

**Influência das recuperações térmicas (ar e água) no
dimensionamento de sistemas energéticos centralizados em
Grandes Edifícios de Serviço**

Mauro Valério Rodrigues Vieira

Dissertação do MIEM

Orientador na AFAconsult: Engenheira Isabel Sarmento

Orientador na FEUP: Professor José Luis Alexandre



FEUP

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Julho 2011

Resumo

Esta dissertação tem como objectivo o estudo de diversas hipóteses de recuperação térmica passíveis de aplicação em sistemas de climatização e avaliar o impacto que estas podem ter no dimensionamento dos equipamentos conversores (“produtores”) de energia térmica, que no presente caso são caracterizados por caldeiras de produção de água quente e por unidades produtoras de água refrigerada do tipo bomba de calor por condensação a ar (*chillers* ar-água) ou por condensação a água (*chillers* água-água).

Para realizar este trabalho, foi utilizado um programa de simulação dinâmica (*Energy Plus*), no qual se configuraram diversas soluções de sistemas AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado), constituindo cinco cenários de análise, num dos volumes do novo hospital central de Évora, designado de “*Corpo H*”, com cerca de 3800 m². As soluções de recuperação térmica, presentes nos respectivos cenários, são constituídas por recuperadores de placas de fluxos cruzados ou por recuperadores de calor rotativos, aplicados às unidades de tratamento de ar e por *chillers* com recuperação de calor.

A análise dos referidos cenários foi realizada sobre a influência que as soluções de recuperação térmica aplicadas aos sistemas AVAC podem ter na determinação da potência dos respectivos equipamentos “produtores” de energia térmica mas, também, em termos do tempo de resposta daqueles sistemas para que todas as zonas climatizadas estejam em conforto térmico, em função do horário definido para o funcionamento daqueles equipamentos produtores.

É, ainda, avaliado para cada cenário o impacto ao nível da poupança nos consumos energéticos e nos custos de investimentos.

A utilização de tecnologias de recuperação térmica permite, potencialmente, e consoante os cenários analisados, reduzir a potência térmica do conjunto das caldeiras na ordem dos 40 a 70% e a potência dos *chillers* em, aproximadamente, 15%. Tal, traduz-se numa redução dos custos com os equipamentos. Esta redução no dimensionamento dos equipamentos não afecta o consumo energético, existindo apenas uma variação de cerca de 1% quando se utiliza equipamentos com o dimensionamento em base nos dias de projecto em comparação com um dimensionamento com base nas potências térmicas máximas atingidas. Todavia, com a diminuição da potência destes equipamentos, verifica-se um aumento do tempo de resposta do sistema AVAC desde a fase de arranque até se atingir o conforto térmico nos diferentes espaços. De facto, considerando que os equipamentos “produtores” de energia térmica são desligados desde a 01:00 às 06:00 horas, o tempo de resposta do sistema AVAC, para criar

condições de conforto térmico nos diversos espaços, aumenta entre 1h30min a 3h15min, dependendo da redução de potência térmica instalada face à tecnologia de recuperação térmica analisada.

Paralelamente, verifica-se que a utilização de recuperação térmica nos sistemas AVAC pode conduzir a reduções na ordem dos 50 aos 75% do consumo de gás natural e de 2% do consumo de energia eléctrica do edifício, consoante o tipo e a quantidade de tecnologias introduzidas.

Palavras-chave: Recuperação térmica, simulação dinâmica, dimensionamento, consumo energético, tempo de resposta

Influence of heat recovery (air and water) in the design of centralized energy systems in big service buildings

Abstract

The dissertation aims to study the recovery of several hypotheses that can be applied in thermal HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) systems and assess the impact they may represent in the design of equipment that converts ("produces") energy, which in this case are characterized by boilers for production of hot water and chilled water production units (heat pump) by air or water cooled condensers.

To accomplish this analysis, a dynamic simulation program was used (*Energy Plus*), in which various heat recovery solutions were formed, constituting five scenarios of analysis, on one of the volumes of the new central hospital in Evora, designated "*Corpo H*", with about 3800 m². The thermal recovery solutions consist of a cross flow plate heat exchangers or a rotary heat wheel applied in the air handling unit and by chillers with heat recovery.

The analysis of these scenarios is based on the influence that heat recovery solutions, applied to HVAC systems, may have in determining the power of the thermal energy "producing" equipment and also in terms of response time of those systems, so that all climate controlled zones are in thermal comfort, when an operational schedule is introduced.

The impact of each scenario in terms of savings in energy consumption and investment costs is also assessed.

The use of heat recovery technology allows, potentially, and depending on the scenarios analysed, in reducing the thermal power of the boiler group in the range of 40 to 70% and the thermal power of chillers in approximately 15%. This translates into, of course, a reduction of costs associated with the first investments and a further reduction of energy consumption, although less than 1%. However, by reducing the power of these devices, the response time of the HVAC system increases. In fact, considering the equipment that "producers" thermal energy are disconnected from 01:00 to 06:00 hours, the response time of the HVAC system to achieve comfort conditions in all the controlled zones, shows an increase ranging from 1h30min to 2h45min, depending on the reduction of thermal power applied which resulted of the thermal recovery technology analysis.

In parallel, it appears that the use of heat recovery in HVAC systems can lead to reductions of 50% to 75% of natural gas consumption and 2% of electric energy consumption of the building, depending on the type and amount of introduced technologies.

Keywords: Thermal recovery, dynamic simulation, sizing, energy consumption, response time

Agradecimentos

Agradeço à minha família pelo apoio durante toda a minha vida, aos amigos conhecidos na faculdade e fora dela que me acompanharam em tardes e noites de estudo, obrigado pela amizade, a todos os professores da faculdade de engenharia pela transmissão de conhecimentos.

Agradeço em especial à minha namorada Paula Costa que me tem apoiado e motivado em tudo, desde antes da entrada na faculdade.

Agradeço também em especial ao Jorge Ascensão, amigo que esteve sempre presente e disposto a ajudar nestes últimos 5 anos.

Agradeço à empresa AFAconsult, que disponibilizou os dados do projecto para a concretização desta dissertação. Agradeço aos seus colaboradores da secção de mecânica pela simpatia e disponibilidade para o esclarecimento das dúvidas que foram surgindo.

Por fim, agradeço aos meus orientadores, Professor José Luís Alexandre e Eng^a. Isabel Sarmento, pelos conselhos, pela ajuda e pelo desafio que propuseram, de aprender e a utilizar um programa de simulação, sem interface gráfica, a um nível muito independente.

Um muito obrigado a toda a comunidade FEUP.

Nomenclatura

Abreviaturas

ACSS – Administração Central do Sistema de Saúde

AQS – Água Quente Sanitária

ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

BLAST – Building Loads Analysis and System Thermodynamics

CE – Certificado Energético

COP – Coefficient Of Performance (coeficiente de desempenho)

DOE – Department of Energy (departamento de energia)

ERSE – Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos

IDF – Input Data File (ficheiro de introdução de dados do *Energy Plus*)

IVA – Imposto sobre o Valor Acrescentado

INMG – Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica

kgep – Quilograma equivalente de petróleo

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

QAI – qualidade do ar interior

RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

rph – Renovações por hora

RSECE – Regulamento dos Sistemas Energéticos e de Climatização dos Edifícios

tep – Tonelada Equivalente de Petróleo

UTAN – Unidade de Tratamento de Ar Novo

VC – Ventilador Convectivo

Índice

Resumo	ii
Nomenclatura.....	viii
1 Introdução	1
1.1 Planeamento	2
2 Contexto energético nacional.....	3
3 Estado de arte	5
3.1 Recuperação térmica nos <i>chillers</i>	6
3.2 Recuperação térmica nos sistemas tudo ar.....	7
3.2.1 Permutador de calor de placas.....	7
3.2.2 Permutador de calor do tipo rotativo	8
3.3 Programa de simulação dinâmica	10
4 Caso de estudo	11
4.1 Descrição do caso de estudo	11
4.1.1 “Zonamento”	12
4.2 Parâmetros e pressupostos do caso de estudo	14
4.2.1 Dados climáticos	14
4.2.2 Temperatura interior de projecto.....	14
4.2.3 Densidade e perfis de ocupação, iluminação e de equipamentos	15
4.2.4 Definição dos caudais de ventilação	16
4.2.5 Descrição do sistema base de AVAC.....	17
4.2.6 Pressupostos introduzidos na simulação dinâmica.....	17
5 Metodologia	19
6 Cálculo das cargas térmicas	21
7 Cenários analisados e resultados.....	23
7.1 Descrição dos cenários.....	23
7.2 Cenário 5.....	24
7.3 Resultados	31
8 Conclusões	37
8.1 Perspectivas de trabalho futuro	38
9 Bibliografia	39
ANEXO A: Tabelas complementares	41
ANEXO B: Nós de ligação de um sistema base de AVAC.....	43
ANEXO C: Resultados da simulação dos cenários	45
ANEXO D: Custos de primeiro investimento	63

1 Introdução

Os equipamentos de recuperação térmica, associados aos sistemas de climatização (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado - AVAC), permitem a redução no consumo energético para a satisfação das necessidades de conforto térmico, aumentando a eficiência energética dos edifícios. No entanto, poderão aquelas recuperações térmicas reflectir-se ao nível do dimensionamento dos equipamentos geradores de energia térmica?

É neste sentido que o presente trabalho se desenvolve, isto é, tem como objectivo a análise da influência da implementação de soluções de recuperação térmica no dimensionamento dos equipamentos “produtores” da energia térmica.

Para esta análise, o ponto de partida é um sistema de referência, sem quaisquer tecnologias de recuperação térmica, sendo, depois, adicionadas diferentes tecnologias de recuperação térmica, desde os equipamentos “produtores” até aos sistemas de difusão de energia térmica, constituindo assim cinco cenários de análise.

Para cada um dos cinco cenários, foram avaliados os potenciais de redução da potência térmica, dos consumos e custos energéticos, custos de investimento e, ainda, a influência que a redução de potência térmica instalada tem ao nível do tempo de resposta do sistema AVAC para que todas as zonas climatizadas estejam em conforto térmico, com a imposição de um horário de funcionamento dos equipamentos “produtores” e respectivos equipamentos de distribuição de energia térmica (genericamente, designados por centrais térmicas).

Conforme referido, o primeiro cenário traduz um sistema de referência; a este foram adicionados, nas unidades de tratamento de ar, recuperadores de placas de fluxos cruzados, constituindo assim o segundo cenário. O terceiro cenário é composto pelo sistema de referência com recuperadores de calor rotativos a equipar as unidades de tratamento de ar. O quarto cenário analisa a recuperação de calor ao nível dos condensadores dos *chillers*, conjuntamente com a recuperação térmica nas unidades de tratamento de ar, caracterizada por permutadores de placas de fluxos cruzados. O quinto e último cenário é composto por um

recuperador de calor rotativo associado às unidades de tratamento de ar e pela recuperação térmica nos *chillers*.

O caso de estudo incide num dos vários volumes do novo hospital central de Évora, designado de “*Corpo H*”, sendo os resultados energéticos obtidos recorrendo a um programa de simulação dinâmica, *Energy Plus v6.0.0.023*.

1.1 Planeamento

O presente trabalho engloba um total de 8 capítulos:

Capítulo 1 – Presente capítulo com o enquadramento e a descrição do trabalho realizado.

Capítulo 2 – Exposição da legislação nacional aplicável à eficiência energética dos edifícios.

Capítulo 3 – Descrição das tecnologias de recuperação térmica de climatização, aplicados neste trabalho e descrição do programa de simulação dinâmica utilizado.

Capítulo 4 – Enquadramento do edifício e descrição do caso de estudo. Redução do número de zonas do edifício a controlar termicamente, procedendo ao seu agrupamento conforme as orientações de fachada e tipo de utilização. Definição dos pressupostos introduzidos nos parâmetros da simulação.

Capítulo 5 – Descrição da metodologia de análise utilizada.

Capítulo 6 – Apresentação das cargas térmicas das zonas com controlo de temperatura.

Capítulo 7 – Análise das diversas soluções de recuperação de energia térmica, que configuram os diferentes cenários, no que respeita ao impacto da recuperação térmica no dimensionamento dos equipamentos de produção térmica mas, também, em termos de consumos e custos energéticos e, ainda, de custos associados ao primeiro investimento.

Capítulo 8 – Conclusões e perspectivas de trabalho futuro.

2 Contexto energético nacional

A nível nacional, os edifícios, de serviços e residenciais, representam cerca de 29% da energia final consumida, ascendendo a 62% em termos da energia eléctrica consumida [1]. Face a este cenário de grande consumo de energia, existe, naturalmente, um elevado potencial para a melhoria da eficiência energética dos edifícios.

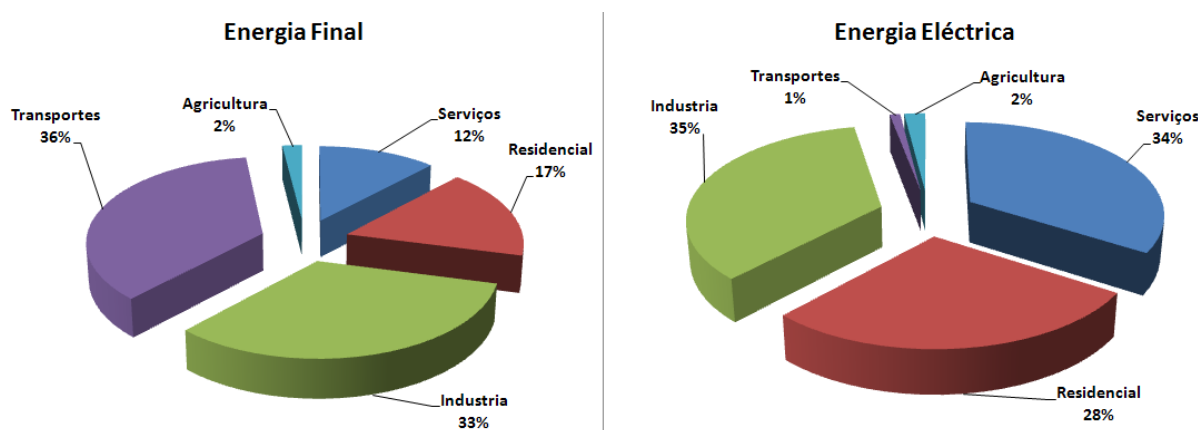


Figura 1 – Consumo de energia final e eléctrica por diferentes sectores consumidores da sociedade [1]

Esta realidade nacional reflecte uma mesma realidade Europeia, esta até um pouco mais agravada, sendo os edifícios responsáveis por quase 40% da energia total consumida. Daqui o enfoque da eficiência energética nos edifícios com a publicação da Directiva Europeia 2002/91/CE que visou a alteração e melhoria da regulamentação térmica dos Estados Membros com vista à redução dos consumos energéticos associados aos edifícios, impondo, entre outros, a emissão de Certificados Energéticos (CE). A transposição daquela Directiva para a legislação nacional resultou na publicação dos Decretos-Lei 78/2006, 79/2006 e 80/2006, respectivamente, designados por SCE – Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios, RSECE – Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios e RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios.

Nos dias de hoje, preocupações ambientais e monetárias obrigam a que os consumos de energia para a obtenção de conforto térmico sejam diminuídos. Para atingir tal objectivo, encontram-se constantemente em desenvolvimento tecnologias de climatização com eficiências crescentes e sobretudo utilizando a recuperação térmica como principal meio de poupança energética.

A política energética visa diminuir a dependência dos combustíveis fósseis, diminuir a libertação de gases com efeito de estufa para a atmosfera, aumentar a sustentabilidade e eficiência energética. Neste contexto, a recuperação térmica nos sistemas de climatização, contribui positivamente na promoção da eficiência energética.

A legislação nacional referente à recuperação térmica, de acordo com o nº9 do Artº 14º do RSECE, transcreve: *«É obrigatório o recurso à recuperação de energia no ar de rejeição, na estação de aquecimento, com uma eficiência mínima de 50 %, ou recuperação de calor equivalente, sempre que a potência térmica de rejeição em condições de projecto seja superior a 80 kW, excepto nos casos em que seja demonstrada em projecto a não viabilidade económica da sua instalação, segundo a metodologia definida no presente Regulamento.»*

De seguida, são expostas as principais tecnologias de recuperação térmica mais comuns no mercado e alvo de análise neste trabalho.

3 Estado de arte

Apesar de haver registo de que em 1930 já se efectuava recuperação térmica em aplicações de climatização, esta apresentou maior desenvolvimento na década de 70, década em que se deu a crise do petróleo [2]. Hoje em dia, a recuperação térmica, especialmente nas unidades de tratamento de ar, tem um impacto significativo quanto às poupanças no consumo energético tornando-se quase imprescindíveis.

Das tecnologias de recuperação térmica para aplicação nas unidades de tratamento de ar, neste trabalho são abordados: os permutadores de placas e as rodas térmicas. Existem outras opções para efectuar a recuperação térmica, tais como os “*run-around-coils*” que consistem em duas ou mais serpentinas de permuta de calor, ligadas entre si, que permitem a recuperação de calor de múltiplos fluxos de ar com localizações remotas, existindo também casos de utilização de “*heat-pipes*” (“tubos de calor”) como meio de efectuar a recuperação térmica.

A tecnologia de recuperação térmica ao nível dos *chillers*, também abordada neste trabalho, tem evoluído devido ao desenvolvimento de compressores mais eficientes e ao desenvolvimento ao nível de fluido frigorigéneo, que permitem que a água atinja “temperaturas utilizáveis” (40 a 55 °C) para apoio a soluções de reaquecimento e/ou pré-aquecimento do ar ou apoio à produção de AQS - Água Quente Sanitária.

Segue uma descrição mais detalhada, das tecnologias de recuperação térmica, utilizadas neste trabalho.

3.1 Recuperação térmica nos *chillers*

A energia térmica gerada nos condensadores dos *chillers* (rejeição de calor) é um subproduto do ciclo de refrigeração que pode ser aproveitado para soluções de aquecimento ou pré-aquecimento do ar de insuflação, ou para apoio à produção de AQS.

A recuperação térmica é conseguida através de um sistema comum do tipo “*split*” (dois condensadores ligados em paralelo), em que a recuperação de calor ocorre num condensador, conforme a figura 2 à esquerda. Também existe a configuração em que o condensador de recuperação é ligado em série ao condensador convencional, conforme a figura 2 à direita. *Chillers* do tipo água/água que não possuem recuperação térmica integrada podem ser alterados de modo a adquirir essa característica, com aplicação de um permutador ligado em série ao condensador.

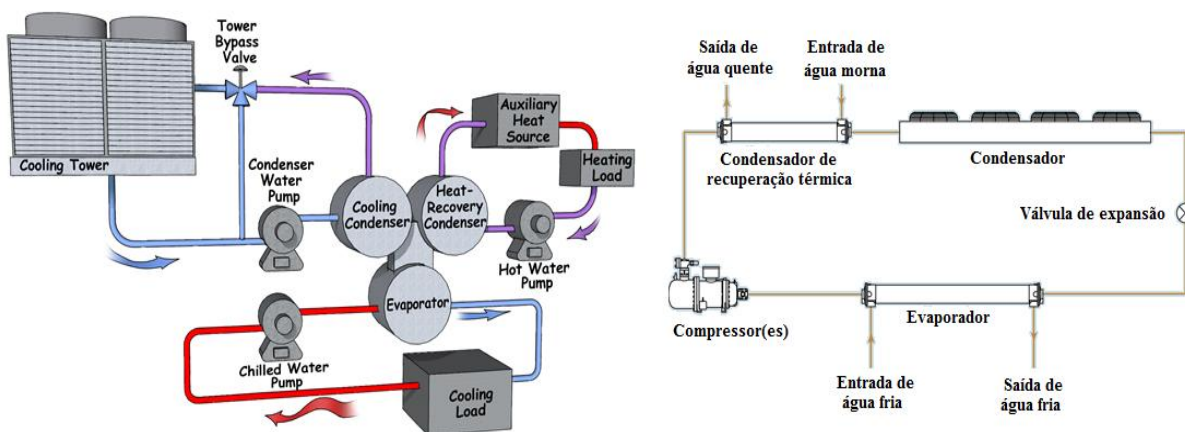


Figura 2 – Recuperação térmica nos *chillers*. Configuração do tipo *split* (em paralelo) dos condensadores à esquerda [3]. Configuração em série dos condensadores à direita [4]

Para obter uma gama de temperaturas de água, na ordem dos 40 a 55 °C, é necessário um aumento da pressão à saída do compressor, que por consequência diminui a capacidade de refrigeração do *chiller*, sendo necessário que o compressor processe uma quantidade superior de fluido frigorigéneo por kW de arrefecimento.

3.2 Recuperação térmica nos sistemas tudo ar

3.2.1 Permutador de calor de placas

O permutador de calor de placas apresenta uma configuração de modo a que o ar de exaustão e ar novo vindo do exterior se cruzam mas fisicamente separados. Os dois fluxos de ar podem cruzar-se em paralelo, perpendicularmente ou em sentidos opostos (fluxos cruzados - figura 3), onde o calor sensível é transferido entre os dois fluxos.

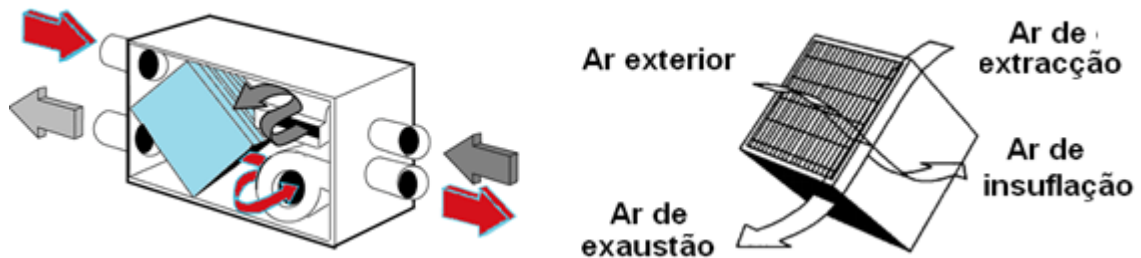


Figura 3 – Permutador de calor por fluxos cruzados [5]

Estes permutadores podem ser fabricados com membranas permeáveis microporosas (celulose ou polímeros), permitindo assim a transferência de humidade, tendo uma contaminação cruzada inferior a 5%.

Para um permutador de calor de fluxos cruzados, a eficiência de permuta de calor é da ordem dos 50 a 70%. Quando são ligados em série, a eficiência aumenta para a ordem dos 60 a 80%. Um permutador deste tipo introduz uma perda de pressão entre os 25 e os 370 Pa [6], aumentando assim o consumo energético dos ventiladores de insuflação e de extracção.

Existe um *bypass* que regula a quantidade de ar que passa efectivamente no permutador, para ventilação no verão (*free cooling*), protecção anti-gelo e controlo de temperatura.

3.2.2 Permutador de calor do tipo rotativo

Os permutadores de calor do tipo rotativo, mais conhecidos por rodas térmicas, transferem a energia sensível e/ou latente do ar de extracção que passa numa metade da roda, para o ar vindo do exterior que passa em sentido oposto, na outra metade da roda, quando esta se encontra em rotação.

O material e substrato que pode ser em alumínio, poliestireno, fibra de vidro ou fibra cerâmica, pode ter a configuração de uma matriz higroscópica em formato de favo de abelha (figura 4 à esquerda), ou uma configuração em finas tiras (figura 4 à direita), cobertas ou não por um dissecante (gel de sílica, por exemplo).



Figura 4 – Roda entálpica segmentada (centro), matriz higroscópica (esquerda), matriz em finas tiras (direita) [7]

As rodas térmicas sem dissecantes, têm a função de transferir apenas energia sensível, contudo também ocorre transferência de energia latente, embora em poucas quantidades, por condensação do ar mais húmido, sendo a humidade depois transferida, por evaporação, para o ar menos húmido. A inclusão de um tratamento de dissecantes na roda térmica, permite, além da transferência de energia sensível, transferir energia latente.

As rodas térmicas podem ainda ser construídas em segmentos (figura 4 ao centro) de modo a facilitar as operações de limpeza.

A contaminação cruzada ou mistura entre o ar de exaustão e o ar novo ocorre por meio de fugas devido à diferença de pressões entre os dois fluxos de ar ou por transição directa do ar que fica aprisionado no seio do recuperador. A percentagem de contaminação cruzada varia entre 1 a 10%.

A taxa de recuperação da energia pode ser regulada: variando a velocidade de rotação, por meio de um motor de velocidade variável; ou regulando a quantidade de ar que efectivamente passa na roda térmica, por meio de um *bypass*.

A perda de pressão introduzida no sistema de ventilação é da ordem dos 60 a 250 Pa [6], havendo assim um aumento do consumo energético dos ventiladores de extracção e insuflação.

As eficiências na recuperação de calor das rodas térmicas variam entre os 55 e os 85%.

3.3 Programa de simulação dinâmica

De modo a avaliar a influência que a recuperação térmica tem sobre o dimensionamento dos equipamentos produtores de água fria e água quente, foi necessário recorrer a um programa de simulação dinâmica. O programa escolhido foi o *Energy Plus* v6.0.0.023.

Foi concebido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos a partir de programas já existentes, nomeadamente o *BLAST* e o *DOE-2*. O programa faz a simulação dinâmica do balanço térmico e de massa de várias zonas de um edifício em simultâneo. Podem ser inseridos vários sistemas de climatização de modo a se obter o dimensionamento desses sistemas e os seus respectivos consumos energéticos, com base nas temperaturas interiores de projecto pretendidas. Permite simulações por intervalos de tempo inferiores a uma hora, até ao minuto, o que possibilita o conhecimento detalhado do comportamento térmico do edifício ao longo de um dia, mês ou ano.

O método de introdução de dados é sobre a forma de editor de texto ou por introdução de dados por tabela em formato *IDF* (*Input Data File*) (figura 5).

A implementação de sistemas AVAC no *Energy Plus* é baseada num sistema de nós (*nodes*). A designação de “nó” é atribuída à ligação entre componentes, tais como tubagens, condutas e equipamentos. É necessário definir um nó antes e depois de cada componente.

Um esquema exemplificativo de ligações/nós de um sistema de climatização pode ser consultado no Anexo A.

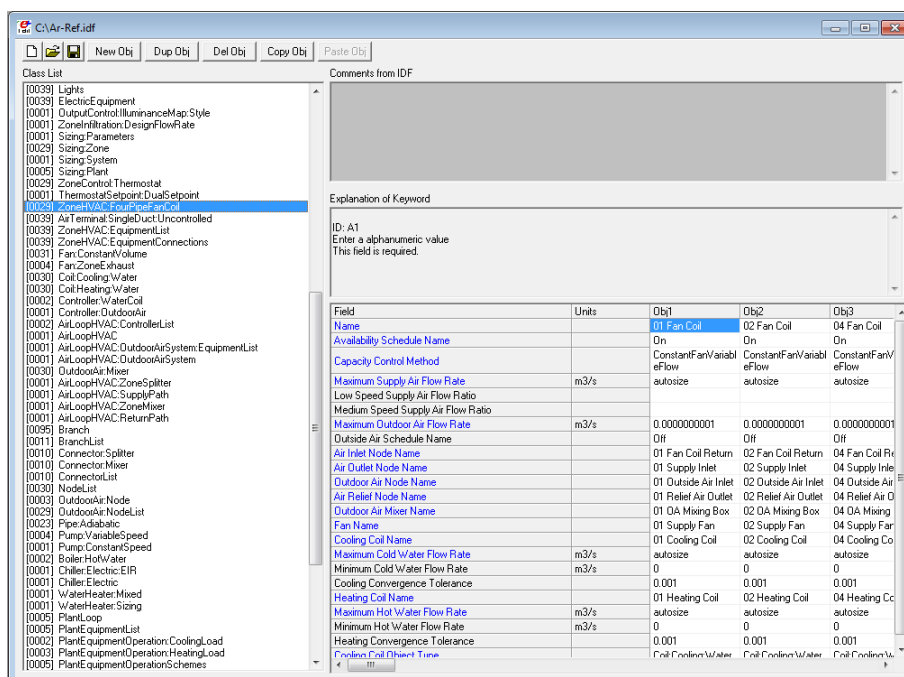


Figura 5 – Método de introdução de dados no *Energy Plus*

4 Caso de estudo

4.1 Descrição do caso de estudo

O trabalho tem como base o projecto de climatização do novo hospital central de Évora, incidindo em particular sobre o volume designado de “*Corpo H*”.

O complexo hospitalar é composto por um conjunto de volumes interligados com características e tipologias distintas. O volume principal que se desenvolve no sentido nascente poente é composto por um total de 10 pisos, sendo três deles subterrâneos, é o volume de maior expressão pela sua altura e elevado comprimento. Perpendicularmente a este, existe um conjunto de cinco volumes de menor altura. A localização, no complexo hospitalar, do *Corpo H* está assinalada na figura 6 e a imagem obtida pela importação do ficheiro de simulação pelo *Google Sketchup* está na figura 7.

O *Corpo H* é essencialmente constituído por gabinetes médicos. Tem um total de 114 espaços distribuídos entre 3 andares, perfazendo uma área total de pavimento de 3800 m².



Figura 6 – Localização do *Corpo H* no complexo do novo hospital central de Évora [8]

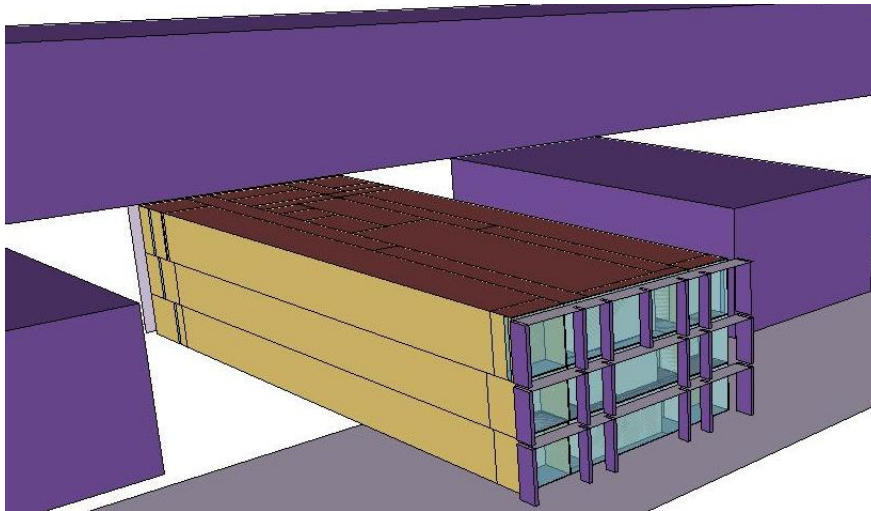


Figura 7 – Corpo H do novo hospital central de Évora

4.1.1 “Zonamento”

No plano de arquitectura, o *Corpo H* possui um total de 114 espaços (3800 m²). Para efeitos de simplificação dos cálculos das simulações, alguns destes espaços foram agrupados de acordo com as suas orientações de fachada e tipo de utilização, em zonas térmicas. Após este “zonamento”, são estabelecidas 39 zonas térmicas, tendo permitido uma redução de 50% do tempo de simulação, isto é, passando de 1h40min para cerca de 50 minutos.

As figuras 8, 9 e 10 representam, respectivamente, o “zonamento” dos pisos -1, 0 e 1. Na figura 11 é apresentado o valor da área útil de pavimento, dos gabinetes (por piso), corredores/átrios, instalações sanitárias, arrecadações e caixas de escadas/elevadores.

O valor da área útil, de cada zona, encontra-se na tabela 7 do Anexo A.

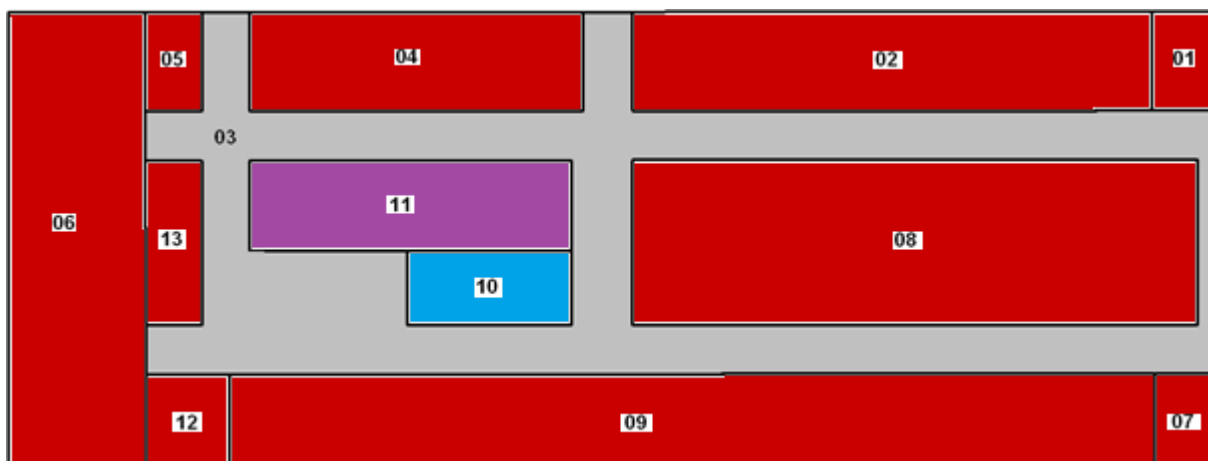


Figura 8 – Zonamento do piso -1

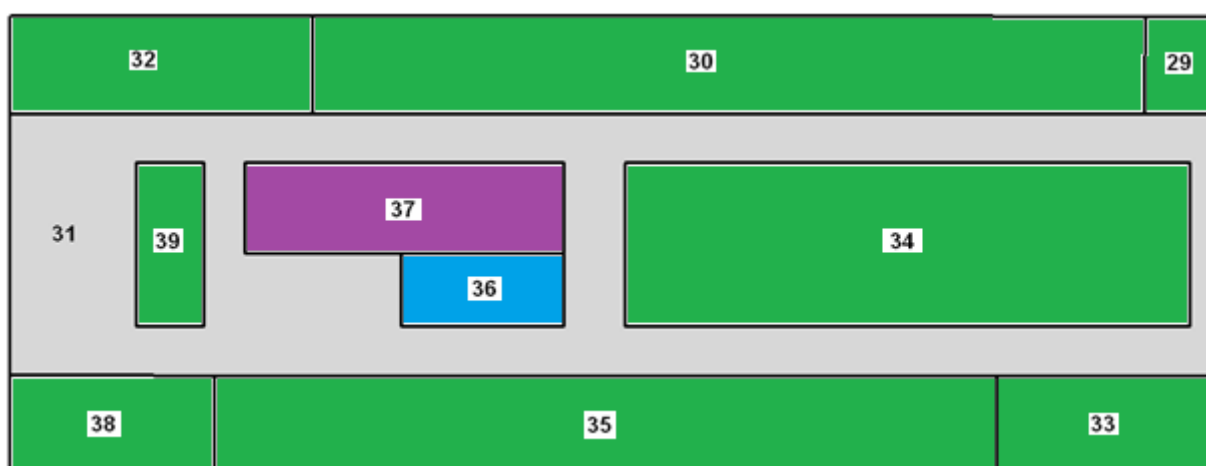


Figura 9 – Zonamento do piso 0

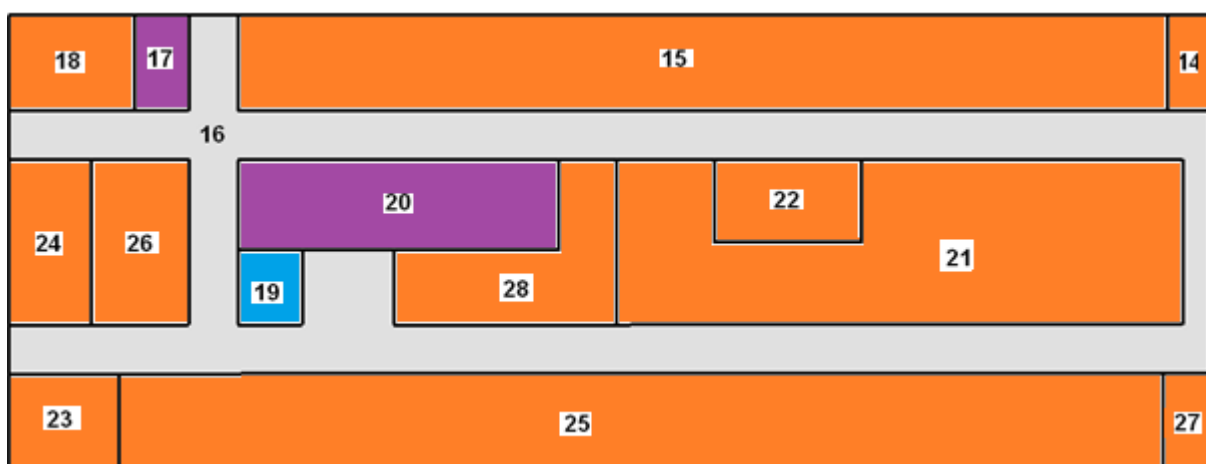


Figura 10 – Zonamento do piso 1

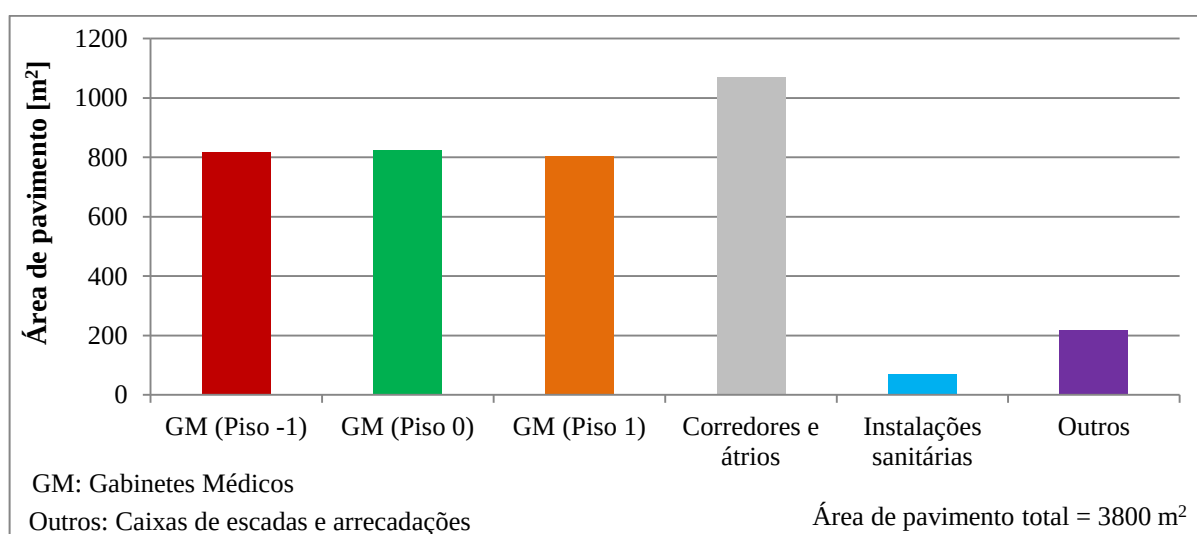


Figura 11 – Área útil de pavimento do Corpo H

4.2 Parâmetros e pressupostos do caso de estudo

4.2.1 Dados climáticos

O edifício encontra-se localizado na cidade de Évora, a 38,6° latitude Norte e 320 m acima do nível do mar.

Évora pertence à zona climática I_1 (Inverno) e V_3 (Verão) segundo o *Quadro III.1* do *Anexo III* do RCCTE [9].

Os valores da temperatura e humidade exterior de projecto, de acordo com a publicação do INMG/LNEC tomam como base a Estação Climatológica de Évora, e para uma probabilidade de ocorrência de 1 % e 99 %, são, respectivamente, os seguintes:

- Inverno: temperatura de bolbo seco de 1,2 °C;
- Verão: temperatura de bolbo seco de 35,4 °C, temperatura do bolbo húmido de 19,9 °C (humidade relativa de 24 %) e a amplitude térmica de 13,8 °C.

4.2.2 Temperatura interior de projecto

De acordo com as *Especificações Técnicas para Instalações de AVAC* da ACSS – Administração Central do Sistema Saúde [10], as condições de conforto de referência, para os gabinetes, são:

- 20 °C para a época de aquecimento;
- 25 °C para a época de arrefecimento.

A ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers*) estabeleceu este intervalo de temperaturas (20 a 25 °C), que é globalmente aceite como parâmetro de referência ou “*standard*”. Estes valores também se encontram no *Artigo 14º* do RCCTE.

4.2.3 Densidade e perfis de ocupação, iluminação e de equipamentos

Os perfis de utilização de referência do *Corpo H* foram estipulados de acordo com *Anexo XV* do RSECE, para tipologia “*estabelecimentos de saúde com internamento*”, donde resultam as seguintes densidades:

- Ocupação: 20 m²/Ocupante;
- Equipamentos: 10 W/m².

Os perfis de ocupação, iluminação e de equipamento apresentam-se na figura 12.

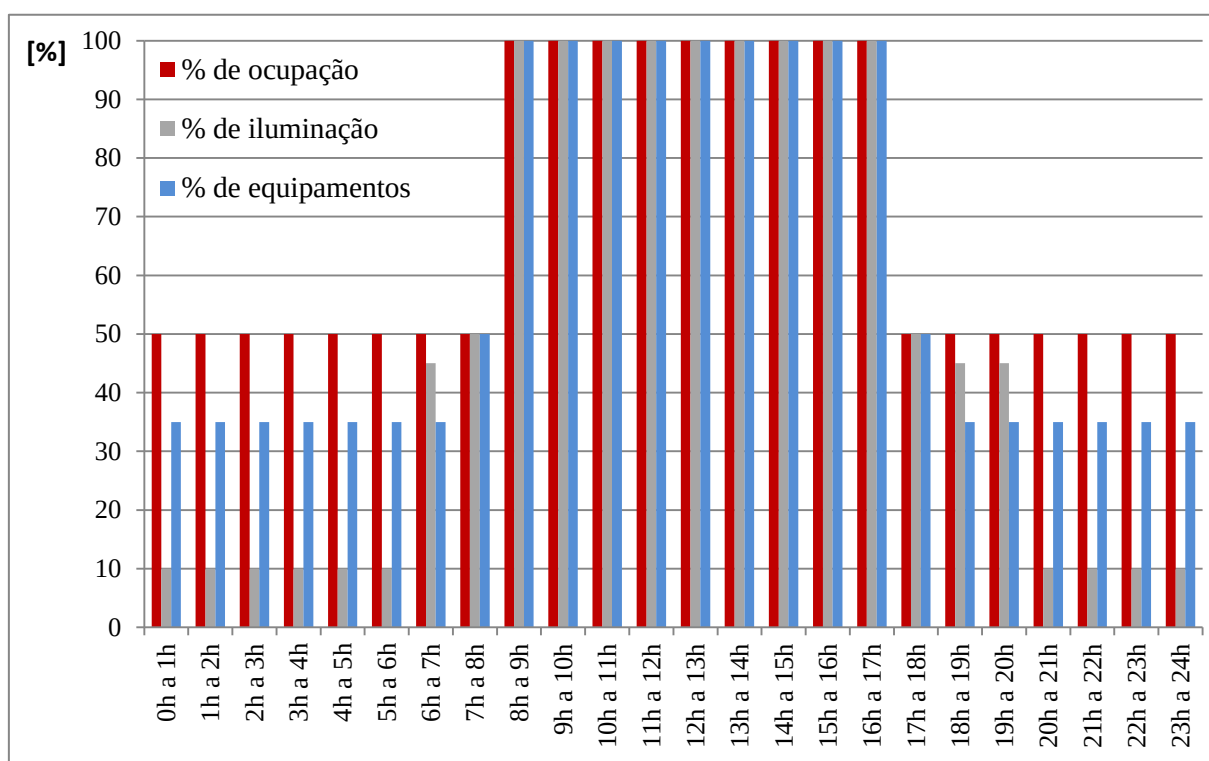


Figura 12 – Perfis de ocupação, iluminação e de equipamentos para estabelecimentos de saúde com internamento, para todos os dias da semana [11]

No que respeita à densidade de iluminação, e face à ausência de referência no RSECE, é estipulado um valor de 15 W/m² que corresponde a um valor típico definido na EN13779 para garantir um fluxo luminoso de 500 lux no plano de trabalho, valor este recomendado para espaços de gabinetes.

4.2.4 Definição dos caudais de ventilação

O caudal mínimo de ar novo a garantir para zonas de ocupação permanente, tais como, gabinetes e corredores/ átrios, é estabelecido de acordo com o *ANEXO VI* do RSECE, donde resulta:

- Gabinetes: $35 \text{ m}^3/\text{h.ocupante}$ ou de $5 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$, consoante o que for mais exigente;
- Corredores/átrios: $5 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$.

No que respeita ao caudal de ventilação a garantir para as arrecadações e instalações sanitárias, são tidas em consideração as especificações da ACSS, sendo as taxas recomendadas de 10 rph para as instalações sanitárias e de 2 rph para as arrecadações. [6]

Na figura 13 apresentam-se os valores dos caudais mínimos de ar novo referente aos gabinetes (por piso), aos corredores/átrios, às instalações sanitárias, às caixas de escadas e às arrecadações.

O caudal de insuflação de ar novo, no *Corpo H*, é de aproximadamente $20\,000 \text{ m}^3/\text{h}$. O caudal de extracção directa, das instalações sanitárias e arrecadações, é de $1\,300 \text{ m}^3/\text{h}$. O caudal de retorno, para soluções de recuperação térmica, é de aproximadamente $18\,700 \text{ m}^3/\text{h}$.

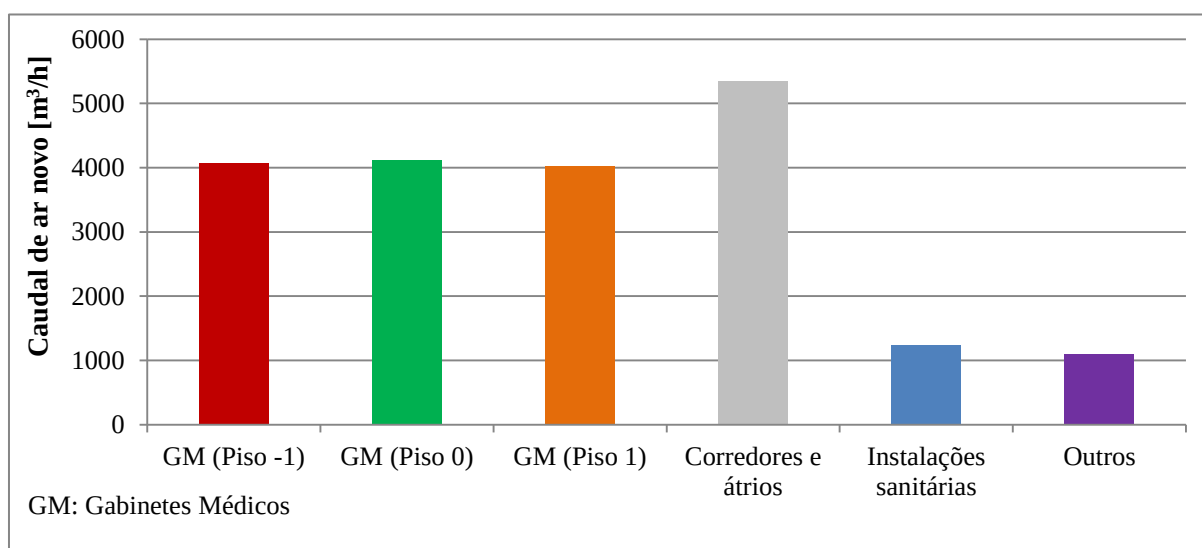


Figura 13 – Caudal de ar novo mínimo, por tipo de zonas

Na tabela 8 do Anexo A encontram-se os valores de ventilação de ar novo e de extracção, para as diferentes zonas do *Corpo H*.

Os valores dos caudais de ar novo são baseados admitindo uma eficiência de ventilação igual à unidade, considerando que há uma mistura completa em cada zona (a concentração de poluentes é idêntica na extracção e na zona ocupada).

4.2.5 Descrição do sistema base de AVAC

O sistema de climatização em análise, e que assegura o conforto térmico e a qualidade do ar interior dos espaços que integram o *Corpo H*, é, sucintamente, caracterizado por:

- “Produção” de energia térmica: assegurada por 2 caldeiras de produção de água quente e 2 *chillers* de produção de água refrigerada;
- Distribuição de energia térmica: assegurada por uma rede de tubagem, termicamente isolada, do tipo a 4 tubos, isto é, uma distribuição simultânea de água quente e de água refrigerada assegurada por 2 redes independentes em circuito fechado e constituídas por uma tubagem de ida e outra de retorno;
- Difusão de energia térmica nos espaços: assegurada por unidades locais do tipo ventilo convectores;
- Ventilação: assegurada por uma unidade de tratamento de ar novo (UTAN), que promove, nos espaços, a insuflação de ar termicamente tratado e filtrado; a extracção de ar viciado é realizada nas instalações sanitárias e arrecadações.

Para simplificar a realização do estudo e a avaliação dos impactos, os equipamentos “produtores” de energia térmica são afectos autonomamente aos equipamentos de tratamento ambiente e ventilação, isto é, um par caldeira/*chiller* está associado às unidades locais ventiloconvectors e outro à UTAN.

4.2.6 Pressupostos introduzidos na simulação dinâmica

Conforme referido anteriormente, foi introduzido o sistema base de AVAC, em que o conforto térmico das zonas climatizadas, do *Corpo H*, é controlado por meio de ventilo convectores, para manter uma gama de temperatura de 20 a 25 °C, e o ar novo garantido por meio de uma UTAN.

O algoritmo de transferência de calor considerado, para a envolvente do *Corpo H*, foi o “*Conduction Transfer Function*”, em que apenas é considerada a transmissão de calor por condução, desprezando o armazenamento de humidade nos elementos de construção [12].

As potências térmicas dos equipamentos, para os dias de projecto, foram determinadas pelo modo de “auto-dimensionamento” do *software* de simulação dinâmica, *Energy Plus*, sendo designadas, neste trabalho, de “potências térmicas nominais”.

O COP de referência utilizado foi de 3,2 para os *chillers* ar-água e de 4 para os *chillers* água-água, às condições de temperatura de entrada do fluido frigorigéneo para o evaporador, de 6,67 °C e de temperatura de entrada do fluido frigorigéneo no condensador de 29 °C, sendo os caudais de água de circulação determinados, de igual modo, pelo modo de “auto-dimensionamento”. O valor real do COP varia de acordo com as curvas características, que foram obtidas dos ficheiros de exemplos do *Energy Plus*.

A recuperação térmica nos *chillers* tem como temperatura de referência da água, 45 °C, sendo o calor aproveitado, na estação de aquecimento, para reaquecimento do ar de insuflação das zonas com maiores necessidades térmicas, e na estação de arrefecimento a recuperação térmica dá apoio à produção de água quente sanitária (AQS).

A caldeira associada à UTAN fornece água quente à temperatura de 80 °C. A caldeira associada aos ventilo convectores fornece água quente à temperatura de 55 °C.

A caldeira associada à AQS produz 60 m³/mês de água quente à temperatura de 60 °C.

Todas as caldeiras foram configuradas como tendo 80% de eficiência térmica.

Em termos de simulação, a UTAN é constituída por uma bateria de aquecimento, uma bateria de arrefecimento, um ventilador de insuflação e um ventilador de extracção. O *setpoint* da UTAN foi configurado para uma gama de temperaturas de insuflação de 20 a 25 °C.

Todos os ventiladores são de caudal de ar constante.

O ventilador de insuflação da UTAN vence uma perda de pressão de 1000 Pa e o caudal de insuflação é de 19895 m³/h. O ventilador de extracção da UTAN, também vence uma perda de pressão de 1000 Pa e tem o caudal de extracção de 18595 m³/h.

Os ventiladores de extracção das instalações sanitárias e arrecadações vencem uma perda de pressão de 45 Pa, tendo no seu conjunto um caudal de extracção de 1300 m³/h.

Os ventiladores referentes aos ventilo convectores vencem uma perda de pressão de 75 Pa.

5 Metodologia

A explicação da metodologia seguida neste trabalho é exposta num conjunto de 5 etapas:

1ª Etapa: Como ponto de partida, introduzam-se os valores de ventilação mecânica, densidades e perfis de ocupação, iluminação e de equipamentos, nos parâmetros de simulação. Com isto foram determinadas cargas térmicas, mantendo-se as temperaturas interiores de projecto (20 a 25 °C) das zonas com ocupação permanente, nomeadamente os gabinetes. Os valores obtidos das cargas térmicas de aquecimento e arrefecimento, são consideradas como as “potências térmicas nominais totais” do *Corpo H*.

2ª Etapa: Foram introduzidas nos parâmetros da simulação as configurações dos cenários, com as diversas soluções de recuperação térmica. Os resultados da simulação dinâmica destes cenários permitiram obter as potências térmicas máximas atingidas, designadas por “potências térmicas efectivas”, dos equipamentos de produção de água quente e água fria. Da simulação, também resultam os consumos energéticos anuais do *Corpo H*.

3ª Etapa: Alteraram-se os parâmetros da simulação ao nível da potência térmica dos equipamentos de “produção” de energia térmica com os obtidos da etapa anterior. Correu-se novamente a simulação dinâmica, da qual se obtiveram os consumos energéticos anuais do edifício (*Corpo H*), sendo estes dados comparados com os da 2ª etapa.

4ª Etapa: Além da limitação da potência térmica descrita anteriormente, introduziu-se nos parâmetros da simulação, um horário de funcionamento no qual as centrais térmicas são desligadas da 01:00 às 06:00h. Com isto foi possível analisar o tempo de resposta, do sistema

que climatização, para que todas as zonas se encontrassem em conforto térmico, em relação à limitação da potência térmica.

5ª Etapa: Avaliaram-se as poupanças nos custos de investimento e nos custos com o consumo energético anual, que a limitação da potência térmica nos equipamentos permitiu.

6 Cálculo das cargas térmicas

A carga térmica de um espaço é a potência térmica que é necessário introduzir ou retirar desse mesmo espaço, quando se pretende, respectivamente, o seu aquecimento ou arrefecimento.

O cálculo das cargas térmicas de aquecimento considera que o edifício não possui ganhos solares nem ganhos internos de ocupação, iluminação ou de equipamentos.

O cálculo das cargas térmicas de arrefecimento contabiliza os ganhos sensíveis e latentes devidos aos ganhos solares, às fontes internas de calor, resultantes de ocupantes, iluminação artificial e equipamentos e às infiltrações e renovação do ar por ventilação mecânica.

Foram utilizados os dados climáticos, descritos anteriormente no subcapítulo 4.2.1, para assim definir os dias de projecto (*Design Day*) de Inverno e Verão. Com isto e com os dados da ventilação das zonas do *Corpo H*, obtiveram-se os valores das cargas térmicas de aquecimento e arrefecimento (sensível e latente).

Na figura 14, apresentam-se as cargas térmicas, por piso, dos gabinetes. De notar que o piso superior possui valores mais elevados, devido a este ter uma maior área de superfície exposta às intempéries.

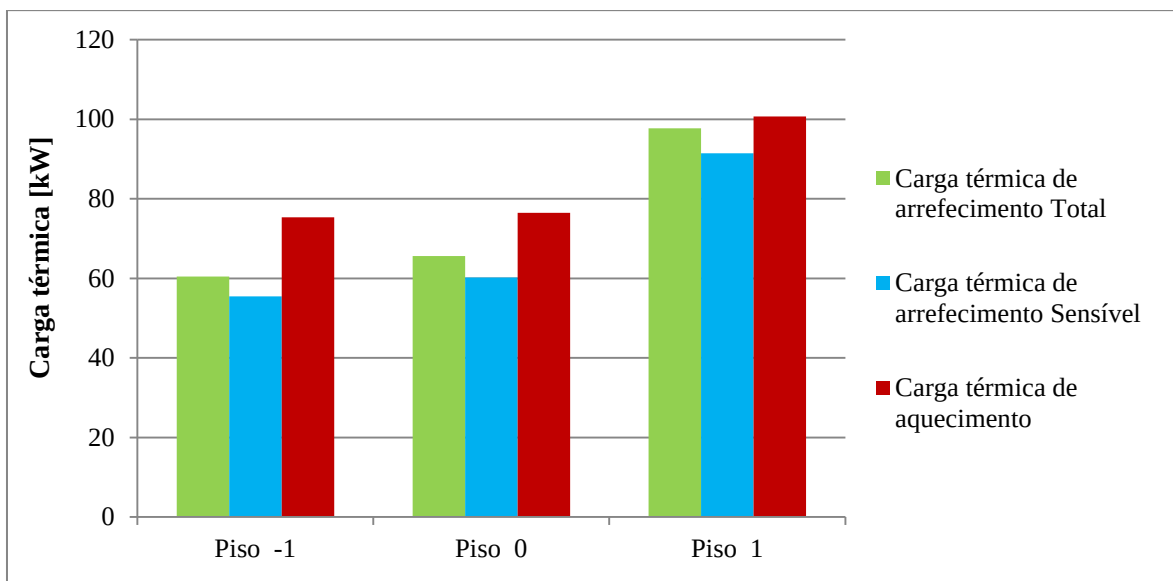


Figura 14 – Cargas térmicas de aquecimento e arrefecimento, das zonas climatizadas, do *Corpo H*

Na tabela 9 do Anexo A, apresentam-se os resultados das cargas térmicas de cada zona climatizada.

A carga térmica total de aquecimento, das zonas climatizadas do *Corpo H*, é de 252 kW, sendo que a carga térmica total de arrefecimento é de 224 kW.

Os valores das cargas térmicas são referentes à potência nominal total dos equipamentos a instalar, de produção de água quente e água fria, relativos à climatização, isto é, o conjunto de caldeiras têm de ter uma potência térmica de 252 kW, e o conjunto de *chillers* têm de ter 224 kW de potência térmica.

7 Cenários analisados e resultados

7.1 Descrição dos cenários

Foram constituídos um total de 5 cenários para análise, com base nas tecnologias presentes no mercado de recuperação térmica.

Os cenários foram analisados, seguindo a metodologia descrita, em dois modos de configuração da central de frio, com a utilização de *chillers* ar-água ou com a utilização *chillers* água-água.

Cenário 1)

Consiste no sistema base descrito no subcapítulo 4.2.5, em suma:

O sistema de difusão da energia térmica é composto por uma UTAN que contém bateria de aquecimento, bateria de arrefecimento, ventilador de insuflação e ventilador de extracção e as zonas a serem climatizadas têm, cada uma, um ventilo convector. Existem dois pares caldeira/*chiller*, em que um está associado às unidades locais ventiloconvectors e outro à UTAN.

A este sistema base acresce uma caldeira dedicada à produção de AQS.

Não há quaisquer tecnologias de recuperação térmica implementadas neste cenário.

Cenário 2)

O sistema de climatização é o mesmo que o indicado no cenário 1, com a adição de um permutador de placas por fluxos cruzados à UTAN.

Cenário 3)

O sistema de climatização é o mesmo que o indicado no cenário 1, com a adição de uma roda entálpica à UTAN.

Cenário 4)

O sistema de climatização é o mesmo que o indicado no cenário 1, com a adição de um permutador de placas por fluxos cruzados à UTAN e é implementada a recuperação térmica nos *chillers*.

Cenário 5)

O sistema de climatização é o mesmo que o indicado no cenário 1, com a adição de uma roda entálpica à UTAN e é implementada a recuperação térmica nos *chillers*.

7.2 Cenário 5

Devido ao método de análise ser repetitivo para todos os cenários, no seguimento é apresentado o desenvolvimento do cenário 5, a título de exemplo.

O desenvolvimento dos restantes cenários é apresentado no Anexo C.

De acordo com a metodologia, anteriormente descrita, resultam da primeira simulação deste cenário, a influência que as soluções de recuperação térmica tiveram quanto à determinação da potência térmica efectiva das caldeiras, *chillers* e consequentemente da torre de arrefecimento. Também desta primeira simulação, obtém-se o consumo energético de cada equipamento e os consumos energéticos totais do *Corpo H*.

Na figura 15, apresenta-se a evolução mensal da potência térmica efectiva do *chiller* que fornece água refrigerada à UTAN, e respectivo consumo energético, por tipo de arrefecimento dos condensadores (a ar ou a água). A potência térmica efectiva deste *chiller* é de 65 kW, ocorre para o dia 23 de Julho às 14h, já o mês de maior consumo de energia eléctrica, é Agosto.

O menor consumo energético dos *chillers* água-água em relação aos *chillers* ar-água, deve-se ao facto de que os *chillers* água-água possuem um maior coeficiente de desempenho, e ao facto do consumo energético da torre de arrefecimento não ser contabilizado no gráfico.

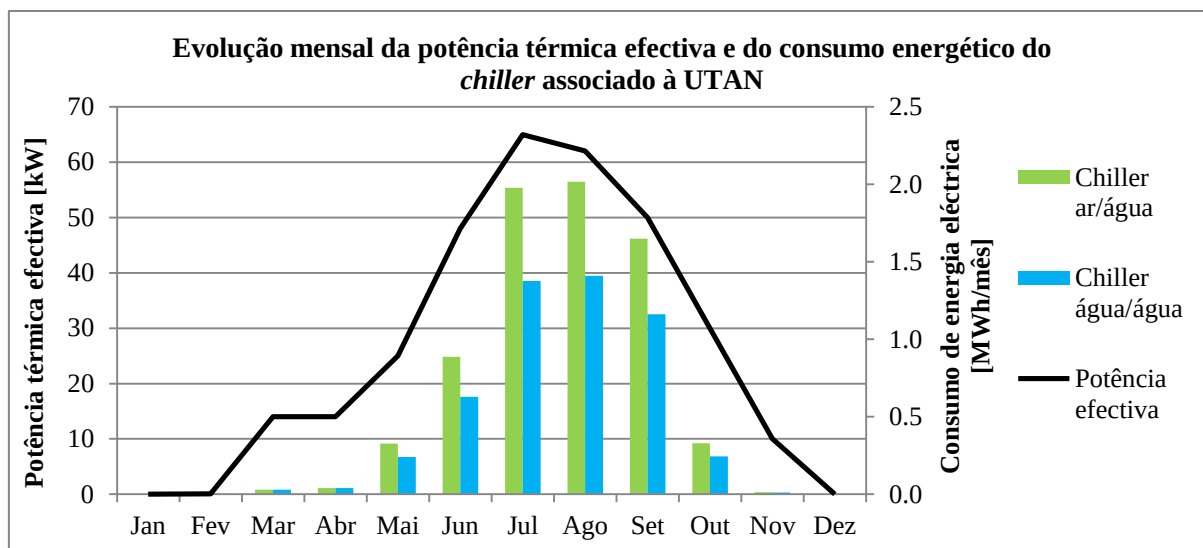


Figura 15 – Evolução mensal da potência térmica efectiva e do consumo de energia eléctrica do *chiller* associado à UTAN. Soluções com *chiller* ar-água ou com *chiller* água-água: Cenário 5

Na figura 16 apresenta-se a potência térmica efectiva mensal do *chiller* que fornece água refrigerada aos ventilo convectores, sendo esta de 123 kW, para o dia 12 de Agosto às 13h.

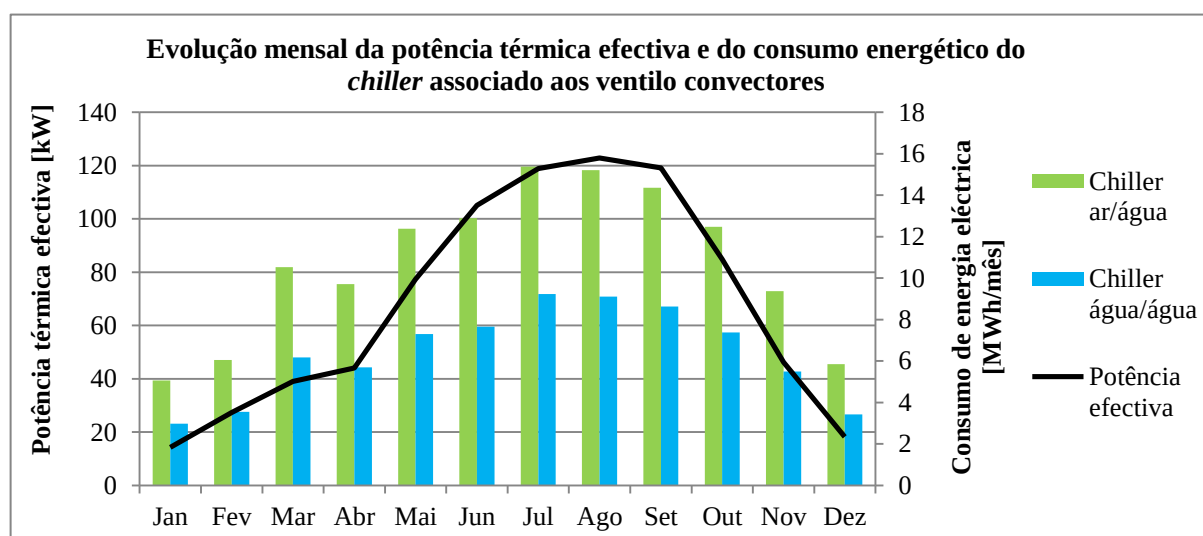


Figura 16 – Evolução mensal da potência térmica efectiva e do consumo de energia eléctrica do *chiller* associado aos ventilo convectores. Soluções com *chiller* ar-água ou com *chiller* água-água: Cenário 5

Na figura 17 apresenta-se a evolução mensal da potência térmica e do consumo energético, relativa a duas caldeiras. Neste cenário, a utilização da roda térmica e de recuperação de calor nos condensadores dos *chillers*, dispensa a associação caldeira à UTAN, evitando assim o consumo de gás natural entre Junho e Agosto. A caldeira associada aos ventilo convectores, necessita de uma potência térmica efectiva de 80 kW (30 de Janeiro às 23h).

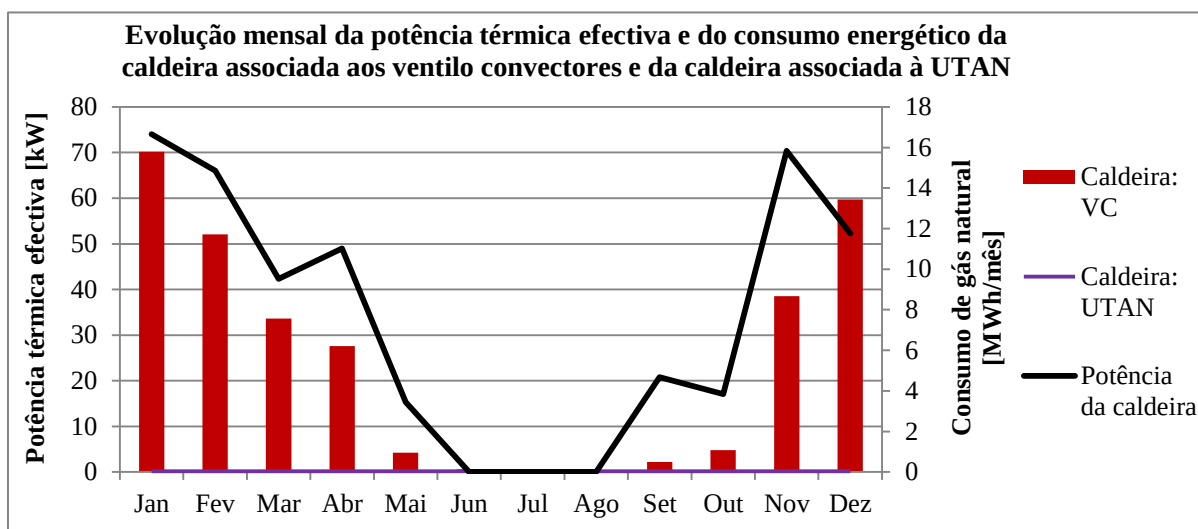


Figura 17 – Evolução mensal da potência térmica efectiva e do consumo de gás natural, da caldeira associada à UTAN e da caldeira associada aos ventilo convectores: Cenário 5

No caso da utilização de condensadores arrefecidos a água, a figura 18 apresenta a evolução mensal da potência térmica efectiva da torre de arrefecimento, sendo o máximo atingido de 209 kW no dia 23 de Julho às 15h.

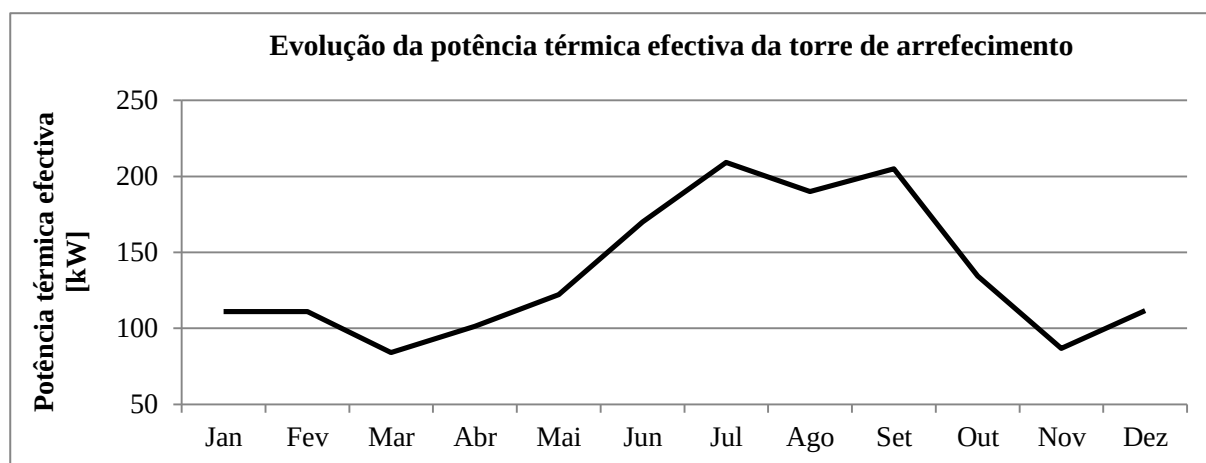


Figura 18 – Evolução mensal da potência térmica efectiva da torre de arrefecimento: Cenário 5

Em resumo, apresenta-se na tabela 1, os resultados do dimensionamento das caldeiras, dos *chillers* e da torre de arrefecimento, consequentes da utilização de soluções de recuperação térmica aplicadas neste cenário.

Tabela 1 – Potência térmica efectiva dos equipamentos “produtores” de energia térmica das centrais térmicas:

Cenário 5

Equipamento	Potência térmica efectiva [kW]
Caldeira: Ventilador convector	80
Caldeira: UTAN	0
Chiller: Ventilador convector	123
Chiller: UTAN	65
Torre de arrefecimento	209

Seguindo a metodologia, aplicou-se os valores das potências térmicas, apresentados na tabela 1, nos parâmetros da simulação, tendo-se com isso obtido o impacto desta medida sobre o consumo energético anual do *Corpo H*.

Na tabela 2 apresentam-se os consumos energéticos anuais do *Corpo H* (com a utilização da solução de arrefecimento dos condensadores, quer a ar, quer a água), referente à utilização de potências térmicas nominais nos parâmetros da simulação dinâmica, sendo estas obtidas do modo de “auto-dimensionamento” do *Energy Plus*.

Os resultados das potências térmicas nominais de cada equipamento são apresentados no Anexo C, na tabela 10.

Tabela 2 – Consumos energéticos anuais do *Corpo H*, referente à utilização de potências térmicas nominais nos parâmetros da simulação dinâmica: Cenário 5

Com as potências térmicas nominais	Central de frio com <i>chiller</i> ar-água		Central de frio com <i>chiller</i> água-água	
	Energia eléctrica [MWh/ano]	Gás Natural [MWh/ano]	Energia eléctrica [MWh/ano]	Gás Natural [MWh/ano]
Caldeira	-	66,0	-	69,4
Chiller	118,8	-	76,3	-
Iluminação artificial	208,5	-	208,5	-
Equipamento interior	142,2	-	142,2	-
Ventiladores	136,8	-	136,8	-
Bombas hidráulicas	6,9	-	24,2	-
Torre de arrefecimento	-	-	17,0	-
Água quente	-	28,1	-	29,0
Total =	613,2	94,1	605,0	98,4

Na tabela 3 apresenta-se os consumos energéticos anuais do *Corpo H*, referente à utilização das potências térmicas efectivas, anteriormente descritas, nos parâmetros da simulação dinâmica.

Tabela 3 – Consumos energéticos anuais do *Corpo H*, referente à utilização de potências térmicas efectivas nos parâmetros da simulação dinâmica: Cenário 5

Com as potências térmicas efectivas	Central de frio com <i>chiller</i> ar-água		Central de frio com <i>chiller</i> água-água	
	Energia eléctrica [MWh/ano]	Gás Natural [MWh/ano]	Energia eléctrica [MWh/ano]	Gás Natural [MWh/ano]
Caldeira	-	65,8	-	69,2
Chiller	118,8	-	76,2	-
Iluminação artificial	208,5	-	208,5	-
Equipamento interior	142,2	-	142,2	-
Ventiladores	136,8	-	136,8	-
Bombas hidráulicas	6,9	-	24,2	-
Torre de arrefecimento	-	-	17,0	-
Água quente	-	28,1	-	29,0
Total =	613,2	93,9	604,9	98,2

A análise das tabelas 2 e 3 permite verificar que o consumo de energia eléctrica é menor quando se utiliza *chillers* água-água. Quanto ao consumo de gás natural, que se esperava não sofrer alterações, aquando da utilização deste tipo de *chillers*, sofre um aumento marginal, justificado pela diferença entre as curvas características, que influenciam a capacidade de recuperação térmica dos *chillers*.

Na tabela 4 apresentam-se as diferenças do consumo energético anual, em termos de valor absoluto e em termos percentuais, entre a utilização das potências térmicas nominais e a utilização das potências térmicas efectivas, nos equipamentos “produtores” de energia térmica. Estas diferenças são, inferiores a 0,5%.

Tabela 4 – Influência da limitação das potências térmica nos equipamentos “produtores” de energia térmica, em relação ao consumo energético anual do *Corpo H*: Cenário 5

Tipo de central de frio	Energia eléctrica [kWh/ano]	Energia eléctrica [%]	Gás natural [kWh/ano]	Gás natural [%]
<i>Chillers</i> ar-água	- 62	- 0,01%	- 208	- 0,32%
<i>Chillers</i> água-água	- 119	- 0,02%	- 187	- 0,27%

Prosseguindo com a metodologia, aplicou-se um horário de funcionamento das centrais térmicas, em que estas são desligadas, da 01:00 às 06:00 horas. Avaliou-se a influência que a limitação da potência térmica nos equipamentos teve sobre o tempo de resposta destes, para garantir as condições de conforto térmico¹ estipuladas.

O gráfico na figura 19 demonstra a evolução da percentagem de zonas em conforto térmico e a evolução do consumo de gás natural das caldeiras associadas aos sistemas de climatização, entre este cenário e o primeiro, em que não existem recuperações térmicas. Este gráfico permite obter o aumento de tempo de resposta que ocorre, quando se limita a potência térmica das caldeiras. O tempo de resposta de referência é de 1h30min (cenário 1), sendo que este aumenta para 3h15min (+ 1h45min), quando se limita a potência térmica, representando em termos percentuais, um aumento de 117%. De referenciar que este aumento do tempo de resposta foi calculado apenas para o dia mais frio do ano (31 de Janeiro).

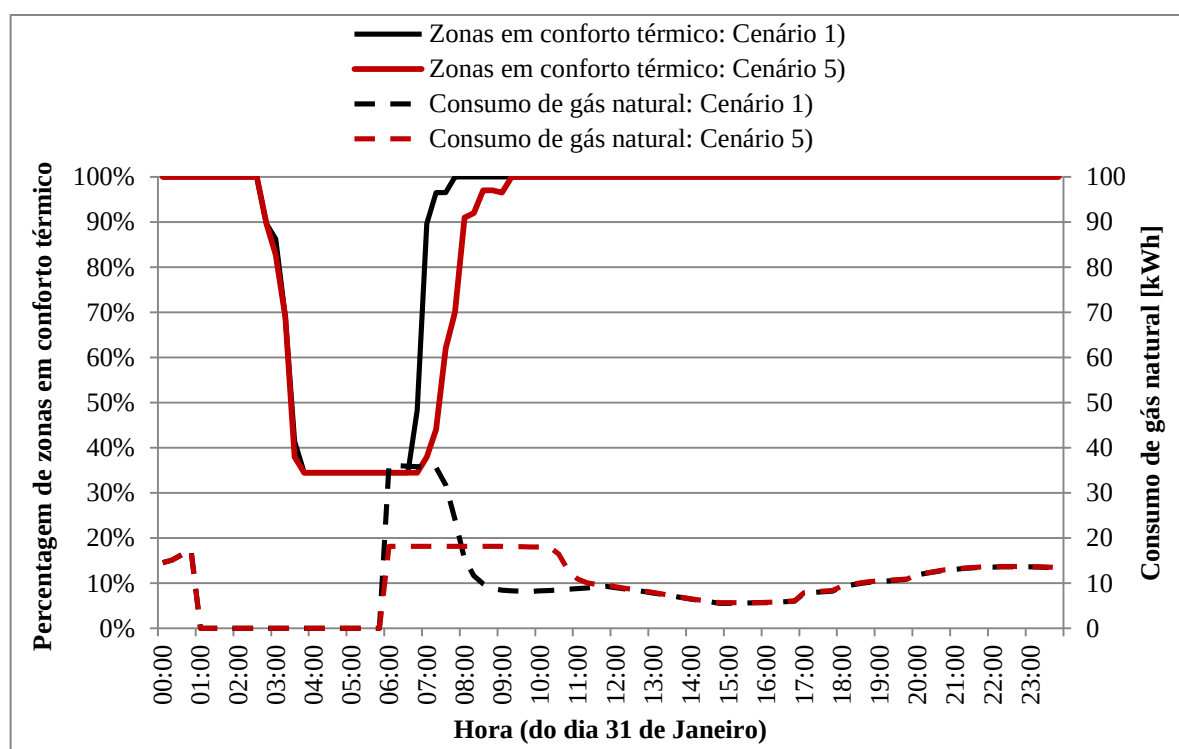


Figura 19 – Tempo de resposta do *Corpo H* com a limitação da potência térmica nas caldeiras: Cenário 5

Quanto ao tempo de resposta da central de frio, para o dia mais quente do ano, tendo em conta o mesmo horário de funcionamento, todas as zonas voltam a estar na gama dos 20 a 25 °C, às 06:30 horas, em todos os cenários. O tempo de resposta de apenas 30 minutos deve-se à

¹ Condição de conforto térmico, neste trabalho, é garantir uma gama de temperatura do ar interior, de 20 a 25 °C.

inércia térmica do edifício (*Corpo H*), sendo que as temperaturas das zonas encontram-se próximas de 25 °C antes da entrada em funcionamento dos *chillers*.

Por fim, são calculados o custo com os consumos energéticos anuais e o custo de primeiro investimento.

De acordo com a tarifa transitória de venda a clientes finais do 3º Trimestre de 2011, de gás natural, da *Galp Energia* [13] e tendo em conta que o complexo hospitalar tem um consumo de gás natural superior a 10000 m³/ano, o preço do gás está estipulado em 0,039284 €/kWh (fora de vazio²) e em 0,038724 €/kWh (em vazio), com uma taxa “*Termo tarifário fixo*” de 319,88 €/mês. Os valores apresentados não incluem IVA.

De acordo com o tarifário de alta e média tensão da ERSE [14], o preço da energia eléctrica em hora de ponta é de 0,1235 €/kWh. Foi considerado este tarifário como sendo constante ao longo do dia, para assim compensar a tarifa mais baixa de “fora de horas” (em vazio) com as perdas na transformação de alta para baixa tensão nos transformadores e para compensar a tarifa da energia activa e reactiva (fornecidas e recebidas) que não são contabilizadas.

Na tabela 5 apresentam-se os custos associados aos consumos energéticos anuais do *Corpo H*, em que se verifica que quando se limita a potência dos equipamentos das centrais térmicas (potências efectivas), os custos praticamente não variam. Como seria esperado, o custo anual com o consumo energético é menor quando se utilizam *chillers* água-água.

Tabela 5 – Custos anuais do *Corpo H* com os consumos energéticos, por tipo de arrefecimento dos condensadores dos *chillers*, com base nas potências térmicas nominais e efectivas: Cenário 5

	Com base nas potências nominais		Com base nas potências efectivas	
Tipo de central de frio	Gás natural [€/ano]	Energia eléctrica [€/ano]	Gás natural [€/ano]	Energia eléctrica [€/ano]
Com <i>chiller</i> ar-água	7 536	75 730	7 529	75 723
Com <i>chiller</i> água-água	7 695	74 718	7 703	74 703
	Total [€/ano] =		Total [€/ano] =	
Com <i>chiller</i> ar-água	83 266		83 252	
Com <i>chiller</i> água-água	82 413		82 406	

² Período fora de vazio: 11 meses, compreendendo Setembro a Julho

Os custos de primeiros investimentos encontram-se descritos em detalhe no Anexo D. Para este cenário e para os resultados obtidos em relação às potências térmicas efectivas, o custo de investimento inicial, no caso da utilização de *chillers* ar-água, é de aproximadamente 180 500 €, no caso da utilização de *chillers* água-água, seria de aproximadamente 192 000 €.

Neste trabalho não são contabilizados os custos com as condutas e tubagens.

Como há uma poupança no consumo energético, no caso da utilização de *chillers* água-água, de aproximadamente 1 700 €/ano, ao fim de 7 anos, esta opção torna-se a mais rentável economicamente.

7.3 Resultados

Após ter aplicado as etapas descritas na metodologia aos cinco cenários, resulta a figura 20, onde se apresenta a redução na potência térmica passível de ser aplicado às caldeiras e aos *chillers*.

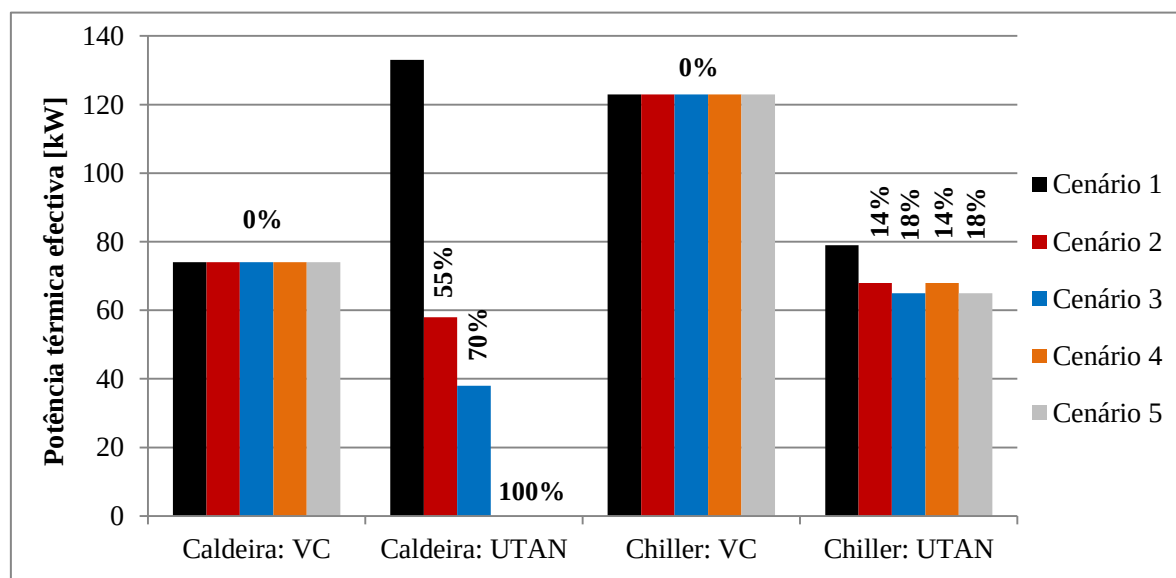


Figura 20 – Influência da recuperação térmica aplicada de cada cenário, sobre o dimensionamento dos equipamentos “produtores” de energia térmica

Os resultados permitem concluir que a recuperação térmica não tem influência ao nível dos equipamentos “produtores” de energia térmica associados ao fornecimento dos ventilo convectores, *caldeira: VC* e *chiller: VC*.

Quanto aos equipamentos associados ao fornecimento de energia térmica à UTAN, a recuperação térmica tem grande impacto quanto ao dimensionamento da caldeira, sendo que o permutador de calor de placas permite a redução em cerca de 50 % da potência térmica, a roda térmica permite uma redução de aproximadamente 70 % e implementando *chillers* com recuperação térmica, com a utilização de baterias de reaquecimento terminal, conjuntamente com uma das soluções de recuperação térmica na UTAN, a redução é total, não sendo necessária uma caldeira para garantir uma gama de temperaturas de insuflação de ar novo de 20 a 25 °C.

O permutador de calor de placas permite a redução no dimensionamento do *chiller* associado à UTAN, em cerca de 14 %, já a roda térmica permite a redução deste de aproximadamente 18%.

A aplicação de um horário de funcionamento nas centrais térmicas tem como objectivo avaliar a resposta dos equipamentos de climatização às necessidades térmicas do *Corpo H*, de modo a que todas as zonas climatizadas estejam dentro da gama de temperaturas pretendida. Foi escolhido um horário em que os equipamentos das centrais térmicas são desligados da 01:00 às 06:00 horas.

O cenário 1, que não possui quaisquer tecnologias de recuperação térmica, é o que apresenta o menor tempo de resposta (1h30min). Aplicando as potências térmicas efectivas obtidas em cada cenário, verifica-se que o aumento do tempo de resposta está directamente relacionada com a potência térmica da caldeira que está associada à UTAN, conforme apresentado na figura 21.

No cenário 2, a diminuição de 55 % da potência térmica da caldeira (figura 20), aumenta em 83 % o tempo de resposta, para 2h45min (figura 21).

Já no cenário 3, a redução da potência da caldeira em 70% (figura 20), duplica o tempo de resposta, para 3 horas (figura 21).

Nos cenários 4 e 5, em que é possível remover por completo a caldeira associada à UTAN (figura 20), o tempo de resposta aumenta em 117 %, para 3h15min (figura 21).

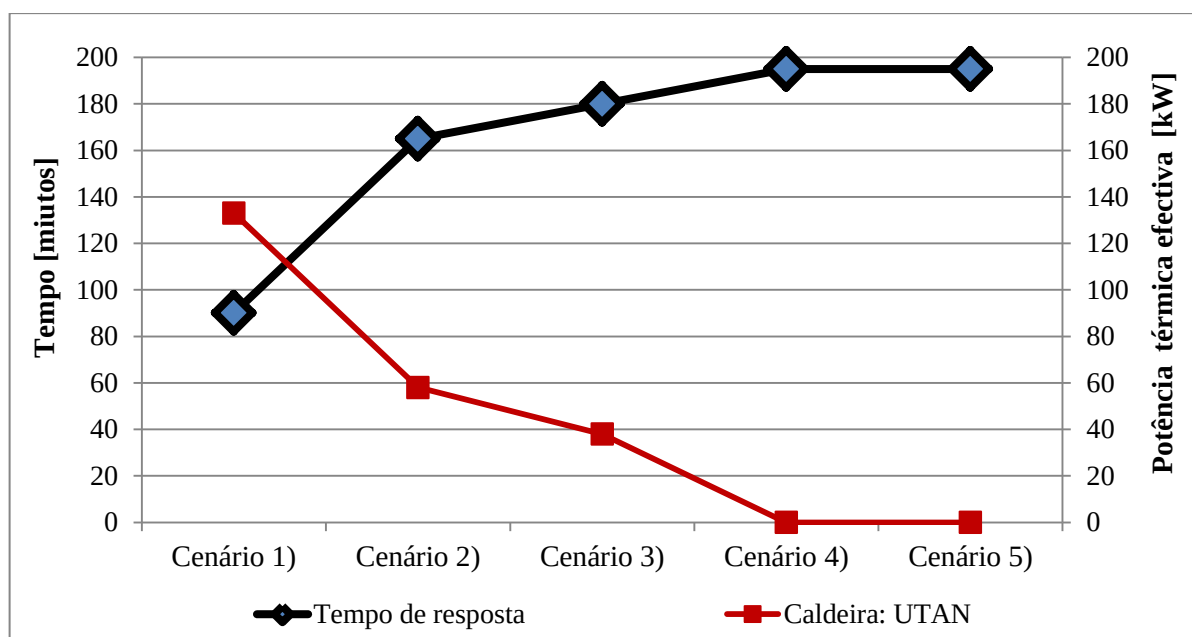


Figura 21 – Tempo de resposta para o dia mais frio do ano, de cada cenário, em comparação com a diminuição da potência térmica efectiva

A redução da potência térmica dos *chillers* revelou-se insuficiente para causar variação no tempo de resposta para o dia mais quente do ano (23 de Julho), mantendo-se nos 30 minutos, em todos os cenários.

Aplicando a redução da potência térmica, nos parâmetros da simulação de cada cenário, ao analisar o seu impacto sobre o consumo energético anual, resultou numa optimização marginal, obtendo-se reduções inferiores a 1 % (Análise para cada cenário, definindo numa primeira simulação, potências térmicas nominais e comparando com uma segunda simulação, com potências térmicas efectivas).

Em paralelo compararam-se os consumos energéticos entre os vários cenários, e como era esperado, verifica-se uma diminuição no consumo energético com a introdução de tecnologias de recuperação térmica. Na figura 22 apresenta-se o consumo anual de gás natural referente a cada cenário e a redução em termos percentuais que é possível obter. A utilização de uma UTAN com permutador de calor de placas, reduz o consumo de gás natural em 58 %, comparativamente com o cenário 1, se se utilizar uma roda térmica, o consumo é reduzido em 73 % e com a adição de recuperação de calor ao nível dos condensadores dos *chillers*, obtém-se uma redução no consumo de 72 a 78 %.

Também, como seria de esperar, o tipo de central de frio, com *chillers* ar-água ou com *chillers* água-água, não influencia o consumo de gás natural, apenas existe uma variação marginal quando se incorpora recuperação térmica nos chillers, sendo que os do tipo “água-água” têm um consumo pouco superior (aproximadamente 1%) aos do tipo “ar-água”, devendo-se estas variações às diferenças que existem entre as curvas características utilizadas na simulação dinâmica.

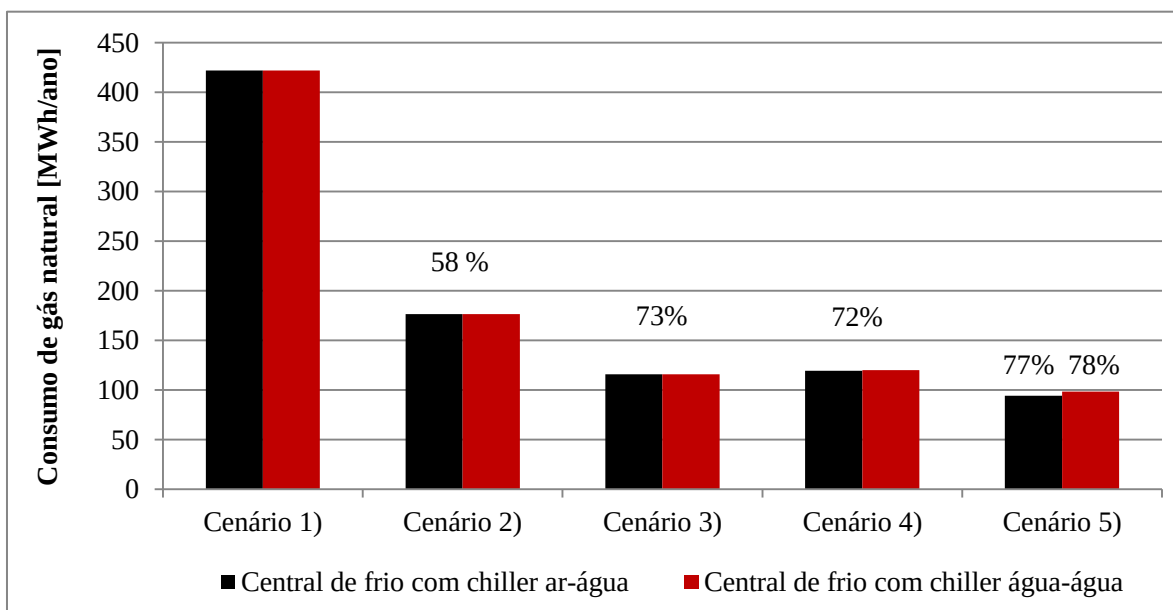


Figura 22 – Consumo anual de gás natural de cada cenário e redução percentual (em comparação com o primeiro cenário), para cada tipo de central de frio

Na figura 23 apresentam-se as diferenças no consumo de energia eléctrica entre cada cenário e para cada tipo de central de frio (com *chillers* ar-água ou com *chillers* água-água). A utilização de *chillers* água-água resulta numa redução do consumo de energia eléctrica, em todos os cenários. Os cenários 2 e 3 têm um consumo superior relativamente ao cenário 1, justificado pelo facto de existirem simultaneamente necessidades de aquecimento e arrefecimento, na estação de aquecimento, e como a recuperação térmica permitiu um aumento da temperatura de insuflação do ar novo, as zonas que têm necessidades de arrefecimento, os ventilo convectores requerem mais água fria para remover o calor adicional, aumentando assim o consumo de energia eléctrica, sobretudo no *chiller* associado às unidades ventiloconvectoras.

Consegue-se uma redução no consumo de energia eléctrica nos cenários 4 e 5, embora inferior a 2%, em comparação ao cenário 1, devido ao facto de se utilizar baterias de reaquecimento,

colocando-as, estrategicamente, nas condutas que fornecem ar novo às zonas com maiores necessidades de aquecimento, juntamente com a remoção da caldeira associada à UTAN, as zonas que têm maioritariamente necessidades de arrefecimento na estação de aquecimento, precisam de menos água fria para garantir a gama de temperaturas estipulada.

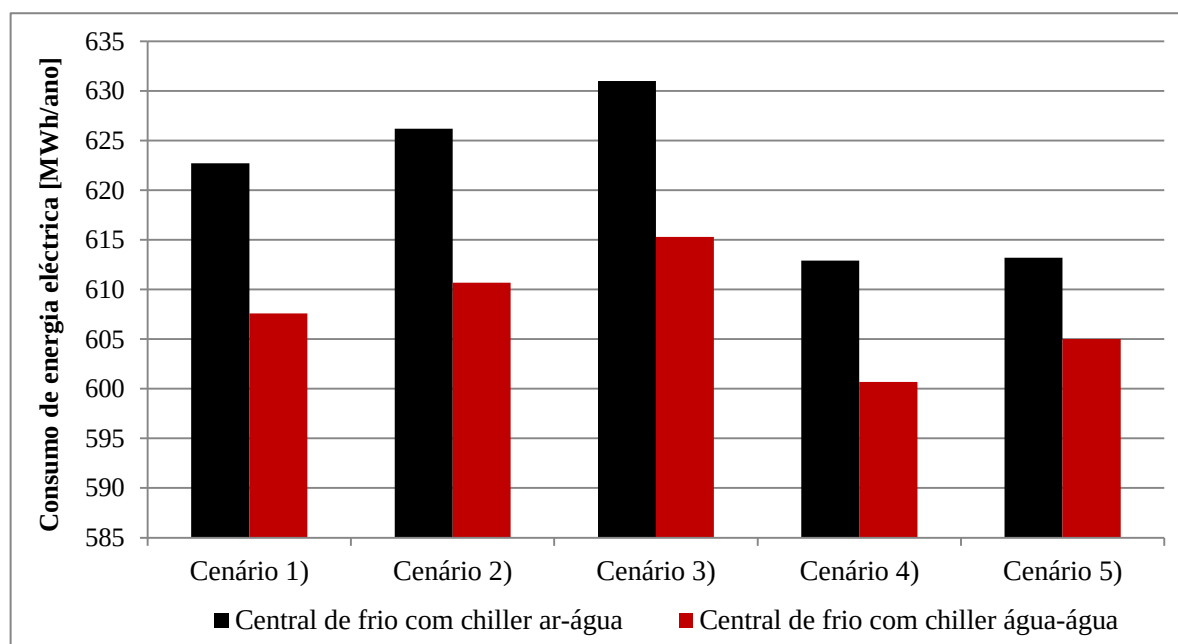


Figura 23 – Comparação entre os cenários do consumo anual de energia eléctrica, para cada tipo de central de frio

Conjugando as figuras 22 e 23, é perceptível que os cenários que oferecem menores consumos energéticos, são os cenários 4 e 5. Sendo também estes os que permitem uma maior percentagem na redução do dimensionamento das caldeiras e dos *chillers*. Tal traduz-se nos custos de primeiro investimento que se verificam menores do que se aplicasse o dimensionamento conforme as potências térmicas nominais. A poupança monetária, ao nível das caldeiras é de aproximadamente 35% (cerca de 3 000 €) e ao nível dos *chillers* é de aproximadamente 15% (cerca de 8 000 €), para este caso de estudo.

Na tabela 6 apresentam-se os custos estimados de primeiro investimento de cada cenário e os custos acumulados com o consumo energético, ao fim de 5, 10, 15 e 20 anos (sem IVA). Neste trabalho não são contabilizados os custos com as condutas e tubagens.

Tabela 6 – Custos de primeiro investimento e evolução dos custos com o consumo energético, para cada cenário

Cenário	Tipo de central de frio	Investimento inicial	5 Anos	10 Anos	15 Anos	20 Anos
1)	ar-água	155 k€	645 k€	1,13 M€	1,62 M€	2,10 M€
	água-água	170 k€	645 k€	1,12 M€	1,60 M€	2,08 M€
2)	ar-água	160 k€	600 k€	1,04 M€	1,48 M€	1,92 M€
	água-água	175 k€	600 k€	1,03 M€	1,47 M€	1,90 M€
3)	ar-água	160 k€	600 k€	1,02 M€	1,45 M€	1,89 M€
	água-água	175 k€	595 k€	1,02 M€	1,44 M€	1,86 M€
4)	ar-água	180 k€	605 k€	1,03 M€	1,45 M€	1,87 M€
	água-água	190 k€	605 k€	1,02 M€	1,43 M€	1,85 M€
5)	ar-água	180 k€	600 k€	1,01 M€	1,43 M€	1,85 M€
	água-água	190 k€	605 k€	1,02 M€	1,43 M€	1,84 M€

A curto prazo, a implementação da solução do cenário 3, com arrefecimento dos condensadores dos *chillers* a água, é a mais rentável, a longo prazo os cenários 4 e 5 tornam-se os mais rentáveis, sobretudo se se utilizar *chillers* água-água.

8 Conclusões

A conclusão principal sobre a temática desta dissertação é que com a implementação de soluções de recuperação térmica é possível reduzir, efectivamente, a potência térmica dos equipamentos das centrais térmicas. Isto permite uma redução dos custos associados ao investimento inicial e ao mesmo tempo obter uma optimização, embora marginal, no consumo energético. A desvantagem desta redução reside no aumento do tempo de resposta para garantir as condições de conforto térmico face às alterações das cargas térmicas das zonas climatizadas.

Os resultados mostram que as tecnologias de recuperação térmica têm grande influência na redução da potência dos equipamentos “produtores” de energia térmica, sobretudo nestes equipamentos associados às unidades de tratamento de ar, sendo que não houve qualquer alteração no dimensionamento dos equipamentos associados aos ventilo convectores.

A análise revelou um forte peso na redução da potência térmica da caldeira. Aplicando um permutador de calor de fluxos cruzados à unidade de tratamento de ar é possível reduzir em 55%, a potência térmica da caldeira associada. Se se utilizar uma roda térmica, a redução da potência térmica é superior, atingindo os 75 %, e ao adicionar recuperação térmica ao nível dos *chillers*, é possível retirar por completo a caldeira, pois a gama de temperaturas de insuflação de ar novo é garantido pelas tecnologias de recuperação térmica aplicadas.

Quanto ao dimensionamento do *chiller*, associado às necessidades da unidade de tratamento de ar, a sua potência térmica pode ser reduzida em 14 % aquando da utilização de um permutador de calor de fluxos cruzados, ou de 18 % aquando a utilização de uma roda térmica.

Os resultados demonstraram que ao efectuar as reduções das potências térmicas das caldeiras e *chillers*, existe uma optimização no consumo energético, embora marginal, sendo a poupança inferior a 1 %, não tendo um impacto significativo em termos financeiros (inferior a 100 €).

No entanto, a redução na potência térmica implica um aumento do tempo de resposta do sistema AVAC às variações das cargas térmicas do *Corpo H*. Os resultados demonstram, naturalmente, que quanto maior for a redução da potência térmica aplicada, maior será o tempo de resposta. Para um horário, hipotético, de funcionamento das centrais térmicas, em que estas são desligadas da 01:00 às 06:00 horas, há um aumento do tempo de resposta em 1h15min a 1h45min para o dia mais frio do ano, relativamente ao sistema de referência. Em termos percentuais, este aumento representa um incremento de 83 % a 117 %, dependente do nível de redução da potência térmica da caldeira. O tempo de resposta referente ao dia mais quente do ano, não sofre alterações relativamente ao sistema de referência, mantendo-se nos 30 minutos.

Por fim, face aos resultados obtidos, o cenário mais adequado em termos económicos, a médio-longo prazo, é o cenário 5 com a utilização de *chillers* água-água. Este cenário é composto pela utilização de uma roda térmica na unidade de tratamento de ar novo e pela utilização de *chillers* com recuperação térmica. Poder-se-ia optar pela utilização de *chillers* ar-água em detrimento de *chillers* água-água, tendo vantagem de menores custos de investimento inicial, mas com a consequência de aumentar os custos finais em cerca de 10 000 € num prazo de 20 anos.

8.1 Perspectivas de trabalho futuro

Como sugestão para trabalhos futuros, seria interessante: (1) Averiguar o impacto no dimensionamento dos *chillers*, com a utilização da acumulação de frio, através do armazenamento térmico; (2) Dimensionar as tubagens conforme a potência térmica efectiva dos equipamentos das centrais térmicas, para avaliar reduções adicionais nos custos de investimento e (3) Implementar o controlo da humidade do ar e verificar de igual modo se a sua variação produz impactos significativos quanto ao dimensionamento dos equipamentos das centrais térmicas.

9 Bibliografia

1. ADENE, *Sistema de Certificação Energética e de QAI*. Informações Gerais, 2009.
2. *Trane newsletter volume 20 nº1/1991, Two Good Old Ideas Combine to Form One New Great Idea*. <http://www.trane.com/commercial/library/en20-1.pdf> 12-04-2011].
3. *Cutting energy costs in hospitals*. <http://www.csemag.com/media-library/case-studies-and-white-papers/single-article/cutting-energy-costs-in-hospitals/ae247a44bf.html> 20-03-2011].
4. *Illinois Village Uses Heat-Recovery Chiller to Boost Efficiency of Police Station*. <http://hpac.com/departments/design-solutions/illinois-village-heat-recovery-0311/> 20-03-2011].
5. FlaktWoods, *Air Handling Unit eQ and eQ PLUS Technical Data - June 2010*.
6. *ASHRAE Handbook - HVAC Systems and Equipment (SI Edition)* 2008.
7. Wellford, B. *This ERV's For You*. http://www.achrnews.com/Articles/Feature_Article/e69d26828dd5a010VgnVCM100000f932a8c0 11-05-2011].
8. Moura, S. *Projecto de Souto Moura*. <http://maisevora.blogspot.com/2011/03/novo-hospital-de-evora-projecto-de.html> 08-06-2011].
9. *Decreto-Lei nº80/2006*. RCCTE - Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios.
10. *Especificações Técnicas para Instalações de AVAC da Administração Central do Sistema Saúde - ACSS*, 2008.
11. *Decreto-Lei nº 79/2006*. RSECE - Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios.
12. EnergyPlus, *Input Output Reference*. The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output, 2010.
13. Energia, G. *Tarifa de venda de gás natural a clientes finais - 3º Trimestre 2011*. <http://www.galpennergia.com/PT/ProdutosServicos/GasNatural/Mercado-Regulado/Tarifario/Paginas/Empresas.aspx> 02-06-2011].
14. ERSE. *Tarifas a aplicar pelo operador da rede de distribuição em MT e AT*. <http://www.erse.pt/pt/electricidade/tarifaseprecos/tarifareguladas2011/Documents/PreçosACESSO2011.pdf> 28-05-2011].
15. Buderus, *Tabela geral de preços 2010*.
16. *EFCIS - comércio internacional, Ciat - VC Major Line*. Precário ventilo convectores horizontais, 2011.

ANEXO A: Tabelas complementares

Tabela 7 – Área de pavimento das zonas do *Corpo H*

Zona #	Piso	Tipo	Área [m ²]	Zona #	Piso	Tipo	Área [m ²]
1	-1	Gabinete Médico	15	21	1	Gabinete Médico	190
2	-1	Gabinete Médico	120	22	1	Gabinete Médico	28
3	-1	Circulação	335	23	1	Gabinete Médico	25
4	-1	Gabinete Médico	76	24	1	Gabinete Médico	30
5	-1	Gabinete Médico	13	25	1	Gabinete Médico	230
6	-1	Gabinete Médico	145	26	1	Gabinete Médico	38
7	-1	Gabinete Médico	13	27	0	Gabinete Médico	10
8	-1	Gabinete Médico	215	28	0	Gabinete Médico	50
9	-1	Gabinete Médico	200	29	0	Gabinete Médico	16
10	-1	WC	28	30	0	Gabinete Médico	175
11	-1	Caixa de Escadas + Elevador	70	31	0	Circulação	405
12	-1	Gabinete Médico	18	32	0	Gabinete Médico	68
13	1	Gabinete Médico	20	33	0	Gabinete Médico	50
14	1	Gabinete Médico	10	34	0	Gabinete Médico	210
15	1	Gabinete Médico	205	35	0	Gabinete Médico	175
16	1	Circulação	330	36	0	WC	30
17	1	Arrecadação	12	37	0	Caixa de Escadas + Elevador	68
18	1	Gabinete Médico	28	38	0	Gabinete Médico	45
19	1	WC	11	39	0	Gabinete Médico	25
20	1	Caixa de Escadas + Elevador	68	Área total [m ²] =			3800

Tabela 8 – Caudais de ar novo para as zonas do *Corpo H*

Zona #	Caudal de ar novo		Zona #	Caudal de ar novo	
	referência	m ³ /h		referência	m ³ /h
1	5 m ³ /(h.m ²)	75	21	5 m ³ /(h.m ²)	950
2	5 m ³ /(h.m ²)	600	22	5 m ³ /(h.m ²)	140
3	5 m ³ /(h.m ²)	1 675	23	5 m ³ /(h.m ²)	125
4	5 m ³ /(h.m ²)	380	24	5 m ³ /(h.m ²)	150
5	5 m ³ /(h.m ²)	65	25	5 m ³ /(h.m ²)	1 150
6	5 m ³ /(h.m ²)	725	26	5 m ³ /(h.m ²)	190
7	5 m ³ /(h.m ²)	65	27	5 m ³ /(h.m ²)	50
8	5 m ³ /(h.m ²)	1 075	28	5 m ³ /(h.m ²)	250
9	5 m ³ /(h.m ²)	1 000	29	5 m ³ /(h.m ²)	80
10	5 m ³ /(h.m ²)	140	30	5 m ³ /(h.m ²)	875
11	5 m ³ /(h.m ²)	350	31	5 m ³ /(h.m ²)	2 025
12	5 m ³ /(h.m ²)	90	32	5 m ³ /(h.m ²)	340
13	5 m ³ /(h.m ²)	100	33	5 m ³ /(h.m ²)	250
14	5 m ³ /(h.m ²)	50	34	5 m ³ /(h.m ²)	1 050
15	5 m ³ /(h.m ²)	1 225	35	5 m ³ /(h.m ²)	870
16	5 m ³ /(h.m ²)	1 650	36	10 rph	810
17	2 rph	70	37	5 m ³ /(h.m ²)	340
18	5 m ³ /(h.m ²)	140	38	5 m ³ /(h.m ²)	225
19	10 rph	280	39	5 m ³ /(h.m ²)	125
20	5 m ³ /(h.m ²)	340	Total [m³/h] =		19 895

Tabela 9 – Carga térmica de arrefecimento e aquecimento das zonas úteis, para os dias de projecto

Zona #	Carga de arrefecimento [kW]		Carga de aquecimento [kW]
	Total	Sensível	
#01	2	2	3
#02	8	8	11
#04	6	6	8
#05	1	1	2
#06	10	9	12
#07	2	2	3
#08	13	12	15
#09	16	15	19
#12	2	1	2
#13	2	1	2
#14	3	2	3
#15	22	21	22
#18	3	3	4
#21	16	15	15
#22	3	3	4
#23	4	4	4
#24	3	3	3
#25	37	35	40
#26	4	4	4
#27	3	3	3
#28	6	5	6
#29	2	2	3
#30	12	12	14
#32	5	5	6
#33	5	4	6
#34	14	13	15
#35	13	12	15
#38	4	3	5
#39	2	2	3

Total por piso	Carga de arrefecimento [kW]		Carga de aquecimento [kW]
	Total	Sensível	
-1	60	55	75
0	66	60	76
1	98	91	101

Total	Carga de arrefecimento [kW]		Carga de aquecimento [kW]
	Total	Sensível	
Corpo H	224	207	252

ANEXO B: Nós de ligação de um sistema base de AVAC

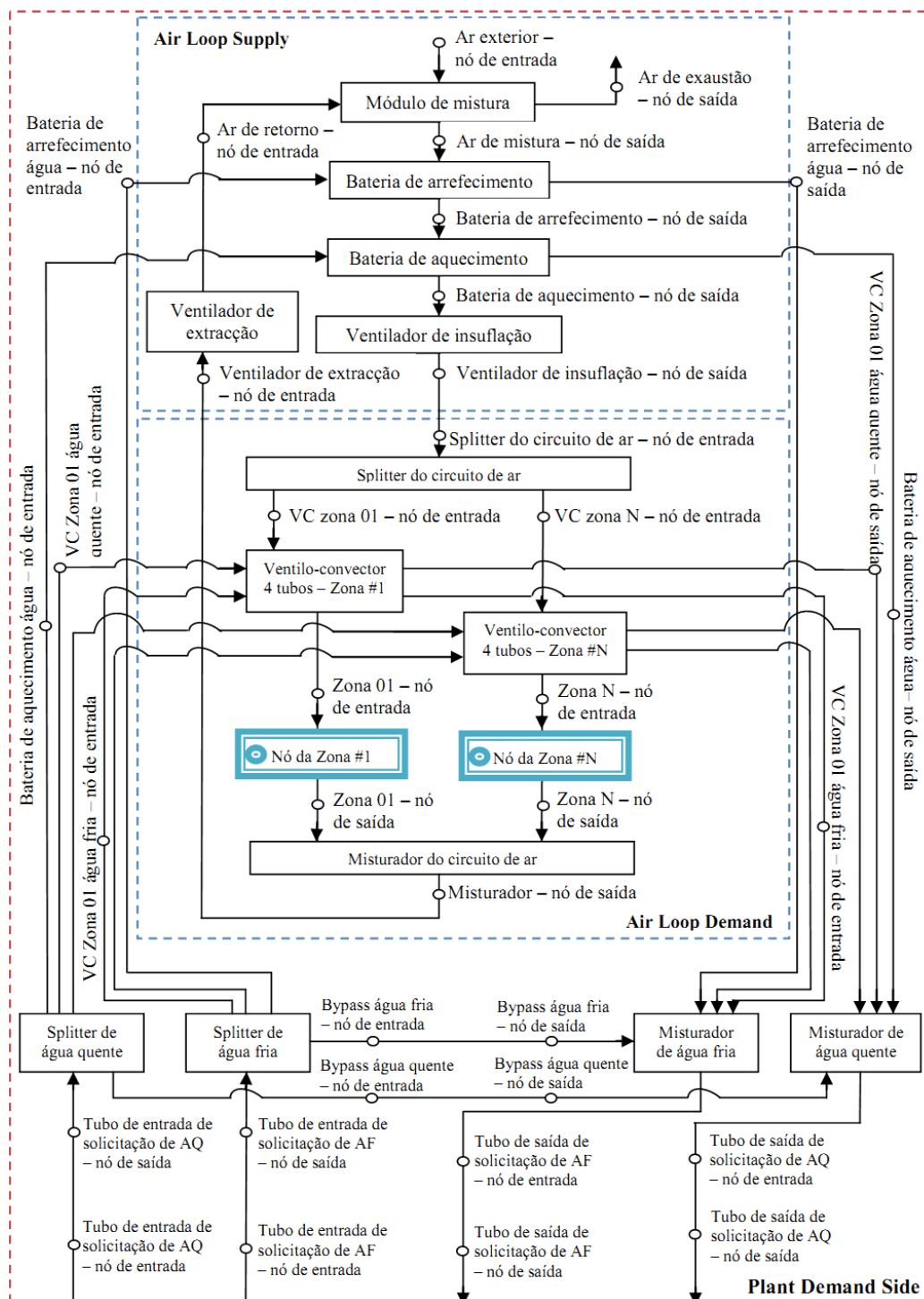


Figura 24 – Definição dos nós no circuito de ar e no circuito de produção da parte da solicitação

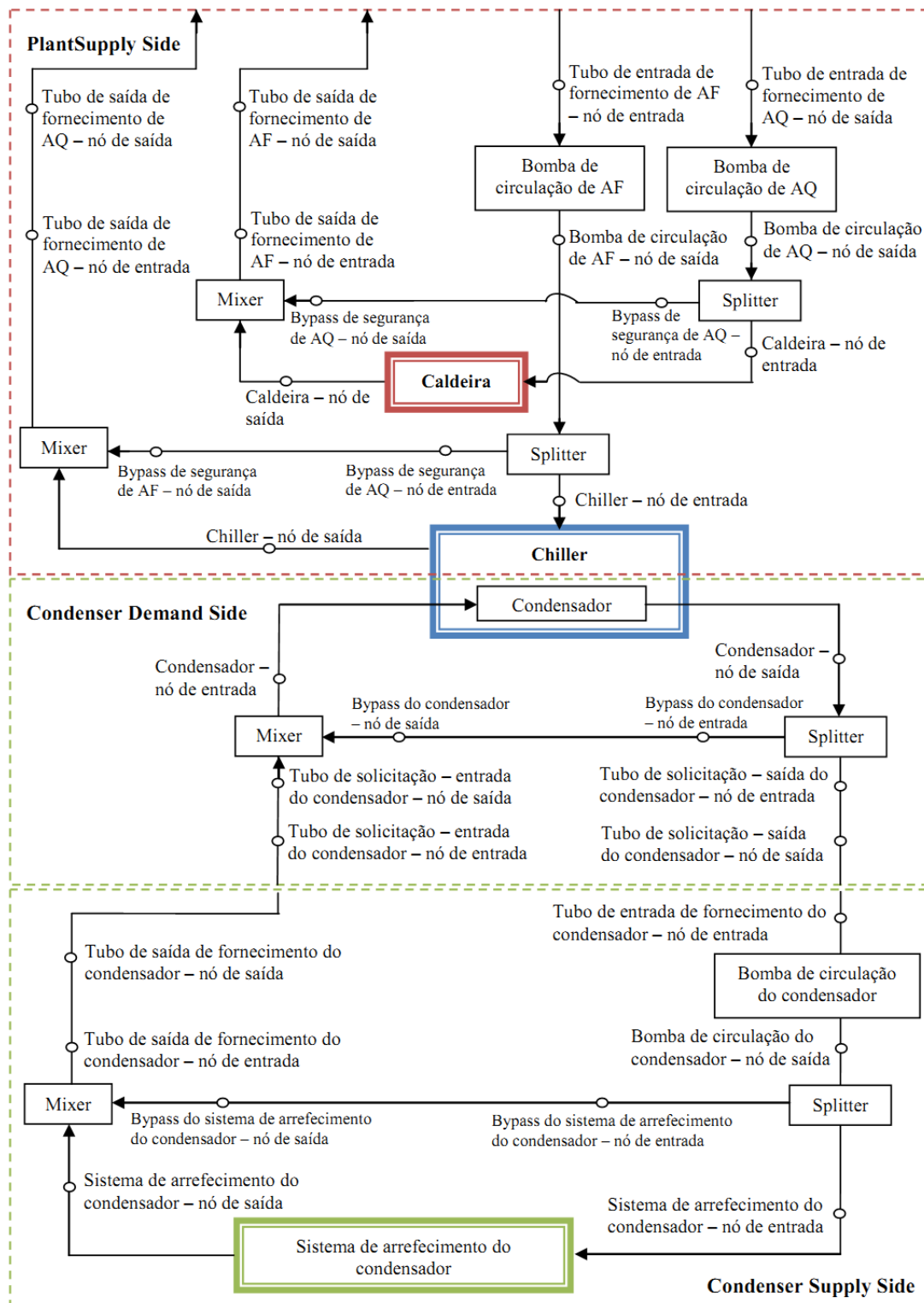


Figura 25 – Definição dos nós no circuito de produção da parte do fornecimento e do circuito do condensador

ANEXO C: Resultados da simulação dos cenários

Neste trabalho, quando se refere à utilização de “potências térmicas nominais” nos parâmetros da simulação, são utilizados os valores da tabela 10. Estes valores são resultantes do modo de “auto-dimensionamento” do *Energy Plus* e são obtidos com base nos dias de projecto (*design days*)

Tabela 10 – Resultados das potências térmicas nominais das caldeiras, *chillers* e da torre de arrefecimento, resultantes do modo de “auto-dimensionamento”

Componente	Potência [kW]
Caldeira: Ventiladores	110
Caldeira: UTAN	133
Chiller: Ventiladores	123
Chiller: UTAN	79
Torre de arrefecimento	247

De seguida apresenta-se os resultados das simulações dinâmicas referentes aos quatro primeiros cenários, a análise do quinto cenário está exposta no subcapítulo 7.2, onde também pode ser consultado o texto de apoio a cada tipo de gráfico.

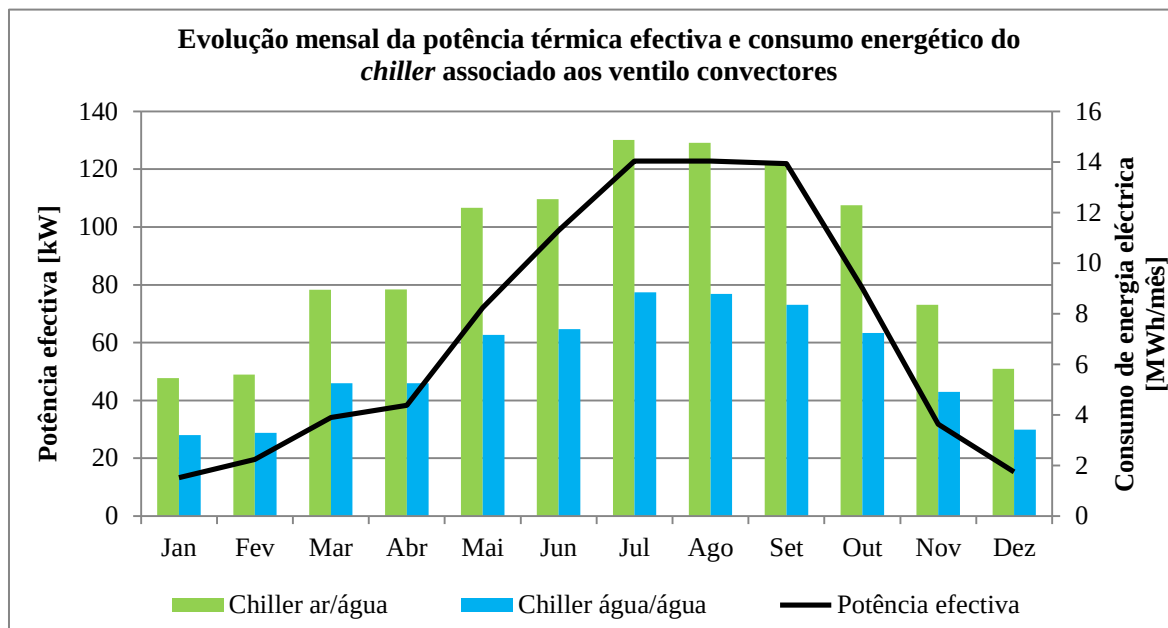
Cenário 1)

Figura 26 – Evolução mensal da potência térmica efectiva e do consumo de energia eléctrica do *chiller* associado aos ventilo convectores. Soluções com *chiller* ar-água ou com *chiller* água-água: Cenário 1

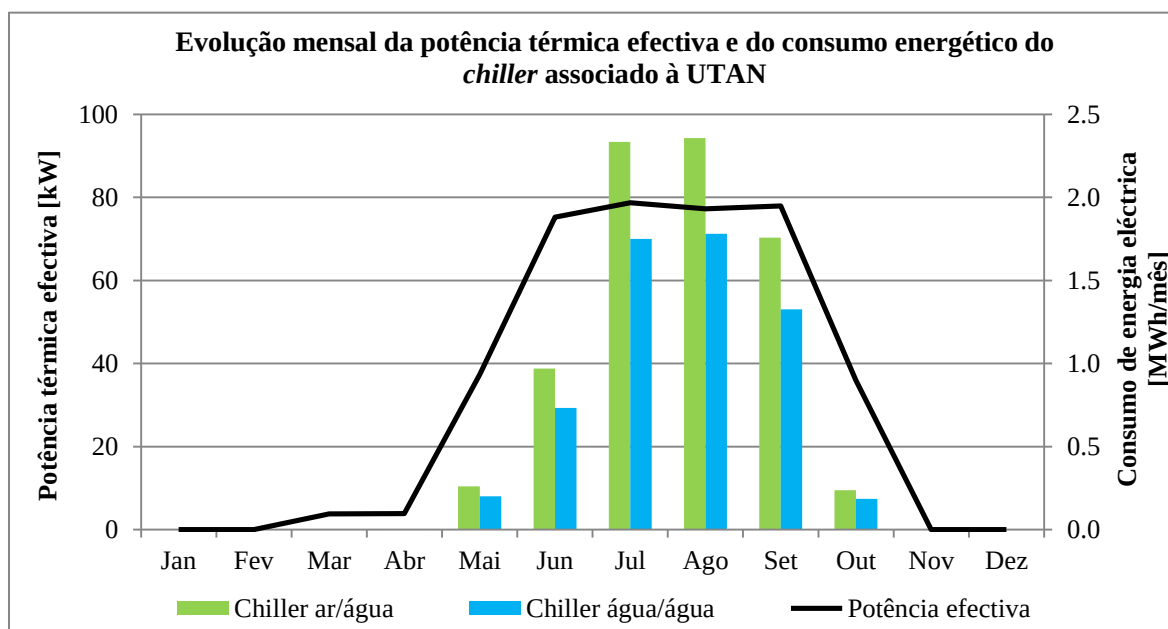


Figura 27 – Evolução mensal da potência térmica efectiva e do consumo de energia eléctrica do *chiller* associado à UTAN. Soluções com *chiller* ar-água ou com *chiller* água-água: Cenário 1

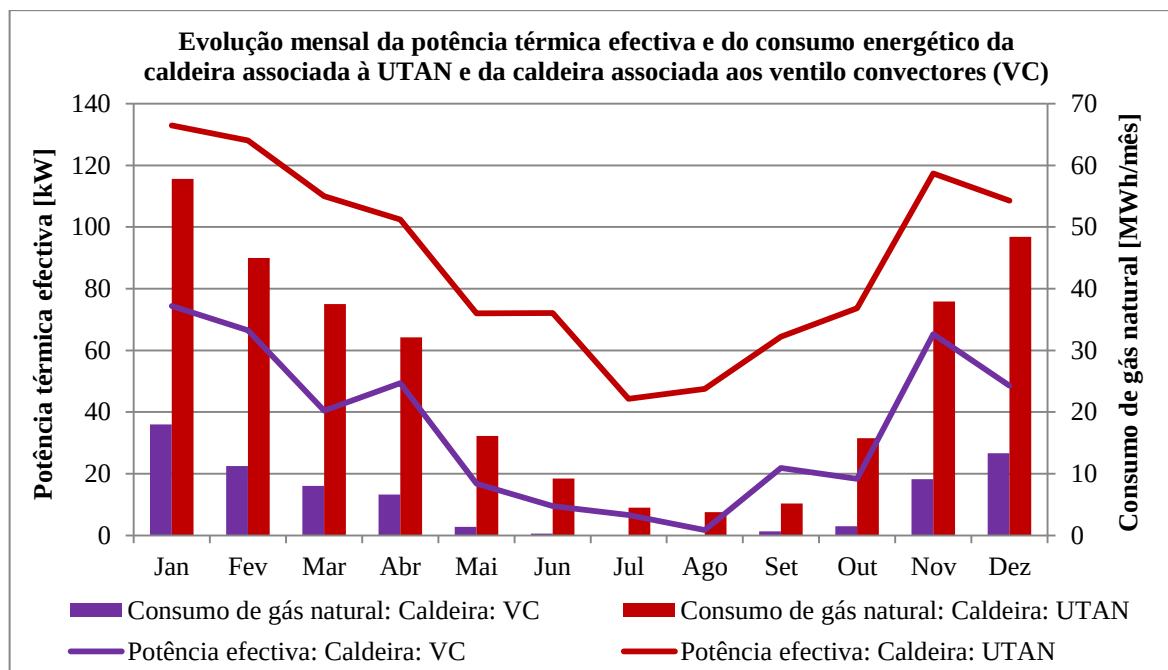


Figura 28 – Evolução mensal da potência térmica efectiva e do consumo de gás natural, da caldeira associada à UTAN e da caldeira associada aos ventilo convectores: Cenário 1

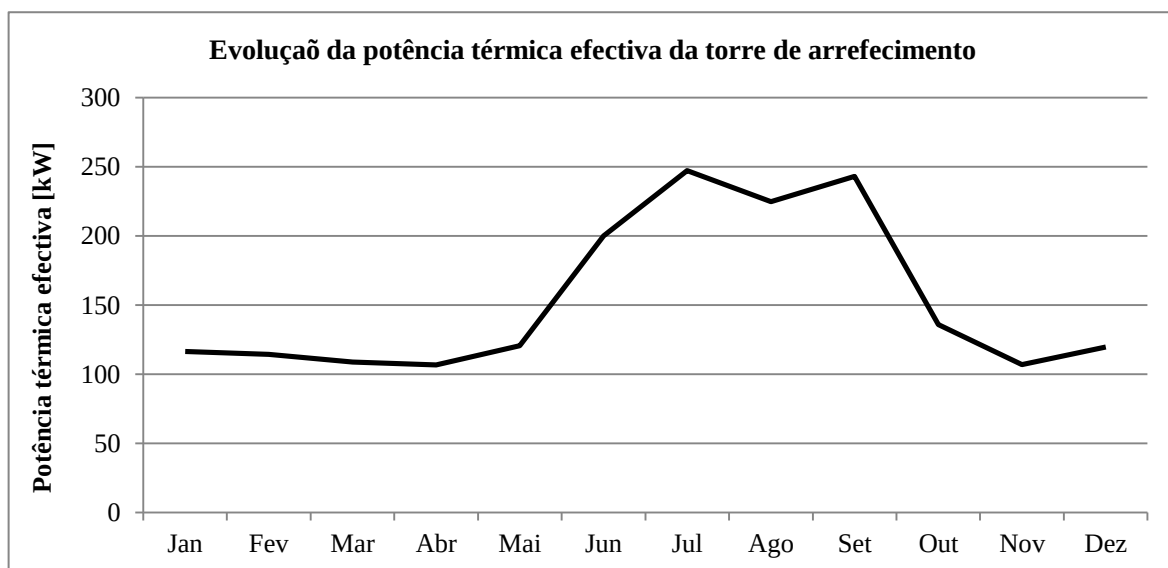


Figura 29 – Evolução mensal da potência térmica efectiva da torre de arrefecimento: Cenário 1

Na tabela 11, apenas a potência térmica da caldeira que fornece água quente aos ventilo convectores, é que difere em relação aos valores das potência térmicas nominais da tabela 10, isto deve-se à presença das cargas internas, que faz com que não seja necessária uma caldeira de maior potência térmica.

Tabela 11 – Potência térmica efectiva dos equipamentos “produtores” de energia térmica das centrais térmicas:

Cenário 1

Componente	Potência térmica efectiva [kW]
Caldeira: ventilo convectores	74
Caldeira: UTAN	133
Chiller: ventilo convectores	123
Chiller: UTAN	79
Torre de arrefecimento	247

Tabela 12 - Consumos e custos energéticos anuais do *Corpo H*, referente à utilização de potências térmicas nominais nos parâmetros da simulação dinâmica: Cenário 1

Com as potências térmicas nominais	Central de frio com chillers ar-água		Central de frio com chillers água-água	
	Energia eléctrica [MWh/ano]	Gás Natural [MWh/ano]	Energia eléctrica [MWh/ano]	Gás Natural [MWh/ano]
Caldeira	-	383.2	-	383.2
Chiller	131.7	-	79.1	-
Iluminação artificial	208.5	-	208.5	-
Equipamento interior	142.2	-	142.2	-
Ventiladores	136.8	-	136.8	-
Bombas hidráulicas	3.5	-	23.0	-
Torre de arrefecimento	-	-	18.1	-
Água quente	-	38.8	-	38.8
Total [MWh/ano] =	622.7	422.0	607.6	422.0
Custo [€/ano] =	76 897 €	20 417 €	75 043 €	20 417 €
Custo total [€/ano] =	97 315 €		95 461 €	

Tabela 13 – Consumos e custos energéticos anuais do *Corpo H*, referente à utilização de potências térmicas efectivas nos parâmetros da simulação dinâmica: Cenário 1

Com as potências térmicas efectivas	Central de frio com chillers ar-água		Central de frio com chillers água-água	
	Energia eléctrica [MWh/ano]	Gás Natural [MWh/ano]	Energia eléctrica [MWh/ano]	Gás Natural [MWh/ano]
Caldeira	-	383.0	-	383.0
Chiller	131.7	-	79.1	-
Iluminação artificial	208.5	-	208.5	-
Equipamento interior	142.2	-	142.2	-
Ventiladores	136.8	-	136.8	-
Bombas hidráulicas	3.5	-	23.0	-
Torre de arrefecimento	-	-	18.1	-
Água quente	623	38.8	-	38.8
Total [MWh/ano] =	622.7	421.8	607.6	421.8
Custo [€/ano] =	76 897 €	20 409 €	75 043 €	20 409 €
Custo total [€/ano] =	97 307 €		95 452 €	

Tabela 14 – Influência da limitação das potências térmica nos equipamentos “produtores” de energia térmica, em relação ao consumo energético anual do *Corpo H*: Cenário 1

Tipo de central de frio	Energia eléctrica [kWh/ano]	Energia eléctrica [%]	Gás natural [kWh/ano]	Gás natural [%]
Com chiller ar-água	0	0	-214	-0.05%
Com chiller água-água	0	0	-214	-0.05%

Na figura 30 apresenta-se a evolução do consumo energético e da percentagem de zonas que encontram-se em conforto térmico³, com a implementação de um horário de funcionamento, em que as centrais térmicas são desligadas da 01:00 às 06:00 horas.

Para o dia mais quente do ano (23 de Julho), o tempo de resposta foi de apenas 30 minutos, devido à temperatura das zonas estar um pouco acima dos 25 °C.

Para o dia mais frio do ano (31 de Janeiro), o tempo de resposta para foi de 1h30min.

O gráfico obtido é igual quer para a utilização das potências térmicas nominais, obtidas do modo de “auto-dimensionamento”, quer para as potências térmicas efectivas, descritas anteriormente.

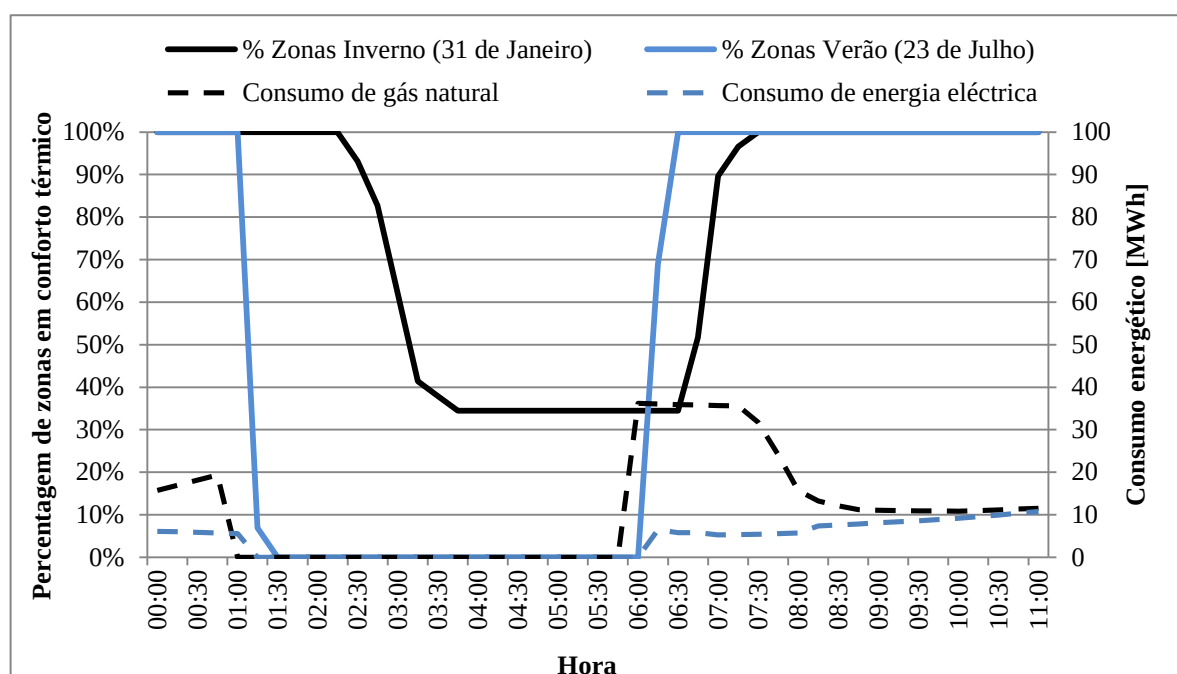


Figura 30 – Tempo de resposta do *Corpo H*, para o dia mais frio e mais quente do ano, com a limitação da potência térmica nas caldeiras e *chillers*: Cenário 1

³ Condição de conforto térmico, neste trabalho, é garantir uma gama de temperatura do ar interior, de 20 a 25 °C.

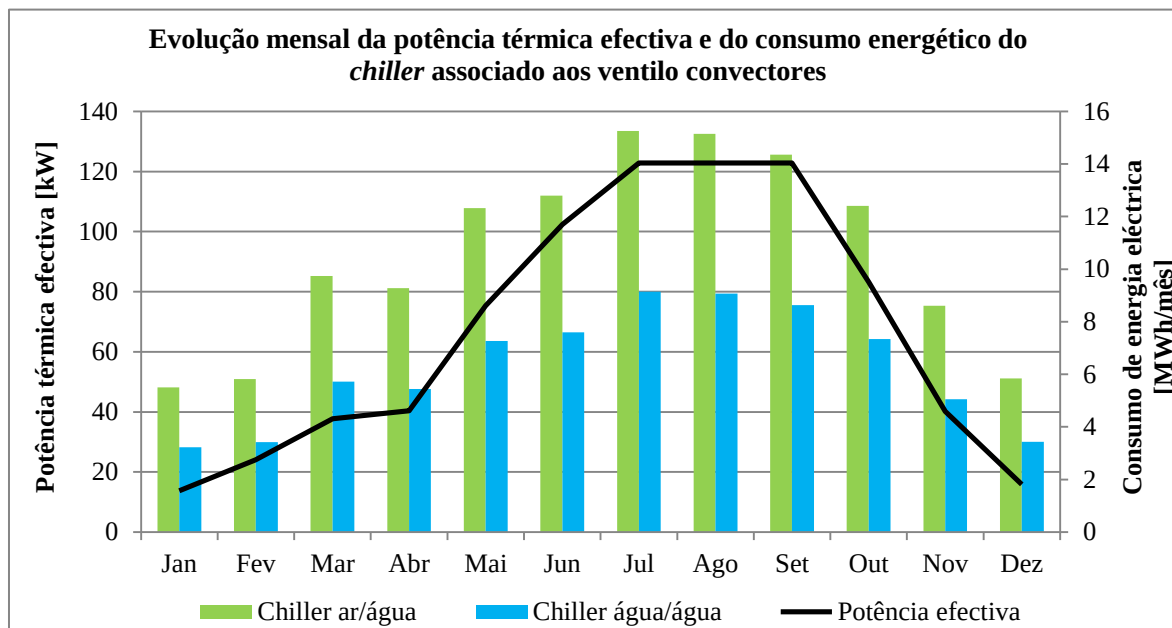
Cenário 2)

Figura 31 – Evolução mensal da potência térmica efectiva e do consumo de energia eléctrica do *chiller* associado aos ventilo convectores. Soluções com *chiller* ar-água ou com *chiller* água-água: Cenário 2

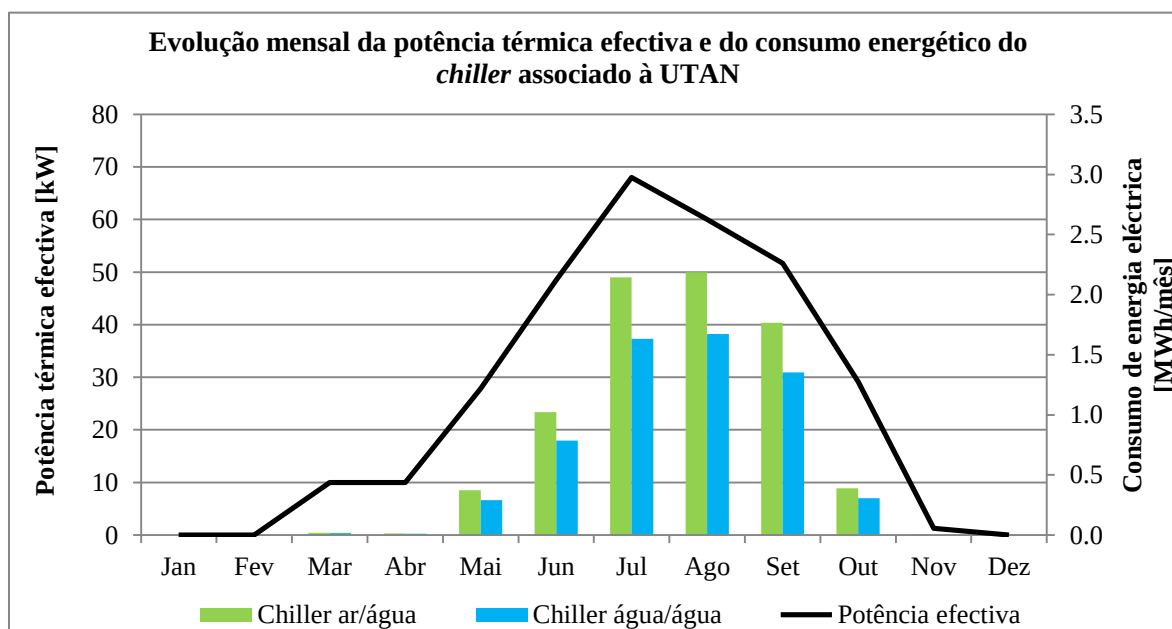


Figura 32 – Evolução mensal da potência térmica efectiva e do consumo de energia eléctrica do *chiller* associado à UTAN. Soluções com *chiller* ar-água ou com *chiller* água-água: Cenário 2

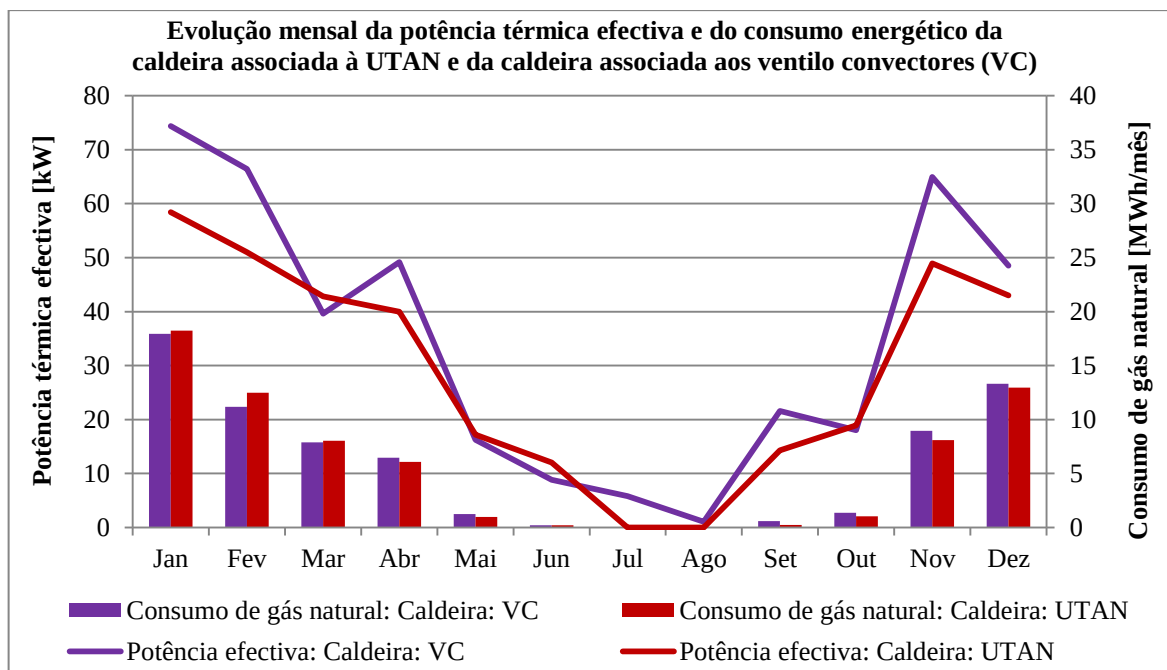


Figura 33 – Evolução mensal da potência térmica efectiva e do consumo de gás natural, da caldeira associada à UTAN e da caldeira associada aos ventilo convectores: Cenário 2

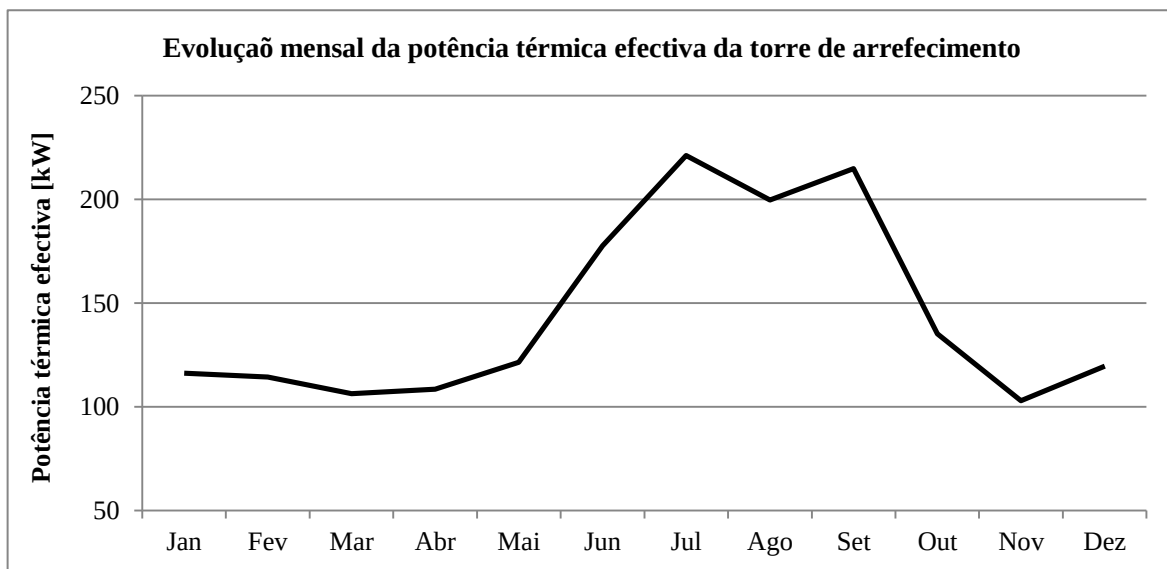


Figura 34 – Evolução mensal da potência térmica efectiva da torre de arrefecimento: Cenário 2

Tabela 15 – Potência térmica efectiva dos equipamentos “produtores” de energia térmica das centrais térmicas:

Cenário 2

Componente	Potência térmica efectiva [kW]
Caldeira: ventilo convectores	74
Caldeira: UTAN	58
Chiller: ventilo convectores	123
Chiller: UTAN	68
Torre de arrefecimento	221

Tabela 16 – Consumos e custos energéticos anuais do *Corpo H*, referente à utilização de potências térmicas nominais nos parâmetros da simulação dinâmica: Cenário 2

Com as potências térmicas nominais	Central de frio com chillers ar-água		Central de frio com chillers água-água	
	Energia eléctrica [MWh/ano]	Gás Natural [MWh/ano]	Energia eléctrica [MWh/ano]	Gás Natural [MWh/ano]
Caldeira	-	137.5	-	137.5
Chiller	135.0	-	81.4	-
Iluminação artificial	208.5	-	208.5	-
Equipamento interior	142.2	-	142.2	-
Ventiladores	136.8	-	136.8	-
Bombas hidráulicas	3.7	-	23.5	-
Torre de arrefecimento	-	-	18.4	-
Água quente	-	38.8	-	38.8
Total [MWh/ano]=	626.2	176.3	610.7	176.3
Custo [€/ano] =	77 335 €	10 763 €	75 425 €	10 763 €
Custo total [€/ano] =	88 098 €		86 187 €	

Tabela 17 – Consumos e custos energéticos anuais do *Corpo H*, referente à utilização de potências térmicas efectivas nos parâmetros da simulação dinâmica: Cenário 2

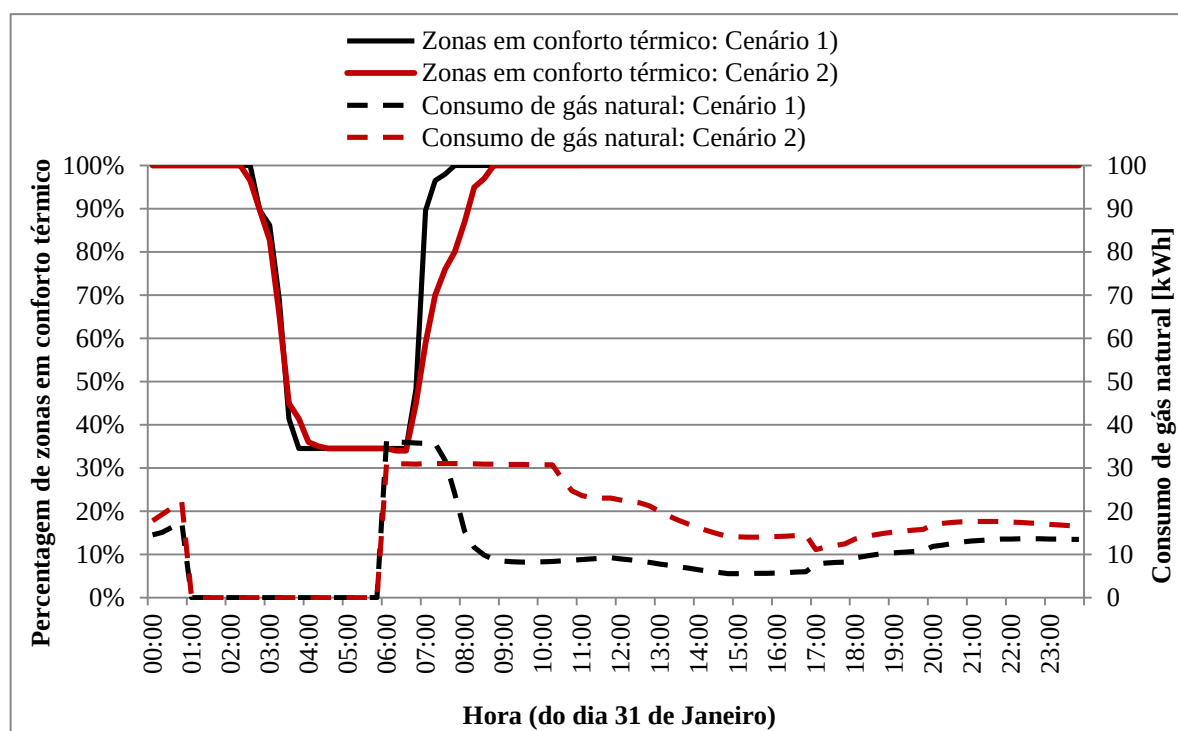
Com as potências térmicas efectivas	Central de frio com chillers ar-água		Central de frio com chillers água-água	
	Energia eléctrica [MWh/ano]	Gás Natural [MWh/ano]	Energia eléctrica [MWh/ano]	Gás Natural [MWh/ano]
Caldeira	-	136.7	-	136.7
Chiller	135.0	-	81.3	-
Iluminação artificial	208.5	-	208.5	-
Equipamento interior	142.2	-	142.2	-
Ventiladores	136.8	-	136.8	-
Bombas hidráulicas	3.7	-	21.6	-
Torre de arrefecimento	-	-	16.7	-
Água quente	-	38.8	-	38.8
Total [MWh/ano]=	626.2	175.4	607.1	175.4
Custo [€/ano] =	77 334 €	10 730 €	74 974 €	10 730 €
Custo total [€/ano] =	88 064 €		85 704 €	

Tabela 18 – Influência da limitação das potências térmica nos equipamentos “produtores” de energia térmica, em relação ao consumo energético anual do *Corpo H*: Cenário 2

Tipo de central de frio	Energia eléctrica [kWh/ano]	Energia eléctrica [%]	Gás natural [kWh/ano]	Gás natural [%]
Com chillers ar-água	-10	-0.002%	-823	-0.47%
Com chillers água-água	-3647	-0.60%	-823	-0.47%

De acordo com a figura 35, o tempo de resposta, para o dia mais frio do ano (31 de Janeiro), foi de 2h45min, que representa um aumento de 1h15min (+ 83%) em relação ao cenário 1.

O tempo de resposta para o dia mais quente do ano (23 de Julho) foi de igual ao do cenário 1 (30 min) e segue a mesma evolução diária representada na figura 30.

Figura 35 – Tempo de resposta do *Corpo H* com a limitação da potência térmica nas caldeiras: Cenário 2

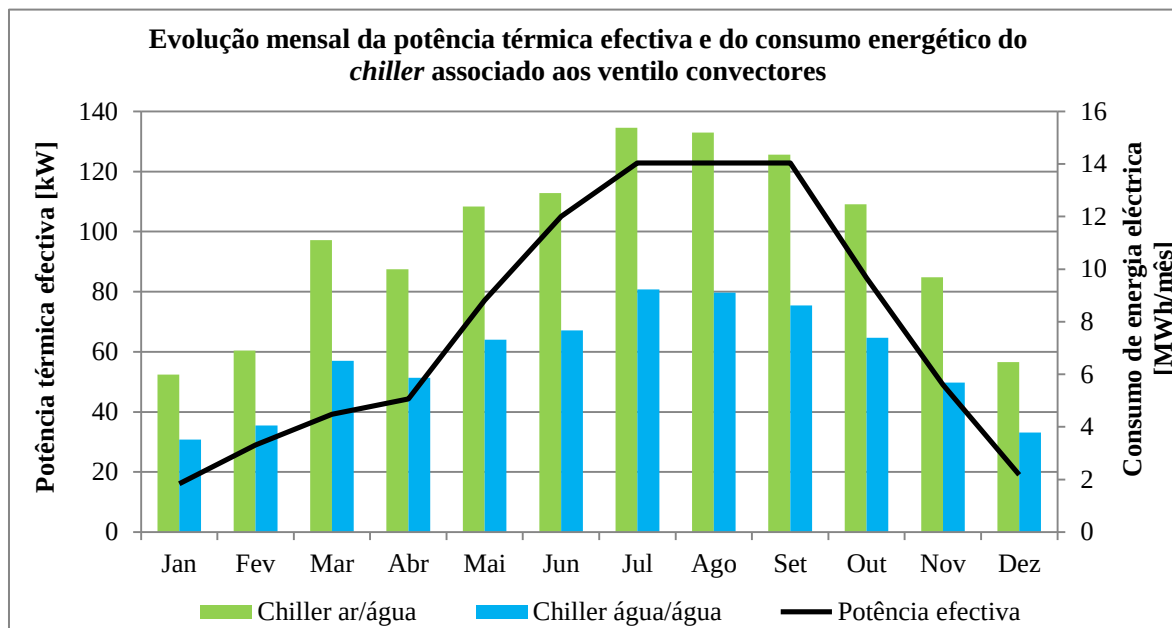
Cenário 3)

Figura 36 – Evolução mensal da potência térmica efectiva e do consumo de energia eléctrica do *chiller* associado aos ventilo convectores. Soluções com *chiller* ar-água ou com *chiller* água-água: Cenário 3

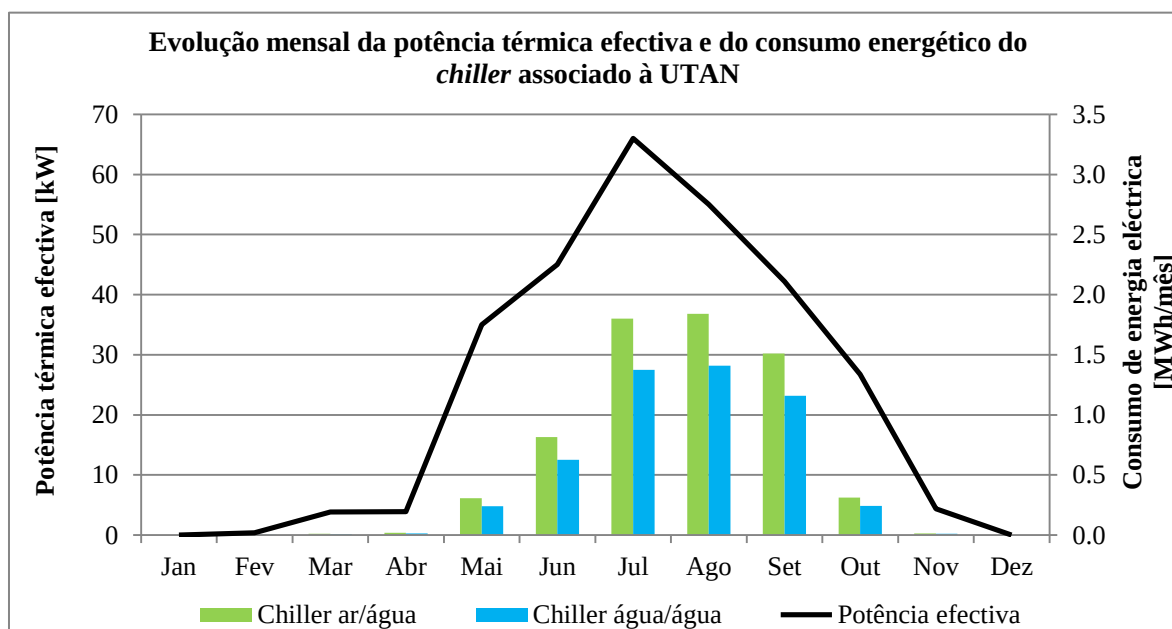


Figura 37 – Evolução mensal da potência térmica efectiva e do consumo de energia eléctrica do *chiller* associado à UTAN. Soluções com *chiller* ar-água ou com *chiller* água-água: Cenário 3

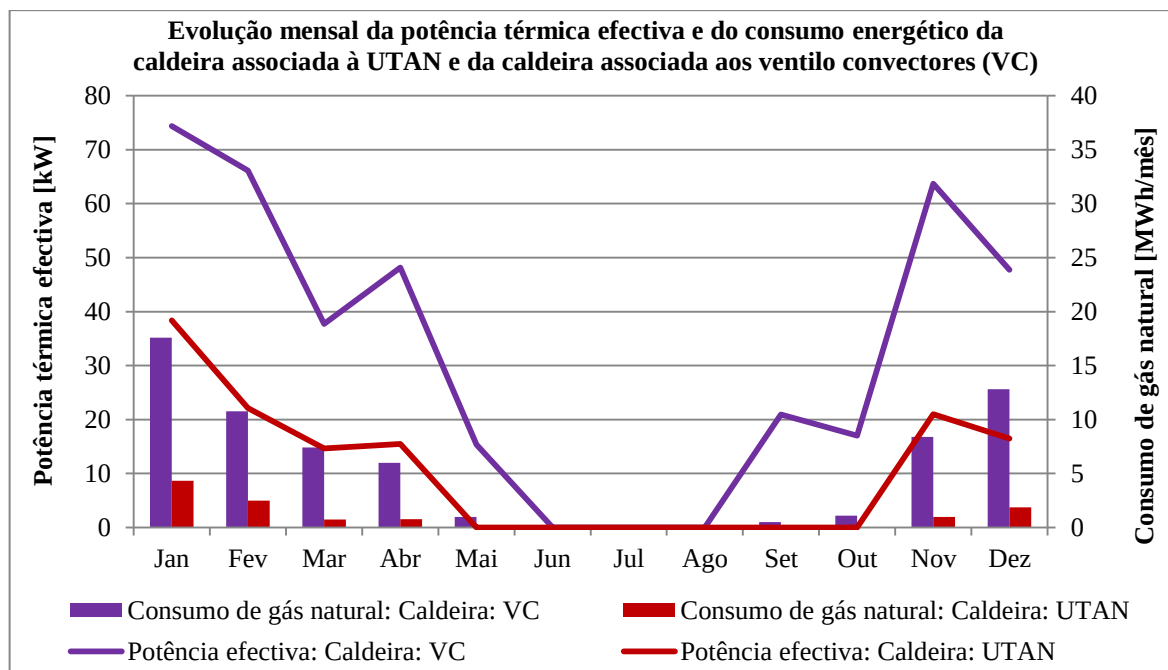


Figura 38 – Evolução mensal da potência térmica efectiva e do consumo de gás natural, da caldeira associada à UTAN e da caldeira associada aos ventilo convectores: Cenário 3

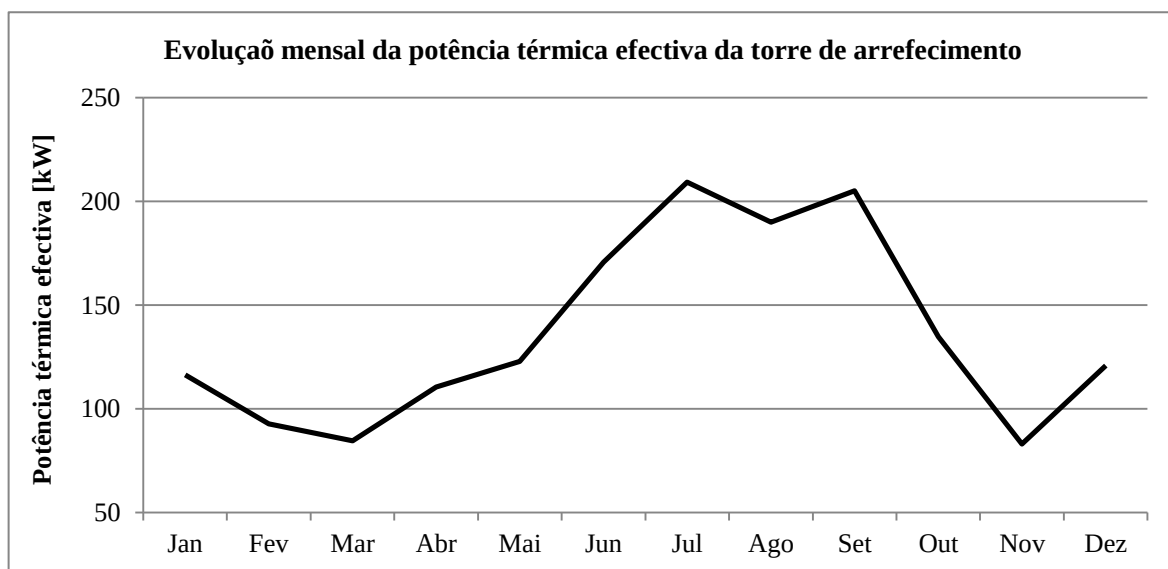


Figura 39 – Evolução mensal da potência térmica efectiva da torre de arrefecimento: Cenário 3

Tabela 19 – Potência térmica efectiva dos equipamentos “produtores” de energia térmica das centrais térmicas:
Cenário 3

Componente	Potência térmica efectiva [kW]
Caldeira: ventilo convectores	74
Caldeira: UTAN	38
Chiller: ventilo convectores	123
Chiller: UTAN	65
Torre de arrefecimento	209

Tabela 20 – Consumos e custos energéticos anuais do *Corpo H*, referente à utilização de potências térmicas nominais nos parâmetros da simulação dinâmica: Cenário 3

Com as potências térmicas nominais	Central de frio com chillers ar-água		Central de frio com chillers água-água	
	Energia eléctrica [MWh/ano]	Gás Natural [MWh/ano]	Energia eléctrica [MWh/ano]	Gás Natural [MWh/ano]
Caldeira	-	76.9	-	76.9
Chiller	140.0	-	84.4	-
Iluminação artificial	208.5	-	208.5	-
Equipamento interior	142.2	-	142.2	-
Ventiladores	136.8	-	136.8	-
Bombas hidráulicas	3.6	-	24.2	-
Torre de arrefecimento	-	-	19.2	-
Água quente	-	38.8	-	38.8
Total [MWh/ano] =	631.0	115.7	615.3	115.7
Custo [€/ano] =	77 933 €	8 382 €	75 984 €	8 382 €
Custo total [€/ano] =	86 314 €		84 366 €	

Tabela 21 – Consumos e custos energéticos anuais do *Corpo H*, referente à utilização de potências térmicas efectivas nos parâmetros da simulação dinâmica: Cenário 3

Com as potências térmicas efectivas	Central de frio com chillers ar-água		Central de frio com chillers água-água	
	Energia eléctrica [MWh/ano]	Gás Natural [MWh/ano]	Energia eléctrica [MWh/ano]	Gás Natural [MWh/ano]
Caldeira	-	76.5	-	76.5
Chiller	140.0	-	84.3	-
Iluminação artificial	208.5	-	208.5	-
Equipamento interior	142.2	-	142.2	-
Ventiladores	136.8	-	136.8	-
Bombas hidráulicas	3.6	-	20.9	-
Torre de arrefecimento	-	-	16.2	-
Água quente	-	38.8	-	38.8
Total [MWh/ano] =	631.0	115.3	608.9	115.3
Custo [€/ano] =	77 926 €	8 368 €	75 201 €	8 368 €
Custo total [€/ano] =	86 295 €		83 569 €	

Tabela 22 – Influência da limitação das potências térmica nos equipamentos “produtores” de energia térmica, em relação ao consumo energético anual do *Corpo H*: Cenário 3

Tipo de central de frio	Energia eléctrica [kWh/ano]	Energia eléctrica [%]	Gás natural [kWh/ano]	Gás natural [%]
Com chillers ar-água	-52	-0.01%	-338	-0.29%
Com chillers água-água	-6346	-1.03%	-338	-0.29%

De acordo com a figura 40, o tempo de resposta, para o dia mais frio do ano (31 de Janeiro), foi de 1h30min, que representa um aumento de 1h30min (+ 100%) em relação ao cenário 1.

O tempo de resposta para o dia mais quente do ano (23 de Julho) foi de igual ao do cenário 1 (30 min) e segue a mesma evolução diária representada na figura 30.

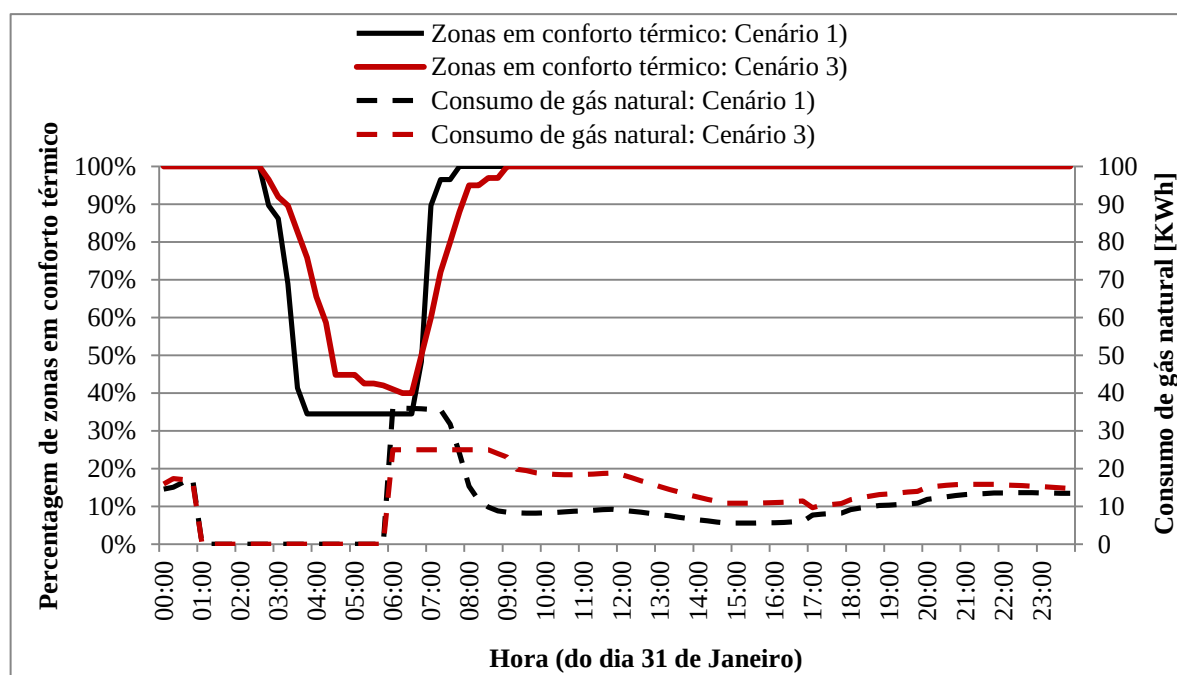


Figura 40 – Tempo de resposta do *Corpo H* com a limitação da potência térmica nas caldeiras: Cenário 3

Cenário 4)

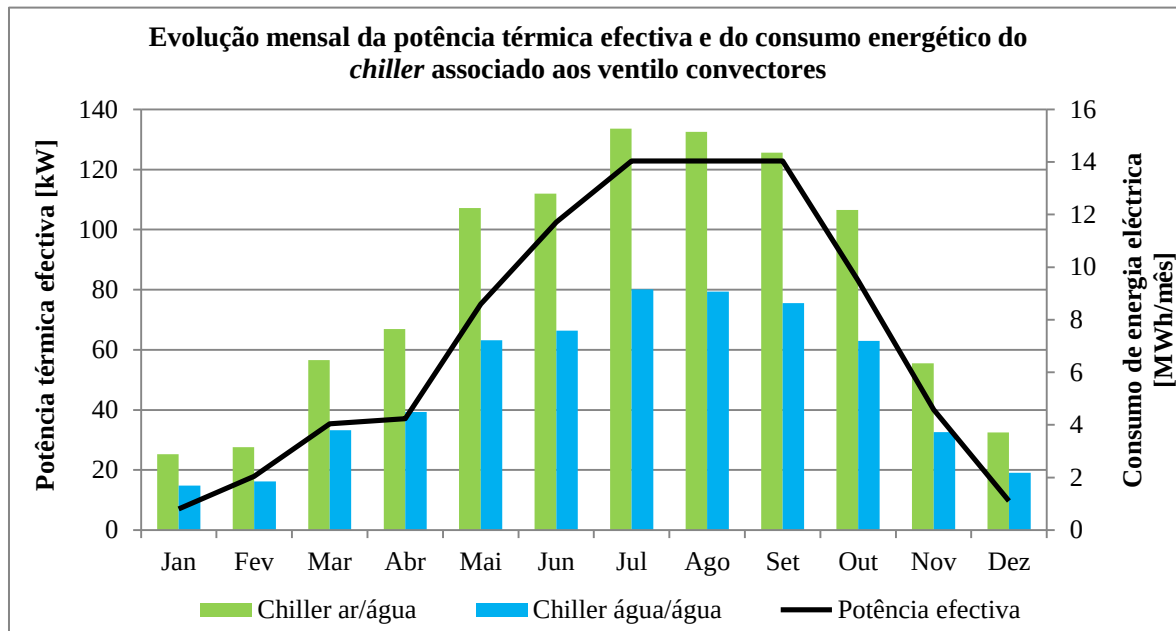


Figura 41 – Evolução mensal da potência térmica efectiva e do consumo de energia eléctrica do *chiller* associado aos ventilo convectores. Soluções com *chiller* ar-água ou com *chiller* água-água: Cenário 4

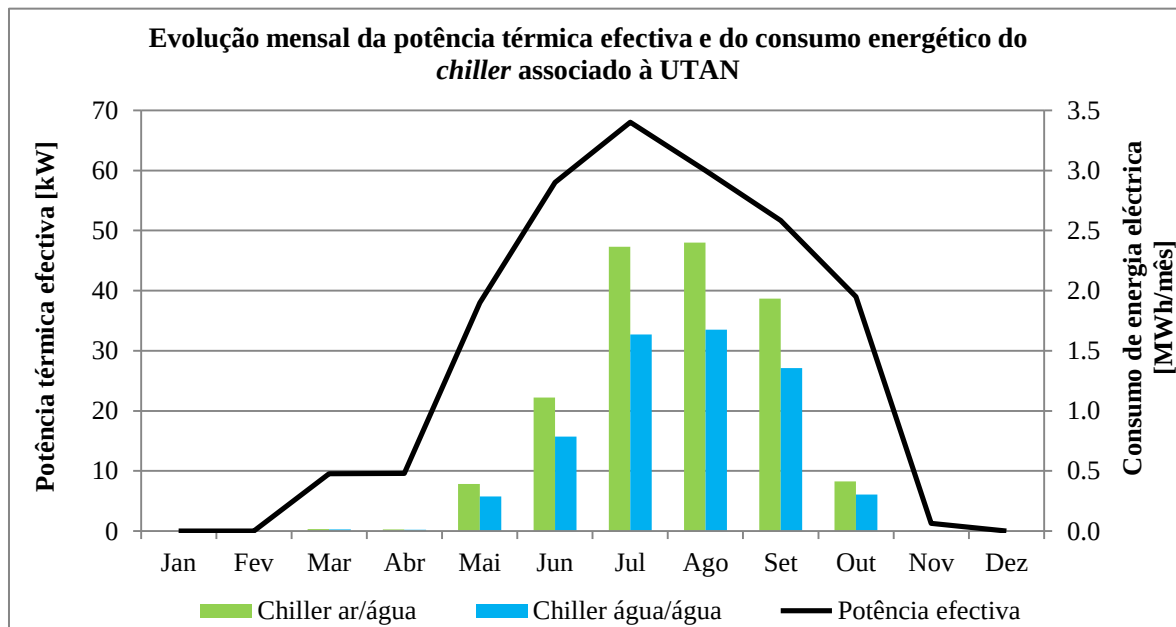


Figura 42 – Evolução mensal da potência térmica efectiva e do consumo de energia eléctrica do *chiller* associado à UTAN. Soluções com *chiller* ar-água ou com *chiller* água-água: Cenário 4

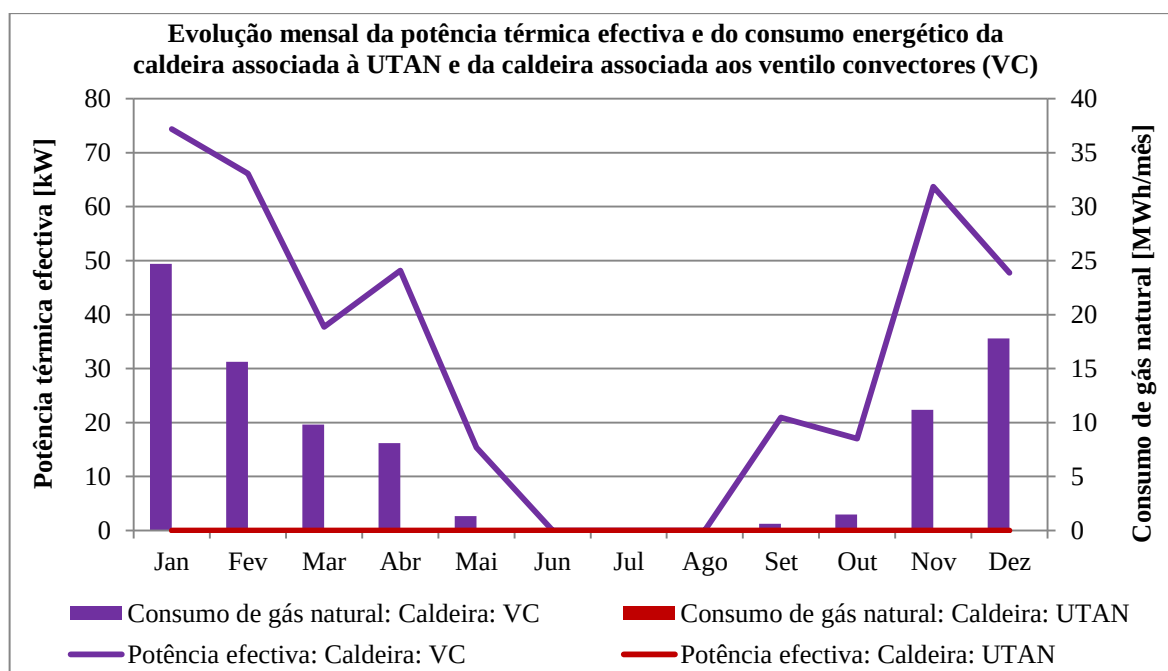


Figura 43 – Evolução mensal da potência térmica efectiva e do consumo de gás natural, da caldeira associada à UTAN e da caldeira associada aos ventilo convectores: Cenário 4

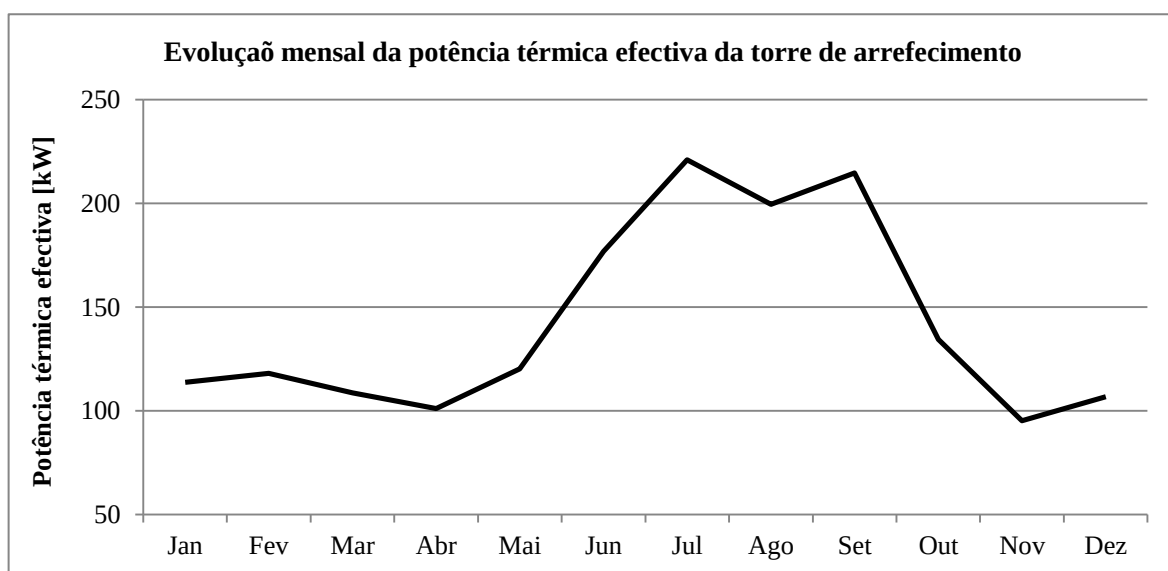


Figura 44 – Evolução mensal da potência térmica efectiva da torre de arrefecimento: Cenário 4

Tabela 23 – Potência térmica efectiva dos equipamentos “produtores” de energia térmica das centrais térmicas:

Cenário 4

Componente	Potência térmica efectiva [kW]
Caldeira: ventilo convectoros	74
Caldeira: UTAN	0
Chiller: ventilo convectoros	123
Chiller: UTAN	68
Torre de arrefecimento	221

Tabela 24 – Consumos e custos energéticos anuais do *Corpo H*, referente à utilização de potências térmicas nominais nos parâmetros da simulação dinâmica: Cenário 4

Com as potências térmicas nominais	Central de frio com chillers ar-água		Central de frio com chillers água-água	
	Energia eléctrica [MWh/ano]	Gás Natural [MWh/ano]	Energia eléctrica [MWh/ano]	Gás Natural [MWh/ano]
Caldeira	-	90.4	-	90.9
Chiller	118.9	-	72.7	-
Iluminação artificial	208.5	-	208.5	-
Equipamento interior	142.2	-	142.2	-
Ventiladores	136.8	-	136.8	-
Bombas hidráulicas	6.5	-	24.0	-
Torre de arrefecimento	-	-	16.6	-
Água quente	-	29.0	-	29.0
Total [MWh/ano] =	612.9	119.4	600.7	119.9
Custo [€/ano] =	75 693 €	8 529 €	74 180 €	8 547 €
Custo total [€/ano] =	84 222 €		82 727 €	

Tabela 25 – Consumos e custos energéticos anuais do *Corpo H*, referente à utilização de potências térmicas efectivas nos parâmetros da simulação dinâmica: Cenário 4

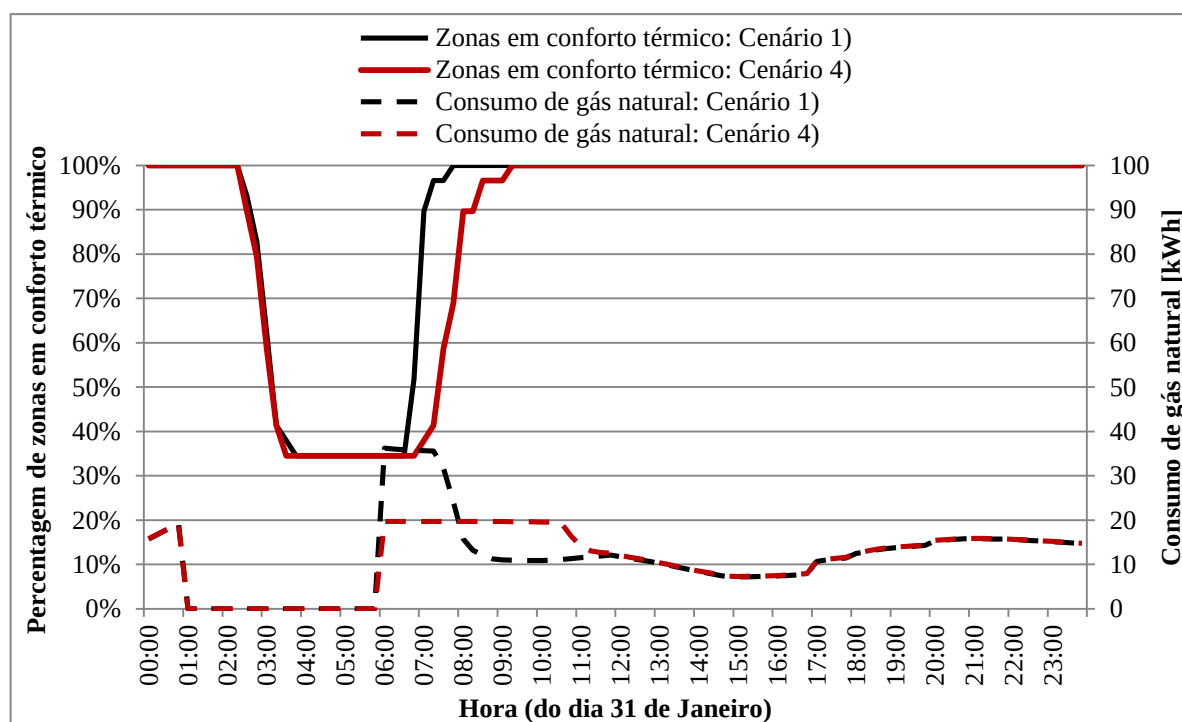
Com as potências térmicas efectivas	Central de frio com chillers ar-água		Central de frio com chillers água-água	
	Energia eléctrica [MWh/ano]	Gás Natural [MWh/ano]	Energia eléctrica [MWh/ano]	Gás Natural [MWh/ano]
Caldeira	-	90.3	-	90.7
Chiller	118.8	-	72.5	-
Iluminação artificial	208.5	-	208.5	-
Equipamento interior	142.2	-	142.2	-
Ventiladores	136.8	-	136.8	-
Bombas hidráulicas	6.5	-	24.0	-
Torre de arrefecimento	-	-	16.6	-
Água quente	-	29.0	-	29.0
Total [MWh/ano]=	612.8	119.3	600.5	119.7
Custo [€/ano] =	75 681 €	8 525 €	74 160 €	8 543 €
Custo total [€/ano] =	84 206 €		82 703 €	

Tabela 26 – Influência da limitação das potências térmica nos equipamentos “produtores” de energia térmica, em relação ao consumo energético anual do *Corpo H*: Cenário 4

Tipo de central de frio	Energia eléctrica [kWh/ano]	Energia eléctrica [%]	Gás natural [kWh/ano]	Gás natural [%]
Com chillers ar-água	-51	-0.01%	-109	-0.09%
Com chillers água-água	-162	-0.03%	-110	-0.09%

De acordo com a figura 45, o tempo de resposta para o dia mais frio do ano (31 de Janeiro), foi de 3h15min, que representa um aumento de 1h45min (+ 117%) em relação ao cenário 1.

O tempo de resposta para o dia mais quente do ano (23 de Julho) foi igual ao do cenário 1 (30 min) e segue a mesma evolução diária representada na figura 30.

Figura 45 – Tempo de resposta do *Corpo H* com a limitação da potência térmica nas caldeiras: Cenário 4

ANEXO D: Custos de primeiro investimento

Na tabela 27 apresentam-se os custos de primeiro investimento para cada cenário. As tabelas seguintes, deste anexo, indicam em detalhe o custo de cada equipamento. Os valores apresentados não incluem IVA.

Tabela 27 – Custo de primeiro investimento para cada cenário

Cenário	Custo de primeiro investimento	
	Com a <i>chillers</i> ar-água na central de frio	Com a <i>chillers</i> água-água na central de frio
1)	157 150 €	168 950 €
2)	160 650 €	172 850 €
3)	159 750 €	171 950 €
4)	181 520 €	192 630 €
5)	180 530 €	191 930 €

Caldeiras

Na tabela 28 apresentam-se os preços das caldeiras, da empresa *Buderus* [15], para o dimensionamento realizado com base na potência térmica nominal e na potência térmica efectiva das diversas soluções de recuperação térmica implementadas.

Tabela 28 – Preço das caldeiras

Modelo	Potência térmica útil [kW]	Preço
Logano GE315	210	7 600 €
Logano G334 XZ	140	5 800 €
	120	5 600 €
	100	5 100 €
	80	4 800 €

Chillers

Os preços dos *chillers* ar/água e água/água, com e sem recuperação de calor, da empresa *Daikin* [26], são apresentados na tabela 29.

Tabela 29 – Preço dos *chillers* tipo ar/água e tipo água/água, com e sem recuperação de calor

Tipo	Potência térmica [kW]	Modelo	Recuperação térmica	Preço
ar/água	170	<i>EWTP170MBYNN</i>	Sim	43 800 €
		<i>EWAP170MBYNN</i>	Não	36 000 €
	200	<i>EWTP200MBYNN</i>	Sim	51 400 €
		<i>EWAP200MBYNN</i>	Não	42 600 €
água/água	170	<i>EWWD-G-SS</i>	Sim	42 200 €
			Não	35 200 €
	210		Sim	49 500 €
			Não	41 400 €

Unidades de tratamento de ar

Os preços das unidades de tratamento de ar novo, para cada tipo de solução de recuperação térmica, são apresentados na tabela 30. Os preços foram obtidos da empresa *Systemair*, para o modelo *Danvent DV50* (higiênica).

Tabela 30 – Preço das unidades de tratamento de ar com diversas soluções de recuperação térmica

Unidade de tratamento de ar	Preço
UTAN sem recuperações de calor	21 500 €
UTAN com permutador de calor de fluxos cruzados	33 400 €
UTAN com roda térmica	32 700 €

Ventilo convectores

Na tabela 31 apresentam-se os preços dos ventilo convectores e respectivas quantidades necessárias para as zonas climatizadas do *Corpo H*, da empresa *Ciat* [16].

Tabela 31 – Preço e quantidades de ventilo convectores necessários para o *Corpo H*

Modelo	Preço unidade	Quantidade
<i>MJLINE 204x</i>	600 €	11
<i>MJLINE 304x</i>	650 €	21
<i>MJLINE 404x</i>	700 €	37
<i>MJLINE 504x</i>	800 €	13
<i>MJLINE 604x</i>	850 €	34
Total		
85 450 €		

Baterias de reaquecimento terminal

Na tabela 32 apresentam-se as quantidades e o custo associado às baterias de reaquecimento terminal, da empresa *Systemair*, que são utilizadas no caso de se optar pela recuperação de calor no condensador do *chiller*.

Tabela 32 – Preço e quantidades de baterias de reaquecimento terminal

Modelo	Potência [kW]	Preço unidade	Quantidade
<i>VBC 100-3</i>	1,5	330 €	3
<i>VBC 125-3</i>	1,9	370 €	3
<i>VBC 160-3</i>	4,1	380 €	1
<i>VBC 315-3</i>	14,6	700 €	2
Total de potência a instalar [kW]		Total preço	
22,1		3 880 €	

Depósito de acumulação de água quente

Empresa: *Buderus*

Modelo: *Logalux ER*

Capacidade: 500 litros

Preço: 2 000 €

Bombas de circulação

Os custos com as bombas hidráulicas adicionais, para o sistema com a solução de recuperação térmica nos condensadores dos *chillers*, apresentam-se na tabela 33. As bombas são da empresa *Grundfos* e são do tipo *rotor duplo com caudal variável*.

Tabela 33 – Preço das bombas hidráulicas adicionais

Bomba hidráulica	Modelo	Preço
Recuperação no condensador	TPED 50-160/2-S	4 200 €
Distribuição a baterias de reaquecimento	TPED 32-150/2-S	3 700 €
Preço total		7 900 €

Torre de arrefecimento

A diminuição da potência aquando do dimensionamento é realizada com base na potência térmica efectiva, não é suficiente para a escolha de uma torre de arrefecimento com menor potência térmica, do que a obtida com os resultados do modo de “auto-dimensionamento” (potência térmica nominal), por indisponibilidade no mercado. Assim sendo, optou-se pela seguinte torre de arrefecimento que está associada a todos os cenários:

Empresa: *Trane*

Modelo: *AT-14-66*

Potência: 250 kW

Preço: 13 000 €