

Análise de Programas de Cálculo de Consumo de Energia em Edifícios

Patrício Daniel Vinha Ribeiro

Relatório do Projecto Final / Dissertação do MIEM

Orientadores na Edifícios Saudáveis: Eng.º Ricardo Sá

Orientadores na FEUP: Prof. Armando Oliveira



FEUP

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**

Julho 2008

Aos meus pais e à minha namorada por
me terem ajudado neste percurso...

Resumo

Este trabalho foi realizado no âmbito da cadeira de Projecto do Mestrado Integrado de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e decorreu em ambiente empresarial, concretamente na Edifícios Saudáveis. O seu objectivo consiste na comparação de dois softwares de simulação térmica dinâmica detalhada de edifícios: TRACE 700 e Energy Plus.

Desta forma foi definido um edifício de raiz (área: 3445 m²) para aplicação dos referidos programas de simulação – Caso de Estudo. Apesar de não ser o objectivo principal, a definição do edifício teve em conta recomendações da ASHRAE conducentes a uma maior eficiência energética.

Numa primeira abordagem, os resultados (necessidades térmicas) mostraram fortes discrepâncias, o que impôs a necessidade de uma análise exaustiva de ambos os programas. Dada a elevada complexidade do Caso de Estudo, optou-se por utilizar modelos mais simples, nomeadamente alguns dos que constam na norma de acreditação dos programas de simulação detalhada, a ASRHAE 140-2004.

Desta análise apuraram-se algumas diferenças ao nível da modelação dos fenómenos da transferência de calor. O de maior impacto tem a ver com a definição do coeficiente de convecção exterior. Também foi possível concluir que o TRACE 700 apresenta resultados sistematicamente superiores aos referenciados na norma para outros programas, nas necessidades de arrefecimento.

Por fim, tendo em atenção as conclusões anteriores, repetiram-se as simulações no Caso de Estudo, impondo agora, no TRACE 700, uma metodologia de cálculo dos coeficientes de convecção exteriores que permitiu a obtenção de resultados menos díspares: nas necessidades de aquecimento a diferença é de 2% mas para as de arrefecimento sobe para os 45%. Apesar desta diferença, em favor do TRACE 700 jogam factores como a simplicidade e a interface amigável, de que resulta uma rápida e relativamente fácil aprendizagem, quando comparado com o Energy Plus.

Em jeito de conclusão, pode-se afirmar que o Energy Plus é uma ferramenta de maior complexidade, especialmente indicada para situações que exijam maior rigor e informação sobre variáveis específicas. O TRACE 700 é útil quando basta uma análise mais simplista e que requiera menos "outputs" específicos.

Abstract

This work was performed under the scope of the final project conducting to Master degree on Mechanical Engineering, conceded by the Faculty of Engineering of the University of Porto. It was conducted in an Energy and Environment company called Edifícios Saudáveis. The purpose of the work is the comparison between two detailed thermal simulation softwares: TRACE 700 and Energy Plus.

Thus, for application of the softwares, a building was defined (area of 3445 m²) - Case Study. Although it was not the main objective, the definition of the building took into account recommendations of ASHRAE leading to a higher energy efficiency.

On a first analysis, the results (thermal needs) presented great discrepancies between both softwares, which imposed the need for a comprehensive analysis. Given the high complexity of the Case Study it was decided to use simpler models, including those proposed in the standard accreditation for detailed simulation softwares, ASHRAE 140-2004.

Differences in the modelling of heat transfer phenomena were detected. Definition of the external convection coefficient is the parameter with the most impact. It was also possible to conclude that TRACE 700 presents higher thermal needs for cooling than those referenced in the ASHRAE standard.

Finally, taking into account the conclusions above, simulations of the Case Study were repeated, imposing a methodology for calculating the external convection coefficients that allowed reducing the asymmetrical results of TRACE 700: the difference between heating needs is 2% but for cooling needs rises up to 45%. Despite this difference, TRACE 700 has advantages such as simplicity and user-friendliness, resulting in a quick and relatively easy to learn software, compared to Energy Plus.

One can say that Energy Plus is a tool with greater complexity, especially suitable for situations requiring greater accuracy and information on specific variables. TRACE 700 is more useful when a more simplistic approach and less specific outputs are required.

Agradecimento

Ao professor Armando Oliveira agradeço a oportunidade da realização e a orientação deste trabalho.

Uma palavra de agradecimento à empresa Edifícios Saudáveis e a todos os seus colaboradores, em especial ao Eng.º Ricardo Sá e ao Eng.º Alexandre Varela.

Por último um agradecimento a todas as pessoas que contribuíram para execução deste trabalho, em particular ao Rui Almeida e ao Luís Teixeira.

Índice

RESUMO	V
ABSTRACT	VII
AGRADECIMENTO	IX
1. INTRODUÇÃO	3
Contexto	3
Actualidade	4
Objectivos	6
2. PROGRAMAS DE SIMULAÇÃO	7
2.1. ENERGY PLUS	7
2.2. TRACE 700	9
3. CASO DE ESTUDO	11
3.1. FORMA DO EDIFÍCIO	12
3.2. DEFINIÇÃO DA ENVOLVENTE	14
Parede Exterior	14
Parede Interior	15
Laje entre Pisos	15
Cobertura	16
Laje em contacto com o solo	16
3.2.1. Tipologia de envidraçados	17
Iluminação Natural	17
Ventilação Natural	17
3.2.2. Sombreamentos	18
3.2.3. Sistemas de climatização	19
3.3. CONDIÇÕES DE FUNCIONAMENTO	20
Ocupação	21
Iluminação	21
Equipamentos	22
4. COMPARAÇÃO ENTRE OS PROGRAMAS – CASO DE ESTUDO	23
4.1. VERIFICAÇÃO DA NORMA ASHRAE 140-2004	23
4.1.1. Informações comuns a todos os casos	24
4.1.1.1. Propriedades dos envidraçados	24
4.1.1.2. Ficheiro Climático	25

4.1.1.3.	Infiltrações	25
4.1.1.4.	Ganhos Internos	25
4.1.1.5.	Sistema de Climatização	26
4.1.2.	<i>Construção da envolvente de baixa densidade</i>	26
4.1.2.1.	Caso 600 – Construção de baixa densidade	28
4.1.2.2.	Caso 610 – Construção de baixa densidade	28
4.1.2.3.	Caso 620 – Construção de baixa densidade	29
4.1.2.4.	Caso 630 – Construção de baixa densidade	29
4.1.3.	<i>Construção da envolvente de alta densidade</i>	29
4.1.4.	<i>Notas sobre a modelação</i>	31
4.1.4.1.	TRACE 700	31
	Especificação dos materiais	31
	Coefficiente de convecção exterior	31
	Coefficiente de convecção interior	32
	Opções de cálculo	32
4.1.4.2.	Energy Plus	32
	Especificação dos materiais	32
	Coefficiente de convecção exterior e interior	32
	Opções de cálculo	32
4.2.	ANÁLISE AOS CASOS DE ESTUDOS DA ASHRAE 140-2004	33
4.2.1.	<i>Análise do ficheiro climático</i>	33
4.2.2.	<i>Análise dos Coeficientes de convecção</i>	36
4.3.	RESULTADOS DOS CASOS DE ESTUDOS DA ASHRAE 140-2004	39
5.	RESULTADOS	45
5.1.	COMPARAÇÃO DOS FICHEIROS CLIMÁTICOS DO PORTO	46
5.2.	CONTRIBUIÇÃO DA ENVOLVENTE PARA O ERRO FINAL	49
5.3.	ANÁLISE DO CALOR TROCADO POR RADIAÇÃO	51
5.4.	RESULTADOS FINAIS	54
6.	CONCLUSÕES	61

Abreviaturas e Acrónimos

AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado;

Dedicated AO- Ar exterior dedicado;

UTAN - Unidade de Tratamento de Ar Novo;

RCCTE - Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios;

RSECE – Regulamento de Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios

RPH – Renovações Por Hora

LT – “Lighting and Thermal method of design”

OS- “Open Space”

G- Gabinete

1. Introdução

Contexto

A gestão dos recursos de energia é hoje um dos principais desafios que, a nível mundial, a sociedade moderna enfrenta.

O desenvolvimento económico prevalente nas últimas décadas, tem-se caracterizado pela utilização muito intensa de energia produzida a partir de recursos de origem fóssil. A natureza finita desses recursos naturais, e o impacto ambiental da sua produção e consumo, alertaram o Mundo para a necessidade de mudança dessas premissas de suporte ao modelo de desenvolvimento.

Aliada a esta realidade surgiram ainda as evidências da globalização que hoje nos demonstram a interdependência de factores até há pouco olhados como independentes, tais como o acesso e a utilização de energia e o desenvolvimento económico, o combate à pobreza e as preocupações ambientais e climáticas, entre outros. Novos caminhos têm que ser encontrados para viabilizar a manutenção dos padrões de vida das sociedades desenvolvidas e as justas aspirações dos países em desenvolvimento, sem contudo comprometer o futuro das gerações vindouras.

A solução a este desafio passa pela procura de fontes alternativas de energias, com ênfase especial para as renováveis e pelo aumento de eficiência da utilização das energias disponíveis.

A maneira como utilizamos a energia de que dispomos é uma questão chave neste processo e por isso o aumento da eficiência energética de uma forma global é o caminho do desenvolvimento sustentável, isto é, produzindo mais com menos impacto, numa cultura de eco-eficiência, com os consequentes resultados positivos a nível económico, social e ambiental.

O conceito de desenvolvimento sustentável surgiu no final do século XX, pela constatação de que o desenvolvimento económico também tem que levar em conta o equilíbrio ecológico e a preservação da qualidade de vida das populações humanas a nível global. A ideia de desenvolvimento sustentável tem por base o princípio de que o Homem deve gastar os recursos naturais de acordo com a sua capacidade de renovação, de modo a evitar o seu esgotamento. Assim, entende-se por desenvolvimento sustentável aquele que atende às

necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras fazerem o mesmo [1].

Apresenta-se na Figura 1 uma representação simbólica da sustentabilidade a nível de gestão de recursos naturais.

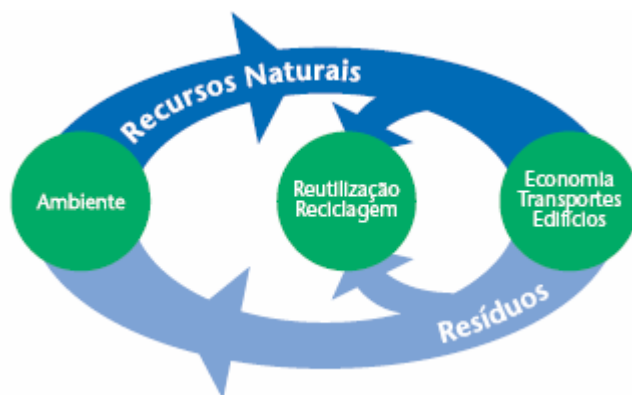


Figura 1 – Sustentabilidade: Gestão de Recursos [1]

Actualidade

O consumo de energia é dividido em três grandes grupos: Indústria, Transportes e Edifícios. Em 2004, estes três sectores foram responsáveis, respectivamente, por 27.9%, 31% e 36.3% da energia primária consumida em Portugal [2]. Devido à instalação de sistemas de climatização, o consumo de energia dos Edifícios tendo vindo a agravar-se: a taxa de crescimento média dos últimos anos ronda os 12% [3], muito acima do crescimento da economia nacional.

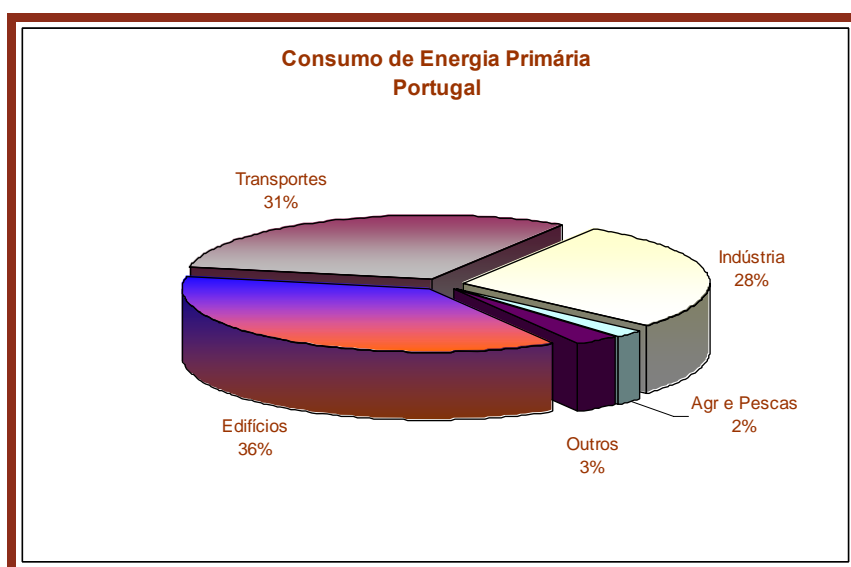


Figura 2 – Consumo de energia primária em Portugal (ano 2004).

Na sequência destas necessidades de aumento da eficiência energética surgiu a directiva europeia 2002/91/CE de 16 de Dezembro relativa ao desempenho energético dos edifícios, com o objectivo de promover a melhoria do desempenho energético dos edifícios na

Comunidade, tendo em conta as condições climáticas externas e as condições locais, bem como as exigências em matéria de clima interior e a rentabilidade económica.

Esta regulamentação foi parcialmente transcrita para a legislação nacional pelo Decreto-lei nº 78/2006 de 4 de Abril que aprova o Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE). O SCE é um dos três pilares sobre os quais assenta a nova legislação relativa à qualidade térmica dos edifícios em Portugal e que se pretende venha a proporcionar economias significativas de energia para o país em geral, e para os utilizadores dos edifícios em particular. Em conjunto com os regulamentos técnicos aplicáveis aos edifícios de habitação (RCCTE, DL 80/2006) e aos edifícios de serviços (RSECE, DL 79/2006), o SCE define regras e métodos para verificação da aplicação efectiva destes regulamentos às novas edificações, bem como, numa fase posterior, aos imóveis já construídos.

Nestas publicações foram definidos valores máximos de consumo energético para as diferentes tipologias de utilização, acima dos quais os edifícios não podem ser licenciados ou operar. Este valor é, no caso concreto dos novos edifícios de escritórios, de 35 kgep/(m².ano) e 40 kgep/(m².ano) para os existentes.

A simulação térmica detalhada, para além de obrigatória no âmbito regulamentar, é uma ferramenta indispensável no sentido do aumento da eficiência quer ao nível da optimização da potência dos equipamentos, quer ao nível do estudo e materialização de medidas de mitigação. É neste âmbito que surge a importância da simulação dinâmica detalhada do consumo de energia dos edifícios.

Objectivos

Existem vários programas de simulação dinâmica detalhada, no entanto, para muitos deles, é desconhecida a fiabilidade bem como outras vantagens e desvantagens específicas. Tendo em conta o interesse apresentado pela empresa em que decorreu este trabalho, procurou-se explorar as potencialidades e limitações do TRACE 700 [4] por comparação ao Energy Plus [5], que é tido como um programa de referência. Tentou-se assim determinar até que ponto, e em que situações específicas, se pode considerar o TRACE 700 como substituto plausível do Energy Plus. No capítulo 2 apresentam-se, sucintamente, estas duas ferramentas de cálculo.

Dada a necessidade de definição de um edifício para simular com ambos os programas optou-se pela utilização de algumas estratégias conducentes a uma melhor eficiência energética, com base em documentação própria. A definição do edifício encontra-se no capítulo 3.

No capítulo 4 são expostos alguns testes recomendados pela norma de acreditação de programas de simulação: ASHRAE 140-2004.

No capítulo 5 serão apresentados e relatados os resultados das simulações feitas ao caso de estudo desenvolvido para a execução deste trabalho, bem como alguns estudos feitos com base nas conclusões tiradas dos modelos de teste do capítulo 4.

2. Programas de Simulação

2.1. Energy Plus

O EnergyPlus é um programa de simulação energética em edifícios, vocacionado para a modelação de sistemas de aquecimento, arrefecimento, iluminação, ventilação e outros fluxos energéticos. Esta ferramenta gratuita surgiu com base em dois programas existentes, BLAST¹ e DOE-2, desenvolvidos pelo DOE² em colaboração com diversos investigadores de vários países tendo sido desenvolvido em código aberto.

Em relação a outras ferramentas disponíveis o EnergyPlus destaca-se pelo rigor na modelação da geometria do edifício (incluindo edifícios adjacentes), sistemas de AVAC, e pela possibilidade de integração de modelos que facilitam os estudos de optimização energética (iluminação natural e artificial com *dimmers*, sistemas de ventilação natural e híbrida, superfícies "radiantes", painéis solares, etc.). No entanto, deve referir-se que a introdução de novos módulos no código do programa é uma tarefa complexa, e que exige um elevado grau de formação por parte do utilizador.

O programa foi escrito em FORTRAN90. Uma das grandes vantagens desta linguagem é a sua capacidade de modularização das subrotinas. Esta organização em módulos permite que diferentes pesquisadores e programadores possam desenvolver seus blocos e subrotinas simultaneamente, sem interferir em outros módulos que estão sendo desenvolvidos e com uma necessidade limitada de conhecimento de toda a estrutura do programa.

Existem também módulos que foram desenvolvidos para permitir a interação entre o EnergyPlus e outros programas, como por exemplo o COMIS33, programa que analisa a distribuição dos caudais de ar no interior dos espaços e que será apresentado em seguida. Na figura seguinte [5] representa-se, esquematicamente, a ligação entre os diferentes programas e módulos, no que forma o código base do EnergyPlus.

¹ Building Loads Analysis and System Thermodynamics

² Department of Energy

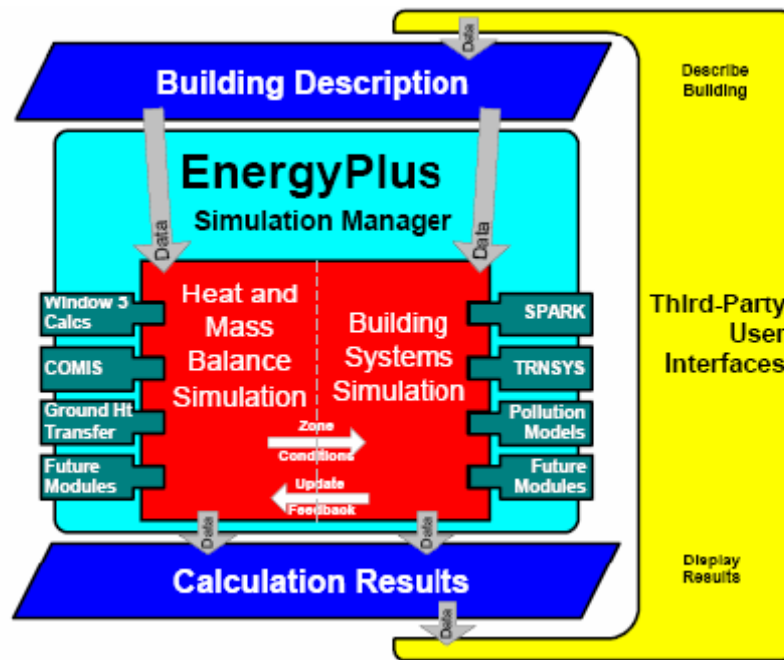


Figura 3 – Esquema de princípio do Energy Plus.

O EnergyPlus surge da necessidade de criar um sistema de simulação integrada, ou seja, sistema e necessidades energéticas em simultâneo para cada intervalo de tempo. Para esse efeito, foram desenvolvidos dois módulos, um que diz respeito ao edifício, e o cálculo das potências máximas dos equipamentos a instalar nos espaços, e outro para a definição dos sistemas. Esta integração permite a obtenção das temperaturas das zonas mais precisas e próximos dos casos reais, o que é fundamental para o correcto dimensionamento de sistemas, análise de conforto e de QAI³.

O programa utiliza modelos detalhados de:

- Transferências radiativas e convectivas em superfícies exteriores e interiores;
- Sistemas de AVAC (elevada flexibilidade);
- Trocas de calor com o terreno de implantação;
- Transferência de massa (absorção/adsorção de humidade, produção no interior);
- Conforto térmico dos ocupantes;
- Modelo de “céu” anisotrópico (determinação da radiação e temperatura do céu, entre outros);
- simulação de sistemas de iluminação natural e híbridos (controle automático);
- Simulação de Ventilação por Deslocamento (DCV);
- Simulação de temperaturas e caudais de ventilação natural (COMIS).

Trata-se de um *software* autónomo com o inconveniente de ainda não possuir uma interface gráfica que facilite a sua utilização. No entanto, os “*Inputs*” e “*Outputs*” são

³ Qualidade do Ar Interior

documentos de texto apresentados na forma ASCII⁴ que permite a importação e exportação de dados entre outros *softwares*, nomeadamente Google SketchUp, DesignBuilder, Ecotec, SPR, entre outros.

O EnergyPlus necessita de uma série de dados de entrada, os quais descrevem o edifício sob análise, e de dados climáticos da localidade na qual ele se encontra. Após a realização da simulação, o programa produz até 23 arquivos de saída. A interpretação destes arquivos não é simples, sendo que eles precisam passar por uma análise ou serem arranjados por um outro programa de interface mais amigável, para que os resultados da simulação tenham algum sentido.

Relativamente aos métodos de cálculo utilizados, existem três métodos distintos que podem ser utilizados, CTF, EMPD⁵ e CondFD⁶.

O CTF apenas contabiliza trocas de calor sensíveis, e não tem em consideração o armazenamento e a difusividade de humidade dos elementos construtivos. O EMPD considera a difusividade de calor sensível e a humidade armazenada nas superfícies interiores, o que implica uma necessidade adicional de informações específicas dos materiais para este caso. O CondFD só tem conta trocas de calor sensível e não tem em consideração o armazenamento e a difusividade de humidade nos elementos construtivos. Esta solução aplica um método unidimensional de diferenças finitas aos elementos da envolvente [6].

2.2. Trace 700

O TRACE 700 é um programa de cálculo de carga térmica e de análise económico-energética, desenvolvido pelo grupo C.D.S., da empresa “*TRANE Company*”. Ao contrário do EnergyPlus, este software não é gratuito, necessitando de uma licença paga para instalação. É um programa de interface amigável, sendo de fácil interacção com o utilizador. A entrada de dados é feita através do “*ProjectNavigator*”, uma das três formas de visualizar o programa.

No TRACE 700 é possível inserir e alterar detalhes da construção e mudar o modelo em estudo a qualquer momento durante o projecto do sistema de climatização. É possível fazer a modelação do sistema com várias opções de equipamentos, também permite uma análise do custo energético e do tempo de retorno de investimento de cada modelo, ajudando a optar pela opção mais viável. Este *software* possibilita criar até quatro opções de modelos diferentes para estudar o melhor resultado. No programa existem extensas bibliotecas com informações de materiais de construção, arranjos construtivos, cargas internas (pessoas e equipamentos), programação (*schedule*) de funcionamento do edifício e equipamentos de climatização, bem como uma variedade de dados climáticos com 448 localidades, incluindo o Porto. Apesar da diversidade de materiais existentes na biblioteca de elementos construtivos, eles são mais comuns nos Estados Unidos, sendo necessária a inserção de materiais adequados à realidade Portuguesa.

A biblioteca de dados climáticos do TRACE 700 é baseada nos dados de frequência acumulada de 2.5% da ASHRAE, o que significa que durante 219 horas das 8760 do ano, determinado dado climático ficou acima daquele especificado.

4 American Standard Code for Information Interchange

5 Effective Mean Penetration Depth

6 Conduction Finite Difference

Metodologia de cálculo do TRACE 700

No TRACE 700 é possível utilizar tanto o método CLTD/CLF⁷ como o TETD/TA⁸. Porém o TRACE 700 não utiliza dados tabelados para o método CLTD/CLF para o cálculo de carga térmica, como normalmente é feito quando se utiliza este método. Normalmente o método CLTD/CLF é utilizado para cálculos manuais, utilizando casos construtivos tabelados. No TRACE 700, o método CLTD/CLF é realizado baseado nas equações utilizadas para gerar as tabelas deste método, ou seja, quando o programa se refere ao método CLTD/CLF, quer dizer que utilizou o método TFM⁹ para gerar os dados a aplicar na metodologia CLTD/CLF.

O método TETD/TA apresenta alguns problemas, uma vez que não existem dados publicados a respeito de quantas horas são necessárias para fazer a média temporal da porção radiante do ganho de calor. Normalmente o método TFM (método exacto das CLTD/CLF) utilizado pelo TRACE 700 calcula cargas térmicas até 30% menores (principalmente cargas solares) do que aquelas calculadas pelo método TETD.

Existem seis opções de metodologia de cálculo de carga térmica no TRACE 700. Na opção TETD-TA1 faz-se inicialmente o cálculo do ganho de calor baseado nas funções de transferência; a carga térmica do espaço é então calculada utilizando o método da média temporal (TA - *Time Averaging*).

A escolha da opção CLTD-CLF (ASHRAE TFM) [6] utiliza funções de transferência para o cálculo do ganho de calor e da carga térmica.

Na opção TETD-TA2 o ganho de calor é baseado no método aproximado de TETD's, o qual utiliza factores lambda e delta para descreverem características de amplitude e atraso da envolvente. O cálculo da carga térmica finaliza-se com a técnica da média temporal, como esta opção é menos exacta do que a TETD-TA1, recomenda-se que a opção TETD-TA2 seja utilizada apenas para fins de comparação, apesar de que esta simplificação faz dela uma opção mais rápida na sua fase de cálculo da carga térmica.

O TETD-PO, realiza o cálculo do ganho de calor através do método aproximado das TETD's, mas para a finalização do cálculo da carga térmica utilizam-se os factores de ponderação "*Post Office RMRG*", que foram anteriormente utilizados na versão original do TRACE 700.

A alternativa RP359 é baseada no projecto de pesquisa 359 da ASHRAE; o ganho de calor é baseado no método das funções de transferência, enquanto que a carga térmica é calculada com base nos coeficientes de transferência para cada espaço (factores de ponderação) gerados para combinações específicas de componentes de edifícios. Este método utiliza o mesmo algoritmo do método CLTD/CLF, o que muda são os coeficientes para os espaços utilizados para o cálculo da carga térmica.

Na última opção, CEC-DOE2, o método de cálculo de carga térmica duplica os factores ponderadores pré-calculados (PWF – *Precalculated Weighting Factors*) do programa de análise energética DOE2.1c, os cálculos são baseados nos factores da ASHRAE para construções leves, médias e pesadas.

7 Cooling and load temperature difference / cooling load factor

8 Total equivalent temperature difference / Time averaging

9 Conduction transfer function

3. Caso de Estudo

Por conveniência da empresa Edifícios Saudáveis, surgiu a ideia de “*construir*” um edifício eficiente do ponto de vista energético para utilizar na comparação dos softwares de simulação. A sua execução baseou-se em algumas publicações e estudos que relatam formas eficientes de combater o elevado consumo de energia por parte destes.

As estratégias a adoptar para a criação de edifícios sustentáveis, passam por um conjunto de regras ou medidas de carácter geral, destinadas a influenciar a forma do edifício, bem como os seus processos, sistemas e soluções construtivas. As estratégias a adoptar num determinado edifício ou projecto, deverão ser seleccionadas tendo em atenção a especificidade climática do local, a função do edifício e, conseqüentemente, o modo de ocupação e operação do mesmo, com o objectivo de promover um bom desempenho em termos de adaptação ao clima

No sentido de direccionar o estudo só vão ser considerados aspectos relacionados com a construção da envolvente e algumas técnicas de optimização dos sistemas de climatização. No entanto, seria também de enorme interesse a interacção com sistemas provenientes de fontes renováveis, nomeadamente, colectores solares térmicos, colectores fotovoltaicos, microgeração e microeólica.

Existem vários aspectos relevantes na construção de um edifício sustentável. Algumas das preocupações são:

- Geometria do edifício,
- Definição da envolvente,
- Utilização de iluminação natural e sombreadores,
- Promoção da Ventilação Natural,
- Utilização de equipamento de alto rendimento.

Seguidamente descreve-se em detalhe as opções tomadas na construção deste edifício.

3.1. Forma do edifício

Existem muitos factores que influenciam a escolha do tipo de geometria para um edifício. No entanto, no Caso de Estudo a iluminação (“*Daylighting*”) e ventilação naturais foram factores primordiais tidos em conta na escolha da forma do edifício.

Um edifício que na sua concepção tenha em conta o factor de forma exterior, pode vir a obter melhores resultados do ponto de vista de consumo energético do que outro que não o tenha. A construção de uma determinada área de edifício pode ser baseada em várias geometrias distintas, por exemplo, quadrada, alongada, cruzada, rés-do-chão, entre outras (ver figura seguinte). A escolha do tipo de sistema base para a construção tem efeito na área das respectivas paredes, o que pode representar uma maior ou menor quantidade de calor trocada com a envolvente. O aumento da área da envolvente tem impacto na quantidade de energia que se gasta para climatizar um espaço, ou seja, vão existir mais perdas de calor mas pode-se tirar maior proveito dos recursos naturais disponíveis, nomeadamente, luz e ventilação natural.

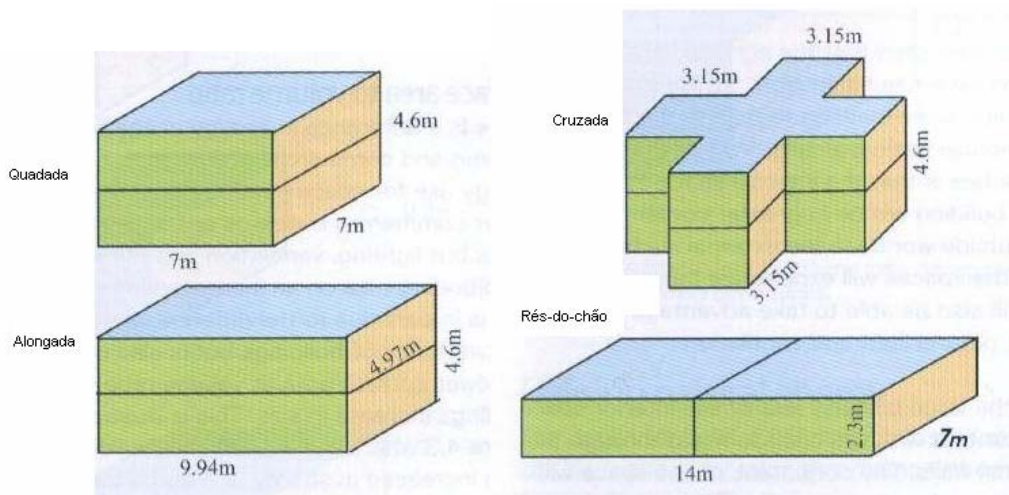


Figura 4 – Sistemas base de construção de um edifício.

Para a obtenção de uma solução de compromisso entre estas variáveis apresentadas, recorreu-se a um estudo existente [7]. Este estudo descreve o efeito da escolha dos diversos tipos de geometria no consumo de energia final do edifício.

Nesse estudo foi utilizado o método “*lighting and thermal method of design*” (LT), que consiste num processo de comparação da energia consumida entre diferentes formas de edifícios. Deste estudo resulta a conclusão que é possível reduzir a energia consumida em edifícios à custa de um aumento das zonas afectadas por iluminação e ventilação natural, chamadas zonas passivas, em contraponto da zona activa, que é frequentemente iluminada à custa de luz artificial (ver figura seguinte). Das diferentes geometrias estudadas, foi uma construção em “L” que apresentou um valor mais reduzido de consumo de energia por unidade de área.

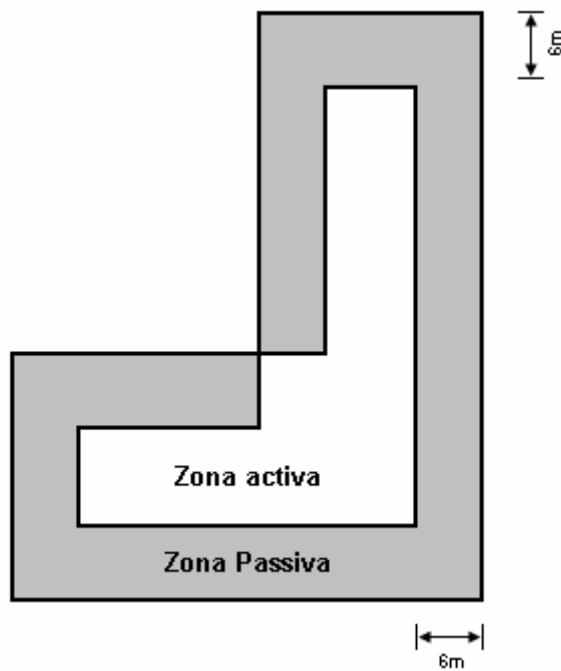


Figura 5 – Geometria otimizada.

Para tentar criar uma solução que promova também uma maior ventilação natural e tendo ainda em conta a existência de tipologias semelhantes no portfólio da empresa, a geometria escolhida para o modelo de teste deste relatório passou a ser um conjunto de quatro “L’s”, conforme se pode verificar na figura que se segue:

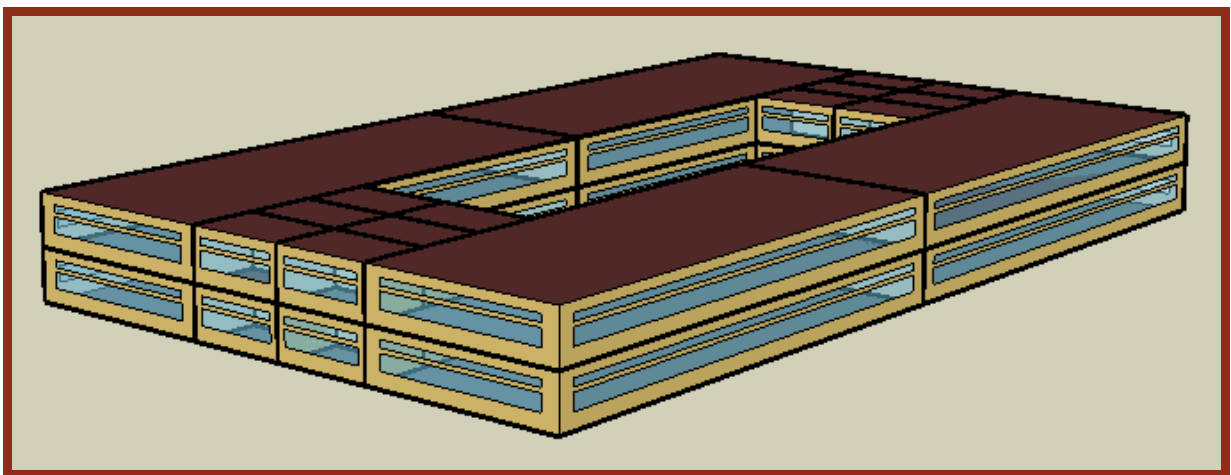


Figura 6 – Modelo de estudo.

O nome dado a cada uma das zonas foi feito com uma determinada lógica, para que sejam de fácil identificação. Na figura que segue encontram-se os nomes atribuídos às zonas do primeiro piso: estes são constituídos por letras no início que identificam a tipologia do local, seguidos de três números. O primeiro identifica o piso, o segundo a fracção e o terceiro o

local. Neste edifício foram consideradas duas tipologias distintas, “Open Space” (OS) e Gabinetes (G).

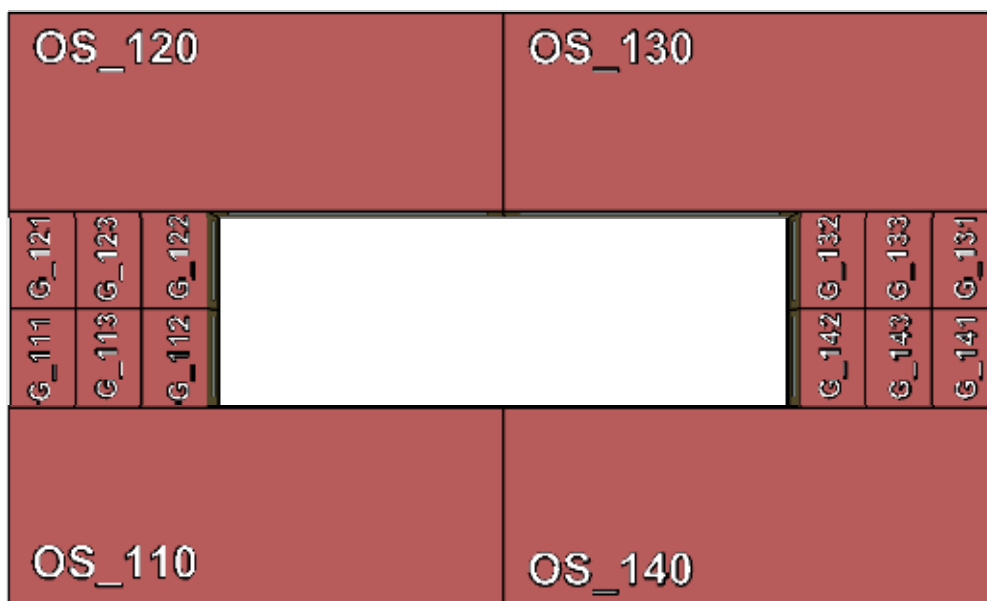


Figura 7 – Nome das diferentes zonas.

3.2. Definição da envolvente

A envolvente exterior do edifício – paredes, coberturas e pavimentos – delimitam o espaço interior do ambiente exterior. A envolvente interior, lajes entre pisos e paredes interiores, separam a fracção autónoma de ambientes por vezes não climatizados, tais como garagens ou armazéns, bem como de outras fracções autónomas adjacentes em edifícios vizinhos [8].

Grande parte da área da envolvente exterior dos edifícios corresponde à área das paredes exteriores – fachadas. É através das paredes exteriores que se processa grande parte das trocas térmicas entre o interior e o exterior, pelo que o estudo cuidadoso do comportamento térmico das soluções construtivas a adoptar na envolvente vertical, é fundamental para que se reduza o consumo de energia inerente ao espaço associado.

A construção escolhida para cada elemento da envolvente foi feita com base num estudo da ASHRAE [9] e tendo sempre em atenção os limites impostos pela legislação em vigor em Portugal (RCCTE). Neste estudo, foram definidas boas práticas de construção para pequenos edifícios de serviços:

Parede Exterior

A solução de referência escolhida para esta tipologia foi uma parede de betão com isolamento térmico do lado exterior (capoto). Na tabela que se segue podemos encontrar algumas das propriedades mais importantes da referida parede.

Tabela 1 – Propriedades da parede exterior.

	e [m]	λ [W/(m.°C)]	R [(m ² .°C)/W]	U [W/(m ² .°C)]	ρ_i [kg/m ³]	m_i [kg/m ²]	Msi Corrigidos [kg/m ²]
Resistência exterior	-	-	0.040	0.94	-	397.5	150
Reboco exterior delgado (cor clara)	0.008	1.8	0.004		2000		
Poliestireno extrudido	0.03	0.037	0.811		20		
Betão normal	0.15	2.00	0.075		2450		
Reboco interior	0.015	1.8	0.008		2000		
Resistência interior	-	-	0.130		-		

Parede Interior

A parede interior consiste num pano de alvenaria revestida com reboco de cimento em ambas as faces.

Tabela 2 – Propriedades das paredes interiores.

	e [m]	λ [W/(m.°C)]	R [(m ² .°C)/W]	U [W/(m ² .°C)]	ρ_i [kg/m ³]	m_i [kg/m ²]	Msi Corrigidos [kg/m ²]
Resistência exterior	-	-	0.130	2.24	-	180	90
Reboco interior 1	0.015	1.8	0.008		2000		
Pano de alvenaria de tijolo furado normal	0.07	0.41	0.170		1714		
Reboco interior 2	0.015	1.8	0.008		2000		
Resistência interior	-	-	0.130		-		

Laje entre Pisos

Tabela 3 – Propriedades da Laje entre pisos.

	e [m]	λ [W/(m.°C)]	R [(m ² .°C)/W]	U [W/(m ² .°C)]	ρ_i [kg/m ³]	m_i [kg/m ²]	Msi Corrigidos [kg/m ²]
Resistência exterior	-	-	0.100	1.71	-	738.4	150
Ladrilhos	0.008	0.13	0.062		-		
Piso técnico	0.3		0.16		2300		
Betonilha de Regularização	0.1	1.8	0.056		2000		
Laje de Betão	0.2	2	0.100		2450		
Reboco	0.015	1.8	0.008		2000		
Resistência interior	-	-	0.100		-		

Cobertura

	e [m]	λ [W/(m.°C)]	R [(m ² .°C)/W]	U [W/(m ² .°C)]	ρ_i [kg/m ³]	m_i [kg/m ²]	Msi Corrigidos [kg/m ²]
Resistência exterior	-	-	0.040	0.72	-	730	150
Godó médio	0.015	2	0.008		1950		
Poliestireno expandido	0.04	0.037	1.081		20		
Tela impermeabilizadora	0.001	0.7	0.001		2100		
Betonilha de Regularização	0.1	1.8	0.056		2000		
Laje de betão	0.2	2	0.100		2450		
Reboco interior	0.02	1.8	0.011		2000		
Resistência interior	-	-	0.100		-		

Laje em contacto com o solo

	e [m]	λ [W/(m.°C)]	R [(m ² .°C)/W]	U [W/(m ² .°C)]	ρ_i [kg/m ³]	m_i [kg/m ²]	Msi Corrigidos [kg/m ²]
Resistência exterior	-	-	0.100	1.73	-	710.5	150
Ladrilhos	0.008	0.13	0.062				
Piso técnico	0.3	-	0.16		2300		
Betonilha de Regularização	0.1	1.8	0.056		2000		
Laje de Betão	0.2	2	0.100		2450		
Tela impermeabilizadora	0.001	0.7	0.001		2100		
Resistência interior	-	-	0.100		-		

3.2.1. Tipologia de envidraçados

O sistema utilizado para definir os envidraçados foi de acordo com as recomendações da Ref. [9]. Dado que os envidraçados são os principais responsáveis pela quantidade de luz e ventilação natural do edifício, a dimensão das janelas é feita tendo em consideração estes factores.

Iluminação Natural

A iluminação artificial deve ser substituída sempre que possível por luz natural. A quantidade de luz natural que se consegue ter no interior do edifício é função do tipo de janelas usadas e da sua dimensão. Em geral é boa prática que os envidraçados sejam aproximadamente 40% da área da parede em que estão inseridas [9]. Com este valor consegue-se uma solução de compromisso entre a carga térmica e o ganho de luz natural pelo envidraçado. Esta solução consegue luz natural até cerca de 6 metros para o interior.

Ventilação Natural

Em edifícios de serviços, o consumo típico referente à ventilação mecânica assume cerca de 17% da energia total consumida [7]. No sentido de tentar reduzir esta fatia deve-se aproveitar sempre que possível a ventilação natural disponível. Face à geometria escolhida para o edifício, o método que mais se aplica é denominado por ventilação transversal [7] [10]. Neste método, uma quantidade de ar atravessa o edifício através de aberturas próprias, fomentadas pela diferença de pressão existente entre as fachadas. Com esta estratégia de ventilação a distância máxima entre paredes para que a ventilação tenha um bom desempenho é de cerca de 13 metros [7].

Para otimizar a quantidade de luz e ventilação natural, foram criadas nas fachadas da envolvente do edifício dois tipos de envidraçados. Na cota inferior situa-se a janela denominada por “Janela de visualização”, que consiste num tipo de janela vulgarmente utilizada nas construções da actualidade. Na cota superior, encontra-se a “Janela de luz natural”, conforme exemplificado na figura seguinte. Esta vai ser a principal responsável pela iluminação e ventilação natural.

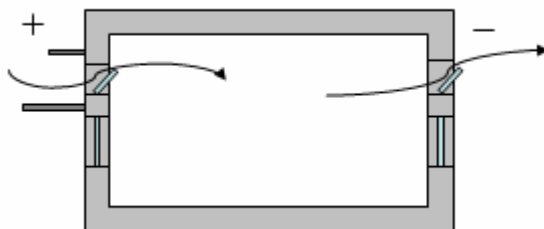


Figura 8 – Sistema de envidraçados no modelo de estudo.

Relativamente às propriedades dos vidros, segundo a Ref. [9], a quantidade de luz transmitida pela janela de luz natural deve estar compreendida entre 0.50 e 0.70, ao passo que a janela de visualização deve conter o factor solar entre 0.35 e 0.50. De acordo com estas recomendações as propriedades dos vidros escolhidos foram as seguintes:

Tabela 4 – Propriedades dos envidraçados.

Envidraçados	
Vidro Ext. PARSOL GREEN 6.0 mm	
Vidro Int. PLANILUX 4.0 mm	
Tipo	Duplo
Espessura	26.4 mm
Peso	35.4 kg/m ²
Factor UV	
Transmissão	1 %
Factores luminosos	
Transmissão	64 %
Reflexão exterior	11 %
Reflexão interior	13 %
Factores energéticos EN 410	
Transmissão	34 %
Reflexão exterior	7 %
Absorção A1	52 %
Absorção A2	6 %
Factor solar	0.45
Coeficiente de sombreamento	0.51
Transmissão Térmica	
U	2.8 W/(m ² .k)

3.2.2. Sombreamentos

O sistema de sombreamento considerado foi unicamente utilizado na orientação Sul. De acordo com o sistema de janelas utilizado, foi escolhido um sistema de sombreamento constituído por duas palas horizontais. Para além de sombrear, i.e. eliminar a radiação directa nos vãos envidraçados, a pala inferior reflecte iluminação para o tecto do espaço aumentando a luz natural.

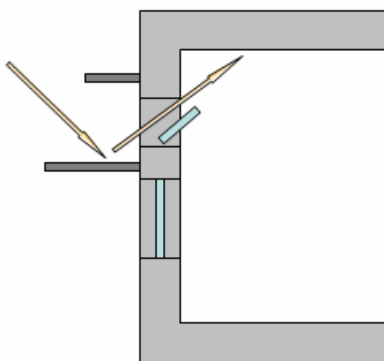


Figura 9 – Sistema de sombreamento e reflexão da luz natural para o interior.

A pala superior tem uma largura de 0.55m e a inferior 1.15m, e estendem-se ao longo de toda a fachada.

3.2.3. Sistemas de climatização

Na climatização do edifício foi utilizado um sistema ar-água de controlo multizona. Para satisfazer as necessidades térmicas de cada espaço recorreu-se também a um “*Fan-Coil*” alimentado por um sistema centralizado de geração de energia térmica (água fria e quente). As temperaturas de “*set-point*” do ar interior são as seguintes:

- 1 de Outubro a 31 de Maio: 20°C;
- 1 de Junho a 30 de Setembro: 25°C.

Nas tabelas que se seguem encontra-se algumas das condições de funcionamento.

Tabela 5 – Temperaturas limite de operação do Fan Coil.

Temperaturas Limite de Insuflação	
Max	27 °C
Min	18 °C

Tabela 6 - Horário de funcionamento do “*Fan-Coil*”.

Horário do Sistema	
Das 0:01 às 6:00	Desligado
Das 6:01 às 20:00	Ligado
Das 20:01 às 0:00	Desligado

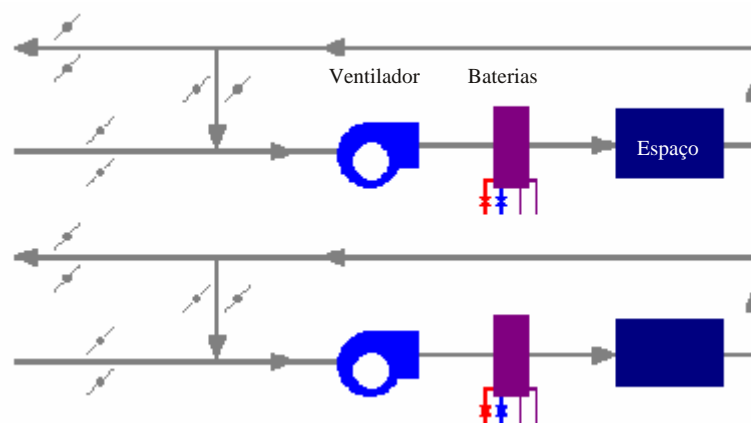


Figura 10 – Esquema representativo de um Fan Coil.

Relativamente ao ar exterior de higienização, este é tratado numa unidade centralizada (UTAN), sendo posteriormente conduzido para os diferentes locais do edifício. O caudal mínimo necessário foi estipulado de acordo com a EN13779 (ver tabela seguinte).

Tabela 7 – Caudal mínimo de ar novo

Caudais		
Específico	45	[m ³ /(hora.pessoa)]
Total	10335	[m ³ /hora]

Tabela 8 – Horário de funcionamento da UTA.

Horário do Sistema	
Das 0:01 às 6:00	Desligado
Das 6:01 às 20:00	Ligado
Das 20:01 às 0:00	Desligado

O ar exterior será insuflado em condições controladas de temperatura: 18°C. Este valor tem em conta a necessidade de garantia do conforto térmico dos ocupantes.

A distribuição de água fria e quente faz-se em caudal constante no circuito primário e caudal variável no circuito secundário.

3.3. Condições de funcionamento

Na sequência da publicação da Directiva Europeia 2002/91/CE de 16 de Dezembro relativa ao desempenho energético dos edifícios, transcrita para a legislação Nacional pelos Decretos-Lei n.ºs 78, 79 e 80 de Abril de 2006, foram definidos valores máximos de consumo energético para as diferentes tipologias de utilização, acima dos quais os edifícios não podem ser licenciados. Como atrás referido, no caso concreto dos novos edifícios de escritórios, o valor é de 35 kgep/m².ano.

Os consumos energéticos para efeitos de licenciamento e atribuição da classe de eficiência têm de ser calculados em “*condições nominais de funcionamento*” que estão definidas no DL 79/2006 e convertidos para unidades de energia primária (utilizando coeficientes de conversão definidos no mesmo decreto).

As restantes condições nominais de funcionamento definidas no DL 79/2006, relativas à ocupação, iluminação e aos equipamentos, são as seguintes:

Ocupação

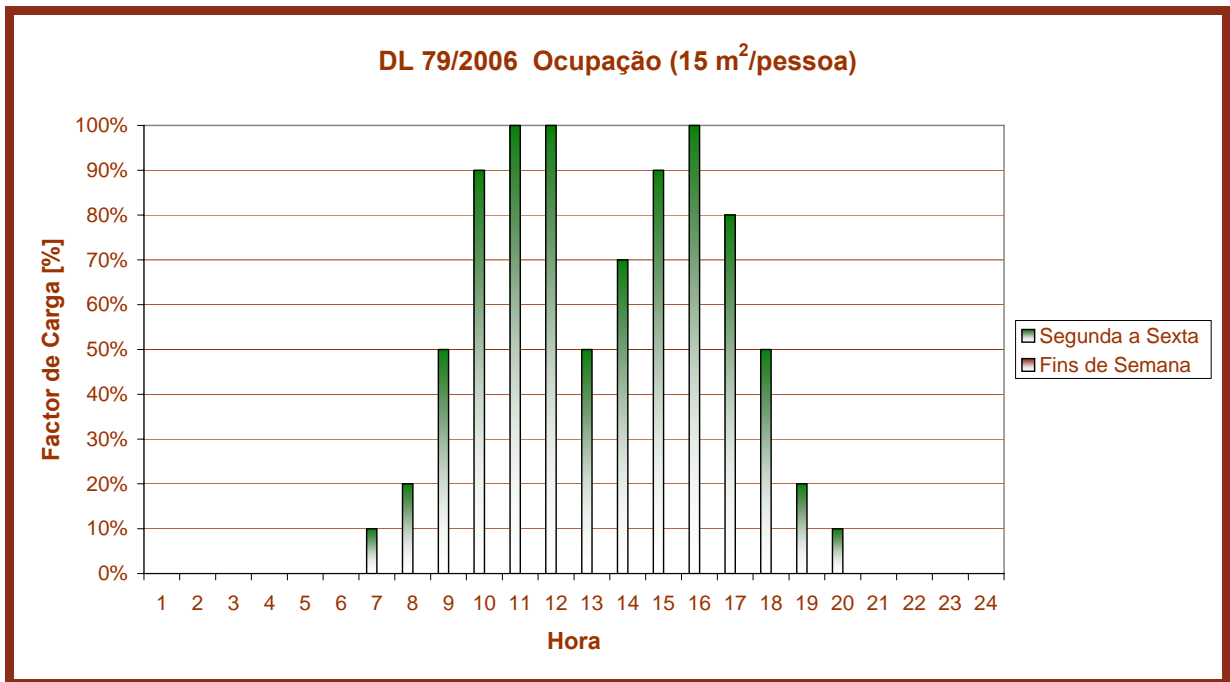


Figura 11 – Perfil de carga de ocupação.

Iluminação

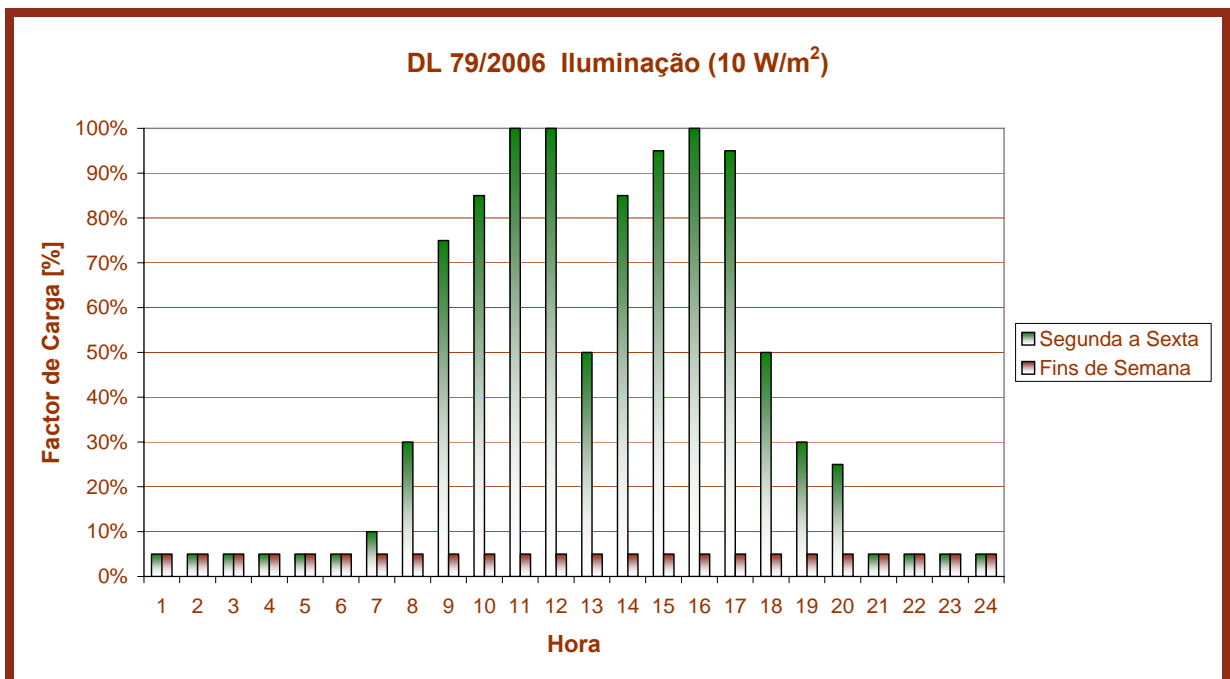


Figura 12 - Perfil de carga de iluminação.

Equipamentos

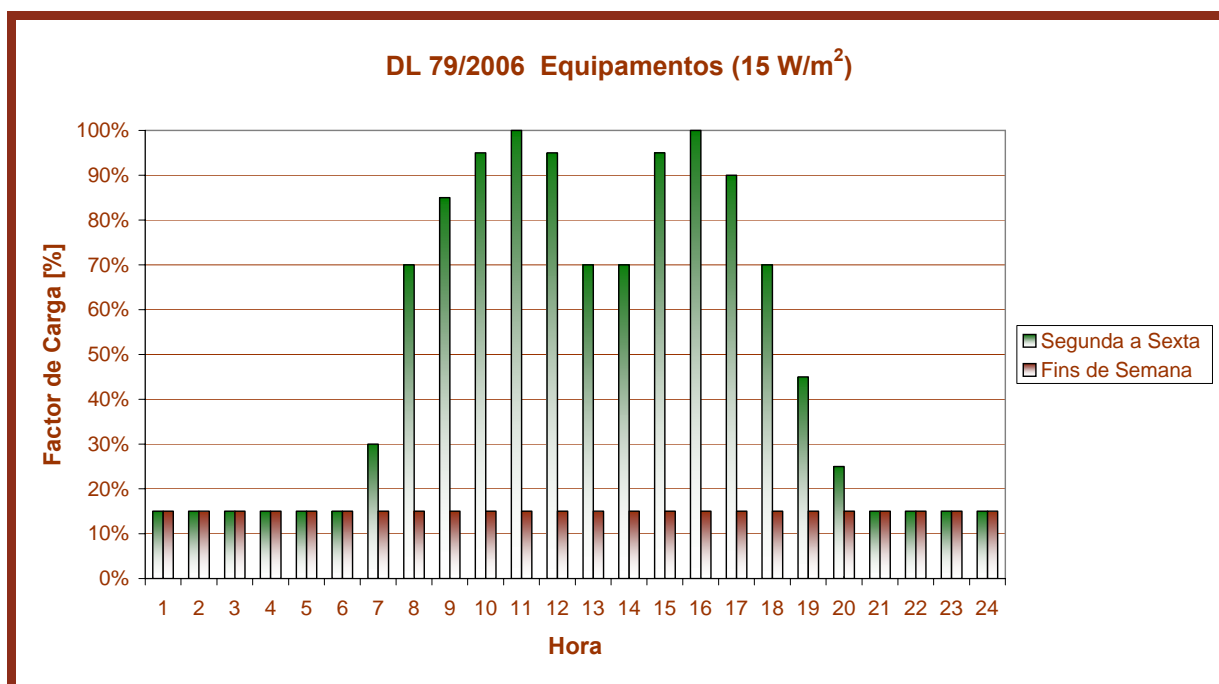


Figura 13 - Perfil de carga de equipamentos.

A potência referente aos ganhos de ocupação foi definida com base na AHSRAE Fundamentals. Para edifícios de escritórios as cargas provenientes por ocupante são:

- 75W de carga sensível,
- 55W de carga latente.

Da carga sensível, 58% do calor trocado é por radiação.

Relativamente aos equipamentos, foi estipulado 15 W/m² de acordo com o DL 79/2006. A quantidade de calor que é trocada por radiação corresponde a 40% do total [6].

A potência de iluminação estipulada para este caso de estudo foi de 10 W/m². De acordo com os manuais do Energy Plus é boa prática utilizar 40% para a componente radiativa de lâmpadas fluorescentes, sendo que 20% são na gama do visível e os outros 20% na gama do infravermelho [5].

4. Comparação entre os programas – Caso de Estudo

Com a evolução da simulação do Caso de Estudo constatou-se que os valores calculados para as necessidades térmicas eram significativamente diferentes. No sentido de tentar encontrar a origem da diferença foi-se simplificando o modelo, com sucessivas simulações em ambos os softwares, que se mostraram infrutíferas já que o problema subsistiu.

Dada a elevada complexidade do Caso de Estudo, seria difícil fazer uma análise detalhada da sensibilidade dos resultados de ambos os programas. Surgiu então a necessidade de um suporte sólido e de confiança para a resolução do problema. De acordo com o nº 2 do artigo 30º do Decreto-Lei 79/2006 de 4 Abril [3], a norma aplicável à acreditação de programas de simulação detalhados é a ASHRAE 140-2004 [11]. Esta norma especifica modelos de teste para avaliar as capacidades técnicas e a aplicabilidade computacional para o cálculo do desempenho térmico e de sistemas de AVAC. Este documento é utilizado para determinar as principais falhas e limitações dentro das potencialidades dos programas de simulação não fazendo, no entanto, parte desta norma o teste aos algoritmos de cálculo.

Dado o elevado número de casos de estudo presentes nesta norma, e à falta de tempo para uma verificação exaustiva, foram analisados apenas alguns dos casos de estudo que melhor parecem se identificar com o Caso de Estudo, já que a análise aos resultados das primeiras simulações feitas ao Caso de Estudo, davam a entender que existia algum problema com a envolvente do edifício. A escolha dos casos de estudo recaiu sobre aqueles que se focam mais no estudo da envolvente, a saber: caso 600, 610, 620, 630, 900, 910, 920 e 930 .

De seguida são apresentados os estudos efectuados aos casos anteriores:

4.1. Verificação da norma ASHRAE 140-2004

Os testes relativos ao comportamento térmico da envolvente estão divididos em dois grupos principais. O primeiro corresponde a soluções construtivas de baixa densidade, enquanto que o segundo de elevada, traduzindo assim, respectivamente, uma menor ou maior capacidade de acumulação térmica (o valor do calor específico segue a mesma relação).

Os casos de teste foram realizados conforme especificado na norma. Na tabela que se segue estão resumidas as características da envolvente de cada caso.

Tabela 9 – Resumo dos casos de estudo.

Envolvente	Caso de Estudo	Descrição
Baixa densidade	600	Dois envidraçados orientados a sul.
	610	Semelhante ao 600 mas com uma pala de sombreamento.
	620	Um envidraçado a nascente e outro a poente.
	630	Semelhante ao 620 mas com sombreadores horizontais e verticais.
Alta densidade	900	Igual ao caso 600.
	910	Igual ao caso 610.
	920	Igual ao caso 620.
	930	Igual ao caso 630.

4.1.1. Informações comuns a todos os casos

Nesta secção são descritas todas as propriedades comuns aos casos a simular.

4.1.1.1. Propriedades dos envidraçados

Na tabela que segue estão expostos todos os valores fornecidos pela norma para introdução dos vidros nos programas de simulação. Esta tabela é exaustiva, e nem todos os programas requerem exactamente os mesmos dados.

Tabela 10 – Propriedades dos vidros.

Propriedades	Valor	Unidades
Tipo de envidraçado	Duplo	-
Espessura de cada vidro	3.175	mm
Espessura da caixa-de-ar do vidro	13	mm
Índice de refração	1.526	-
Transmissibilidade	0.86156	-
Condutibilidade térmica do vidro	1.06	W/m.K
Condutibilidade por cada vidro simples	333	W/m ² .K
Combinação da radiação e da convecção para a caixa-de-ar do vidro	6.297	W/m ² .K
Coeficiente de convecção exterior	21	W/m ² .K
Coeficiente de convecção interior	8.29	W/m ² .K
Coeficiente de transmissão térmica	3.0	W/m ² .K
Emissividade na gama do infravermelho	0.9	-
Densidade	2500	kg/m ³
Calor específico	750	J/kg.K
Sombreamento Interior	-	-
Coeficiente de sombreamento	0.907	-
Coeficiente de ganho de calor solar (SHGC)	0.789	-

4.1.1.2. Ficheiro Climático

O ficheiro climático utilizado nas simulações dos casos de estudo foi o disponibilizado pela ASHRAE 140. Este ficheiro contém os dados climáticos de Golden, uma cidade do estado de Colorado no centro da América do Norte.

Tabela 11 – Resumo dos dados climáticos de “Colorado/Golden”.

Tipo de Clima	Inverno Frio com céu limpo / Verões quentes e secos
Formato do ficheiro climático	TMY
Latitude	39.8° Norte
Longitude	104.9° Oeste
Altitude	1609 m
Zona horária	7
Reflexão do solo	0.2
Velocidade do vento (média anual)	4.02 m/s
Temperatura do solo	10°C
Temperatura ambiente média anual	9.71°C
Temperatura ambiente mínima anual	-24.39°C
Temperatura ambiente máxima anual	35.00°C
Velocidade do vento máxima anual	14.89 m/s
Graus dia de Aquecimento (base 18.3°C)	3636.2°C-dia
Graus dia de Arrefecimento (base 18.3°C)	487.1°C-dia
Temperatura de bolbo húmido média anual	-1.44°C
Humidade média anual	0.0047
Radiação horizontal	1831.82 kWh/(m ² · ano)
Radiação directa na normal	2353.58 kWh/(m ² · ano)
Radiação directa na horizontal	1339.48 kWh/(m ² · ano)
Radiação difusa na horizontal	492.34 kWh/(m ² · ano)

4.1.1.3. Infiltrações

Para as infiltrações utilizou-se uma taxa de 0.5 RPH, durante 24h/dia ao longo de todo ano.

4.1.1.4. Ganhos Internos

Os ganhos internos gerados pela iluminação, equipamentos e pessoas são de 200 W, durante 24h/dia ao longo de todo ano. Considera-se que estes são constituídos como uma carga 100% sensível (0% latente) e as componentes radiativa e convectiva são, respectivamente, 40% e 60%.

4.1.1.5. Sistema de Climatização

Para fazer a climatização do espaço é sugerido na norma que sistema seja 100% eficiente quer no aquecimento quer no arrefecimento, e que tenha as seguintes propriedades:

- Remoção da carga 100% por convecção,
- Controlo feito unicamente com sensor de temperatura,
- Sem remoção de carga latente,
- Termóstato não proporcional,
- O termóstato é constituído por dois “setpoints”, de aquecimento e arrefecimento (figura seguinte).

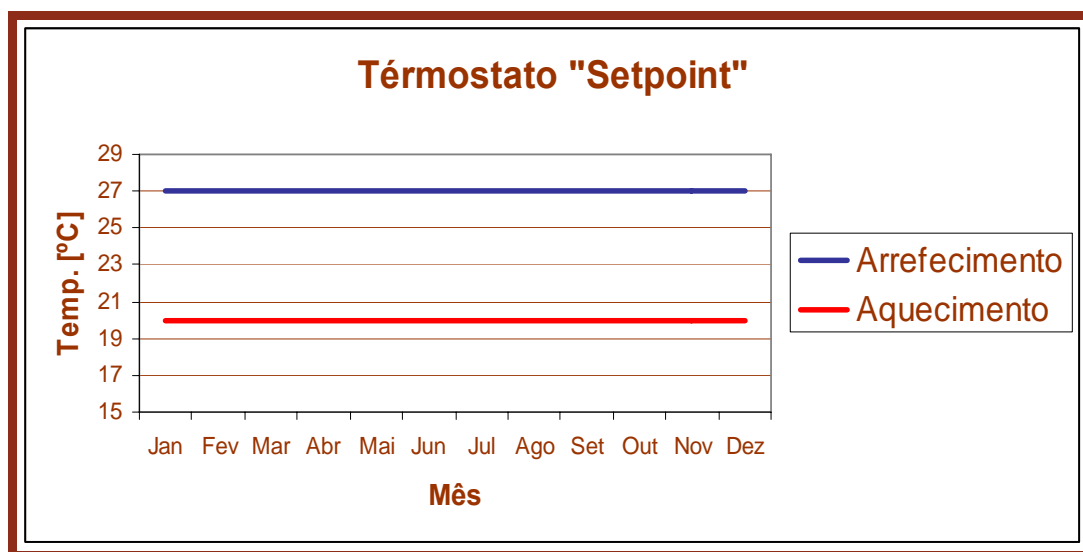


Figura 14- Temperaturas de “Setpoint” para aquecimento e arrefecimento.

4.1.2. Construção da envolvente de baixa densidade

Nas tabelas que se seguem encontra-se em detalhe os materiais utilizados na construção da envolvente de baixa densidade.

Tabela 12 – Parede Exterior de baixa densidade.

Elemento	K [W/mK]	Espessura [m]	U [W/m ² K]	R [m ² K/W]	Densidade [kg/m ³]	Cp [J/kgK]
Int. Surf. Coef.	-	-	8.290	0.121	-	-
Plasterboard	0.160	0.012	13.333	0.075	950	840
Fiberglass quilt	0.040	0.066	0.606	1.650	12	840
Wood Siding	0.140	0.009	15.556	0.064	530	900
Ext. Surf. Coef.	-	-	29.3	0.034	-	-
Total Air - Air			0.514	1.944		
Total Air - Surf			0.559	1.789		

A perda de calor através do piso térreo pode ter um efeito significativo nas necessidades de aquecimento e arrefecimento. Como não se pretende analisar a influência do piso térreo colocou-se uma camada muito espessa de isolamento térmico para torná-lo adiabático.

Tabela 13 – Piso térreo de baixa densidade.

Elemento	K [W/m.K]	Espessura [m]	U [W/m ² K]	R [m ² K/W]	Densidade [kg/m ³]	Cp [J/kg.K]
Int. Surf. Coef.	-	-	8.290	0.121	-	-
Timber flooring	0.140	0.025	5.600	0.179	650	1200
Insulation	0.040	1.003	0.040	25.075	-	-
Total Air - Air			0.039	25.374		
Total Air - Surf			0.040	25.254		

Tabela 14 – Telhado de baixa densidade.

Elemento	K [W/m.K]	Espessura [m]	U [W/m ² K]	R [m ² K/W]	Densidade [kg/m ³]	Cp [J/kg.K]
Int. Surf. Coef.	-	-	8.290	0.121	-	-
Plasterboard	0.160	0.010	16.000	0.063	950	840
Fiberglass quilt	0.040	0.1118	0.358	2.794	12	840
Roofdeck	0.140	0.019	7.368	0.136	530	900
Ext. Surf. Coef.	-	-	29.3	0.034	-	-
Total Air - Air			0.318	3.147		
Total Air - Surf			0.334	2.992		

4.1.2.1. Caso 600 – Construção de baixa densidade

O caso 600 é o caso mais simples apresentado pela norma ASHRAE 140-2004, e será este modelo que servirá de base à construção dos modelos subsequentes.

O edifício base consiste num prisma rectangular com as seguintes dimensões, 6 m x 8 m x 2.7 m = 129.6 m³. A superfície orientada a sul é constituída por 12m² de área envidraçada, como podemos ver na figura que se segue.

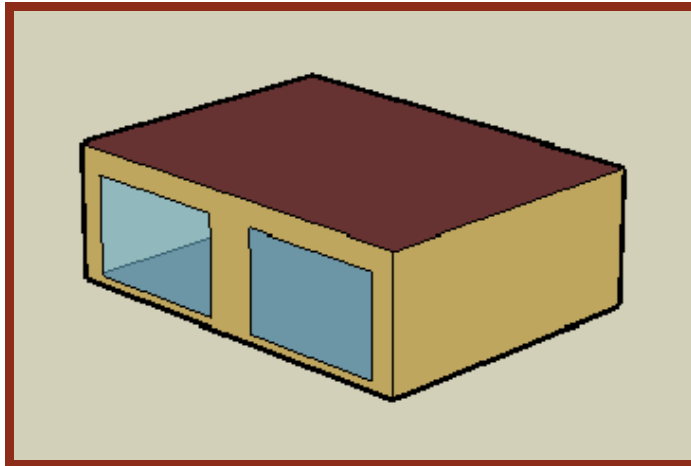


Figura 15 – Caso 600 da ASHRAE 140-2004.

4.1.2.2. Caso 610 – Construção de baixa densidade

O caso 610 é semelhante ao caso 600 mas com sombreamento a sul. Este sombreamento é feito por uma pala horizontal ao longo de toda fachada com 1m de largura que se encontra 0,5 metros acima da janela. Na imagem que segue está exemplificado este caso.

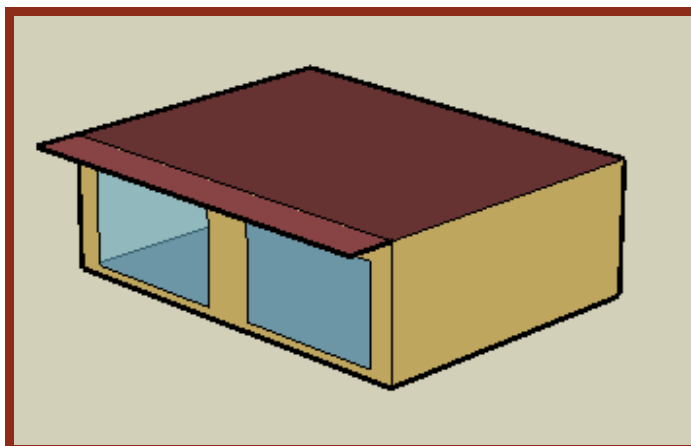


Figura 16 – Caso de 610 – construção de baixa densidade com sombreamento a sul.

4.1.2.3. Caso 620 – Construção de baixa densidade

O caso 620 é igual ao caso 600 mas sem janelas na face virada a sul mas com uma de 6m² em ambas as faces Este e Oeste:

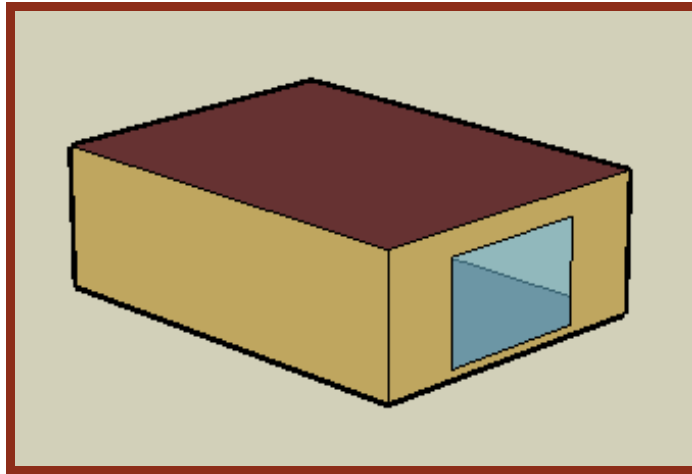


Figura 17 – Caso de 620 – construção de baixa densidade com janelas a Este e Oeste.

4.1.2.4. Caso 630 – Construção de baixa densidade

O caso 630 é semelhante ao caso 620 mas com palas verticais e horizontais para sombrear a área envidraçada. A pala horizontal tem 1 m de largura e encontra-se 0,5 m acima da janela. A pala vertical também tem 1 m de largura e encontra-se logo após o vão de envidraçado.

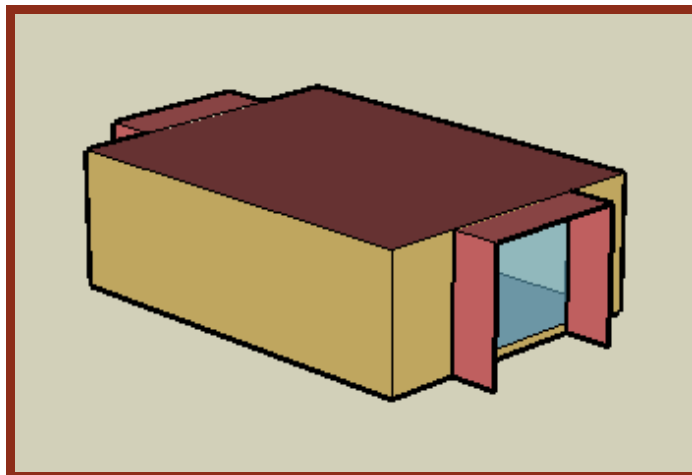


Figura 18 – Caso de 630 – construção de baixa densidade com sombreamento a Este e Oeste.

4.1.3. Construção da envolvente de alta densidade

Os casos de estudo com a envolvente de elevada densidade são semelhantes aos de baixa densidade com a exceção da construção da envolvente. Nas tabelas que se seguem serão apresentadas em detalhe as soluções construtivas utilizadas.

Tabela 15 – Parede Exterior de alta densidade.

Elemento	K [W/m.K]	Espessura [m]	U [W/m ² K]	R [m ² K/W]	Densidade [kg/m ³]	Cp [J/kg.K]
Int. Surf. Coef.	-	-	8.290	0.121	-	-
Concrete Blok	0.510	0.100	5.1	0.196	1400	1000
Foam Insulation	0.040	0.0615	0.651	1.537	10	1400
Wood Siding	0.140	0.009	15.556	0.064	530	900
Ext. Surf. Coef.	-	-	29.3	0.034	-	-
Total Air - Air			0.512	1.952		
Total Air - Surf			0.556	1.797		

O piso térreo é novamente adiabático.

Tabela 16 – Piso de alta densidade.

Elemento	K [W/m.K]	Espessura [m]	U [W/m ² K]	R [m ² K/W]	Densidade [kg/m ³]	Cp [J/kg.K]
Int. Surf. Coef.	-	-	8.290	0.121	-	-
Concrete Slab	1.130	0.080	14.125	0.071	1400	1000
Insulation	0.040	1.007	0.040	25.175	-	-
Total Air - Air			0.039	23.366		
Total Air - Surf			0.040	25.246		

Tabela 17 – Telhado de alta densidade

Elemento	K [W/m.K]	Espessura [m]	U [W/m ² K]	R [m ² K/W]	Densidade [kg/m ³]	Cp [J/kg.K]
Int. Surf. Coef.	-	-	8.290	0.121	-	-
Plasterboard	0.160	0.010	16.000	0.063	950	840
Fiberglass quilt	0.040	0.1118	0.358	2.794	12	840
Roofdeck	0.140	0.019	7.368	0.136	530	900
Ext. Surf. Coef.	-	-	29.3	0.034	-	-
Total Air - Air			0.318	3.147		
Total Air - Surf			0.334	2.992		

4.1.4. Notas sobre a modelação

Ao longo da descrição dos modelos de teste são apresentadas as variáveis necessárias para o estudo dos programas de simulação. No entanto, devido ao facto destes requererem diferentes variáveis de entrada, existem vários valores ao longo da norma que não são necessários. Ao longo desta secção serão apresentadas todas as considerações que foram tomadas para efectuar as simulações.

4.1.4.1. TRACE 700

Especificação dos materiais

No caso do TRACE 700, aquando da introdução dos materiais para a construção do piso térreo, é recomendado pela norma a utilização de forte isolamento e uma reduzida capacidade térmica (valor mínimo para a densidade e para o calor específico). Os valores utilizados foram de 0.001 kg/m^3 e 0.001 kJ/kg.K , respectivamente para a massa volúmica e para o calor específico.

Relativamente às propriedades do solo, o programa não solicita quaisquer valores, apenas o valor da transmissão térmica linear para o solo (perdas lineares pelo piso térreo), que no caso foi considerado como nulo.

Coefficiente de convecção exterior

A norma recomenda que se utilizem os coeficientes de convecção exterior calculados pelo programa quando este o permite. No caso do TRACE 700, o programa pode avaliar esses coeficientes de quatro modos distintos, nomeadamente:

- Constante,
- Variável com o vento,
- Variável com o vento, direcção e variação da temperatura,
- Variável com o vento, direcção, variação da temperatura e rugosidade.

Por motivos apresentados adiante, vai ser considerado um valor constante para o coeficiente de convecção exterior. Para este caso a norma sugere que sejam utilizados os valores apresentados na tabela seguinte. Devido a limitações do programa, no caso de não se considerarem os algoritmos de cálculo para o efeito, o coeficiente de convecção exterior nos envidraçados é $22.85 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, não sendo possível mudar para o sugerido.

Tabela 18- Coeficientes de convecção exterior.

Textura da superfície	Coef. Convecção Exterior
Tijolo e gesso cartonado	$29.3 \text{ W/m}^2\text{K}$
Vidros (Janelas)	$21.0 \text{ W/m}^2\text{K}$

Coefficiente de convecção interior

A norma recomenda que se utilizem os coeficientes de convecção interior calculados pelo programa quando este o permite. No entanto, o TRACE 700 não calcula o coeficiente de convecção interior hora a hora: utiliza a resistência superficial definida na construção da envolvente opaca para o determinar (valor fixo). Nos vãos envidraçados utiliza 8.30 W/(m²·K).

Opções de cálculo

Como já foi descrito na apresentação do TRACE 700, este permite escolher diferentes métodos de cálculo para arrefecimento e aquecimento. Neste caso optou-se pelos seguintes:

- Aquecimento: CLTD-CLF (ASHRAE TFM) -Exact Transfer Function Method
- Arrefecimento: RTS (Heat Balance) - Radiant Time Series coefficients based on Heat Balance.

4.1.4.2. Energy Plus

Especificação dos materiais

Os materiais utilizados nas soluções construtivas das paredes, pisos e tectos foram especificados em detalhe, à excepção do isolamento do piso térreo. Este material foi definido apenas com um valor de resistência térmica.

Coefficiente de convecção exterior e interior

O Energy Plus calcula automaticamente os coeficientes de convecção exterior e interior.

Opções de cálculo

Os critérios de convergência foram os seguintes:

- Convergência das Cargas=0.0040
- Convergência das Temperaturas=0.040

Neste programa pode-se definir o número de vezes por hora que o programa faz os cálculos. Neste campo (“*Time steps*”) foram definidos quatro cálculos por hora.

4.2. Análise aos casos de estudos da ASHRAE 140-2004

Os resultados apresentados em seguida foram resultado de sucessivas iterações, especialmente no caso do TRACE 700, pois os resultados a que se chegou com este programa não correspondiam ao intervalo de valores esperados, apresentando um erro semelhante ao encontrado no caso de estudo deste relatório. Era espectável que a solução devolvida fosse da mesma ordem de grandeza dos restantes programas exibidos na norma [11].

Numa fase inicial foi verificado por mais do que uma vez se todas as variáveis teriam sido introduzidas correctamente, e conclui-se que estava tudo como a norma recomendava. Visto que não foi encontrado qualquer problema, foi necessário comparar, ponto a ponto, os resultados horários das cargas térmicas devolvidos pelo TRACE 700 com os do Energy Plus.

Neste sentido foram verificadas todas as contribuições para a carga térmica do espaço, nomeadamente, ganhos internos, condução pelos envidraçados, condução pela envolvente opaca, infiltrações, valores dos coeficientes de transmissão térmica, ganhos solares através dos envidraçados, entre outras. Ao fim desta verificação constatou-se que a maior diferença residia na carga proveniente da envolvente. Então estudou-se ainda mais em detalhe tudo o que estava relacionado com a envolvente.

Numa fase inicial procedeu-se a uma verificação dos dados climáticos em ambos os programas, visto que apesar do ficheiro climático de base ser o mesmo, os programas têm subrotinas para transformar os ficheiros destas bases para os seus formatos, pelo que poderia existir algum problema associado a este processo. Posteriormente, estudou-se o efeito da utilização das subrotinas de cálculo da convecção exterior face ao valor fixo estipulado pela norma [11]. Por fim analisou-se o efeito da utilização das subrotinas de cálculo do coeficiente de convecção exterior nas necessidades térmicas do caso 600.

4.2.1. Análise do ficheiro climático

Nesta secção pretende-se comparar o ficheiro climático utilizado nas simulações dos casos de estudo da norma ASHRAE 140-2004. O ficheiro fornecido pela norma está num formato (TMY) que não é reconhecido pelos programas, pelo que necessita de ser convertido para os respectivos formatos de cada programa, EPW e IWC, respectivamente, para o Energy Plus e TRACE 700. Para confirmar se o processo de alteração dos formatos não teve implicações nos resultados das variáveis climáticas vão-se fazer algumas comparações ao longo desta secção.

Na sequência de uma análise aos valores contidos nos ficheiros climáticos de ambos os programas verifica-se que a temperatura é aproximadamente similar ao longo de todo o ano. Fazendo uma análise aos graus dias para uma base de 18.3 °C verifica-se que não existe diferença¹⁰. Com uma análise atenta verifica-se que a amplitude máxima na diferença de temperatura é de 10 °C, esta ocorre no dia 16 de Outubro às 18h. Como se pode ver no gráfico seguinte, a evolução da temperatura ao longo do dia segue aproximadamente o mesmo andamento nos dois casos, no entanto existe um desfaseamento de cerca de uma hora. No anexo 1, encontra-se um gráfico representativo da diferença de temperaturas ao longo de todo o ano.

¹⁰ - Base de 18.3 °C – Foi utilizada esta base para calcular os graus dia, porque foi a utilizada pela ASHRAE.

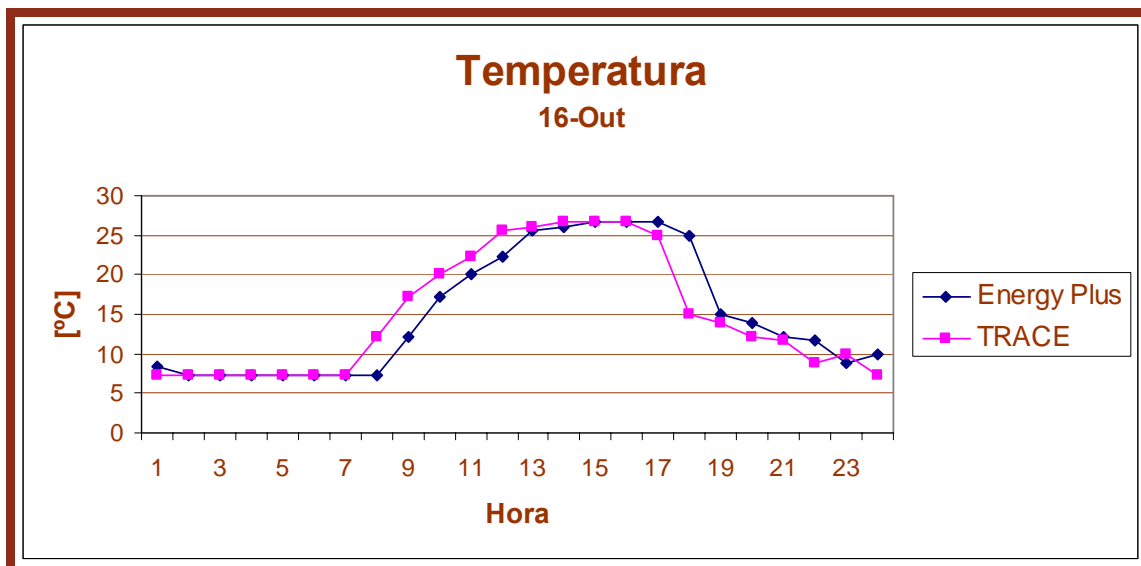


Figura 19- Temperaturas horária dos ficheiros climáticos de “Colorado/Golden” no dia da diferença máxima (16 de Out.).

Relativamente à temperatura máxima, esta ocorre no dia 26 de Julho às 15h em ambos os climas com o valor de 35 °C. As temperaturas mínimas são de -23.9 °C e -24.4°C respectivamente no TRACE 700 e Energy Plus este valor é registado a 4 de Janeiro em ambos os casos. Na tabela 19 encontra-se um resumo da análise às temperaturas dos ficheiros climáticos:

Tabela 19 – Temperaturas extremas de “Colorado/Golden” .

	Temperatura Exterior	
	TRACE	Energy Plus
Máximo	35.0	35.0
Mínimo	-23.9	-24.4
Média	9.7	9.7
Graus dia Arrefecimento	490	490
Graus dia Aquecimento	3626	3627

Outro aspecto muito importante é variação da radiação solar ao longo de todo ano. Duma verificação horária verifica-se que existem variações significativas no que respeita à radiação directa horária, esta chega a atingir aproximadamente 400 W/m² de diferença (ver anexo 2), no entanto a radiação directa mensal é aproximadamente igual nos dois casos.

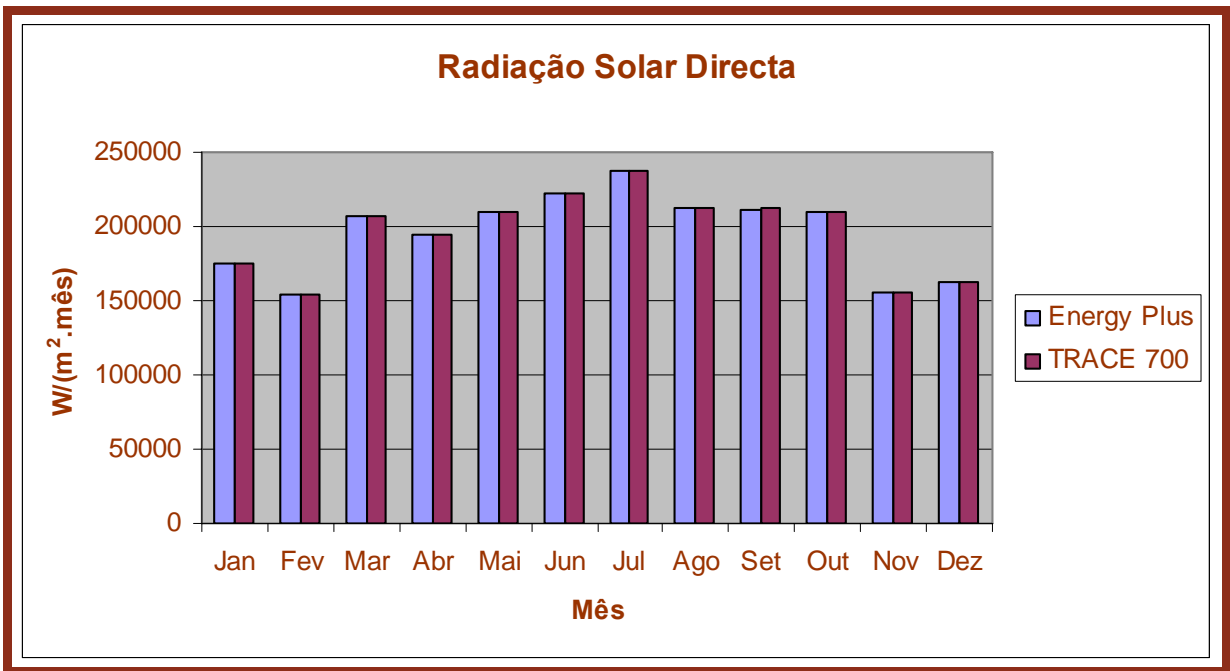


Figura 20- Diferença da radiação directa mensal dos ficheiros climáticos de Colorado/Golden.

No que respeita à radiação difusa, esta apresenta uma diferença máxima ao longo de uma hora de aproximadamente de 100 W/m² (ver anexo 3). Na figura 21 pode-se ver as diferenças mensais existentes.

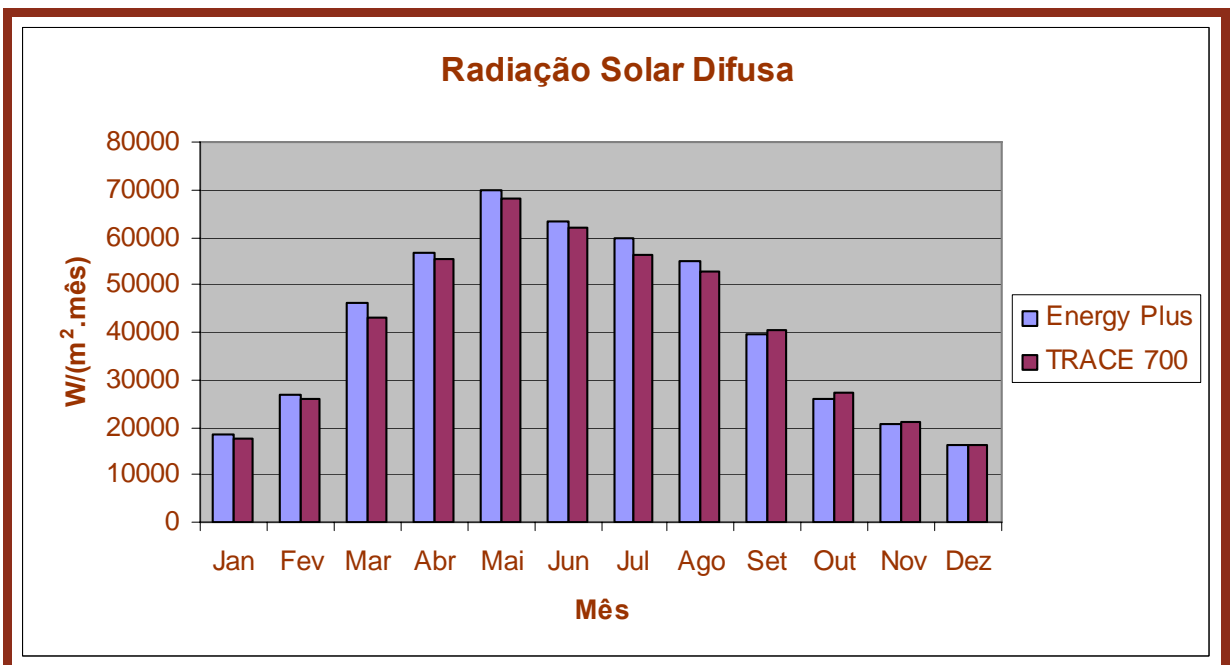


Figura 21- Diferença da radiação difusa mensal dos ficheiros climáticos de Colorado/Golden.

Analisando a diferença da intensidade da velocidade do vento horária entre os valores utilizados na TRACE 700 e Energy Plus, verifica-se que esta chega a atingir 7m/s (ver anexo 4), no entanto quando se compara a velocidade média mensal verifica-se que esta é exactamente igual.

Tabela 20 – Velocidade média mensal do vento.

Velocidade Média Mensal [m/s]		
Mês	TRACE 700	Energy Plus
Jan	4.7	4.7
Fev	4.3	4.3
Mar	4.0	4.0
Abr	4.5	4.5
Mai	4.0	4.1
Jun	4.9	4.9
Jul	4.0	4.0
Ago	3.4	3.4
Set	3.4	3.4
Out	3.6	3.7
Nov	3.5	3.5
Dez	3.6	3.6

Desta análise pode-se concluir que as variáveis em estudo têm aproximadamente o mesmo valor em ambos os ficheiros. Na análise horária verificam-se variações significativas (anexo 4) que podem provocar cargas térmicas diferentes hora a hora, pois as trocas de calor através da envolvente são influenciadas pela temperatura da parede e por sua vez esta é função da velocidade do vento, temperatura do meio ambiente, radiação incidente, entre outras variáveis.

4.2.2. Análise dos Coeficientes de convecção

Na sequência da análise do ficheiro climático e dos estudos feitos aos fluxos de calor existente na envolvente do caso simulado no TRACE 700, surgiu a suspeita que a diferença encontrada no cálculo das cargas térmicas entre os dois programas poderia estar relacionada com o cálculo dos coeficientes de convecção exterior.

Como se pode ver na figura 22, o TRACE 700 permite escolher quatro formas distintas para o cálculo dos coeficientes de convecção exterior, nomeadamente:

- Constante,
- Variável com a velocidade do vento,
- Variável com velocidade e direcção do vento e ainda com diferença de temperaturas sentida entre a superfície e o ar,
- Variável com velocidade e direcção do vento, com diferença de temperaturas sentida entre a superfície e o ar, e com a rugosidade da superfície.

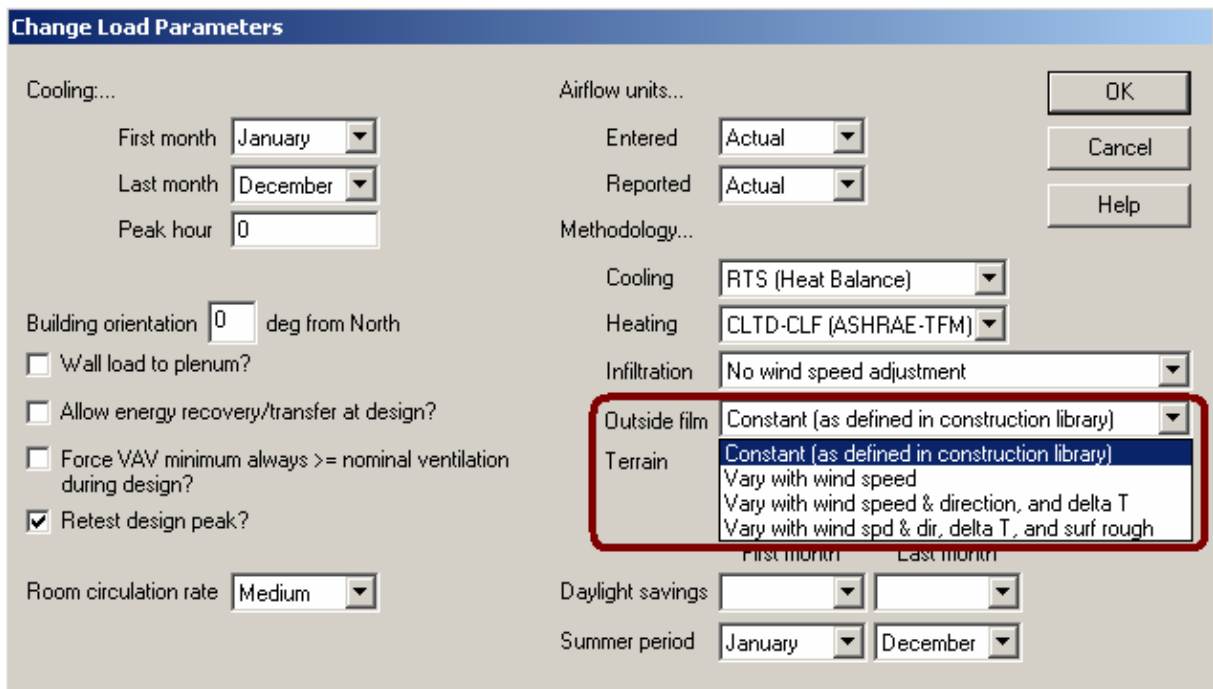


Figura 22- Métodos de cálculo do coeficiente de convecção exterior.

Relativamente ao coeficiente de convecção interior o programa utiliza um valor constante, ou seja utiliza o coeficiente de resistência superficial interior para a sua determinação. O TRACE 700 não tem um processo de cálculo automático como no caso do coeficiente de convecção exterior.

Nos estudos que foram feitos, mencionados ao longo deste relatório, para o cálculo dos coeficientes de convecção exterior foi utilizada a terceira opção apresentada anteriormente. Esta opção foi tomada ao abrigo da norma ASHRAE 140-2004, pois esta diz que no caso de o programa possibilitar o cálculo dos coeficientes de convecção automaticamente, deve ser utilizada essa potencialidade (secção 5.2.1.9. da norma ASHRAE 140-2004).

No sentido de tentar perceber a influência no cálculo das cargas térmicas testou-se cada uma das opções para o cálculo dos coeficientes de convecção apresentadas atrás. O modelo para teste utilizado foi o 600 da norma mas sem os envidraçados sul.

Os resultados obtidos com estas simulações são os que seguem:

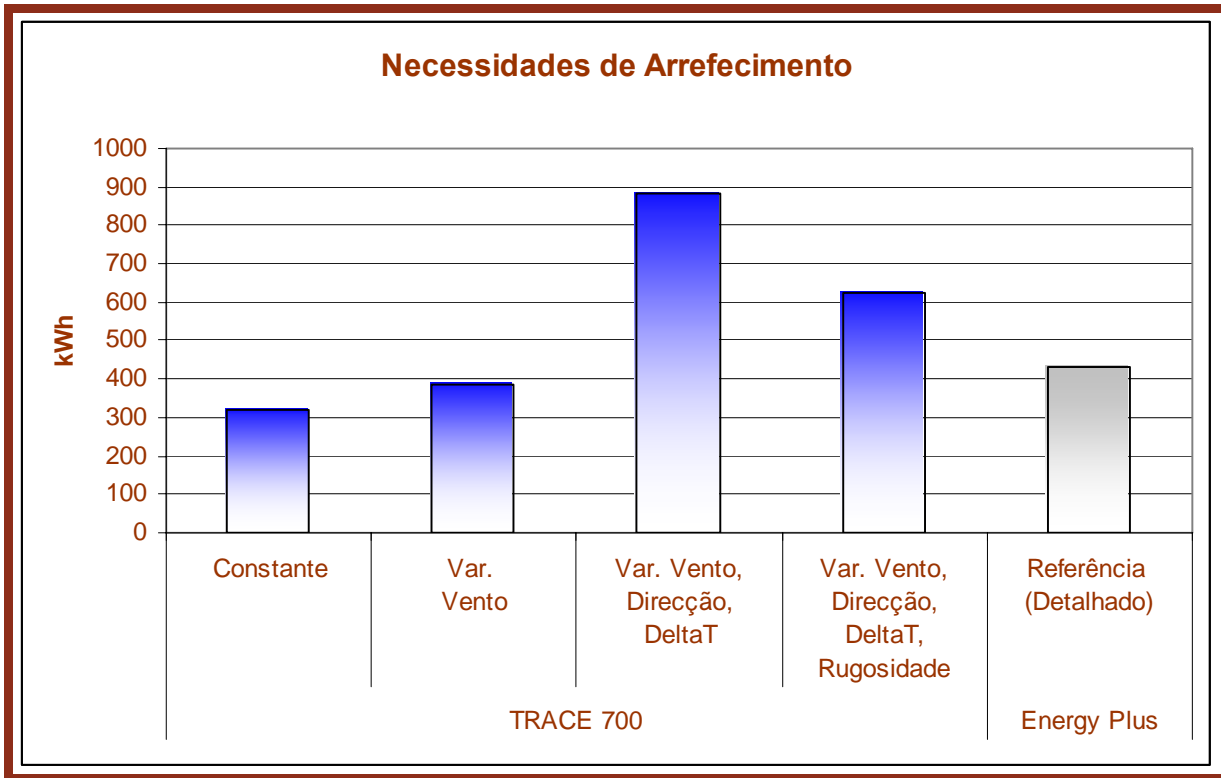


Figura 23 - Comparação dos métodos de cálculo dos coeficientes de convecção exterior.

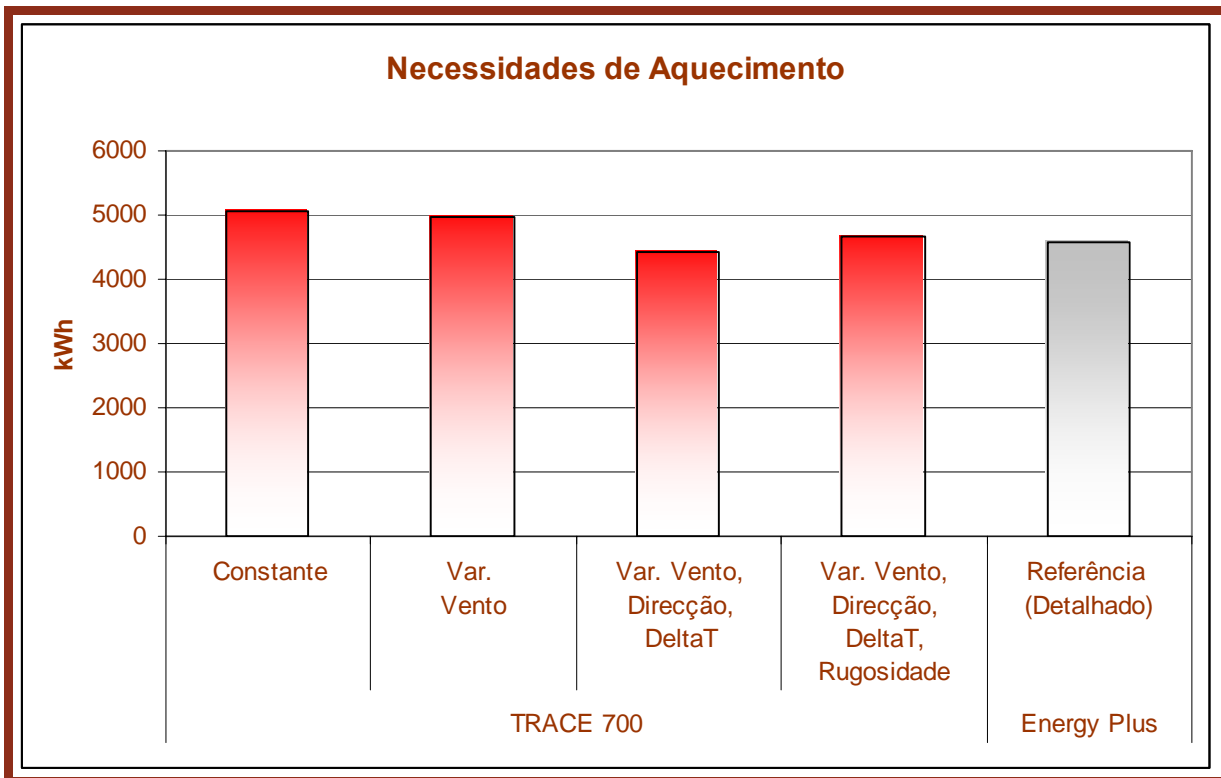


Figura 24- Comparação dos métodos de cálculo dos coeficientes de convecção exterior.

Analisando os gráficos apresentados anteriormente verifica-se que existe um desfaseamento para os diversos métodos de cálculo com o TRACE 700 e o valor de referência do Energy Plus.

O método de cálculo que estava a ser utilizado é o que apresenta a maior diferença quando comparado com o Energy Plus. Relativamente aos dois primeiros métodos, o constante e o variável com o vento, estes são os que se aproximam mais do valor de referência. As necessidades térmicas de aquecimento apresentam uma variação reduzida (no máximo 11%).

4.3. Resultados dos casos de estudos da ASHRAE 140-2004

Os resultados apresentados em seguida foram obtidos de sucessivas iterações, especialmente no caso do TRACE 700, pois os primeiros valores a que se chegou com este programa eram muito superiores aos esperados. Após alguns estudos verificou-se que a diferença excessiva era causada no cálculo automático dos coeficientes de convecção exterior (ver 4.2.2.). Para reduzir esta diferença foi utilizado um valor constante para os coeficientes de convecção. Desta simulação obtiveram-se os resultados que se podem ver nos gráficos e tabelas que se seguem. Da sua análise pode-se concluir que os resultados relativamente ao aquecimento estão dentro do intervalo dos outros programas, o que não acontece para os primeiros três casos das necessidades de arrefecimento. De um modo geral o TRACE 700 apresenta cargas de arrefecimento superiores à generalidade dos programas de simulação. No arrefecimento o resultado que mais se aproxima dos restantes programas é o caso 630.

No caso do Energy Plus, a maioria dos resultados deram na ordem de grandeza que era esperado, ou seja, perto da média dos resultados dos outros programas. Para este programa, os resultados mais afastados da média para este programa ocorre no caso 630 e nos casos de elevada massa, nas cargas de aquecimento.

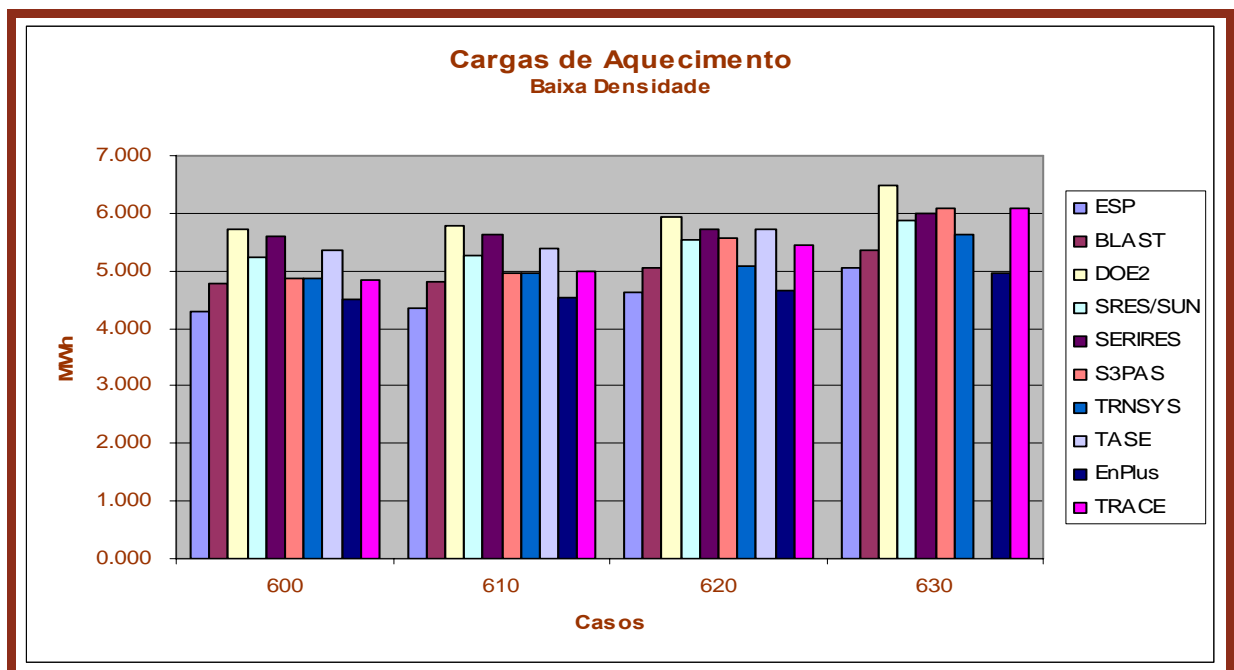


Figura 25- Cargas de Aquecimento para os casos de baixa densidade.

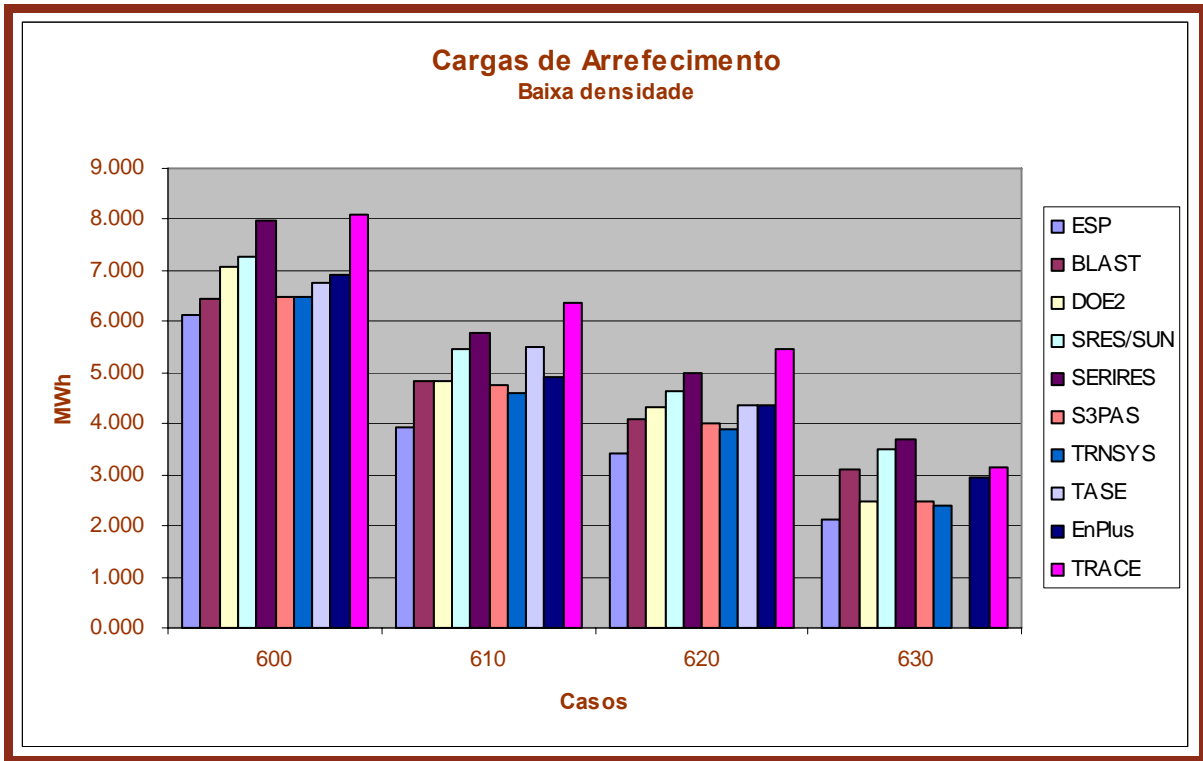


Figura 26- Cargas de arrefecimento para os casos de baixa densidade.

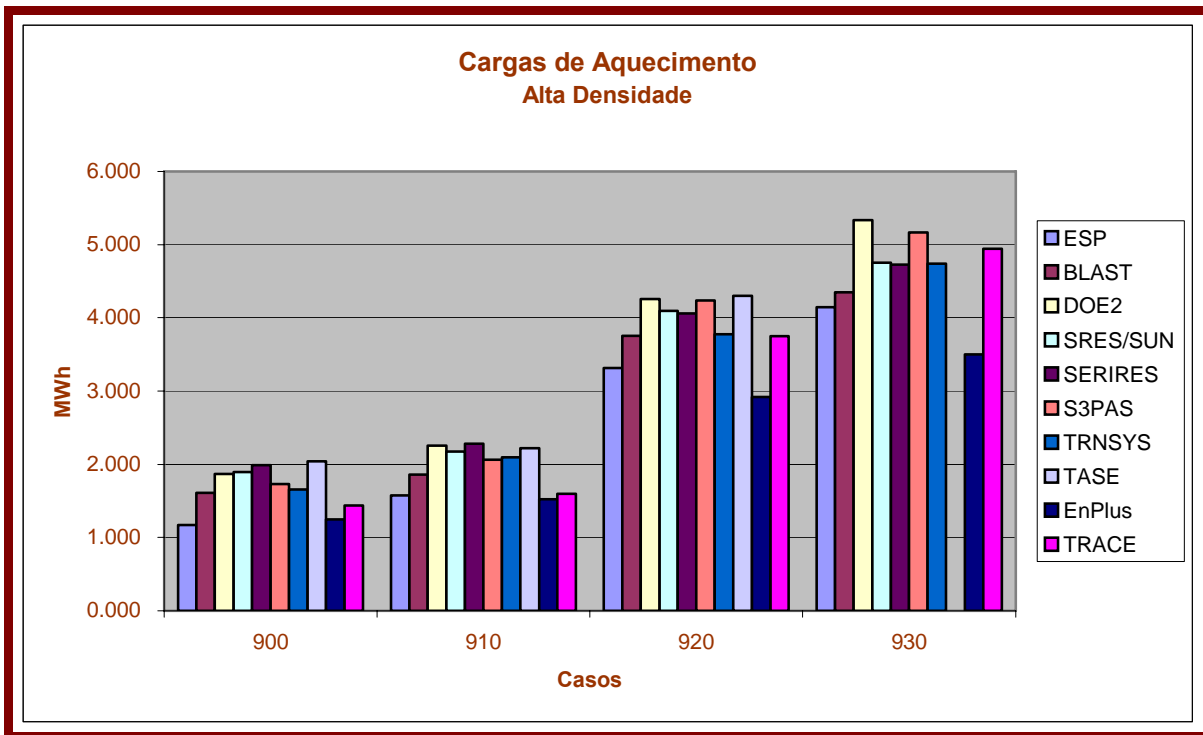


Figura 27- Cargas de Aquecimento para os casos de baixa densidade.

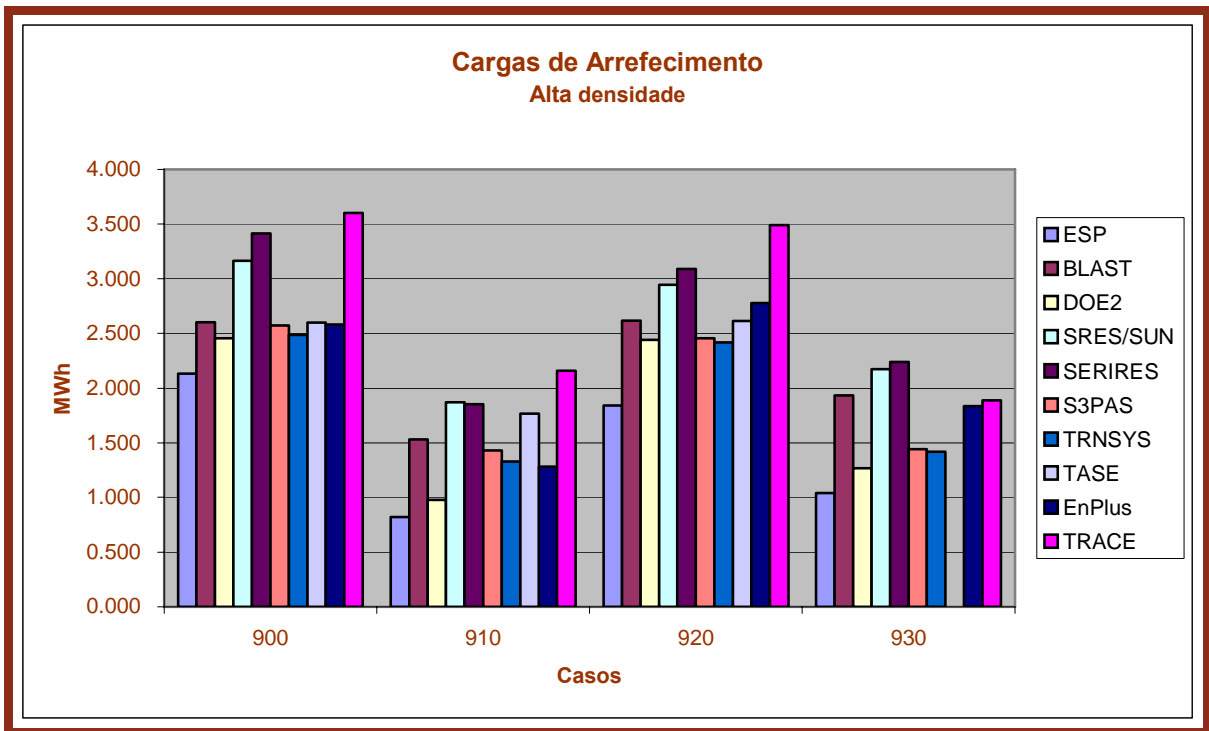


Figura 28- Cargas de arrefecimento para os casos de baixa densidade.

Nas tabelas que se seguem encontram-se resumidos os resultados de cada programa em comparação com os máximos e mínimos gerados pelos programas descritos na norma. Foi feita uma média aritmética aos resultados dos programas dados pela norma, que servirá para analisar a diferença corresponde ao desfasamento existente nos valores devolvidos pelos programas em estudo. Para perceber de uma forma mais instantânea se os resultados do TRACE 700 e do Energy Plus se encontram dentro do intervalo formado pelo máximo e mínimo dos programas apresentados na norma, inseriu-se uma linha na tabela com a indicação “Sim” e “Não”.

Tabela 21- Enquadramento das cargas térmicas do TRACE 700 face à norma ASHRAE 140-2004.

TRACE 700				
Casos: Baixa densidade	600	610	620	630
Aquecimento Anual (MWh)				
Mínimo	4.296	4.355	4.613	5.050
Máximo	5.709	5.786	5.944	6.469
Média	5.090	5.146	5.407	5.783
TRACE 700	4.845	4.985	5.443	6.087
Diferença %	-4.8%	-3.1%	0.7%	5.3%
TRACE 700 dentro do intervalo	Sim	Sim	Sim	Sim
Arrefecimento Anual (MWh)				
Mínimo	6.137	3.915	3.417	2.129
Máximo	7.964	5.778	5.004	3.701
Média	6.832	4.964	4.218	2.832
TRACE 700	8.088	6.352	5.450	3.161
Diferença %	18.4%	28.0%	29.2%	11.6%
TRACE 700 dentro do intervalo	Não	Não	Não	Sim
Casos: Alta Densidade				
	900	910	920	930
Aquecimento Anual (MWh)				
Mínimo	1.170	1.575	3.313	4.143
Máximo	2.041	2.282	4.300	5.335
Média	1.745	2.066	3.973	4.745
TRACE 700	1.437	1.595	3.750	4.945
Diferença %	-17.7%	-22.8%	-5.6%	4.2%
TRACE 700 dentro do intervalo	Sim	Sim	Sim	Sim
Arrefecimento Anual (MWh)				
Mínimo	2.132	0.821	1.840	1.039
Máximo	3.415	1.872	3.092	2.238
Média	2.678	1.447	2.552	1.644
TRACE 700	3.602	2.160	3.492	1.890
Diferença %	34.5%	49.2%	36.8%	15.0%
TRACE 700 dentro do intervalo	Não	Não	Não	Sim

Tabela 22- Enquadramento das cargas térmicas do Energy Plus face à norma ASHRAE 140-2004.

Energy Plus				
Casos: Baixa densidade	600	610	620	630
Aquecimento Anual (MWh)				
Mínimo	4.296	4.355	4.613	5.050
Máximo	5.709	5.786	5.944	6.469
Média	5.090	5.146	5.407	5.783
Energy Plus	4.497	4.529	4.650	4.949
Diferença %	-11.6%	-12.0%	-14.0%	-14.4%
Energy Plus dentro do intervalo	Sim	Sim	Sim	Não
Arrefecimento Anual (MWh)				
Mínimo	6.137	3.915	3.417	2.129
Máximo	7.964	5.778	5.004	3.701
Média	6.832	4.964	4.218	2.832
Energy Plus	6.919	4.901	4.352	2.933
Diferença %	1.3%	-1.3%	3.2%	3.6%
Energy Plus dentro do intervalo	Sim	Sim	Sim	Sim
Casos: Alta Densidade				
	900	910	920	930
Aquecimento Anual (MWh)				
Mínimo	1.170	1.575	3.313	4.143
Máximo	2.041	2.282	4.300	5.335
Média	1.745	2.066	3.973	4.745
Energy Plus	1.244	1.518	2.920	3.500
Diferença %	-28.7%	-26.5%	-26.5%	-26.2%
Energy Plus dentro do intervalo	Sim	Não	Não	Não
Arrefecimento Anual (MWh)				
Mínimo	2.132	0.821	1.840	1.039
Máximo	3.415	1.872	3.092	2.238
Média	2.678	1.447	2.552	1.644
Energy Plus	2.580	1.280	2.777	1.836
Diferença %	-3.7%	-11.6%	8.8%	11.7%
Energy Plus dentro do intervalo	Sim	Sim	Sim	Sim

5. Resultados

Nesta secção serão apresentados os resultados do caso de estudo deste relatório que foi descrito ao longo do capítulo 3. Tal como já foi mencionado atrás os resultados foram obtidos duma forma iterativa, pois estes numa fase inicial eram muito diferentes do que seria de esperar. Depois da primeira solução, face à elevada discrepância desses resultados foi necessário recorrer à norma ASHRAE 140-2004 para determinar as potenciais falhas existentes nas simulações em ambos os programas de simulação. Desta morosa análise surgiram algumas conclusões que poderiam justificar as diferenças encontrados numa fase inicial entre o programa TRACE 700 e o Energy Plus, nomeadamente ao nível dos algoritmos de cálculo utilizados para determinar o coeficiente de convecção na envolvente exterior, e ainda a maneira como trata a quantidade de calor transmitida por radiação dos equipamentos, iluminação e pessoas.

Numa fase final simulou-se de novo o edifício e foi-se verificar se as diferenças existentes estavam ligadas com as conclusões tiradas aquando das verificações feitas aos modelos propostos pela ASHRAE 140-2004. Nas secções que se seguem vão ser apresentadas algumas análises complementares que poderão justificar as diferenças encontradas nos resultados finais.

Dada a limitação do TRACE 700 para colocar mais do que um tipo de janela por fachada, as simulações apresentados não contêm a “janela de luz natural”.

Então nas secções que se seguem vão ser efectuados três estudos distintos. No primeiro vai-se comparar os ficheiros climáticos do Porto dos dois softwares, pois como já foi explicado atrás ambos os softwares têm um algoritmo de transformação dos ficheiros climáticos de uma base normalizada para a sua base, o que pode provocar algumas diferenças dos dados do clima, e por sua vez nas necessidades energéticas finais. Com o segundo estudo pretende-se analisar a influência da envolvente no erro final, pois aquando dos estudos feitos aos modelos de teste da ASHRAE verificou-se que os algoritmos de cálculo utilizados para determinar os coeficientes de convecção tinham uma influência bastante significativa na condução de calor pela envolvente. O terceiro, consiste num estudo da interferência da quantidade de calor trocada por radiação proveniente dos equipamentos, iluminação e pessoas.

Por fim serão apresentados os resultados finais.

5.1. Comparação dos ficheiros climáticos do Porto

Nesta secção vão ser apresentadas as diferenças entre os dados climáticos do Porto utilizados para simular o caso de estudo deste relatório no Energy Plus e no TRACE 700.

Estes programas de simulação contêm algoritmos internos para converter os ficheiros climáticos normalizados nas as suas bases, ou seja, EPW e IWC respectivamente para o Energy Plus e TRACE 700. Para confirmar se o processo de alteração dos formatos não teve implicações nos resultados das variáveis climáticas vão-se apresentar alguns resultados das comparações ao longo desta secção.

Na sequência de uma análise aos valores contidos nos ficheiros climáticos de ambos os softwares verifica-se que a temperatura é aproximadamente similar ao longo de todo o ano. Fazendo uma análise aos graus dias para uma base de 20 °C verifica-se que não existem diferenças significativas. A amplitude máxima na diferença de temperatura é de 2.6 °C, esta ocorre no dia 11 de Novembro às 10h como se pode ver no gráfico que seguinte. Para ter uma ideia como varia a diferença de temperatura entre os dois ficheiros climáticos ao longo de todo ano pode ser consultado o anexo 5.

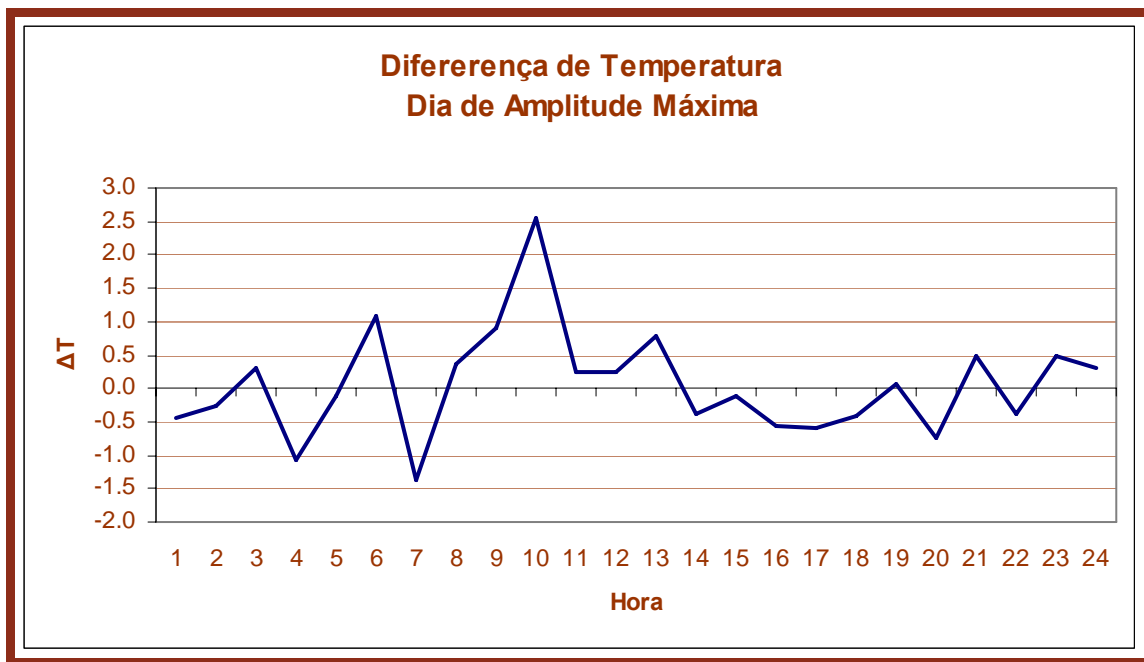


Figura 29- Diferença de temperaturas horária dos ficheiros climáticos no dia de diferença máxima (11de Nov.).

Na tabela que segue encontra-se um resumo das temperaturas máximas e mínimas, bem como os graus dia de aquecimento e arrefecimento calculados para uma base de 20°C. Relativamente à temperatura máxima, esta ocorre no dia seis de Julho em ambos os climas com uma diferença de temperaturas de 0,9 °C.

A temperatura mínima é de 0°C nos dois casos, este valor é registado a 25 de Janeiro em ambos os casos. No anexo 9, estão presentes algumas tabelas de comparação de vários dados climáticos.

Tabela 23 – Resumo das Temperaturas extremas nos ficheiros climáticos do Porto.

	Temperatura Exterior	
	TRACE	Energy Plus
Máximo	32.2	31.3
Mínimo	0.0	0.0
Média	14.3	14.3
Graus dia Arrefecimento	121	118
Graus dia Aquecimento	2195	2193

Outro aspecto importante é variação da radiação solar ao longo de todo ano. Duma verificação horária nota-se que existem variações significativas no que respeita à radiação directa horária, esta chega a atingir aproximadamente 130 W/m² de diferença (ver anexo 6), no entanto a radiação directa mensal é aproximadamente igual nos dois casos.

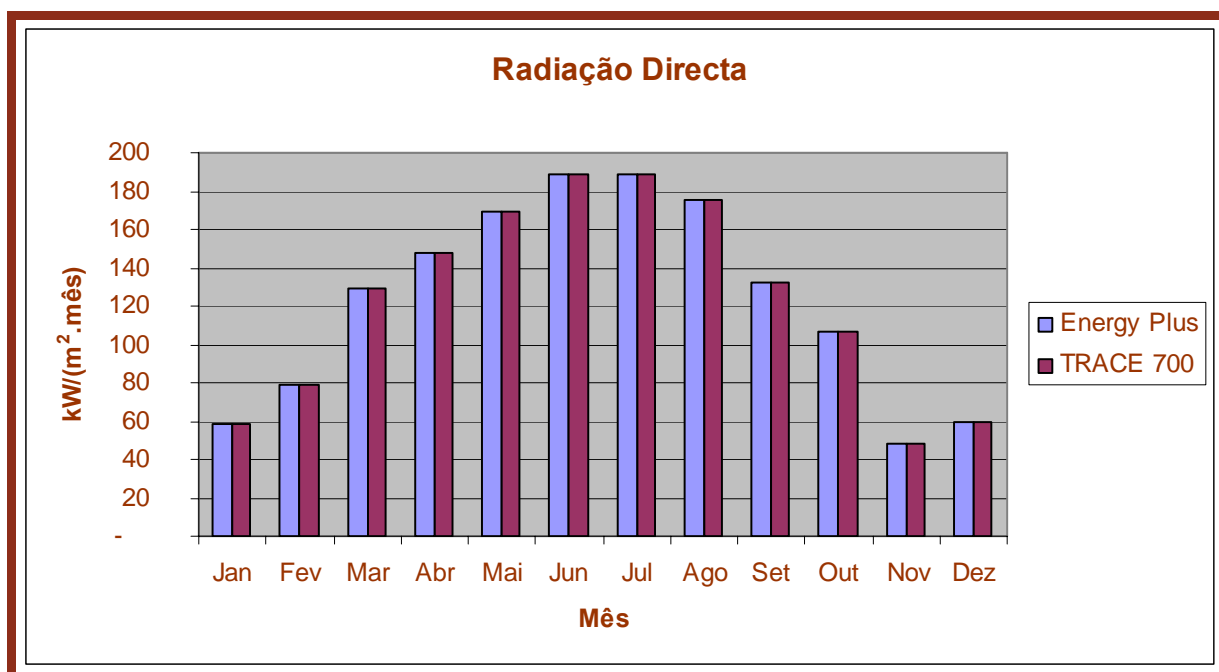


Figura 30- Diferença da radiação directa mensal dos ficheiros climáticos do Porto.

No que respeita à radiação difusa, esta apresenta uma diferença máxima ao longo de uma hora de aproximadamente de 60 W/m² (ver anexo 7). No gráfico que se segue esta representada a radiação difusa mensal.

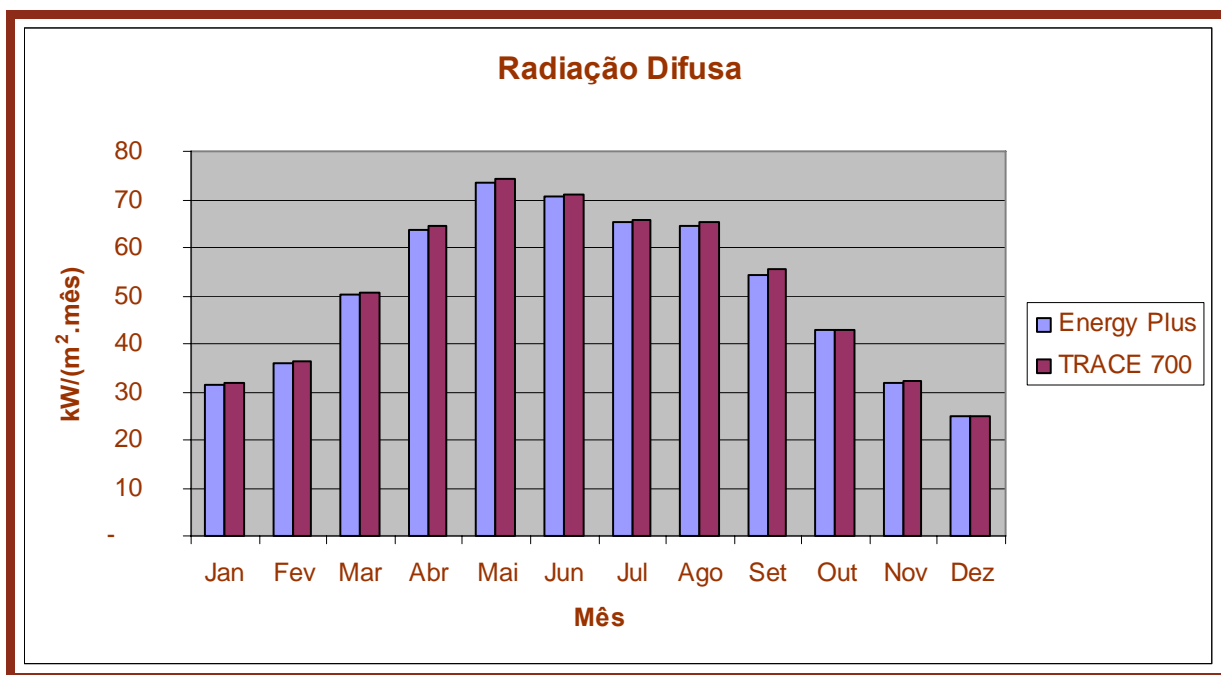


Figura 31- Diferença da radiação difusa mensal dos ficheiros climáticos do Porto.

Analisando a diferença da intensidade da velocidade do vento horária entre os valores utilizados na TRACE 700 e Energy Plus, verifica-se que esta chega a atingir 3m/s (ver anexo 8), no entanto quando se compara a velocidade média mensal verifica-se que esta é exactamente igual, à excepção do mês de Janeiro.

Tabela 24 – Velocidade média mensal do Porto.

Velocidade Média Mensal [m/s]		
Mês	TRACE 700	Energy Plus
Jan	2.9	2.8
Fev	4.0	4.0
Mar	3.9	3.9
Abr	3.3	3.3
Mai	4.1	4.1
Jun	1.6	1.6
Jul	3.2	3.2
Ago	2.2	2.2
Set	1.9	1.9
Out	3.7	3.7
Nov	3.1	3.1
Dez	1.9	1.9

Desta análise podemos concluir que as variáveis em estudo têm aproximadamente o mesmo valor de velocidade média mensal em ambos os ficheiros. As variações de velocidade horária (anexo 8 e 9) podem provocar cargas térmicas diferentes hora a hora, pois as trocas de calor através da envolvente são influenciadas pela temperatura da parede e por sua vez esta é função da velocidade do vento, temperatura do meio ambiente, radiação incidente, entre outras variáveis.

No anexo 9, encontram-se tabelas de resumo dos dados climáticos. Da sua análise verifica-se que a variação horária mais significativa diz respeito à velocidade, esta variável chega a atingir 23% de diferença, o que pode ter influência no comportamento da envolvente.

5.2. Contribuição da envolvente para o erro final

De acordo com as análises feitas aos casos de estudo da ASHRAE 140-2004, conclui-se que os algoritmos de cálculo dos coeficientes de convecção exterior têm um impacto significativo no cálculo das necessidades térmicas anuais. Então, como a quantidade de calor trocada pela envolvente é dependente dos coeficientes de convecção superficial, de seguida serão apresentados os resultados das necessidades térmicas finais provenientes unicamente da envolvente.

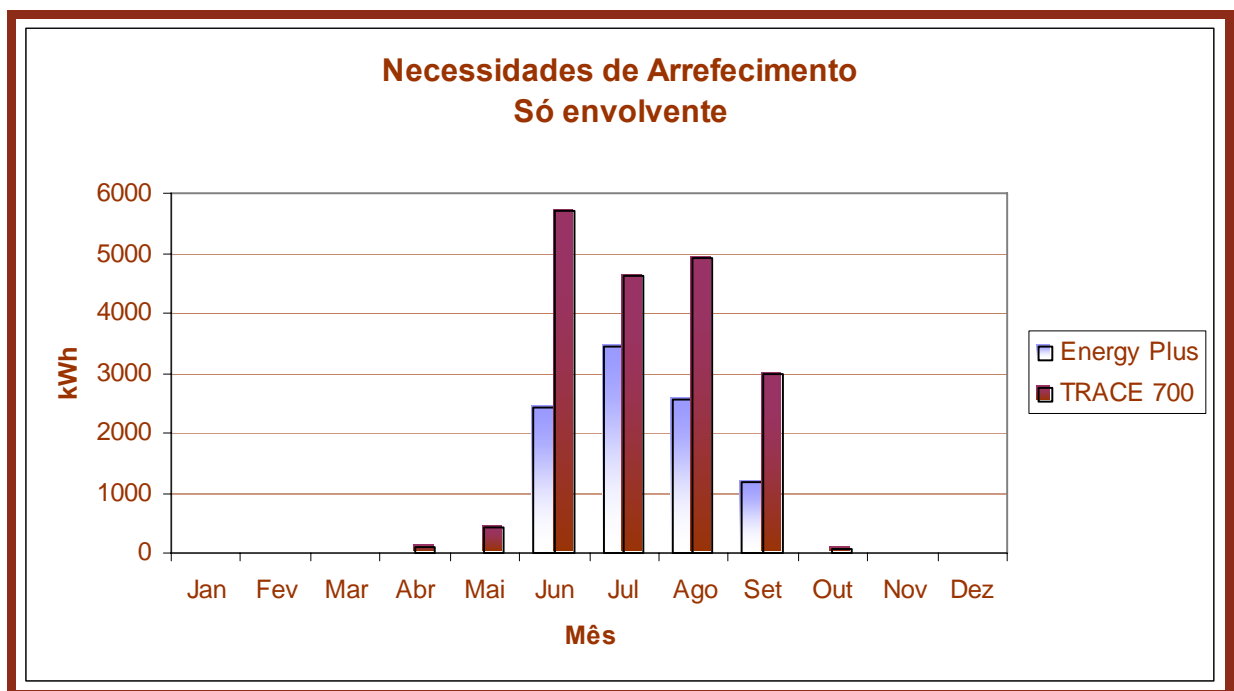


Figura 32 – Necessidades térmicas de arrefecimento provenientes da envolvente.

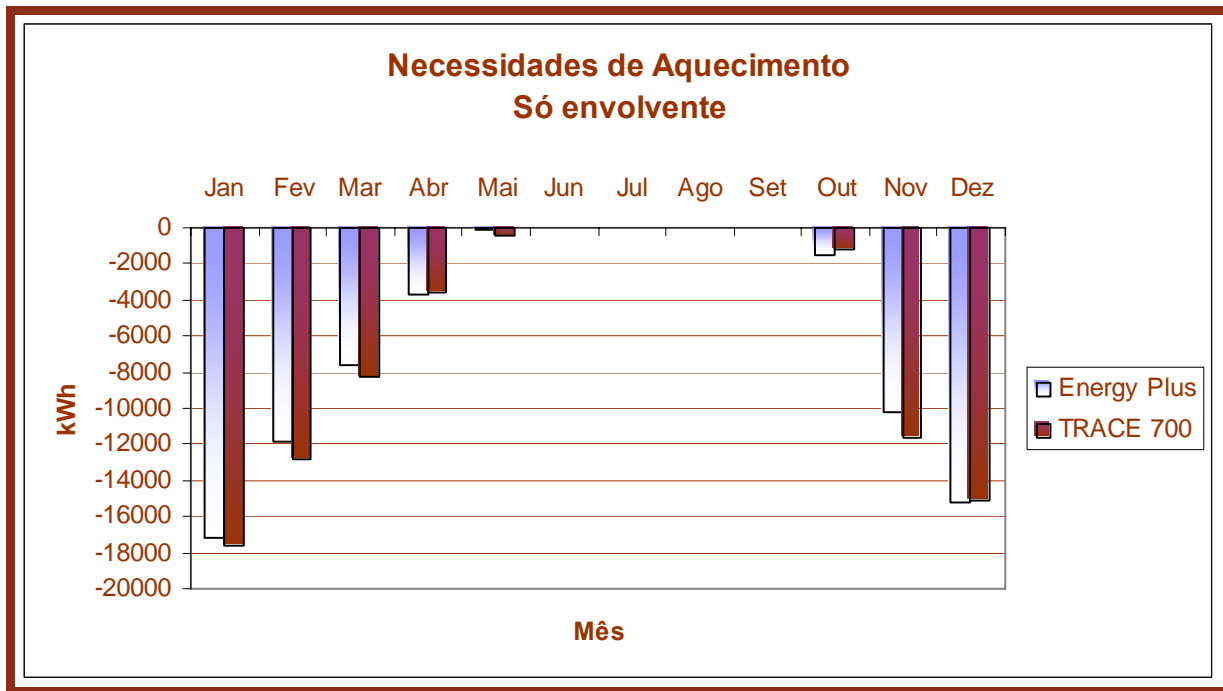


Figura 33 - Necessidades térmicas de aquecimento provenientes da envolvente.

Analisando o estudo feito à troca de calor com o meio ambiente pela envolvente do edifício, constata-se que existe um erro sistemático nas necessidades de aquecimento. Nas necessidades de arrefecimento, período de verão, existe um claro desfasamento entre os resultados de ambos os softwares. No caso do TRACE 700 os resultados não seguem a tendência que seria de esperar. Era espectável que o valor máximo de carga térmica pela envolvente fosse no mês de Julho tal como no caso do Energy Plus.

Para perceber o que se estava a passar recorreu-se a uma análise horária. Esta análise foi limitada à hora de carga térmica máxima dada pelo TRACE 700. Seria de elevado interesse fazer uma verificação mais extensa, mas o TRACE 700 não permite ver hora a hora o comportamento da envolvente, apenas disponibiliza esses dados para a hora de carga térmica máxima. Desta verificação resultou que o Energy Plus esta a perder calor pela envolvente enquanto que o TRACE 700 esta a ganhar.

O esquema que segue é representativo do que está a acontecer na hora de carga térmica máxima do “Open Space 110” .

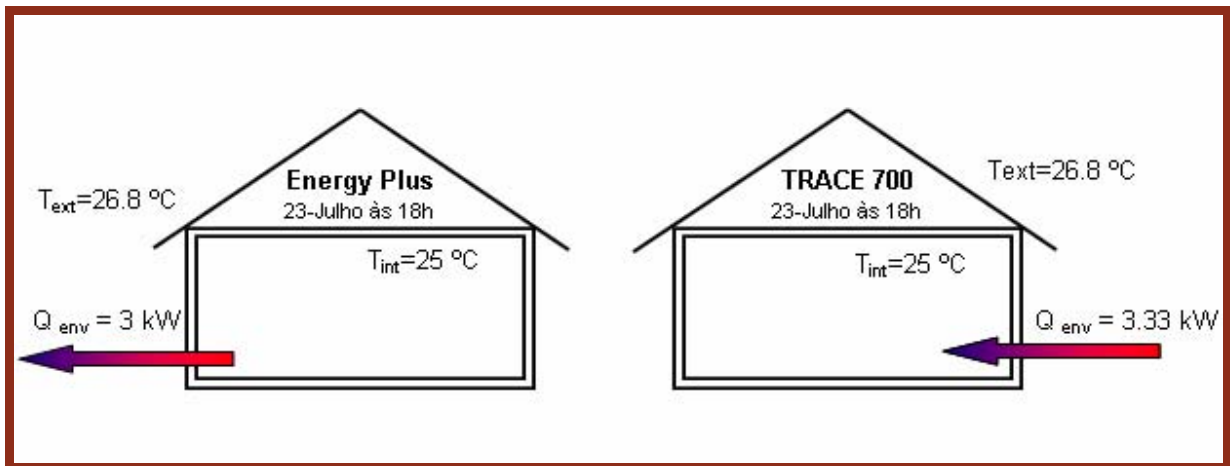


Figura 34 – Comparação do comportamento da envolvente no dia 23 de Julho às 18h.

Após esta análise seria interessante comparar os coeficientes de convecção hora a hora calculados em ambos os softwares, mas por limitações nos “Outputs” do TRACE 700 não foi feito. No entanto, já foi verificado atrás que os algoritmos de cálculo destes coeficientes dão origem a necessidades térmicas diferentes. Apesar de não se conhecer em detalhe o que ocorre, é possível concluir que os softwares tratam a envolvente de maneira diferente.

5.3. Análise do calor trocado por radiação

Na sequência da análise de resultados aquando da introdução do edifício, verificou-se que os programas reagem de forma diferente à introdução de equipamentos eléctricos, para tentar perceber o que se estava a passar fizeram-se estudos dedicados a este acontecimento.

No sentido a tentar explicar estas diferenças de uma forma sucinta e objectiva reduziu-se o edifício ao “Open Space 110” e admitiram-se algumas simplificações, nomeadamente:

- Controlo de Temperatura: “Deadband” entre 20 e 25°C.
- Piso térreo adiabático,
- Sistema activo 24h/dia,
- Potência de equipamentos – 15 W/m² durante 24h/dia.

Para analisar o impacto de cada variável, a construção do edifício foi feita de uma forma sequencial nos dois softwares. Numa primeira fase introduziu-se toda a envolvente e constatou-se que os consumos inerentes eram similares nos dois softwares com um ligeiro desfasamento como era de esperar, face ao estudo de verificação dos casos da ASHRAE 140-2004.

Aquando da introdução dos equipamentos verificaram-se algumas diferenças na maneira como os softwares tratam a carga proveniente destes. Numa fase inicial as simulações foram feitas com as seguintes considerações para a carga proveniente apenas dos equipamentos:

- 100% de carga sensível com 100% por convecção e 0% por radiação,

Os resultados desta simulação deram algo que não se estava à espera, pois as necessidades térmicas calculadas pelo Energy Plus foram superiores às do TRACE 700, o que contraria a tendência verificada até aqui.

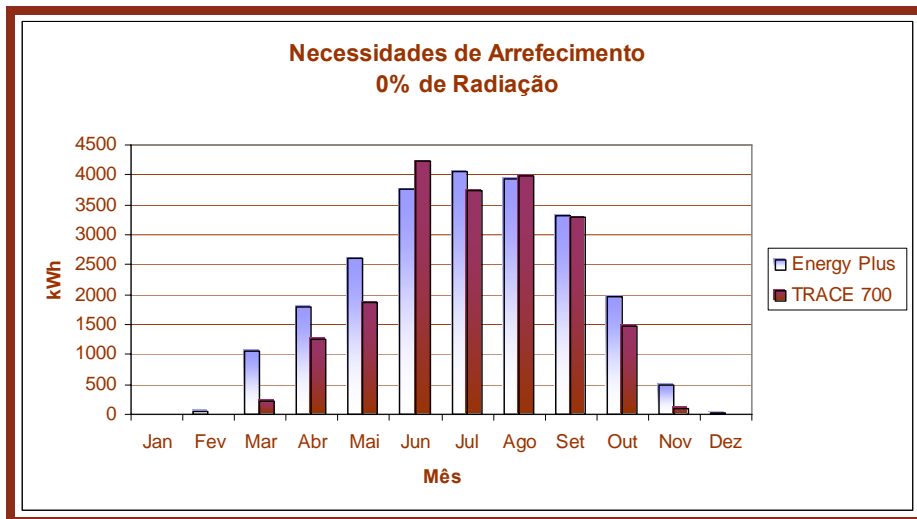


Figura 35 – Necessidades de arrefecimento – 0 % de componente radiativa dos equipamentos.

Na sequência destes resultados foram feitas mais duas simulações. Estas simulações foram semelhantes à anterior mas alterando a percentagem de calor que é trocada por radiação, respectivamente 50% e 100%.

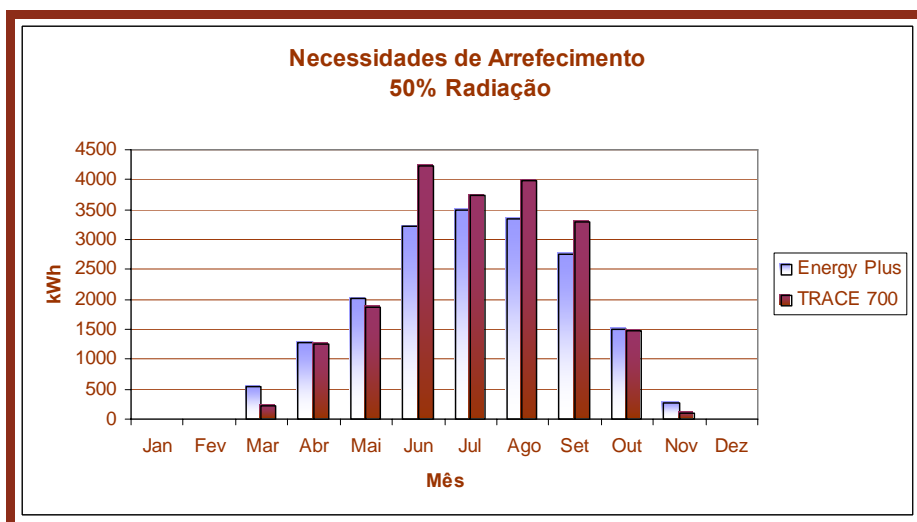


Figura 36 – Necessidades de arrefecimento - 50% de componente radiativa dos equipamentos.

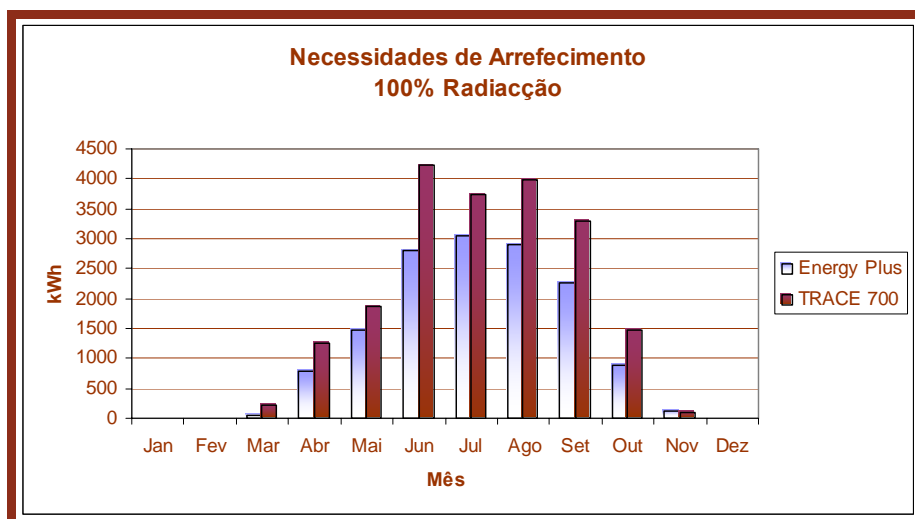


Figura 37 – Necessidades de arrefecimento - 100% de componente radiativa dos equipamentos.

Da análise dos gráficos anteriores conclui-se que o TRACE 700 não reage às alterações da quantidade de calor trocada por radiação. Esta aproximação do TRACE 700, de fixar a quantidade de calor que é trocada por radiação com os equipamentos, pode justificar algumas diferenças que existam nos resultados finais entre os dois programas.

No Energy Plus o aumento da radiação provoca uma diminuição das necessidades de arrefecimento, como se verifica na tabela seguinte:

Tabela 25 – Comparação das necessidades térmicas com a condução pela envolvente.

	Perdas de Calor Envolvente	Nec. Térmica Aquecimento	Nec. Térmica Arrefecimento
	kWh/ano	kWh/ano	kWh/ano
0% Rad	6.855	0.0	23068
50% Rad	8.065	18.7	18418
100% Rad	9.210	158.1	14349

O aumento da percentagem de radiação, tem como consequência um aumento das temperaturas da sua envolvente, que por sua vez se reflecte na quantidade de calor trocado com o meio ambiente. Esta questão é especialmente importante em edifícios de serviços, em que as necessidades de arrefecimento são preponderantes. Outro aspecto muito importante é o facto de se conseguir uma diminuição de 22% nas necessidades de arrefecimento anuais, à custa de um aumento de 12% na quantidade de calor trocada para o meio ambiente. De acordo com estes resultados pode-se ainda acrescentar que a optimização da envolvente, no sentido do aumento da condução, é mais interessante à medida que seja maior a percentagem radiativa dos ganhos internos, de que podem resultar poupanças energéticas significativas.

5.4. Resultados finais

Nesta secção serão apresentados os resultados referentes ao caso de estudo descrito na secção 3 .

Numa primeira análise, estudaram-se as necessidades térmicas de arrefecimento e aquecimento do espaço sem considerar a insuflação de ar exterior.

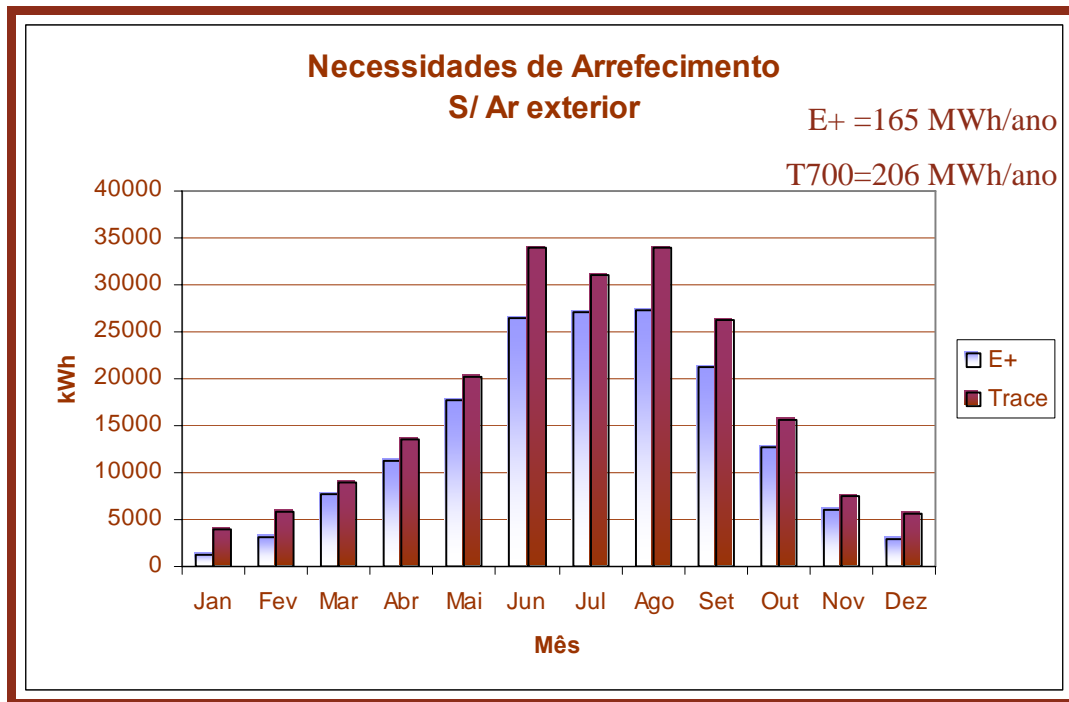


Figura 38 – Comparação das Nec. de arrefecimento para o modelo sem ar exterior.

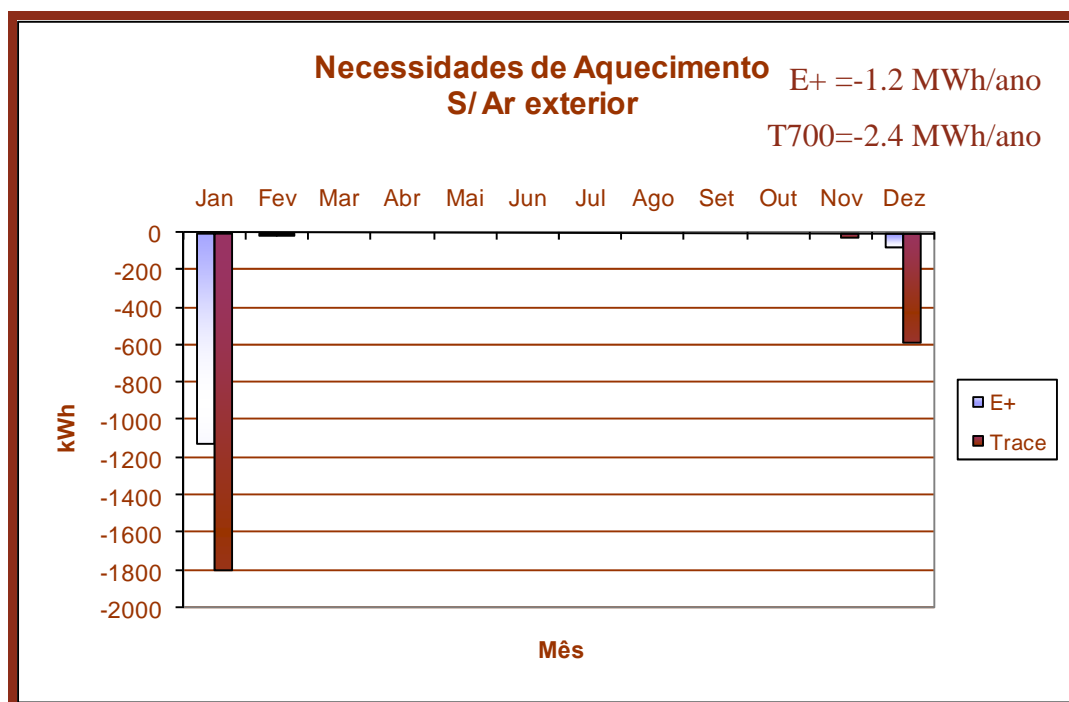


Figura 39 - Comparação das Necessidades de Aquecimento para o modelo sem ar exterior.

Analisando os gráficos conclui-se que as necessidades de arrefecimento do TRACE 700 são sempre superiores às do Energy Plus (22%). A diferença mais acentuada ocorre no período de Verão. Cruzando os dados obtidos anteriormente para a carga térmica da envolvente (secção 4.2), é possível concluir que esta tem um efeito significativo na variação destes resultados finais.

Na ausência de ar exterior praticamente não é necessário aquecer o espaço.

Com o gráfico que se segue pode-se verificar o efeito da introdução de ar exterior tratado a 18°C. A fixação deste “setpoint” obriga ao um gasto adicional de energia para aquecer o ar, em algumas situações, mesmo quando as necessidades do espaço são de arrefecimento, mas em termos globais permite uma redução das necessidades de arrefecimento: 23% e 34%, respectivamente, no TRACE 700 e no Energy Plus (ver Tabela 26). A diferença existente neste caso entre os dois softwares é de 37%.

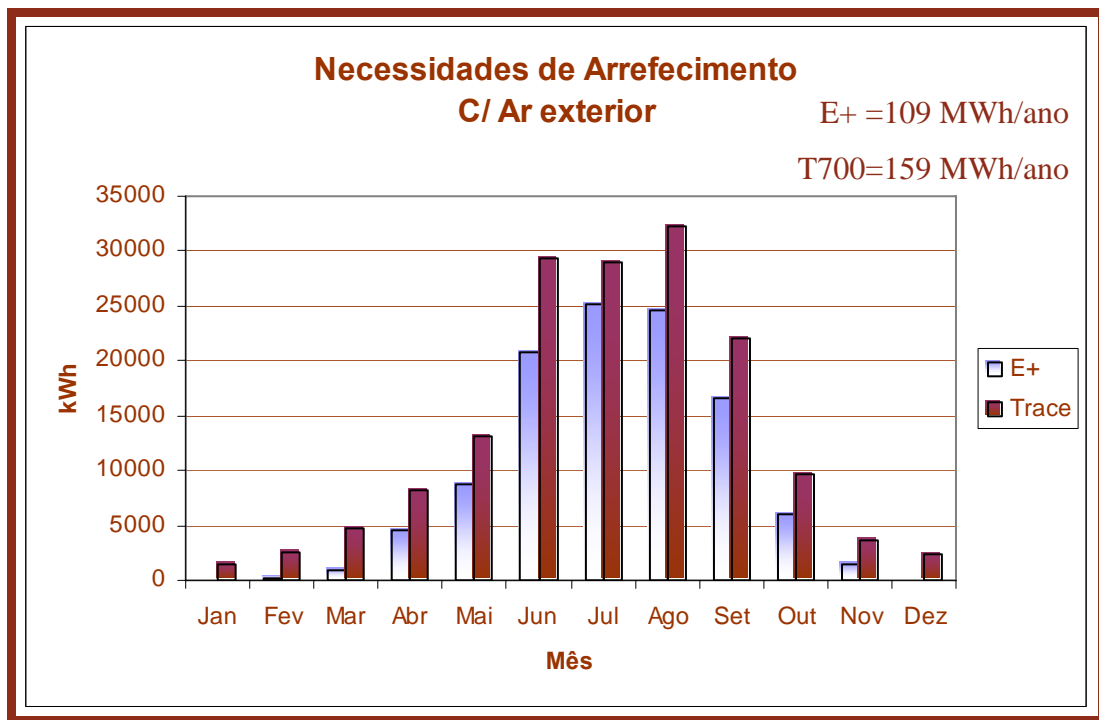


Figura 40 – Estudo da influência da introdução de ar exterior tratado a 18 °C nas necessidades de arrefecimento.

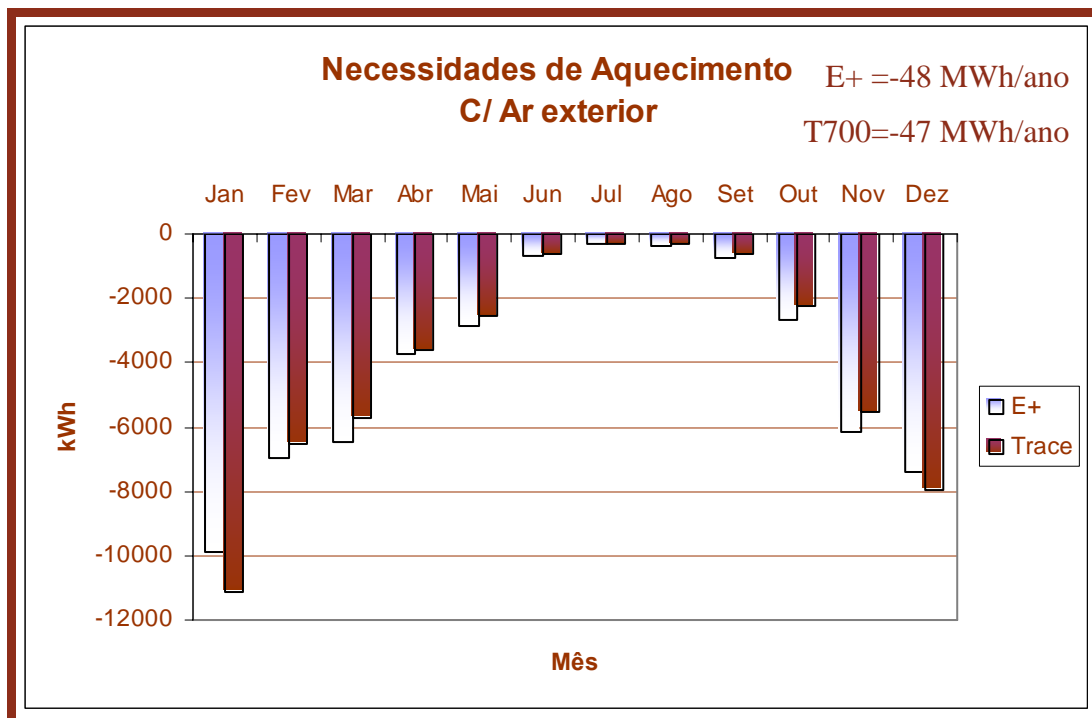


Figura 41 – Estudo da influência da introdução de ar exterior tratado a 18 °C nas necessidades de aquecimento.

De seguida estão apresentados os efeitos da simulação do edifício com aproveitamento de iluminação natural. Para além da redução das necessidades térmicas, existe uma diminuição significativa no consumo de electricidade para iluminação. Em ambos os programas de simulação a redução proveniente do aproveitamento da iluminação natural é semelhante, e traduz-se numa economia de energia de cerca de 40% para a iluminação. Associada a esta redução tem-se uma diminuição das necessidades de arrefecimento mas também um ligeiro aumento das necessidades de aquecimento.

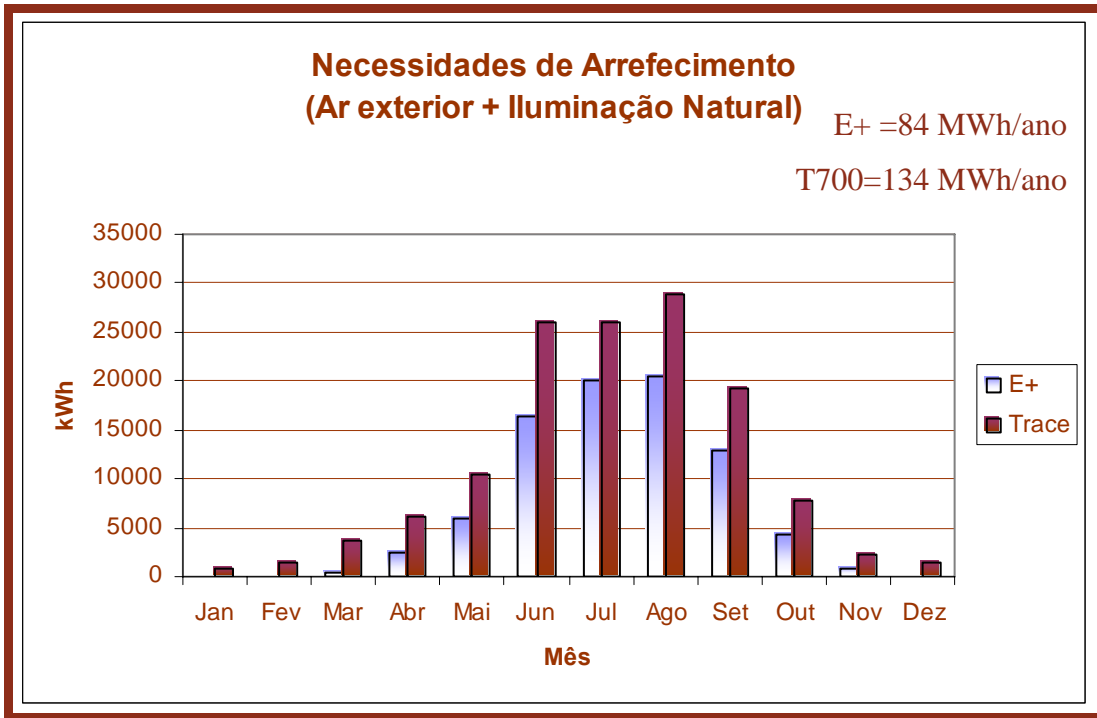


Figura 42 - Comparação do efeito da iluminação natural nas necessidades de arrefecimento.

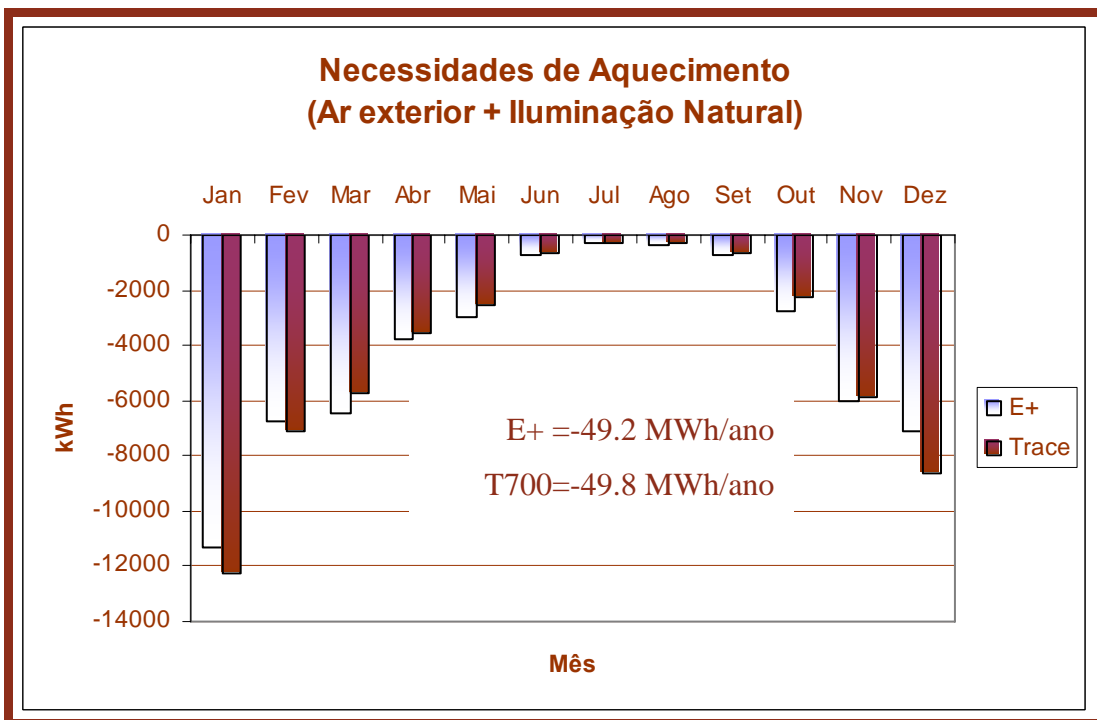


Figura 43- Comparação do efeito da iluminação natural nas necessidades de aquecimento.

Nas tabelas que seguem encontram-se compilados todos os resultados obtidos e relatados ao longo desta secção.

Tabela 26 – Resumo das necessidades térmicas para os vários casos testados (MWh/ano)

Caso	TRACE 700		Energy Plus	
	Arrefecimento	Aquecimento	Arrefecimento	Aquecimento
S/ Ar Exterior	206	-2.4	165	-1.2
C/ Ar Exterior	159	-47	109	-48
C/ Ar Ext.+ Ilum. Natural	134	-49	84	-50

Tabela 27 – Resumo das necessidades térmicas para os vários casos testados (kgep/(m².ano))¹¹.

Caso	TRACE 700	Energy Plus
S/ Ar Exterior	17.4	13.9
C/ Ar Exterior	14.5	10.4
C/ Ar Ext. + Iluminação Natural	12.5	8.3

Dado que a legislação em vigor impõe um valor limite de consumo de energia final, 35 kgep/(m².ano) neste caso, resta verificar a situação para o caso de estudo.

Nos gráficos seguintes encontram-se respectivamente os consumos do Energy Plus e TRACE 700.

¹¹ - Os Factores de conversão utilizados entre energia útil e energia primária foram os definidos no DL 80/2006. (Para a electricidade: Fpu=0.29 kgep/kWh e para os combustíveis sólidos, líquidos e gasosos: Fpu=0.086 kgep/kWh)

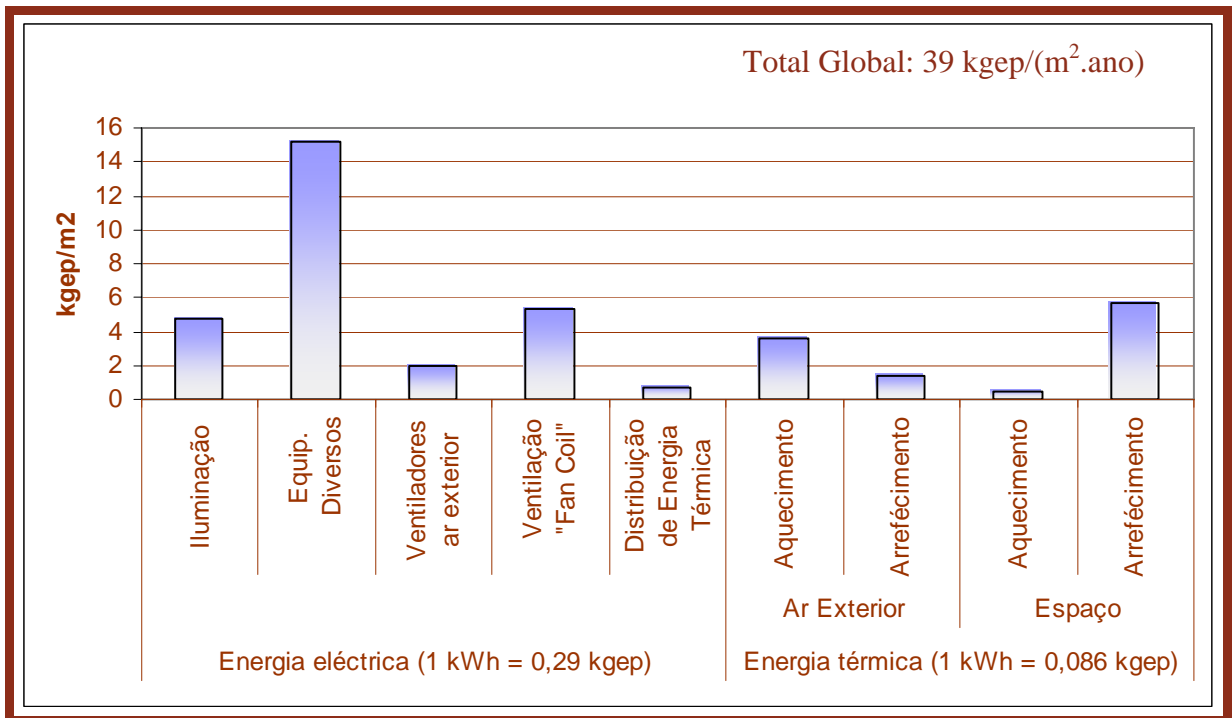


Figura 44 – Consumo de energia primária referente ao programa Energy Plus.

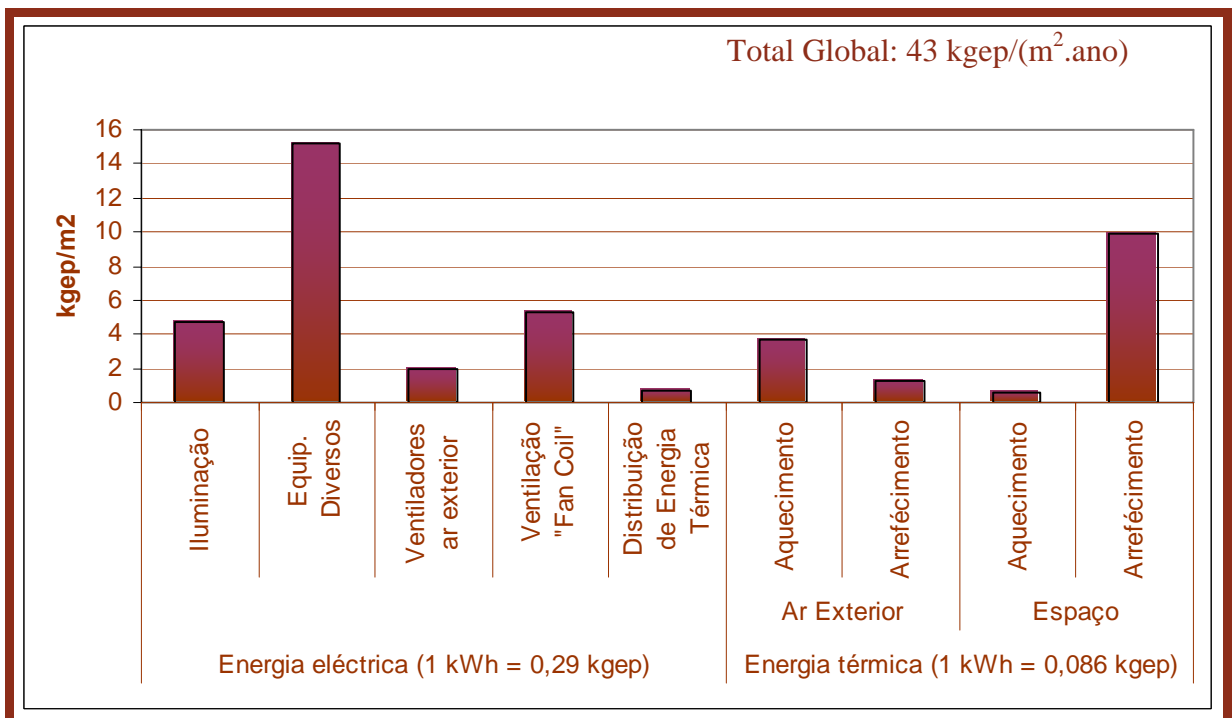


Figura 45 - Consumo de energia primária referente ao programa TRACE 700.

Para comparar os resultados referentes aos consumos de energia primária, provenientes de aquecimento e arrefecimento, em ambos os softwares, apresenta-se o gráfico que se segue.

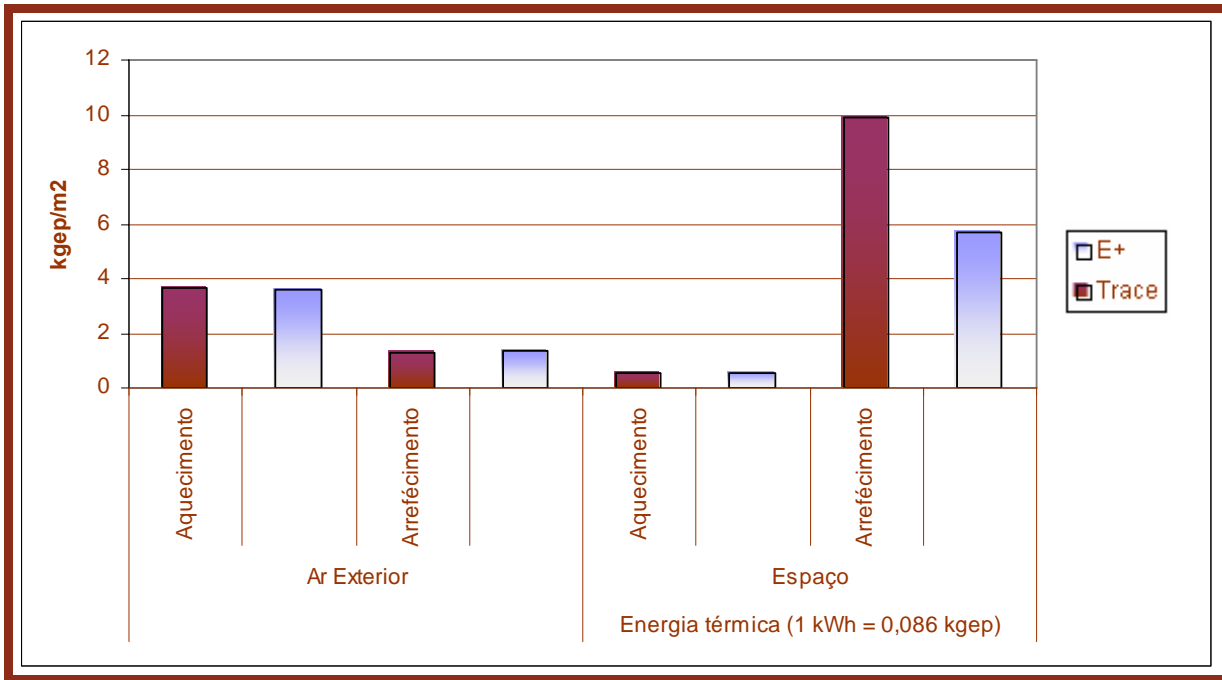


Figura 46 – Comparação do consumo de energia primária entre ambos os softwares.

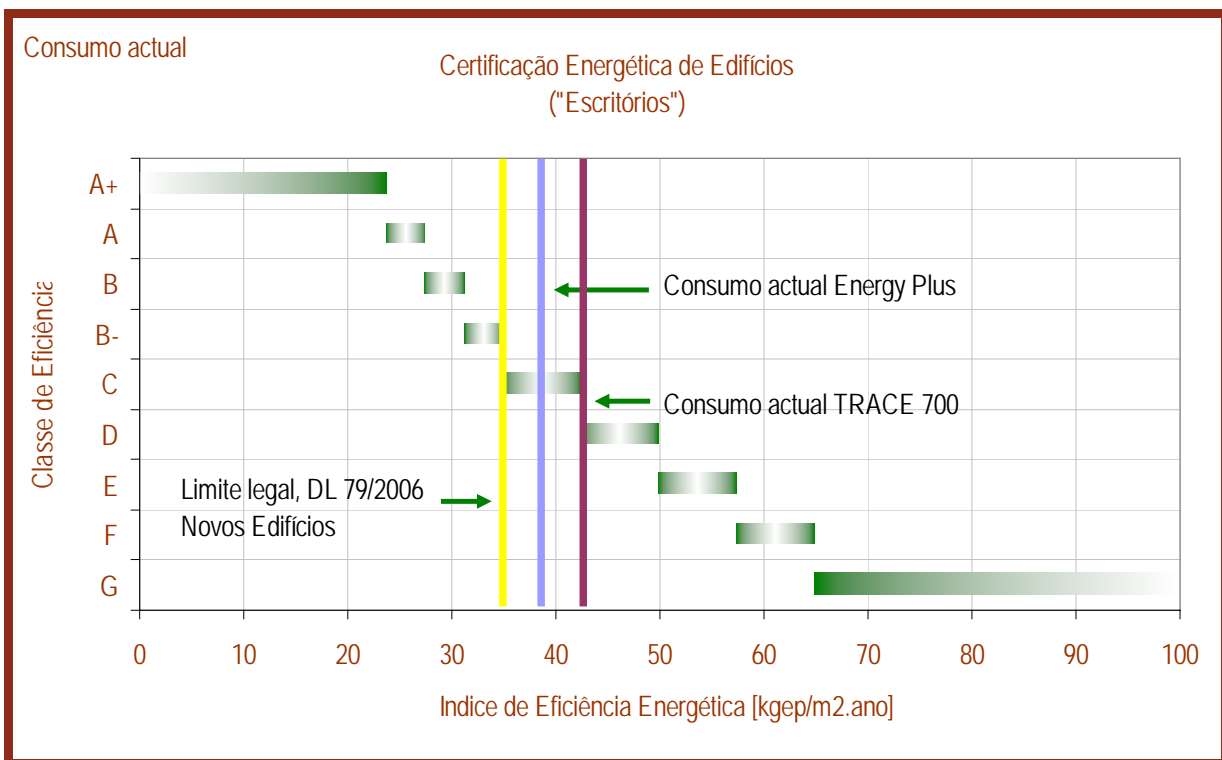


Figura 47 – Posição do edifício face à legislação nacional

Da figura anterior conclui-se que, apesar do esforço suplementar dedicado à tentativa de construção de um edifício com base em medidas conducentes a maior eficiência energética, o consumos de energia primária são superiores ao permitido.

6. Conclusões

Neste trabalho pretenderam-se comparar dois programas de simulação térmica detalhada – Energy Plus e TRACE 700 – e aferir da fiabilidade dos resultados obtidos por este último.

TRACE 700:

Os seus principais trunfos são a interface bastante amigável, a relativa simplicidade e a rapidez de introdução de características geométricas e operacionais de um edifício. Fornece ainda uma grande quantidade de relatórios predefinidos, que resumem os resultados mais importantes, estão bem organizados e são de fácil compreensão. São ótimos para utilizadores com muita experiência e espírito crítico. No entanto, quando se pretende fazer uma análise mais específica, hora a hora, esta pode-se tornar complicada, pois a quantidade de variáveis que podem ser extraídas é algo limitada.

A introdução dos sistemas AVAC neste programa é rápida mas algo circunscrita a uma quantidade predefinida, castrando a possibilidade de utilização de sistemas mais elaborados. Este é um ponto importante de comparação já que a definição de sistemas no Energy Plus é totalmente diferente: manual e bastante morosa. Ao nível dos outputs o detalhe é incomparavelmente superior no Energy Plus.

Outra grande desvantagem do TRACE 700 consiste no facto de não possibilitar uma análise a três dimensões (a visualização 3D é muitíssimo útil para verificação da construção da envolvente). Também não é possível a colocação de janelas diferentes numa mesma fachada, o que surgiu como limitação neste Caso de Estudo. Esta limitação impossibilita o estudo de soluções de iluminação natural como, por exemplo, a utilização de “daylight windows” independentes de “view windows”. Quanto ao sombreamento, só permite a utilização de sistemas convencionais. A impossibilidade de colocar sistemas de sombreamento complexos inviabiliza a execução de estudos de optimização do controle destes dispositivos.

Por fim, a grande diferença surgiu com a análise dos resultados (nomeadamente das necessidades de arrefecimento), que mostraram discrepâncias consideráveis, face ao Energy Plus (no Caso de Estudo) e face a outros programas de simulação (casos da norma de acreditação), com valores bastante superiores (diferenças médias da ordem dos 40%). Deve-se

ainda frisar que numa primeira abordagem as diferenças obtidas foram de uma magnitude ainda maior, e que a redução destas exigiu uma exaustiva verificação das metodologias de ambos os programas, donde se concluiu que a escolha de diferentes processos de cálculo do coeficiente de convecção exterior influencia fortemente os resultados. Também surgiu evidência que o programa é insensível a variações da fracção radiativa dos ganhos internos. Esta questão tem uma forte influência na quantidade de calor trocada pela envolvente.

Energy Plus

Este programa destaca-se pelo rigor na modelação da geometria do edifício, sistemas AVAC e pela possibilidade de integração de modelos que facilitam os estudos e a optimização energética. Os resultados oferecem maior segurança e fiabilidade. As grandes desvantagens encontram-se ao nível da interface, nada amigável, da dificuldade de aprendizagem e da morosidade na introdução de dados.

Tendo em conta as considerações anteriores pode-se concluir o seguinte: a escolha de um programa de simulação depende dos objectivos que o utilizador pretende alcançar, do seu conhecimento das ferramentas, do tempo disponível e do rigor exigido. De uma forma geral o TRACE 700 é indicado para situações em que se pretenda uma simulação rápida, em casos que exijam menos rigor e detalhe dos outputs, especialmente na realização de estudos comparativos

O Energy Plus é uma ferramenta mais potente mas que exige do utilizador bastante experiência e conhecimentos avançados, em muito maior grau que o TRACE 700. É indicada para estudos que solicitem maior rigor e/ou informações e parâmetros mais detalhados.

Apesar da discrepância das necessidades de arrefecimento entre os *softwares*, cerca de 40% no caso de estudo, existem outros estudos que apresentam valores muito semelhantes, por exemplo, a energia eléctrica poupada com a utilização de controladores de iluminação natural, 40%. A redução das necessidades de arrefecimento associadas a este é de 13% na TRACE 700 e de 16% no Energy Plus. As necessidades de aquecimento têm um valor absoluto muito diminuto.

O contacto com ambos os programas permitiu ainda concluir que a simulação térmica de edifícios é algo de elevada complexidade e sensibilidade. Podem existir várias complicações que alteram os resultados gerais e, de uma forma geral, todos os programas acabam por obter resultados diferentes, embora idealmente da mesma ordem de grandeza. A simulação requer muita dedicação e experiência!

Referências

- [1] BCSD Portugal, Manual de boas práticas de eficiência energética, 2005.
- [2] *Edifícios Saudáveis Consultares*.
- [3] *Regulamento de Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE), Decreto-Lei N° 79 de 4 de Abril, 2006*, Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações: Portugal.
- [4] TRACE 700, *Building Energy and Economic Analysis*, version 6, 2005.
- [5] Energy Plus, *Energy Plus Manual*, version 2.2, 2008
- [6] *ASHRAE Handbook: Fundamentals*, SI Edition, Atlanta 2005.
- [7] Green building bible, “The low energy design technical reference”, Volume 2, 3ª edição, 2006.
- [8] *Regulamento das Características de comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), Decreto-Lei N°80 de 4 de Abril, 2006*, Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações: Portugal.
- [9] *ASHRAE Design Guide, Advanced Energy Design Guide for Small Office Buildings*, 2004.
- [10] Vaquero, Petra, *Sistemas de Ventilação Híbridos em Edifícios*, 2006, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP): Porto, Portugal.
- [11] *ASHRAE STANDART: Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs*, ASHRAE 140-2004.
- [12] *Desempenho Energético em Edifícios, Decreto-Lei N° 78 de 4 de Abril, 2006*, Ministério da Economia e da Inovação: Portugal.
- [13] Gonçalves, Helder e Graça, João M., *Conceitos Bioclimáticos para Edifícios em Portugal*, 2004, Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação (INETI).
- [14] *Matriz Energética do Porto*, 2008, Agência da Energia do Porto (AdE Porto).

- [15] CIBSE standard tests for the assessment of building services design software, 2004.
- [16] BCSD Portugal, Eficiência Energética em Edifícios.
- [17] <http://www.energyplus.gov/>
- [18] <http://www.trane.com/>
- [19] <http://www.ineti.pt>

Anexos

Anexo 1- Diferença de temperaturas dos ficheiros climáticos de “Colorado/Golden” ao longo de um ano.

Anexo 2- Diferença da radiação directa dos ficheiros climáticos de “Colorado/Golden” ao longo de um ano.

Anexo 3 - Diferença da radiação difusa dos ficheiros climáticos de “Colorado/Golden” ao longo de um ano.

Anexo 4 - Diferença da velocidade horária dos ficheiros climáticos de “Colorado/Golden” ao longo de um ano.

Anexo 5 - Diferença da temperatura horária dos ficheiros climáticos do Porto ao longo de um ano.

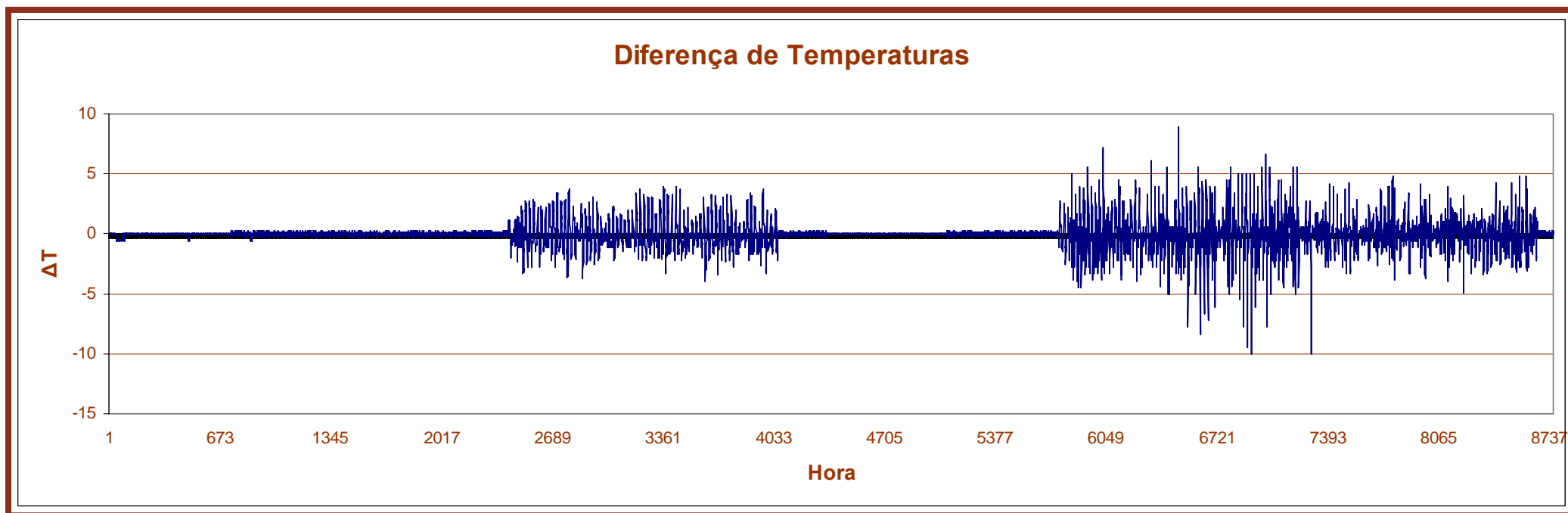
Anexo 6 - Diferença da radiação directa horária dos ficheiros climáticos do Porto ao longo de um ano.

Anexo 7 - Diferença da radiação difusa horária dos ficheiros climáticos do Porto ao longo de um ano.

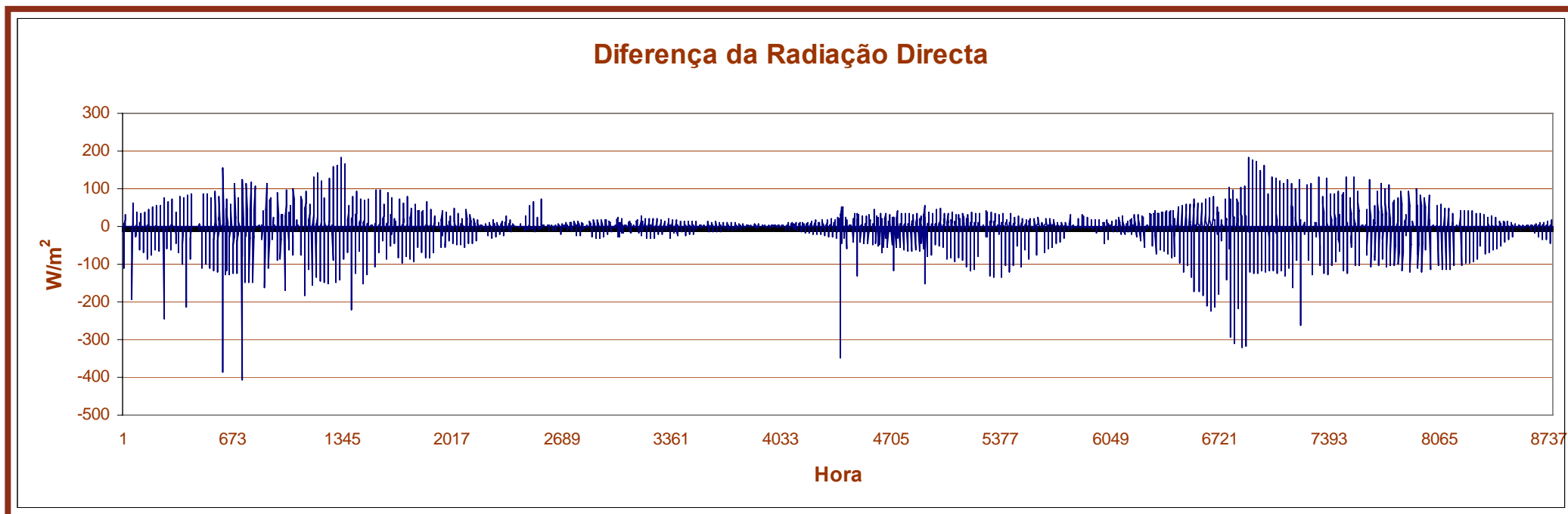
Anexo 8 - Diferença da velocidade horária dos ficheiros climáticos do Porto ao longo de um ano.

Anexo 9 - Resumo dos dados Climáticos do Porto.

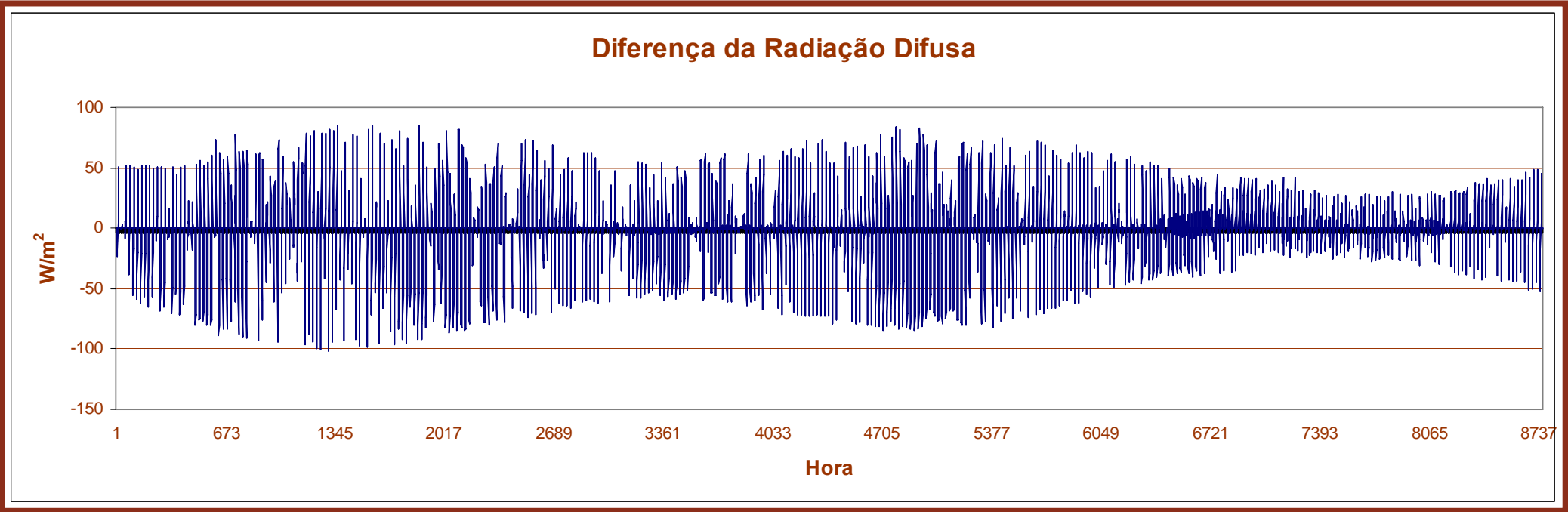
Anexo 1- Diferença de temperaturas dos ficheiros climáticos de “Colorado/Golden” ao longo de um ano.



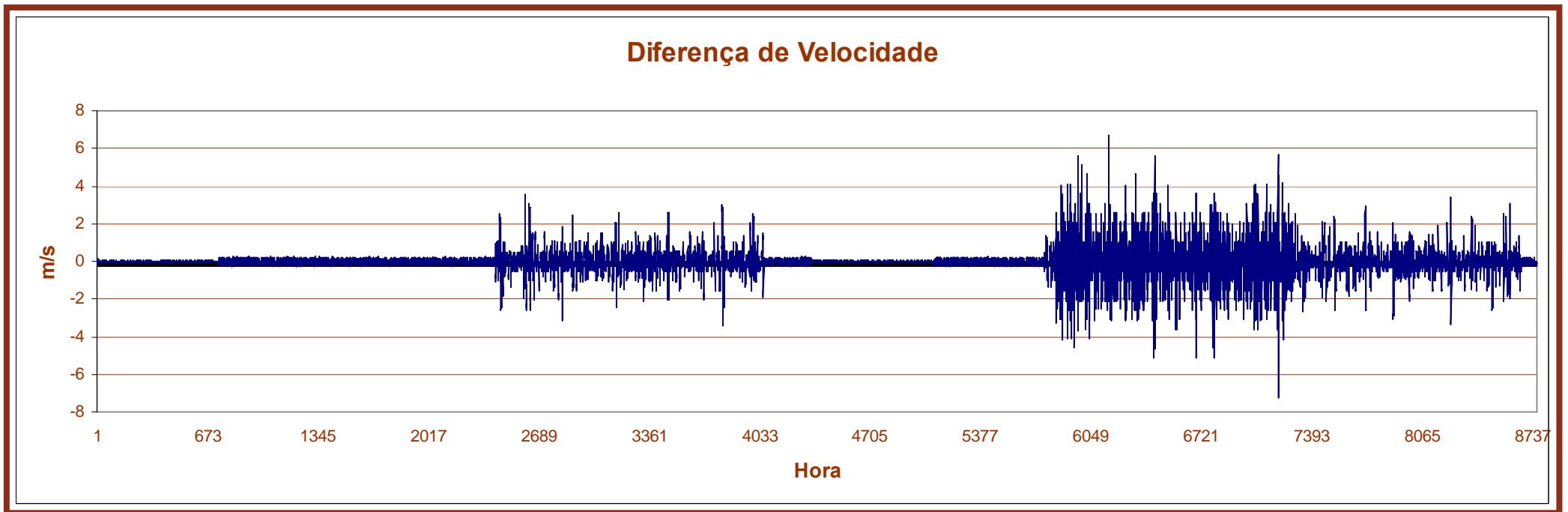
Anexo 2- Diferença da radiação directa dos ficheiros climáticos de “Colorado/Golden” ao longo de um ano.



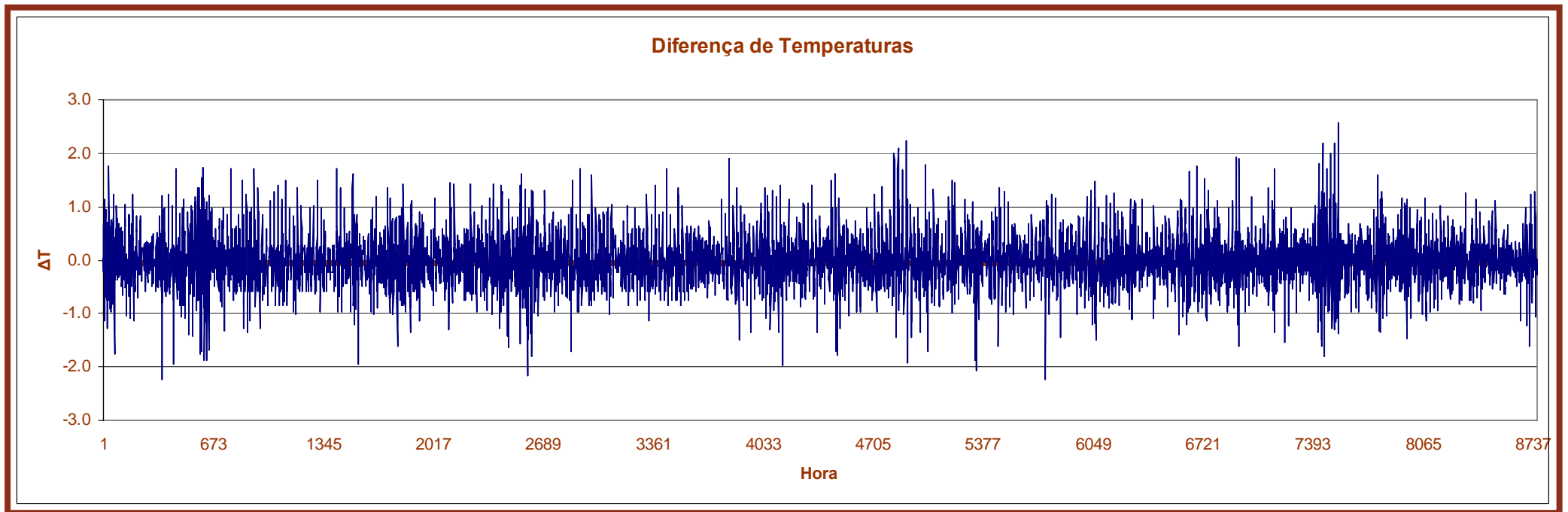
Anexo 3- Diferença da radiação difusa dos ficheiros climáticos de “Colorado/Golden” ao longo de um ano.



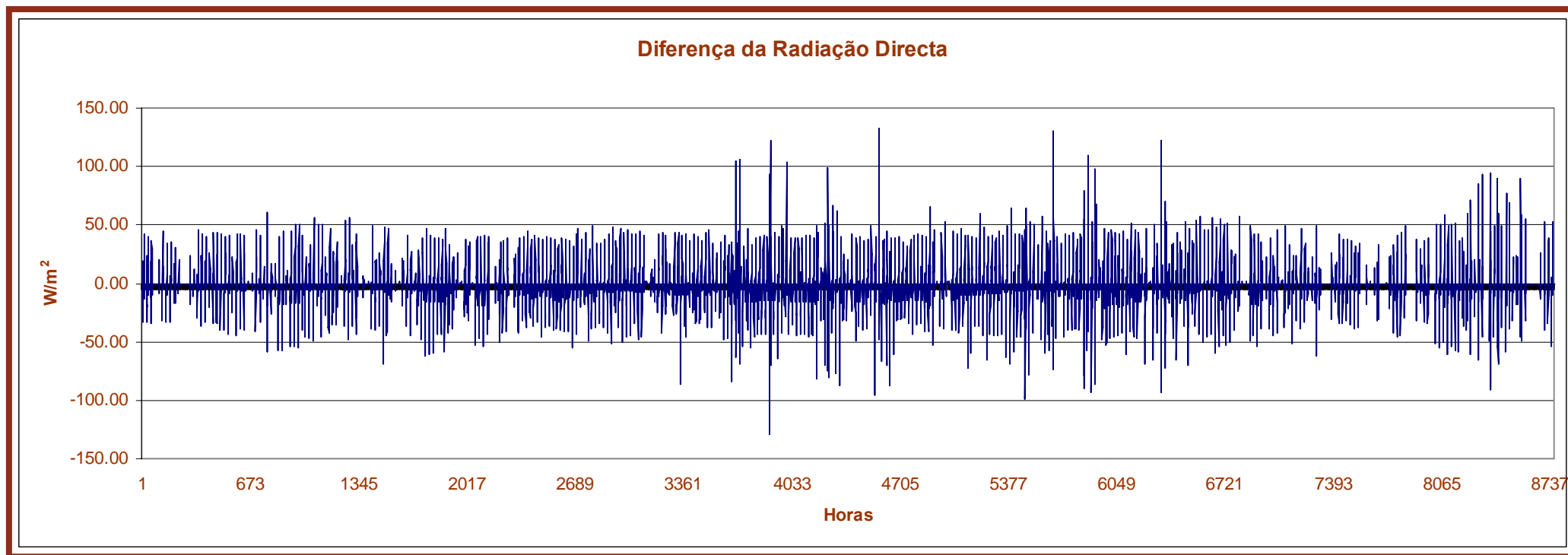
Anexo 4- Diferença da velocidade horária dos ficheiros climáticos de “Colorado/Golden” ao longo de um ano.



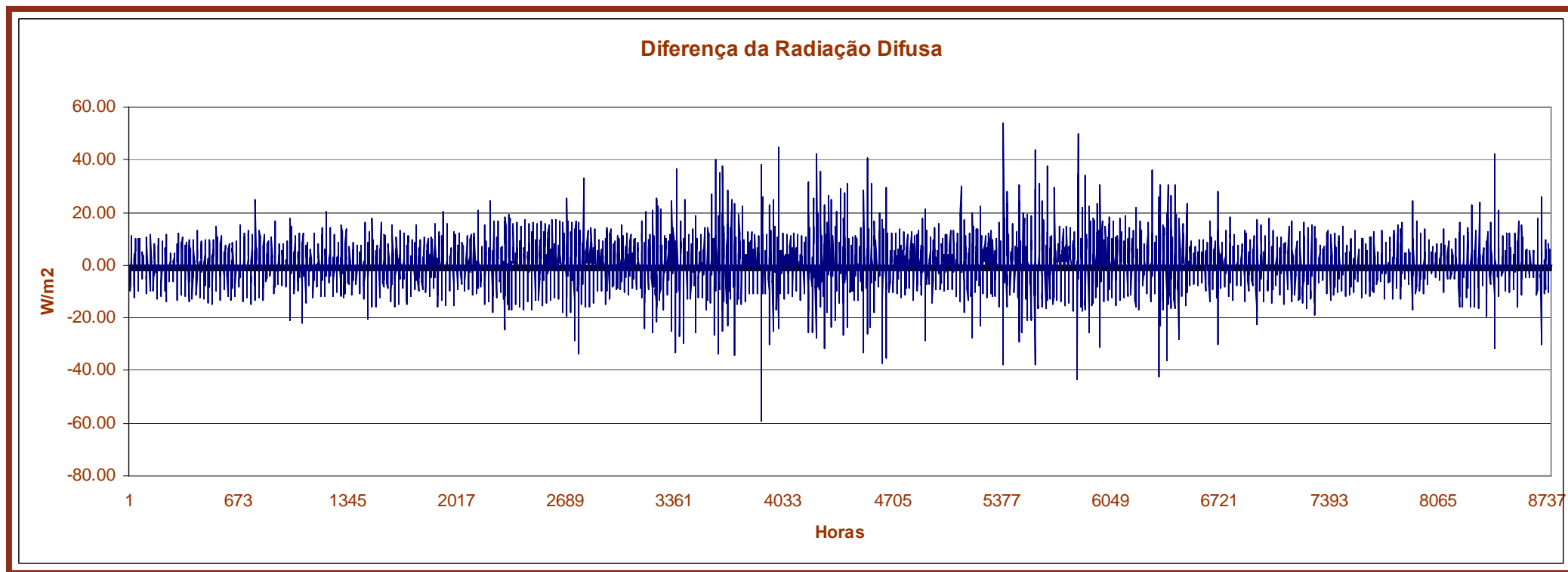
Anexo 5- Diferença da temperatura horária dos ficheiros climáticos do Porto ao longo de um ano.



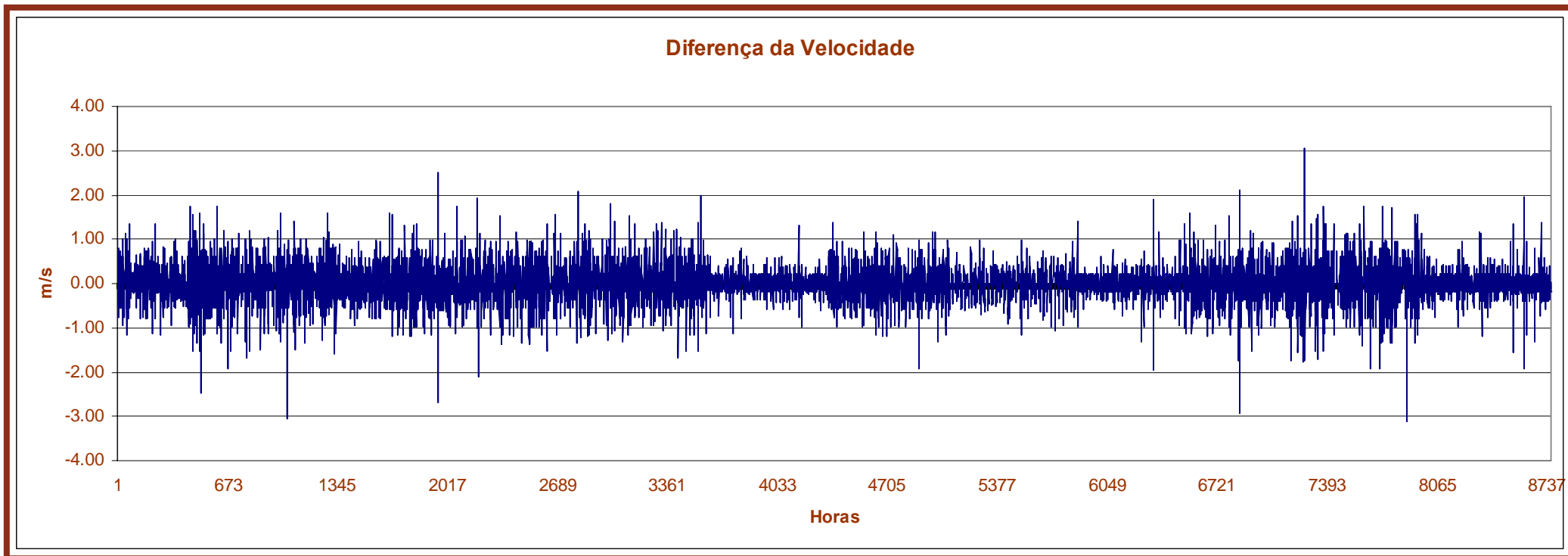
Anexo 6- Diferença da radiação directa horária dos ficheiros climáticos do Porto ao longo de um ano.



Anexo 7- Diferença da radiação difusa horária dos ficheiros climáticos do Porto ao longo de um ano.



Anexo 8- Diferença da velocidade horária dos ficheiros climáticos do Porto ao longo de um ano.



Anexo 9- Resumo dos dados Climáticos do Porto.

Tabela 28 – Resumo do ficheiro climático do Porto para o Energy Plus e TRACE 700.

		OA Dry Bulb	OA Wet Bulb	OA Dew Point	OA Humidity Ratio	OA Pressure	Wind Velocity	Direct Solar	Diffuse Solar
TRACE	Máximo	32.2	23.9	23.9	18.9	102.6	13.4	915.0	505.1
	Mínimo	0.0	-0.6	-4.8	2.5	98.5	0.0	0.0	0.0
	Média	14.3	12.1	10.4	8.2	101.0	3.0	169.4	70.2
Energy Plus	Máximo	31.3	22.5	21.9	0.0	102.7	12.7	905.4	481.2
	Mínimo	0.0	-0.4	-3.9	0.0	98.4	0.0	0.0	0.0
	Média	14.3	12.1	10.4	0.0	101.0	3.0	169.3	69.6

Tabela 29 – Resumo das diferenças ocorridas na mesma hora entre os dois ficheiros climáticos.

	OA Dry Bulb	OA Wet Bulb	OA Dew Point	OA Humidity Ratio	OA Pressure	Wind Velocity	Direct Solar	Diffuse Solar
Máximo	2.57	1.62	3.10	2.11	0.22	3.06	132.49	53.98
Mínimo	-2.25	-1.87	-3.21	-2.23	-0.37	-3.11	-129.25	-59.18
Média	0.00	0.01	0.01	0.01	-0.05	0.00	0.06	0.63

Tabela 30 – Resumo das diferenças ocorridas na mesma hora entre os dois ficheiros climáticos (%).

	AO Dry Bulb	OA Wet Bulb	OA Dew Point	OA Humidity Ratio	OA Pressure	Wind Velocity	Direct Solar	Diffuse Solar
Máximo	8%	7%	13%	11%	0%	23%	14%	11%
Mínimo	-7%	-8%	-13%	-12%	0%	-23%	-14%	-12%
Média	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%