



João António Simões Claro

# VIABILIDADE DA INSTALAÇÃO EM ESCOLAS SECUNDÁRIAS DE SISTEMAS DE GERAÇÃO EM REGIME DE PRODUÇÃO PARA AUTOCONSUMO

Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica  
na Especialidade Energia e Ambiente

Julho/2015



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



**FCTUC** FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

# **Viabilidade da instalação em escolas secundárias de sistemas de geração em regime de produção para autoconsumo**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia  
Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

**Autor**

**João António Simões Claro**

**Orientador**

**António Manuel Mendes Raimundo**

**Júri**

**Presidente** Professor Doutor António Rui de Almeida Figueiredo  
Professor Associado com agregação da Universidade de Coimbra

**Vogais** Professor Doutor José Carlos Miranda Gois  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra  
Engenheiro Manuel Carlos Esteves da Fonseca  
Diretor e Professor da Escola Secundária de Avelas Brotero

**Orientador** Professor Doutor António Manuel Mendes Raimundo  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Coimbra, Julho 2015**

Entre o sorriso e a lágrima há apenas o nariz

Millôr Fernandes

Ao avô José de Melo Claro que partiu durante a elaboração deste trabalho

## Agradecimentos

O trabalho que aqui se apresenta só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento.

Ao Professor Doutor António Manuel Mendes Raimundo por ter aceitado orientar este trabalho e pela sua constante disponibilidade e ajuda.

À Escola Secundária de Avelar Brotero, na pessoa do seu Diretor, Manuel Carlos Esteves da Fonseca, por todo o material fornecido e por todo o apoio prestado. Sem esta colaboração este trabalho não era de todo possível.

À empresa Sistclima, na pessoa do sócio gerente Álvaro Manuel Morais de Sousa, pelo apoio incondicional dado durante a elaboração deste trabalho.

Ao Engenheiro Rafael Lourenço, da empresa Termomat S.A. pelos orçamentos, apoio técnico e disponibilidade sempre demonstrada. Sem ele este trabalho também não teria sido possível.

À “família” do DEM, amigos e professores que marcaram a minha vida para sempre e que tornaram possível este meu percurso que culmina com este trabalho.

À minha família pelo apoio sempre prestado ao longo do curso e deste trabalho, sem eles nada seria possível.

Por fim, e porque os últimos são sempre os primeiros, à minha Mãe, Anabela Facas Simões, professora de Matemática e um exemplo a seguir. Sem o teu apoio e os teus “sermões” o meu percurso talvez não fosse este. No mundo faltam professores e pessoas assim. Obrigado!

## Resumo

O crescimento da população mundial e os cada vez mais exigentes requisitos de conforto, está a levar a um consumo exacerbado dos combustíveis fósseis, encontrando-se os mesmos na eminência de se esgotarem. Por este motivo a sociedade está cada vez mais desperta para a eficiência energética e para a substituição das energias fósseis por energias limpas, de preferência renováveis.

A cogeração e a trigeração são vistas como sistemas alternativos dado terem uma elevada eficiência global e gerarem energia térmica e elétrica, partindo apenas de uma fonte de energia primária. Surge assim a necessidade de estudar a viabilidade da implementação destes sistemas na indústria e nos edifícios de comércio e serviços.

O objetivo deste trabalho é proceder à análise da viabilidade de implementação em escolas secundárias de sistemas de cogeração e de trigeração. Selecionou-se uma escola secundária de grande dimensão, localizada em Coimbra, para servir de base ao estudo. Foram testadas várias alternativas para os sistemas ativos AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado) e de preparação de AQS (Águas Quentes Sanitárias), desde os mais tradicionais a sistemas com cogeração e/ou incorporando energias renováveis. Para o efeito recorreu-se a várias ferramentas de simulação, nomeadamente do comportamento energético de edifícios, da produção dos sistemas solares térmicos, do consumo e da produção energética dos equipamentos e de análise da viabilidade económica.

O estudo aqui realizado permitiu afastar logo de início a trigeração. Este afastamento foi devido ao elevado investimento necessário para a aquisição do chiller de absorção e da torre de arrefecimento, acrescido ainda dos perigos associados às torres de arrefecimento.

Verificou-se ainda, após análise mais atenta, que a cogeração não era a alternativa mais viável economicamente para suprir as necessidades térmicas do edifício em análise, tendo sido ainda possível retirar deste estudo que a implementação de sistemas solares térmicos em edifícios escolares é economicamente desvantajoso.

A conclusão do estudo apresentado nesta tese conclui que o sistema mais vantajoso a implementar numa escola secundária será um sistema composto por uma caldeira a *pellets* que providencie as águas quentes sanitárias e a climatização da escola no período de aquecimento e um chiller bomba de calor que providencie a refrigeração da escola no período de arrefecimento.

**Palavras-chave:** Cogeração, *pellets*, AVAC, AQS, escola secundária, viabilidade económica.

## Abstract

The world population growing and the increasingly requirements of comfort are leading to an exaggerated consumption of fossil fuels, inducing to eminence of its dried-up. For this reason, the society is now more awoken about energy efficiency and the replacement of fossil fuels by clean energy, preferably renewable.

Cogeneration and trigeneration are seen as alternative systems, since they have a high global efficiency and generate heat and electricity from only one primary energy source. This endorses the need of studying the possibility of the implementation of these systems in industry and in trade and services buildings.

The purpose of this study is to examine the viability of the implementation of co / trigeneration systems in secondary schools. It was selected a big secondary school, located in Coimbra, to serve as basis for the study. Several alternatives have been tested for active HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) systems and for preparation of DHW (domestic hot water), from the most traditional to systems with cogeneration and / or incorporating renewable energy. For this purpose some simulation tools were used, namely for calculation of buildings energy performance, of solar thermal systems production, of energy consumption and production by equipment and for economic viability analysis.

Due to the high investment required for the acquisition of an absorption chiller and an cooling tower, the trigeneration was dismiss from this study.

It was also found, after closer examination, that the cogeneration is not the most economically viable alternative to support the thermal requirements of the building and it was still possible to withdraw that the implementation of thermal solar systems in school buildings is economically disadvantageous.

The main conclusion of this study is that the most advantageous system to implement in a secondary school will be composed by a pellets boiler, for providing sanitary hot water and heat for the school acclimation in the winter, and a heat pump chiller, for cooling in the summer.

**Keywords** Cogeneration, Pellets, HVAC, AQS, Secondary School, Economic Viability

## Índice

Índice de Figuras .....	v
Índice de Tabelas .....	vii
Simbologia e Siglas .....	viii
Simbologia.....	viii
Siglas .....	x
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Enquadramento .....	1
1.2. Estado da arte.....	2
1.3. Objetivos.....	7
2. METODOLOGIAS DE ANÁLISE .....	8
2.1. Ferramentas de cálculo .....	8
2.2. Necessidades energéticas para funcionamento do edifício.....	11
2.3. Análise energética - metodologia de cálculo .....	12
2.4. Análise económico-financeira – metodologia de cálculo .....	17
3. PROBLEMA EM ESTUDO .....	19
3.1. Descrição do edifício .....	19
3.2. Consumo energético atual do edifício .....	21
3.2.1. Consumo energético real .....	21
3.2.2. Simulação da contribuição para AQS do sistema solar térmico.....	22
3.2.3. Consumo energético simulado do edifício .....	24
3.3. Validação da metodologia de análise.....	24
3.4. Sistemas alternativos de AVAC, AQS e Cogeração.....	26
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	33
4.1. Pressupostos.....	33
4.2. Resultados.....	35
4.3. Discussão .....	43
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....	45
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	46
ANEXO A – Dados considerados na simulação.....	47
ANEXO B - Relatório <i>Solterm</i> .....	54

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Sistema convencional Vs Sistema de cogeração (Cogen Portugal, 2015) .....	2
Figura 1.2. Cogeração recorrendo a motor de combustão interna (Cogen Portugal, 2015) ..	3
Figura 1.3. Cogeração recorrendo a uma turbina de vapor (Cogen Portugal, 2015).....	4
Figura 2.1. <i>SEnergEd</i> - Relatório final, quadro resumo (Exemplo).....	10
Figura 2.2. <i>SEnergEd</i> – Relatório final, detalhe do AVAC (Exemplo).....	10
Figura 2.3. <i>SEnergEd</i> – separador <i>gráficos</i> . .....	12
Figura 3.1. Vista aérea do edifício escolar em estudo (Google).....	19
Figura 3.2. Divisão atual do edifício escolar da ESAB em blocos (Natural-Works, 2009).20	
Figura 3.3. Perfil do consumo das AQS para todo o ano. ....	23
Figura 3.4. Solterm – relatório contribuição dos coletores solar térmicos. ....	23
Figura 5 – comparação do consumo energético real com o simulado.....	25
Figura 6 – Perfis da temperatura interior e exterior do edifício ao longo do ano.....	35
Figura A.1. <i>SEnergEd</i> – Dados climáticos. ....	47
Figura A.2. <i>SEnergEd</i> – Dados gerais do edifício.....	47
Figura A.3. <i>SEnergEd</i> – Envolvente opaca exterior.....	48
Figura A.4. <i>SEnergEd</i> – Coberturas em contacto com o exterior. ....	48
Figura A.5. <i>SEnergEd</i> – Coberturas em contacto com espaços não úteis. ....	48
Figura A.6. <i>SEnergEd</i> – Envolventes interiores sem requisitos.....	49
Figura A.7. <i>SEnergEd</i> – Paredes e pavimentos em contacto com o solo.....	49
Figura A.8. <i>SEnergEd</i> – Valores para os envidraçados.....	49
Figura A.9. <i>SEnergEd</i> – Perfil AVAC. ....	50
Figura A.10. <i>SEnergEd</i> – Densidades de ocupação, iluminação e equipamentos (não AVAC). ....	50
Figura A.11. <i>SEnergEd</i> – Perfil de ocupação.....	50
Figura A.12. <i>SEnergEd</i> – Perfil de iluminação. ....	51
Figura A.13. <i>SEnergEd</i> – Perfil de equipamentos não AVAC.....	51
Figura A.14. <i>SEnergEd</i> – Ventilação. ....	52
Figura A.15. <i>SEnergEd</i> – Perfil de ventilação. ....	52
Figura A.16. <i>SEnergEd</i> – Espaços complementares. ....	53



Figura A.17. *SEnergEd* – Iluminação do exterior. .... 53

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Consumo elétrico real da ESAB, no ano de 2014. ....	21
Tabela 3.2. Consumo de GN da ESAB, no ano de 2014. ....	22
Tabela 3.3. Consumo elétrico total simulado da ESAB .....	24
Tabela 3.4. Consumo elétrico total simulado da ESAB. ....	25
Tabela 3.5. Comparação entre os valores globais do consumo anual global de eletricidade pelo edifício. ....	25
Tabela 3.6. Caraterística dos equipamentos do cenário 1. ....	27
Tabela 3.7. Caraterística dos equipamentos do cenário 2 .....	27
Tabela 3.8. Caraterística dos equipamentos do cenário 3 .....	28
Tabela 3.9. Caraterística dos equipamentos do cenário 4 .....	30
Tabela 3.10. Caraterística dos equipamentos do cenário 5. ....	30
Tabela 3.11. Caraterística dos equipamentos do cenário 6. ....	31
Tabela 3.12. Caraterística dos equipamentos do cenário 7. ....	32
Tabela 4.1. Custo de aquisição e instalação dos equipamentos já acrescidos de IVA .....	35
Tabela 4.2. Necessidades térmicas do edifício .....	36
Tabela 4.3. Necessidades elétricas do edifício .....	36
Tabela 4.4. Dados energéticos cenário 1 .....	37
Tabela 4.5. Dados energéticos cenário 2 .....	37
Tabela 4.6. Dados energéticos cenário 3 .....	38
Tabela 4.7. Dados energéticos cenário 4 .....	39
Tabela 4.8. Dados energéticos cenário 5 .....	39
Tabela 4.9. Dados energéticos cenário 6 .....	40
Tabela 4.10. Dados energéticos cenário 7 .....	40
Tabela 4.11. Posição relativa dos sub-cenários dentro de cada cenário. ....	41
Tabela 4.12. Posição absoluta dos cenários. ....	42
Tabela 4.13. Cenários ordenados por valor de <i>CAE</i> . ....	42

## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

$A$	– Área de transferência de calor	[m <sup>2</sup> ]
$CAE$	– Custo anual equivalente	[€/ano]
$CF$	– <i>Cash-flow</i>	[€/ano]
$COP$	– “Coefficient of performance” ou “rendimento” do chiller em aquecimento	
$Custo_{pellets}$	– Custo unitário de aquisição de <i>pellets</i>	[€/kg]
$EER$	– “Energy Efficiency Ratio” ou “rendimento” do chiller em arrefecimento	
$G$	– Gasto anual	[€/ano]
$Gasto_{pellets}$	– Gasto anual com a aquisição dos <i>pellets</i>	[€/ano]
$i$	– Taxa de atualização para uma análise a preços constantes	
$i_a$	– Taxa de juro exigida para os capitais alheios	
$i_p$	– Taxa de juro exigida para os capitais próprios	
$\dot{M}_{pellets}$	– Consumo mássico de <i>pellets</i>	[Mg/ano]
$n$	– Período de vida do investimento	[anos]
$p_a$	– Parcela de capitais alheios no investimento	
$p_p$	– Parcela de capitais próprios no investimento	
$P_{u,cald}$	– Potência útil gerada pela caldeira	[kW]
$P_{u,equip,i}$	– Potência útil gerada pelo equipamento “ <i>i</i> ”	[kW]
$P_{consum,i}$	– Potência consumida pelo equipamento “ <i>i</i> ”	[kW]
$P_{consum,cald}$	– Potência consumida pela caldeira	[kW]
$P_{cons,gerador}$	– Potência consumida pelo moto-gerador	[kW]
$P_{elet,gerador}$	– Potência elétrica consumida pelo moto-gerador	[kW]
$P_{term,gerador}$	– Potência térmica gerada pelo moto-gerador	[kW]
$P_{u, equip, i}$	– Potência gerada pelo equipamento “ <i>i</i> ”	[kW]
$P_{u, caldeira}$	– Potência útil da caldeira	[kW]
$P_{efet,caldeira}$	– Potência efetiva consumida pela caldeira	[kW]
$P_{elet,turbina}$	– Potência elétrica gerada pela turbina	[kW]
$P_n$	– Potência nominal	[kW]
$P_{nec}$	– Potência útil horária necessária para suprir as necessidades térmicas	[kW]
$P_{PZ}$	– Potência que torna nulo o rendimento da turbina	[kW]
$P_i$	– Potência da turbina no ponto “ <i>i</i> ”	[kW]
$P_{u,turb}$	– Potência útil de vapor gerado pela turbina	[kW]

---

$P_{AVAC+AQS}$	– Potência para garantir as necessidades de AVAC e AQS	[kW]
$Q_{AQS,m}$	– Energia mensal efetivamente necessária para garantir as AQS	[kWh/mês]
$Q_{cozinha}$	– Consumo energético anual da cozinha	[kWh/ano]
$Q_{GM,cozinha}$	– Consumo anual de gás natural pela cozinha	[kWh/ano]
$Q_{elet,cozinha}$	– Energia elétrica consumida pela cozinha	[kWh]
$Q_{GN,cozinha}$	– Consumo energético de gás natural pela cozinha	[kWh]
$Q_{AQS}$	– Consumo energético mensal para garantir as necessidades de AQS	[kWh/mês]
$Q_{GN,ed}$	– Consumo de gás natural do edifício	[kWh]
$Q_{GN,cozinha,m}$	– Consumo mensal de gás natural pela cozinha	[kWh/mês]
$Q_{GN,ed}$	– Consumo anual de gás natural do edifício	[kWh/ano]
$Q_{GN,efet}$	– Consumo anual efetivo de GN pelo edifício	[kWh/ano]
$Q_{solar}$	– Energia térmica anual fornecida pelos painéis solares	[kWh/ano]
$R$	– Rendimento anual	[€/ano]
$t_{h,cozinha}$	– Tempo de funcionamento anual da cozinha	[h]
$t_{d,cozinha,mes}$	– Tempo em dias de funcionamento da cozinha num dado mês	[dia]
$t_i$	– Taxa de impostos sobre o resultado (IRC+Derramas+Tributações autónomas)	
$U$	– coeficiente de transferência de calor	[W/(m <sup>2</sup> °C)]
$VLA$	– Valor líquido atual	[€]
$VR$	– Valor residual	[€]
$\eta_i$	– Rendimento da turbina no ponto “i”	
$\eta_i$	– Rendimento da turbina no ponto “i”	
$\eta_{Pz}$	– Rendimento máximo da turbina	
$\eta_{Pz}$	– Rendimento nulo da turbina	
$\eta_n$	– Rendimento nominal da turbina	
$\eta_{cald}$	– Rendimento da caldeira	
$\eta_{T,gerador}$	– Rendimento térmico do gerador	
$\eta_{elet,gerador}$	– Rendimento elétrico do gerador	
$\eta_{equip,i}$	– Rendimento do equipamento “i”	
$\eta_n$	– Rendimento no ponto nominal	
$\eta_{turb}$	– Rendimento da turbina	
$\eta_{permutador}$	– Rendimento do permutador	
$\rho$	– Densidade de ocupação ou de iluminação ou de equipamentos não AVAC	[W/m <sup>2</sup> ]
$\rho_{t,cozinha}$	– Somatório, para a cozinha, das densidades de iluminação, ventilação e equipamentos	[W/m <sup>2</sup> ]
$\rho_{equip}$	– Densidade de equipamentos presentes na cozinha	[W/m <sup>2</sup> ]
$\rho_{ilum}$	– Densidade de iluminação presente na cozinha	[W/m <sup>2</sup> ]
$\rho_{vent}$	– Densidade de ventilação presente na cozinha	[W/m <sup>2</sup> ]

---

## **Siglas**

AVAC – Aquecimento ventilação e ar condicionado

AQS – Águas quentes sanitárias

ESAB – Escola Secundária de Avelar Brotero

GN – Gás natural

RSECE – Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios

## 1. INTRODUÇÃO

Com o atual crescimento da população mundial e com a cada vez maior exigência de requisitos de conforto, a sociedade está a deparar-se com um grave problema, dado se encontrar alicerçada nos recursos de origem fóssil, que estão em depleção. Estes, para além de gerarem a energia, a qual é, considerada uma das necessidades básicas da humanidade, entram ainda em toda a cadeia produtiva.

### 1.1. Enquadramento

Os recursos fósseis, na teoria, poderiam ser considerados recursos renováveis, uma vez que a Terra os consegue produzir. Contudo, dado a sua taxa de exploração ser muitas ordens de grandeza superior à sua taxa de produção, os mesmos são considerados recursos não renováveis, esgotando-se em pouco tempo.

Fazendo um simples mas doloroso exercício de raciocínio, imaginando que, neste momento os recursos fósseis findavam, iríamos concluir que tudo a nosso redor pararia. O mundo e a sociedade tal como a conhecemos entraria em colapso. Por estes motivos a sociedade tem estado cada vez mais atenta à sustentabilidade com enfoque na sua vertente económica, ambiental e energética, vendo com “bons olhos” a diminuição do consumo energético e a substituição dos combustíveis fósseis por combustíveis limpos, de preferência renováveis, fazendo assim com que os sistemas mais eficientes e mais “amigos” do ambiente estejam a singrar.

A par da escassez cada vez maior dos combustíveis fósseis tem-se ainda a problemática da poluição, dado que a combustão dos mesmos é altamente poluidora, sendo os setores energéticos e o dos transportes uns dos principais responsáveis.

Nos dias de hoje já é possível notar-se esta preocupação energética, bastando para isso ver a proliferação de parques eólicos, os quais, aliados às barragens são os principais responsáveis pela parcela de energia renovável na eletricidade que consumimos.

A co e a trigeriação implementadas quer em fábricas, quer no setor terciário, são vistas como alternativas energeticamente viáveis. Estes processos, apenas com uma fonte de energia, para além de produzirem calor ou frio (apenas calor no caso da cogeração), necessários aos processos, produzem ainda eletricidade a qual pode ser utilizada quer para consumo próprio quer para ser vendida à rede.

A par com estes sistemas, também a substituição dos recursos fósseis por recursos renováveis, com vista à produção de energia térmica e/ou elétrica, são uma alternativa viável, dado que se consegue obter o mesmo fim, partindo de um combustível limpo e renovável.

Dado ser necessário um investimento económico considerável quer na implementação de um sistema de cogeração, quer na substituição dos sistemas atuais por

sistemas que operem a energia limpa, é importante proceder a análises técnico-económicas com o intuito de demonstrar as potencialidades destes sistemas.

## 1.2. Estado da arte

A Cogen Portugal (2015) define a cogeração como “*um processo de produção e utilização combinada de calor e eletricidade, proporcionando o aproveitamento de mais de 70% da energia térmica proveniente dos combustíveis utilizados nesse processo. Distingue-se da produção convencional de energia elétrica com combustíveis fósseis, dado que nesta se desperdiça uma parte muito significativa do calor resultante da combustão (normalmente mais de 60%)*”. Apresenta-se na Figura 1.1. a representação gráfica das afirmações anteriores.

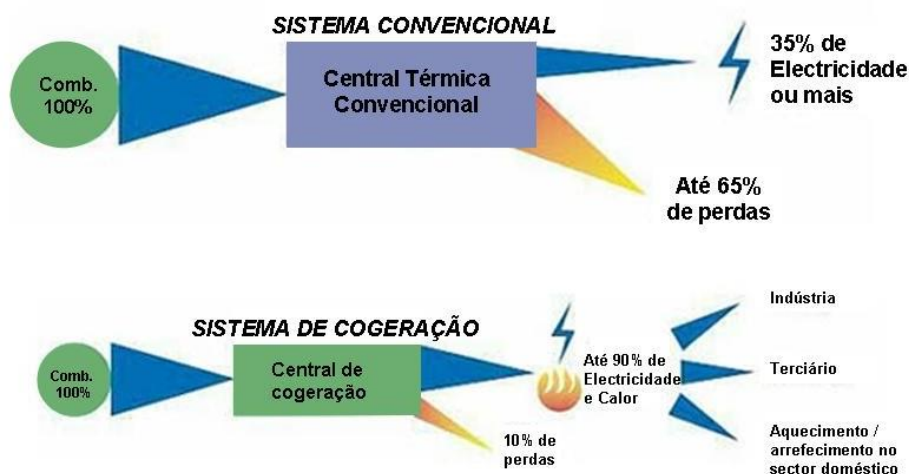


Figura 1.1. Sistema convencional Vs Sistema de cogeração (Cogen Portugal, 2015)

Consoante a tecnologia com que operam, os sistemas de cogeração podem ser divididos nos seguintes tipos:

- Motor de combustão interna, ver Figura 1.2
- Turbina a gás
- Turbina de vapor, ver Figura 1.3
- Ciclo combinado
- Microturbinas

Seguidamente apenas serão objeto de atenção os sistemas que serão considerados na análise do problema em estudo.

## Motores de combustão interna

Os motores alternativos de combustão interna podem ser divididos em dois tipos mediante o seu ciclo de funcionamento, ciclo Otto ou ciclo Diesel.

Nos motores de ciclo Otto, uma mistura de ar e combustível é comprimida em cada cilindro, sendo a ignição provocada por uma faísca. Por seu turno, nos de ciclo Diesel, apenas o ar é comprimido no cilindro, sendo então o combustível injetado na fase final do ciclo de compressão, ocorrendo assim a ignição espontânea da mistura provocada pela alta temperatura do ar comprimido.

Na Figura 1.2, encontra-se ilustrado o esquema de funcionamento de um sistema de Cogeração recorrendo a motor de combustão interna.

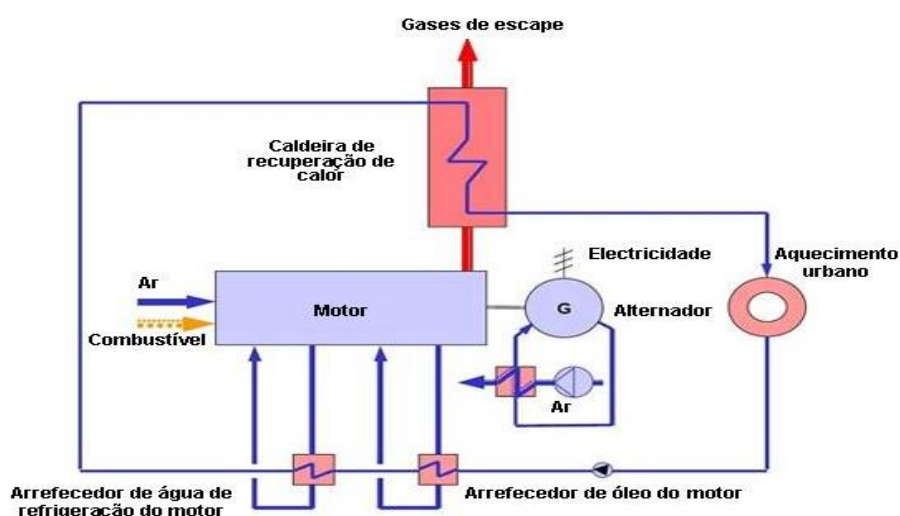


Figura 1.2. Cogeração recorrendo a motor de combustão interna (Cogem Portugal, 2015)

No que respeita ao tipo de combustível, os motores de combustão interna podem operar recorrendo a uma grande variedade de combustíveis líquidos e gasosos.

Os motores de explosão utilizam mais frequentemente o GN (gás natural) como combustível, podendo operar também com combustão de gás propano ou butano, entre outros.

No que respeita aos motores de ciclo Diesel, os combustíveis mais utilizados são os combustíveis líquidos, desde os vários tipos de *fuelóleo* ao gasóleo, podendo ainda operar com misturas de combustíveis gasosos com líquidos, em condições que permitam auto-ignição.

Quando o GN (gás natural) está disponível, este é o escolhido normalmente como energia primária, quer por questões logísticas/físicas, dado não necessitar de transporte nem de espaço de armazenamento, quer por questões económicas.

Podemos elencar como vantagens para a utilização de motores de combustão interna em cogeração os seguintes aspetos: arranque rápido, facilidade na adaptação á variação das necessidades térmicas, elevada eficiência mecânica e bom rendimento em regime de carga variável. Contudo, tem como desvantagens: limitação a aplicações a

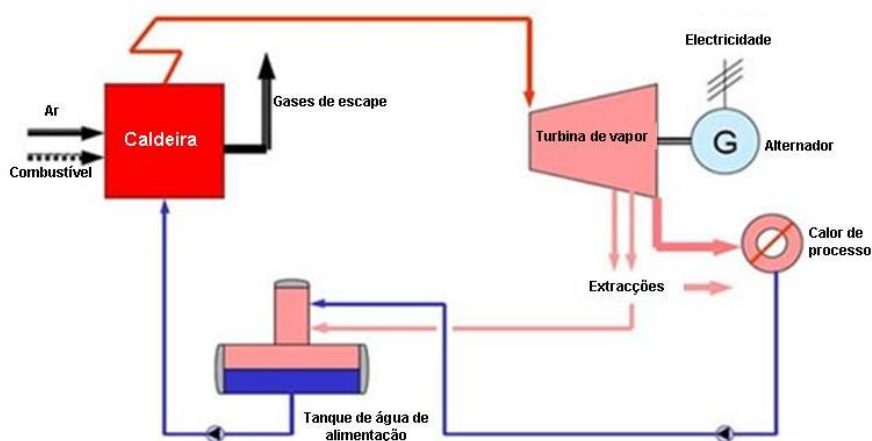


baixas temperaturas, baixo rendimento térmico, custo de manutenção elevado aliado ao facto de necessitar de paragens com alguma frequência para manutenção e níveis de ruído elevados a baixas frequências.

### **Turbina de vapor**

Os sistemas de cogeração baseados em turbinas a vapor funcionam segundo o ciclo de *Rankine*, quer na sua versão base quer melhorado. O ciclo de *Rankine* considera que o líquido saturado sai do condensador (neste caso o condensador é substituído pelo processo, calor de processo), sendo pressurizado pela bomba, entrando depois na caldeira onde o mesmo ganha calor, normalmente a pressão constante, processo isobárico, isto é, entropia final igual a entropia inicial.

A turbina utiliza o vapor que foi previamente gerado por uma caldeira. O vapor é expandido na turbina realizando trabalho de veio o qual é transformado em energia eléctrica com a acoplação de um gerador ao veio da turbina, como se encontra ilustrado na Figura 1.3.



**Figura 1.3.** Cogeração recorrendo a uma turbina de vapor (Cogen Portugal, 2015).

No que respeita ao tipo de combustível, os sistemas de cogeração baseados em turbinas de vapor podem operar com qualquer tipo de combustível, desde os combustíveis fósseis aos renováveis como os *pellets* ou até mesmo subprodutos de desperdícios. Note-se que, a queima destes combustíveis, ocorre numa caldeira sendo a turbina alimentada pelo vapor gerado pela combustão destes combustíveis na mesma.

Podemos referir como vantagens para a utilização da turbina a vapor na cogeração os seguintes aspetos: tempo de vida útil elevado, eficiência global elevada, capacidade de fornecer vapor a elevada pressão ou à pressão atmosférica (caso se trate de turbina de condensação ou de contra pressão respetivamente) e elevado período de tempo entre manutenções. Contudo, como desvantagem tem: o baixo rendimento eléctrico, o arranque lento e o investimento inicial elevado.

### **Implementação de sistemas de cogeração**

Da necessidade de diminuir consumos energéticos, não só por questões de ordem financeira mas por motivos ambientais, surge a cogeração, dado que a mesma consegue um maior rendimento comparada com os outros sistemas (ver Figura 1.1).

Para se poder implementar um sistema de cogeração é necessário que exista na sua proximidade um consumidor de energia térmica, dado não ser viável o transporte de energia térmica por grandes distâncias devido às perdas de calor.

A geração de energia térmica e elétrica de forma combinada, cogeração/trigeriação já se encontra implantada em fábricas onde as necessidades térmicas são elevadas e relativamente constantes ao longo do tempo, como por exemplo tinturarias. A par das fábricas, também nas piscinas, dado as suas necessidades térmicas, a cogeração/trigeriação já se encontram algo difundidas. Este sistema é ainda aplicável a aglomerados populacionais, como no caso da Parque Expo em Lisboa e do Bairro da Inovação em Barcelona. Em ambos os casos a climatização e as águas quentes sanitárias são produzidas de forma centralizada na central térmica sendo depois distribuídas por um conjunto de tubos até aos edifícios e suas frações.

No caso Espanhol, como se pode ler em (Figueiredo, 2015) a central abastece mais de 80 edifícios, sendo alimentada por vapor gerado pela queima de resíduos urbanos e gerados no bairro, permitindo uma poupança de mais de 53% de combustíveis fósseis e uma diminuição 10 100 Mega gramas de CO<sub>2eq</sub>, quando comparado a um sistema descentralizado. Esta central comemorou já 10 anos de existência, sendo um marco tecnológico e de eficiência energética, funcionando como um atrativo para a implementação de empresas nessa zona. A maturidade deste sistema demonstra que, mesmo em climas amenos, este sistema de trigeriação é viável.

No caso de Barcelona o arrefecimento acaba por ser neste caso, a principal energia fornecida, sendo o chiller refrigerado através da água do mar, poupando assim a necessidade de torres de arrefecimento, diminuindo os custos associados (Figueiredo, 2015). Note-se contudo que, no caso de implementação de um sistema destes numa fábrica ou em edifícios não é legalmente permitido fazer o arrefecimento recorrendo à água do mar, sendo então imperativa a necessidade de se utilizarem torres de arrefecimento.

Em 2010 esta rede foi distinguida com um prémio da *Sustainable Energy Europ*, iniciativa anual da união europeia para premiar os projetos mais inovadores e sustentáveis na área da energia.

Dado o sucesso deste sistema, foi criada uma nova central em setembro de 2011, uma outra rede de distribuição de calor e frio, também em Barcelona, no bairro de La Marine, funcionando a partir de biomassa (calor) e a da recuperação de frio gerado no processo de despressurização do Gás Natural da *Enagas*.

No caso de Lisboa, a central térmica abastece a zona do antigo Parque das Nações, tendo como fonte de energia primária o Gás Natural. Inicialmente nasceu apenas com a rede de calor, tendo a rede de frio surgido posteriormente, uma vez que só a necessidade de climatizar grandes espaços de trabalho veio permitir a criação deste tipo de distribuição.

Segundo a Climaespaço (2014) a criação de sistemas centralizados é economicamente viável, quer em termos dos custos globais quer em termos dos investimentos de utilização. Têm ainda como vantagem técnica o facto de o sistema centralizado estar sempre a funcionar em regime mais ou menos permanente, maximizando assim o rendimento, contrariamente ao que aconteceria no caso da produção descentralizada que teria um desempenho baixo associado a ciclos de paragem e arranque muito frequentes, conduzindo assim a um maior consumo de energia e a uma menor vida útil dos equipamentos.

Também a nível ambiental, a produção centralizada é vantajosa, uma vez que diminui as emissões de poluente, dado necessitar de menos energia primária para produzir a mesma energia final. Pode associar-se ainda o facto da produção combinada de energia térmica e eléctrica ter um rendimento muito superior do que se as mesmas fossem produzidas de forma separada, como se ilustra na Figura 1.1.

Contudo, como em qualquer outro sistema, a cogeração também tem desvantagens. O investimento inicial é muito elevado e os lucros obtidos são dependentes do preço da electricidade (compra e venda) e do preço do combustível utilizado, podendo ainda existir o problema da poluição sonora, dependendo do sistema de cogeração utilizado.

Em França, Alemanha, Dinamarca, Suécia, e Finlândia este tipo de redes é amplamente implantado, podendo contar-se 366, 506, 360, 302 e 402 redes, respetivamente em cada um dos países (Climaespaço, 2014).

O sistema pioneiro encontra-se nos Estados Unidos, estando em funcionamento há mais de 1 século. Mais recentemente este tipo de redes começou a surgir no Canadá e no Japão (Climaespaço, 2014).

Contudo, os sistemas centralizados anteriormente referidos fornecem na sua maior parcela de energia térmica para edificios residenciais e do sector terciário e ainda, no caso Espanhol, para instalações fabris, não se assemelhando, assim ao caso em estudo, dado as necessidades e os pressupostos serem diferentes. Tem ainda de se ter em conta que, no caso em estudo, o sistema apenas irá servir um edificio escolar e não será um sistema centralizado de grande dimensão.

No que respeita à cogeração em ambiente fabril, embora a mesma exista e esteja amplamente difundida em Portugal e no mundo, esta não foi objeto de análise, nomeadamente pelo facto do perfil das necessidades de energia térmica em nada se assemelharem às de um edificio escolar.

Embora, como demonstrado, a tecnologia da cogeração seja viável e já amplamente utilizada com sucesso, nada foi encontrado sobre sistemas de cogeração em funcionamento em escolas ou em edificios com necessidades térmicas e perfis de ocupação semelhantes. Note-se que uma escola tem necessidades de consumo energético que depende quer da altura do ano em que nos encontramos, quer também do horário de funcionamento, bem como do tempo de férias.

### **1.3. Objetivos**

Este trabalho visa o estudo da viabilidade técnico e económica da instalação numa grande escola secundária de sistemas de co/trigeriação em regime de produção para autoconsumo. Para tal, recorreu-se aos consumos energéticos da Escola Secundaria de Avelar Brotero, sita na cidade de Coimbra.

Ao longo do presente relatório serão ainda apresentados e analisados outros cenários alternativos, com o intuito de se comparar as vantagens/desvantagem dos mesmos, sendo que todos estes garantirão a climatização da escola e a preparação das águas quentes sanitárias (AQS).

A análise económica de cada um dos cenários terá em conta o investimento necessário, os gastos de funcionamento, os gastos de aquisição de energia elétrica (quando necessário) e o rendimento com a venda da energia elétrica excedentária (no caso do cenário em estudo gerar energia elétrica).

Em suma, o objetivo do presente trabalho visa estudar a possibilidade da diminuição da fatura energética da escola em causa recorrendo, para isso, à análise de diferentes cenários que assegurem a climatização e as águas quentes sanitárias.

Espera-se assim chegar a resultados que nos permitam realizar uma análise comparativa entre a viabilidades das vários sistemas testados e, a partir dela, conseguir identificar os sistemas ativos de AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado) e a preparação de AQS (Águas Quentes Sanitárias) mais vantajosos.

## 2. METODOLOGIAS DE ANÁLISE

O uso de programas de simulação tornam-se uma mais-valia quando se procura chegar aos melhores resultados possíveis em termos energéticos e/ou económicos, pois a sua utilização possibilita, ainda numa fase inicial, testar vários tipos de sistemas alternativos, promover novas estratégias e seleccionar as soluções mais adequadas.

Para realizar este estudo foi necessário recorrer a um conjunto de ferramentas de cálculo, umas já disponíveis e outras que foi necessário desenvolver, que assentam num conjunto alargado de algoritmos.

### 2.1. Ferramentas de cálculo

Foram utilizadas ferramentas de simulação para obter a produção dos sistemas solares térmicos, para prever o comportamento energético do edifício, para determinar o consumo e a produção energética dos equipamentos e para efectuar a correspondente análise de viabilidade económica.

A produção dos sistemas solares térmicos foi obtida recorrendo ao programa *Solterm* (LNEG, 2015), a simulação do comportamento energético do edifício foi efectuada através do *software SEnergEd* (Lopes, 2013), a determinação do consumo e da produção energética dos equipamentos foi obtida recorrendo a folhas de cálculo em *MS Excel* desenvolvidas para o efeito e utilizando os algoritmos apresentados neste texto e para efectuar a análise da viabilidade económica utilizaram-se umas folhas de cálculo em *MS Excel* disponíveis como material de apoio à disciplina de Economia e Gestão Industrial (Raimundo, 2015).

#### **Programa *SolTerm***

Este programa permite obter a contribuição dos painéis solares na preparação das AQS (LNEG, 2015). Para fazer a simulação, este programa necessita da introdução de dados referentes à localização da instalação e às características dos componentes que a constituem, assim como do perfil de consumo das AQS.

No que respeita à localização, apenas é necessário proceder à escolha da cidade na qual irá ser instalado o projeto, para assim, deste modo, o programa adequar o ficheiro climático.

Nos constituintes da instalação, tem de se “formatar” os componentes do sistema para o caso em análise, desde a capacidade do depósito, às características do permutador de calor, da bomba e do painel solar até à seleção do sistema de apoio. Tem ainda de se introduzir um perfil de utilização das AQS, como referido anteriormente.

Depois de se terem introduzido todos estes dados basta ir ao separador *simulação energética*, onde aparece a simulação energética para o sistema considerado. O relatório da simulação indica para cada mês a radiação, nas suas componentes horizontal e inclinada absorvida pelo painel. São indicados ainda os valores mensais das energias térmicas associadas ao sistema solar, nomeadamente a desperdiçada, a fornecida (ou útil do sistema), a requerida para garantir as necessidades de AQS (a carga) e a de apoio (a que o sistema de apoio tem de produzir para que as AQS atinjam a temperatura desejada).

### **Folha de cálculo *SEnergEd***

A utilização de um programa de simulação dinâmica multizona exige um grande esforço inicial de aprendizagem, sendo ainda a introdução dos dados demorada. Por estes factos a simulação de pequenos edifícios de serviços e residenciais não é economicamente viável (Raimundo, 2008).

Por sua vez o *SEnergEd* é um programa elaborado em folha de cálculo de *MS Excel*, de uma utilização fácil e intuitiva.

O programa *SEnergEd* está preparado para realizar a simulação dinâmica do comportamento energético de um edifício composto por uma única zona climatizada (monozona) e um conjunto de espaços complementares. Assenta numa metodologia dinâmica simplificada sugerida pela norma EN ISO 13790 (2008) e detalhada no texto de Raimundo (2008). Este programa começou por ser criado no âmbito de uma Tese de MiEM (Lopes, 2013), tendo posteriormente sido alvo de melhoramentos implementados pelo supervisor deste trabalho. O programa segue a abordagem proposta no RSECE (2006), procedendo à simulação horária monozona proposta neste regulamento.

Para se obter a simulação energética do edifício é necessário introduzir no programa os dados do edifício, os da sua envolvente opaca e envidraçados, e os dos seus perfis de utilização, como por exemplo o perfil de ocupação, de iluminação, de funcionamento da cozinha, entre outros. É também requerido pelo programa a introdução das potências disponíveis dos equipamentos que asseguram o AVAC e as AQS bem como os seus rendimentos.

Após se introduzirem todos os dados requeridos, o programa fornece ao seu utilizador um relatório energético como o que se encontra ilustrado na Figura 2.1 e na Figura 2.2.

Dos aspetos listados na Figura 2.1 e na Figura 2.2, o funcionamento da climatização (aquecimento e arrefecimento), a ventilação e bombagem, a energia associada aos equipamentos (não AVAC) e a iluminação são simulados para todas e cada uma das horas do ano. A energia associada aos restantes aspetos é obtida apenas por cálculo global anual, logo para estes últimos, não são determinados valores horários.

Refira-se ainda que, como é possível verificar na Figura 2.1, o programa entra em conta com a contribuição de energias renováveis, apresentando no seu relatório os consumos com e sem a contribuição das mesmas. Apresenta ainda também, a percentagem da energia alocada a cada um dos parâmetros possibilitando assim, de uma forma simples e

clara ao seu utilizador, verificar, por exemplo, qual dos pontos é o principal responsável pelo consumo de energia no edifício.

Energia para o edifício	Necessidade (energia útil)		Consumo (energia final)	
	Sem contribuição energia renovável [kWh/ano]	Após contribuição energia renovável [kWh/ano]	Após contribuição da energia renovável [kWh/ano]	[ % ]
Energia global para o edifício:	1 012 375.63	1 012 375.63	1 015 103.48	100.00%
Energia para aquecimento:	563 254.74	563 254.74	563 254.74	55.49%
Energia para arrefecimento:	119 489.76	119 489.76	119 489.76	11.77%
Energia para ventilação e bombagem:	7 619.42	7 619.42	9 524.28	0.94%
Energia para equipamentos (não AVAC):	116 532.00	116 532.00	116 532.00	11.48%
Energia para iluminação:	170 690.44	170 690.44	170 690.44	16.82%
Energia para preparação de AQS:	0.00	0.00	0.00	0.00%
Energia para a cozinha:	18 165.08	18 165.08	18 276.27	1.80%
Energia para a lavandaria:	0.00	0.00	0.00	0.00%
Energia para armazéns:	13 524.20	13 524.20	14 236.00	1.40%
Energia para estacionamento:	0.00	0.00	0.00	0.00%
Energia para a iluminação exterior:	3 100.00	3 100.00	3 100.00	0.31%
Energia para equipamentos específicos:	0.00	0.00	0.00	0.00%
Energia para espaços compl específicos:	0.00	0.00	0.00	0.00%

Figura 2.1. *SEnergEd* - Relatório final, quadro resumo (Exemplo).

Energia para climatização	Necessidade (energia útil)		Consumo (energia final)	
	Sem contribuição energia renovável [kWh/ano]	Após contribuição energia renovável [kWh/ano]	Após contribuição da energia renovável [kWh/ano]	[ % ]
Energia para climatização:	682 744.49	682 744.49	682 744.49	67.26%
Energia para aquecimento				
- Componente sensível:	563 254.74	563 254.74	563 254.74	55.49%
- Componente latente:	0.00	0.00	0.00	0.00%
Energia para arrefecimento				
- Componente sensível:	117 649.40	117 649.40	117 649.40	11.59%
- Componente latente:	1 840.35	1 840.35	1 840.35	0.18%
<b>Potências térmicas (valores úteis)</b>				
	<b>Sensível [kW]</b>	<b>Latente [kW]</b>	<b>Total [kW]</b>	
<b>Potências úteis que garantem os Setpoints em 100% do tempo de:</b>				
- Aquecimento:	335.00	0.00	335.00	
- Arrefecimento:	307.00	26.18	333.18	
<b>Potências úteis que garantem os Setpoints em 97.5% do tempo de:</b>				
- Aquecimento:	335.00	0.00	335.00	
- Arrefecimento:	268.63	22.91	291.54	
<b>Funcionamento do sistema de climatização:</b>				
Horas em aquecimento:	3 406	horas		
Horas em arrefecimento:	1 170	horas		
Climatização desligada:	4 184	horas		

Figura 2.2. *SEnergEd* – Relatório final, detalhe do AVAC (Exemplo).

Em anexo, ANEXO A – DADOS CONSIDERADOS NA SIMULAÇÃO, apresentam-se os vários menus de entrada de dados e as folhas de apresentação de resultados. As folhas de cálculo propriamente dito funcionam em modo escondido.

### **Folha de cálculo de análise económica de projetos**

A análise da viabilidade económica dos vários cenários testados foi efetuada recorrendo a uma folha de cálculo em *MS Excel* disponível como material de apoio à disciplina de Economia e Gestão Industrial (Raimundo, 2015).

Trata-se de uma folha de cálculo de fácil utilização, exigindo apenas que se domine os conceitos e os pressupostos associados a este tipo de análise. O utilizador apenas tem de introduzir a origem dos capitais e as taxas a que os mesmos estão sujeitos, os gastos e os rendimentos obtidos com o projeto e o valor residual dos equipamentos no fim do período de análise. Após a introdução destes dados, o programa calcula vários indicadores económicos, entre os quais o CAE (Custo Anual Equivalente)

Na presente situação o CAE representa o “gasto anual equivalente” para garantir na escola a climatização (aquecimento e arrefecimento) e a preparação das AQS necessárias, onde para além dos consumos de energia é incluído o “gasto anual equivalente” dos equipamentos afetos a estas tarefas.

Para efeitos do presente estudo optou-se por uma análise a preços constantes e um período de análise de 20 anos.

## **2.2. Necessidades energéticas para funcionamento do edifício**

As necessidades energéticas do edifício, são obtidas recorrendo-se ao programa SEnergEd o qual após a introdução de todos os parâmetros gera, como ilustrado na Figura 2.1 e na Figura 2.2, um relatório onde se encontram as necessidades energéticas para cada um dos sectores, como por exemplo, para o aquecimento e arrefecimento do edifício, e para a ventilação, entre outros.

Para além deste relatório final o programa, tem ainda um separador, “cálculos” no qual se encontram as necessidades horárias, para todos os dias do ano. Neste separador podemos encontrar as necessidades de aquecimento e arrefecimento, e o consumo de energia pela ventilação, quer pelos equipamentos não AVAC quer pela iluminação.

Note-se contudo que, as necessidades estão dependentes das potências dos equipamentos de climatização introduzidos no programa, isto é, as necessidades nunca são cumpridas na sua totalidade, dado que há ao longo do ano, há dias/horas de pico que saem fora dos padrões normais, como por exemplo um dia anormalmente frio. Assim, por exemplo, se se considerar um sistema de climatização com uma potência de 100 kW o programa vai considerar esses 100 kW como a potência máxima disponível a alocar em cada hora, levando assim a uma dada necessidade. Contudo se se considerar um



equipamento de 150 kW, este valor irá passar a ser o máximo horário, levando assim a um aumento do conforto, dado os requisitos de temperatura serem cumpridos durante mais tempo, levando também, conseqüentemente, a um aumento das necessidades térmicas calculadas pelo programa.

Para as necessidades serem sempre iguais seria necessário ter uma potência instalada que cumprisse em todas as horas, mesmo nas de pico, os requisitos térmicos estabelecidos, ficando assim, o sistema fortemente sobredimensionado, pois o mesmo estava a ser dimensionado para uma situação limite que ocorre um muito reduzido número de vezes por ano. O cumprimento ou não dos requisitos de climatização pode ser analisado, de uma maneira gráfica recorrendo à folha *Gráficos* do programa, ver Figura 2.3, ficando assim o utilizador com uma ideia do tempo em que a temperatura está dentro e fora dos limites pré-estabelecidos.

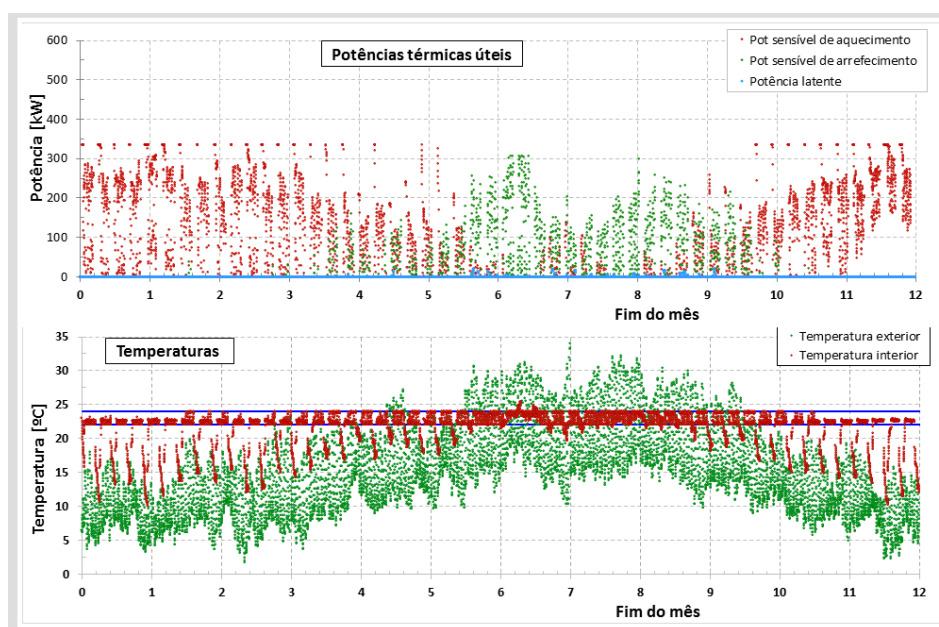


Figura 2.3. SEnergyEd – separador *gráficos*.

### 2.3. Análise energética - metodologia de cálculo

Neste trabalho são testados vários sistemas alternativos para os equipamentos que asseguram a climatização (aquecimento e arrefecimento), a preparação das AQS e nalguns casos a produção de energia eléctrica. Designamos por “Cenário” cada um dos conjuntos testados dos equipamentos para desempenho das funções anteriores.

Para poder comparar/analisar os diferentes cenários possíveis de cogeração, é necessário saber o consumo e a produção de energia de cada um dos equipamentos intervenientes nos mesmos, isto é, se o cenário em estudo for constituído, por exemplo, por

um moto-gerador para garantir o AVAC e as AQS, um chiller de compressão para providenciar as necessidades do AVAC e uma caldeira para as necessidades das AQS, é importante saber o valor do consumo e da produção energética de cada equipamento, uma vez que o preço do combustível primário é diferente no caso de se tratar, por exemplo, de eletricidade ou GN.

Como foi visto anteriormente o programa *SEnergEd*, apenas calcula os valores globais de consumo por item, como por exemplo “energia para aquecimento” e “energia para arrefecimento”, não dissecando o mesmo por consumo e produção energética do gerador, do chiller de compressão e da caldeira. Por este motivo, e por se ter acesso completo à programação do programa *SEnergEd*, o mesmo foi complementado de forma a dissecar os consumos por equipamento.

### **Consumo energético da cozinha**

No decorrer da utilização do programa verificou-se que o mesmo estava a considerar de forma errada o consumo energético da cozinha e das AQS, pelo facto de em alguns dias, nomeadamente durante o período de férias, a escola se encontrar aberta não estando contudo a cozinha a funcionar, nem havendo necessidades de AQS.

O consumo energético da cozinha,  $Q_{cozinha}$ , foi então obtido com recurso à seguinte função:

$$Q_{cozinha} = t_{h,cozinha} \rho_{t,cozinha} \quad (2.1)$$

em que:

$$\rho_{t,cozinha} = \rho_{equip} + \rho_{ilum} + \rho_{vent} \quad (2.2)$$

onde  $t_{h,cozinha}$ , representa o tempo em horas de funcionamento anual da cozinha,  $\rho_{equip}$ ,  $\rho_{ilum}$ ,  $\rho_{vent}$  as densidades de equipamentos, de iluminação e de ventilação, respetivamente, representando finalmente  $\rho_{t,cozinha}$  o somatório das densidades descritas anteriormente.

Atentando contudo na equação (2.1), verifica-se que desta forma apenas obtemos o consumo energético global da cozinha, onde se engloba o consumo de energia elétrica e de GN. Segundo Sousa (2011) 43% do consumo energético de uma cozinha industrial é referente à energia elétrica, sendo os restantes 57%, referentes ao consumo de GN. Recorrendo-se então a estas percentagens obtém-se:

$$Q_{elet,cozinha} = 0,43 Q_{cozinha} \quad (2.3)$$

$$Q_{GN,cozinha} = 0,57 Q_{cozinha} \quad (2.4)$$

onde,  $Q_{elet,cozinha}$  representa a energia elétrica consumida pela cozinha e  $Q_{GN,cozinha}$  o consumo de GN da cozinha.

Por outro lado, o consumo energético mensal para garantir as necessidades de AQS,  $Q_{AQS,m}$ , foi obtido da seguinte forma:

$$Q_{AQS,m} = \frac{Q_{GN,ed}}{9} - Q_{GN,cozinha,m} \quad (2.5)$$

em que:

$$Q_{GN,cozinha,m} = \frac{Q_{GN,cozinha}}{9} t_{d,cozinha,m} \quad (2.6)$$

onde  $t_{d,cozinha}$  representa os dias de funcionamento da cozinha num determinado mês,  $Q_{AQS,m}$  representa a energia mensal de GN consumida para garantir as necessidades de AQS,  $Q_{GN,ed}$  a quantidade de energia de GN total consumida no edifício,  $Q_{GN,cozinha,m}$  a quantidade mensal de GN gasta pela cozinha e  $t_{d,cozinha,m}$  representa o tempo em dias de funcionamento da cozinha num dado mês.

Para saber então a  $Q_{efet,AQS,m}$ , a energia efetivamente necessária para garantir as necessidades de AQS mensalmente, basta fazer:

$$Q_{efet,AQS,m} = Q_{AQS,m} \eta_{cald} \quad (2.7)$$

onde  $\eta_{cald}$  representa o rendimento da caldeira que providencia as AQS.

Note-se que, quando não se considera a contribuição dos painéis solares na preparação das AQS, tem de se considerar antes de se proceder à equação (2.5) que:

$$Q_{GN,ed} = Q_{GN,efet} + Q_{solar} \quad (2.8)$$

em que  $Q_{GN,efet}$  representa energia de GN consumida efetivamente pelo edifício e  $Q_{solar}$  representa a energia térmica efetiva fornecida pelos painéis solares.

### **Consumo dos equipamentos de climatização, de AQS e de cogeração**

Como referido anteriormente houve necessidade de se obter o consumo de cada equipamento. Para isso teve de se estabelecer primeiro uma lista de equipamentos prioritários, ou seja, qual dos equipamentos a entrar primeiro em funcionamento para suprir as necessidades térmicas. Optou-se por dar prioridade ao moto-gerador e à caldeira a *pellets*, em detrimento dos outros equipamentos. Isto foi feito recorrendo à formulação geral apresentada a seguir, onde  $P_{u,equip,i}$  representa a potência útil horária fornecida por um dado equipamento “i” e  $P_{nec}$ , representa a potência útil horária térmica necessária para suprir a totalidade de umas dadas necessidades térmicas (AVAC ou AQS).

$$P_{u,equip,1} = \begin{cases} P_{nec} & \text{se } P_{nec} < P_{u,equip,1} \\ P_{u,equip,1} & \text{se } P_{nec} \geq P_{u,equip,1} \end{cases} \quad (2.9)$$

$$P_{u,equip,2} = \begin{cases} 0, & \text{se } P_{u,equip,1} \geq P_{nec} \\ \text{Máx}[(P_{nec} - P_{u,equip,1}); P_{u,equip,2}], & \text{se } P_{nec} > P_{u,equip,1} \end{cases}$$

Nos cenários em que apenas há um equipamento passível de fornecer uma dada necessidade tem-se apenas que:

$$P_{u,equip,1} = \begin{cases} P_{nec}, & \text{se } P_{nec} < P_{u,equip,1} \\ P_{u,equip,1}, & \text{se } P_{nec} \geq P_{u,equip,1} \end{cases} \quad (2.10)$$

Atente-se contudo que, no caso de apenas se ter um equipamento capaz de suprir uma necessidade, como por exemplo acontece no cenário real, em que temos unicamente o chiller bomba de calor a assegurar as necessidades de AVAC, que se a potência necessária à climatização for superior à potência disponível do chiller ter-se-á um défice de energia térmica, não sendo assim asseguradas as condições de conforto térmico.

Como já foi referido em todos os cenários, quer as necessidades térmicas quer de AVAC quer de AQS, são asseguradas ao longo de todo o ano.

Após se ter calculado a potência gerada pelo equipamento,  $P_{u,equip,i}$ , para se obter a potência consumida,  $P_{consum,i}$ , basta fazer:

$$P_{consum,i} = \frac{P_{u,equip,i}}{\eta_{equip,i}} \quad (2.11)$$

No caso do moto-gerador e da turbina, é ainda necessário proceder ao cálculo da energia elétrica gerada. Note-se que, apenas existe geração de energia elétrica quando há necessidades térmicas. Então, para se obter a energia elétrica gerada pelo moto-gerador, atentou-se nas seguintes equações:

$$P_{cons,gerador} = \frac{P_{term,gerador}}{\eta_{T,gerador}} \quad (2.12)$$

$$P_{elet,gerador} = \eta_{elet,gerador} P_{cons,gerador} \quad (2.13)$$

onde  $P_{cons,gerador}$ , representa a potência consumida pelo gerador,  $P_{term,gerador}$ , a potência térmica gerada pelo moto-gerador e  $\eta_{T,gerador}$ ,  $\eta_{elet,gerador}$ , o rendimento térmico do gerador e elétrico do gerador, respetivamente. Assim sendo, a potencia elétrica gerada é dada por:

$$P_{elet} = \frac{\eta_{elet}}{\eta_{term}} P_{term} \quad (2.14)$$

Falta agora proceder à análise da energia elétrica gerada pela turbina. Contudo, o mesmo cálculo é mais complexo que no caso do moto-gerador, tendo de se considerar alguns pressupostos.

Segundo os catálogos técnicos das turbinas, verificou-se que as mesmas mantinham o seu rendimento ( $\eta_{turb}$ ) até um regime de funcionamento parcial de 50%, abaixo do qual o rendimento se “deteriora”. Assim, para se poder proceder a esta análise, tem de se admitir, um valor para a quantidade de vapor gerada pela caldeira que torna nulo o seu rendimento, aqui denominado por  $P_{PZ}$ .

Consideram-se então três pontos de funcionamento, o mínimo, referente a 50% da carga e onde rendimento da turbina é ainda máximo, o ponto  $P_{PZ}$  que torna nulo o rendimento da turbina e um ponto genérico entre estes dois designado por ponto “i”. Desta

forma é possível deduzir uma equação genérica que dê o rendimento da turbina para qualquer nível de carga são considerados os seguintes pontos

$$\begin{aligned}\eta_{P_Z} &\leftrightarrow P_{P_Z} \\ \eta_{P_i} &\leftrightarrow P_i \\ \eta_n &\leftrightarrow P\end{aligned}\quad (2.15)$$

onde  $\eta_n$  e  $P_n$  representam, respetivamente o rendimento no ponto “nominal” e a potência de vapor fornecida à turbina que leva a esse rendimento. Obtém-se então:

$$(\eta_i - \eta_{P_Z}) = \frac{P_i - P_{P_Z}}{P_n - P_{P_Z}} (\eta_n - \eta_{P_Z}) \quad (2.16)$$

$$\eta_{turb} = \frac{P_{u,turb} - P_{P_Z}}{P_n - P_{P_Z}} (\eta_n - \eta_{P_Z}) \quad (2.17)$$

onde  $\eta_{turb}$  representa o rendimento da turbina e  $P_{u,turb}$  a potência útil de vapor gerada pela caldeira.

Obtém-se a seguinte formulação para o rendimento da turbina:

$$\eta_{turb} = \begin{cases} 0, & \text{se } P_u < P_{P_Z} \\ \frac{P_u - P_{P_Z}}{P_n - P_{P_Z}} (\eta_n - P_u), & \text{se } \eta_n \geq P_n \end{cases} \quad (2.18)$$

Agora pode-se calcular a potência útil da caldeira ( $P_{u,cald}$ ) como se mostra na seguinte dedução:

$$P_{u,turb} = P_{u,cald} (\eta_{turb} \eta_{permutador}) \quad (2.19)$$

$$P_{AVAC+AQS} = P_{u,cald} - P_{u,cald} (\eta_{turb} \eta_{permutador}) \quad (2.20)$$

$$P_{AVAC+AQS} = P_{u,cald} (1 - \eta_{turb} \eta_{permutador}) \quad (2.21)$$

$$P_{u,cald} = \frac{P_{AVAC+AQS}}{(1 - \eta_{turb} \eta_{permutador})} \quad (2.22)$$

Então a potência efetiva consumida pela caldeira ( $P_{efet,cald}$ ) é finalmente dada por:

$$P_{efet,cald} = \frac{P_{u,cald}}{\eta_{cald}} \quad (2.23)$$

onde  $P_{u,cald}$  representa a potência útil gerada pela caldeira e  $P_{AVAC+AQS}$  representa a potência gerada pela caldeira para garantir as necessidades de AVAC e AQS.

Falta então agora, apenas determinar a potência de energia elétrica gerada pela turbina ( $P_{elet,turb}$ ) o que foi conseguido, fazendo:

$$P_{elet,turb} = P_{u,cald} \eta_{cald} \eta_{permutador} \eta_{turb} \quad (2.24)$$

onde  $P_{elet,turb}$  representa a potência elétrica efetiva gerada pela turbina, tendo então, assim a quantidade de energia gerada e consumida pela turbina.

Note-se que na equação anterior figura o rendimento de um permutador ( $\eta_{permutador}$ ). Este facto deve-se a que a caldeira a *pellets* apenas produz água quente e não vapor, sendo por isso necessário recorrer à introdução de um permutador, localizado entre a caldeira e a turbina, para transferir o calor da água para um biofluido.

Uma vez que se vai proceder a uma análise na ótica do autoconsumo irá a cada hora, ser comparada a potência elétrica gerada no moto-gerador ou na turbina, com a potência elétrica consumida pela escola, determinando assim se existe um excedente de energia elétrica, sendo a mesma injetada na rede, ou se por seu turno existe um défice, tendo o mesmo de ser colmatado com a compra de energia à rede.

## 2.4. Análise económico-financeira – metodologia de cálculo

A viabilidade económico-financeira dos cenários alternativos testados, para os equipamentos que asseguram a climatização (aquecimento e arrefecimento), a preparação das AQS e nalguns casos à produção de energia eléctrica, acaba por ser o fator decisivo na escolha entre os vários sistemas possíveis a implementar.

Um dos indicadores económicos possíveis para fazer esta distinção entre os cenários tecnicamente possíveis é o *CAE* (custo anual equivalente).

O *CAE* neste caso, representa o montante anualmente gasto para garantir as necessidades energéticas do edifício, sendo assim, o sistema de cogeração mais vantajoso será aquele que tiver um menor *CAE*.

Para obter o *CAE* referente a cada um dos cenários testados recorreu-se a uma folha de cálculo em *MS Excel* disponível como material de apoio à disciplina de Economia e Gestão Industrial (Raimundo, 2015). De referir aqui que a folha de cálculo permite obter outros parâmetros de análise económico-financeira mas que, como não são úteis para a presente análise, não são aqui mencionados. Também não são referidos os valores que por se tratar de uma organização pública assumem valores nulos, como sejam impostos a pagar e eventuais poupanças fiscais.

Para determinar o *CAE* é necessário ter em conta os custos de aquisição e instalação dos sistemas e os consumos energéticos do edifício. Apresenta-se seguidamente a metodologia de cálculo implementada na folha de cálculo para obter este parâmetro.

O *cash-flow* anual de exploração (*CF*) do cenário representa o saldo entre os fluxos económicos de entrada e de saída, ou seja corresponde à subtração dos gastos anuais (*G*) aos rendimentos desse ano (*R*). Sendo assim, o *cash-flow* é dado por

$$CF = R - G \quad (2.25)$$

Os gastos são essencialmente constituídos pelos valores anuais a pagar pela energia consumida e pela manutenção dos equipamentos. Os rendimentos anuais são apenas os que resultam de uma possível venda de energia eléctrica.

Para os equipamentos que consomem energia elétrica ou geram energia elétrica basta multiplicar a energia consumida ou o excedente da energia gerada pelos mesmos pelo preço de compra e de venda desta energia, respetivamente. No caso dos equipamentos que consomem GN procede-se da mesma forma, obviamente não havendo venda desta energia, apenas compra. Nos equipamentos que têm como fonte de energia primária os *pellets*, é necessário fazer sucessivamente:

$$\dot{M}_{pellets} = \frac{P_{cons,cald}}{PCI_{pellets}} \quad (2.26)$$

$$Gasto_{pellets} = \dot{M}_{pellets} \text{ Custo}_{pellets} \quad (2.27)$$

onde  $\dot{M}_{pellets}$  representa o consumo mássico anual de *pellets*,  $P_{cons,cald}$  a potência consumida pela caldeira num ano,  $PCI_{pellets}$  o poder calorífico inferior dos *pellets* e  $Custo_{pellets}$  o custo unitário deste combustível.

A taxa de atualização para uma análise a preços constantes ( $i$ ) pode ser definida como sendo uma média ponderada entre o custo dos capitais próprios e dos capitais alheios investidos no projeto, sendo calculado mediante a seguinte expressão:

$$i = P_p \cdot i_p + P_a \cdot i_a \quad (2.28)$$

em que  $P_p$  ( $0 \leq P_p \leq 1$ ) e  $P_a$  ( $0 \leq P_a \leq 1$ ) representam a parcela de capitais próprios e alheios, respetivamente, e  $i_a$  e  $i_p$  representam respetivamente a taxa de juro efetiva global para os capitais alheios e a taxa de juro exigida aos capitais próprios.

Pode-se agora calcular o  $VLA$  (valor líquido actual) recorrendo à expressão:

$$VLA = \sum_{k=0}^n \frac{CF_k - I_k}{(1+i)^k} + \frac{VR}{(1+i)^n} \quad (2.29)$$

onde  $n$  representa o número de anos de análise do projeto,  $CF_k$  o *cash-flow* anual de exploração no ano  $k$ ,  $I_k$  o capital a investir no ano  $k$  e  $VR$  a estimativa do valor económico do projeto ao fim de  $n$  anos.

Conhecido o valor do  $VLA$ , que é o valor do resultado (ou lucro) global do projecto quando atualizado para o instante inicial, é agora possível determinar o  $CAE$ . Este, por representar um gasto anual, é proporcional ao inverso do  $VLA$ , ou seja, o  $CAE$  é a renda anual equivalente ao inverso do  $VLA$  (Raimundo, 2015), vindo

$$CAE = -VLA \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (2.30)$$

É óbvio que para os projetos em apreço o  $VLA$  é provavelmente negativo. Logo, esperam-se para todos os casos um  $CAE$  positivo. Se resultar positivo estamos perante um  $RAE$  (rendimento anual equivalente).

### 3. PROBLEMA EM ESTUDO

Tendo em atenção que a cogeração é potencialmente mais viável em edifícios com elevado consumo energético, selecionou-se uma escola secundária de grande dimensão para servir de base ao estudo. Serão testadas várias alternativas para os sistemas ativos de AVAC e de preparação de AQS, desde os mais tradicionais a sistemas com cogeração e/ou incorporando energias renováveis.

#### 3.1. Descrição do edifício

Será tido como problema em estudo um edifício do sector terciário. Por se inserir dentro dos requisitos pretendidos, a escola secundária selecionada foi a ESAB - Escola Secundária de Avelar Brotero, sita na rua Dom Manuel I, na cidade de Coimbra, ver Figura 3.1 (Google Maps, 2015)



Figura 3.1. Vista aérea do edifício escolar em estudo (Google).

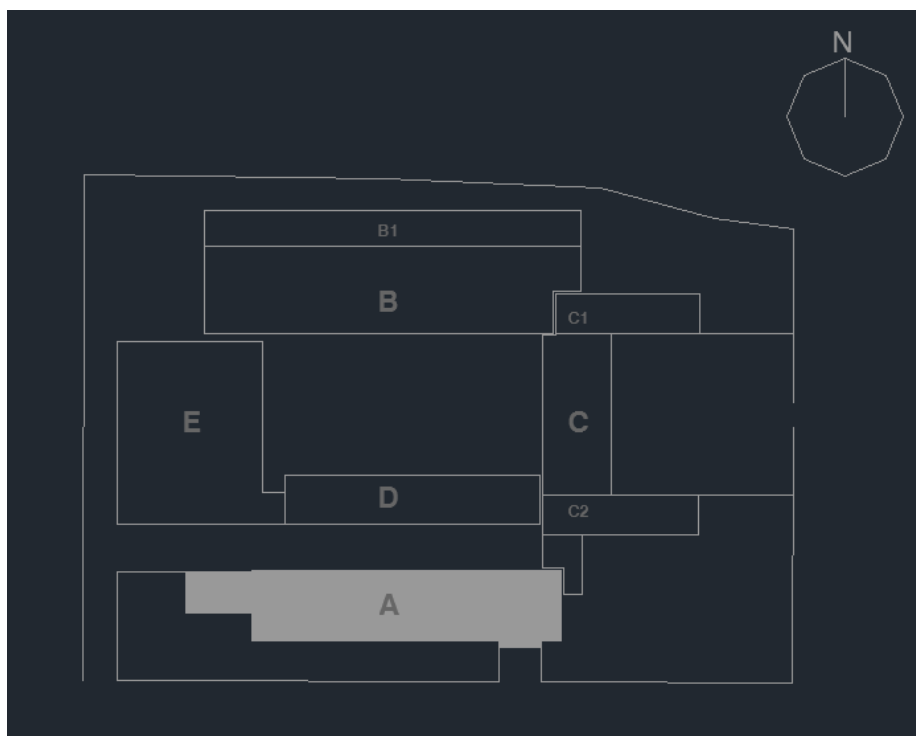
Esta escola tem uma população estudantil de aproximadamente 1 100 alunos, funcionando de segunda a sexta-feira entre as 8h e as 18.30h. Tem ainda um período de funcionamento noturno, entre as 19h e as 23h.

O edifício onde funciona a escola é composto por 7 corpos, *A*, *B*, *C*, *C1*, *C2*, *D* e *E*. Nos dois primeiros corpos funcionam as salas de aulas, no *C* funciona a biblioteca, o salão polivalente, a sala dos diretores de turma e a cozinha, no corpo *D* existe a sala de professores e balneários e sendo o corpo *E* um campo exterior coberto (o pavilhão



desportivo). Os blocos *A* e *B* são constituídos por 3 pisos, o *C*, *C1* e *C2* por 4 e o *D* por 1 piso.

A construção das instalações próprias da ESAB, corpos *A*, *B* e *C* iniciou-se em 1954 tendo apenas sido concluído em Setembro de 1958 (Figueira, 2012). Posteriormente, nos anos de 2007 e 2008 a escola foi alvo de modernização no âmbito da Fase 1 da Parque Escolar, tendo sido construídos então os blocos *C1*, *C2* (acoplados ao bloco *C*) e o bloco *E*, tendo ainda sido construído, aproveitando o talude que define o pátio central, o bloco *D*. Na Figura 3.2 encontra-se ilustrada a divisão atual da escola em blocos.



**Figura 3.2.** Divisão atual do edifício escolar da ESAB em blocos (Natural-Works, 2009).

Esta edificação tem um pé direito médio de 3 m e uma área útil de pavimento de 11 246 m<sup>2</sup>. Desta área útil 7 669 m<sup>2</sup> são referentes às salas de aula, 3 171 m<sup>2</sup> referentes aos corredores e finalmente 406 m<sup>2</sup> ocupada pelos balneários.

O sistema atualmente implementado no edifício para suprir as necessidades consta de uma caldeira a GN, que supre as necessidades AQS e de um chiller bomba de calor que colmata as necessidades de climatização (aquecimento e arrefecimento).

A caldeira a GN tem uma potência nominal  $P_n = 156,5$  kW, tendo uma potência útil  $P_u = 144$  kW, levando assim a um rendimento  $\eta = 0,92$ . Por seu turno, o chiller bomba de calor, alimentado por energia elétrica, tem uma potência útil de aquecimento de 335 kW e uma potência útil de refrigeração de 307 kW, tendo ainda um  $EER = 2,7$  e um  $COP = 2,9$ .

A escola tem ainda um sistema de painéis solares térmicos constituído por 20 coletores solares, sendo a instalação constituída por 5 ramais em paralelo, contendo 4

coletores em série por ramal. Cada painel solar térmico tem uma área útil de captação (área de absorção) de  $2,2 \text{ m}^2$  e uma área bruta de  $2,57 \text{ m}^2$ , tendo um rendimento  $\eta_0 = 0,82$  e uma taxa de transferência de calor global  $UA = 4,3 \text{ W}/(^{\circ}\text{C m}^2)$ , estando aplicados com uma inclinação de  $40^{\circ}$ .

Nota: Valores obtidos através dos catálogos técnicos dos equipamentos instalados.

## 3.2. Consumo energético atual do edifício

Atualmente, em termos energéticos, a escola apresenta apenas consumos de energia elétrica e de GN (gás natural).

### 3.2.1. Consumo energético real

O consumo de energia elétrica faturada mensalmente à escola representa o consumo real desse mês, dado que o contador elétrico se encontra *on-line*. Por seu turno, o consumo de GN é estimado. Assim sendo, no que concerne ao consumo de GN apenas se consegue saber o consumo médio mensal.

Refira-se ainda, que apenas se teve acesso às faturas de eletricidade e de GN dos meses de janeiro a novembro, tendo por isso o mês de dezembro sido estimado partindo da análise dos meses anteriores.

Assim, na Tabela 3.1 e na Tabela 3.2, encontram-se, respetivamente, os consumos, de energia elétrica e de GN.

**Tabela 3.1.** Consumo elétrico real da ESAB, no ano de 2014.

	Consumo elétrico [kWh]
<b>Janeiro</b>	72 901
<b>Fevereiro</b>	61 333
<b>Março</b>	56 040
<b>Abril</b>	46 084
<b>Mai</b>	37 820
<b>Junho</b>	34 771
<b>Julho</b>	42 042
<b>Agosto</b>	25 542
<b>Setembro</b>	40 879
<b>Outubro</b>	45 217
<b>Novembro</b>	45 931
<b>Dezembro</b>	50 000 (estimado)

**Tabela 3.2.** Consumo de GN da ESAB, no ano de 2014.

	<b>Consumo GN [kWh]</b>
<b>Janeiro</b>	8 979
<b>Fevereiro</b>	10 423
<b>Março</b>	8 365
<b>Abril</b>	8 868
<b>Mai</b>	8 865
<b>Junho</b>	6 181
<b>Julho</b>	6 15
<b>Agosto</b>	0
<b>Setembro</b>	2 173
<b>Outubro</b>	8 437
<b>Novembro</b>	13 877
<b>Dezembro</b>	10 000 (estimado)

### **3.2.2. Simulação da contribuição para AQS do sistema solar térmico**

O sistema atualmente implementado na escola conta com a contribuição de coletores solares térmicos para a preparação das AQS.

Como já referido anteriormente, este sistema é composto por 20 coletores com uma área útil de captação (área de absorção) de  $2,2 \text{ m}^2$  e uma área bruta de  $2,57 \text{ m}^2$ , tendo ainda um rendimento  $\eta_0 = 0,82$  e uma taxa de transferência de calor global  $UA = 4,3 \text{ W}/(\text{°C m}^2)$ , estando os mesmos aplicados com uma inclinação de  $40^\circ$ .

O sistema solar térmico é ainda composto por um depósito de 5 000 litros de água, com um permutador externo com rendimento  $\eta = 0,75$ , e uma caldeira a GN como sistema de apoio.

Para proceder à simulação, para além dos dados supracitados, é ainda necessário definir um perfil de utilização das AQS. Para o efeito considerou-se que cada aluno da escola tomaria 2 banhos semanais, gastando em média em cada banho 28 litros de AQS a  $45^\circ\text{C}$ . Obteve-se assim um consumo médio diário de 12 312 litros. Por seu turno este consumo é repartido ao longo do dia letivo, com 9 horas de duração, obtendo-se um consumo médio horário de 1 368 litros de AQS. No período de fim-de-semana, considerou-se nulo o consumo de AQS. Apresenta-se na Figura 3.3 o perfil de consumo de AQS resultante destes pressupostos.

Perfis de consumo de segunda a sexta (l)

hora	Jan	Feb	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
01												
02												
03												
04												
05												
06												
07												
08												
09												
10	1368	1368	1368	1368	1368	1368			1368	1368	1368	1368
11	1368	1368	1368	1368	1368	1368			1368	1368	1368	1368
12	1368	1368	1368	1368	1368	1368			1368	1368	1368	1368
13	1368	1368	1368	1368	1368	1368			1368	1368	1368	1368
14	1368	1368	1368	1368	1368	1368			1368	1368	1368	1368
15	1368	1368	1368	1368	1368	1368			1368	1368	1368	1368
16	1368	1368	1368	1368	1368	1368			1368	1368	1368	1368
17	1368	1368	1368	1368	1368	1368			1368	1368	1368	1368
18	1368	1368	1368	1368	1368	1368			1368	1368	1368	1368
19												
20												
21												
22												
23												
24												
diário	12312	12312	12312	12312	12312	12312			12312	12312	12312	12312

Figura 3.3. Perfil do consumo das AQS para todo o ano.

Introduzindo, no programa *SolTerm*, a informação anterior relativa ao sistema solar térmico e ao perfil anual de consumo obtém-se o relatório final presente na Figura 3.4.

	Rad.Horiz. kWh/m²	Rad.Inclin. kWh/m²	Desperdiçado kWh	Fornecido kWh	Carga kWh	Apoio kWh
Janeiro	56	94	,	2853	13072	10218
Fevereiro	74	109	,	2919	10943	8024
Março	108	132	,	3142	11506	8364
Abril	148	157	51,	4194	11218	7024
Mai	184	174	,	4676	12188	7512
Junho	191	171	,	4228	9927	5699
Julho	211	194	1833,	0	0	0
Agosto	193	197	2196,	0	0	0
Setembro	136	160	85,	4124	9816	5692
Outubro	102	143	,	4288	12110	7822
Novembro	66	112	,	3119	11381	8262
Dezembro	53	95	,	2711	11689	8978
<b>Anual</b>	<b>1523</b>	<b>1739</b>	<b>4164,</b>	<b>36255</b>	<b>113849</b>	<b>77595</b>
					Fracção solar: 31,8%	
					Produtividade: 824 kWh/[m² colector]	

Figura 3.4. Solterm – relatório contribuição dos coletores solar térmicos.

No Anexo B - Relatório *Solterm*, encontra-se o relatório completo obtido nesta simulação.

### 3.2.3. Consumo energético simulado do edifício

Como referido anteriormente a simulação do problema em estudo foi feita recorrendo ao programa *SEnergEd*.

Após a introdução dos dados referentes ao edifício, envolvente opaca, envidraçados e perfis obteve-se então o consumo energético simulado para o edifício, encontrando-se os dados considerados para a simulação no Anexo A.

Obteve-se então os consumos energéticos presentes na Tabela 3.3.

**Tabela 3.3.** Consumo elétrico total simulado da ESAB

	<b>Consumo eléctrico do edifício [kWh]</b>
<b>Janeiro</b>	62 973
<b>Fevereiro</b>	55 828
<b>Março</b>	56 442
<b>Abril</b>	44 834
<b>Mai</b>	37 404
<b>Junho</b>	35 361
<b>Julho</b>	39 919
<b>Agosto</b>	27 399
<b>Setembro</b>	39 496
<b>Outubro</b>	40 748
<b>Novembro</b>	49 644
<b>Dezembro</b>	50 373
<b>SOMA</b>	<b>540 421</b>

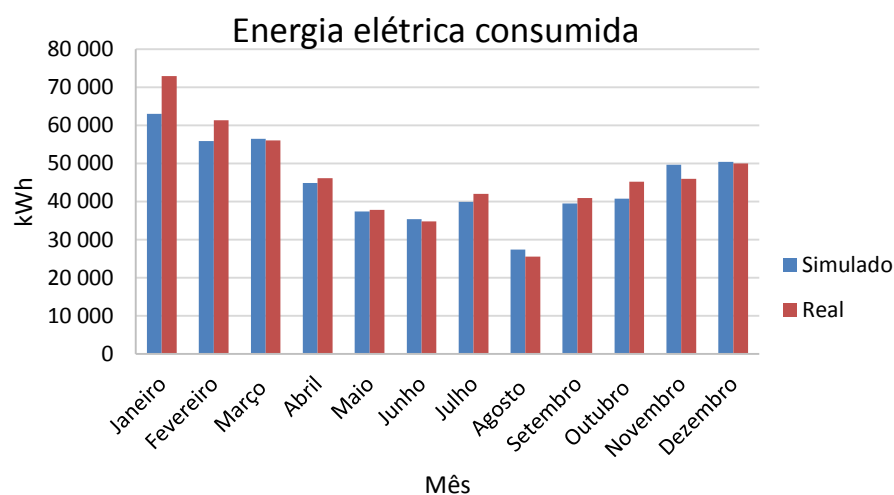
Note-se que, apenas se apresenta o consumo elétrico simulado dado que o consumo de GN é igual na simulação e na realidade. Este facto deve-se a ter-se obtido a potencia útil necessária à preparação das AQS e à cozinha partindo do consumo real, como demonstrado anteriormente.

### 3.3. Validação da metodologia de análise

Para se proceder à validação do modelo de simulação, para assim o poder utilizar para proceder à simulação energética do edifício, comparam-se os valores energéticos reais, com os consumos energéticos obtidos pela simulação. No fundo trata-se de uma comparação entre os valores apresentados na Tabela 3.3. com os presentes na Tabela 3.1. Na Tabela 3.4 e no gráfico representado na Figura 5, encontram-se as comparações destes dois consumos.

**Tabela 3.4.** Consumo elétrico total simulado da ESAB.

	Real [kWh]	Simulado [kWh]
<b>Janeiro</b>	72 901	63 696
<b>Fevereiro</b>	61 333	56 443
<b>Março</b>	56 040	56 985
<b>Abril</b>	46 084	45 485
<b>Mai</b>	37 820	38 164
<b>Junho</b>	34 771	35 595
<b>Julho</b>	42 042	39 566
<b>Agosto</b>	25 542	27 242
<b>Setembro</b>	40 879	39 809
<b>Outubro</b>	45 217	41 544
<b>Novembro</b>	45 931	50 403
<b>Dezembro</b>	50 000	50 807
<b>SOMA</b>	<b>558 560</b>	<b>545 739</b>



**Figura 5** – comparação do consumo energético real com o simulado

Apresenta-se na Tabela 3.5 uma comparação entre os consumos anuais do edifício obtidos por simulação e os verificados na realidade, para o caso do consumo de energia elétrica.

**Tabela 3.5.** Comparação entre os valores globais do consumo anual global de eletricidade pelo edifício.

<b>Consumo de energia elétrica obtido por simulação [kWh]</b>	545 740
<b>Consumo energia elétrica real [kWh]</b>	558 560
<b>Diferença = Real - Simulado [kWh]</b>	12 819
<b>Diferença = Real vs Simulado [%]</b>	2,30%

A simulação encontra-se assim validada, uma vez que tem um erro de apenas 2,30% como se pode observar na Tabela 3.5.

### 3.4. Sistemas alternativos de AVAC, AQS e Cogeração

Com o intuito de se calcular a viabilidade da implementação de um sistema de cogeração num edifício escolar, foram criados cenários alternativos ao atual, verificando-se posteriormente qual deles será economicamente o mais vantajoso.

Analisam-se 7 cenários alternativos diferentes, numerados de 1 a 7. No entanto cada cenário foi ainda subdividido em vários sub-cenários, como seguidamente se irá apresentar. Aos sub-cenários foi dada uma nomenclatura segundo um “código”, sendo assim mais fácil de se entender a particularidade de cada um deles. Assim, “B” indica que se trata do cenário base, “ST” (de solar térmico) representa que existe contribuição dos painéis solares térmicos na preparação das AQS e “DV” (de desligado no verão) indica que um dos equipamentos que providencia o AVAC e as AQS está desligado durante o período de arrefecimento.

Nos cenários alternativos o chiller bomba de calor, a caldeira a GN e o sistema solar térmico são os que se encontram efetivamente instalados no cenário real, dado se estar a considerar que apenas se irá complementar o mesmo. Contudo, foram ainda considerados novos cenários, supondo que a instalação iria ser criada de raiz.

Não foi considerado em nenhum dos cenários a hipótese de trigerção, quer por razões técnicas quer económicas, dado este sistema ter um custo muito elevado e funcionar apenas no período de arrefecimento, o que no caso da escola, representa na realidade pouco mais de um mês. Aleado a este facto havia ainda a necessidade de se ter uma torre de arrefecimento, dado que as necessidades de AQS não são suficientes para escoar o calor de refrigeração do chiller de absorção que seria necessário incorporar.

As várias alternativas para os sistemas ativos de AVAC e de preparação de AQS e eventuais equipamentos de cogeração são

- Cenário 1 – Chiller / Bomba de calor + Caldeira a GN
- Cenário 2 – Chiller / Bomba de Calor + Caldeira a GN + Gerador a GN
- Cenário 3 – Chiller / Bomba de Calor + Caldeira GN + Caldeira a Pellets
- Cenário 4 – Chiller / Bomba de Calor + Gerador a GN
- Cenário 5 – Chiller / Bomba de Calor + Caldeira a pellets
- Cenário 6 – Chiller / Bomba de Calor + Caldeira a pellets + Turbina a vapor
- Cenário 7 – Chiller / Bomba de Calor + Caldeira a pellets + Turbina a vapor

No caso dos cenários 6 e 7 a diferença está em que no 6 a Turbina a vapor tem uma potência útil de 100 kW e no 7 esta potência é de 200 kW.

Segue-se uma apresentação com mais detalhe de cada um dos cenários, a qual é precedida de uma tabela com as características dos equipamentos que o constituem, sendo as mesmas extensíveis aos sub-cenários desse cenário.

### **Cenário 1 –Chiller / Bomba de calor + Caldeira a GN**

Apresenta-se na Tabela 3.6 as características dos equipamentos que constituem este cenário, seguida da indicação dos equipamentos que compõem cada sub-cenário.

**Tabela 3.6.** Caraterística dos equipamentos do cenário 1.

<b>Equipamento</b>	<b>Caldeira a GN</b>
<b>Potência útil</b>	144 kW
<b>Potência nominal</b>	156,5 kW
<b>Rendimento</b>	0,92
<b>Equipamento</b>	<b>Chiller / Bomba de Calor</b>
<b>Potência útil de aquecimento</b>	335 kW
<b>COP</b>	2,9
<b>Potência útil de arrefecimento</b>	307 kW
<b>EER</b>	2,7

#### **Sub-cenário 1B**

- Caldeira a GN → AQS
- Chiller / Bomba de calor → AVAC

#### **Sub-cenário 1B+ST → situação atual (real)**

- Caldeira a GN → AQS
- Chiller / Bomba de calor → AVAC
- Painéis solares térmicos → AQS

### **Cenário 2 – Chiller / Bomba de Calor + Caldeira a GN + Gerador a GN**

Apresenta-se na Tabela 3.7 as características dos equipamentos que constituem este cenário, seguida da indicação dos equipamentos que compõem cada sub-cenário.

**Tabela 3.7.** Caraterística dos equipamentos do cenário 2

<b>Equipamento</b>	<b>Caldeira a GN</b>
<b>Potência útil</b>	144 kW
<b>Potência nominal</b>	156,5 kW
<b>Rendimento</b>	0,920
<b>Equipamento</b>	<b>Chiller / Bomba de Calor</b>
<b>Potência útil de aquecimento</b>	335 kW
<b>COP</b>	2,9
<b>Potência útil de arrefecimento.</b>	307 kW
<b>EER</b>	2,7



Equipamento	Gerador a GN
Potência de alimentação	960 kW
Potência elétrica	363 kW
Rendimento elétrico	0,378125
Potência térmica	498 kW
Rendimento térmico	0,51875

### Sub-cenário 2B

- Moto-gerador a GN → Energia elétrica + AVAC + AQS
- Chiller / Bomba de calor → AVAC
- Caldeira a GN → AQS

### Sub-cenário 2B+ST

- Moto-gerador a GN → Energia elétrica + AVAC + AQS
- Chiller / Bomba de calor → AVAC
- Caldeira a GN → AQS
- Painéis solar térmicos → AQS

### Sub-cenário 2B+DV

- Moto-gerador a GN → Energia elétrica + AVAC + AQS
- Chiller / Bomba de calor → AVAC
- Caldeira a GN → AQS

Neste cenário considera-se que o moto-gerador desligado no período de arrefecimento, ou seja no verão.

### Sub-cenário 2B+ST+DV

- Moto-gerador a GN → Energia elétrica + AVAC + AQS
- Chiller / Bomba de calor → AVAC
- Caldeira a GN → AQS
- Painéis solar térmicos → AQS

Neste cenário considera-se, mais uma vez, que o moto-gerador está desligado no verão.

### **Cenário 3 – Chiller / Bomba de Calor + Caldeira GN + Caldeira a Pellets**

Apresenta-se na Tabela 3.8 as características dos equipamentos que constituem este cenário, seguida da indicação dos equipamentos que compõem cada sub-cenário.

**Tabela 3.8.** Característica dos equipamentos do cenário 3

Equipamento	Caldeira GN
Potência útil	144 kW
Potência nominal	156,5 kW
Rendimento	0,92

Equipamento	Chiller / Bomba de Calor
Potência útil de aquecimento	335 kW
<i>COP</i>	2,9
Potência útil de arrefecimento	307 kW
<i>EER</i>	2,7
Equipamento	Caldeira a Pellets
Potência de alimentação	400 kW
Potência útil	360 kW
Rendimento	0,9

### Sub-cenário 3B

- Caldeira a *pellets* → AVAC + AQS
- Chiller / Bomba de calor → AVAC
- Caldeira a GN → AQS

### Sub-cenário 3B+ST

- Caldeira a *pellets* → AVAC + AQS
- Chiller / Bomba de calor → AVAC
- Caldeira a GN → AQS
- Painéis solare térmicos → AQS

### Sub-cenário 3B+DV

- Caldeira a *pellets* → AVAC + AQS
- Chiller / Bomba de calor → AVAC
- Caldeira a GN → AQS

Neste cenário considera-se que a caldeira a *pellets* está desligada no verão.

### Sub-cenário 3B+ST+DV

- Caldeira a *pellets* → AVAC + AQS
- Chiller / Bomba de calor → AVAC
- Caldeira a GN → AQS
- Painéis solares térmicos → AQS

Neste cenário considera-se que a caldeira a *pellets* se encontra desligada no período de arrefecimento.

### **Cenário 4 – Chiller / Bomba de Calor + Caldeira a GN + Gerador a GN**

Apresenta-se na Tabela 3.9 as características dos equipamentos que constituem este cenário, seguida da indicação dos equipamentos que compõem cada sub-cenário.

**Tabela 3.9.** Característica dos equipamentos do cenário 4

<b>Equipamento</b>	<b>Chiller / Bomba de Calor</b>
<b>Potência útil de aquecimento</b>	335 kW
<b>COP</b>	2,9
<b>Potência útil de arrefecimento</b>	307 kW
<b>EER</b>	2,7
<b>Equipamento</b>	<b>Gerador a GN</b>
<b>Potência de alimentação</b>	960 kW
<b>Potência elétrica</b>	363 kW
<b>Rendimento elétrico</b>	0,378125
<b>Potência térmica</b>	498 kW
<b>Rendimento térmico</b>	0,51875

#### **Sub-cenário 4B**

- Moto-gerador a GN → Energia elétrica + AVAC + AQS
- Chiller / Bomba de calor → AVAC

#### **Sub-cenário 4B+ST**

- Moto-gerador a GN → Energia elétrica + AVAC + AQS
- Chiller / Bomba de calor → AQS
- Painéis solares térmicos → AQS

### **Cenário 5 – Chiller / Bomba de Calor + Caldeira a pellets**

Apresenta-se na Tabela 3.10 as características dos equipamentos que o constituem este cenário, seguida da indicação dos equipamentos que compõem cada sub-cenário.

**Tabela 3.10.** Característica dos equipamentos do cenário 5

<b>Equipamento</b>	<b>Chiller / Bomba de Calor</b>
<b>Potência útil de aquecimento</b>	335 kW
<b>COP</b>	2,9
<b>Potência útil de arrefecimento</b>	307 kW
<b>EER</b>	2,7
<b>Equipamento</b>	<b>Caldeira a pellets</b>
<b>Potência de alimentação</b>	540 kW
<b>Potência útil</b>	480 kW
<b>Rendimento</b>	0,89

### Sub-cenário 5B

- Caldeira a *pellets* → AVAC + AQS
- Chiller / Bomba de calor → AVAC

### Sub-cenário 5B+ST

- Caldeira a *pellets* → AVAC + AQS
- Chiller / Bomba de calor → AVAC
- Painéis solares térmico → AQS

## **Cenário 6 – Chiller / Bomba de Calor + Caldeira a Pellets + Turbina a vapor**

Apresenta-se na Tabela 3.11 as características dos equipamentos que constituem este cenário, seguida da indicação dos equipamentos que compõem cada sub-cenário.

**Tabela 3.11.** Característica dos equipamentos do cenário 6

<b>Equipamento</b>	<b>Chiller / Bomba de Calor</b>
<b>Potência útil de aquecimento</b>	335 kW
<b>COP</b>	2,9
<b>Potência útil de arrefecimento</b>	307 kW
<b>EER</b>	2,7
<b>Equipamento</b>	<b>Caldeira a Pellets</b>
<b>Potência de alimentação</b>	540 kW
<b>Potência útil</b>	480 kW
<b>Rendimento</b>	0,89
<b>Equipamento</b>	<b>Turbina a vapor</b>
<b>Potência de alimentação</b>	132 kW
<b>Potência útil</b>	100 kW
<b>Rendimento</b>	0,76

### Sub-cenário 6B

- Caldeira a *pellets* → Turbina de vapor + AVAC + AQS
- Chiller / Bomba de calor → AVAC
- Turbina de vapor → Energia elétrica

### Sub-cenário 6B+ST

- Caldeira a *pellets* → Turbina de vapor + AVAC + AQS
- Chiller / Bomba de calor → AVAC
- Turbina de vapor → Energia elétrica
- Painéis solar térmicos → AQS

### **Cenário 7 – Chiller / Bomba de Calor + Caldeira a Pellets + Turbina a vapor**

Apresenta-se na Tabela 3.12 as características dos equipamentos que constituem este cenário, seguida da indicação dos equipamentos que compõem cada sub-cenário.

**Tabela 3.12.** Característica dos equipamentos do cenário 7

<b>Equipamento</b>	<b>Chiller / Bomba de Calor</b>
<b>Potência útil de aquecimento</b>	335 kW
<b>COP</b>	2,9
<b>Potência útil de arrefecimento</b>	307 kW
<b>EER</b>	2,7
<b>Equipamento</b>	<b>Caldeira a Pellets</b>
<b>Potência de alimentação</b>	540 kW
<b>Potência útil</b>	480 kW
<b>Rendimento</b>	0,89
<b>Equipamento</b>	<b>Turbina a vapor</b>
<b>Potência de alimentação</b>	264 kW
<b>Potência útil</b>	200 kW
<b>Rendimento</b>	0,76

#### **Sub-cenário 7B**

- Caldeira a *pellets* → Turbina de vapor + AVAC + AQS
- Chiller / Bomba de calor → AVAC
- Turbina de vapor → Energia elétrica

#### **Sub-cenário 7B+ST**

- Caldeira a *pellets* → Turbina de vapor + AVAC + AQS
- Chiller / Bomba de calor → AVAC
- Turbina de vapor → Energia elétrica
- Painéis solar térmicos → AQS

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicia-se este capítulo com a apresentação dos pressupostos e das simplificações assumidas para obter os resultados que serão alvo de análise. Segue-se a apresentação de resultados propriamente dita. Por fim discutem-se os valores obtidos e tentam-se retirar conclusões.

### 4.1. Pressupostos

Não sendo possível simular exatamente o edifício real e o preciso funcionamento dos seus sistemas passivos e ativos, foi necessário criar modelos que, embora não representem rigorosamente os sistemas a simular, são adequados para prever o desempenho energético do edifício e dos seus sistemas. Por outro lado, para se poder comparar entre si os vários cenários testados é necessário impor requisitos que os coloquem em igualdade de circunstâncias.

Embora se tenha conseguido obter valores dos recursos financeiros necessários para adquirir e instalar os componentes principais associados a cada cenário, não foi viável obter preços dos componentes menos importantes (tubagens, válvulas, filtros, etc.), isto devido ao seu elevado número. Logo houve necessidade de efetuar algumas estimativas de valores económico-financeiros.

Face ao que se acabou de expor, existe a necessidade de formular pressupostos.

#### Análise energética

Na análise energética utilizou-se sempre, para todos os cenários, como potência máxima de aquecimento e de refrigeração as potências do cenário atual, cenário 1B+ST. Decidiu-se desta forma que, como explicado anteriormente, a alteração das potências térmicas disponíveis iria levar a uma alteração das necessidades energéticas do edifício. Deste modo, foram considerados para cada um dos cenários, equipamentos que tivessem potência máxima não inferior às potências atuais, garantido assim em qualquer um dos cenários alternativos o mesmo nível de conforto atual.

Note-se que, num hipotético cenário alternativo em que a potência máxima de aquecimento disponível fosse superior à do cenário atual, esse equipamento iria levar a um conforto maior, aumentando contudo o consumo energético.

Considerou-se sempre como prioritário o funcionamento do moto-gerador e da caldeira a *pellets*, entrando apenas em funcionamento os outros equipamentos, caldeira a GN e Chiller / Bomba de calor, apenas no caso de os primeiros não conseguirem suprir as necessidades energéticas.

### **Análise económica**

Na análise económica o *CAE* (custo anual equivalente) representa o gasto anual efetivo para garantir as funções dependentes do consumo de energia, incluindo o custo da energia consumida e o “gasto equivalente” pelo uso dos equipamentos necessários para desempenhar as funções de climatização (aquecimento e arrefecimento), ventilação e preparação de AQS. Obviamente que este último gasto seria nulo se estes sistemas tivessem uma vida infinita, mas não tem.

Refira-se contudo desde já, que todos os valores são considerados com IVA, uma vez que a escola não recebe o seu retorno.

Foram considerados como gastos anuais, a compra de energia elétrica, de GN e de *pellets* e os custos de manutenção e de operação dos equipamentos de AVAC e de preparação de AQS. Aos gastos anteriores foram ainda acrescentados os custos com o consumo energético da iluminação, da ventilação e da cozinha, entre outros.

Considerou-se como rendimento unicamente a venda da energia excedentária à rede elétrica nacional. Apenas a energia excedentária será vendida dado se estar a fazer uma análise na ótica do autoconsumo.

Considerou-se que o custo da instalação de AVAC, à exceção das máquinas que geram a energia térmica, é de 648 592 €, como fazendo parte do investimento inicial ( $I_0$ ), sendo as restantes parcelas os custos de aquisição e instalação das máquinas principais que equipam o cenário em apreço ( $I_1$ ). Acresceu-se ainda ao preço de cada equipamento 20%, considerando este como o custo da montagem dos equipamentos.

Considerou-se um período de análise dos projetos de 20 anos, ao fim dos quais o sistema completo instalado ainda vale 30% do capital que foi necessário investir para o obter e colocar em funcionamento.

Admitiu-se ainda como consumo energético base do edifício, o consumo elétrico e de GN afetos à cozinha, à iluminação, à ventilação e aos espaços complementares, dado estes serem iguais em todos os cenários. Obteve-se então uma necessidade base de energia elétrica de 321 988 kWh e de GN de 10 496 kWh. Foi considerado em cada ano um custo de manutenção de 5% do valor do investimento inicial  $I_0$ .

Estabeleceu-se ainda um preço para a energia a comprar e a vender, tendo-se considerado 0,0689 € como custo de compra do kWh de gás natural, 0,16 € para o custo do kWh elétrico a comprar, 0,10 € como preço de cada kWh de energia elétrica a vender e, por fim, considerou-se como preço de compra dos *pellets* de 4 156 € por cada 23 Mega gramas (0,044€/kWh).

Considerou-se uma taxa de inflação de 3%/ano, tendo-se ainda admitido que todos os capitais necessários para financiar o investimento inicial ( $I_0$ ) seriam alheios e sujeitos a uma taxa de juro efetiva global de 9%/ano. A escola não paga impostos sobre o rendimento (IRC, derramas, etc.), motivo pelo qual se considerou então nulo o valor desses impostos.

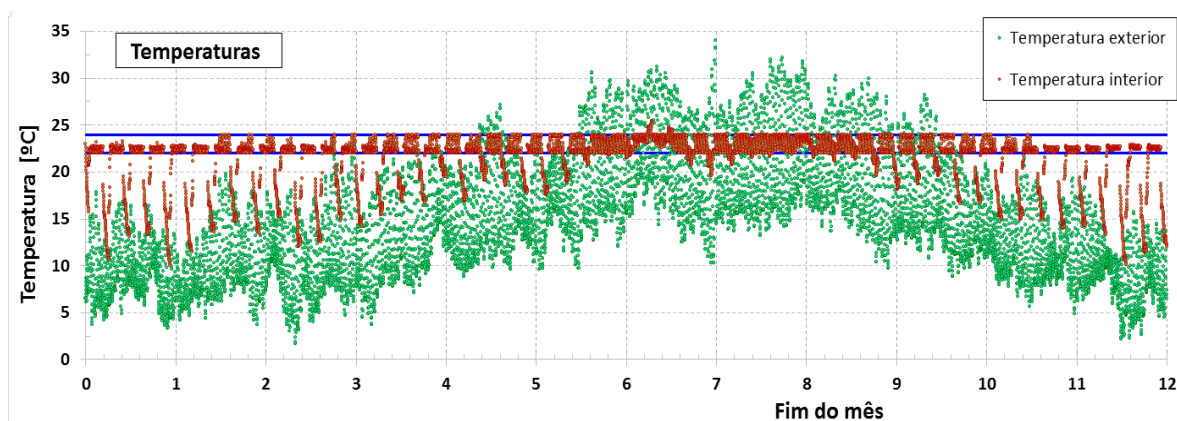
Na Tabela 4.1 estão presentes o preço de todos os equipamentos que compõe os sub-cenários analisados, onde os montantes já aparecem acrescentados do valor do IVA a uma taxa de 23%.

**Tabela 4.1.** Custo de aquisição e instalação dos equipamentos já acrescidos de IVA

Custo equipamentos	
[1] Caldeira GN 144 kW	81 850 €
[2] Caldeira Pellets 400 kW	112 276 €
[3] Gerador GN 960 kW	470 320 €
[4] Chiller / Bomba de calor 307/335 kW	69 126 €
[5] Coletor solar	34 488 €
[6] Silo	4 797 €
[7] Permutador	12 300 €
[8] Caldeira pellets 540 kW	122 302 €
[9] Turbina 100 kW	317 340 €
[10] Turbina 200 kW	381 300 €

## 4.2. Resultados

Como já referido anteriormente, as necessidades energéticas do edifício escolar foram obtidas através da simulação em SEnegEd do cenário atualmente implementado, cenário 1B+ST. No gráfico da Figura 6, encontra-se as temperaturas interiores (a vermelho) e exteriores (a verde), onde se pode verificar que os setpoints são mantidos entre os 22°C e os 24°C, nos dias de funcionamento da escola. Encontrando-se ainda ilustradas na Tabela 4.2 e na Tabela 4.3 as necessidades térmicas e elétricas do edifício.



**Figura 6** – Perfis da temperatura interior e exterior do edifício ao longo do ano



**Tabela 4.2.** Necessidades térmicas do edifício

	Necessidades térmicas do edifício [kWh]				
	Aquecimento	Arrefecimento	Ventilação	AQS	Cozinha GN
<b>Janeiro</b>	91890	--	789	8173	1250
<b>Fevereiro</b>	79124	--	691	6947	1062
<b>Março</b>	78664	--	686	6130	937
<b>Abril</b>	46664	--	714	7356	1124
<b>Mai</b>	32076	--	636	8581	1312
<b>Junho</b>	--	19308	661	3678	562
<b>Julho</b>	--	34213	666	0	0
<b>Agosto</b>	--	19699	488	0	0
<b>Setembro</b>	--	25488	691	5312	812
<b>Outubro</b>	27376	--	789	8990	1374
<b>Novembro</b>	70605	--	591	8581	1312
<b>Dezembro</b>	116435	--	210	4904	750

Nota: Na tabela anterior, no caso da cozinha assumiu-se uma eficiência de 100% para os aparelhos a GN, o que na realidade não é verdade.

**Tabela 4.3.** Necessidades elétricas do edifício

	Necessidades térmicas do edifício [kWh]				
	Iluminação	Ventilação	Equipamentos	Armazéns	Cozinha elétrico
<b>Janeiro</b>	17302	789	11629	1186	943
<b>Fevereiro</b>	15735	691	10571	1186	801
<b>Março</b>	16149	686	10923	1186	707
<b>Abril</b>	15924	714	10571	1186	848
<b>Mai</b>	14407	636	9726	1186	990
<b>Junho</b>	15513	661	10466	1186	424
<b>Julho</b>	14959	666	9937	1186	0
<b>Agosto</b>	10869	488	7294	1186	0
<b>Setembro</b>	16566	691	11100	1186	613
<b>Outubro</b>	17302	789	11629	1186	1037
<b>Novembro</b>	13818	591	9303	1186	990
<b>Dezembro</b>	5246	210	3383	1186	566

Nota: Na tabela anterior, as necessidades de iluminação representam o somatório das necessidades de iluminação interior com as da iluminação exterior.

Por outro lado, na Tabela 4.4 à Tabela 4.10, apresenta-se ainda, para cada cenário e seus sub-cenários a produção e o consumo de cada equipamento, quer em termos energéticos, quer em termos monetários, bem como o investimento inicial,  $I_0$ .

Tabela 4.4. Dados energéticos cenário 1

Sub-cenário 1B		Sub-cenário 1B+ST	
<b>Caldeira</b>		<b>Caldeira</b>	
Energia fornecida	104 905 kWh	Energia fornecida	68 658 kWh
Energia consumida	114 011 kWh	Energia consumida	74 618 kWh
Custo GN	7 985 €	Custo GN	5 271 €
<b>Chiller</b>		<b>Chiller</b>	
Energia Fornecida	643 590 kWh	Energia Fornecida	643 590 kWh
Energia consumida	224 501 kWh	Energia consumida	229 853 kWh
Custo elétrico	35 920 €	Custo elétrico	36 777 €
<b>Investimento – I<sub>1</sub></b>	<b>150 976 €</b>	<b>Investimento – I<sub>1</sub></b>	<b>185 464 €</b>

Tabela 4.5. Dados energéticos cenário 2

Sub-cenário 2B		Sub-cenário 2B+DV	
<b>Gerador GN térmico</b>		<b>Gerador GN térmico</b>	
Energia fornecida	647 738 kWh	Energia fornecida	636 498 kWh
Energia consumida	1 248 651 kW	Energia consumida	1 226 984 kWh
Custo GN	86 161 €	Custo GN	84 69 €
<b>Chiller</b>		<b>Chiller</b>	
Energia Fornecida	100 757 kWh	Energia Fornecida	100 757 kWh
Energia consumida	37 317 kWh	Energia consumida	373 173 kWh
Custo elétrico	5 971 €	Custo elétrico	59 708 €
<b>Caldeira</b>		<b>Caldeira</b>	
Energia fornecida	0 kWh	Energia fornecida	10 265 kWh
Energia consumida	0 kWh	Energia consumida	11 157 kWh
Custo GN	0 €	Custo GN	898 €
<b>Electricidade gerada</b>	472 146 kW	<b>Electricidade gerada</b>	463 953 kWh
Vende	347 140 kW	Vende	347 064 kW
Consome	125 007 kW	Consome	116 890 kW
<b>Investimento – I<sub>1</sub></b>	<b>621 296 €</b>	<b>Investimento – I<sub>1</sub></b>	<b>621 296 €</b>

Sub-cenário 2B+ST		Sub-cenário 2B+ST+DV	
<b>Gerador GN térmico</b>		<b>Gerador GN térmico</b>	
Energia fornecida	611 491 kWh	Energia fornecida	604 135 kWh
Energia consumida	1 178 778 kWh	Energia consumida	1 164 597 kWh
Custo GN	81 347 €	Custo GN	80 370 €
<b>Chiller</b>		<b>Chiller</b>	
Energia fornecida	100 757 kWh	Energia fornecida	100 757 kWh
Energia consumida	37 318 kWh	Energia consumida	37 317 kWh
Custo elétrico	5 971 €	Custo elétrico	5 971 €

Caldeira		Caldeira	
Energia fornecida	0 kWh	Energia fornecida	6 770 kWh
Energia consumida	0 kWh	Energia consumida	7 358 kWh
Custo GN	0 €	Custo GN	636 €
<b>Electricidade gerada</b>	445 725 kWh	<b>Electricidade gerada</b>	440363 kWh
Vende	344 041 kW	Vende	344 005 kW
Consome	101 684 kW	Consome	96 359 kW
<b>Investimento – I<sub>1</sub></b>	<b>655 784 €</b>	<b>Investimento – I<sub>1</sub></b>	<b>655 784 €</b>

Tabela 4.6. Dados energéticos cenário 3

Sub-cenário 3B		Sub-cenário 3B+ST	
<b>Caldeira a pellets</b>		<b>Caldeira a pellets</b>	
Energia fornecida	645 917 kWh	Energia fornecida	610 716 kWh
Energia consumida	717 686 kWh	Energia consumida	678 573 kWh
Consumo de pellets	151 981 kg	Consumo de pellets	143 698 kg
	152 Mg		144 Mg
Custo Pellets	31 590 €	Custo Pellets	29 869 €
<b>Caldeira</b>		<b>Caldeira</b>	
Energia fornecida	1 821 kWh	Energia fornecida	775 kWh
Energia consumida	1 979 kWh	Energia consumida	843 kWh
Custo GN	266 €	Custo GN	187 €
<b>Chiller</b>		<b>Chiller</b>	
Energia Fornecida	100 757 kWh	Energia Fornecida	100 757 kWh
Energia consumida	37 317 kWh	Energia consumida	37 317 kWh
Custo elétrico	5 971 €	Custo elétrico	5 971 €
<b>Investimento – I<sub>1</sub></b>	<b>268 049 €</b>	<b>Investimento – I<sub>1</sub></b>	<b>302 537 €</b>

Sub-cenário 3B+DV		Sub-cenário 3B+ST+DV	
<b>Caldeira a pellets</b>		<b>Caldeira a pellets</b>	
Energia fornecida	634 678 kWh	Energia fornecida	603 359 kW
Energia consumida	705 197 kWh	Energia consumida	670 399 kW
Consumo de pellets	149 336 kg	Consumo de pellets	141 967 kg
	149 Mg		142 Mg
Custo Pellets	31 040 €	Custo Pellets	29 509 €
<b>Caldeira</b>		<b>Caldeira</b>	
Energia fornecida	13 060 kWh	Energia fornecida	8132 kW
Energia consumida	14 194 kWh	Energia consumida	8837 kW
Custo GN	1 107 €	Custo GN	738 €

Chiller		Chiller	
Energia Fornecida	100 757 kWh	Energia Fornecida	100 757 kW
Energia consumida	37 317 kWh	Energia consumida	37 317 kW
Custo elétrico	5 971 €	Custo elétrico	5 971 €
<b>Investimento – <math>I_1</math></b>	<b>268 049 €</b>	<b>Investimento – <math>I_1</math></b>	<b>302 537 €</b>

Tabela 4.7. Dados energéticos cenário 4

Sub-cenário 4B		Sub-cenário 4B+ST	
<b>Gerador GN térmico</b>		<b>Gerador GN térmico</b>	
Energia fornecida	647 738 kWh	Energia fornecida	611 491 kWh
Energia consumida	1 248 651 kWh	Energia consumida	1 178 778 kWh
Custo GN	86 161 €	Custo GN	81 347 €
<b>Chiller</b>		<b>Chiller</b>	
Energia Fornecida	100 757 kWh	Energia Fornecida	100 757 kWh
Energia consumida	37 317 kWh	Energia consumida	37 317 kWh
Custo elétrico	5 971 €	Custo elétrico	5 971 €
<b>Electricidade gerada</b>	<b>472 146 kWh</b>	<b>Electricidade gerada</b>	<b>445 725 kWh</b>
Vende	172 852 kW	Vende	170 095 kW
Consome	299 294 kW	Consome	275 631 kW
<b>Investimento – <math>I_1</math></b>	<b>539 446 €</b>	<b>Investimento – <math>I_1</math></b>	<b>573 934 €</b>

Tabela 4.8. Dados energéticos cenário 5

Sub-cenário 5B		Sub-cenário 5B+ST	
<b>Caldeira a pellets</b>		<b>Caldeira a pellets</b>	
Energia fornecida	647 738 kWh	Energia fornecida	611 491 kWh
Energia consumida	728 705 kWh	Energia consumida	687 927 kWh
Consumo de pellets	154 314 kg	Consumo de pellets	145 679 kg
	154 Mg		146 Mg
Custo Pellets	32 075 €	Custo Pellets	30 280 €
<b>Chiller</b>		<b>Chiller</b>	
Energia Fornecida	100 757 kWh	Energia Fornecida	100 757 kWh
Energia consumida	37 317 kWh	Energia consumida	37 317 kWh
Custo elétrico	5 971 €	Custo elétrico	5 971 €
<b>Investimento – <math>I_1</math></b>	<b>196 225 €</b>	<b>Investimento – <math>I_1</math></b>	<b>230 713 €</b>

Tabela 4.9. Dados energéticos cenário 6

Sub-cenário 6B		Sub-cenário 6B+ST	
Caldeira a pellets		Caldeira a pellets	
Energia fornecida	647 738 kWh	Energia fornecida	611 491 kWh
Energia consumida	1 191 994 kWh	Energia consumida	1 106 027 kWh
Consumo de pellets	252 422 kg	Consumo de pellets	234 218 kg
	252 Mg		234 Mg
Custo Pellets	52 468 €	Custo Pellets	48 684 €
Chiller		Chiller	
Energia Fornecida	100 757 kWh	Energia Fornecida	100 757 kWh
Energia consumida	37 317 kWh	Energia consumida	37 317 kWh
Custo elétrico	5 971 €	Custo elétrico	5 971 €
Turbina		Turbina	
Electricidade gerada	328 068 kWh	Electricidade gerada	279 870 kWh
Vende	204 540 kW	Vende	204 777 kW
Consome	123 528 kW	Consome	75 093 kW
Investimento – $I_1$	538 165 €	Investimento – $I_1$	572 653 €

Tabela 4.10. Dados energéticos cenário 7

Sub-cenário 7B		Sub-cenário 7B+ST	
Caldeira a pellets		Caldeira a pellets	
Energia fornecida	647 738 kWh	Energia fornecida	611 491 kWh
Energia consumida	1 191 994 kWh	Energia consumida	1 106 027 kWh
Consumo de pellets	252 422 kg	Consumo de pellets	234 218 kg
	252 Mg		234 Mg
Custo Pellets	52 468 €	Custo Pellets	48 684 €
Chiller		Chiller	
Energia Fornecida	100 757 kWh	Energia Fornecida	100 757 kWh
Energia consumida	37 317 kWh	Energia consumida	37 317 kWh
Custo elétrico	5 971 €	Custo elétrico	5 971 €
Turbina		Turbina	
Electricidade gerada	444 870 kWh	Electricidade gerada	410 042 kWh
Vende	347 563 kW	Vende	345 446 kW
Consome	97 307 kW	Consome	64 596 kW
Investimento – $I_1$	602 125 €	Investimento – $I_1$	636 613 €

Como as necessidades do edifício são as mesmas em todos os cenários, é de antever que os cenários mais benéficos serão os que recorrem a sistemas mais eficientes ou a fontes de energia primária com um custo inferior.

Neste caso, após análise das tabelas anteriores é de prever vantagem dos sistemas a *pellets*, dado que esta fonte de energia tem um custo muito inferior às outras fontes de energia aqui consideradas.

Após isto, numa primeira abordagem, fez-se uma análise puramente económica tendo-se procedido a um ordenamento relativo dos sub-cenários dentro de cada cenário, por ordem crescente do seu *CAE*, como se pode ver na Tabela 4.11.

Posteriormente realizou-se outra classificação relativa dos sub-cenários, mas agora levando em consideração a totalidade dos sub-cenários considerados, a qual se apresenta na Tabela 4.12.

Seguiu-se a identificou o sub-cenário economicamente mais vantajoso, o qual foi tomado como referência (o sub-cenário 5B). Finalmente determinou-se o acréscimo de custo anual equivalente ( $\Delta CAE$ ) de cada sub-cenário em relação ao de referência. A seriação assim obtida encontra-se na Tabela 4.13.

**Tabela 4.11.** Posição relativa dos sub-cenários dentro de cada cenário.

Sub-cenário	Composição	CAE [€/ano]	Posição relativa
<b>1B</b>	Chiller / Bomba de calor + Caldeira GN	186 212	1
<b>1B+ST</b>		188 848	2
<b>2B</b>	Chiller / Bomba de calor + Caldeira GN + Gerador a GN	227 671	1
<b>2B+ST</b>		230 640	3
<b>2B+DV</b>		228 252	2
<b>2B+ST+DV</b>		231 025	4
<b>3B</b>	Chiller / Bomba de calor + Caldeira pellets + Caldeira GN	191 262	1
<b>3B+ST</b>		194 185	3
<b>3B+DV</b>		191 626	2
<b>3B+ST+DV</b>		194 423	4
<b>4B</b>	Chiller / Bomba de calor + Gerador a GN	219 918	1
<b>4B+ST</b>		223 664	2
<b>5B</b>	Chiller / Bomba de calor + Caldeira pellets	182 179	1
<b>5B+ST</b>		185 117	2
<b>6B</b>	Chiller / Bomba de calor + Caldeira pellets + Turbina	204 284	1
<b>6B+ST</b>		212 942	2
<b>7B</b>	Chiller / Bomba de calor + Caldeira pellets + Turbina	202 519	1
<b>7B+ST</b>		209 173	2

**Tabela 4.12.** Posição absoluta dos cenários

Cenário	Composição	CAE [€/ano]	Posição geral
<b>1B</b>	Chiller / Bomba de calor + Caldeira GN	186 212	3
<b>1B+ST</b>		188 848	4
<b>2B</b>	Chiller / Bomba de calor + Caldeira GN + Gerador a GN	227 671	15
<b>2B+ST</b>		230 640	17
<b>2B+DV</b>		228 252	16
<b>2B+ST+DV</b>		231 025	18
<b>3B</b>	Chiller / Bomba de calor + Caldeira pellets + Caldeira GN	191 262	5
<b>3B+ST</b>		194 185	7
<b>3B+DV</b>		191 626	6
<b>3B+ST+DV</b>		194 423	8
<b>4B</b>	Chiller / Bomba de calor + Gerador a GN	219 918	13
<b>4B+ST</b>		223 664	14
<b>5B</b>	Chiller / Bomba de calor + Caldeira pellets	182 179	1
<b>5B+ST</b>		185 117	2
<b>6B</b>	Chiller / Bomba de calor + Caldeira pellets + Turbina	204 284	10
<b>6B+ST</b>		212 942	12
<b>7B</b>	Chiller / Bomba de calor + Caldeira pellets + Turbina	202 519	9
<b>7B+ST</b>		209 173	11

**Tabela 4.13.** Cenários ordenados por valor de CAE

Cenários ordenados	CAE [€/ano]	Acréscimo a pagar [€/ano]
<b>5B</b>	182 179	0.00
<b>5B+ST</b>	185 117	2 938
<b>1B</b>	186 212	4 033
<b>1B+ST</b>	188 848	9 083
<b>3B</b>	191 262	9 447
<b>3B+DV</b>	191 626	6 669
<b>3B+ST</b>	194 185	12 006
<b>3B+ST+DV</b>	194 423	12 244
<b>7B</b>	202 519	20 340
<b>6B</b>	204 284	30 763
<b>7B+ST</b>	209 173	22 105
<b>6B+ST</b>	212 942	26 994
<b>4B</b>	219 918	37 739
<b>4B+ST</b>	223 664	41 485
<b>2B</b>	227 671	45 492
<b>2B+DV</b>	228 252	46 073
<b>2B+ST</b>	230 640	48 461
<b>2B+ST+DV</b>	231 025	48 846

### 4.3. Discussão

As necessidades do edifício, ilustradas na Tabela 4.2 e na Tabela 4.3, são transversais a todos os cenários, como já foi referido, pois só assim, é possível comparar uns cenários com os outros.

Deste modo, antevê-se que os cenários mais vantajosos serão então os que recorrerem a fontes de energia primária com um custo menor ou os que recorrem a sistemas com mais eficiência.

Então, numa primeira fase, e atendendo unicamente à informação que consta na Tabela 4.11, é possível verificar que, em relação à sua versão base, todos os cenários apresentam um CAE superior quando se considera a existência de um sistema solar térmico, isto contrariamente ao que seria espectável. A título de exemplo pode referir-se o cenário atualmente implantado na escola (cenário 1B+ST) que tem um  $CAE = 188\,848$  €/ano e que no caso de não haver sistema solar térmico (cenário 1B) o seu custo equivalente seria apenas de  $186\,212$  €/ano. Assim, se no sistema atual se tivesse optado pela não instalação do sistema solar térmico, a escola iria ter uma poupança anual equivalente a  $2\,636$  €/ano.

O facto anterior pode ser explicado pela simples razão de a escola nos meses de julho e agosto apresentar consumos de AQS muito reduzidos, sendo nestes meses máxima a energia captada pelos painéis solares. Assim, torna-se mais rentável colmatar a totalidade das necessidades de AQS recorrendo à caldeira, em detrimento de se investir na implementação de um sistema solar térmico.

Analisando a Tabela 4.13, pode inferir-se que, para este estabelecimento de ensino, o cenário mais vantajoso seria o sub-cenário 5B, composto por uma caldeira a *pellets* e por um Chiller / Bomba de calor, com  $CAE = 182\,179$  €/ano, sendo assim  $6\,669$  €/ano mais vantajoso que o cenário atual (cenário 1B+ST).

Constata-se ainda que a utilização de uma turbina a vapor (cenário 7B) também não é economicamente vantajosa, dado que pela sua instalação o cenário tem um acréscimo no seu valor do CAE de  $20\,340$  €/ano em relação ao sistema mais económico (o cenário 5B).

Verifica-se ainda que é vantajoso optar por fontes de energia primária de origem natural, nomeadamente os *pellets*, uma vez que os cenários alimentados com esta fonte de energia são os que, em regra geral, apresentam menor CAE, ocupando 10 dos 12 primeiros lugares da Tabela 4.13.

Finalmente, atentando de novo na Tabela 4.11, pode concluir-se que é economicamente desvantajoso funcionar com o Gerador a GN parado no período de arrefecimento (ou seja no verão). A título de exemplo pode proceder-se à comparação do sub-cenário 2B com o 2B+DV, onde se obtém um acréscimo anual do custo equivalente de  $581$  €/ano, simplesmente por desligar o moto-gerador a GN no verão. Contudo tecnicamente verifica-se o contrário, pelo facto de no período de arrefecimento a energia



térmica para climatizar o edifício ser fornecida unicamente pelo Chiller / Bomba de calor, levando assim o moto-gerador, unicamente a entrar em funcionamento para suprir as necessidades de AQS, estando por isso sujeito a curtos períodos de funcionamento, executado diariamente várias vezes o arranque e a paragem.

Embora seja economicamente desfavorável, tem de se ter em consideração, como foi referido no início deste trabalho, que é prejudicial aos equipamentos estarem sujeitos a constantes ciclos de arranque e de paragem levando assim a que os mesmos necessitem de uma manutenção mais frequente. Assim, por este facto, embora seja economicamente mais desvantajoso, tecnicamente será benéfico, sendo por isso preferível optar por desligar o moto-gerador ou a caldeira a *pellets*, durante o período de arrefecimento, considerando que as necessidades de AQS são colmatadas pelo sistema de apoio, neste caso uma caldeira a GN.

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A dissertação realizada permite afirmar que, contrariamente a todas as expectativas iniciais é economicamente desvantajosa a aplicação de painéis solares térmicos nos edifícios escolares. Este facto deve-se a que, no período de verão, os sistemas solares térmicos atingem o seu contributo máximo, encontrando-se contudo desativos, dado não existirem necessidades de AQS para suprir uma vez que se está em tempo de férias. Com a instalação dos coletores solares cria-se ainda um problema técnico, uma vez que, como não há consumo nesse período, os mesmos terão de ser tapados ou terá de ser considerado um sistema de segurança, como por exemplo uma válvula de descarga que abre acima de uma dada temperatura, levando a um desperdício de água quente, garantindo assim, contudo, que não ocorre a vaporização do fluido térmico, o que inutilizaria os painéis.

Pode afirmar-se ainda que o sistema mais benéfico a implementar numa escola seria uma caldeira a *pellets* e um Chiller / Bomba de calor, uma vez que é este que apresenta menor custo anual equivalente (cenário 5B).

Pode ainda inferir-se que a implementação de uma turbina de vapor alimentada por uma caldeira a *pellets* (cenário 6B) é economicamente desvantajosa, no mínimo 22 105 €/ano quando comparado com a situação mais económica (cenário 5B), sendo ainda tecnicamente complexa dado a necessidade de existência de permutador de placas para “transformar” a água quente produzida pela caldeira em vapor para alimentar a turbina.

Contrariamente ao que inicialmente se presumia, verifica-se que a implementação de um sistema de cogeração não é a solução economicamente mais viável para um edifício escolar. Contudo, no caso de se optar por este sistema, será preferível eleger uma caldeira a *pellets* e uma turbina de vapor (cenário 7B) em detrimento de se seleccionar um moto-gerador a GN (cenário 4B), representando a segunda opção em relação à primeira um acréscimo de custo equivalente de 17 399 €/ano.

Conclui-se então, que não só a adoção de energias primárias de origem renovável é possível como ainda é a abordagem economicamente mais viável, sendo por isso uma alternativa a considerar em projetos futuros.

A título de sugestão futura, seria interessante proceder-se a um estudo técnico-económico como o apresentado nesta tese, mas para um sistema de produção centralizado de cogeração, ou eventualmente de trigeriação, englobando os quatro grandes consumidores de energia localizados nas proximidades uns dos outros, a Escola Secundária de Avelar Brotero, a Escola Secundária Infanta Dona Maria, o centro comercial *Dolce Vita* e ainda as Piscinas e Pavilhão Multiusos, dado ser espectável uma viabilidade económica muito interessante.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Climaespaço (2014). Manual das instalações secundárias da Climaespaço – manual técnico.
- Cogen Portugal (2015). Cogeração - Cogen Portugal, <http://www.cogenportugal.com/>. Acedido em junho de 2015.
- Figueira, M. L. (2012). Escola Brotero - Memórias de Sempre, *Coimbra: Escola Secundária de Avelar Brotero*.
- Figueiredo, M. V. (2015). Rede de calor e frio marca eficiência energética em Barcelona, *Revista Edifícios e Energia*, nº98, pp. 58 a 61.
- Google Maps (2015). Vista da Escola Secundária de Avelar Brotero em Coimbra, *Google Maps*, <https://www.google.com/maps/>. Acedido em junho de 2015.
- ISO 13790 (2008). Energy performance of building - calculation of energy use for space heating and cooling, *International Organization for Standardization*.
- LNEG (2015). *SolTerm* – programa de análise de desempenho de sistemas solares, LNEG, <http://www.lneg.pt/iedt/projectos/370/>.
- Lopes, D. V. S. (2013). Simulação do comportamento térmico e energético de pequenos edifícios com recurso a uma folha de cálculo em Excel, Tese de MiEM (Mestrado integrado em Engenharia Mecânica), Universidade de Coimbra, Setembro de 2013.
- Natural-Works (2009), Projectos de Execução - Modernização da ESAB pela Parque Escolar, *Natural-Works, Projectos de Engenharia L<sup>da</sup>*.
- Parque Escolar (2015) Intervenções na ESAB, <http://www.parque-escolar.pt/pt/escola/015>. Acedido em junho de 2015.
- Raimundo, A. M. (2008). Cálculo do comportamento térmico de edifícios através do modelo dinâmico horário monozona, II *Conferencia Nacional de Métodos Numéricos em Mecânica dos Fluidos e Termodinâmica*, Universidade de Aveiro.
- Raimundo, A. M. (2015). Elementos de apoio à disciplina Economia e Gestão Industrial, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra, 2015.
- RSECE (2006). Regulamento dos sistemas energéticos de climatização em edifícios, *Decreto-Lei nº 79/2006*, Diário da Republica nº66 - Série I - A de Abril de 2006.
- Sousa, A. F. (2011). Análise do desempenho energético de cozinhas industriais, Tese de MiEM (Mestrado integrado em Engenharia Mecânica), Universidade de Coimbra, Setembro de 2011.

## ANEXO A – Dados considerados na simulação

Serão aqui apresentados sobre a forma de imagens retiradas do programa *SEnergEd* os dados introduzidos no programa de simulação.

DADOS CLIMÁTICOS				
Zonamento climático				
Concelho:	COIMBRA	Ficheiro: Coimbra Concelho: Coimbra		
Distância à costa marítima	50	( km )	Longitude =	8.42 ° Oeste
Altitude do lugar (em relação ao nível do mar)	100	( m )	Latitude =	40.2 ° Norte
Zona climática de Inverno -->	I1	(ver Anexo III, pág. 2477 - 2484)		
Número de graus-dias de aquecimento - GD =	1460	°C . dias		
Duração da estação de aquecimento - M =	6.0	meses		
Energia solar média incidente no Inverno numa superfície vertical orientada a Sul - Gsul =	108	kW / m2.mês (ver Quadro III.8, pág. 2484)		
Zona climática de Verão -->	V2-N	(ver Anexo III, pág. 2477 - 2484) 33		
Temperatura do ar exterior no Verão - T <sub>atm</sub> =	19	°C (ver Quadro III.9, pág. 2484)		
Intensidade da radiação solar incidente (kWh / m2) - I <sub>r</sub> (valores retirados do Quadro III.9)	Sup. vertical	N	NE	E
		S	SW	W
Localização da região --> Norte	Sup. horizontal	420	470	450
		790	450	320
Dados climáticos actualizados	<---- Se igual a '#REF!' os Dados climáticos Não estão actualizados (Para actualizar os Dados climáticos fazer 'Click' sobre o link)			
<a href="#">Actualizar os dados climáticos --&gt; C:/SEnergEd/Clima/Coimbra.xlsx</a>				

Figura A.1. *SEnergEd* – Dados climáticos.

DADOS GERAIS SOBRE A FRACÇÃO AUTÓNOMA OU EDIFÍCIO				
Características da Fração Autónoma ou Edifício				
Identificação da FA ou Edifício:	Coimbra - ESAB			
Área útil de pavimento - A <sub>p</sub> =	11246.20	m2		
Pé direito médio - P <sub>d</sub> =	3.00	m		
Enquadramento do edifício (Novo / Existente) -->	Novo	▼	1	1
Tipo de edifício (segundo Quadro IV.3, pág. 2489) -->	Escolas	▼	6	6
<b>O edifício funciona na:</b>				
		<b>1ª quinzena</b>	<b>2ª quinzena</b>	
Janeiro -->	Sim - a 100%	Sim - a 100%	1	1
Fevereiro -->	Sim - a 100%	Sim - a 100%	1	1
Março -->	Sim - a 100%	Sim - a 80%	1	0.8
Abril -->	Sim - a 100%	Sim - a 100%	1	1
Maió -->	Sim - a 80%	Sim - a 80%	0.8	0.8
Junho -->	Sim - a 80%	Sim - a 100%	0.8	1
Julho -->	Sim - a 100%	Sim - a 80%	1	0.8
Agosto -->	Sim - a 60%	Sim - a 60%	0.6	0.6
Setembro -->	Sim - a 100%	Sim - a 100%	1	1
Outubro -->	Sim - a 100%	Sim - a 100%	1	1
Novembro -->	Sim - a 100%	Sim - a 60%	1	0.6
Dezembro -->	Sim - a 40%	Sim - a 20%	0.4	0.2

Figura A.2. *SEnergEd* – Dados gerais do edifício.

ENVOLVENTE OPACA EXTERIOR Introdução de dados							Valor Entre (0 e 1)	Coefficientes U verificam os requisitos mínimos ?
Orientação : Vertical								
Paredes em contacto com o exterior e suas pontes térmicas planas	Orientação	Área (m <sup>2</sup> )	Msi (kg / m <sup>2</sup> )	U (W / m <sup>2</sup> .°C)	Uref (W / m <sup>2</sup> .°C)	Cor da face exterior	Factor de sombra	
Parede Exterior Norte	Norte	1240.20	150.0	0.80	0.50	Clara	0.75	Sim
	Norte			0.00				
	Norte			0.00				
	Norte			0.00				
	Noroeste			0.00				
	Noroeste			0.00				
	Noroeste			0.00				
Parede Exterior Oeste	Oeste	699.96	150.0	0.80	0.50	Clara	0.75	Sim
	Oeste			0.00				
	Oeste			0.00				
	Sudoeste			0.00				
	Sudoeste			0.00				
	Sudoeste			0.00				
Parede Exterior Sul	Sul	1226.55	150.0	0.80	0.50	Clara	0.75	Sim
	Sul			0.00				
	Sul			0.00				
	Sudeste			0.00				
	Sudeste			0.00				
	Sudeste			0.00				
Parede Exterior Este	Este	757.89	150.0	0.80	0.50	Clara	0.75	Sim
	Este			0.00				
	Este			0.00				
	Nordeste			0.00				
	Nordeste			0.00				
	Nordeste			0.00				
Porta exterior a norte	Norte			0.00				
Porta exterior a noroeste	Noroeste			0.00				
Porta exterior a oeste	Oeste			0.00				
Porta exterior a sudoeste	Sudoeste			0.00				
Porta exterior a sul	Sul			0.00				
Porta exterior a sudeste	Sudoeste			0.00				
Porta exterior a este	Este			0.00				
Porta exterior a nordeste	Nordeste			0.00				
<b>TOTAL ----&gt;</b>		<b>15094.60</b>						

Figura A.3. *SEnergEd* – Envolvente opaca exterior.

Coberturas em contacto com o exterior e suas pontes térmicas planas	Orientação	Área (m <sup>2</sup> )	Msi (kg / m <sup>2</sup> )	U (W / m <sup>2</sup> .°C)	Uref (W / m <sup>2</sup> .°C)	Cor da face exterior	Factor de sombra	Requisitos mínimos ?
Corpo B	H	1412.57	150.0	0.80	0.50	Média	0.75	Sim
Corpo C	H	621.00	150.0	0.80	0.50	Média	0.75	Sim
Corpo D & E	H	1116.66	150.0	0.80	0.50	Média	0.75	Sim
				0.00				
				0.00				
				0.00				
				0.00				
				0.00				
				0.00				
				0.00				
				0.00				
				0.00				
<b>TOTAL</b>		<b>3150.23</b>						

Figura A.4. *SEnergEd* – Coberturas em contacto com o exterior.

Coberturas (tectos sob espaços não úteis) e suas pontes t. planas	Área (m <sup>2</sup> )	Msi (kg/m <sup>2</sup> )	U (W/m <sup>2</sup> .°C)	Tipo de espaço não útil (ou não climatizado)	Ai (m <sup>2</sup> )	Au (m <sup>2</sup> )	τ (-)	Requisitos mínimos ?
Corpo A	1020.43	11.0	0.70	8.2- Desvão não habitado fracamente ventilado	1020.43	1020.43	0.70	Sim
			0.00	...	0.00	0.00		
			0.00	...				
			0.00	...				
			0.00					
<b>TOTAL</b>	<b>1020.43</b>							

Figura A.5. *SEnergEd* – Coberturas em contacto com espaços não úteis.

Elementos interiores sem requisitos (Paredes, Pavimentos e Coberturas)	Área (m <sup>2</sup> )	Msi (kg / m <sup>2</sup> )
Paredes interiores	13104.00	250.00
<b>TOTAL</b>	<b>13104.00</b>	

Figura A.6. *SEnergEd* – Envolventes interiores sem requisitos.

Paredes e Pavimentos em contacto com o Solo	Tipo	Comp. B (m)	Cota Z (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Msi (kg / m <sup>2</sup> )	U (W/m <sup>2</sup> .°C)	Pavimento isolado ?	R <sub>exente</sub> (m <sup>2</sup> .°C/W)	ψ (W / m.°C)
	Parede								
	Parede								
	Parede								
	Parede								
	Parede								
Corpo A	Pavimento	459.20	0.00	1020.43	250.00		Não	0.00	1.50
Corpo B	Pavimento	635.66	0.00	1412.57	250.00		Não	0.00	1.50
Corpo C	Pavimento	279.45	0.00	621.00	250.00		Não	0.00	1.50
Corpo D	Pavimento	502.50	0.00	1116.66	250.00		Não	0.00	1.50
<b>TOTAL</b>		<b>1876.81</b>		<b>4170.66</b>					

Figura A.7. *SEnergEd* – Paredes e pavimentos em contacto com o solo.

Valores para os envidraçados exteriores										Ângulos de sombreamento:			
Designação do vão envidraçado	Orientação (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW, H)	Área A (m <sup>2</sup> )	U <sub>v</sub> (W / m <sup>2</sup> .°C)	Nº de vidros (1 ≤ 2)	Fracção envidr. Fg (-)	Factor de selectiv. angular F <sub>s</sub> (-)	Factor solar do vidro g <sub>v</sub> (-)	Factor solar de protecção 100% activa g <sub>100%</sub> (-)	Factor solar verifica os requisitos mínimos ?	Somb. do horizonte α <sub>h</sub> (°)	Elementos horizontais próximos α <sub>o</sub> (°)	Elementos verticais próximos. Pala: esquerda β <sub>f-Esq</sub> (°) direita β <sub>f-Dir</sub> (°)	
Conj. 1	Norte	186.40	3.00	1	0.70	0.85	0.85	0.44	Sim	20	13	0	0
	Norte												
	Norte												
	Noroeste												
	Noroeste												
	Noroeste												
Conj. 1	Leste	52.46	3.00	1	0.70	0.90	0.85	0.09	Sim	20	13	0	0
	Leste												
	Leste												
	Sudoeste												
	Sudoeste												
	Sudoeste												
Conj. 1	Sul	278.10	3.00	1	0.70	0.80	0.85	0.09	Sim	20	13	0	0
	Sul												
	Sul												
	Sul												
	Sudeste												
	Sudeste												
	Sudeste												
PE2.10_E	Leste	78.10	3.00	1	0.70	0.90	0.85	0.09	Sim	20	13	0	0
	Leste												
	Leste												
	Nordeste												
	Nordeste												
	Nordeste												
	Horizontal												
	Horizontal												
	Horizontal												
	Horizontal												
<b>TOTAL</b>		<b>595.06</b>											

Figura A.8. *SEnergEd* – Valores para os envidraçados.

Funcionamento dos sistemas de aquecimento e de arrefecimento					
Para o edifício a funcionar a 100%					
2ª a 6ª Feira		Sabados		Domingos	
Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)
0 - 1	100	0 - 1	0	0 - 1	0
1 - 2	100	1 - 2	0	1 - 2	0
2 - 3	100	2 - 3	0	2 - 3	0
3 - 4	100	3 - 4	0	3 - 4	0
4 - 5	100	4 - 5	0	4 - 5	0
5 - 6	100	5 - 6	0	5 - 6	0
6 - 7	100	6 - 7	0	6 - 7	0
7 - 8	100	7 - 8	0	7 - 8	0
8 - 9	100	8 - 9	0	8 - 9	0
9 - 10	100	9 - 10	0	9 - 10	0
10 - 11	100	10 - 11	0	10 - 11	0
11 - 12	100	11 - 12	0	11 - 12	0
12 - 13	100	12 - 13	0	12 - 13	0
13 - 14	100	13 - 14	0	13 - 14	0
14 - 15	100	14 - 15	0	14 - 15	0
15 - 16	100	15 - 16	0	15 - 16	0
16 - 17	100	16 - 17	0	16 - 17	0
17 - 18	100	17 - 18	0	17 - 18	0
18 - 19	100	18 - 19	0	18 - 19	0
19 - 20	100	19 - 20	0	19 - 20	0
20 - 21	100	20 - 21	0	20 - 21	0
21 - 22	100	21 - 22	0	21 - 22	0
22 - 23	100	22 - 23	0	22 - 23	0
23 - 24	100	23 - 24	0	23 - 24	0
Sistemas completamente ligados ---> 100%					
Sistemas completamente desligados ---> 0%					

Figura A.9. SEnergEd – Perfil AVAC.

Densidade	Valor Máximo		
Ocupação:	1 100 ocupantes	---->	Nível de actividade 120.00 W/ocupante Ver norma ISO 7730
Iluminação:	7.00 W/m2		
Equipamentos:	5.00 W/m2	--->	5.00 W/m2

Figura A.10. SEnergEd – Densidades de ocupação, iluminação e equipamentos (não AVAC).

Perfil de ocupação					
Para o edifício a funcionar a 100%					
2ª a 6ª Feira		Sabados		Domingos	
Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)
0 - 1	0	0 - 1	0	0 - 1	0
1 - 2	0	1 - 2	0	1 - 2	0
2 - 3	0	2 - 3	0	2 - 3	0
3 - 4	0	3 - 4	0	3 - 4	0
4 - 5	0	4 - 5	0	4 - 5	0
5 - 6	0	5 - 6	0	5 - 6	0
6 - 7	0	6 - 7	0	6 - 7	0
7 - 8	40	7 - 8	0	7 - 8	0
8 - 9	60	8 - 9	0	8 - 9	0
9 - 10	100	9 - 10	0	9 - 10	0
10 - 11	100	10 - 11	0	10 - 11	0
11 - 12	90	11 - 12	0	11 - 12	0
12 - 13	80	12 - 13	0	12 - 13	0
13 - 14	100	13 - 14	0	13 - 14	0
14 - 15	100	14 - 15	0	14 - 15	0
15 - 16	100	15 - 16	0	15 - 16	0
16 - 17	70	16 - 17	0	16 - 17	0
17 - 18	60	17 - 18	0	17 - 18	0
18 - 19	40	18 - 19	0	18 - 19	0
19 - 20	7	19 - 20	0	19 - 20	0
20 - 21	7	20 - 21	0	20 - 21	0
21 - 22	7	21 - 22	0	21 - 22	0
22 - 23	7	22 - 23	0	22 - 23	0
23 - 24	0	23 - 24	0	23 - 24	0

Figura A.11. SEnergEd – Perfil de ocupação.

Perfil de iluminação					
Para o edifício a funcionar a 100%					
2ª a 6ª Feira		Sabados		Domingos	
Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)
0 - 1	0	0 - 1	10	0 - 1	10
1 - 2	0	1 - 2	10	1 - 2	10
2 - 3	0	2 - 3	10	2 - 3	10
3 - 4	0	3 - 4	10	3 - 4	10
4 - 5	0	4 - 5	10	4 - 5	10
5 - 6	0	5 - 6	10	5 - 6	10
6 - 7	0	6 - 7	10	6 - 7	10
7 - 8	0	7 - 8	10	7 - 8	10
8 - 9	15	8 - 9	0	8 - 9	0
9 - 10	90	9 - 10	0	9 - 10	0
10 - 11	100	10 - 11	0	10 - 11	0
11 - 12	100	11 - 12	0	11 - 12	0
12 - 13	95	12 - 13	0	12 - 13	0
13 - 14	80	13 - 14	0	13 - 14	0
14 - 15	80	14 - 15	0	14 - 15	0
15 - 16	100	15 - 16	0	15 - 16	0
16 - 17	100	16 - 17	0	16 - 17	0
17 - 18	90	17 - 18	0	17 - 18	0
18 - 19	70	18 - 19	0	18 - 19	0
19 - 20	15	19 - 20	0	19 - 20	0
20 - 21	0	20 - 21	10	20 - 21	10
21 - 22	0	21 - 22	10	21 - 22	10
22 - 23	0	22 - 23	10	22 - 23	10
23 - 24	0	23 - 24	10	23 - 24	10

Figura A.12. *SEnergEd* – Perfil de iluminação.

Perfil de equipamentos [não incluindo os relacionados com o AVAC]					
Para o edifício a funcionar a 100%					
2ª a 6ª Feira		Sabados		Domingos	
Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)
0 - 1	0	0 - 1	0	0 - 1	0
1 - 2	0	1 - 2	0	1 - 2	0
2 - 3	0	2 - 3	0	2 - 3	0
3 - 4	0	3 - 4	0	3 - 4	0
4 - 5	0	4 - 5	0	4 - 5	0
5 - 6	0	5 - 6	0	5 - 6	0
6 - 7	0	6 - 7	0	6 - 7	0
7 - 8	0	7 - 8	0	7 - 8	0
8 - 9	15	8 - 9	0	8 - 9	0
9 - 10	95	9 - 10	0	9 - 10	0
10 - 11	100	10 - 11	0	10 - 11	0
11 - 12	100	11 - 12	0	11 - 12	0
12 - 13	95	12 - 13	0	12 - 13	0
13 - 14	80	13 - 14	0	13 - 14	0
14 - 15	80	14 - 15	0	14 - 15	0
15 - 16	100	15 - 16	0	15 - 16	0
16 - 17	100	16 - 17	0	16 - 17	0
17 - 18	90	17 - 18	0	17 - 18	0
18 - 19	70	18 - 19	0	18 - 19	0
19 - 20	15	19 - 20	0	19 - 20	0
20 - 21	0	20 - 21	0	20 - 21	0
21 - 22	0	21 - 22	0	21 - 22	0
22 - 23	0	22 - 23	0	22 - 23	0
23 - 24	0	23 - 24	0	23 - 24	0

Figura A.13. *SEnergEd* – Perfil de equipamentos não AVAC.



Ventilação		Valor Máximo	
Caudal de ar renovado pelo sistema mecânico:	8 000.00 m3/hora	Caudal 1	
Potência consumida pelos ventiladores e bombas:	3 000.00 W	<--- Valor máximo para o edificio a funcionar a 100%	
Eficiência dos ventiladores e das bombas:	0.80	<--- As eficiências não são em percentagem 0.80	
Caudal de ar renovado em ventilação natural:	1 500.00 m3/hora	Caudal 2	
Existe freecooling ? -->	Não	<--- Sim ou Não	Fnc = 0 (entre 16-06 e 15-09) Fnc = 0 (restantes dias)
Existe recuperação de calor do ar de rejeição? -->	Não	<--- Sim ou Não	Frc = 0 (entre 16-10 e 15-04) Frc = 0 (restantes dias)
Eficiência deste sistema de recuperação:	0.50	<--- As eficiências não são em percentagem (valores entre 0,5 e 1)	
Contribuição de energias renováveis para a ventilação:	0.00 kWh/ano	<--- Contribuição para as necessidades de energia	

Figura A.14. SEnergEd – Ventilação.

Funcionamento dos sistemas de ventilação mecânica					
Para o edificio a funcionar a 100%					
2ª a 6ª Feira		Sabados		Domingos	
Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)
0 - 1	0	0 - 1	0	0 - 1	0
1 - 2	0	1 - 2	0	1 - 2	0
2 - 3	0	2 - 3	0	2 - 3	0
3 - 4	0	3 - 4	0	3 - 4	0
4 - 5	0	4 - 5	0	4 - 5	0
5 - 6	0	5 - 6	0	5 - 6	0
6 - 7	0	6 - 7	0	6 - 7	0
7 - 8	100	7 - 8	0	7 - 8	0
8 - 9	100	8 - 9	0	8 - 9	0
9 - 10	100	9 - 10	0	9 - 10	0
10 - 11	100	10 - 11	0	10 - 11	0
11 - 12	100	11 - 12	0	11 - 12	0
12 - 13	100	12 - 13	0	12 - 13	0
13 - 14	100	13 - 14	0	13 - 14	0
14 - 15	100	14 - 15	0	14 - 15	0
15 - 16	100	15 - 16	0	15 - 16	0
16 - 17	100	16 - 17	0	16 - 17	0
17 - 18	100	17 - 18	0	17 - 18	0
18 - 19	100	18 - 19	0	18 - 19	0
19 - 20	60	19 - 20	0	19 - 20	0
20 - 21	60	20 - 21	0	20 - 21	0
21 - 22	60	21 - 22	0	21 - 22	0
22 - 23	60	22 - 23	0	22 - 23	0
23 - 24	0	23 - 24	0	23 - 24	0

Sistemas: Completamente ligados --> 100%; Desligados --> 0%

Figura A.15. SEnergEd – Perfil de ventilação.

Armazéns	Valor Médio	
Área de pavimento:	836.23	m <sup>2</sup>
Perfil de funcionamento:		
- Número de horas por dia:	8	horas / dia
- Número de dias por semana:	6	dias / semana
Consumo (energia final):		
- Densidade de equipamentos:	0.00	W/m <sup>2</sup>
- Densidade de iluminação:	6.00	W/m <sup>2</sup>
- Densidade de ventilação:	2.00	W/m <sup>2</sup>
Eficiência dos ventiladores:	0.80	0.80
Contribuição de energia renovável para equipamentos e iluminação:		
- Energia final:	0.00	kWh / ano
Nº de dias de funcionamento:	266.00	dias / ano
Nº de horas de funcionamento:	2 128.00	horas / ano
Energia final sem contribuição de energias renováveis:		
- Pelos equipamentos:	0.00	kWh / ano
- Pela iluminação:	10 677.00	kWh / ano
- Pela ventilação:	3 559.00	kWh / ano
Consumo de energia final:	14 236.00	kWh / ano
Energia final após contribuição de energias renováveis:		
Consumo de energia final:	14 236.00	kWh / ano
Necessidades de energia (energia útil):		
- Sem contribuição de renovável:	13 524.20	kWh / ano
- Após contribuição de renovável:	13 524.20	kWh / ano

**Figura A.16.** *SEnergEd* – Espaços complementares.

Iluminação exterior	Valor Médio	
Potência de iluminação:	1 000.00	W
Perfil de funcionamento:		
- Número de horas por dia:	10	horas / dia
- Número de dias por semana:	7	dias / semana
Contribuição de energia renovável para a iluminação exterior:		
- Energia final:	0.00	kWh / ano
Nº de dias de funcionamento:	310.00	dias / ano
Nº de horas de funcionamento:	3 100.00	horas / ano
Energia final sem contribuição de energias renováveis:		
Consumo de energia final:	3 100.00	kWh / ano
Energia final após contribuição de energias renováveis:		
Consumo de energia final:	3 100.00	kWh / ano
Necessidades de energia (energia útil):		
- Sem contribuição de renovável:	3 100.00	kWh / ano
- Após contribuição de renovável:	3 100.00	kWh / ano

**Figura A.17.** *SEnergEd* – Iluminação do exterior.

## ANEXO B - Relatório *Solterm*

-----  
SolTerm 5.0

-----  
Estimativa de desempenho de sistema solar térmico com depósito pressurizado

-----  
Painel

-----  
Modelo de colector: Flacchkollector SK500L-ECO-AL

Tipo: Plano

(20 módulos) 44, m<sup>2</sup>

Rendimento óptico: 81,00%

Coefficiente de perdas térmicas a1: 3,590 W/m<sup>2</sup>/K

Coefficiente de perdas térmicas a2: 0,021 W/m<sup>2</sup>/K<sup>2</sup>

Modificador de ângulo a 50°: 0,96

Caudal no grupo painel/permutador: 49,7 l/m<sup>2</sup> por hora (=0,61 l/s)

-----  
Permutador

-----  
Externo, com eficácia 75%

(factor de penalização: 97%)

-----  
Depósito

-----  
Modelo: ESAB\_5000L

Volume: 5000 l

Área externa: 18,15 m<sup>2</sup>

Material: PVC

Posição vertical

Deflectores interiores

Coefficiente de perdas térmicas: 18,31 W/°C

-----  
Cargas térmicas

-----  
Consumo de água nova, sem recuperação de calor.

Temperatura nominal: 60°C

Temperatura mínima aceite: °C

(Existem válvulas misturadoras.)

Perfis de consumo de segunda a sexta (1)

hora	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
01												
02												
03												
04												
05												
06												
07												
08												
09												
10	1368	1368	1368	1368	1368	1368			1368	1368	1368	1368
11	1368	1368	1368	1368	1368	1368			1368	1368	1368	1368
12	1368	1368	1368	1368	1368	1368			1368	1368	1368	1368
13	1368	1368	1368	1368	1368	1368			1368	1368	1368	1368
14	1368	1368	1368	1368	1368	1368			1368	1368	1368	1368
15	1368	1368	1368	1368	1368	1368			1368	1368	1368	1368
16	1368	1368	1368	1368	1368	1368			1368	1368	1368	1368
17	1368	1368	1368	1368	1368	1368			1368	1368	1368	1368
18	1368	1368	1368	1368	1368	1368			1368	1368	1368	1368
19												
20												
21												
22												
23												
24												
diário	12312	12312	12312	12312	12312	12312			12312	12312	12312	12312

Perfis de consumo ao fim-de-semana (1)

hora	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
01												
02												
03												
04												
05												
06												
07												
08												
09												
10												
11												
12												
13												
14												
15												
16												
17												
18												
19												
20												
21												
22												
23												
24												
diário												

-----  
 Localização, posição e envolvente do sistema  
 -----

Concelho de Coimbra

Latitude 40,2°N (nominal)

Longitude 8,4°W (nominal)

TRY SNCE 2006

-

Inclinação do painel: 40°

Azimute do painel: 0°

Obstruções do horizonte: 3°(por defeito)

-----  
 Balanço energético mensal e anual  
 -----

	Rad.Horiz. kWh/m <sup>2</sup>	Rad.Inclin. kWh/m <sup>2</sup>	Desperdiçado kWh	Fornecido kWh	Carga kWh	Apoio kWh
Janeiro	56	93	,	2837	13072	10235
Fevereiro	74	108	,	2908	10943	8035
Março	108	132	,	3141	11506	8365
Abril	148	158	54,	4204	11218	7014
Maio	184	175	,	4703	12188	7485
Junho	191	173	,	4257	9927	5669
Julho	211	196	1870,	0	0	0
Agosto	193	198	2218,	0	0	0
Setembro	136	160	86,	4127	9816	5689
Outubro	102	143	,	4277	12110	7833
Novembro	66	112	,	3100	11381	8281
Dezembro	53	94	,	2692	11689	8997
Anual	1523	1742	4228,	36247	113849	77602

Fracção solar: 31,8%

Produtividade: 824 kWh/[m<sup>2</sup> colector]