento de uma caldeira, é fundamental a sua monitorização durante o funcionamento, recorrendo-se para isso aos balanços de massa e de energia. No trabalho desenvolvido por [23], [24] o cálculo do rendimento pode ser feito pelo método do balanço direto (contabilizando os fluxos energéticos de entrada e de saída), ou pelo método do balanço inverso (contabilizando as principais perdas: associadas ao combustível não queimado, por radiação e convecção, por purga e associadas à combustão ineficiente).

O rendimento de uma caldeira não é constante ao longo do tempo de funcionamento, dependendo este da carga, do caudal de circulação do fluido e do valor das várias temperaturas envolvidas no processo [25] [26]. Os fabricantes não apresentam, geralmente, estas curvas e existem poucos trabalhos científicos em que o problema seja abordado. No entanto, Glenn [27] estudou este assunto tendo apresentado, entre outras, uma curva de rendimento que evidencia a ligação entre este e o regime de carga da caldeira em percentagem, tal como se mostra na Figura 2-9.

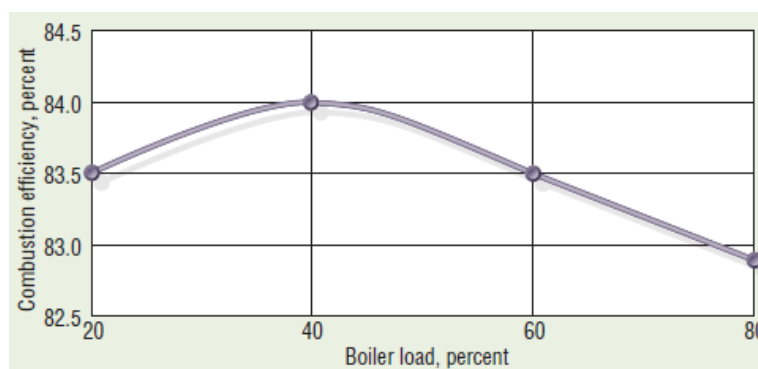


Figura 2-9: Eficiência caldeira em função da carga [27]

Atendendo a esta dificuldade de encontrar curvas relativas ao rendimento em função da potência, optou-se por criar um modelo de curva que será apresentada na secção 3.2.

## 2.6 Microcogeração

O princípio da cogeração há muito que é conhecido, consistindo na produção combinada de calor e de eletricidade através de uma única fonte primária. Desde o início do século XX que várias unidades de cogeração têm alimentado fábricas com calor e eletricidade. A Figura 2-10 mostra o princípio da cogeração.

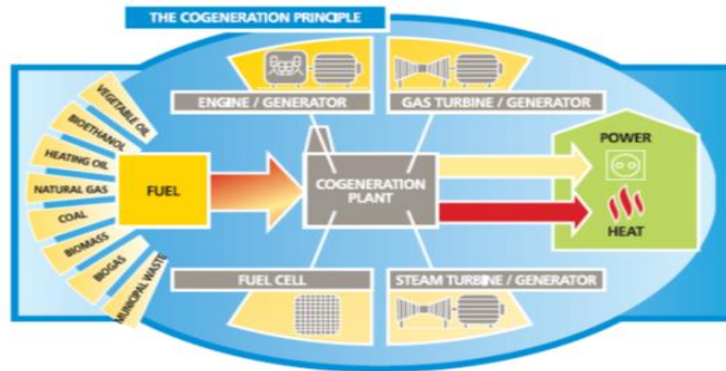


Figura 2-10: Princípio da cogeração [28]

No passado, foram várias as definições utilizadas na literatura no tocante à  $\mu$ CHP [29]. Em Fevereiro de 2004 surge uma diretiva comunitária europeia [5] para clarificar o conceito de  $\mu$ CHP, estabelecendo que:

- Entende-se por  $\mu$ CHP a unidade de cogeração com uma capacidade elétrica abaixo dos 50 kWel;
- Entende-se por pequena escala a unidade de cogeração com uma capacidade térmica instalada inferior a 1 MW.

Na literatura, a  $\mu$ CHP é entendida por vários autores como sistemas de produção com pequenas potências elétricas (<15 kWel). Os argumentos que suportam esta definição, segundo Simader [29], são:

- Os sistemas com potência elétrica até 15 kW são sistemas para aplicação, essencialmente, em moradias unifamiliares, edifícios residenciais, hotéis, etc.;
- Estes sistemas diferem dos sistemas de CHP de maiores potências em vários aspetos, como sejam, a forma de distribuição de eletricidade, os modelos de propriedade, os contratos de fornecimento e o próprio comportamento dos proprietários.
- Comparado com o sistema convencional de CHP e, tomando como exemplo o aquecimento urbano (district heating), não é necessária qualquer rede (elétrica ou térmica) de distribuição adicional de distribuição de energia, uma vez que estes sistemas podem ser ligados diretamente à rede de BT e à canalização existente da habitação.

A  $\mu$ CHP permite a produção de eletricidade de forma descentralizada, longe das grandes centrais de produção, contribuindo para uma aproximação entre os pontos de produção e de consumo. Este facto tende a produzir benefícios importantes para os sistemas elétricos, como sejam a redução nas perdas com o transporte e a distribuição da eletricidade e a diminuição das emissões dos gases de efeito de estufa (em particular as emissões de CO<sub>2</sub>). Adicionalmente, a  $\mu$ CHP contribui para um aproveitamento mais eficiente da energia primária, tal como, a título exemplificativo, se mostra na Figura 2-11 [30].

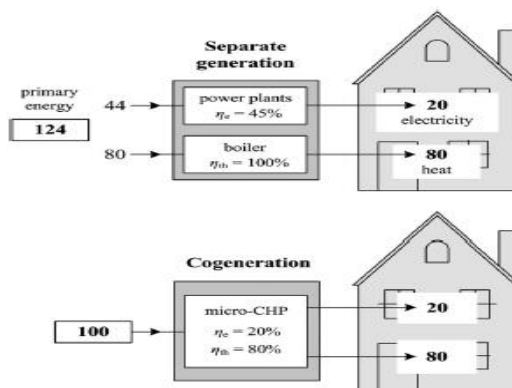


Figura 2-11: Eficiência energética com a  $\mu$ CHP [30]

A Figura 2-12 mostra um exemplo de aplicação da  $\mu$ CHP a uma habitação familiar com a respetiva representação dos fluxos de energia. A ilustração representada pode ser aplicada conceitualmente ao motor Stirling ou a outras tecnologias de  $\mu$ CHP, incluindo as pilhas de combustível [31].

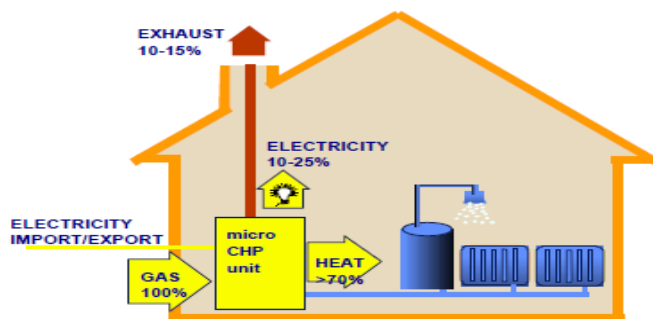


Figura 2-12: Esquema dos fluxos de energia de um sistema de  $\mu$ CHP [32]

## 2.6.1 Tecnologias de sistemas de microcogeração

As tecnologias de conversão servem para converter a energia química contida no combustível noutras formas de energia como sejam a eletricidade e calor [33]. As principais tecnologias de  $\mu$ CHP atualmente disponíveis (algumas já com provas dadas enquanto outras ainda em fase de desenvolvimento) derivam, na sua maioria, das tecnologias de cogeração há muito utilizadas. A Figura 2-13 mostra de forma esquemática as tecnologias atualmente existentes.

Uma parte significativa das tecnologias de  $\mu$ CHP converte a energia química contida em combustíveis em calor e em energia mecânica. O calor é utilizado para aquecimento de espaços e de AQS, enquanto a energia mecânica é convertida em energia elétrica através de um gerador. Entre as tecnologias deste tipo destacam-se: os motores de combustão interna (MCI), as microturbinas, o motor Stirling (MS) e o ciclo orgânico de Rankine (COR). Alternativamente, as tecnologias de  $\mu$ CHP poderão não recorrer ao uso de geradores,

baseando-se o processo na conversão eletroquímica direta de energia química para energia elétrica, como é o caso das pilhas de combustível (PC).

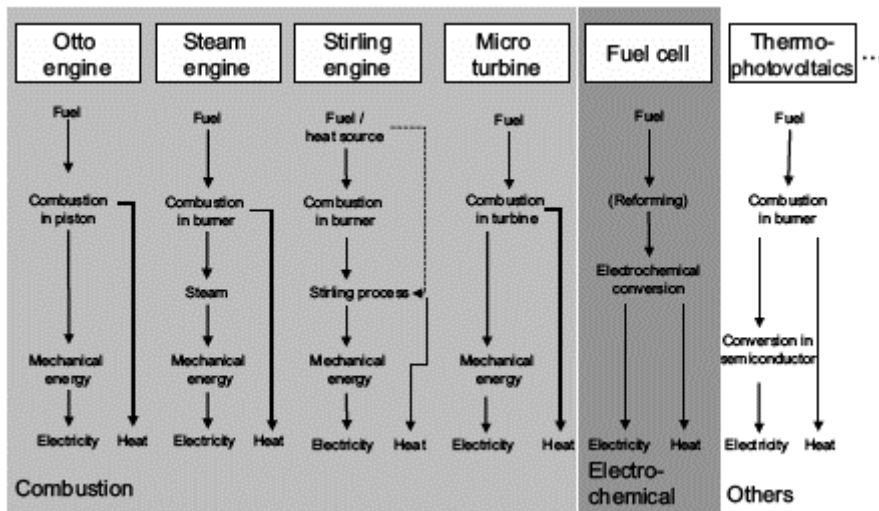


Figura 2-13: Processos de conversão de tecnologias de  $\mu$ CHP [33]

### 2.6.1.1 Motor de combustão interna

O motor de combustão interna, muito utilizado na indústria automóvel, transforma a energia química contida no combustível em energia mecânica, através da expansão dos gases no processo da combustão. Neste processo de transformação há libertação de calor que, no caso do automóvel, pode ser utilizado para aquecimento. Se o motor for utilizado na  $\mu$ CHP, o mesmo está acoplado a um gerador elétrico para produção de eletricidade, enquanto o calor libertado aquece água (através do circuito de arrefecimento do motor e da recuperação de temperatura nos gases de escape), que pode ser usada para satisfação de necessidades de energia térmica.

Este motor é muito usado em cogerações de pequena escala devido ao rendimento relativamente elevado que se consegue em tais aplicações. Os motores de combustão interna, podem ser subdivididos em dois tipos: o motor Diesel ou de compressão e o motor de explosão ou a gasolina. A maior parte dos motores utilizados na  $\mu$ CHP são a quatro tempos e podem utilizar como combustível, para além do gasóleo, o biodiesel. Este motor, comparado com o motor de explosão, apresenta um maior rendimento, podendo funcionar para potências elétricas desde os 5 kW para as pequenas unidades até aos 10 MW nos sistemas das grandes unidades.

O Motor de explosão ou Ciclo Otto é semelhante ao motor diesel, também de quatro tempos, diferindo apenas quanto à forma da explosão do combustível. Assim, enquanto no motor diesel a explosão ocorre devido à elevada compressão do ar, no motor de explosão esta ocorre

devido à utilização de velas, que a provocam devido ao incendiar do combustível. Este motor pode funcionar para potências elétricas entre os 3 kW e os 6 MW. No Quadro 2-2 mostram-se algumas das características do MCI.

Quadro 2-2: Características do MCI [29]

	Thermo dynamical cycle	Fuel used	Efficiencies		Power size range
			total	electrical	
Diesel engine	Diesel cycle	Gas, biogas, ELFO <sup>*)</sup> , LFO <sup>**)</sup> , HFO <sup>***)</sup> , rape oil, RME <sup>****)</sup>	65 - 90	35 - 45	5 kW <sub>e</sub> to 20 MW <sub>e</sub>
Spark ignition engine	Otto cycle	Gas, biogas, naphtha	70 - 92	25 - 43	3 kW <sub>e</sub> to > 6 MW <sub>e</sub>
Average cost investment in €/kW <sub>e</sub> (Fuel oil engine)			340 - 2000		
Average cost investment in €/kW <sub>e</sub> (spark ignition gas engine)			450 - 2500		
Operation and maintenance costs in €/kWh <sub>e</sub>			0,0075 - 0,015		

<sup>\*)</sup> Extra Light Fuel Oil, <sup>\*\*)</sup> Light Fuel Oil, <sup>\*\*\*)</sup> Heavy Fuel Oil, <sup>\*\*\*\*)</sup> rapeseed methyl ester

### 2.6.1.2 Microturbinas

A tecnologia básica das microturbinas deriva dos sistemas de energia auxiliar utilizados na indústria aeronáutica e dos turbocompressores diesel da indústria automóvel. As microturbinas funcionam da mesma maneira que as turbinas de elevada potência, mas a sua eficiência elétrica é menor, situando-se em cerca de 15% [29]. No entanto, este inconveniente pode ser minimizado através da instalação de um recuperador de calor.

O funcionamento de um sistema de  $\mu$ CHP com microturbina a gás é mostrado Figura 2-14 e as características principais constam do Quadro 2-3

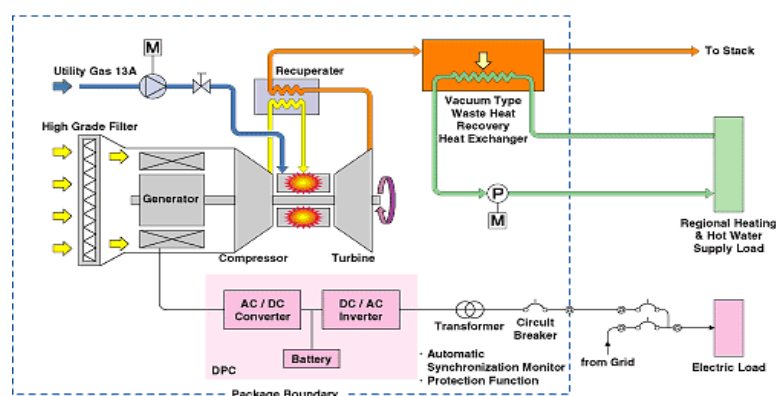


Figura 2-14: Diagrama de microturbina [34]

As microturbinas têm custos de investimento maiores do que o MCI, mas devido ao fato de terem poucas peças móveis e custos de manutenção mais baixos é possível serem comparadas ao MCI.

Quadro 2-3: Características de uma microturbina [29]

	Power to heat ratio	Fuel used	Efficiencies		Power size range
			Total	electrical	
Micro turbine	0,2 – 0,8	Natural gas, gas oil, diesel, propane, Kerosene, biogas, flare gas, etc.	65 – 90	15 - 30	15 kW <sub>e</sub> to 300 kW <sub>e</sub>
Average cost investment in €/kW <sub>e</sub> (Diesel engine)			900 – 2.500		
Operation and maintenance costs in €/kWh <sub>e</sub>			0,006 – 0,21		

### 2.6.1.3 Motor Stirling

O motor Stirling (MS), sendo um motor de combustão externa, apresenta algumas vantagens promissoras na aplicação a sistemas de  $\mu$ CHP de potências elétricas inferiores a 1 kW, nomeadamente: elevado rendimento, bom desempenho em regime de carga parcial, elevada flexibilidade no que concerne à sua alimentação em termos de combustíveis (gasolina, álcool, gás natural, butano, biomassa), baixo ruído e reduzidos níveis de emissão de gases, quando a fonte de energia é a biomassa.

O MS deve o nome ao ciclo que efetua, que consiste na expansão e compressão de um gás de trabalho, geralmente o hélio ou hidrogénio, dentro de um ou mais cilindros. Existem diferentes configurações para este motor (dois pistões num cilindro, dois pistões e dois cilindros por ciclo, etc.).

No Quadro 2-4 mostram-se algumas características dos MS e na Figura 2-15 é ilustrada a aplicação de uma unidade de  $\mu$ CHP da WhisperTech baseado num MS com uma potência elétrica de 1 kW a uma habitação. Podemos constatar que o espaço ocupado é comparável ao de uma simples máquina de lavar loiça ou roupa, ou mais recentemente, ao espaço ocupado por uma caldeira mural [29].

Quadro 2-4: Características do MS [29]

	Thermo dynamical cycle	Fuel used	Efficiencies		Power size range
			Total	electrical	
Stirling engine	Stirling cycle	Natural gas, gas oil, alcohol, butane	65 – 95	~ 25	3 kW <sub>e</sub> to 1,5 MW <sub>e</sub>
Average cost investment in €/kW <sub>e</sub>			Ca. 2.500 – 4.500 (for < 10 kW Systems)		
Operation and maintenance costs in €/kWh <sub>e</sub>			N.A.		



Figura 2-15: Exemplo  $\mu$ CHP com MS [33]

A principal dificuldade associada aos MS está relacionada com o facto de o seu fabrico implicar a utilização de peças de elevada precisão o que, para a produção em série, se apresenta como um desafio considerável [33].

### 2.6.1.4 Ciclo orgânico de Rankine

O ciclo orgânico de Rankine (COR) é semelhante ao ciclo de uma turbina a vapor convencional, exceto no fluido que aciona a turbina que, neste caso, é um fluido orgânico. A escolha do fluido de trabalho permite, de forma eficiente, que fontes de calor de baixa temperatura produzam energia elétrica numa vasta gama de potências elétricas (desde alguns kWel até acima de 3MWel por unidade) [29]. A Figura 2-16 mostra o princípio de trabalho de COR desenvolvido pela empresa Alemã Enginon.

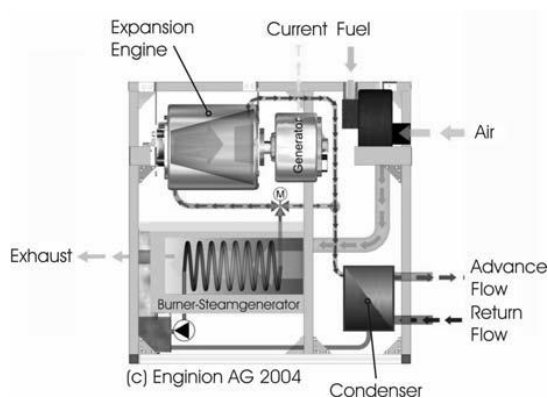


Figura 2-16: Princípio de trabalho do COR [33]

Apesar de as máquinas com COR apresentarem um rendimento elétrico baixo (entre 12% e 20%) [33], as vantagens que podem apresentar são: um ciclo de elevado rendimento; elevado rendimento da turbina (>85%); baixa rotação da turbina, o que permite o acoplamento direto do alternador; longa duração; sem necessidade de operador; ausência de erosão das pás, devido à ausência de vapores corrosivos no fluido [29].

Numa pesquisa efetuada por [35] sobre algumas características de equipamentos para  $\mu$ CHP, que utilizam COR e que se mostram no Quadro 2-5, podemos constatar que o rendimento total destas máquinas apresenta valores que oscilam entre os 85% e os 90%.

Quadro 2-5: Características do COR[35]

Microgeração	LIC			Ciclo orgânico
	CogenMicro	Climate Energy LLC e ECR	Enginion	Energetix microPower Ltd.
origem	Austrália	EUA	****	E.U.A.
Tensão de saída (V)	****	****	400	****
Frequência (Hz)	****	****	60	****
<b>Potência</b>				
P <sub>entrada</sub> (kW)	****	****	****	****
P <sub>elétrica</sub> (kW)	2,5	1	6	10
P <sub>térmica</sub> (kW)	11	8,5	25	60
<b>Eficiência (%)</b>				
$\eta_{elétrica}$	17	10	****	****
$\eta_{térmica}$	71	75	****	****
$\eta_{total}$	90	85	****	90
Temperatura do calor recuperado (°C)	****	****	****	30°C - 50°C
<b>Peso e dimensões</b>				
Número de expansores	1	1	1	1
<b>Poluções</b>				
Ruído	****	****	****	****
Emissão (NOx)	0,0039kg / MWh	****	****	****
CO	****	****	****	****
CO <sub>2</sub>	188 kg/MWh	****	****	****
Temperatura da exaustão	****	****	****	****
Tempo de vida útil	****	20.000	****	****
Tempo entre manutenções	****	5.000	****	****
Consumo de óleo	****	Não utiliza óleo lubrificante	****	****
Preço aproximado (US\$)	3.900	****	****	****

\*\*\*\* Não há dados referente a este campo.

### 2.6.1.5 Pilhas de Combustível

A Pilha de Combustível (PC) produz eletricidade combinando hidrogénio e oxigénio através de um processo eletroquímico, sem que se verifique qualquer processo de combustão, isto é, a energia elétrica é gerada através de uma reação eletroquímica entre o hidrogénio e o oxigénio, não envolvendo a queima de combustível [35].

O funcionamento de uma PC é semelhante ao de uma bateria no que diz respeito à produção de energia elétrica em corrente contínua. A diferença é que a PC não se esgota (mas necessita de mudanças periódicas de membranas) nem necessita de recargas. Efetivamente, as PC produzem energia sob a forma de eletricidade e calor a partir do momento em que são alimentadas com hidrogénio e oxigénio. O único subproduto que é libertado neste processo é a água.

O oxigénio necessário para as PC é, frequentemente, obtido diretamente do ar. Quanto ao combustível utilizado para que o processo ocorra, este tem de ser rico em hidrogénio (gás natural, biogás, metanol, etc.), podendo também utilizar hidrogénio no estado puro. Se o hidrogénio for o combustível utilizado, as emissões serão apenas vapor de água e água quente. Caso sejam utilizados hidrocarbonetos, é necessário que este passe por um reformador para se extrair o hidrogénio para alimentação da PC, havendo neste caso a emissão de dióxido de

carbono, monóxido de carbono e outros gases para a atmosfera, resultantes da separação do hidrogénio do hidrocarboneto [35].

As PC podem ter diferentes tamanhos consoante o fim a que se destinam, podendo apresentar potências elétricas reduzidas (para alimentação de computadores, rádios portáteis, etc.) ou potências elétricas mais elevadas (destinadas a servir estações elétricas, por exemplo). Na Figura 2-17 pode ver-se uma pilha de combustível comercializada pela Sulzer Hexis [29].

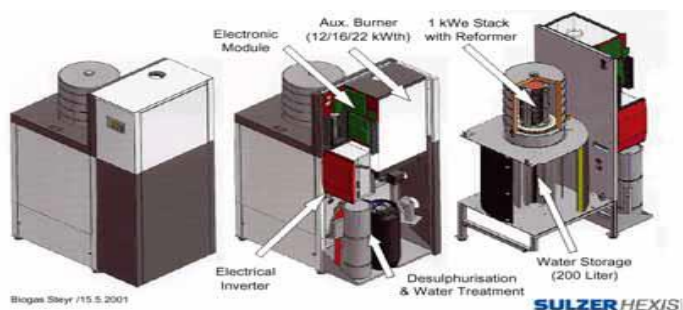


Figura 2-17: Pilha de combustível [29]

## 2.6.2 Comparação entre tecnologias $\mu$ CHP

AOUN [36] efetuou uma comparação entre diferentes tecnologias de  $\mu$ CHP com base nos seguintes critérios:

- Desempenho termodinâmico (rendimento elétrico, térmico e total e poupança de energia primária);
- Viabilidade económica (custos de aquisição e de funcionamento);
- Impactos ambientais (emissões de CO<sub>2</sub>).

O Quadro 2-6 resume os resultados da comparação efetuada por AOUN [36].

Quadro 2-6: Características das diferentes tecnologias de  $\mu$ CHP [36]

Parameter range	ICE	Fuel Cell	Stirling engine	RC-ORC
Electrical capacity (kW <sub>e</sub> )	1-10	0.5-10	1-10	0.5-10
Electrical efficiency (% HHV)	20-40	30-50 PEMFC 40-50 SOFC	10-25 Current 35-50 Possible	10-20
Heat recovery efficiency (% HHV)	50-60	40-60	40-60	N.A.
Temperature of heat available (°C)	85-100	80-100 PEMFC 950-1000 SOFC	200	N.A.
Overall efficiency	80-90	70-90 PEMFC 70-95 SOFC	65-95	N.A.
Thermal output (kW <sub>th</sub> )	3-30	1-30	3-15	N.A.
Availability (%)	85-98	95	85-90	N.A.
Part load performance efficiency?	Good	Best	Better	N.A.
Maintenance cost (€/kWh <sub>e</sub> )	0.008-0.012	0.016-0.024	0.005-0.01	N.A.
Emissions	Low	Lowest	Lower	N.A.
Cost (€/kW <sub>e</sub> )	785-2200	N.A.	N.A.	N.A.
Potential fuel	Diesel, Gas	N.A.	Gas, wood pellets	Diesel, gas, wood pellets, solar

No mesmo trabalho, AOUN [36] apontou ainda outras conclusões importantes relacionadas com a comparação das tecnologias de  $\mu$ CHP, nomeadamente:

- Os motores de combustão interna têm larga experiência, pelo que são produzidos em larga escala, são comercialmente viáveis e apresentam elevados rendimentos térmico e elétrico, mas apresentam um custo de manutenção elevado, bem como elevadas emissões de CO<sub>2</sub>, comparado com os outros sistemas de μCHP.
- Os MS apresentam a vantagem da sua elevada flexibilidade - uma vez que se trata de um motor de combustão externa permite o uso de vários tipos de combustíveis. Este apresenta um rendimento térmico elevado e um rendimento elétrico baixo. Estes equipamentos apresentam o inconveniente dos seus elevados custos iniciais.
- As pilhas de combustível apresentam como vantagem o maior rendimento elétrico e quase zero de emissões de CO<sub>2</sub>. Como inconvenientes apresentam-se os elevados custos iniciais, aliados ao facto de ter um funcionamento contínuo.
- Quanto ao COR, continua em fase de desenvolvimento e apresenta baixas emissões de CO<sub>2</sub> e elevada flexibilidade quanto ao tipo de fonte de energia utilizado.

A Figura 2-18 e a Figura 2-19 permitem comparar diferentes tipos de μCHP no que concerne ao rendimento elétrico e ao investimento em função da potência desenvolvida.

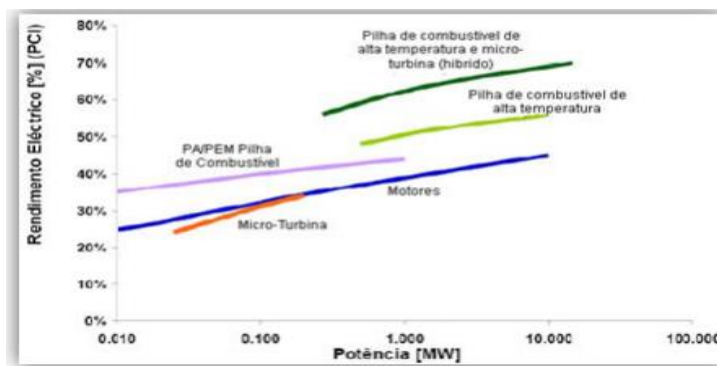


Figura 2-18: Comparação do rendimento elétrico das principais tecnologias de μCHP [37]

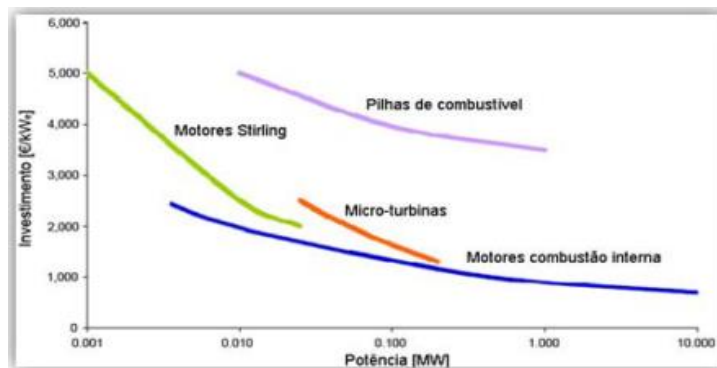


Figura 2-19: Comparação do investimento das principais tecnologias de μCHP [37]

No Quadro 2-7 adaptado de [37], são descritas, resumidamente, as vantagens e os inconvenientes das diferentes tecnologias de μCHP.

Quadro 2-7: Tabela de comparação das diferentes tecnologias de  $\mu$ CHP

Tecnologias	Vantagens	Inconvenientes
Microturbinas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fiabilidade elevada devido a poucas partes móveis;</li> <li>- Instalação simples;</li> <li>- Manutenção reduzida;</li> <li>- Dimensão compacta e peso reduzido;</li> <li>- Níveis de ruído aceitáveis;</li> <li>- Possibilidade de uso de gás natural como combustível e flexibilidade na utilização de outros combustíveis;</li> <li>- Custos competitivos quando construídas em quantidade;</li> <li>- Emissões reduzidas;</li> <li>- Gases de exaustão a temperatura elevada, permitindo a recuperação de calor.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Custos de investimento/aquisição/Manutenção/exploração;</li> <li>- Baixo tempo de vida útil (cerca de 10 anos);</li> <li>- Baixo rendimento elétrico.</li> </ul>
PC	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Emissões reduzidas e baixo ruído.</li> <li>- Rendimento elevado a várias cargas;</li> <li>- Conceção modular, flexibilidade de instalação, tempo de fabrico curto;</li> <li>- Operação automatizada, variações de carga rápidas, baixa manutenção;</li> <li>- Muitos combustíveis, ainda que requerendo processamento, à exceção do hidrogénio puro;</li> <li>- Flexibilidade na razão calor/eletricidade;</li> <li>- Calor de baixo ou alto nível (temperatura), dependendo da conceção e do tipo de pilha de combustível.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Custos de investimento/aquisição, duração, densidade de corrente elétrica, tempo de arranque, degradação;</li> <li>- Corrosão com eletrólitos líquidos.</li> </ul>
MS	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Muita experiência para potências elevadas;</li> <li>- Poucas partes móveis e com baixo atrito;</li> <li>- Sem câmara de combustão interna;</li> <li>- Rendimento teórico elevado;</li> <li>- Produção de eletricidade independente da produção de calor;</li> <li>- Emissões muito reduzidas;</li> <li>- Fácil de controlar;</li> <li>- Pode ser construído como uma unidade substituível.</li> <li>- Utilização com qualquer combustível, dependendo da máquina primária;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pouca experiência na gama das baixas potências;</li> <li>- Baixo rendimento mecânico nas máquinas existentes;</li> <li>- Melhor rendimento para potências superiores (até 3 kW);</li> <li>- Primeiras máquinas muito caras.</li> </ul>
MCI	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tecnologia com muitos anos.</li> <li>- Flexibilidade nas aplicações;</li> <li>- Pequeno tempo de arranque</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elevadas emissões CO<sub>2</sub> e de ruído.</li> <li>- Manutenção dispendiosa e frequente.</li> </ul>

### 2.6.3 Controlabilidade das tecnologias de $\mu$ CHP

O arranque, a paragem e os regimes de variação de carga, são exemplos de controlabilidade. A controlabilidade de unidades de  $\mu$ CHP pode variar significativamente, dependendo da tecnologia e do combustível utilizado.

As microturbinas têm uma baixa eficiência quando funcionam em regime de carga parcial, devido ao longo período transitório até que se atinja o estado permanente de funcionamento [35]. Podem funcionar ininterruptamente ou em períodos bem definidos como, por exemplo, as horas de ponta do sistema elétrico. Para além de terem um tempo de arranque significativo, necessitam, no caso de não estarem ligadas à rede elétrica, de uma fonte de energia para alimentar o compressor na fase de arranque, que tipicamente é uma bateria UPS.

Quanto aos motores de combustão interna, têm uma capacidade de arranque muito rápida, o que os leva a serem utilizados em situações de emergência para produção de eletricidade, possuindo desta forma uma boa controlabilidade. São mais eficientes do que as microturbinas quando há necessidade de funcionar em regime de carga parcial [35].

As pilhas de combustível têm um tempo de resposta no arranque longo, pelo que são utilizadas em aplicações que não necessitem de arranques e paragens frequentes. No entanto, as PC de baixa temperatura necessitam de um tempo de arranque inferior, o que permite uma maior controlabilidade para aplicação na  $\mu$ CHP residencial e na indústria automóvel [35].

Quanto ao MS, sendo um motor de combustão externa caracteriza-se por um funcionamento silencioso e é adequado a regimes de funcionamento com variações de carga reduzidas, apresentando ainda boa capacidade de operar em condições de carga parcial [38]. Trata-se de um motor adequado a sistemas de  $\mu$ CHP, em que o excesso de eletricidade produzida pode ser injetado na rede sem ser necessário proceder a uma modulação no regime de funcionamento. A desvantagem, em termos de controlabilidade, é que não permite arranques imediatos, pois necessita de um período de aquecimento [39]. Esta característica faz com que o melhor desempenho seja conseguido em modo de funcionamento contínuo. Para estar sempre em condições de arranque rápido, era necessário mantê-lo em modo “stand-by”, o que implica maior consumo de energia.

Nas tecnologias utilizando o ORC, tal como acontece no MS, também aqui existe um intervalo de tempo entre o ligar do sistema e a produção efetiva de energia. Desta forma, estes motores são mais indicados para funcionar durante longas horas, evitando custos de funcionamento adicionais.

## 2.6.4 Modos de funcionamento

O modo de funcionamento de um sistema de  $\mu$ CHP caracteriza-se pela forma como a coordenação da produção elétrica e da produção térmica são realizadas. Os modos de funcionamento mais utilizados são os seguintes [37], [40]:

- Funcionamento em função das necessidades elétricas. O sistema de  $\mu$ CHP funciona de forma a satisfazer prioritariamente as necessidades de energia elétrica. Se o calor gerado pelo sistema for inferior às necessidades térmicas, pode utilizar-se uma caldeira adicional ou recorrer-se à energia térmica armazenada num depósito. Se o calor gerado for superior às necessidades térmicas, ocorrerá a sua libertação para a atmosfera ou o seu armazenamento num depósito de AT.
- Funcionamento em função das necessidades térmicas. O sistema de  $\mu$ CHP funciona de forma a satisfazer prioritariamente as necessidades térmicas. Se a eletricidade gerada pelo sistema for inferior às necessidades, será necessário recorrer à rede elétrica. Se a eletricidade gerada for superior às necessidades, o excesso poderá ser vendido à rede elétrica.
- Funcionamento em modo combinado. É possível aplicar modos de funcionamento combinados através de um sistema de gestão de energia que seleciona um modo de funcionamento ótimo, conforme as necessidades específicas. O sistema de  $\mu$ CHP pode funcionar num modo de funcionamento ótimo, obedecendo a alguns critérios, nomeadamente económicos ou ambientais.

## 2.7 Armazenamento térmico

A necessidade de armazenamento de energia térmica está, usualmente, ligada a um dos seguintes casos [41]:

- Existência de desfasamento entre o momento da produção e o momento do consumo da energia térmica;
- Utilização de fontes de energia intermitentes;
- Compensação da flutuação solar nos sistemas de aquecimento solar;

Existem diferentes soluções técnicas para efetuar armazenamento de energia térmica, destacando-se dois grupos fundamentais conforme o esquema ilustrado na Figura 2-20 [42]: armazenamento térmico e armazenamento termoquímico.



Figura 2-20: Armazenamento de energia térmica

O armazenamento termoquímico é uma forma indireta de armazenamento de calor, envolvendo processos químicos. Este tipo de armazenamento socorre-se de materiais que têm a capacidade de absorver ou libertar a energia térmica a uma temperatura constante, à qual ocorre mudança de fase. O processo de armazenamento assenta, portanto, na absorção ou libertação de energia térmica que ocorre na quebra e na formação de ligações moleculares durante uma reação química reversível. O calor armazenado depende da substância que armazena a energia, do calor da reação e do grau de conversão da mesma. Estes sistemas de armazenamento são constituídos por um fluido (geralmente a água) e um material adsorvente (por exemplo a silicagel). O adsorvente liberta vapor de água quando aquecido e liberta calor quando o vapor de água é adsorvido (no caso de materiais sólidos) ou absorvido (no caso de materiais líquidos) [42].

O armazenamento térmico recolhe a energia sob a forma de calor, subdividindo-se em armazenamento na forma de calor sensível e de calor latente. No caso dos sistemas de armazenamento térmico baseados no armazenamento sob a forma de calor latente, o processo assenta no calor absorvido ou libertado quando a substância que armazena a energia sofre mudança de fase: sólido-líquido ou líquido-gasoso.

No caso dos sistemas de armazenamento de calor sensível, a energia térmica é guardada através do aumento da temperatura de um sólido ou líquido. A quantidade de calor armazenado depende do calor específico do meio, da temperatura e da quantidade da substância que suporta o armazenamento. Os depósitos de água quente são o processo mais comum e barato de fazer armazenamento de energia térmica deste tipo.

A energia armazenada num determinado volume de água (ou outro fluído) pode ser obtida pela equação (2-1):

$$E = m \times C_p \times \Delta T \quad (2-1)$$

Onde:

E é a energia térmica armazenada em J

m é a massa da água, em kg

$C_p$  é o calor específico da água, em  $J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$

$\Delta T$  é a diferença entre os extremos da temperatura, em  $^{\circ}C$

Atendendo a que a capacidade do depósito pode ser medida em  $m^3$ , e a que  $\rho = \frac{m}{V}$ , a Equação (2-1) pode tomar o aspeto que se mostra na equação (2-2).

$$E = V \times \rho \times C_p \times \Delta T \quad (2-2)$$

Onde:

$V$  é o volume do depósito, em  $m^3$

$\rho$  é a densidade da água, em  $kg.m^{-3}$

Os sistemas de armazenamento de energia térmica baseados na água representam os sistemas com a maior vida útil de todos os sistemas de armazenamento. Estes sistemas têm uma duração média de vida útil à volta dos 20 a 30 anos, podendo funcionar diariamente durante várias horas e sem necessitarem de manutenção. Adicionalmente, esta alternativa de armazenamento pode aproveitar sistemas antigos de aquecimento já instalados [42]. A grande e porventura única desvantagem dos sistemas de armazenamento deste tipo reside na necessidade de grandes volumes de armazenamento (dependendo da aplicação), levando à necessidade de grandes depósitos e, por conseguinte, grandes espaços. Na Figura 2-21 mostra-se o maior depósito de armazenamento de energia térmica do mundo, construído pela empresa Chicago Bridge & Iron (CB&I) para a *Texas Medical Center Heating and Cooling Services Corporation* (TECO), nos Estados Unidos da América.

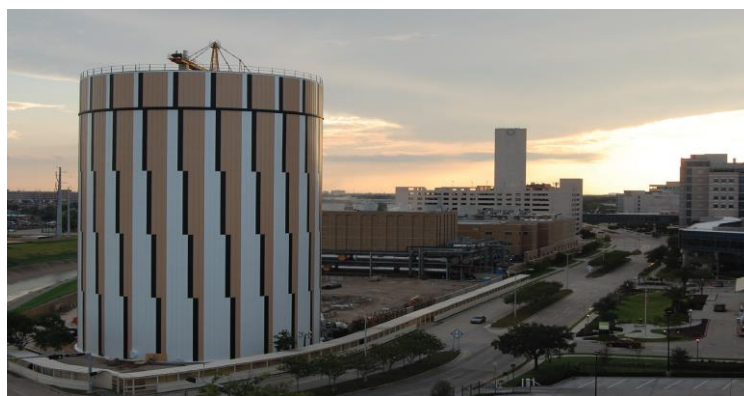


Figura 2-21: Maior depósito de armazenamento de energia térmica do mundo [43].

No Quadro 2-8, a título de curiosidade, podemos comparar a densidade de armazenamento de vários sistemas de armazenamento térmico [42], constatando-se que os sistemas baseados no calor sensível são aqueles que apresentam a menor densidade de energia armazenada por  $m^3$ . O parâmetro “fator” da terceira coluna do Quadro 2-8 serve para comparar os sistemas de armazenamento, tomando como referência a energia armazenada sob a forma de calor sensível, na água.

Quadro 2-8: Densidade de armazenamento de energia térmica [42].

Sistema de armazenamento	Densidade de energia armazenada (kWh/m <sup>3</sup> )	Factor
Calor sensível (Água*)	60	1
Calor latente	50-120	1-2
Processos de adsorção	120-180	2-3
Reacções	200-600	4-10

(\* com  $\Delta T = 50K$ )

O armazenamento de energia térmica, independentemente do sistema utilizado, permite que os sistemas de  $\mu$ CHP possam produzir energia eléctrica em períodos em que a energia térmica não é necessária levando, portanto, ao desacoplamento entre as necessidades de energia térmica e eléctrica. Este facto pode ser explorado no sentido de permitir às unidades de  $\mu$ CHP uma produção de eletricidade em períodos mais adequados do ponto de vista das redes eléctricas.

## 3. Modelização do sistema térmico

### 3.1 Introdução

Como anteriormente referido, apesar de a cogeração ser já uma tecnologia madura, os sistemas  $\mu$ CHP são relativamente recentes. Estes sistemas, tal como a cogeração, são multifuncionais no sentido em que simultaneamente produzem energia térmica para aquecimento de espaços e de AQS e energia elétrica, que pode ser autoconsumida ou injetada nas redes elétricas, geralmente em baixa tensão. Esta produção simultânea faz com que a satisfação das necessidades térmicas de edifícios por meio de unidades  $\mu$ CHP tenha influência nas redes elétricas. Com efeito, os momentos em que as unidades  $\mu$ CHP operam e a potência elétrica que desenvolvem e injetam na rede influenciam os trânsitos de potência nas redes elétricas e, por consequência, aspetos como o valor das perdas e o diferimento de investimentos. Efetivamente, os efeitos nas redes elétricas tendem a ser tanto mais favoráveis quanto maior for a coincidência entre a operação dos sistemas  $\mu$ CHP e os períodos de maior carga das redes elétricas.

Neste contexto, a modelização matemática de sistemas  $\mu$ CHP com e sem armazenamento térmico é um aspeto crucial para se compreender o comportamento destes sistemas, bem como a potencial influência nas redes elétricas. Nas secções seguintes procede-se à apresentação da modelização referida.

### 3.2 Sistema sem armazenamento térmico

A Figura 3-1 ilustra o esquema considerado na modelização do sistema de aquecimento central dotado de unidade de  $\mu$ CHP e sem armazenamento térmico. Neste caso, a unidade  $\mu$ CHP funciona de forma a satisfazer as necessidades térmicas à medida que estas se verificam, não existindo portanto armazenamento de energia térmica. Note-se que as necessidades de energia térmica correspondentes ao aquecimento de espaços e à produção de AQS são, neste modelo, tratadas conjuntamente (ou seja,  $P_{thcons}$  inclui ambas as necessidades). Adicionalmente considera-se que as perdas térmicas (nomeadamente as que se referem às tubagens) estão também incluídas no valor  $P_{thcons}$ .

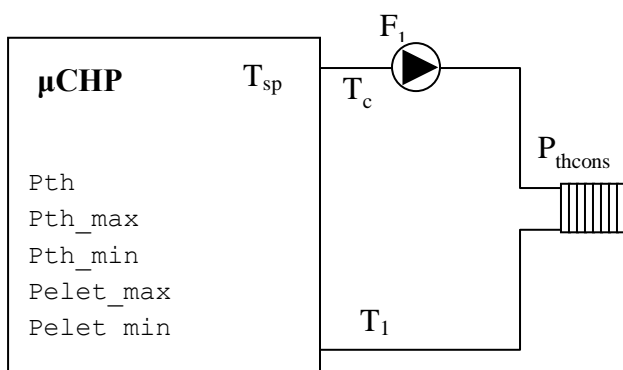


Figura 3-1: Esquema do sistema dotado de  $\mu$ CHP sem AT

A operação da unidade  $\mu$ CHP é determinada, portanto, pela existência de necessidades térmicas, sendo a energia elétrica produzida como um subproduto da produção da energia térmica. Nestas condições o funcionamento da unidade  $\mu$ CHP é determinado pela Equação (3-1).

$$F = \begin{cases} 0 & \text{se } P_{thcons} < P_{thchp}^{min} \\ 1 & \text{se } P_{thcons} \geq P_{thchp}^{min} \end{cases} \quad (3-1)$$

Onde:

$F$  representa o estado da unidade de  $\mu$ CHP, ou seja,  $F=0$  a unidade está parada e  $F = 1$  a unidade está em funcionamento.

$P_{thcons}$  representa a potência térmica consumida na instalação alimentada pela unidade  $\mu$ CHP, em kW

$P_{thchp}^{min}$  representa a potência térmica mínima que a unidade  $\mu$ CHP pode produzir, em kW

A potência térmica desenvolvida pela unidade de  $\mu$ CHP,  $P_{th}$ , é obtida pela equação (3-2).

$$P_{th} = \begin{cases} 0 & \text{se } F = 0 \\ \frac{F_1 \times \rho \times C_p \times (T_c - T_1)}{1000} & \text{se } F = 1 \text{ e } \frac{F_1 \times \rho \times C_p \times (T_c - T_1)}{1000} \geq P_{th}^{min} \\ P_{th}^{max} & \text{se } F = 1 \text{ e } \frac{F_1 \times \rho \times C_p \times (T_c - T_1)}{1000} \geq P_{th}^{max} \end{cases} \quad (3-2)$$

Onde:

$P_{th}$  é a potência térmica desenvolvida pela unidade de  $\mu$ CHP, em kW

$F_1$  é o caudal do fluido que sai da  $\mu$ CHP para o aquecimento, em  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

$\rho$  é a densidade do fluido em  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

$C_p$  é o calor específico da água, em  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$

$T_c$  é a temperatura do fluido à saída da unidade de  $\mu$ CHP, em  $^\circ\text{C}$

$T_1$  é a temperatura do fluido de retorno à unidade de  $\mu$ CHP, em  $^\circ\text{C}$

$P_{th}^{min}$  representa a potência térmica mínima que a unidade  $\mu$ CHP pode produzir, em kW

$P_{th}^{max}$  representa a potência térmica máxima que a unidade  $\mu$ CHP pode produzir, em kW

Sendo conhecida a potência térmica desenvolvida pela  $\mu$ CHP, a temperatura do fluido à saída desta unidade,  $T_c$ , pode ser obtida pela Equação (3-3).

$$T_c = \begin{cases} \frac{P_{th} \times 1000}{F_1 \times \rho \times C_p} + T_1 & \text{se } \frac{P_{th} \times 1000}{F_1 \times \rho \times C_p} + T_1 \leq T_{sp} \\ T_{sp} & \text{se } \frac{P_{th} \times 1000}{F_1 \times \rho \times C_p} + T_1 > T_{sp} \end{cases} \quad (3-3)$$

Onde:

$T_{sp}$  representa a temperatura de “set point” da  $\mu$ CHP, em  $^\circ\text{C}$

A temperatura de retorno à unidade  $\mu$ CHP,  $T_1$ , após passar no circuito de consumo, é dada pela Equação (3-4).

$$T_1 = T_c - \frac{P_{thcons} \times 1000}{F_1 \times \rho \times C_p} \quad (3-4)$$

Onde:

$P_{thcons}$  é a potência térmica consumida na habitação, em kW

A potência elétrica produzida na unidade de  $\mu$ CHP depende, geralmente, do regime de carga, em termos de potência térmica. Naturalmente que, para diferentes unidades de  $\mu$ CHP, poderão existir diferentes relações entre as potências elétrica e térmica geradas. A Figura 3-2 mostra uma hipotética relação (não linear) entre as potências elétrica e térmica. Neste caso concreto, a potência elétrica produzida ( $P_{elet}$ ) em kW, poderia ser obtida pela Equação (3-5).

$$P_{elet} = -4 \times 10^{-5} P_{th}^3 - 0.0062 P_{th}^2 + 0.3839 P_{th} + 0.3064 \quad (3-5)$$

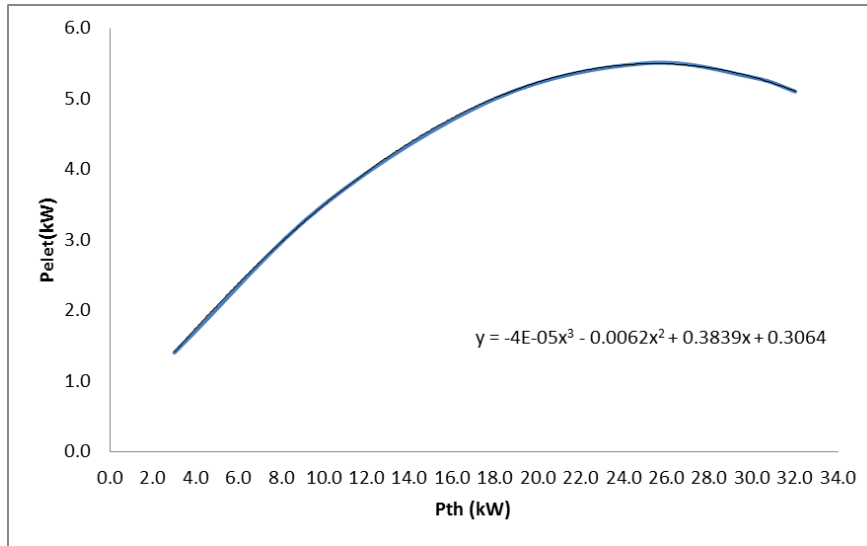


Figura 3-2: Curva que relaciona as potências elétrica e térmica

As energias térmica ( $W_{th}$ ) e elétrica ( $W_{elet}$ ) produzidas pela unidade  $\mu$ CHP num determinado período temporal são obtidas através da integração no tempo das respectivas potências térmica e elétrica, de acordo com as Equações (3-6) e (3-7), respetivamente.

$$W_{th} = \int P_{th} dt \quad (3-6)$$

$$W_{elet} = \int P_{elet} dt \quad (3-7)$$

Note-se que, para um período temporal bem definido de duração  $\Delta t$  segundos, em que se possa assumir como constantes todos os parâmetros que influenciam o valor de  $W_{th}$ , esta energia pode ser determinada, em kWh, pela Equação (3-8).

$$W_{th} = \frac{F_1 \times \rho \times C_p \times (T_c - T_1) \times \Delta t}{3600} \quad (3-8)$$

Onde:

$F_1$  representa o caudal à saída da  $\mu$ CHP, em  $m^3 \cdot s^{-1}$

A energia consumida pela unidade de  $\mu$ CHP é condicionada pelo respetivo rendimento, o qual, geralmente, depende do regime de carga a que o sistema está sujeito em cada momento, a qual pode ser determinada através da Equação (3-9).

$$W_{abs} = \frac{W_{th} + W_{elet}}{\eta} \quad (3-9)$$

Onde:

$\eta$  é o rendimento total da unidade de  $\mu$ CHP

$W_{abs}$  é a energia consumida pela  $\mu$ CHP, em kWh

Uma vez mais, diferentes tipos de unidades de  $\mu$ CHP tendem a apresentar diferentes curvas de rendimento. A Figura 3-3 mostra uma curva exemplificativa do comportamento do rendimento de uma unidade  $\mu$ CHP em função da potência térmica gerada.

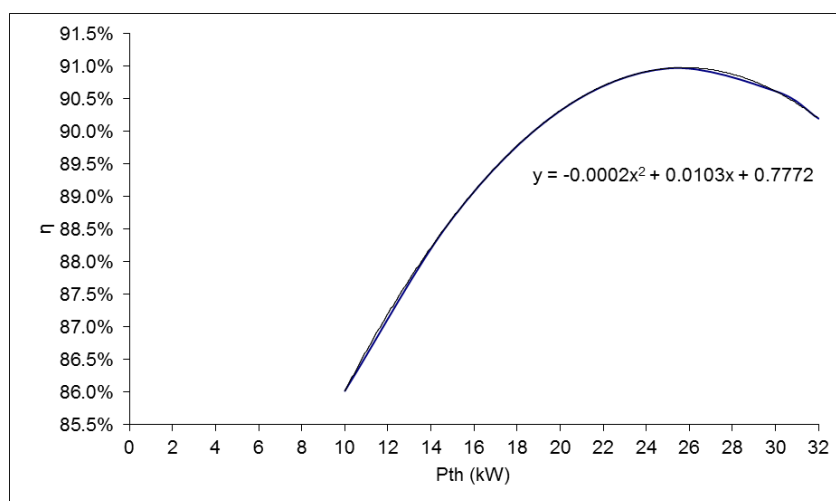


Figura 3-3: Curva que relaciona o rendimento em função da potência térmica

### 3.2.1 Sistema com armazenamento térmico

A Figura 3-4 ilustra o esquema considerado na modelização do sistema de aquecimento central dotado de unidade de  $\mu$ CHP e com armazenamento térmico. Note-se que a modelização exposta em seguida considera, tal como no caso anterior, considera que as necessidades de energia térmica correspondentes ao aquecimento de espaços e à produção de AQS, bem como as perdas nas tubagens a jusante do depósito de AT, estão incluídas no valor  $P_{thcons}$ . As perdas nas tubagens entre a unidade  $\mu$ CHP e o depósito e também as perdas do próprio depósito assumem-se como desprezáveis. O modelo que em seguida se apresenta assume ainda que o depósito de AT está sempre cheio e com uma determinada pressão (circuito fechado) e que a temperatura da água no seu interior é uniforme.

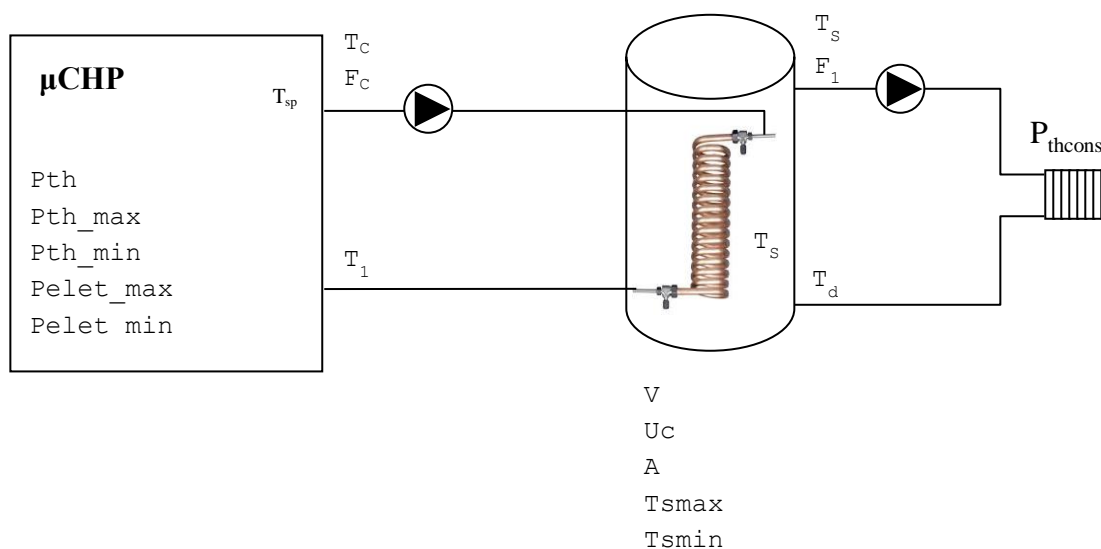


Figura 3-4: Esquema do sistema de  $\mu$ CHP com AT

Neste caso, a unidade  $\mu$ CHP funciona de forma a satisfazer as condições impostas para a temperatura no depósito de AT. Significa isto que a unidade  $\mu$ CHP funcionará de forma a manter a temperatura no depósito de AT na gama de temperaturas definida por  $[T_{smin}; T_{smax}]$ , pelo que esta unidade apenas entra em funcionamento quando a temperatura no AT for inferior a  $T_{smin}$ . O valor  $T_{smin}$  é determinado pela temperatura mínima admissível para o circuito de aquecimento, para que se garanta uma adequada transferência de calor (por exemplo, em aquecimento com radiadores, este valor poderá ser  $65^\circ\text{C}$ ). O valor  $T_{smax}$  é definido tendo em consideração as temperaturas máximas admissíveis no circuito de aquecimento e no depósito de AT, bem como a máxima temperatura que a unidade  $\mu$ CHP pode garantir na água que sai em direção ao depósito.

Para o armazenamento térmico considera-se, neste trabalho, um depósito dotado de serpentina permutadora de calor, na qual, em circuito fechado, circula o fluido entre a unidade de  $\mu$ CHP e o depósito. Desta forma, entre a unidade de  $\mu$ CHP e o depósito de armazenamento existe um circuito primário fechado, uma vez que não existe troca de massa. O fluido que circula neste circuito (neste trabalho a água) absorve calor ao passar pela caldeira da unidade de  $\mu$ CHP e, através da serpentina transfere-o para a água do depósito de AT. Esta água é posteriormente utilizada para satisfação das necessidades térmicas de forma direta e também em circuito fechado, tal como ilustra a Figura 3-4.

A arquitetura aqui proposta é uma solução simples e realista, adaptada do trabalho de Buzas [44] permitindo a simulação do comportamento do sistema de  $\mu$ CHP em função das diferentes necessidades térmicas (aquecimento ambiente e AQS) do edifício.

A Equação (3-10) permite determinar o funcionamento da unidade de  $\mu$ CHP, tendo em consideração as condições acima referidas.

$$F = \begin{cases} 0 & \text{se } T_s \geq T_{smax} \\ 1 & \text{se } T_s < T_{smin} \end{cases} \quad (3-10)$$

Note-se que a unidade  $\mu\text{CHP}$ , uma vez ligada, permanece em funcionamento até que o valor  $T_{smax}$  seja atingido no depósito de AT.

A variação da temperatura da água no depósito de AT depende, por um lado, da energia térmica transferida da unidade  $\mu\text{CHP}$  para o depósito e, por outro, da energia que é extraída pelo circuito de consumo de energia térmica. Esta variação pode ser calculada utilizando a Equação (3-16).

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{F_C \times (T_C - T_1) + F_1 \times (T_d - T_s)}{V} \quad (3-11)$$

Onde:

$dT_s / dt$  é a variação diferencial da temperatura em ordem ao tempo, em  $^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ .

$V$  é o volume do depósito, em  $\text{m}^3$ .

$F_C$  é o caudal do fluido que circula no circuito entre a unidade de  $\mu\text{CHP}$  e a serpentina instalada no depósito, em  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

$T_C$  é a temperatura do fluido à saída da unidade de  $\mu\text{CHP}$ , em  $^{\circ}\text{C}$ .

$T_1$  é a temperatura do fluido de retorno à  $\mu\text{CHP}$ , em  $^{\circ}\text{C}$ .

$F_1$  é o caudal do fluido sai do depósito de AT para o aquecimento, em  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

$T_d$  é a temperatura de retorno do fluido ao depósito AT, vindo do aquecimento, em  $^{\circ}\text{C}$ .

$T_s$  é a temperatura do fluido no depósito de AT, em  $^{\circ}\text{C}$ .

A temperatura à saída da caldeira,  $T_C$ , é dada pela Equação (3-12).

$$T_C = \frac{P_{th} \times 1000}{F_C \times \rho \times C_p} + T_1 \quad (3-12)$$

Onde:

$P_{th}$  é a potência térmica desenvolvida pela caldeira, em kW

$\rho$  é a densidade do fluido do circuito entre a  $\mu\text{CHP}$  e a serpentina do AT, em  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

$C_p$  é o calor específico do fluido do circuito entre a  $\mu\text{CHP}$  e a serpentina, em  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$

$T_1$  é a temperatura do fluido à entrada da caldeira (proveniente da serpentina), em  $^{\circ}\text{C}$

A temperatura do fluido que regressa da serpentina,  $T_1$ , é determinada pelas condições de permutação na serpentina e pela temperatura do fluido à estrada desta, e pode ser obtido através da Equação (3-13).

$$T_1 = (T_C - T_s) \times e^{-\frac{U_C \times A}{F_C \times \rho \times C_p}} + T_s \quad (3-13)$$

Onde:

$U_C$  é o coeficiente global de transferência de calor na serpentina, em  $W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}$   
 $A$  é a área da superfície de transferência de calor da serpentina, em  $m^2$ .

Como facilmente se depreende das Equações (3-12) e (3-13), o cálculo de  $T_1$  e de  $T_C$  são interdependentes. Contudo, a obtenção dos seus valores é possível utilizando períodos temporais (com duração adequada), os quais permitem utilizar o valor de  $T_1$  do período  $t$  para obter o valor  $T_C$  do período  $t+1$ . O valor inicial de  $T_1$  pode ser aproximado como sendo a  $T_S$ , particularmente se o volume do fluido no circuito entre a unidade  $\mu$ CHP e o depósito de AT for reduzido. Ou seja,  $T_1$  iguala a temperatura do fluido existente no AT no qual a serpentina está mergulhada. Naturalmente, outro valor mais adequado pode ser selecionado.

O valor  $T_d$  correspondente à temperatura do fluido que entra no depósito de AT após ter passado no circuito de consumo de energia térmica, pode ser obtido pela Equação (3-14).

$$T_d = T_S - \frac{P_{thcons} \times 1000}{F_1 \times \rho \times C_p} \quad (3-14)$$

Onde:

$T_d$  é a temperatura de retorno ao depósito de AT, em  $^{\circ}C$   
 $P_{thcons}$  é a potência térmica consumida na habitação, em kW  
 $F_1$  é o caudal da água para as necessidades térmicas da habitação, em  $m^3.s^{-1}$

Note-se que o cálculo de  $T_d$  para um determinado período  $t$  pode ser efetuado utilizando o valor  $T_S$  do período  $t-1$ , ou seja, a temperatura a que o fluido sai do depósito de AT para o circuito de aquecimento.

As energias térmicas e elétrica produzidas pela unidade  $\mu$ CHP num determinado período temporal, bem como a energia consumida pela unidade de  $\mu$ CHP, podem ser determinadas da mesma forma que a indicada na secção anterior pelas expressões (3-6) a (3-9).

O valor máximo de energia térmica armazenada no depósito de AT ( $W_{Dep}$ ), em kWh, pode ser obtido pela equação (3-15).

$$W_{Dep} = \frac{V \times C_p \times (T_{Smax} - T_{Smin})}{3600} \quad (3-15)$$

Onde:

$T_{Smax}$  é a temperatura máxima admissível no depósito de AT, em  $^{\circ}C$   
 $T_{Smin}$  é a temperatura mínima admissível no depósito de AT, em  $^{\circ}C$   
 $V$  é o volume do depósito de AT, em  $m^3$ .

Naturalmente, a energia armazenada no depósito de AT ( $W_{Dep}$ ) varia ao longo do tempo em função da produção na unidade de  $\mu$ CHP e do consumo no circuito de aquecimento. A Equação (3-16) permite calcular a energia que, em cada momento, se encontra armazenada no depósito.

$$W_{Dep} = \frac{V \times C_p \times (T_S - T_{S\_min})}{3600} \quad (3-16)$$

O valor  $T_S$  varia ao longo do tempo em função da energia que é carregada ou extraída do depósito de AT. O valor da variação diferencial é dado pela equação (3-17). Num determinado período de tempo  $\Delta t$ , em segundos, a variação em  $^{\circ}\text{C}$  da temperatura no depósito,  $\Delta T_S$ , pode ser obtido através da equação (3-17).

$$\Delta T_S = \frac{F_C \times (T_C - T_1) + F_1 \times (T_d - T_S)}{V} \times \Delta t \quad (3-17)$$

Naturalmente que esta equação apenas é aplicável se for assumida a condição de que todos os valores que influenciam  $\Delta T_S$  são constantes no período  $\Delta t$ . A temperatura da água no final do período  $\Delta t$  pode ser obtida somando  $\Delta T_S$  ao valor de  $T_S$  do período anterior a  $\Delta t$ .

A energia em kWh que num determinado período de tempo  $\Delta t$ , em horas, é armazenada no depósito de AT ( $W_{arm}$ ) é dada pela equação (3-18).

$$W_{arm} = \frac{F_C \times \rho \times V \times C_p \times (T_C - T_1) \times \Delta t}{1000} \quad (3-18)$$

## 4. Casos de estudo

### 4.1 Generalidades

Com base na formulação matemática apresentada no capítulo anterior, foi desenvolvida uma ferramenta de simulação capaz de permitir uma simulação das condições de funcionamento de uma unidade de  $\mu$ CHP em sistemas de aquecimento central com e sem armazenamento térmico.

As simulações efetuadas permitem prever o regime de operação da  $\mu$ CHP no que se refere ao perfil de produção térmica e elétrica. No caso do perfil elétrico, a sua importância prende-se com a compreensão dos potenciais impactos que os sistemas  $\mu$ CHP poderão ter nos aspetos técnicos e económicos dos sistemas elétricos. No que se refere aos aspetos técnicos, destacam-se os impactos nas perdas e no diferimento de investimentos nas redes ou a contribuição para a capacidade de cobertura do sistema. No que concerne aos aspetos económicos, importa relevar o potencial impacto que múltiplas unidades de  $\mu$ CHP poderão produzir no mercado de eletricidade.

A avaliação deste tipo de impactos impõe o conhecimento do comportamento típico das unidades de  $\mu$ CHP, nomeadamente no que se refere ao seu perfil de produção elétrica. Note-se, por exemplo, que a redução de perdas nas redes ou a contribuição para a capacidade de cobertura dos sistemas elétricos são tanto mais acentuados quanto melhor for a coincidência entre a ponta de carga das redes e/ou do sistema elétrico e a ponta do perfil de produção da unidade de  $\mu$ CHP. A Figura 4-1 mostra um diagrama de carga de um dia de inverno para a rede elétrica portuguesa em 2012. A análise desta figura mostra que uma ponta do consumo ocorre por volta das 11h45m e outra ponta (máxima) de consumo ocorre por volta das

19h45m. Os benefícios para o sistema elétrico produzidos pelas unidades  $\mu$ CHP tendem, portanto, a ser mais significativos se a respetiva operação ocorrer nestes períodos.

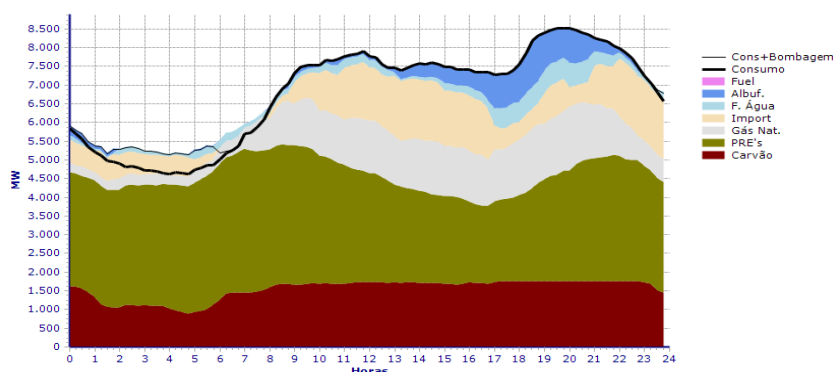


Figura 4-1: Diagrama de carga para um dia típico (13-02-2012)[45]

Neste contexto, o armazenamento de energia térmica poderá ser uma solução interessante, particularmente se permitir armazenar a energia térmica produzida em períodos de maior carga das redes elétricas para satisfazer os consumos que ocorrem no período de vazio / super vazio do diagrama de carga elétrico.

Do ponto de vista do consumidor-produtor, a produção da energia térmica em horários coincidentes com as pontas do diagrama de carga do sistema elétrico poderá também ser vantajosa, já que a energia elétrica produzida tende a ser mais valorizada.

## 4.2 Dados utilizados

### 4.2.1 Perfis de consumo de energia térmica

A obtenção de um perfil típico de consumo térmico é uma tarefa complexa, não existindo muita informação disponível sobre este assunto (perfil de consumo com discretização em períodos de 15 minutos, por exemplo). Neste trabalho, utilizam-se os perfis apresentados em [46], que se referem ao consumo de energia térmica, em dias de inverno, numa vivenda unifamiliar localizada em Viseu. O Quadro 4-1 mostra os valores médios da energia consumida diariamente, obtidos em [46], em função do valor médio da temperatura exterior.

A Figura 4-2, a Figura 4-3 e a Figura 4-4 mostram três dos catorze perfis típicos obtidos em [46], discretizados em períodos de 15 minutos.

Note-se que, para efeitos de aplicação nas simulações que em seguida se apresentam, os perfis térmicos foram convertidos para discretizações em períodos de tempo de 1 minuto (a potência média de cada intervalo de 15 minutos foi atribuída a cada minuto desse intervalo).

Quadro 4-1: Energia térmica consumida em função da temperatura exterior

Temperatura média no exterior em °C	Energia consumida em kWh	Perfil Térmico
2	192,8	1
4	166,6	2
5	181,4	3
6	128,1	4
7	125,2	5
8	99,9	6
9	85,1	7
10	69,7	8
11	66,1	9
12	65,6	10
13	53,3	11
14	37,8	12
15	68,9	13
16	45,7	14

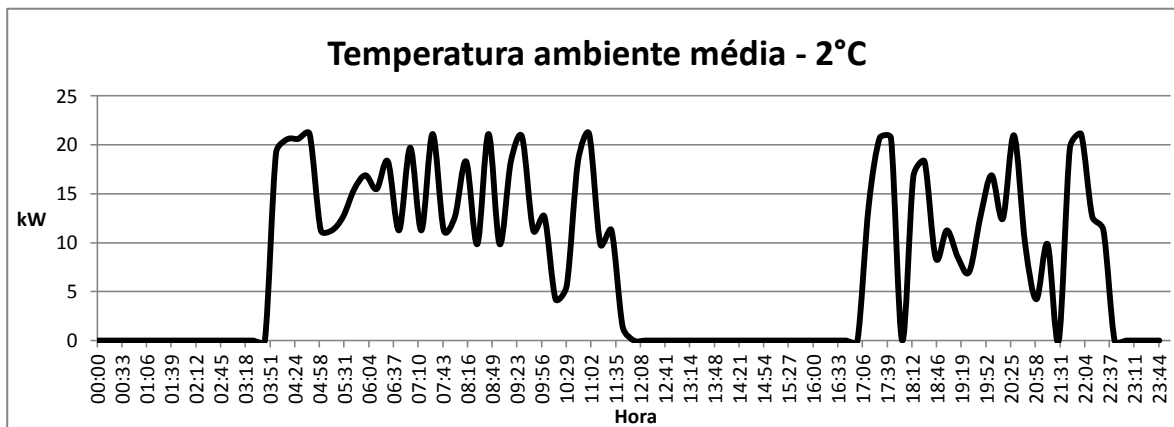


Figura 4-2: Perfil típico de consumo para uma temperatura exterior de 2°C

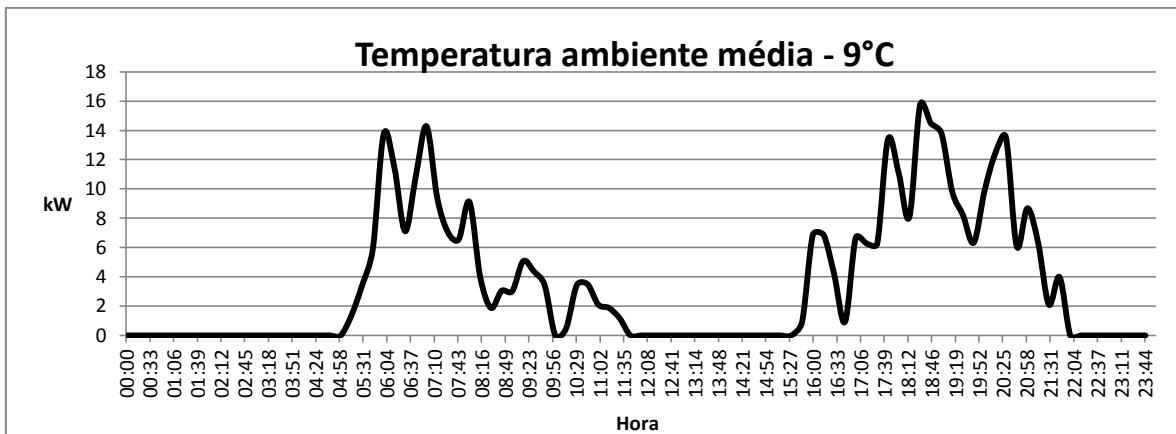


Figura 4-3: Perfil típico de consumo para uma temperatura exterior de 9°C

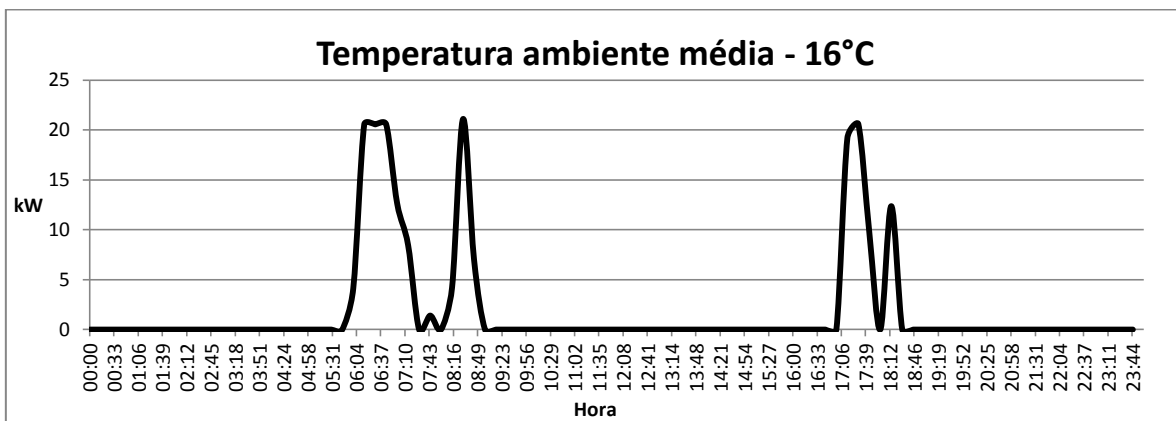


Figura 4-4: Perfil típico de consumo para uma temperatura exterior de 16°C

### 4.2.2 Características da unidade de $\mu$ CHP

As características da unidade de  $\mu$ CHP para efeitos do presente trabalho, são as que se apresentam no Quadro 4-2.

Quadro 4-2: Características da unidade de  $\mu$ CHP

Pth (kW)	3.0	10.0	18.0	25.0	30.0	32.0
Pelet (kW)	1.4	3.5	5.0	5.5	5.3	5.1
Ptotal (kW)	4.4	13.5	23.0	30.5	35.3	37.1
Pabsorvida (kW)	5.5	15.7	25.6	33.5	39.0	41.1
n	80.6%	86.0%	89.8%	91.0%	90.6%	90.2%

A Figura 4-5 e a Figura 4-6 mostram, respetivamente, a relação entre as potências elétrica e térmica gerada pela unidade de  $\mu$ CHP utilizada nas simulações, bem como o rendimento desta unidade em função da potência térmica gerada.

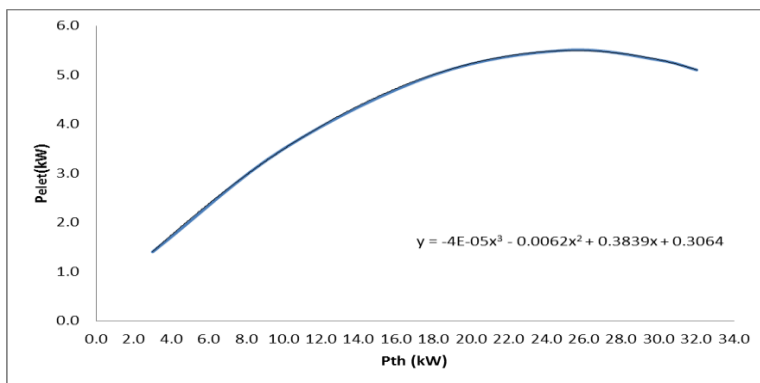


Figura 4-5: Curva da relação entre as potências elétrica e térmica gerada pela μCHP

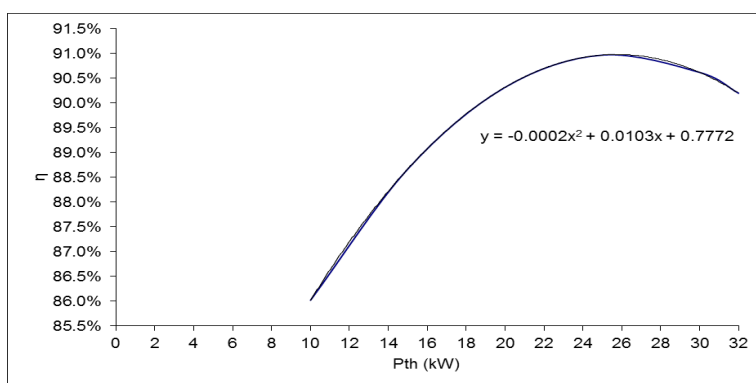


Figura 4-6: Curva da relação entre o rendimento e a potência térmica gerada pela μCHP

### 4.2.3 Características do depósito de armazenamento térmico

As características do sistema AT são apresentadas no Quadro 3-3.

Quadro 4-3: Características do sistema de armazenamento térmico

Sistema de Armazenamento Térmico (AT)		
Volume	1 – 3	m <sup>3</sup>
Área da serpentina	7,3	m <sup>2</sup>
Coefficiente de transferência de calor	250	w.m <sup>-2</sup> .k <sup>-1</sup>
Temperatura máxima	80	°C
Temperatura mínima	65	°C
Temperatura inicial	20/65	°C

### 4.2.4 Aproximações efetuadas

Com a finalidade de tornar possível o desenvolvimento e a concretização do modelo, foram efetuadas algumas aproximações, nomeadamente:

- admite-se que caldeira tem de imediato disponível a potência térmica total, o que pode não acontecer em alguns sistemas como, por exemplo, os alimentados a pellet.

- no sistema direto (sem AT) admite-se uma modelização simplista para traduzir o efeito produzido pelo aquecimento da água existente (admitiu-se um valor de 100 litros) no circuito de aquecimento no momento do arranque a frio do sistema de  $\mu$ CHP (tubagens, radiadores, caldeira). O modelo simplista assume que a água entra à temperatura  $T_0 = 20^\circ\text{C}$  até que todo o volume de água passe na caldeira após o arranque desta. No sistema com AT admite-se que  $T_0 = T_s$ .

- Não se considera um modelo que traduza o real abaixamento da temperatura da água após paragem do sistema de  $\mu$ CHP (admite-se que quando a caldeira fica mais que 3 horas parada a água no circuito fica com  $T=20^\circ\text{C}$ ). No sistema direto se a caldeira pára meia hora a temperatura que considera no arranque é de  $20^\circ\text{C}$  nos sistemas com AT., a caldeira considera a última temperatura do depósito.

### 4.3 Caso de estudo 1 - Sistema sem armazenamento e sem otimização

A Figura 4-7 mostra o esquema de funcionamento e algumas características para o presente caso de estudo. As restantes condições de funcionamento são as que constam do subcapítulo 4.2.

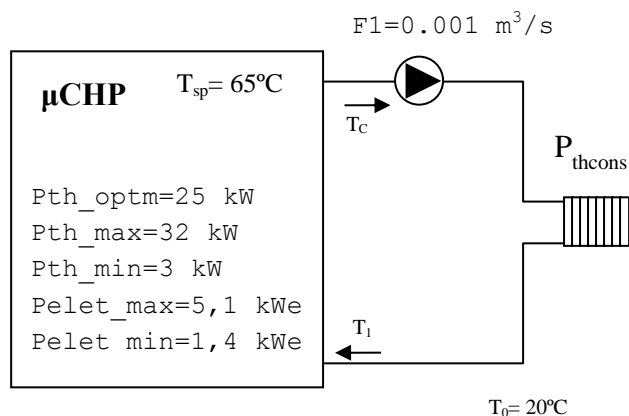


Figura 4-7: Esquema para o sistema sem AT e sem otimização

Os perfis de consumo térmico adotados foram os perfis apresentados anteriormente através da Figura 4-2, da Figura 4-3 e da Figura 4-4.

Com base no modelo e informação apresentados anteriormente verificou-se o seu comportamento para vários dias típicos, de forma a satisfazer as necessidades térmicas de consumo da habitação.

### 4.3.1 Resultados obtidos e análise

Os resultados obtidos na simulação do modelo são os que constam do Quadro 4 – 4.

Quadro 4-4: Resultados para os diferentes perfis de consumo-Caso de estudo 1

Perfil consumo	Energia térmica (kWh)		Energia elétrica (kWh)	Energia absorvida (kWh)	$\eta$ médio (%)
	Consumida	Produzida			
1	192,8	205,3	57,0	295,6	88,7
2	166,6	180,0	53,0	265,3	87,8
3	181,4	194,2	54,6	281,4	88,4
4	128,1	141,0	39,8	204,8	88,2
5	125,2	138,8	45,5	213,1	86,5
6	99,9	113,5	38,1	176,8	85,8
7	85,1	100,8	34,6	158,6	85,4
8	69,6	88,8	30,9	140,9	84,9
9	66,1	83,6	28,4	131,1	85,4
10	65,6	79,7	27,2	125,5	85,2
11	53,3	67,0	21,0	101,8	86,4
12	37,8	52,4	15,5	78,6	86,4
13	68,9	82,5	21,6	119,0	87,5
14	45,7	58,3	15,7	84,5	87,6

Analisando o Quadro 4 - 4, podemos constatar que:

- a diferença entre a energia produzida e a energia consumida na habitação varia entre o valor mínimo de 12,5 kWh (6,5% em relação à energia consumida) para o perfil de consumo 1 e o valor máximo de 19,2 kWh (27,6%) para o perfil de consumo 8. Esta diferença prende-se com a energia gasta para aquecer o volume de água do circuito de aquecimento (100 litros), após o arranque do sistema de  $\mu$ CHP, desde os 20°C até aos 65°C;

- o rendimento médio do sistema  $\mu$ CHP varia entre 84,9%, para o perfil de consumo 8 e 88,7% para o perfil de consumo 1.

- para o perfil de consumo 1 o rendimento médio foi de 88,7%. Para este dia típico a evolução do rendimento total da  $\mu$ CHP é a que se mostra na Figura 4-8, onde se pode verificar que o rendimento varia ao longo do tempo, de acordo com as necessidades térmicas da habitação e, portanto, com o fator de carga da caldeira.

A título de comparação a Figura 4-9 e a Figura 4-10 mostram a evolução do rendimento total para os perfis 7 e 14, respetivamente (perfis correspondentes à temperatura média diária máxima e a uma temperatura média intermédia).

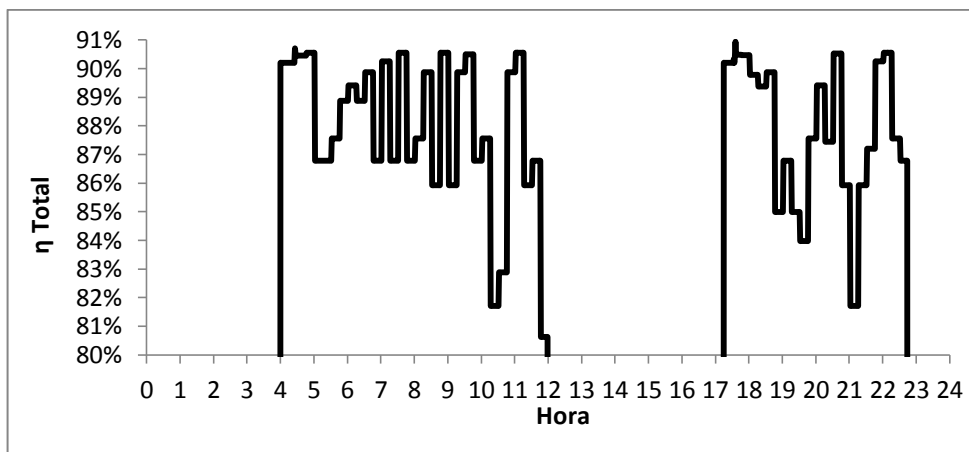


Figura 4-8: Evolução do rendimento total para o perfil 1-Caso de estudo 1

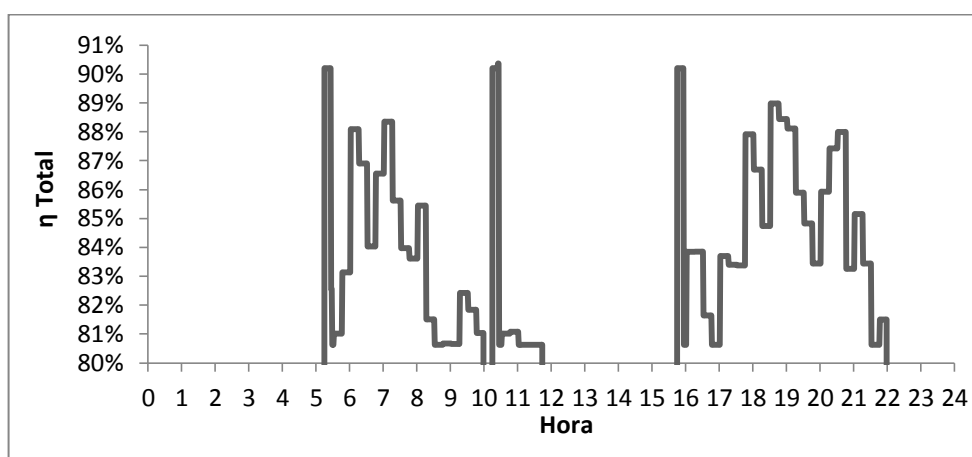


Figura 4-9: Evolução do rendimento total para o perfil 7-Caso de estudo 1

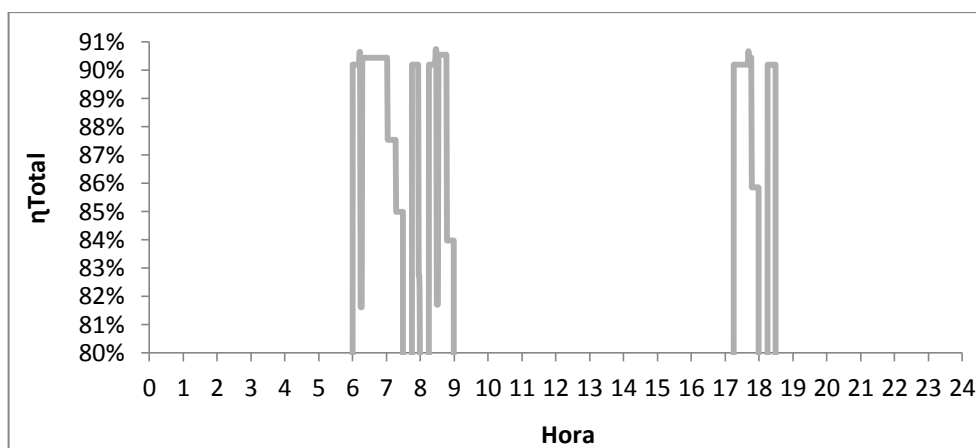


Figura 4-10: Evolução do rendimento total para o perfil 14-Caso de estudo 1

A Figura 4-11 mostra a evolução do rendimento médio em função da temperatura média exterior. Constata-se que o rendimento médio é mais elevado para temperaturas médias exteriores mais baixas e é mais baixo para temperaturas médias exteriores intermédias.

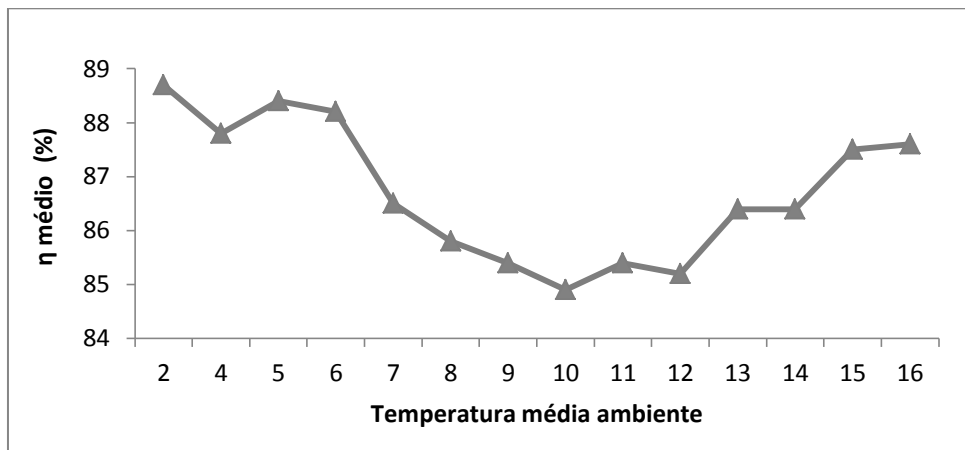


Figura 4-11: Evolução do rendimento médio –Caso de estudo 1

A potência elétrica produzida pela unidade de  $\mu$ CHP para o perfil de consumo 1 é apresentada na Figura 4-12. Para este perfil, a energia elétrica produzida durante um dia foi de 57 kWh (19,3% da energia consumida pela unidade de  $\mu$ CHP). A Figura 4-13 e a Figura 4-14 mostram a evolução da produção elétrica para os perfis de consumo 7 e 14, respetivamente. Para o perfil de consumo 7, a produção de energia elétrica foi de 34,6 kWh (21,1 % da energia consumida pela  $\mu$ CHP). A energia elétrica produzida para o perfil 14 foi de 15,7 kWh (15,6% da energia absorvida pela unidade de  $\mu$ CHP). De notar as significativas variações na produção de energia elétrica, que dependem das necessidades térmicas da habitação.

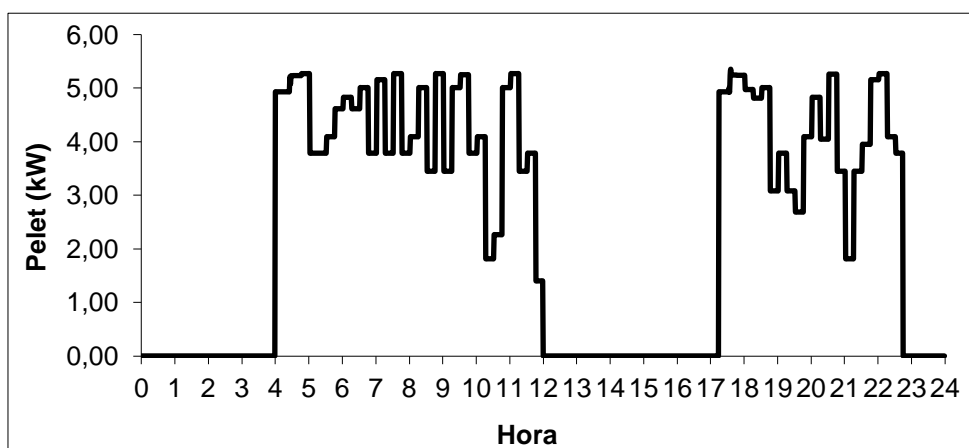


Figura 4-12: Evolução da potência elétrica para o perfil 1-Caso de estudo 1

O gráfico da Figura 4-15 mostra a comparação da potência elétrica produzida para os perfis de consumo 1, 7 e 14. Podemos verificar que os perfis 1 e 7 apresentam um comportamento mais

interessante do ponto de vista do sistema elétrico, uma vez que cobrem os períodos em que tipicamente ocorrem as pontas de consumo.

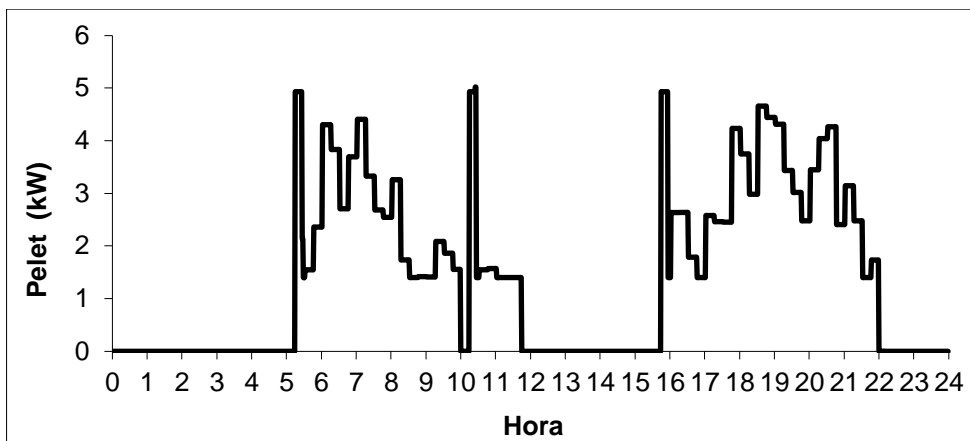


Figura 4-13: Evolução da potência elétrica para o perfil 7-Caso de estudo 1

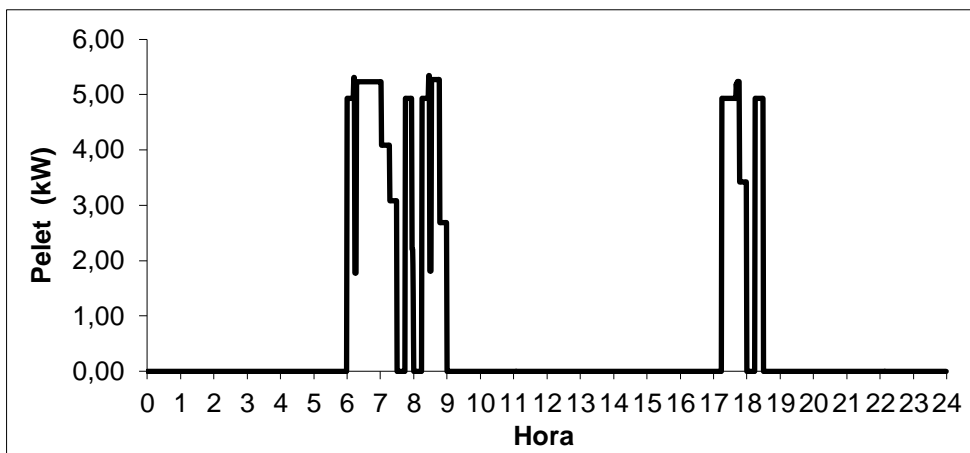


Figura 4-14: Evolução da potência elétrica para o perfil 14-Caso de estudo 1

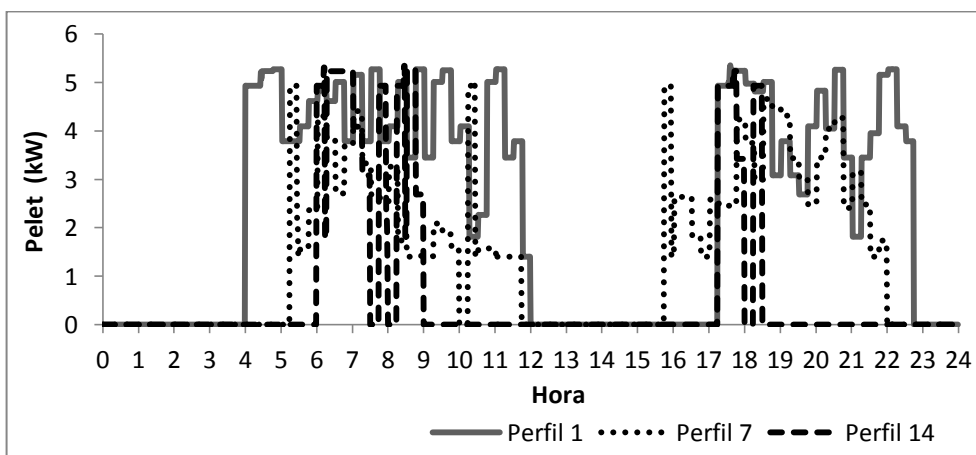


Figura 4-15: Evolução potência elétrica – Caso de estudo 1

O comportamento das potências é ilustrado na Figura 4-16.

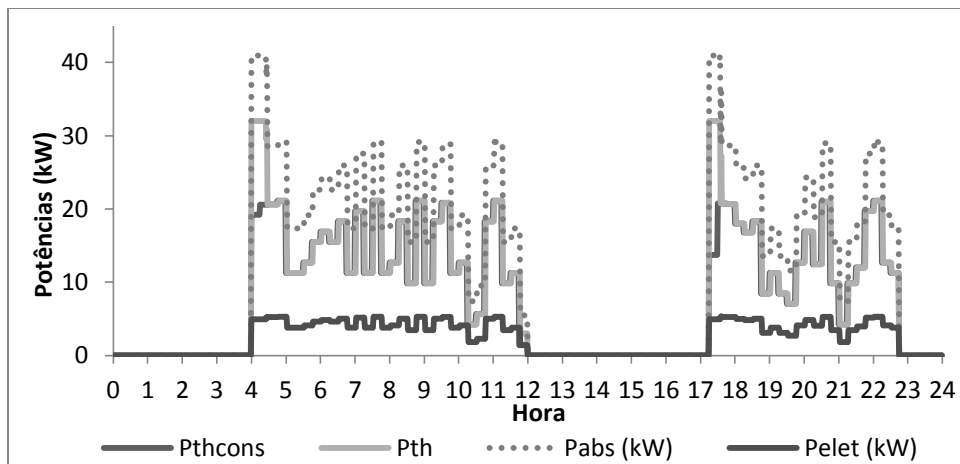


Figura 4-16: Evolução das potências-Caso de estudo 1

A Figura 4-17 evidencia a energia elétrica produzida em função da temperatura média ambiente exterior. Analisando este gráfico podemos concluir que, como esperado, o total de energia elétrica produzida diminui à medida que aumenta a temperatura média exterior.

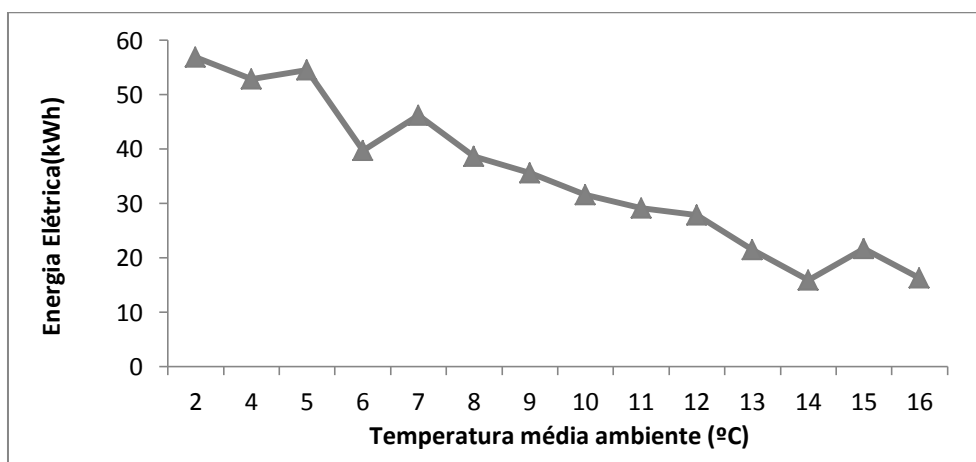


Figura 4-17: Energia elétrica produzida –Caso de estudo 1

O gráfico da Figura 4-18 mostra, em percentagem, o quociente entre a energia elétrica produzida e a energia consumida pela unidade  $\mu$ CHP. Da análise desta figura podemos salientar que os perfis de consumo correspondentes às temperaturas médias exteriores intermédias apresentam os valores mais elevados, ou seja, o rendimento elétrico do sistema  $\mu$ CHP é superior. Os menores rendimentos elétricos verificam-se para as temperaturas médias ambiente mais elevadas.

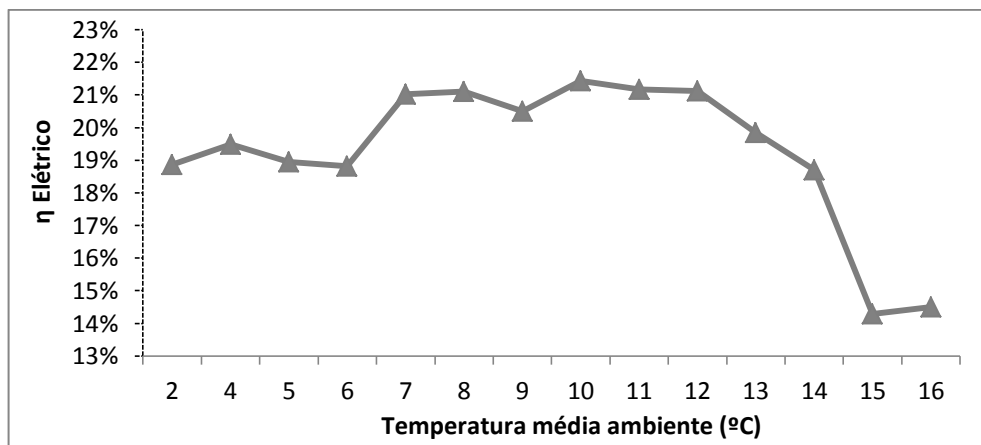


Figura 4-18: Rendimento elétrico da unidade  $\mu$ CHP - Caso de estudo 1

A evolução das temperaturas na caldeira (à saída e à entrada) é apresentada na Figura 4-19. A análise desta figura permite constatar que a temperatura à saída atinge a temperatura de “set point” passado o tempo necessário para aquecer a água existente no circuito de aquecimento (assunto referido no subcapítulo 4.2.2). As variações na temperatura de regresso à caldeira ( $T_1$ ) devem-se às variações temporais verificadas nas necessidades térmicas da habitação.

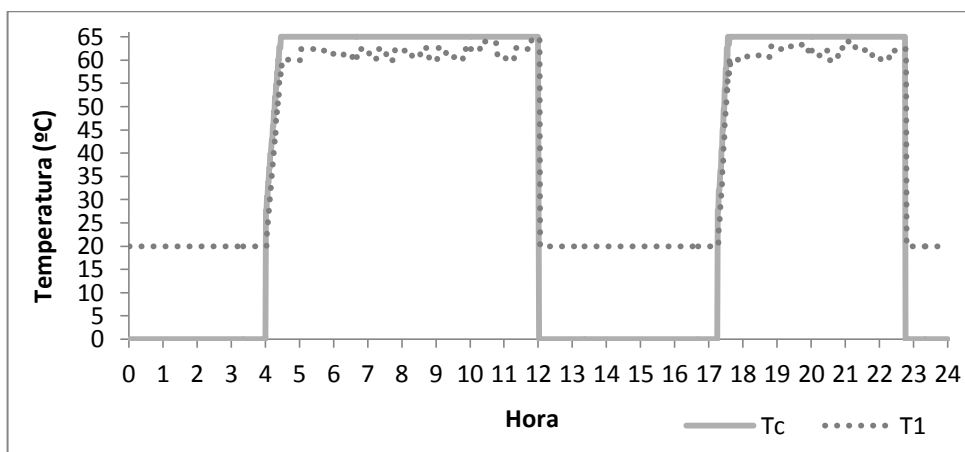


Figura 4-19: Evolução das temperaturas na  $\mu$ CHP–perfil 1–Caso de estudo 1

#### 4.4 Caso de estudo 2 – Sistema com armazenamento e sem otimização

O presente caso de estudo aborda o comportamento do modelo para a situação em que o sistema  $\mu$ CHP é dotado de armazenamento térmico através de um depósito de água quente. As características da unidade de  $\mu$ CHP e do depósito AT são as que se encontram referidas na Figura 4-20, para além das já referidas no subcapítulo 4.2.

Considerou-se um caudal à saída da caldeira constante e igual a 2 l/s. O caudal para o circuito que satisfaz as necessidades térmicas a partir do depósito foi assumido como sendo igual a 1 l/s.

Os perfis de consumo térmico adotados foram os mesmos que no caso de estudo 1.

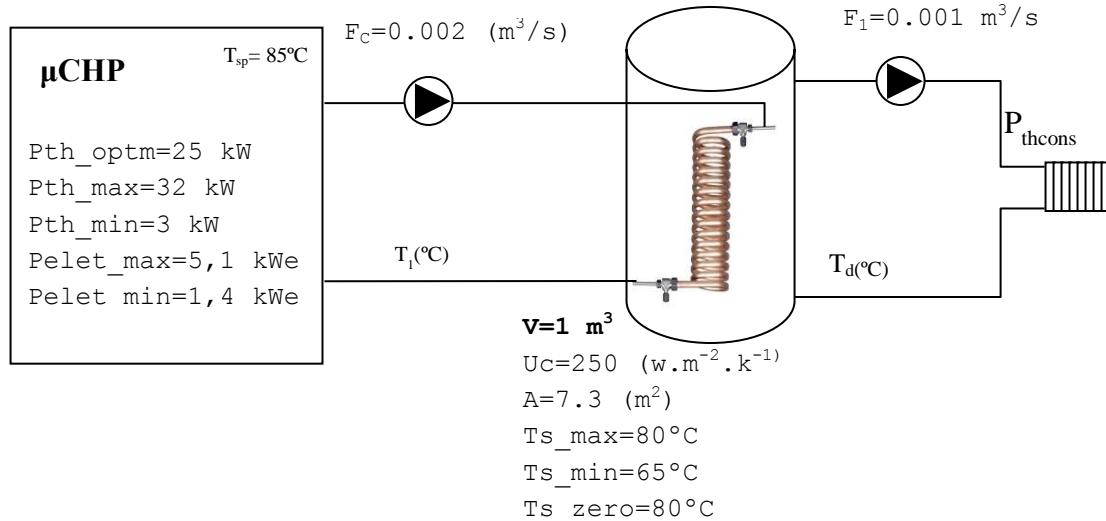


Figura 4-20: Esquema para o sistema com AT e sem otimização

Considerou-se uma temperatura inicial no depósito AT igual a  $80^{\circ}\text{C}$  e que a unidade de  $\mu\text{CHP}$  começa a funcionar logo que no depósito de AT se atinja a temperatura mínima estipulada de  $65^{\circ}\text{C}$ . Depois da  $\mu\text{CHP}$  entrar em funcionamento, só entra em modo de espera após a temperatura máxima no depósito de AT ser alcançada, neste caso  $80^{\circ}\text{C}$  (note-se que a temperatura de “set point” da unidade de  $\mu\text{CHP}$  foi, neste caso, regulada para  $85^{\circ}\text{C}$ ). Quando se registam necessidades térmicas, é utilizada a energia contida no depósito de AT até que a temperatura da água no seu interior ( $T_s$ ) desça abaixo dos  $65^{\circ}\text{C}$ . Assumiu-se, portanto, que a temperatura mínima admissível para a água de ida em direção aos radiadores do sistema de aquecimento é de  $65^{\circ}\text{C}$  (ou seja, considera-se que abaixo deste valor o comportamento dos radiadores não é o desejável).

Com base no modelo e informação apresentados anteriormente, verificou-se o comportamento da unidade de  $\mu\text{CHP}$  para vários dias típicos.

#### 4.4.1 Resultados obtidos e análise

Os resultados obtidos na simulação do modelo, para um depósito de AT de 1000 litros e para os diferentes perfis de consumo (função da temperaturas média exterior), são os que constam do Quadro 4 – 5.

Quadro 4-5: Resultados dos vários perfis de consumo-Caso de estudo 2

Perfil consumo	Energia térmica (kWh)		Energia elétrica (kWh)	Energia absorvida (kWh)	η médio (%)
	Consumida	Produzida			
1	192,8	198,3	54,8	284,6	88,9
2	166,6	171,9	48,3	248,9	88,5
3	181,4	186,8	52,8	270,8	88,5
4	128,1	133,5	36,0	190,8	88,8
5	125,2	130,6	36,5	188,8	88,5
6	99,9	105,2	28,5	151,1	88,5
7	85,1	90,5	23,7	128,3	88,9
8	69,6	74,9	19,3	105,9	88,9
9	66,1	71,5	17,9	100,1	89,3
10	65,6	70,9	17,8	99,5	89,2
11	53,3	58,6	14,4	81,7	89,4
12	37,8	40,5	9,7	56,1	89,5
13	68,9	74,4	16,5	101,2	89,8
14	45,7	51,1	11,9	70,3	89,5

Analisando o Quadro 4 - 5, podemos constatar que:

- A diferença entre a energia produzida pela unidade de  $\mu$ CHP e a energia consumida na habitação varia entre o valor mínimo de 2,7 kWh (7,1% da energia consumida na habitação), para o perfil de consumo 12, e o valor máximo igual a 5,5 kWh (2,9% da energia consumida pela habitação) para o perfil de consumo 1. Esta diferença prende-se com a energia gasta para aquecer o volume de água do circuito de aquecimento do depósito AT através da serpentina, após o arranque do sistema de  $\mu$ CHP, desde 65°C a 85°C;
- O rendimento médio varia entre o valor mínimo de 88,5% para os perfis de consumo 2, 3, 5 e 6 e o valor máximo de 89,8% para o perfil de consumo 13;
- O rendimento médio para o perfil 1 foi de 88,9%, sendo que a evolução do rendimento instantâneo é a que se mostra na Figura 4-21. Verificamos que a sua evolução varia ao longo do tempo de acordo com a variação a potência térmica que é transmitida para a água do AT em cada momento;
- A título de comparação, a Figura 4-22 e a Figura 4-23 mostram a evolução do rendimento total para os perfis 7 e 14, respetivamente;

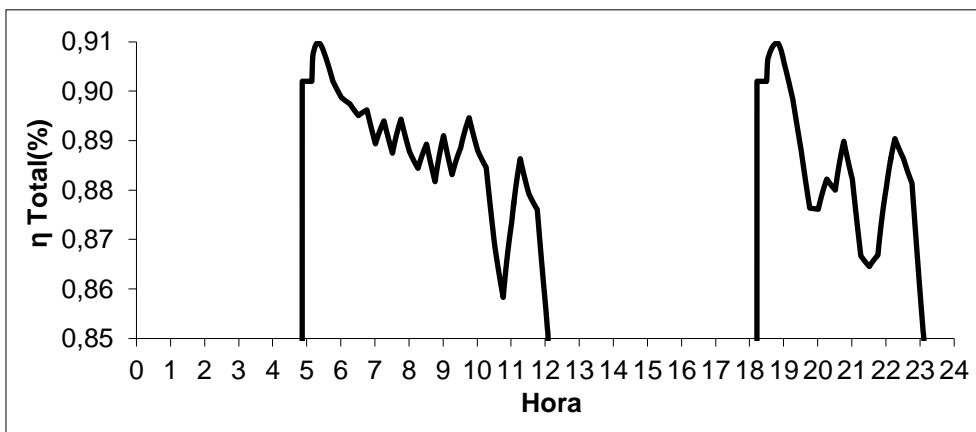


Figura 4-21: Evolução do rendimento total para o perfil 1-Caso de estudo 2

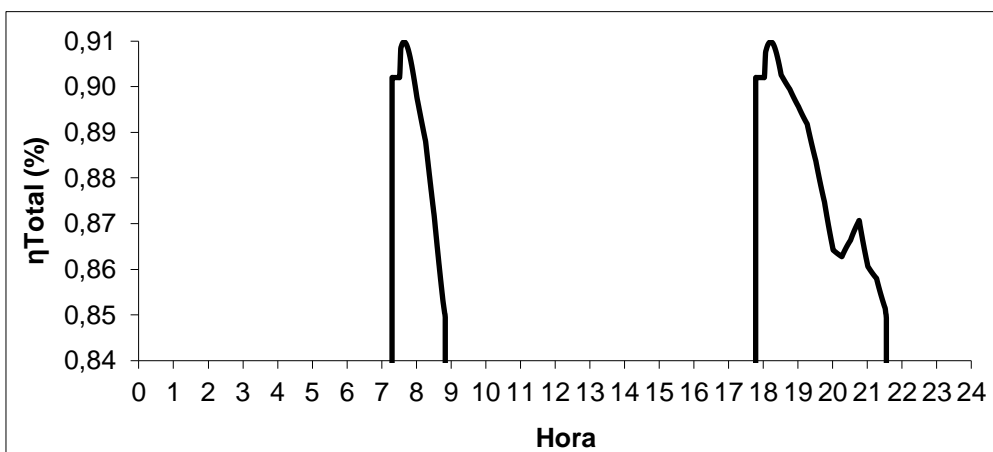


Figura 4-22: Evolução do rendimento total para o perfil 7-Caso de estudo 2

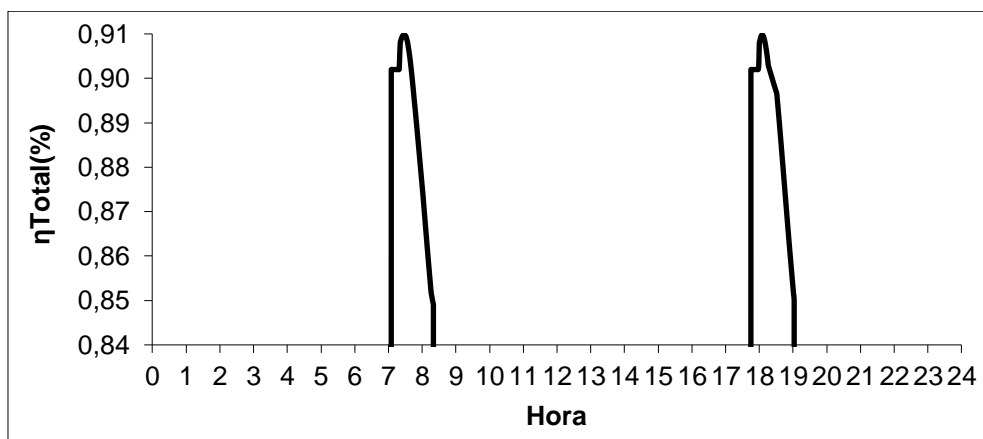


Figura 4-23: Evolução do rendimento total para o perfil 14-Caso de estudo 2

- A Figura 4-24 mostra a evolução do rendimento médio em função do perfil de consumo, constatando-se que o rendimento médio é tendencialmente mais elevado para temperaturas médias exteriores mais elevadas e tendencialmente inferior para temperaturas médias exteriores mais baixas. Isto deve-se ao fato de a unidade de  $\mu$ CHP apresentar um rendimento térmico menor.

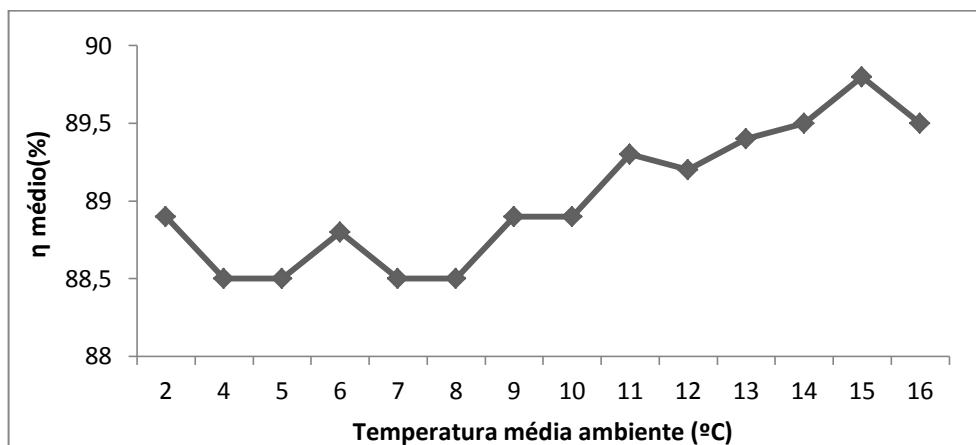


Figura 4-24: Evolução do rendimento médio-Caso de estudo 2

- A evolução da potência elétrica produzida pela unidade de  $\mu$ CHP para o perfil 1, considerando um depósito de AT de 1000 litros, é apresentada na Figura 4-25. Para este perfil, a energia elétrica produzida durante um dia foi de 54,8 kWh, correspondente a 19,3% da energia consumida pela unidade de  $\mu$ CHP. A Figura 4-26 e a Figura 4-27 mostram a evolução da potência elétrica para os perfis de consumo 7 e 14, respetivamente. No caso do perfil de consumo 7, a produção de energia elétrica foi de 22,5 kWh, correspondente a 17,8% da energia consumida pela  $\mu$ CHP. A energia elétrica produzida no caso do perfil 14 é de 11,9 kWh, correspondente a 17,1% da energia absorvida pela unidade de  $\mu$ CHP.

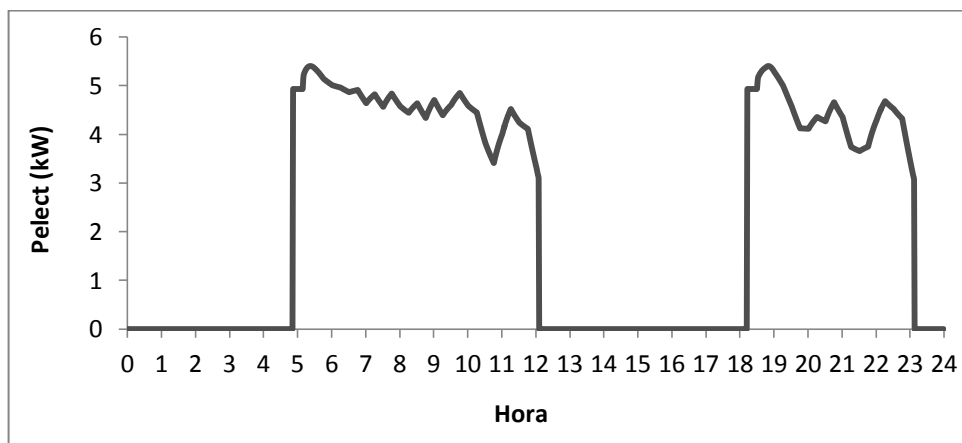


Figura 4-25: Evolução da potência elétrica para o perfil 1-Caso de estudo 2

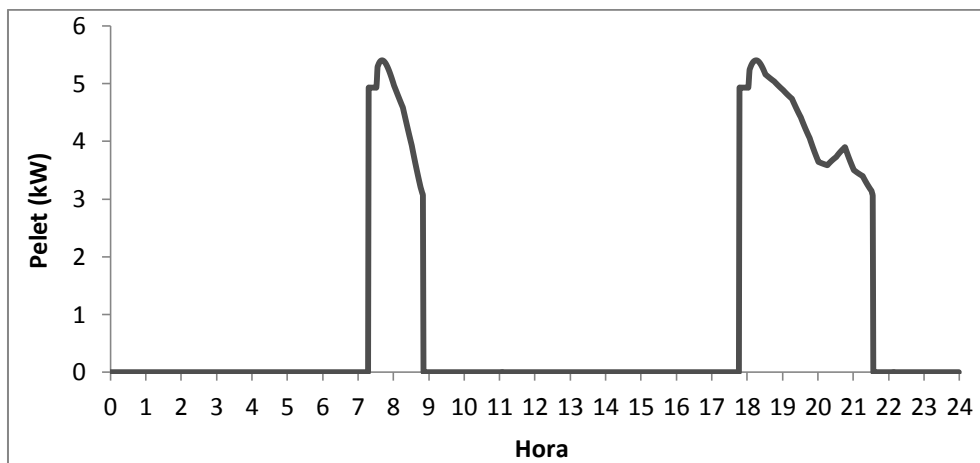


Figura 4-26: Evolução da potência elétrica para o perfil 7-Caso de estudo 2

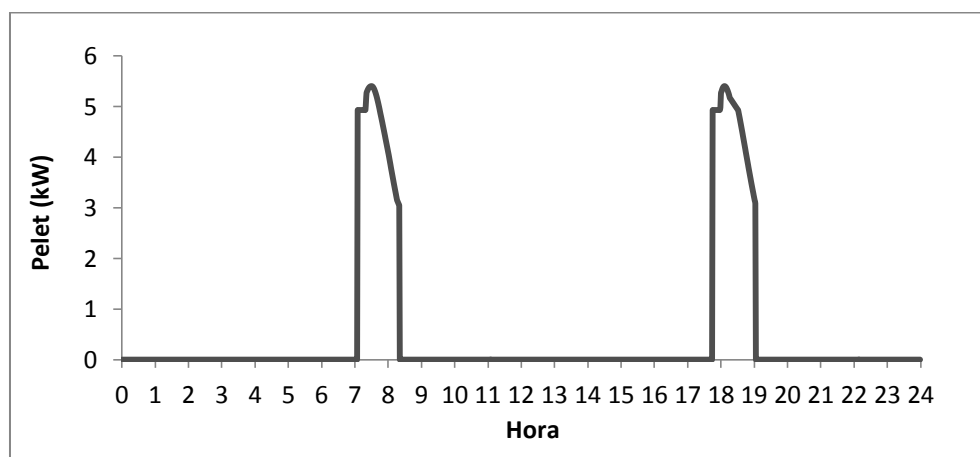


Figura 4-27: Evolução da potência elétrica para o perfil 14-Caso de estudo 2

O gráfico da Figura 4-28 permite comparar o comportamento da potência elétrica produzida nos perfis de consumo 1, 7 e 14. Podemos verificar que o perfil 1 é, do ponto de vista do sistema elétrico, mais interessante que os restantes. Com efeito, a produção neste perfil “cobre” ambos os períodos de maior carga dos sistemas elétricos (ponta do final da manhã e ponta do fim da tarde).

O valor da energia elétrica produzida pela unidade de  $\mu$ CHP em função da temperatura média ambiente exterior é ilustrado na Figura 4-29, onde se pode concluir que, como esperado, a energia elétrica produzida diminui à medida que aumenta a temperatura média exterior.

O gráfico da Figura 4-30 evidencia o rendimento elétrico da unidade de  $\mu$ CHP, de onde se pode concluir que este tende a ser mais elevado para os perfis correspondentes às temperaturas médias exteriores mais baixas.

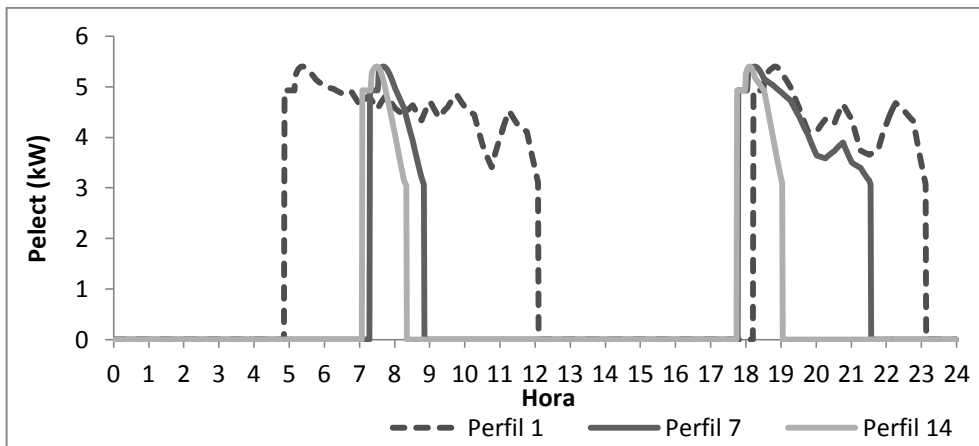


Figura 4-28: Evolução da potência elétrica-Caso de estudo 2

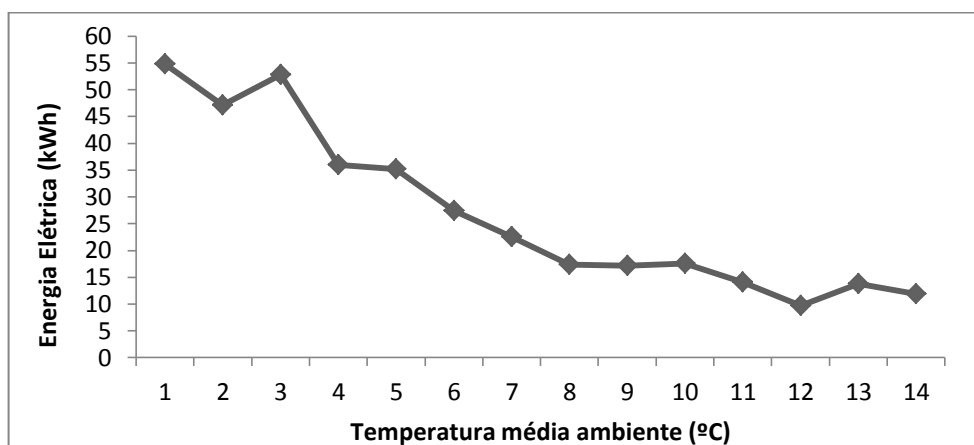


Figura 4-29: Energia elétrica produzida em função da temperatura-Caso de estudo 2

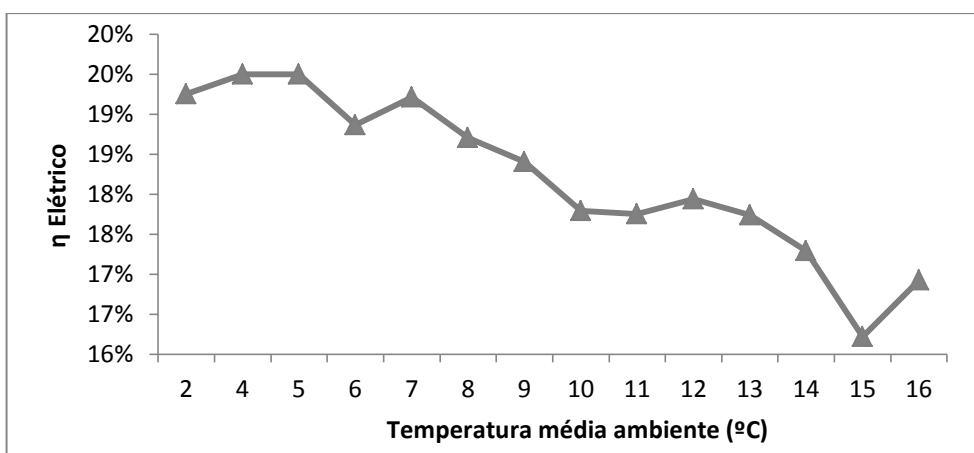


Figura 4-30: Rendimento elétrico da unidade de μCHP-Caso de estudo 2

A evolução das temperaturas na caldeira e no depósito de AT (neste caso com um volume de 1000 litros) para o perfil de consumo 1 é apresentada na Figura 4-31.

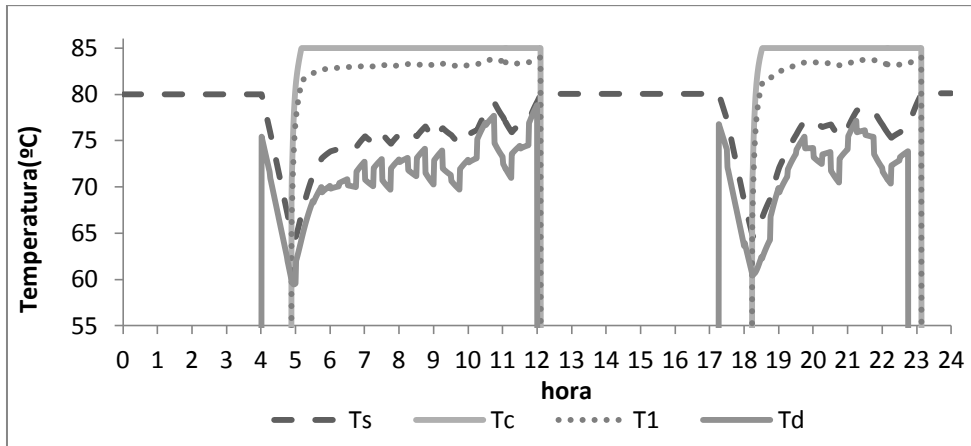


Figura 4-31: Evolução das temperaturas na  $\mu$ CHP e no depósito AT-Caso de estudo 2

A análise desta figura permite constatar que a temperatura, à saída da caldeira, atinge a temperatura de “set point” após o tempo necessário para aquecer a água existente no circuito de aquecimento entre a  $\mu$ CHP e o depósito de AT. A temperatura de regresso à caldeira ( $T_1$ ) sofre variações de acordo com a temperatura da água do depósito de AT, logo da potência transmitida ao depósito através da serpentina. A temperatura de ida para a satisfação das necessidades térmicas da habitação ( $T_s$ ), segue basicamente a curva da temperatura da água no depósito de AT. A curva da temperatura de regresso da água de aquecimento ao depósito ( $T_d$ ) é a que sofre maiores variações, de acordo com as necessidades térmicas da habitação.

A evolução das várias potências envolvidas neste caso de estudo, para o perfil de consumo 1 é mostrada na Figura 4-32.

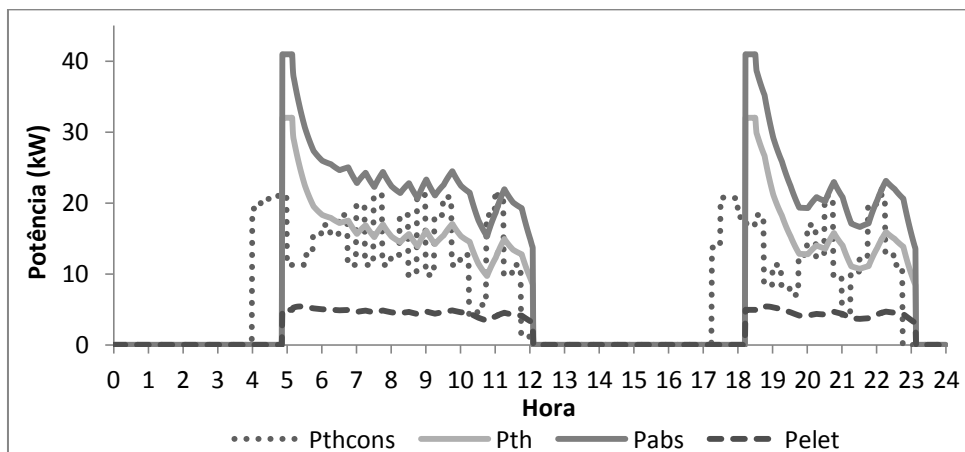


Figura 4-32: Evolução das potências-Caso de estudo 2

A comparação dos resultados deste caso de estudo com os do caso de estudo anterior é efetuada no subcapítulo 4.6.

### 4.5 Caso de estudo 3 - Sistema com armazenamento e otimização

No presente caso de estudo aborda-se o comportamento do sistema  $\mu$ CHP dotado de armazenamento térmico com otimização. A otimização foi implementada através da variação do caudal que circula no circuito entre a unidade de  $\mu$ CHP e a serpentina instalada no depósito de AT. Assumiu-se, nas simulações efetuadas, que o referido caudal pode variar de forma contínua entre os valores mínimo e máximo de 0,5 e 3 l/s, respetivamente. A potência térmica ótima da unidade de  $\mu$ CHP (do ponto de vista do máximo rendimento) corresponde a 25kW, tal como se pode constatar na Figura 4-33. O caudal do circuito que satisfaz as necessidades térmicas a partir do depósito AT foi considerado igual a 1 l/s (igual ao que se considerou nos casos de estudo anteriores).

Os perfis de consumo térmico adotados foram os mesmos dos casos de estudo anteriores. As características da  $\mu$ CHP e do depósito de AT são as que se encontram na Figura 4-33, para além das já referidas anteriormente.

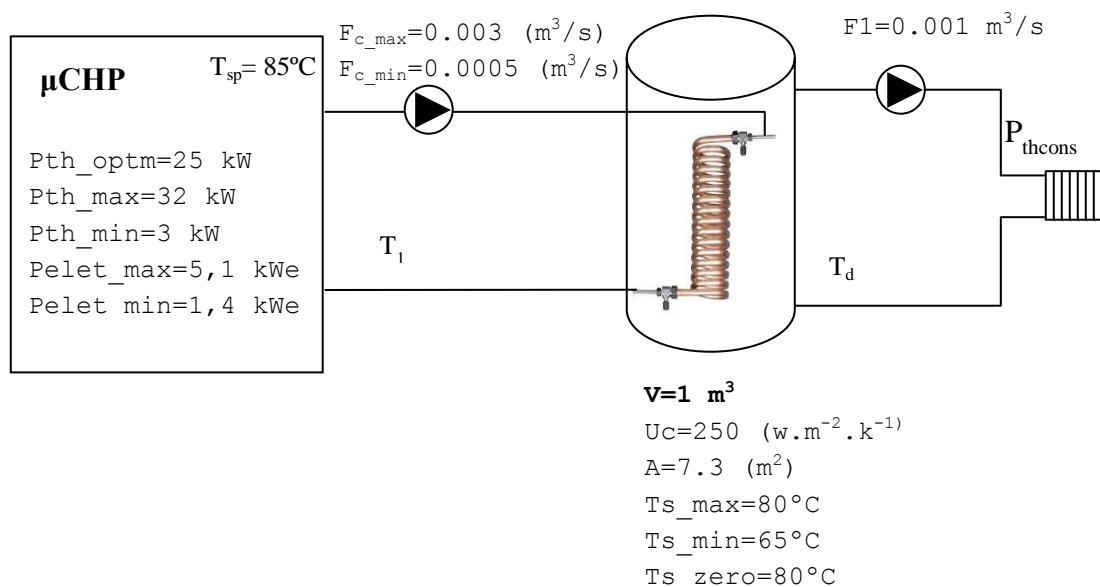


Figura 4-33: Esquema para o sistema  $\mu$ CHP com AT e otimização

Tal como no caso de estudo 2, considerou-se uma temperatura inicial no depósito AT de  $80^{\circ}\text{C}$  e que a unidade de  $\mu$ CHP começa a funcionar logo que no depósito de AT se atinja a temperatura mínima estipulada de  $65^{\circ}\text{C}$  (temperatura a partir da qual se admite que os radiadores não apresentam um comportamento adequado). Depois da  $\mu$ CHP entrar em funcionamento, só entra em modo de espera após a temperatura máxima no depósito AT ser

alcançada (neste caso 80°C). Importa ainda referir que, neste caso, a temperatura de “set point” da saída da  $\mu$ CHP foi ajustada para 85°C.

Com base no modelo e informação apresentados anteriormente, verificou-se o comportamento da unidade de  $\mu$ CHP para vários dias típicos em termos de necessidades térmicas.

#### 4.5.1 Resultados obtidos e análise

Os resultados obtidos na simulação do modelo otimizado, considerando um depósito AT de 1000 litros e diferentes temperaturas médias exteriores, são os que constam do Quadro 4–6.

Quadro 4-6: Resultados dos vários perfis de consumo-Caso de estudo 3

Perfil consumo	Energia térmica (kWh)		Energia elétrica (kWh)	Energia absorvida (kWh)	$\eta$ médio (%)
	Consumida	Produzida			
1	192,8	195,4	55,2	281,3	89,1
2	166,6	169,1	48,9	245,9	88,7
3	181,4	184,0	53,4	267,8	88,7
4	128,1	130,7	36,5	187,8	89,1
5	125,2	127,8	36,7	185,7	88,6
6	99,9	103,7	27,8	147,3	89,3
7	85,1	87,7	23,9	125,2	89,1
8	69,6	72,3	19,5	102,9	89,2
9	66,1	68,7	18,1	96,9	89,5
10	65,6	68,2	18,1	96,4	89,5
11	53,3	55,8	14,6	78,5	89,6
12	37,8	39,1	10,0	54,7	89,8
13	68,9	71,5	17,3	98,4	90,2
14	45,7	48,3	12,2	67,3	89,9

Analisando o Quadro 4 - 6, podemos constatar que:

- A diferença entre a energia produzida e a energia consumida na habitação varia entre o valor mínimo de 1,3 kWh (3,8% em relação à energia consumida pela habitação) para o perfil de consumo 12, e o valor máximo de 3,8 kWh (3,8% em relação à energia consumida pela habitação) para o perfil de consumo 6. Esta diferença já foi justificada no caso de estudo 2;
- O rendimento médio varia entre o valor mínimo de 88,6% (para o perfil de consumo 5) e o valor máximo de 90,2% (para o perfil de consumo 14);
- A evolução do rendimento da unidade de  $\mu$ CHP ao longo de um dia com perfil térmico 1 (cujo rendimento médio é de 89,1%) é mostrada na Figura 4-34. Verificamos que este rendimento varia ao longo do tempo, em função da temperatura da água no depósito de AT.

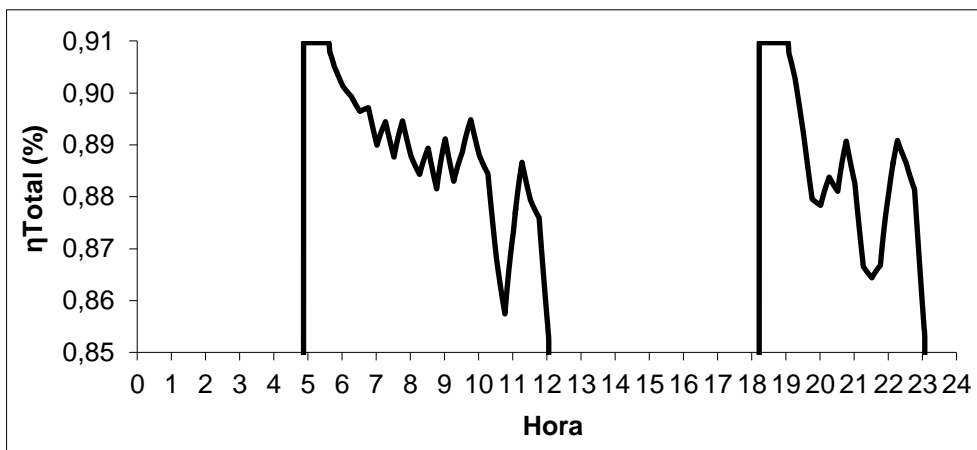


Figura 4-34: Evolução do rendimento total para o perfil 1-Caso de estudo 3

A título de comparação a Figura 4-35 e a Figura 4-36 mostram a evolução do rendimento total da unidade de  $\mu$ CHP para os perfis de consumo 7 e 14, respetivamente.

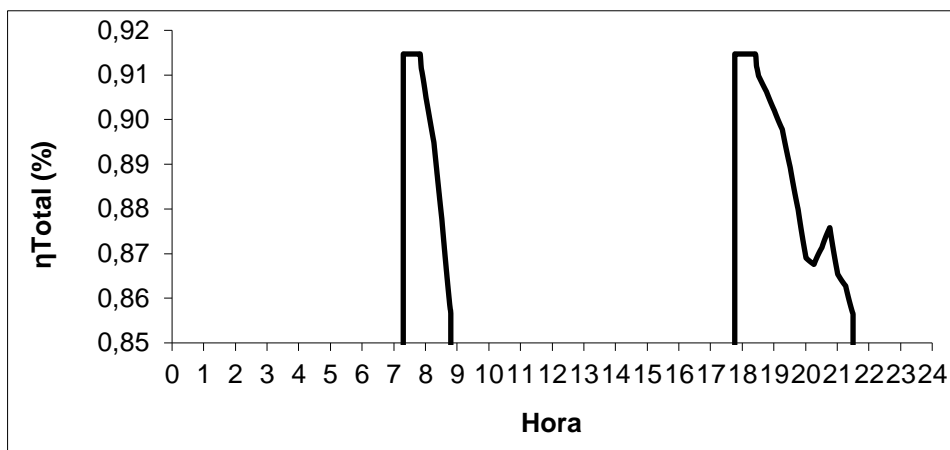


Figura 4-35: Evolução do rendimento total para o perfil 7-Caso de estudo 3

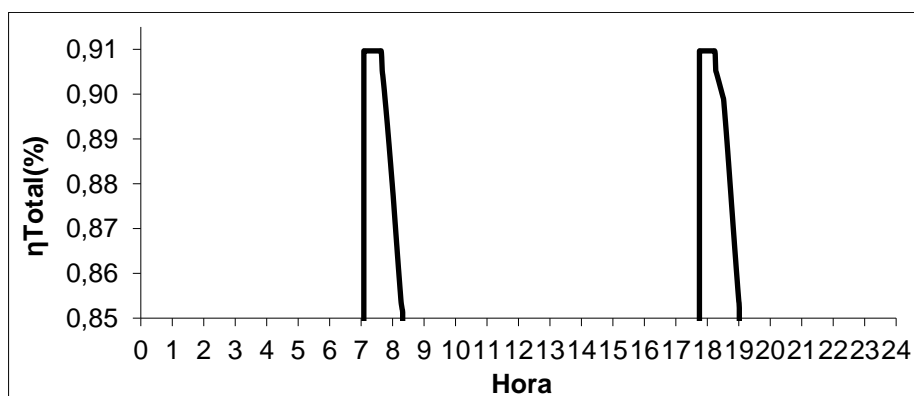


Figura 4-36: Evolução do rendimento total para o perfil 14-Caso de estudo 3

- A evolução do rendimento médio em função do perfil de consumo é mostrado na Figura 4-37, constatando-se que este é mais elevado para temperaturas médias exteriores mais elevadas e é inferior para temperaturas médias exteriores mais baixas. A explicação para este facto foi referida no caso de estudo 2.

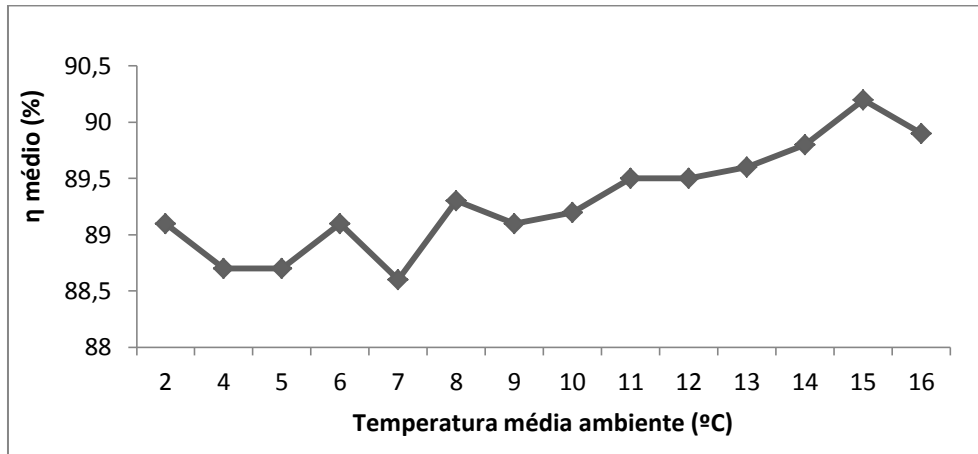


Figura 4-37: Evolução do rendimento médio – Caso de estudo 3

- A evolução da potência elétrica produzida pela unidade de  $\mu$ CHP para o caso do perfil de consumo 1, é apresentada na Figura 4-38. Para este perfil, a energia elétrica produzida durante um dia corresponde a 55,2 kWh (19,6% da energia absorvida pela unidade de  $\mu$ CHP). A Figura 4-39 e a Figura 4-40 mostram a evolução da potência elétrica produzida para os perfis de consumo 7 e 14, respetivamente. Note-se que para o perfil de consumo 7, a produção de energia elétrica é de 23,9 kWh, correspondente a 19,1 % da energia absorvida pela  $\mu$ CHP. A energia elétrica produzida num dia caracterizado pelo perfil 14 é de 12,2 kWh, correspondente a 18,1% da energia absorvida pela unidade de  $\mu$ CHP.

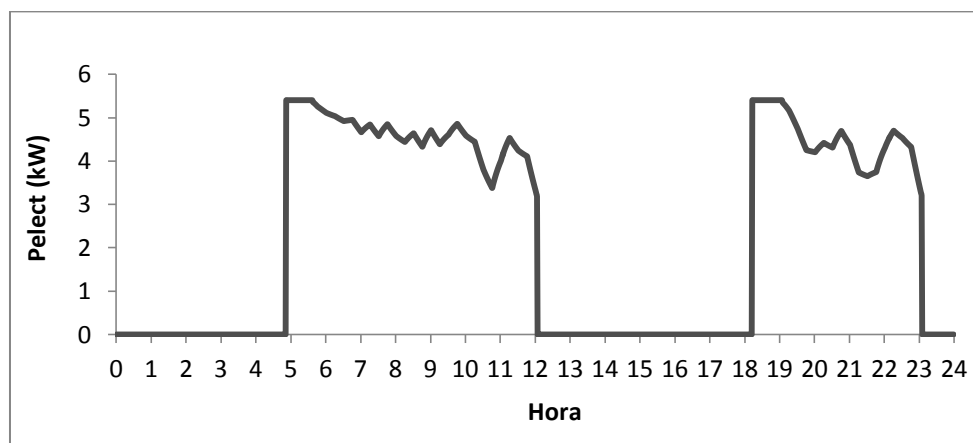


Figura 4-38: Evolução da potência elétrica para o perfil 1-Caso de estudo 3

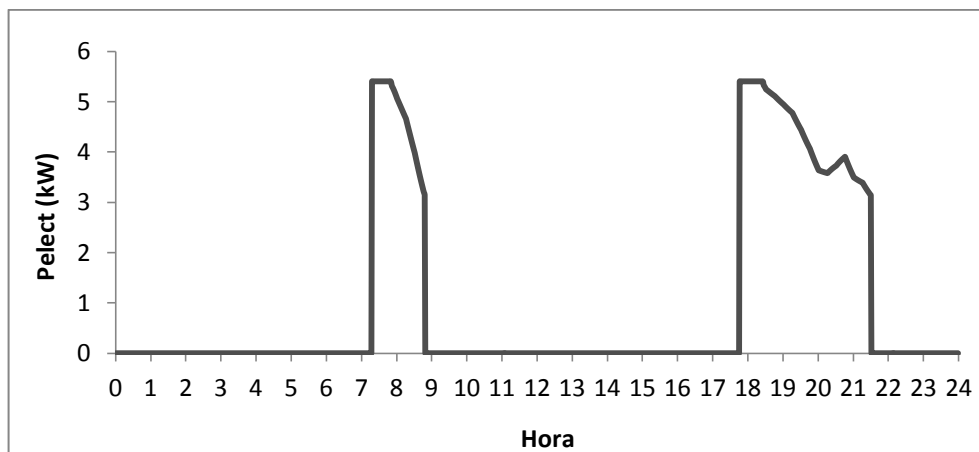


Figura 4-39: Evolução da potência elétrica para o perfil 7-Caso de estudo 3

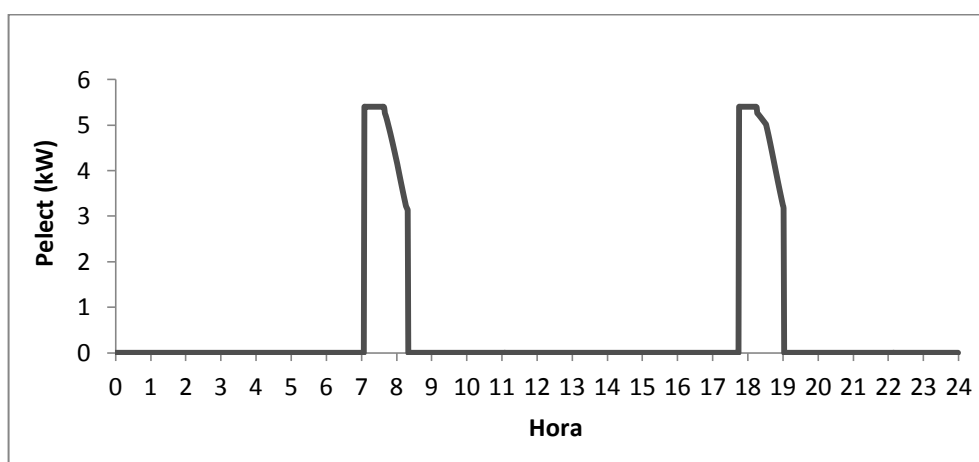


Figura 4-40: Evolução da potência elétrica para o perfil 14-Caso de estudo 3

- O gráfico da Figura 4-41 permite comparar as potências elétricas produzidas em cada um dos perfis de consumo 1, 7 e 14. As conclusões referidas para o caso de estudo anterior são aqui aplicáveis.

A comparação de resultados do presente caso de estudo com resultados dos casos de estudo anteriores é abordada no subcapítulo 4.6.

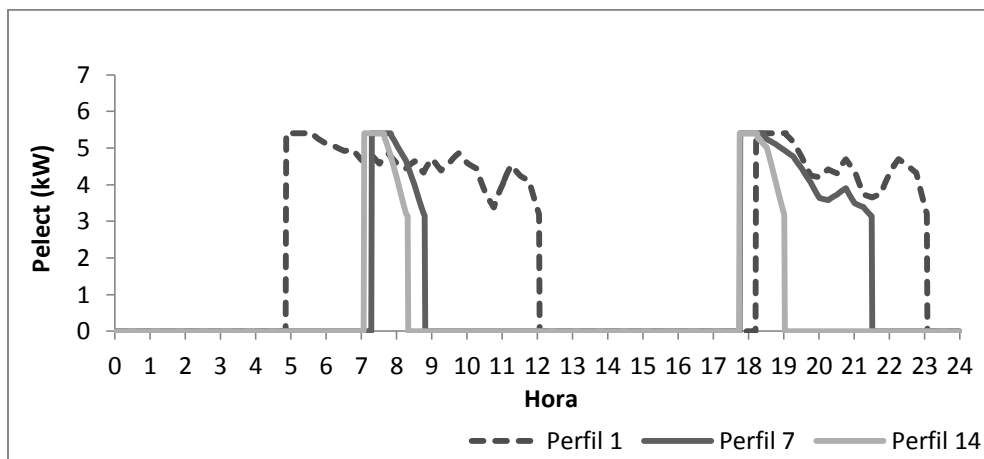


Figura 4-41: Evolução da potência elétrica–Caso de estudo 3

- Os valores da energia elétrica produzida para cada perfil térmico são ilustrados na Figura 4-42.

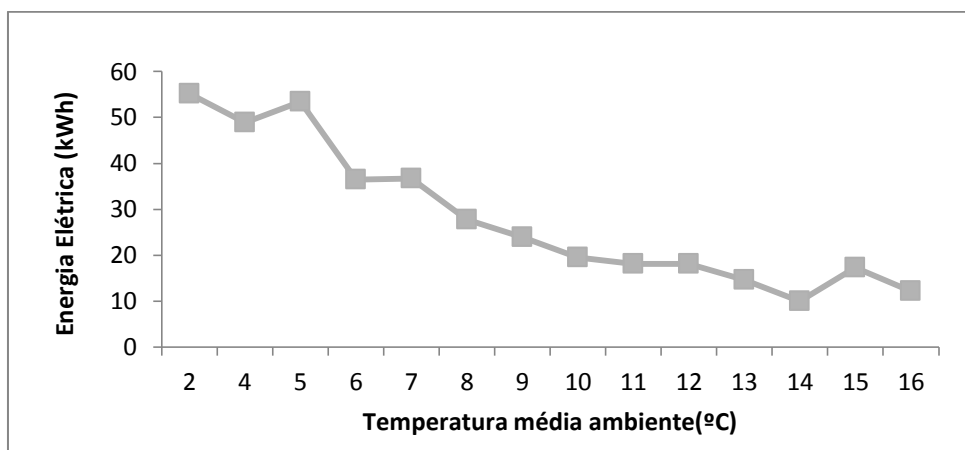


Figura 4-42: Energia elétrica produzida - Caso de estudo 3

No gráfico da Figura 4-43 mostra-se o rendimento elétrico da unidade de  $\mu$ CHP, onde se evidencia que este tende a ser superior para os perfis de consumo correspondentes às temperaturas médias exteriores mais baixas.

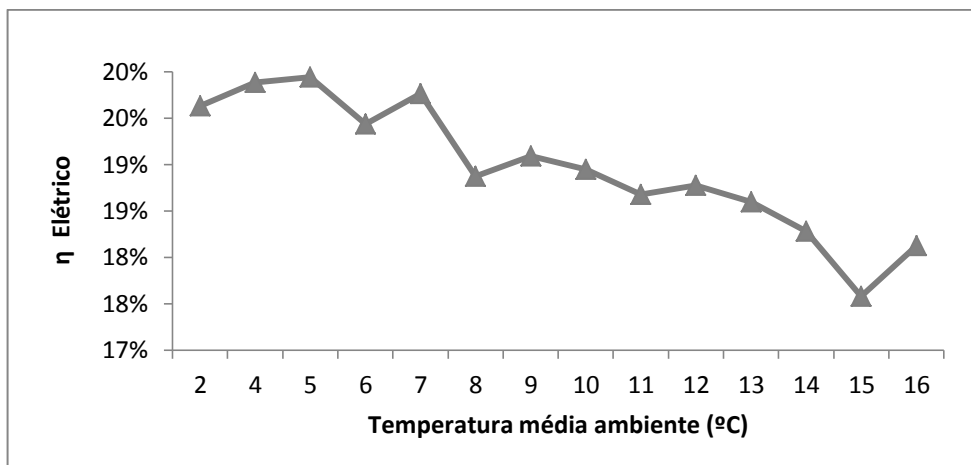


Figura 4-43: Rendimento elétrico da unidade de  $\mu$ CHP-Caso de estudo 3

A evolução das temperaturas na caldeira e no depósito de AT para o perfil de consumo 1 é apresentada na Figura 4-44. A análise desta figura permite constatar que a temperatura à saída da caldeira atinge a temperatura de “set point” decorrido o tempo necessário para aquecer a água existente no circuito de transferência de calor entre a caldeira e o depósito de AT. A temperatura de regresso à caldeira ( $T_1$ ) sofre variações de acordo com a temperatura da água no depósito e por conseguinte da potência transferida através da serpentina. A temperatura de ida para a satisfação das necessidades térmicas segue, basicamente, a curva da temperatura da água no depósito de AT. A curva da temperatura de regresso da água de aquecimento ao depósito ( $T_d$ ) sofre variações de acordo com as necessidades térmicas da habitação.

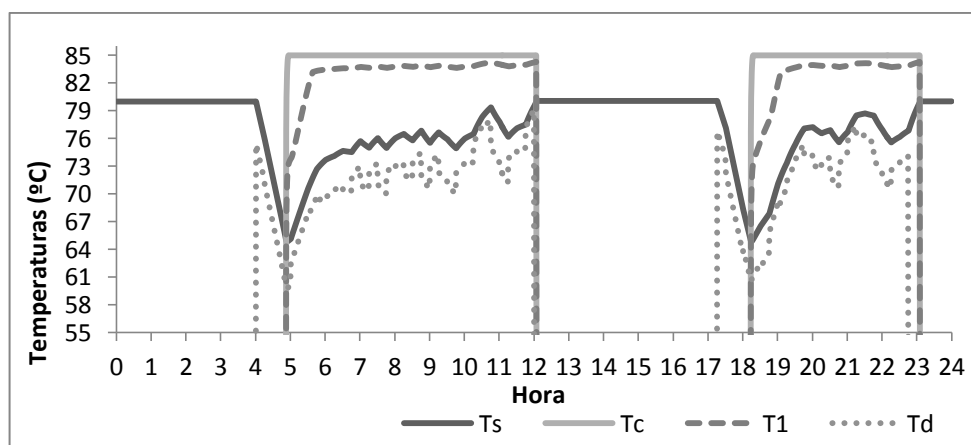


Figura 4-44: Evolução das temperaturas na  $\mu$ CHP e no depósito AT-Caso de estudo 3

- A evolução das várias potências envolvidas para o perfil de consumo 1 é mostrada na Figura 4-45. Observando esta figura, podemos verificar que os maiores picos ocorrem após o arranques da unidade de  $\mu$ CHP.

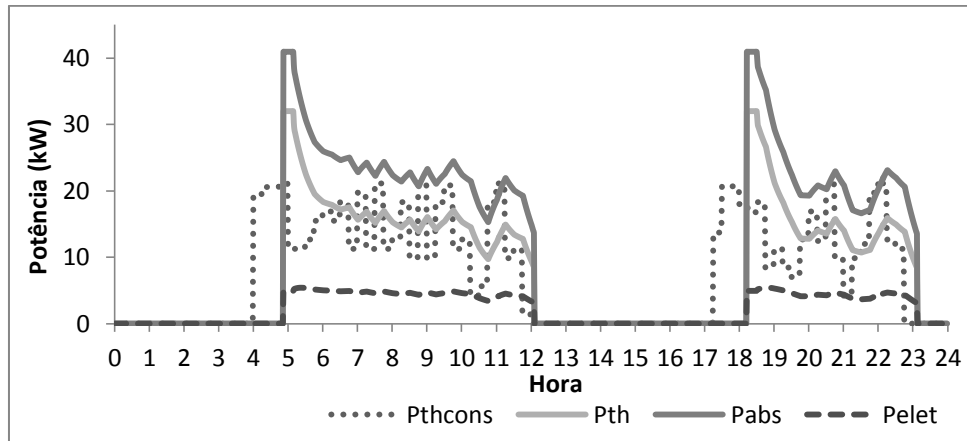


Figura 4-45: Evolução das várias potências-Caso de estudo 3

## 4.6 Comparação de resultados

No trabalho realizado verificou-se, utilizando o modelo matemático implementado, a influência exercida pela capacidade do depósito de AT, particularmente, para volumes entre 500 e 3000 litros.

### 4.6.1 Comparação entre os casos de estudo 1 e 2

Os resultados obtidos para os casos de estudo 1 e 2 permitem tirar algumas conclusões, nomeadamente:

- A energia absorvida pela unidade de  $\mu$ CHP tende a ser inferior quando se considera a inclusão de um sistema de AT relativamente ao sistema de funcionamento “direto”;
- A Figura 4-46 mostra a energia não consumida, face ao caso “direto”, para o perfil de consumo 1 e, genericamente, reflete o que acontece com todos os outros perfis de consumo. O que se constata é que à medida que aumenta a capacidade do depósito AT, aumenta o valor do consumo evitado de energia em relação ao sistema “Direto”. Note-se que os valores considerados para as situações com AT se referem a sistemas sem otimização;
- O rendimento médio do sistema com AT (sem otimização) é sempre maior do que o sistema “Direto”, tal como ilustra a Figura 4-47. Esta figura, relativa ao perfil de consumo 1 e um depósito de 1000 litros, reflete, genericamente, o que acontece com os restantes perfis de consumo e mostra que no sistema com AT o comportamento do rendimento médio da unidade de  $\mu$ CHP em função da temperatura média exterior apresenta um comportamento mais uniforme que o sistema “Direto”;

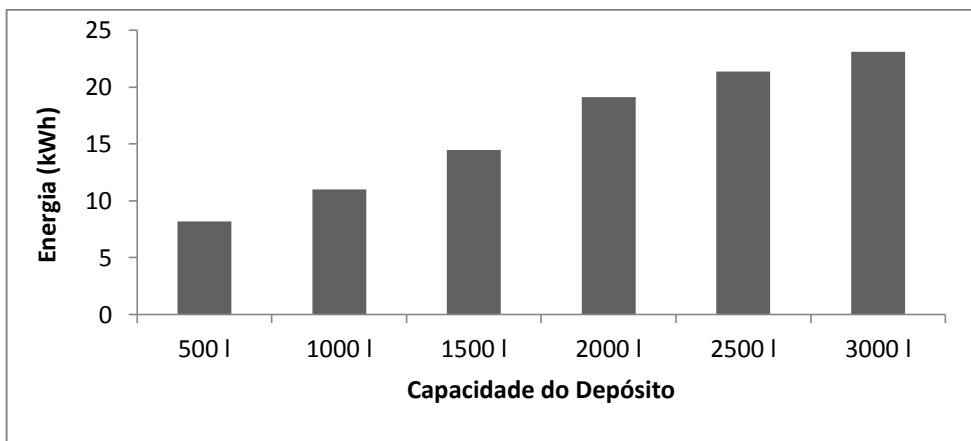


Figura 4-46: Energia não consumida em função do depósito AT

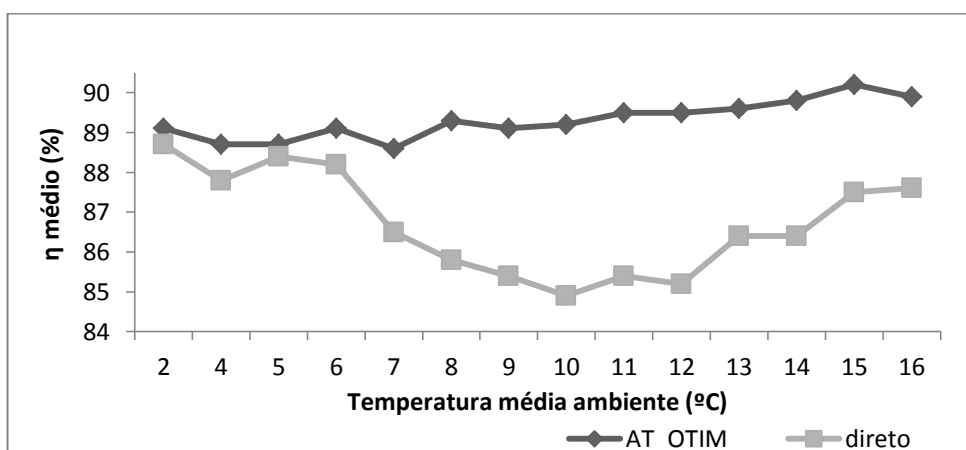


Figura 4-47: Comparação do rendimento médio para situações com e sem AT

- A diferença entre a energia absorvida pela  $\mu$ CHP com sistema direto e com sistema AT (sem otimização) em kWh, para diferentes perfis típicos de consumo e capacidades de depósitos, é a que se mostra na Figura 4-48. Optando pelo sistema com AT (sem otimização), a poupança de energia consumida oscila entre o mínimo de 7,5 kWh (2,7% da energia consumida pela  $\mu$ CHP-sistema direto) para o perfil de consumo 3 – depósito de 500 litros e o máximo de 40,4 kWh (28,7% da energia consumida pela  $\mu$ CHP-sistema direto) para o perfil de consumo 8 e um depósito AT de 3000 l. Observando o gráfico da Figura 4-48 podemos constatar que, de uma forma geral, à medida que aumenta a capacidade do depósito, aumenta a poupança de energia e que o perfil de consumo 8 (10 °C) é o que apresenta maior poupança de energia;

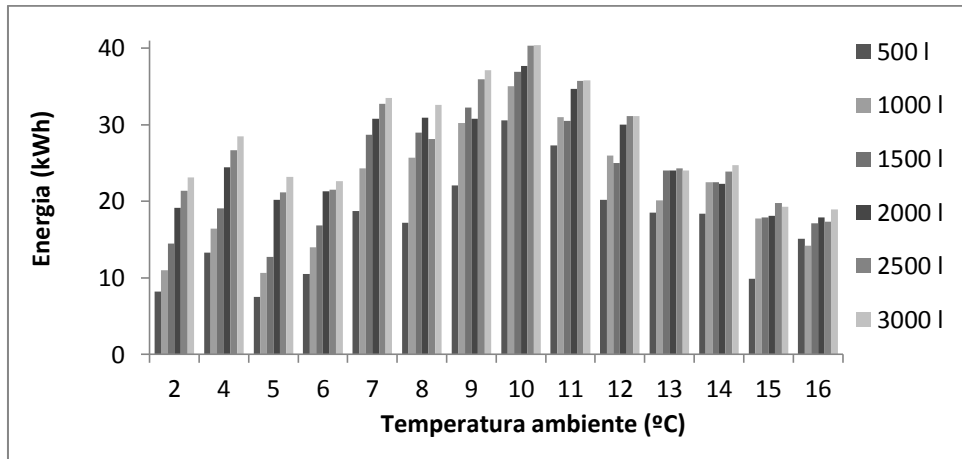


Figura 4-48: Energia não consumida em função do depósito AT

Na Figura 4-49 podemos ver a energia elétrica produzida pelos sistemas direto e com AT para todos os perfis de consumo e depósitos de AT. Podemos constatar que: i) à medida que a temperatura média ambiente aumenta, a energia elétrica produzida vai diminuindo, como seria de esperar; ii) o sistema direto produz maior quantidade de eletricidade que o sistema AT (sem otimização); iii) no sistema AT (sem otimização) a quantidade de eletricidade produzida diminui com o aumento da capacidade do depósito. A justificação apontada para as duas últimas constatações enunciadas é a de que, o sistema direto tem de produzir mais energia térmica (logo, mais energia elétrica) e possui um rendimento elétrico superior ao do sistema AT (sem otimização).

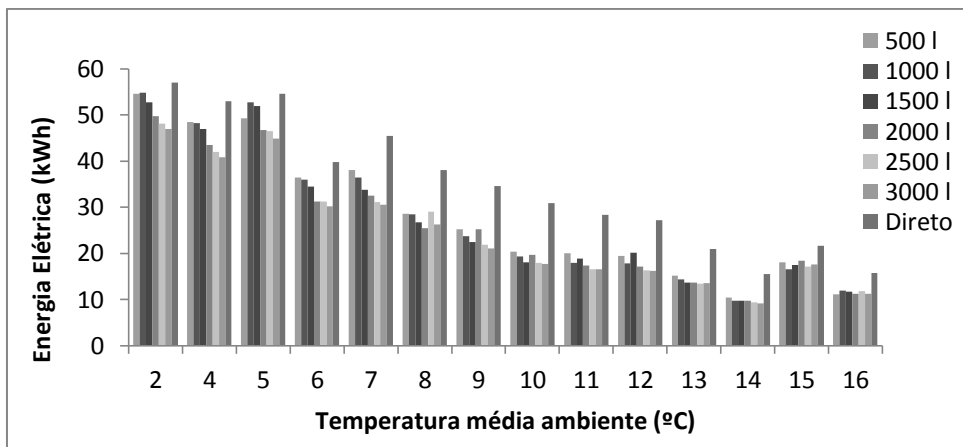


Figura 4-49: Comparação da energia elétrica produzida – Direto–AT

A Figura 4-50 permite comparar o rendimento elétrico da unidade de  $\mu$ CHP para as situações de sistema direto e sistemas com AT (sem otimização) com depósitos de AT de várias capacidades. Podemos constatar que o sistema direto apresenta: i) uma diferença mais significativa entre os valores mínimo e máximo do rendimento elétrico; ii) rendimento elétrico mais elevado para temperaturas ambiente médias intermédias e mais baixos para

temperaturas ambiente médias mais elevadas. No sistema dotado de AT as variações no rendimento elétrico são mais suaves. O rendimento depende da inter-relação entre a capacidade do depósito e o perfil de consumo.

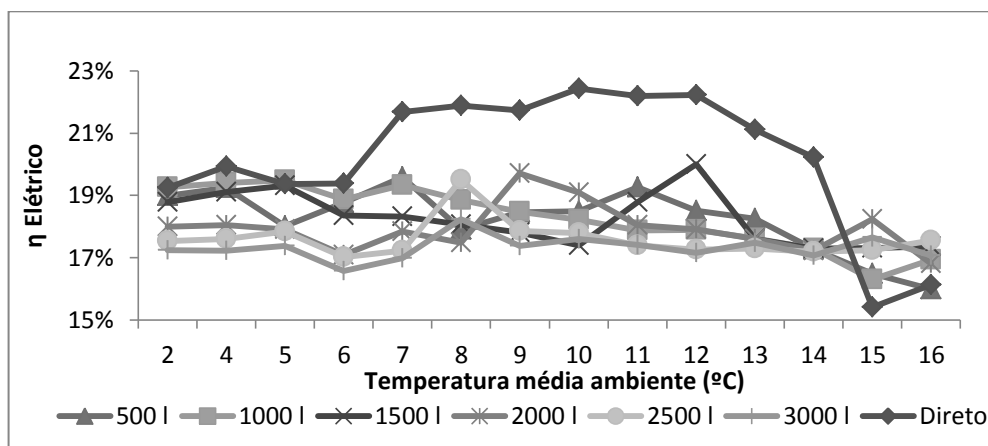


Figura 4-50: Comparação dos rendimentos elétricos da  $\mu$ CHP - Direto-AT

A Figura 4-51 mostra a comparação da energia elétrica produzida pela unidade de  $\mu$ CHP para as situações de sistema “Direto” e sistema dotado de AT (sem otimização) com 1000 litros de capacidade e para o perfil de consumo 1. Analisando o gráfico desta figura, constatamos que as variações da produção elétrica para ao sistema com AT são mais suaves e que o sistema “Direto” está a funcionar durante mais tempo.

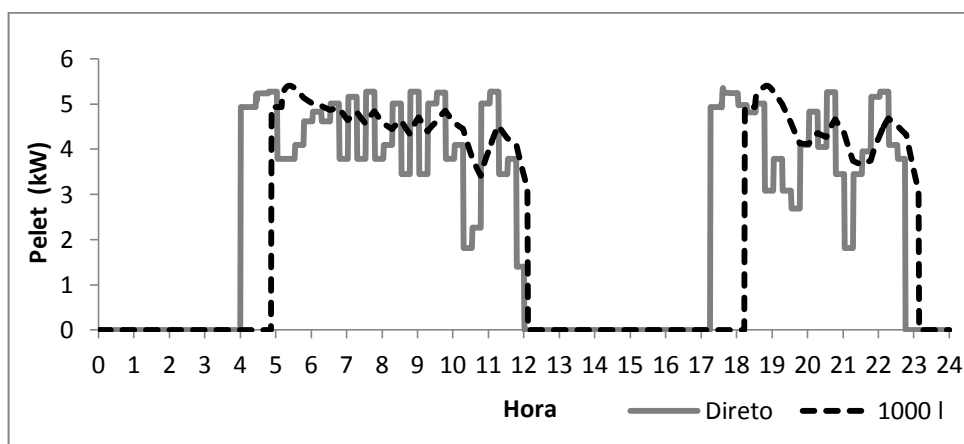


Figura 4-51: Comparação das potências elétricas produzidas - Direto-AT

#### 4.6.2 Comparação entre os casos de estudo 1 e 3

A comparação dos resultados obtidos para os casos de estudo 1 e 3, considerados nas secções anteriores, permitem tirar algumas conclusões:

- A unidade de  $\mu$ CHP consome menos energia optando-se pelo sistema com AT otimizado em relação ao sistema “direto”;

- Considerando o perfil de consumo 1, a unidade de  $\mu$ CHP, consome menos energia optando-se pelo sistema com AT otimizado, com valores de energia que variam entre o valor mínimo de 13 kWh (4,4% da energia absorvida pela  $\mu$ CHP para o sistema direto) para um depósito de AT de 500 l e o valor máximo de 25,8 kWh (8,7% da energia absorvida pela  $\mu$ CHP para o sistema direto) para um depósito de 3000 l. Este perfil reflete, genericamente, o que se passa com todos os outros perfis de consumo, isto é, à medida que aumenta a capacidade do depósito de AT, aumenta o valor de energia não consumida em relação ao sistema “Direto”. A Figura 4-52 mostra este facto;

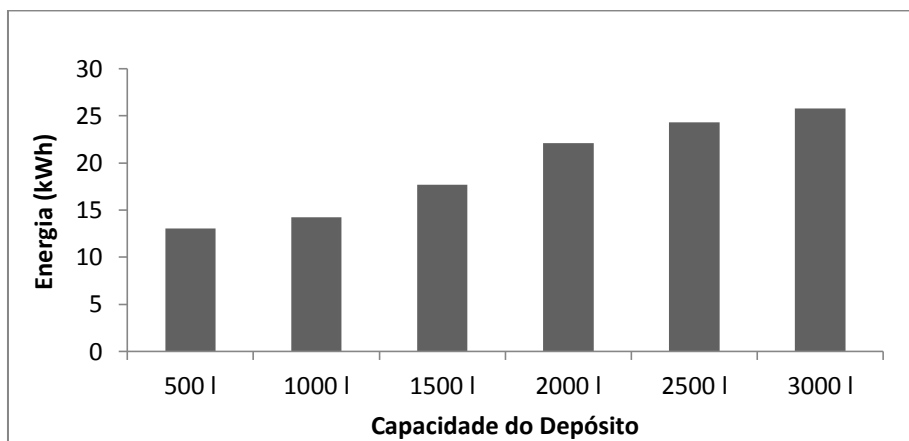


Figura 4-52: Energia não consumida em função do depósito AT\_otim

- O rendimento médio do sistema dotado de AT otimizado é superior ao verificado para o sistema direto. Para o sistema com AT otimizado o rendimento médio apresenta valores que oscilam entre o mínimo de 87,7%, para o perfil de consumo 10 e AT de 1500 litros, e o máximo de 90,2% para o perfil de consumo 13 e AT de 1000 litros. Para o sistema direto os valores do rendimento oscilam entre os 84,9% e os 88,7%.

- A Figura 4-53 compara o rendimento médio para os sistemas direto e dotado de AT otimizado com 1000 litros de capacidade, em função do perfil de consumo. A análise desta figura permite observar que, o rendimento médio tem variações menos significativas no sistema dotado de AT otimizado, isto é, as oscilações no rendimento são menos pronunciadas em comparação com o sistema direto.

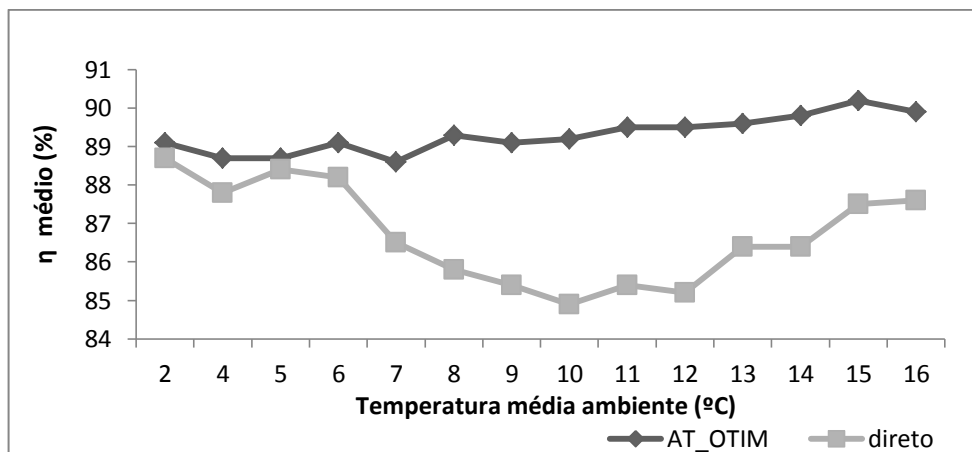


Figura 4-53: Comparação do rendimento médio para os sistemas – Direto – AT\_otim

- A diferença entre a energia absorvida pela unidade de  $\mu$ CHP com sistema direto e com AT otimizado (em kWh) para diferentes perfis típicos de consumo e depósitos de AT é a que se mostra na Figura 4-54. Analisando esta figura, verifica-se que, optando pelo sistema com AT otimizado, a poupança de energia consumida oscila entre o mínimo de 13,0 kWh (4,4 % da energia consumida pelo sistema direto) para o perfil de consumo 1 – depósito de 500 litros e o máximo de 41,7 kWh (29,6% da energia consumida pelo sistema direto) para o perfil de consumo 8 e um depósito AT de 3000 litros. Podemos ainda constatar que, de uma forma geral, à medida que aumenta a capacidade do depósito (para cada um dos perfis de consumo), aumenta a poupança de energia e que o perfil de consumo 8 (10 °C) é o que apresenta maiores poupanças de energia.

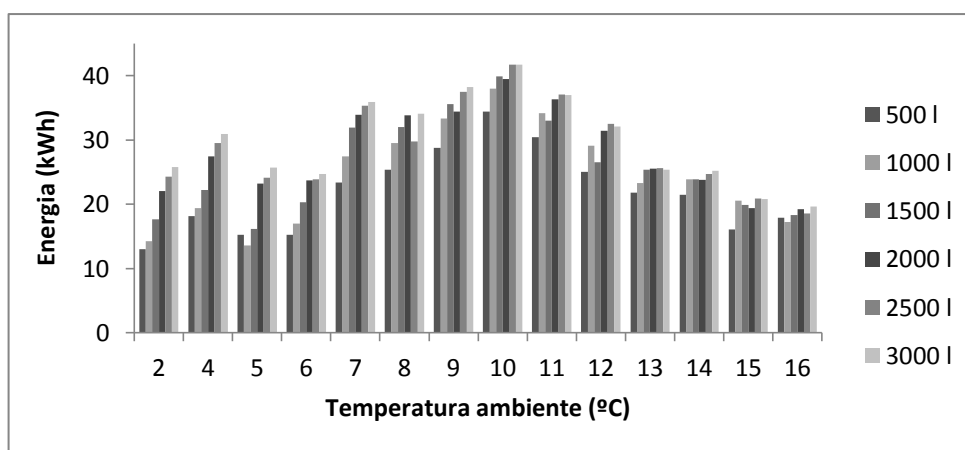


Figura 4-54: Energia não consumida em função do depósito AT\_otim

Na Figura 4-55 podemos comparar a energia elétrica produzida pelos sistemas direto e AT otimizado para todos os perfis de consumo e depósitos de AT. Analisando esta figura verificamos que a energia elétrica produzida diminui com o aumento da temperatura média

exterior e da capacidade do depósito. As constatações e justificação enunciadas para a comparação entre o caso de estuo 1 e 2 são também válidas aqui.

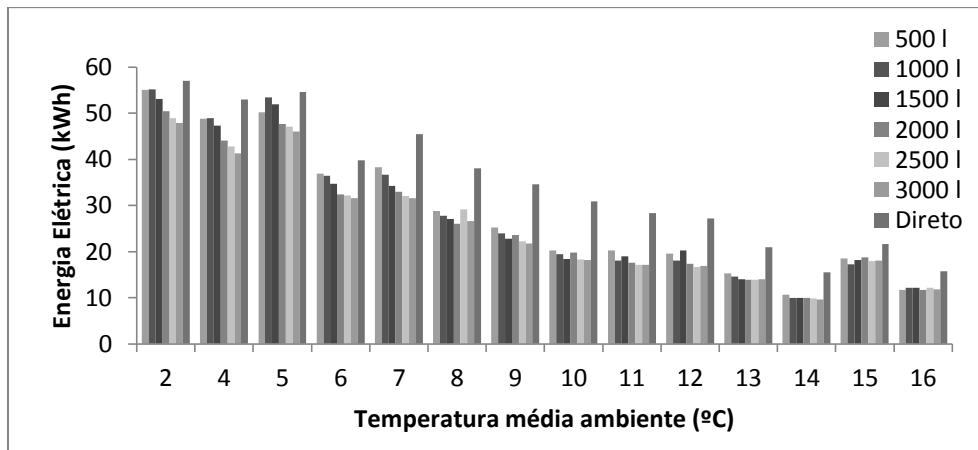


Figura 4-55: Comparação da energia elétrica produzida - Direto - AT\_otim

A Figura 4-56 permite comparar o rendimento elétrico do sistema direto com o sistema AT otimizado, para os diferentes perfis de consumo e capacidades do depósito de AT.

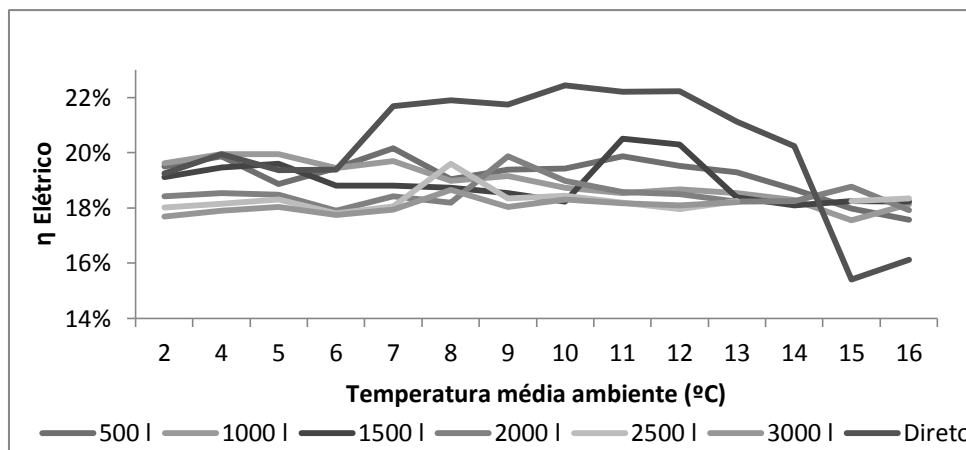


Figura 4-56: Comparação dos rendimentos elétricos - Direto-AT\_otim

A Figura 4-57 mostra a comparação da potência elétrica produzida pela unidade de  $\mu$ CHP entre o sistema “Direto” e o sistema AT otimizado, depósito de 1000 litros para o perfil de consumo 7. Analisando o gráfico desta figura constatamos que as variações da produção elétrica para o sistema com AT são mais suaves que as do sistema “Direto”.

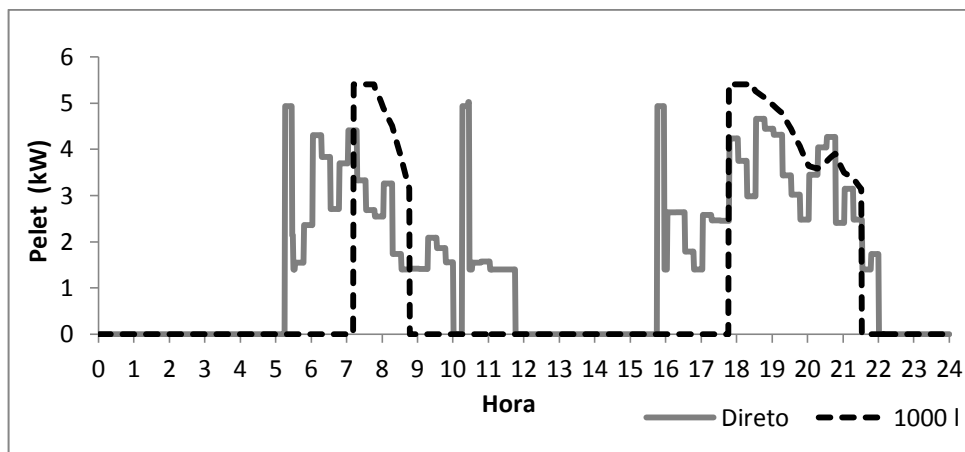


Figura 4-57: Comparação das potências elétricas - Direto-AT\_otim

### 4.6.3 Comparação entre os casos de estudo 2 e 3

Da comparação dos resultados obtidos para os casos de estudo 2 e 3 considerados nas secções anteriores é possível retirar algumas conclusões, nomeadamente:

- A unidade de  $\mu$ CHP consome menos energia quando dotada de sistema de AT com otimização do que com o sistema AT (sem otimização). Optando-se pelo sistema dotado de AT e otimização a poupança de energia apresenta valores que variam entre o valor mínimo de 0,5 kWh (0,9% da energia absorvida pela caldeira - sistema AT sem otimização) para o perfil de consumo 12 e um depósito de AT de 3000 litros e o valor máximo de 8,2 kWh (5,4% da energia absorvida pela caldeira – sistema AT sem otimização) para o perfil e consumo 6 e um depósito de 500 litros;
- No caso do perfil de consumo 1 a unidade de  $\mu$ CHP consome menos energia quando se opta pelo sistema dotado de AT com otimização, com valores de redução de consumo que variam entre o mínimo de 2,7 kWh (1,0% da energia absorvida pela  $\mu$ CHP – sistema AT sem otimização) para um depósito de 3000 litros e o valor máximo de 4,9 kWh (1,7% da energia absorvida pela  $\mu$ CHP – sistema AT sem otimização) para um depósito de 500 litros. O comportamento da unidade de  $\mu$ CHP para este perfil de consumo reflete, genericamente, o que se passa com todos os outros perfis de consumo, isto é, à medida que aumenta a capacidade do depósito de AT, diminui a poupança de energia em relação ao sistema AT sem otimização. A Figura 4-58 ilustra o que se acabou de referir;

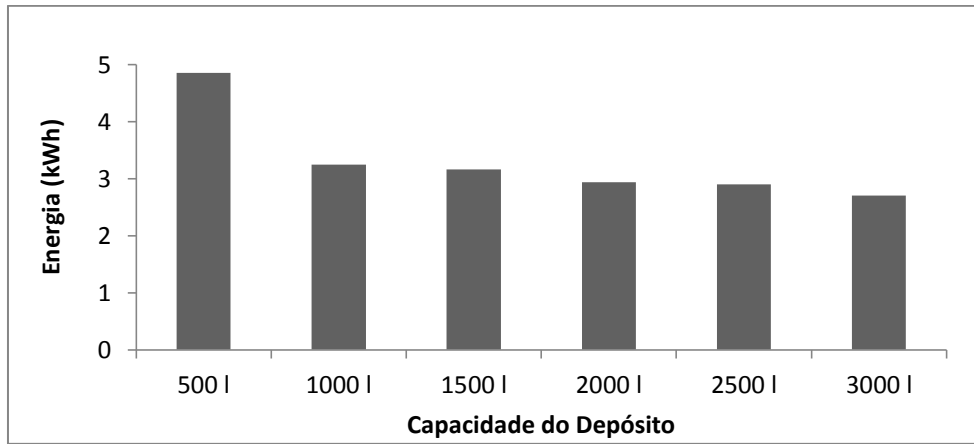


Figura 4-58: Energia não consumida pela  $\mu$ CHP - AT-AT\_otim

- O rendimento médio do sistema dotado com AT otimizado é, como se esperava, superior ao do sistema com AT sem otimização. Para o sistema AT otimizado, o rendimento médio apresenta valores a oscilar entre o mínimo de 87,7% para o perfil de consumo 10 com depósito de 1500 litros e o máximo de 90,2% para o perfil de consumo 13 com depósito de 1000 litros. Para o sistema com AT sem otimização, os valores oscilam entre os 87,8% para o perfil de consumo 10 e depósito de 1500 litros e o máximo de 90,0% para o perfil de consumo 4 e depósito de 3000 litros. A Figura 4-59 mostra a evolução do rendimento médio em função da temperatura média exterior para o perfil de consumo 1 e um depósito de 1000 litros.

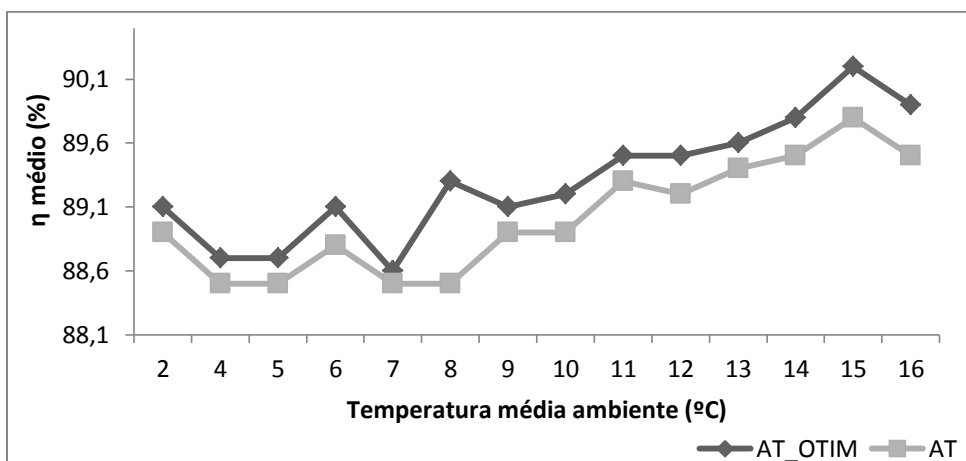


Figura 4-59: Comparação do rendimento médio da  $\mu$ CHP - AT-AT\_otim

- A diferença entre a energia absorvida pela unidade de  $\mu$ CHP com sistema AT sem otimização e AT com otimização, para diferentes perfis típicos de consumo e capacidades de depósitos é a que se mostra na Figura 4-60. Analisando esta figura, verifica-se que, optando pelo sistema AT otimizado, a poupança de energia consumida oscila entre o mínimo de 0,5 kWh (0,9 % da energia consumida pelo sistema AT sem otimização) para o perfil de consumo 12 e um depósito de 3000 litros e o máximo de 8,2 kWh (5,1% da energia consumida pelo

sistema AT sem otimização) para o perfil de consumo 6 e um depósito de 500 litros. Observando o gráfico da Figura 4-54, podemos constatar que, de uma forma geral, à medida que aumenta a capacidade do depósito (para cada um dos perfis de consumo) diminui a poupança de energia e que o sistema AT otimizado fornece maiores poupanças de energia para um depósito de 500 litros. Esta maior poupança de energia para o depósito de 500 litros prende-se com o maior rendimento elétrico do sistema AT otimizado relativamente ao sistema AT sem otimização.

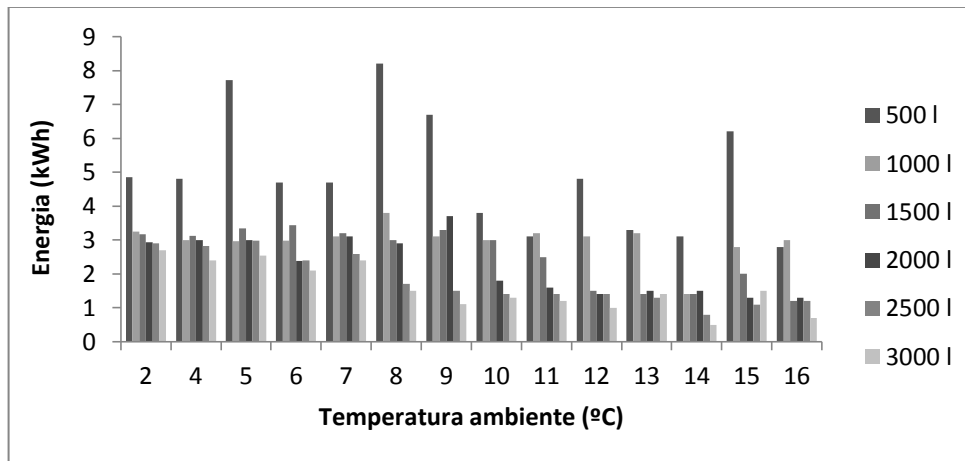


Figura 4-60: Energia não consumida pela μCHP - AT-AT\_otim

Na Figura 4-61 podemos comparar a energia elétrica produzida pelos sistemas AT e AT otimizado para todos os perfis de consumo e depósitos considerados. Analisando esta figura verificamos que a energia elétrica produzida diminui com o aumento da temperatura média exterior e da capacidade do depósito. Verificamos ainda que, a energia elétrica produzida por qualquer dos sistemas é semelhante havendo uma ligeira vantagem para o sistema otimizado.

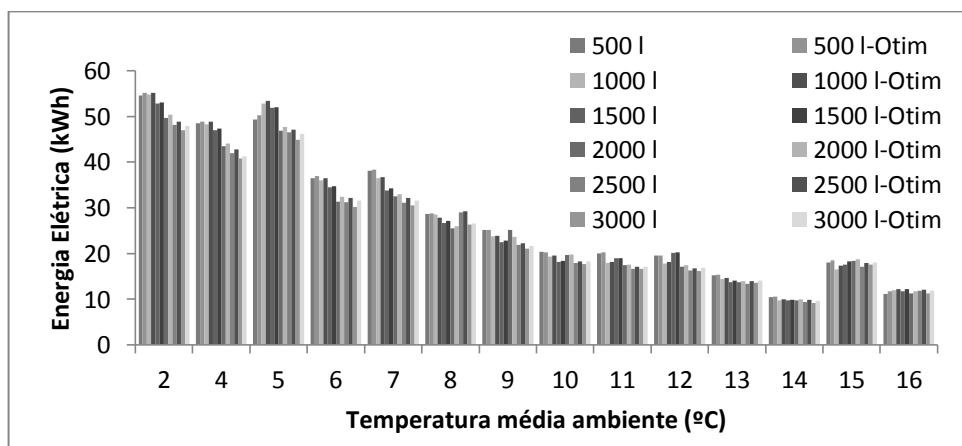


Figura 4-61: Energia elétrica produzida pela μCHP – AT-AT\_otim

A Figura 4-62 ilustra a influência que a capacidade do depósito tem no rendimento elétrico da unidade de  $\mu$ CHP.

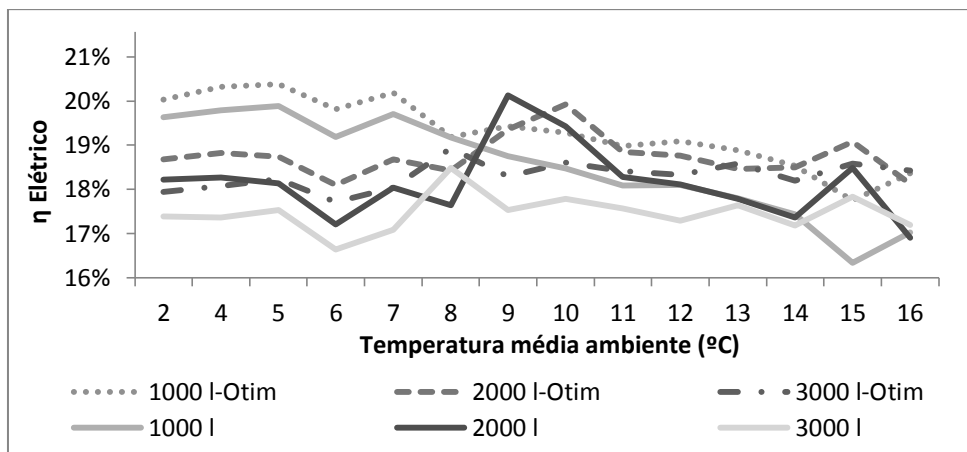


Figura 4-62: Rendimento elétrico da  $\mu$ CHP - AT-AT\_otim

## 5. Conclusões e trabalhos futuros

### 5.1 Conclusões

A presente dissertação, procurou contribuir para a disseminação dos sistemas de microcogeração. Iniciou-se com a apresentação e comparação de diferentes soluções “convencionais” para fonte de produção de calor destinadas a sistemas de aquecimento central de edifícios residenciais. Em seguida foram descritos e analisados os principais sistemas de microcogeração ( $\mu$ CHP) destinados a serem aplicados no sector residencial, avaliando-se as suas principais vantagens, inconvenientes e controlabilidade.

A parte principal do trabalho desenvolvido consistiu na implementação de um modelo capaz de permitir a simulação do comportamento de unidades de  $\mu$ CHP em termos das potências térmica e elétrica produzidas, rendimentos e temperaturas. O modelo implementado permite ainda avaliar a influência que o armazenamento térmico pode produzir sobre o comportamento referido. Ou seja, o modelo permite considerar duas situações distintas: i) a satisfação das necessidades térmicas de energia de forma direta (produção feita no momento do consumo); ii) a satisfação das necessidades térmicas de forma indireta, utilizando um depósito de AT (com capacidade variável).

O modelo desenvolvido foi aplicado a uma situação específica baseada numa habitação localizada em Viseu para a qual foi possível adaptar perfis de consumo térmico. Foram efetuadas simulações considerando a satisfação direta dos consumos térmicos bem como a satisfação indireta através de depósitos de AT com capacidades entre 500 e 3000 litros.

Os resultados das simulações efetuadas permitem obter algumas conclusões, das quais se destacam as seguintes:

- Para cada um dos perfis de consumo testados, verifica-se que, de um modo geral, a utilização de sistemas de AT associados à unidade de  $\mu$ CHP tende a reduzir o consumo de energia por parte desta unidade (face ao sistema “direto”). Ademais, o rendimento médio da unidade de  $\mu$ CHP tende a aumentar à medida que aumenta a capacidade do depósito. Assim, por exemplo para o perfil de consumo 2 o rendimento médio é de 88,7% e para um depósito de 3000 litros este rendimento sobe para 90,1%;
- A utilização de depósito de AT pode representar uma poupança de energia primária diária, face ao sistema “direto”, que pode variar entre 7,5 kWh e 40,4 kWh, caso se opte pelo sistema “AT” ou entre os 13 kWh e os 41,7 kWh se a opção recair no sistema “AT otimizado”;
- Tendo como referência o sistema dotado de AT sem otimização verifica-se que, de um modo geral, a poupança de energia consumida pela unidade de  $\mu$ CHP diminui à medida que aumenta a capacidade do depósito se optarmos pelo sistema AT otimizado;
- Tomando ainda como referência o sistema AT sem otimização, se a opção recair no sistema “AT otimizado” a poupança diária de energia pode ir de 0,5 kWh a 8,2 kWh, dependendo do perfil de consumo e do volume do depósito;
- Em todas as configurações testadas existe produção de energia elétrica que é maior para temperaturas médias exteriores mais baixas, tendencialmente menor quando se utiliza o AT e menor para depósitos de AT de maior volume;
- O sistema direto é de todas as configurações testadas a que apresenta maiores variações no rendimento elétrico médio (entre 15,4% e 22,4%) em comparação com os sistemas AT que apresentam variações mais suaves (entre 16,0% e 20,4%). Assim, o sistema AT sem otimização apresenta valores do rendimento elétrico médio entre 16,0% e 20,0% enquanto o sistema AT com otimização, apresenta valores de rendimento elétrico médio entre 17,5% e 20,4%;
- A produção de energia elétrica na maioria dos perfis de consumo não “cobre” ambos os períodos de maior carga dos sistemas elétricos (ponta do final da manhã e ponta do fim da tarde), no entanto, com o recurso à utilização de depósitos de AT existem situações de maior coincidência da produção elétrica com o diagrama de carga do sistema elétrico.

## 5.2 Trabalhos futuros

Este trabalho teve como principais objetivos a análise e comparação de diferentes soluções de sistemas de aquecimento central de edifícios residenciais, particularmente no que se refere à fonte de produção de energia. Pretendeu, assim, contribuir para o desenvolvimento e

consequente implementação da  $\mu$ CHP no setor residencial, visando a redução do consumo de energia e emissão de GEE.

Tendo em vista o incentivo à implementação e divulgação da  $\mu$ CHP, seria importante um enquadramento legislativo, no sentido de, através de incentivos fiscais, fomentar este tipo de produção de energia, de modo a torná-la económica e ambientalmente sustentável.

Os sistemas analisados na literatura científica, maioritariamente, estão em fase de testes e com uma implementação pouco significativa. Seria importante uma maior investigação e análise, a nível nacional, sobre os sistemas de  $\mu$ CHP, de modo a fornecer uma alternativa eficiente aos sistemas de aquecimento tradicionais, contribuindo desta forma, para uma melhor gestão da produção, transporte e distribuição de energia elétrica, aliada à produção de calor de pequena escala.

Tratando-se de uma tecnologia com aplicação próxima do consumidor final, (após o devido enquadramento na legislação em vigor e no mercado nacional), uma hipótese de estudo futuro poderá ser a averiguação do possível interesse, na área doméstica, de aquisição de um sistema de  $\mu$ CHP para aplicação a edifícios residenciais, nomeadamente a habitações familiares.

A realização de um estudo baseado numa situação real, que passaria pela implementação de sistemas de  $\mu$ CHP piloto em habitações familiares a nível nacional, por forma a analisar, na prática e de acordo com a nossa realidade, o potencial destas tecnologias.

Outro ponto importante para trabalhos futuros poderia passar pela análise e implementação de outras tecnologias de armazenamento térmico em conjugação com a implementação simultânea de sistemas de  $\mu$ CHP, bombas de calor e sistemas solares térmicos.

## REFERÊNCIAS

- [1] M. Zago, A. Casalegno, R. Marchesi, and F. Rinaldi, “Efficiency Analysis of Independent and Centralized Heating Systems for Residential Buildings in Northern Italy,” *Energies*, vol. 4, no. 12, pp. 2115–2131, Nov. 2011.
- [2] P. M. A. da Costa, “Contribuição para a Regulação da Integração de Microgeração e Microredes em Sistemas de Distribuição de Energia Eléctrica.,” Erse, 2010.
- [3] A. D. Smith, P. J. Mago, and N. Fumo, “Benefits of thermal energy storage option combined with CHP system for different commercial building types,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 1, pp. 3–12, Mar. 2013.
- [4] P. M. A. da Costa, “Regulação da integração de microgeração e microredes em sistemas de distribuição de energia eléctrica,” Tese de Doutoramento, FEUP, 2008.
- [5] O. P. Europeu, “O parlamento europeu e o conselho da união europeia,” pp. 50–60, 2004.
- [6] E. Entchev, “Micro-generation technology assessment for housing technology,” *Energy Build.*, vol. 36, no. 9, pp. 925–931, Sep. 2004.
- [7] F. A. dos S. A. de Oliveira, “Potencial da Micro-cogeração nos sectores Residencial e de Serviços,” tese de mestrado, Universidade de Aveiro, 2009.
- [8] European, Commission, *Energy, transport and environment indicators 2012*. 2012.
- [9] [Http://www.dgeg.pt/](http://www.dgeg.pt/), “DGEG-acedido em 2013/set/13.” 2013.
- [10] L. F. V. Morais, “Consumos Energéticos no Sector Residencial : Um Caso de Estudo,” dissertação de mestrado, UTAD, 2009.
- [11] T. P. Isolani, R. C. Adiconsum, F. C. Ademe, F. P. Escan, A. O. Adiconsum, and I. O. Deco, “Eficiência energética nos edifícios residenciais,” 2008.
- [12] Direção Geral de Energia - Ministério da Economia, “Eficiência Energética nos Edifícios.” 2002.
- [13] Y. K. Tilt, “Micro-Cogeneration for Single-Family Dwellings,” no. June. 2001.
- [14] J. G. Martins, “Climatização - Condições Técnicas de Execução,” <http://www.scribd.com/doc/59085081/Climatizacao>.
- [15] “Central Heating Systems,” [Http://www.pearsonschoolsandcolleges.co.uk/FEAndVocational/Construction/Plumb](http://www.pearsonschoolsandcolleges.co.uk/FEAndVocational/Construction/Plumb)

## REFERÊNCIAS

- ing/Levels-2-and-3-Diploma-in-Plumbing-Studies/Samples/FreesamplechapterPlumbing/Level2\_PLUMB\_SB.pdf, pp. 309–336.
- [16] UPONOR, “Manual Técnico Sistema Uponor para Instalações de Aquecimento por Radiadores,” [http://www.padinho.pt/catalogos/uponor\\_pex.pdf](http://www.padinho.pt/catalogos/uponor_pex.pdf). .
- [17] M. Doninelli, “Systems with Manifolds,” [http://www.caleffi.us/en\\_US/caleffi/Details/Handbooks/pdf/quaderno\\_3\\_en.pdf](http://www.caleffi.us/en_US/caleffi/Details/Handbooks/pdf/quaderno_3_en.pdf).
- [18] ITT Portugal, “Bombas e tubagens na teoria e na prática,” <http://www.lowara.com/lowdata/doc/PT/eng-low-slutlig-ed-pt.pdf>.
- [19] G. Mader, B. Palm, B. Elmegaard, T. Tiedemann, and M. Skovrup, “Cost and energy efficiency of air-water heat pumps : A screening method,” no. January, 2012.
- [20] D. Renewables, “Dimplex Heat Pumps,” [http://www.dimplex.co.uk/assets/kb/brochure/0/Heat\\_Pump\\_Brochure.pdf](http://www.dimplex.co.uk/assets/kb/brochure/0/Heat_Pump_Brochure.pdf), 2013. .
- [21] M. G. Martínez, L. C. Andrade, P. M. B. Bugallo, and B. M. Iglesias, “Energy supply in buildings : heat pump and micro-cogeneration,” pp. 1313–1320, 2011.
- [22] O. Parlamento, “DIRECTIVA 2001/77/CE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 27 de Setembro de 2001 relativa à promoção da electricidade produzida a partir de fontes de energia renováveis no mercado interno da electricidade,” vol. 6, pp. 33–40, 2001.
- [23] A. D. Salum, “Eficiência energética em sistema de combustão de caldeira,” 2011.
- [24] P. C. da C. Pinheiro and S. A. A. da G. Cerqueira, “Método de cálculo do balanço térmico de caldeiras (1),” no. 1, 1995.
- [25] CleaverBrooks, “Boiler efficiency guide,” [http://www.cleaver-brooks.com/uploadedFiles/Internet\\_Content/Reference\\_Center/Insights/Boiler\\_Effic\\_Guid.,](http://www.cleaver-brooks.com/uploadedFiles/Internet_Content/Reference_Center/Insights/Boiler_Effic_Guid.,) 2010.
- [26] Bureau of Energy Efficiency, “1 . Energy Performance Assessment of Boilers,” [http://www.em-ea.org/Guide\\_Books/book-4/4.1\\_Boil.,](http://www.em-ea.org/Guide_Books/book-4/4.1_Boil.,) pp. 1–29.
- [27] P. Glenn Showers, “Efficiency Insights and Tips Debunking five common myths about boiler-system,” [http://lattnerboiler.com/Boiler\\_Oper.\\_Effic.\\_-Oper.\\_Tips.pdf](http://lattnerboiler.com/Boiler_Oper._Effic._-Oper._Tips.pdf), no. November, pp. 53–56, 2002.
- [28] [Http://www.cogeneurope.eu/what-is-cogeneration\\_19.html](Http://www.cogeneurope.eu/what-is-cogeneration_19.html), “Cogen Europa-acedido em 2013/set/13.” .
- [29] G. R. Simader, R. Krawinkler, G. Trnka, and E. Commission, “Micro CHP systems :,” Viena-Austrian Energy Agency, 2006.

- [30] B. M. Houwing, R. R. Negenborn, and B. De Schutter, "Demand Response With Micro-CHP Systems," vol. 99, no. 1, 2011.
- [31] S. E. AS, "Micro CHP Technology & Economic Review," [http://www.microchap.info/Future\\_Cogen\\_Micro\\_CHP.pdf](http://www.microchap.info/Future_Cogen_Micro_CHP.pdf), no. June, 2003.
- [32] J. Harrisson and S. Redford, "Domestic CHP What are the potential benefits?," 2001.
- [33] M. Pehnt, M. Cames, C. Fisher, B. Praetorius, L. Schneider, K. Schumacher, and J.-P. VoB, *Micro Cogeneration Towards Decentralized Energy Systems*. 2006.
- [34] United Technologies Research Center, "Micro-CHP Systems for Residential Applications Final Report," no. June, 2006.
- [35] F. H. Sakatsume, "Uso de cogeração no sector residencial: a aplicação de mini e micro-cogeneradores a gás natural," Tese mestrado Universidade Federal Rio de Janeiro, 2004.
- [36] B. Aoun, M. P. Les, B. Residentiels, F. Avec, D. E. S. Energies, M. Combined, H. Operating, O. N. Renewable, E. For, R. Building, M. B. Peuportier, M. P. Stouffs, R. M. G. Descombes, R. M. O. Terzidis, and E. M. D. Clodic, "T h e s e," 2008.
- [37] M. A. L. Pereira, "Estudo do desenvolvimento da integração de micro-cogeração em Portugal," Tese Mestrado, FEUP, 2009.
- [38] A. C. M. Ferreira, M. L. Nunes, L. A. S. B. Martins, and S. F. C. F. Teixeira, "A Review of Stirling Engine Technologies applied to micro-Cogeneration Systems," pp. 1–11, 2012.
- [39] Cogen Portugal, "Brochura Micro-cogeração," [http://www.cogenportugal.com/ficheirosupload/Brochura\\_Micro-cogeração.pdf](http://www.cogenportugal.com/ficheirosupload/Brochura_Micro-cogeração.pdf), 2011.
- [40] J. P. T. B. dos Santos, "Estudo de sistemas solares térmicos aplicados a micro-cogeração," Relatório projeto final MIEM, FEUP, 2008.
- [41] G. Faninger, "Thermal Energy Storage," [http://celsius.co.kr/phase\\_change\\_materials/download/energy/Thermal\\_Energy\\_Storage.pdf](http://celsius.co.kr/phase_change_materials/download/energy/Thermal_Energy_Storage.pdf), pp. 1–27.
- [42] J. F. Mendes, A. Joyce, P. Horta, and M. J. Brites, "Armazenamento de energia solar térmica," <http://hdl.handle.net/10400.9/1153>.
- [43] C. Services, "Sistema de isolamento do tanque de armazenamento térmico de energia," pp. 1–2, 2009.
- [44] J. Buzás, "Block-Oriented Modeling of Solar Thermal," tese doutoramento, Szent István University, 2009.
- [45] REN, "Dados Técnicos 2012," 2012. .

## REFERÊNCIAS

- [46] R. M. dos S. Correia, “Dimensionamento e Gestão de Sistemas de Produção, Armazenamento e Consumo de Eletricidade com Origem em Fontes Renováveis,” Dissertação Mestrado, ESTGV, 2012.

