



UNIVERSIDADE DO ALGARVE - INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA

**Mestrado em Energia e Climatização de Edifícios**

*“Estudo de soluções energéticas para a cabine de pintura automóvel”*

“Study of energy solutions for automotive spray booths”



Marco Santos Sousa Máximo

**Faro,**

**Setembro, 2012**



UNIVERSIDADE DO ALGARVE - INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA

## Mestrado em Energia e Climatização de Edifícios

*“Estudo de soluções energéticas para a cabine de pintura automóvel”*

“Study of energy solutions for automotive spray booths”

Dissertação apresentada no âmbito da  
obtenção do grau de Mestre em  
Energia e Climatização de Edifícios do  
Instituto Superior de Engenharia da  
Universidade do Algarve.

**Orientador:** Docente Eng.º João Lopes

**Faro,  
Setembro, 2012**



É permitida a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou electrónico, para fins de estudo ou pesquisa, desde que citada a fonte.

#### **Ficha Bibliográfica**

Máximo, Marco Santos  
Sousa, 2012

Tese de Mestrado em  
Energia e Climatização de  
Edifícios



### **Agradecimentos**

A minha tese de mestrado não é apenas resultado de longas horas de trabalho, estudo e pesquisa, mas sim o culminar de um objectivo pessoal a que me propus e que apenas foi possível graças ao envolvimento de várias pessoas.

Inicialmente quero agradecer às pessoas que directamente colaboraram com a execução deste projecto pela dedicação e competência que demonstraram no plano académico na orientação fornecida.

Um muito obrigado ao Eng.º António Mortal, responsável da cadeira, que em muito incentivou a realização deste trabalho e cujas informações e comentários permitiram agregar valor a este trabalho.

Para o Eng.º João Lopes, pela sua competência de orientador, amabilidade e a disponibilização dos conhecimentos necessários para direccionar o trabalho no sentido correcto, o meu apreço e gratidão.

Deixo também uma palavra de agradecimento ao Director Geral da Caetano Auto Algarve, Sr. Carlos Salgueiro pela disponibilização de informação e das instalações, para que se pudesse realizar testes práticos dos assuntos abordados. Aproveito para felicitar a forma eficaz e profissional como conduz a empresa.

Estou grato aos colaboradores que trabalharam directamente comigo, pois permitiram que este projecto fosse concluído com êxito.

Por fim, um agradecimento especial à minha família, pelo tempo que lhes privei da minha presença e pelo apoio nos momentos de fraqueza, em que muitas vezes questionamos o caminho que seguimos.



## Índice

Resumo .....	13
Abstract .....	14
1 Introdução .....	15
1.1 Enquadramento .....	15
1.2 Objectivos.....	16
1.3 Organização da Tese .....	16
2 A cabine de pintura automóvel .....	19
2.1 História da cabine de pintura .....	19
2.2 Caracterização da cabine de pintura automóvel .....	21
3 Auditoria Energética .....	33
3.1 Introdução .....	33
3.2 Caracterização da cabine auditada .....	34
3.3 Registo de consumos de energia: .....	41
3.4 Análise ao comportamento térmico da cabine .....	53
3.5 Conclusões.....	62
4 Modelo de simulação energética .....	65
4.1 Introdução .....	65
4.4 Resultados da simulação .....	75
4.5 Conclusões .....	79
5 Fontes de Energia .....	81
5.1 Introdução .....	81
5.2 Sistemas alternativos .....	82
5.4 Conclusões .....	87
6 Soluções estudadas .....	89
6.1 Introdução .....	89
6.2 Sistema com coletores solares (opção 1).....	90



6.3	Sistema de recuperação de calor (Opção 2) .....	116
6.4	Sistema com colectores solares e recuperação de calor (Opção 3).....	123
6.5	Recuperação de calor do compressor (opção 4) .....	128
6.6	Conclusão .....	140
Conclusão Final .....		143
Referências .....		145
Anexos .....		147
1.	TSV .....	147
2.	Propriedades físicas do Ar .....	148
3.	Propriedades do gás propano .....	149
4.	Propriedades do gasóleo.....	151
5.	Propriedades combustíveis .....	151
6.	Propriedades do gás Natural.....	152
7	. Propriedades físicas dos metais. ....	153



### **Índice de Ilustrações**

Ilustração 1 – Fluxo de aquecimento na cabine de pintura.....	15
Ilustração 2 -Primeira pistola de pintura .....	19
Ilustração 3 – Início processo pulverização.....	19
Ilustração 4 – Início pulverização indústria automóvel.....	19
Ilustração 5 – Cabine de pintura inicial.....	20
Ilustração 6 – Câmara de trabalho.....	21
Ilustração 7 – Filtros exaustão .....	22
Ilustração 8 – Aplicação de filtros tipo rolo.....	22
Ilustração 9 – Filtro tipo cassete .....	23
Ilustração 10 – Câmara de exaustão .....	23
Ilustração 11 – Sequência de equipamentos exaustão .....	24
Ilustração 12 – Câmara de admissão e filtro .....	24
Ilustração 13 - Ventilador .....	25
Ilustração 14 - Queimador .....	25
Ilustração 15 – Iluminação interior da cabine.....	26
Ilustração 16 - Iluminação .....	26
Ilustração 17 – Cabine com fluxo horizontal (Crossdraft) .....	27
Ilustração 18 - Cabine com fluxo horizontal (Crossdraft).....	27
Ilustração 19 – Cabine fluxo semi-horizontal (semi-downcraft).....	28
Ilustração 20 - Cabine fluxo semi-horizontal (semi-downcraft).....	29
Ilustração 21 – Cabine fluxo descendente extracção lateral .....	29
Ilustração 22 - Cabine fluxo descendente extracção lateral .....	30
Ilustração 23 – Cabine fluxo descendente (Downcraft).....	31
Ilustração 24 – Fluxo descendente Downcraft.....	32
Ilustração 25 – Cabine com sistema original .....	34
Ilustração 26 – Cabine (vista de frente) .....	35
Ilustração 27 – Cabine (vista lateral) .....	36
Ilustração 28 – Pormenor das chaminés (extracção, insuflação e gases queimador).....	36
Ilustração 29 – Cabine (vista posterior) .....	37
Ilustração 30 – Cabine (vista interior) .....	37
Ilustração 31 – Localização da Cabine e instalações .....	38
Ilustração 32 - Fluxo de ar durante processo de aplicação .....	40



Ilustração 33 - Fluxo de ar durante processo de aplicação secagem .....	40
Ilustração 34 – Posição sensores do ensaio comportamental da cabine.....	55
Ilustração 35 – Fotografia termográfica do interior da cabine .....	58
Ilustração 36 - Fotografia termográfica do interior da cabine .....	59
Ilustração 37 - Fotografia termográfica de peça em processo de secagem .....	59
Ilustração 38 - Fotografia termográfica de perdas pela porta .....	60
Ilustração 39 - Fotografia termográfica das perdas pelas junções das portas....	60
Ilustração 40 - Fotografia termográfica pontes térmicas .....	61
Ilustração 41 - Fotografia termográfica das chaminés.....	61
Ilustração 42 - Fotografia termográfica queimador .....	62
Ilustração 43 – Desenho da cabine com dimensões .....	68
Ilustração 44 – Pormenor dos painéis de revestimento .....	69
Ilustração 45 – Resistência total da envolvente da cabine.....	71
Ilustração 46 – Cabine de infravermelhos em estado OFF .....	83
Ilustração 47 - Cabine de infravermelhos em estado ON .....	83
Ilustração 48 - Cabine mista, infravermelhos e gás.....	84
Ilustração 49 – O Sol – base para vida na terra .....	90
Ilustração 50 – Variação diária e valor global diário de irradiação .....	92
Ilustração 51 – Reflexão solar global e suas componentes.....	93
Ilustração 52 – Somatório mensal da irradiação solar global – directa e difusa para Lisboa.....	94
Ilustração 53 – Radiação global anual em Portugal .....	95
Ilustração 54 – Insolação global anual em Portugal .....	96
Ilustração 55 – Tipos de colectores.....	98
Ilustração 56 – Fluxos de energia num colector.....	99
Ilustração 59 – Cabine com sistema auxiliar de aquecimento solar .....	101
Ilustração 60 – Permutador Ar/Ar .....	116
Ilustração 61 – Esquema funcionamento permutador calor .....	117
Ilustração 62 – Cabine com sistema auxiliar de recuperador de calor .....	119
Ilustração 63 - Cabine com sistema auxiliar de colectores solares e recuperador de calor .....	123
Ilustração 64– Tipos de compressores .....	129
Ilustração 65– Esquema da Instalação de produção de ar comprimido.....	130
Ilustração 66– Compressor como sistema auxiliar. ....	138



## **Índice de Tabelas**

Tabela 1 – Dados do ensaio de temperaturas da cabine .....	56
Tabela 2 – Dados do modelo de simulação para o dia 1 de Janeiro .....	66
Tabela 3 – Dados do modelo para cálculo de cargas térmicas.....	75
Tabela 4 – Resumo do resultado energético mensal e anual do modelo matemático .....	77
Tabela 5 – Propriedades dos combustíveis.....	84
Tabela 6 – Preços combustíveis.....	85
Tabela 7 – Cargas de funcionamento.....	85
Tabela 8 – Resumo de consumos e custos por fonte .....	86
Tabela 9 – Características dos colectores solares.....	104
Tabela 10 – Caracterização do colector em função da instalação .....	106
Tabela 11 – Resultados, energia captada para um dia típico .....	109
Tabela 12 – Energia necessária Vs Energia produzida [Para situação 22°C] ....	111
Tabela 13 – Energia necessária para 22°C, base anual. ....	111
Tabela 14 – Exemplo energia recuperada para 1 dia de trabalho .....	120
Tabela 15 – Energia recuperada.....	120
Tabela 16 – Resultado entre a energia recuperada e a efectivamente necessária .....	124
Tabela 17 – Resultado entre a energia produzida e a necessária após recuperação .....	124
Tabela 18 - Sistema solar com recuperação de calor na extracção .....	125
Tabela 19 – Selecção de depósito de ar comprimido.....	134
Tabela 20 – Comportamento energético anual para compressor Ciata RTB 30	136
Tabela 21 – Economia potencial do aproveitamento energia térmica do compressor .....	137
Tabela 24 – Comparativo económico das soluções propostas.....	140



## **Índice de gráficos**

Gráfico 1 – Registo energético dos anos 2010 e 2011 .....	42
Gráfico 2 – Custos energéticos, anos 2010 e 2011 .....	42
Gráfico 3 – Registo de consumos de gás propano Kg, 2010.....	43
Gráfico 4 – Registo de custos associados ao consumo de gás propano €, 2010 .	43
Gráfico 5 – Registo de consumos de gás propano Kg, 2011.....	44
Gráfico 6 - Registo de custos associados ao consumo de gás propano €, 2011..	44
Gráfico 7 – Consumos eléctricos hora a hora em dia normal de trabalho.....	46
Gráfico 8 - Registo energético da cabine .....	47
Gráfico 9 – Registo energético da cabine por fonte .....	47
Gráfico 10 – Consumos diários da cabine, por fonte energética em €.....	48
Gráfico 11 – Peso energético por fonte [Gás e Electricidade].....	49
Gráfico 12 – Peso do custo diário por fonte [Gás e Electricidade].....	49
Gráfico 13 – Consumos eléctricos diários da cabine .....	50
Gráfico 14 – Distribuição diária de custos eléctricos .....	50
Gráfico 15 – Consumo médio diário da cabine .....	51
Gráfico 16 – Custos energéticos diários.....	51
Gráfico 17 – Consumos energéticos por dia e por processo .....	52
Gráfico 18 – Custo energético por dia e por processo .....	52
Gráfico 19 - Comportamento das temperaturas no interior da cabine .....	57
Gráfico 20 – Energia necessária ao processo de aplicação [22°C].....	76
Gráfico 21 – Energia necessária ao processo de secagem [60°C].....	76
Gráfico 22 – Energia simulada Vs energia obtida nos registos .....	77
Gráfico 23 – Comparativo modelo matemático vs. Registos.....	78
Gráfico 24 – Necessidades energéticas associadas ao aquecimento da cabine consoante processo .....	79
Gráfico 25 – Energia simulada Vs Média energia registada.....	86
Gráfico 26 – Curva de rendimento colector solar .....	105
Gráfico 27 – Energia captada pelo sistema solar .....	110
Gráfico 28 - Energia necessária Vs. Energia produzida para base 22°C.....	112
Gráfico 29 – Peso das fontes energéticas gás propano Vs. Energia solar .....	113
Gráfico 30 – Retorno do investimento, opção 1.....	115



Gráfico 31 – Peso de fontes energéticas gás propano Vs. Recuperador de calor .....	120
Gráfico 32 – Retorno do investimento opção 2 .....	122
Gráfico 33 – Peso das fontes energéticas, Gás propano Vs Sist. solar + recuperador de calor.....	126
Gráfico 34 – Retorno do investimento opção 3 .....	127
Gráfico 39 – Retorno investimento opção 4.....	139



## **Índice de Fórmulas**

(1)	Carga Envolvente	67
(2)	Carga Envolvente	70
(3)	Carga associada à renovação de ar	70
(4)	Carga associada ao automóvel	70
(5)	Carga total	70
(6)	Coefficiente de transmissão térmica	71
(7)	Resistência térmica total	71
(8)	Radiação Global	92
(9)	Balanço energético ao colector solar	102
(10)	Energia útil recolhida pelo fluído térmico	102
(11)	Energia incidente total por unidade de tempo	102
(12)	Energia perdida por dissipação para o exterior	102
(13)	Energia útil recolhida pelo fluído térmico	102
(14)	Temperatura média do fluído térmico	101
(15)	Equação de Bliss	101
(16)	Equação de Bliss adaptada	102
(17)(18)	Rendimento do colector	102
(19)	Radiação incidente em superfície inclinada	107
(20)	Razão radiação directa sup. horizontal e sup. inclinada	108
(21)	Declinação	108
(22)	Ângulo horário $\omega$	108
(23)	VAL - Valor Actual Líquido	114
(24)(25)	Carga térmica máxima do permutador	117
(26)(27)	Eficiência do permutador	118
(28)	Acréscimo do consumo energia com aumento pressão ar	135



## **Resumo**

O processo de pintura de automóveis passa por várias fases que requerem grandes quantidades de energia térmica, uma vez que é necessário garantir uma temperatura mínima de aproximadamente 20°C, na fase de aplicação, e de 60°C, na fase de secagem.

Pretende-se realizar uma auditoria energética a uma cabine de pintura automóvel, tendo em vista a optimização de todo o processo, desde a fase de aplicação até à fase de secagem.

O objectivo principal deste trabalho consiste em encontrar alternativas energéticas ao usual gás propano que sejam economicamente viáveis.

Assim, foram estudadas como alternativas as seguintes soluções:

- Opção 1 – Sistema solar térmico;
- Opção 2 - Sistema recuperação de calor (Extracção e Insuflação);
- Opção 3 – Sistema solar térmica mais recuperação de calor;
- Opção 4 – Sistema de recuperação de calor do compressor;

Apresentadas a respectivas opções, realizaram-se então os estudos de viabilidade económica para cada solução.



## **Abstract**

The process of painting a car passes through several phases, which require large amounts of thermal energy, it is necessary to ensure a minimum temperature of approximately 20 ° C during application and 60 ° C during drying.

We intend to perform an energy audit to a car paint booth with a view to optimizing of the whole process, from initial application until the drying stage.

The main objective of this work is to find energy alternatives to the usual propane gas that are economically viable.

So, I studied as alternative solutions:

1. Option – Solar thermal system;
2. Option – Heat recovering system;
3. Option – Solar thermal system more heat recovering system;
4. Option – Compressor heat recovering system;

Presented options, Started the studies of economic feasibility for each solution.

## 1 Introdução

### 1.1 Enquadramento

Usualmente os sistemas de aquecimento aplicados nas de cabines de pintura automóvel utilizam como fonte de energia térmica a queima de gás propano, que dadas as características de utilização conduz a consumos de energia bastante significativos.

O estudo feito tem como principal objectivo reflectir sobre o peso da energia necessária no processo de pintura automóvel e a necessidade de o tornar mais eficiente.

Assim, o estudo basear-se-á na análise energética e económica do processo de pintura automóvel e a apresentação de alternativas economicamente viáveis. O recurso a energias renováveis ou recuperação de energia serão então soluções estudadas.

Para a realização do estudo proposto utilizar-se-á como referência a cabine de pintura existente nas oficinas da Caetano Auto Algarve S.A, em Faro.

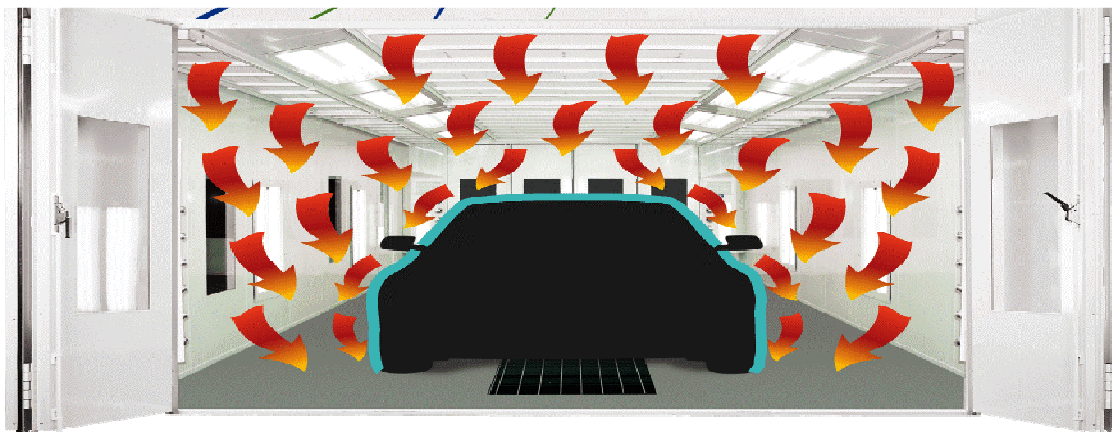


Ilustração 1 – Fluxo de aquecimento na cabine de pintura

(Finishing Academy by Global Finishing Solutions, 2011)



## **1.2 Objectivos**

O contexto industrial actual define-se por uma enorme competitividade, encontrando-se num mercado cada vez mais globalizado onde as empresas lutam diariamente para conseguir que o custo de produção seja o mais baixo possível.

Num mercado em retracção, o controlo dos custos de produção, é o segredo do sucesso para muitas indústrias.

Assim, neste cenário, facilmente se percebe que os factores energéticos têm cada vez mais peso nas decisões de gestão e tornam-se um dos principais pilares para a subsistência das empresas.

A escolha do tema alicerçou-se na necessidade de criar novas perspectivas na utilização racional da energia e sensibilizar o meio académico e empresarial.

O objectivo da tese é, por um lado, dar a conhecer o processo de pintura automóvel e o peso energético associado a esta actividade e por outro, apresentar soluções energéticas que possam ser economicamente viáveis e conduzam a melhorias na utilização da energia.

O presente trabalho aborda a necessidade energética do processo de pintura automóvel, através de auditoria, analisa os resultados obtidos e propõem medidas de optimização na gestão energética.

Este trabalho é de grande interesse na actividade de pintura automóvel, nomeadamente no ramo das empresas que se dedicam à manutenção e reparação automóvel.

## **1.3 Organização da Tese**

A tese encontra-se organizada em seis capítulos.

No presente capítulo, intitulado de “*Introdução*”, é feita uma apresentação do trabalho e indicam-se os objectivos pretendidos na realização do mesmo.



O capítulo 2 denominado “*A Cabine de pintura automóvel*”, começa por abordar a história da cabine de pintura automóvel, os equipamentos que a caracterizam e os tipos de cabines existentes em função do seu funcionamento técnico.

No capítulo 3, denominado “*Auditoria energética*” aborda-se a auditoria energética realizada a todo o processo.

No capítulo 4, designado “*Desenvolvimento de simulações*”, procede-se a uma simulação através da ferramenta Excel com vista à caracterização da realidade e posterior comparação entre fontes energéticas.

No capítulo 5, denominado “*Soluções estudadas*”, apresentam-se as diversas soluções em estudo.

A tese termina com o capítulo 6, intitulado “*Análise de viabilidade económica*” onde se apresenta o estudo de viabilidade económica para as soluções anteriormente apresentadas e as respectivas conclusões do trabalho.



UNIVERSIDADE DO ALGARVE - INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA

## **Mestrado em Energia e Climatização de Edifícios**

## 2 A cabine de pintura automóvel

### 2.1 História da cabine de pintura

A génese da cabine de pintura surge no desenrolar de várias invenções durante o final do século XIX. Foi no final deste período que apareceram as primeiras técnicas de pintura por pulverização. Importa referir que a indústria de carpintaria foi também das primeiras a iniciar a técnica de pulverização para aplicação de tintas e vernizes.

No início do século XX, mais concretamente em 1907, Henry Ford, com o seu modelo T, introduziu na linha de produção a pistola de pintura pela primeira vez, diminuindo significativamente os tempos de produção.



Ilustração 2 -Primeira pistola de pintura



Ilustração 3 – Início processo pulverização



Ilustração 4 – Início pulverização indústria automóvel

(Finishing Academy by Global Finishing Solutions, 2011)

No início da I Guerra Mundial, em 1914, e devido a um aumento da procura intensificaram-se os processos de investigação e aplicação de métodos que acelerassem a produção. Isto porque os processos de produção encontravam muitas vezes, o que em gestão de produção se denomina de gargalos, ou seja, pontos em que a produção se concentrava num ritmo lento e com grandes filas de espera.

O sistema de acabamento associado à aplicação de pintura ou vernizes era um desses pontos, uma vez que os primeiros sistemas de pintura por pulverização demoravam cerca de duas semanas no seu processo de secagem.

Em meados de 1920, os químicos começaram a trabalhar em substâncias que pudessem acelerar o processo de secagem. As primeiras recorrências a cabines de pintura surgem precisamente da necessidade de restringir a um ambiente controlado a aplicação, através da pulverização, de produtos perigosos.

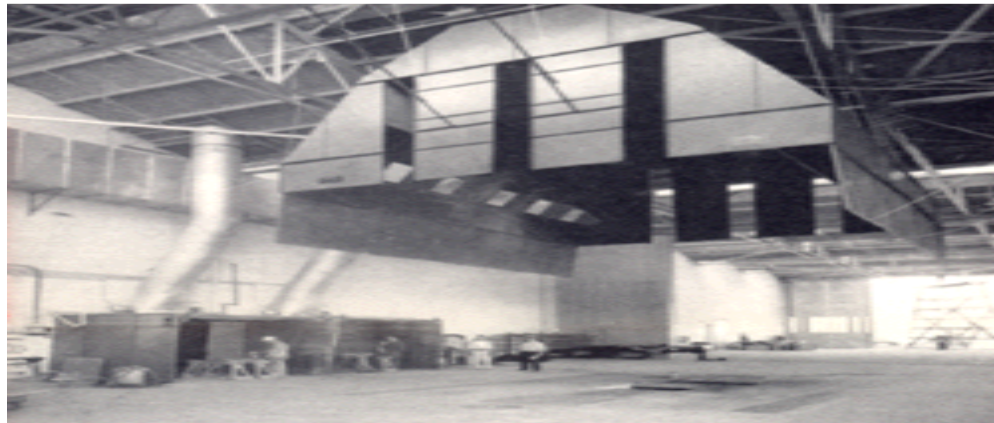


Ilustração 5 – Cabine de pintura inicial

(Finishing Academy by Global Finishing Solutions, 2011)

Dada a perigosidade dos produtos para o meio ambiente e a sua volatilidade, a utilização da cabine permitiu o controlo de fugas que pudessem causar incêndio ou explosão. Isto porque inicialmente estes produtos eram bastante inflamáveis e tóxicos.

Outra grande vantagem das cabines iniciais era proporcionar um ambiente tratado e limpo para o processo da pintura diminuindo, assim a possibilidade de contaminação e a conseqüente necessidade de trabalhos de correcção que atrasavam a produção.

A adopção da pintura por pulverização e o controlo do ambiente através de cabines permitiu que os tempos de produção associados ao acabamento de pintura passassem para três dias. Esta alteração foi um salto significativo, mas ainda assim aquém das necessidades.

Com o desenrolar de investigações que pudessem acelerar o processo de evaporação dos solventes, chegamos então às primeiras cabines de pintura aquecidas.

Na sua generalidade, as cabines de pintura sofreram evoluções distintas, adaptando as suas características em função de diversos factores, objectos a pintar, localizações físicas da implantação, bem como variáveis económicas.

## 2.2 Caracterização da cabine de pintura automóvel

Para conhecermos o funcionamento da cabine de pintura é necessário identificarmos os equipamentos que a constituem.

Assim, podemos definir como equipamentos básicos das cabines de pintura os seguintes componentes:

Câmara de trabalho: Designa-se o espaço de trabalho onde é aplicado a pintura através da pulverização, ou seja, a cabine em si.

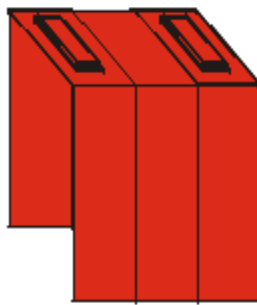


Ilustração 6 – Câmara de trabalho

(Finishing Academy by Global Finishing Solutions, 2011)

Filtros de Extracção: Todas as cabines possuem filtros secos, substituíveis periodicamente, que visam a captação de “overspray” produzido na aplicação por pulverização. Porém, existem situações específicas em sistema de cortina de água que desempenham o papel de filtro. Funcionando normalmente em

sistema de recirculação, estes sistemas são mais adotados em ambientes de fábrica. O mesmo não acontece na indústria automóvel, em ambiente ofical, pois a maioria dos filtros são filtros de rolo (ilustração 8) ou tipo cassete (ilustração 9). Importa salientar que os filtros de rolo utilizam-se nas zonas de aplicação de tinta (cabine) e os de tipo cassete estão normalmente associados aos equipamentos de insuflação e extracção.



Ilustração 7 – Filtros exaustão

(Finishing Academy by Global Finishing Solutions, 2011)



Ilustração 8 – Aplicação de filtros tipo rolo

(Airless.com)



Ilustração 9 – Filtro tipo cassete

*(LULUSOSO)*

Câmara de exaustão: Este equipamento é normalmente colocado depois do filtro. Nesta câmara fica alojado o colector de escape e o ventilador.

Em sistemas de filtros com água, a câmara de lavagem é equivalente à câmara de exaustão de ar seco em cabines de filtro. O ar que atravessa a câmara de pintura transporta o “overspray “ até à cortina de água de lavagem que por sua vez faz a retenção das partículas. A água é posteriormente reciclada num processo onde lhe são removidas as partículas retidas.

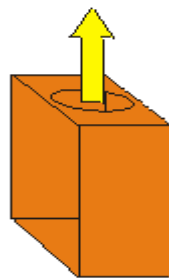


Ilustração 10 – Câmara de exaustão

*(Finishing Academy by Global Finishing Solutions, 2011)*

Na ilustração 11, podemos verificar a sequência de equipamentos das cabines de pintura, que neste caso corresponde ao sistema de fluxo horizontal. Este será explicado mais à frente, ainda neste capítulo.



Ilustração 11 – Sequência de equipamentos exaustão

(Finishing Academy by Global Finishing Solutions, 2011)

Admissão: A admissão do ar no interior da cabine é efectuada em processo idêntico ao da extracção, ou seja, através de uma conduta de admissão com ventilador instalado na câmara de insuflação. Nesta existe também um filtro tipo cassette, que é substituído regularmente, e tem como objectivo controlar a qualidade do ar no interior da câmara de trabalho, evitando a entrada de poeiras do exterior.



Ilustração 12 – Câmara de admissão e filtro

(Finishing Academy by Global Finishing Solutions, 2011)



Ilustração 13 - Ventilador

*(SAIMATEC)*

Queimador: Este dispositivo é responsável pelo aquecimento do ar de forma a coloca-lo à temperatura ideal para o processo em causa.



Ilustração 14 - Queimador

*(BTT Car Tools Co. Ltd.)*

Iluminação: A iluminação no interior da cabine é fundamental e todas dispõem de iluminação própria.



Ilustração 15 – Iluminação interior da cabine

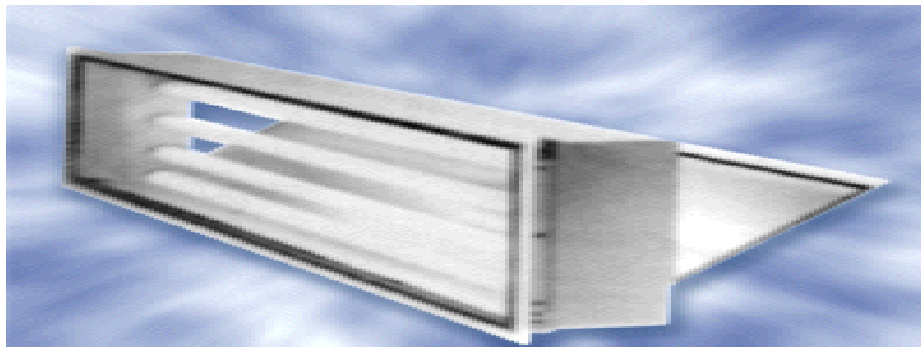
*(Finishing Academy by Global Finishing Solutions, 2011)*

Ilustração 16 - Iluminação

*(Finishing Academy by Global Finishing Solutions, 2011)*

## 2.3 Tipos de Cabines de Pintura

### 2.3.1 Cabines de fluxo horizontal (Crossdraft)

A cabine de fluxo horizontal é certamente a forma mais básica das cabines de pintura que conhecemos, pois a sua configuração é a mais simples de todas. Possui apenas uma câmara de extracção, um filtro de cassete e um ventilador bastante potente na conduta de extracção. A potência do ventilador permite por sua vez puxar o ar desde a porta de entrada, tipo porta filtro.

O processo de ventilação origina um forte fluxo de ar horizontal, criando algum desconforto para o trabalhador. Por outro lado, o seu desempenho impossibilita

acabamentos muito exigentes, pois a qualidade final da pintura é baixa, resultante do tipo de fluxo de ar (horizontal).

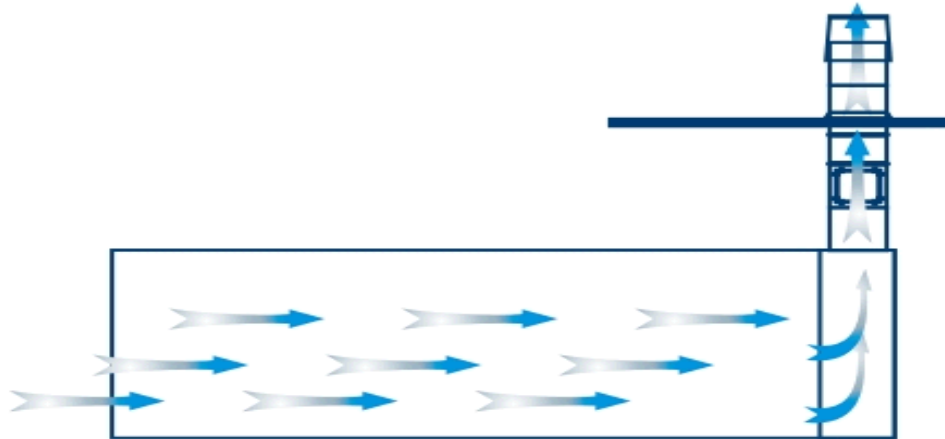


Ilustração 17 – Cabine com fluxo horizontal (Crossdraft)

(Finishing Academy by Global Finishing Solutions, 2011)

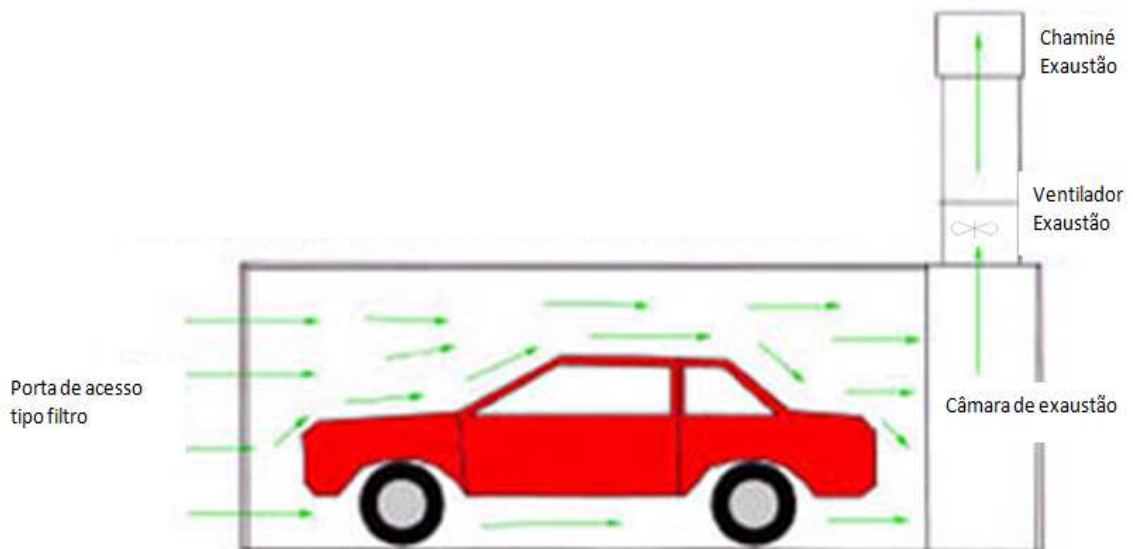


Ilustração 18 - Cabine com fluxo horizontal (Crossdraft)

(Finishing Academy by Global Finishing Solutions, 2011)

### 2.3.2 Cabines de fluxo semi-horizontal (Semi-Downdraft)

A cabine de fluxo semi-horizontal é um sistema “híbrido” dado que combina as características do sistema de “crossdraft” e “downdraft”. Para que se obtenham melhores resultados a cabine deve estar ligeiramente pressurizada. O ar é introduzido na cabine pelo teto que incorpora um ventilador de admissão. Este passa de uma posição de fluxo vertical, na admissão, para horizontal, na exaustão. Isto provoca uma ligeira turbulência no interior, o que leva a uma melhor evaporação de solvente e conseqüentemente melhores tempos de secagem. O aspecto negativo deste tipo de cabines incide na necessidade de uma maior estabilidade do ar interior, de forma manter a turbulência controlada. Só assim atingimos níveis que não comprometam a qualidade final. Como o fluxo não é uniforme, se a turbulência for excessiva pode originar a movimentação de poeiras existentes no interior que por sua vez, se depositariam na superfície da peça pintada e originava maus resultados de acabamento de pintura.

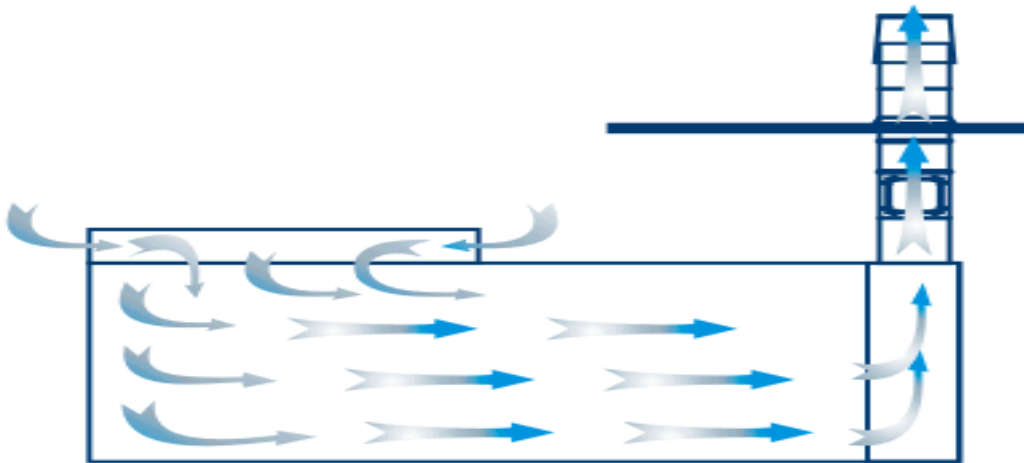


Ilustração 19 – Cabine fluxo semi-horizontal (semi-downdraft)

*(Finishing Academy by Global Finishing Solutions, 2011)*



Ilustração 20 - Cabine fluxo semi-horizontal (semi-downdraft)

*(Finishing Academy by Global Finishing Solutions, 2011)*

### 2.3.3 Cabines de fluxo descendente com extracção lateral (Side-Downdraft)

Na cabine de fluxo descendente com extracção lateral o ar é insuflado no tecto, sendo extraído através de grelhas com filtros laterais inferiores. Este tipo de fluxo produz excelentes níveis de acabamento dado que as partículas que possam existir são facilmente removidas da zona de trabalho.

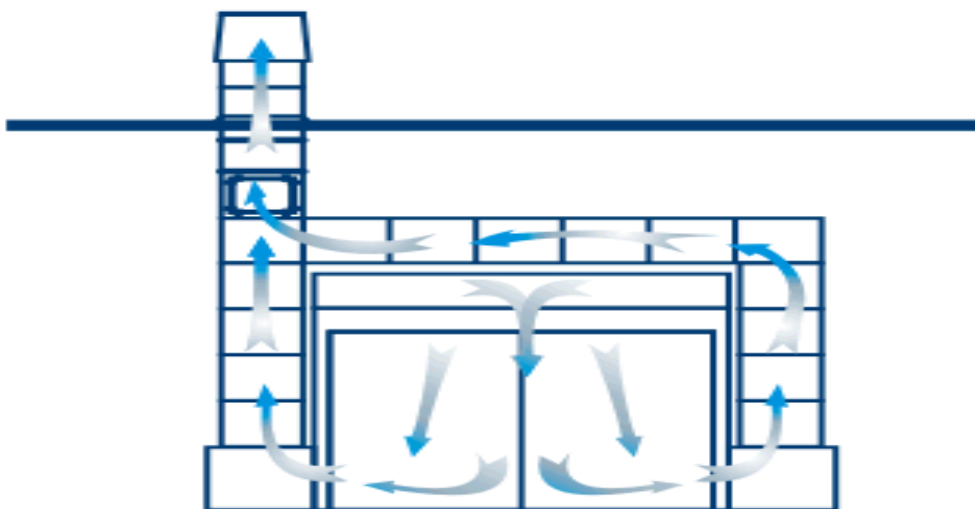


Ilustração 21 – Cabine fluxo descendente extracção lateral

*(Finishing Academy by Global Finishing Solutions, 2011)*

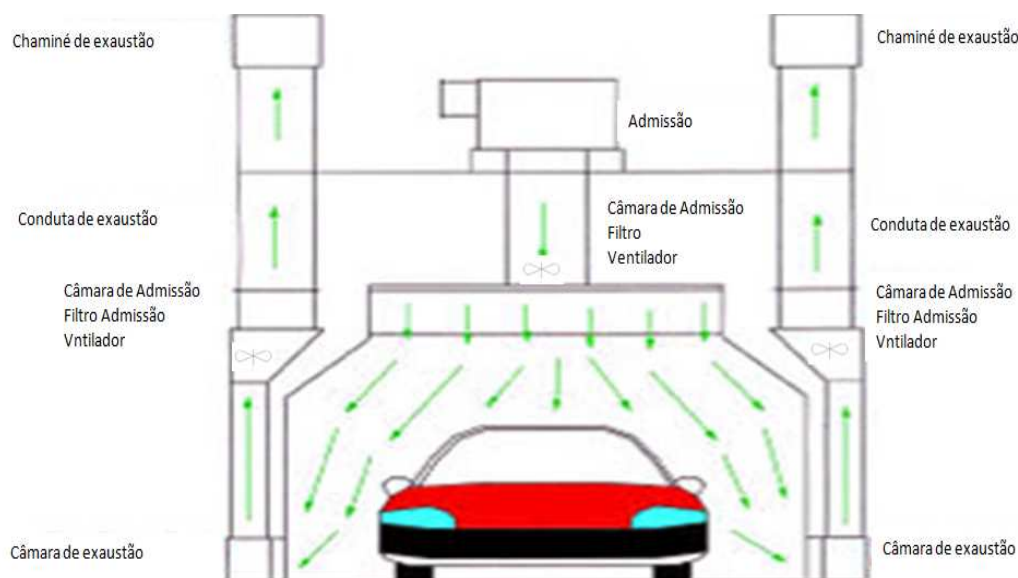


Ilustração 22 - Cabine fluxo descendente extracção lateral

*(Finishing Academy by Global Finishing Solutions, 2011)*

### 2.3.4 Cabines de Sistema de fluxo descendente (Downdraft)

A cabine de sistema de fluxo descendente é a mais utilizada actualmente, uma vez que é o que produz melhores resultados. Esta permite um fluxo de ar cuja envolvente nas superfícies a pintar é muito grande e estável e permite que o processo de secagem seja mais rápido. É também na qualidade final que este sistema se superioriza, pois sendo o fluxo sempre descendente provoca uma depressão ao nível do solo o que faz com que as impurezas se depositem sempre no fundo.

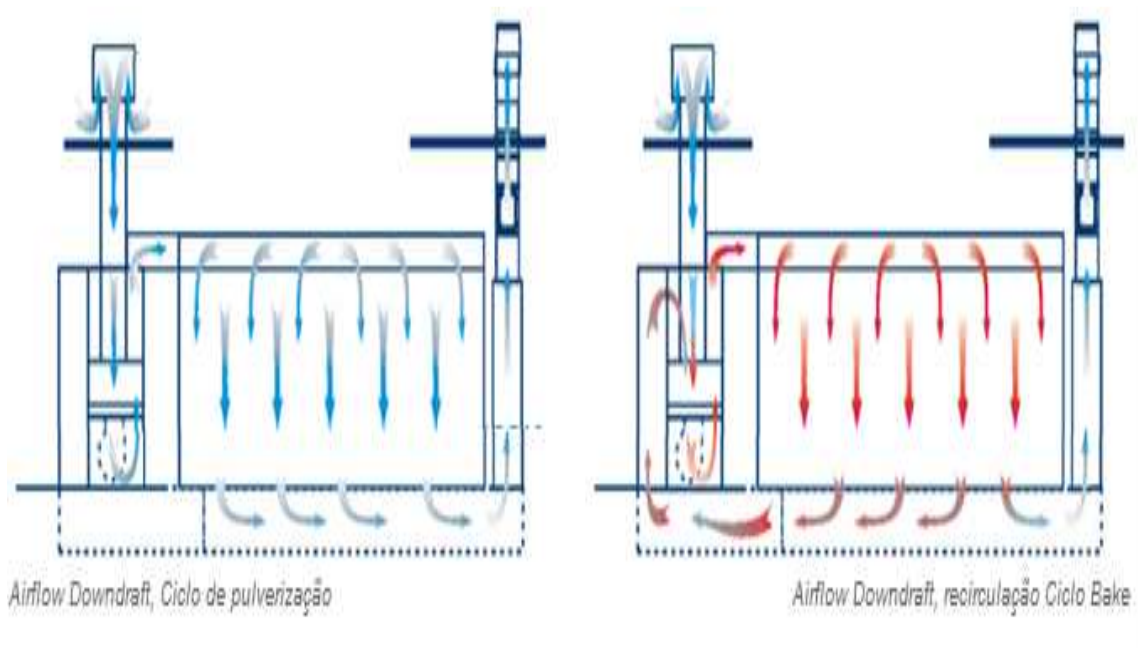


Ilustração 23 – Cabine fluxo descendente (Downdraft)

(Finishing Academy by Global Finishing Solutions, 2011)

Na figura acima (ilustração 23) podemos verificar que estas cabines funcionam com dois ciclos distintos. O ciclo de pulverização está associado à fase de aplicação que corresponde à fase em que temos necessidade que a temperatura da cabine na ordem dos 22°C. A fase de recirculação está associada à secagem dos solventes e nesta fase estamos a trabalhar com temperaturas perto dos 60°C.

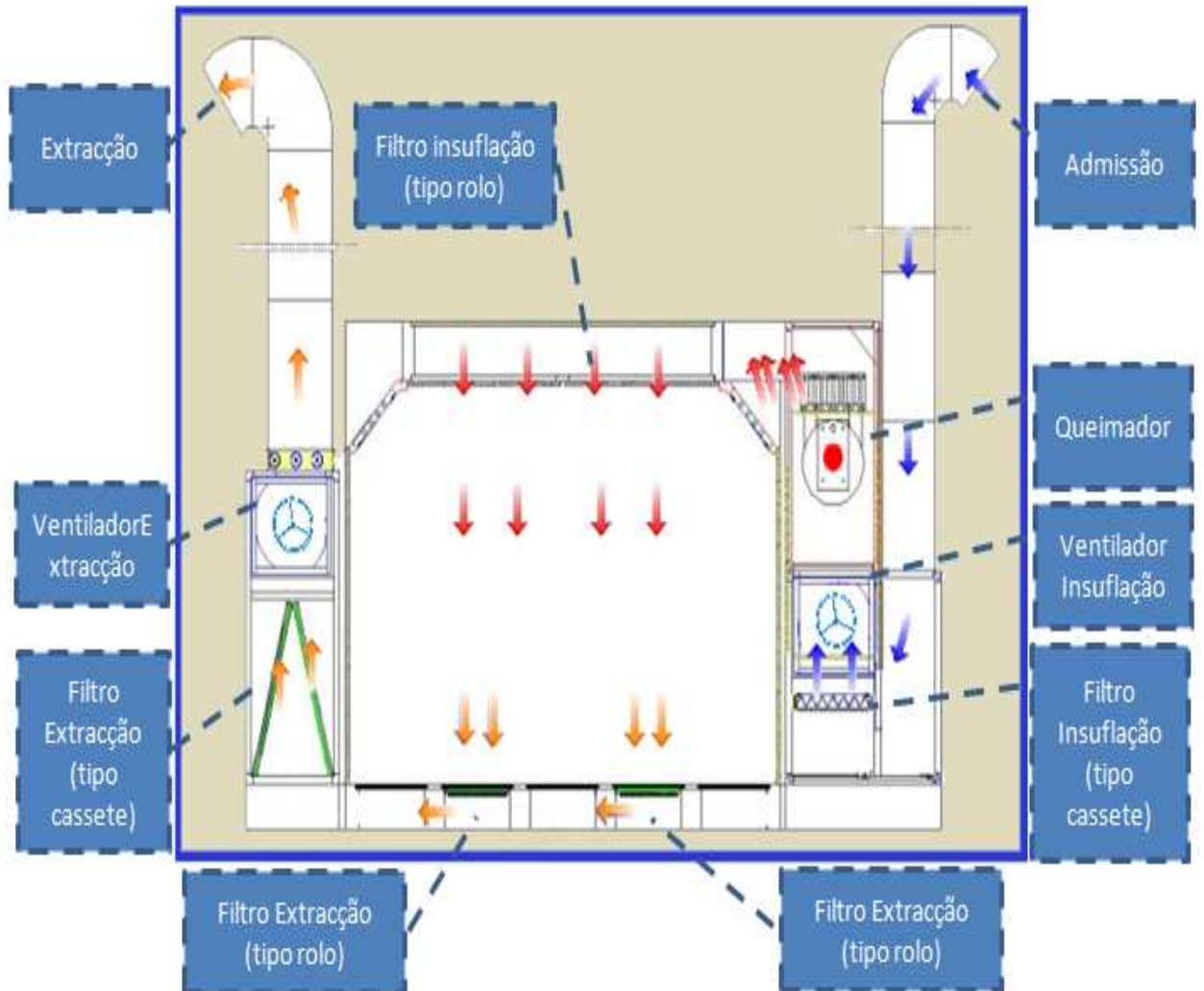


Ilustração 24 – Fluxo descendente Downdraft

(Firat Spray booths, 2011)

O sistema de fluxo descendente, mostrado na ilustração 24, é o que se encontra instalado na generalidade das oficinas que se dedicam à reparação na indústria automóvel. Será então o modelo de cabine que iremos analisar adiante em pormenor.



## **3 Auditoria Energética**

### **3.1 Introdução**

A auditoria energética, tem como objectivo a análise das condições de utilização da energia usada no processo de pintura automóvel em ambiente ofical. O facto de estarmos na presença de processos industriais onde a monitorização de consumos é pouco frequente, ou até mesmo descurada, e os equipamentos, na sua generalidade, têm mais de 15 anos de utilização, leva-nos a fazer recolha de dados que permitam conhecer a componente energética associada ao processo, desde a fase de aplicação à secagem. Assim, poderemos:

- Conhecer os consumos de energia associados ao processo;
- Contabilizar os consumos de energia;
- Dispor os dados de forma a ajudar a tomada de decisões;
- Relacionar o consumo de energia com a produção.

Acções de auditoria, geralmente englobadas em actividades de reabilitação energética, visam a redução de consumos nos processos produtivos. Estes por sua vez tornam-se essências para o desenvolvimento sustentado, pois contribuem de forma significativa para a saúde financeira das organizações.

A avançada idade do parque industrial, associado à pintura automóvel em ambiente ofical, faz com que as actividades de reabilitação de energia desempenhem um papel fundamental, tanto para a redução do impacto ambiental, como para diminuição da dependência externa das fontes de energia primárias.

No ponto 3.2 apresenta-se a cabine de pintura, objecto da auditoria ,e identifica-se a sua localização de forma a podermos obter os dados climáticos associados ao local. Além disso, será também apresentado o processo associado à pintura automóvel em ambiente ofical.

No ponto 3.3, apresenta-se os registos de consumos.

Finalmente, no ponto 3.4 apresentamos o comportamento térmico da cabine.

### 3.2 Caracterização da cabine auditada

A cabine de pintura utilizada como modelo representa a grande maioria das instalações industriais utilizadas neste processo. É uma cabine de fluxo descendente alimentada a gás propano com as características apresentadas seguidamente.

#### 3.2.1 Apresentação da cabine de pintura

Como podemos verificar na ilustração 25, encontramos um queimador a gás propano como fonte de energia e dois ventiladores, um associado à extracção e outro à insuflação. Este é o sistema mais comum associado ao processo de pintura na Indústria Automóvel.

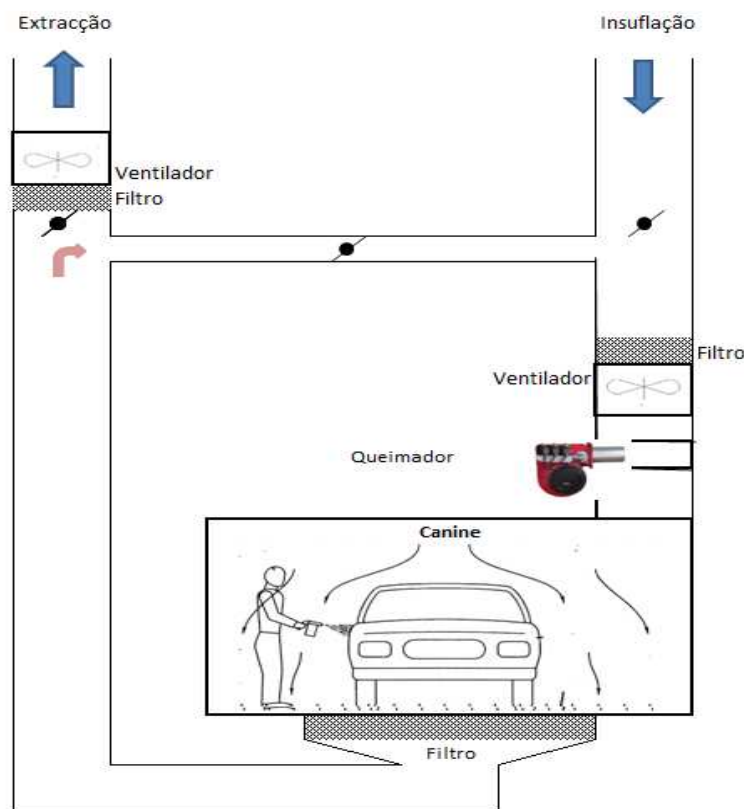


Ilustração 25 – Cabine com sistema original

A cabine de teste possui também as seguintes características:

Potência térmica = 235 kW

Potência dos ventiladores = 7,5 kW

Iluminação: 66 lâmpadas tubulares fluorescentes de 30 W

Na ilustração 26, podemos ver a porta de acesso à cabine onde são também são visíveis os quadros de comando. Nestes quadros é possível controlar a iluminação da cabine, temperatura e ventilação.



Ilustração 26 – Cabine (vista de frente)

A ilustração 27 apresenta a lateral da cabine com o respectivo laboratório de tintas, local onde se fazem as misturas dos corantes para obter as diversas cores, que são obtidas através de fórmulas específicas fornecidas pelos fabricantes.



Ilustração 27 – Cabine (vista lateral)

Na ilustração 28, podemos ver as três chaminés, sendo a da esquerda de extracção, a da direita de insuflação e a do meio, de menor diâmetro é a dos gases de escape do queimador.



Ilustração 28 – Pormenor das chaminés (extracção, insuflação e gases queimador)

Na ilustração 29, temos a zona posterior da cabine com a saída de gases do queimador.



Ilustração 29 – Cabine (vista posterior)

Podemos ver na ilustração 30 o interior da cabine. Realça-se os filtros, o superior de insuflação e o inferior de extracção.

É necessário salientar que existem ainda mais dois pré-filtros, que não são visíveis na ilustração, já que estão instalados nas condutas a montante de cada ventilador.

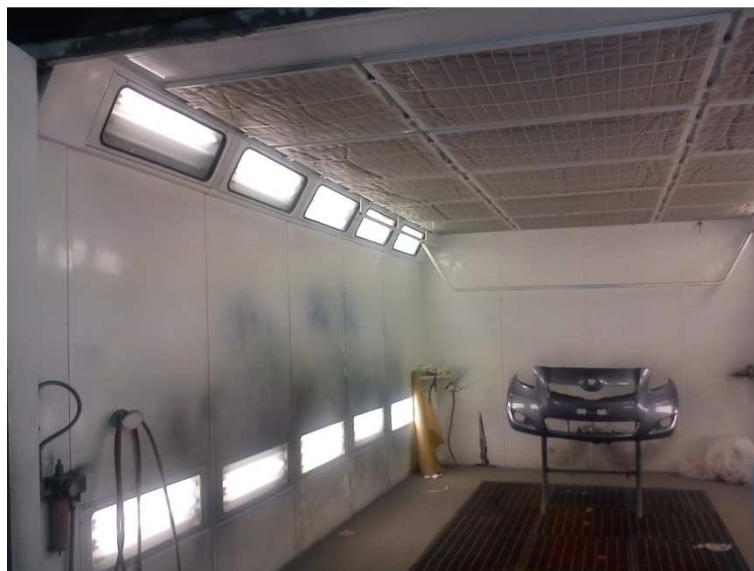


Ilustração 30 – Cabine (vista interior)

### 3.2.2 Localização da cabine e dados climatéricos

A cabine em estudo encontra-se em Faro, com a Latitude de 37°029' Norte e longitude de -7°947' Oeste.

Na ilustração 31, pode-se observar a localização específica da cabine (paralelogramo a vermelho no interior do rectângulo amarelo).

O espaço que envolve a cabine é de grandes dimensões (aproximadamente 1800 m<sup>2</sup>) e caracteriza-se por ter os portões de acesso sempre abertos. Desta forma, considera-se um espaço com temperaturas iguais às exteriores.



Ilustração 31 – Localização da Cabine e instalações

Os dados diários sobre as temperaturas e radiação solar foram retirados do *solterm*. (Echo Choice SA, 2006)



### **3.2.3 Descrição do processo de pintura automóvel**

O processo de pintura automóvel, na fase de utilização da cabine, pode ser dividido em duas etapas. A etapa 1 pode considerar como de aplicação, pois é quando o pintor executa o serviço. A etapa 2 será associada à secagem. Estas duas etapas, segundo informações técnicas dos vários fabricantes de tintas, devem ser trabalhadas às temperaturas médias de 22°C para a aplicação e 60°C para a secagem. É possível trabalhar-se com temperaturas de aplicação superiores sem comprometermos o trabalho, dado que por vezes no verão temos temperaturas superiores.

Na secagem, as temperaturas não deverão ultrapassar os 65°C pois corre-se o risco da qualidade ser afectada. Como na fase de secagem não existe problema se a temperatura for inferior, opta-se às vezes por regular os termóstatos para trabalharem ligeiramente abaixo dos 60°C. Caso isto aconteça, é necessário que o período de secagem aumente ligeiramente.

De referir que os próprios fabricantes de tintas possuem produtos específicos para trabalhar em função da variável temperatura. Além disto, o desenvolvimento de produtos que requeiram temperaturas mais baixas na secagem é uma preocupação dos fabricantes.

Desta forma podemos definir, na generalidade dos casos, como média os seguintes dados:

#### **Aplicação**

Temperatura média adequada, 22°C

#### **Secagem**

Temperatura média adequada, 60 °C

Carga anual:

48 semanas de trabalho

Período semanal de funcionamento: 5 dias/semana

Processos produzidos diariamente: 4 (podem ser viaturas ou conjuntos de peças soltas)

Carga média diária da cabine: 6,5h/dia associadas à aplicação (Ilustração 32) e 1,5h/dia associada ao processo de secagem (ilustração 33).

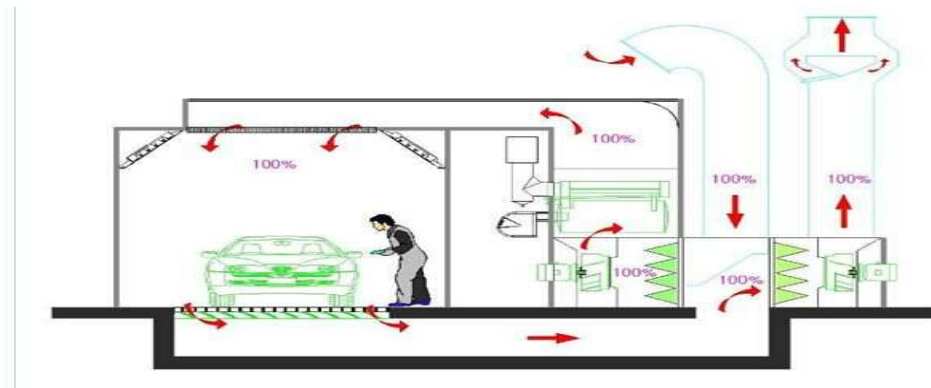


Ilustração 32 - Fluxo de ar durante processo de aplicação

(BTT Car Tools Co. Ltd.)

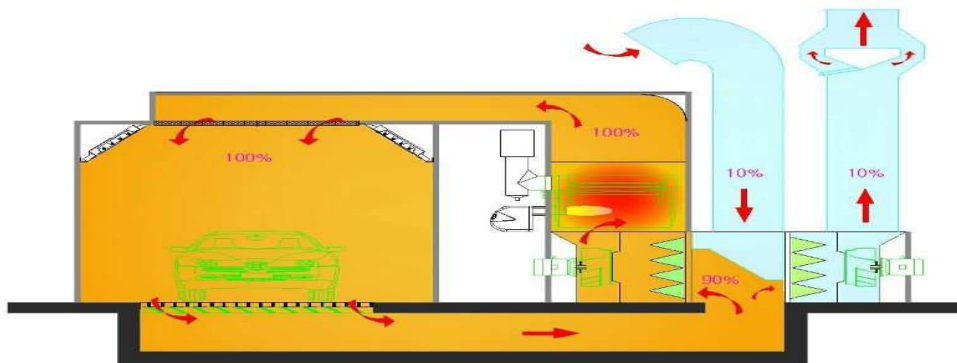


Ilustração 33 - Fluxo de ar durante processo de aplicação secagem

(BTT Car Tools Co. Ltd.)

As ilustrações 32 e 33 mostram as duas fases de funcionamento das cabines de pintura em processo de aplicação e em processo de secagem.

Na aplicação estamos numa situação de ventilação com a introdução de 100% de ar novo proveniente do exterior.

Na secagem a ilustração mostra a cabine a fazer 90% de recirculação com 10% de ar novo. Esta solução nem sempre está disponível nos equipamentos



encontrados, pois alguns permitem apenas ventilação em regime tudo ou nada, ou seja, ou fazem recirculação a 100% ou estão a incorporar 100% de ar novo. Esta situação de “tudo ou nada” é a que caracteriza a cabine em estudo.

### **3.3 Registo de consumos de energia:**

#### **3.3.1 Consumos de Gás propano**

Com base nos registos de abastecimentos de gás propano efectuados nos anos de 2010 e 2011 puderam-se obter os dados energéticos representativos do processo. Podemos verificar através do gráfico 1 que existiu uma diminuição da necessidade energética em 2011 face a 2010 em cerca de 2%. Esta situação pode ter resultado de um melhor aproveitamento da energia ou de uma diminuição da produção.

Embora tenha existido diminuição no consumo energético, a factura correspondente é superior em 2011 em cerca de 10%, tal como podemos ver no gráfico 2. Esta situação tem origem no crescimento do custo do gás propano.

Apresenta-se também nos gráficos 3, 4, 5 e 6 os registos dos abastecimentos dos anos em causa, de forma a podermos analisar como se comportam ao longo do ano. Verificamos que os abastecimentos são mais frequentes nos meses de inverno.

O consumo total de gás propano nos anos de 2010 e 2011 foi de 6183 kg/Ano/cabine e de 6055 kg/Ano/cabine respectivamente.

Com os dados anteriores obtemos uma média para o consumo anual de gás de 6119 Kg/ano/cabine.



### Levantamento energético Anual

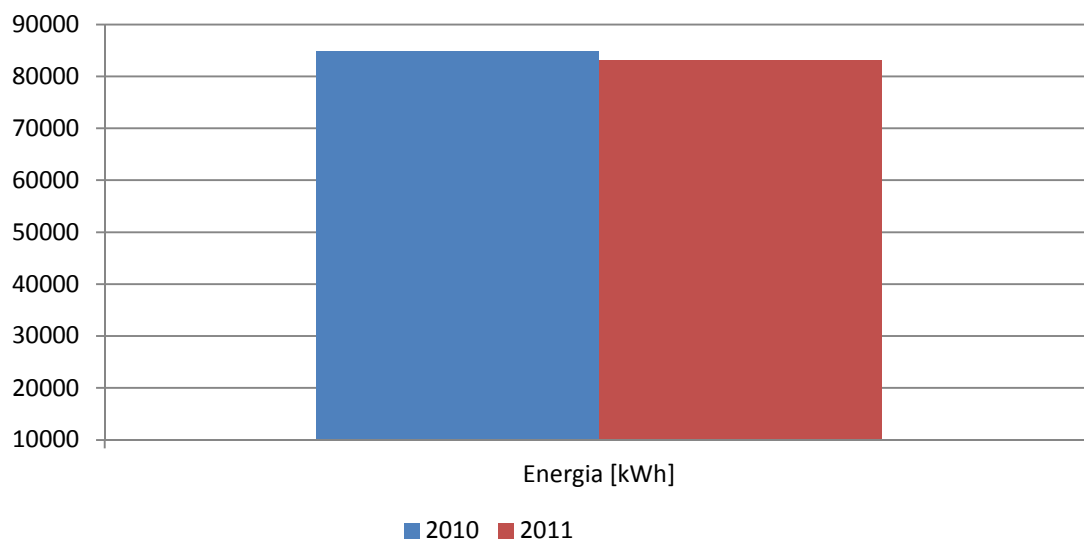


Gráfico 1 – Registo energético dos anos 2010 e 2011

### Custos energéticos anuais

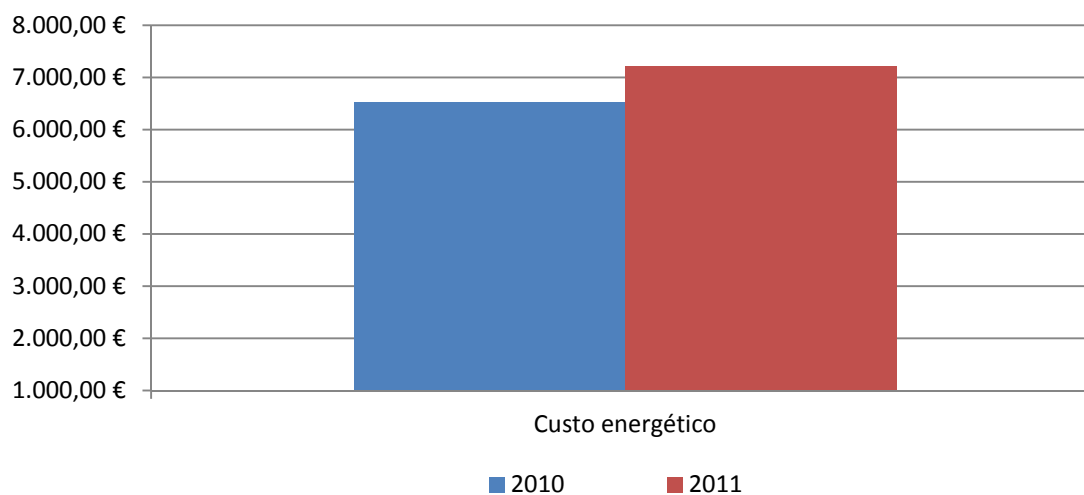


Gráfico 2 – Custos energéticos, anos 2010 e 2011

### Consumos de gás 2010

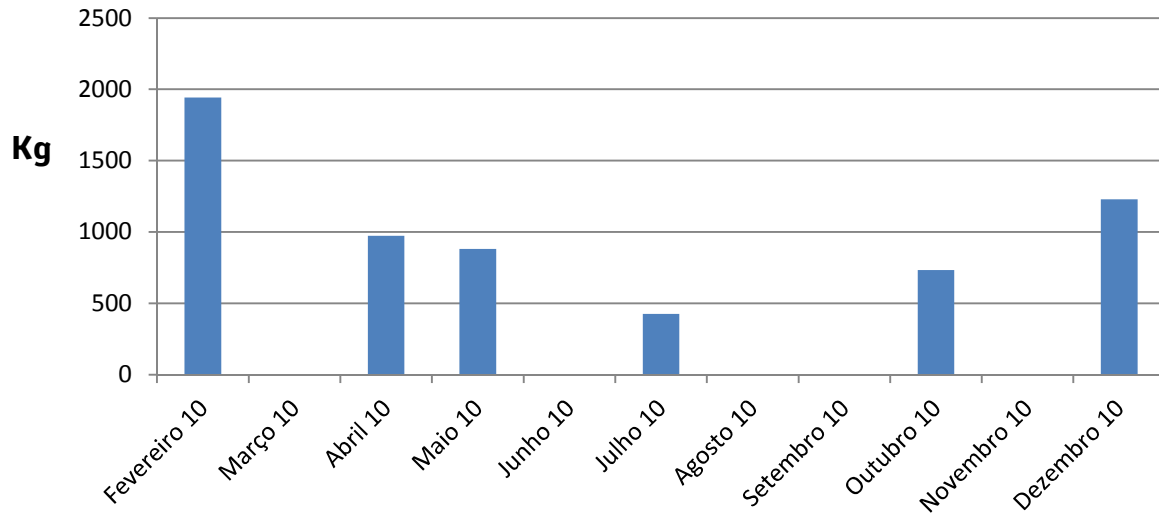


Gráfico 3 – Registo de consumos de gás propano Kg, 2010

### Custos de gás 2010

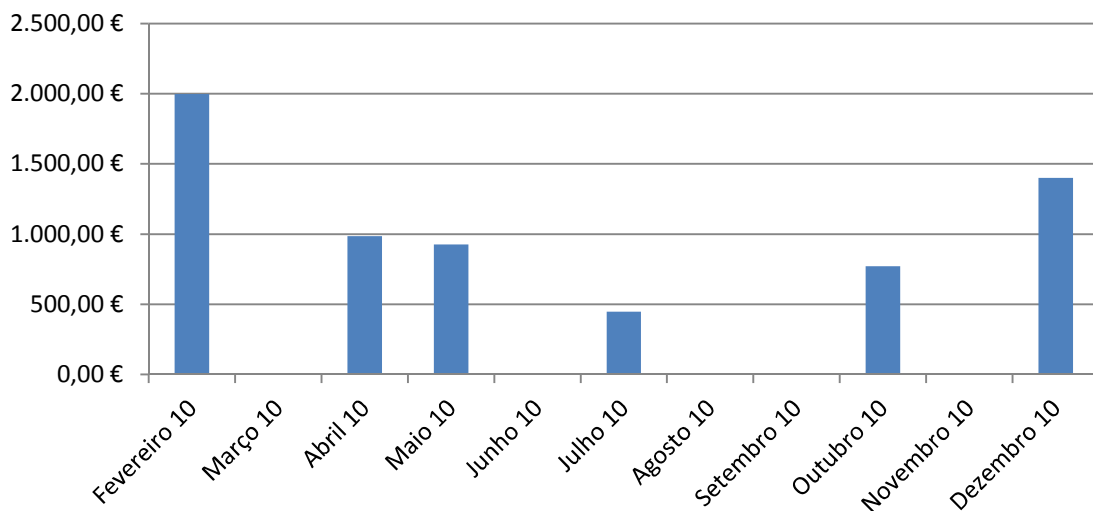


Gráfico 4 – Registo de custos associados ao consumo de gás propano €, 2010

### Consumos de gás 2011

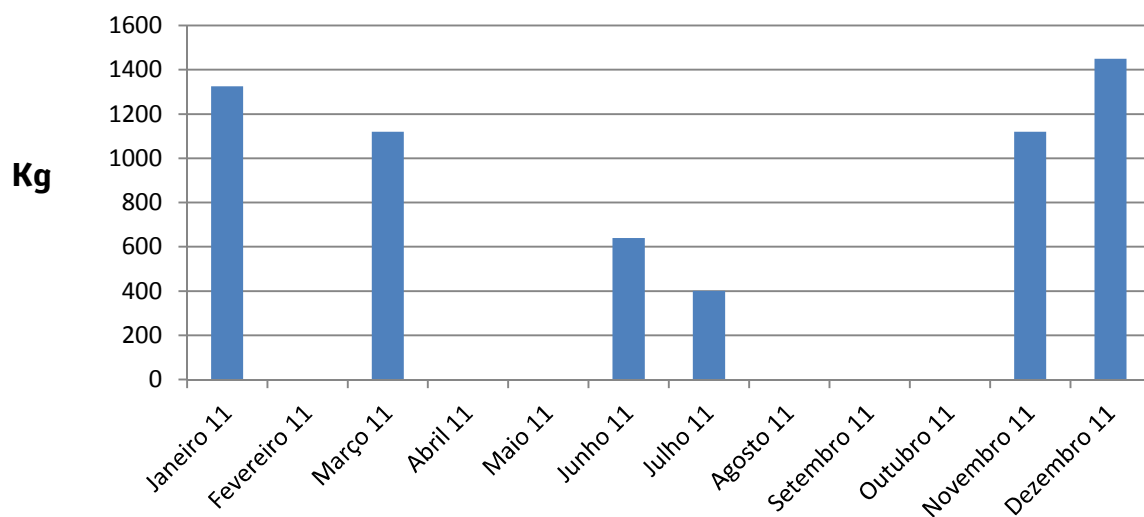


Gráfico 5 – Registo de consumos de gás propano Kg, 2011

### Custos de gás 2011

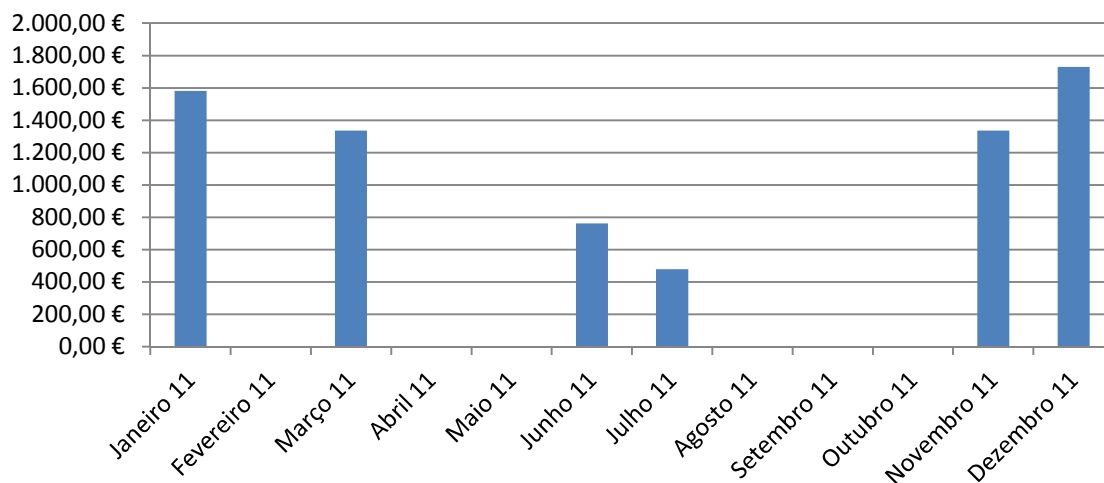


Gráfico 6 - Registo de custos associados ao consumo de gás propano €, 2011



Para obtermos uma base diária média no consumo de gás vamos pegar na média do consumo registado nos dois anos recolhidos, 2010 e 2011, que é de 6119 kg/ano/cabine e calcular a sua componente energética com base em 240 dias úteis de trabalho ao longo do ano.

Através dos dados do gráfico 1 obtemos a média energética dos 2 anos de registos de 83953 kWh/ano, o que representa 349,80 kWh/dia.

### **3.3.2 Consumos Eléctricos**

A cabine possui consumos eléctricos associados aos seguintes equipamentos:

- 66 lâmpadas incandescentes de 30W .

Destas lâmpadas, seis estão associadas à zona de preparação de tintas, como tal poderão não estar ligadas em simultâneo.

- 2 motores ventiladores com 7,5 kW de potência cada.

Um motor está associado à insuflação e outro à extracção. Normalmente, estes motores apenas trabalham em simultâneo no período de inverno, quando é necessário aquecer a cabine aos 22°C, e na fase de aplicação.

O ventilador associado à extracção é ligado sempre que nos encontramos na fase de aplicação de tinta, de forma a captar, através do filtro que o antecede, as impurezas que circulam no ar para não contaminarem o processo.

O motor de insuflação é ligado sempre que estamos na fase de aquecimento da cabine e tem como objectivo colocar ar no seu interior.

Utilizando o *Analizador de Qualidade de Energia da Serie Fluke 43B*, foi possível registar os consumos de energia eléctrica associados a um dia normal de trabalho. A leitura obtida encontra-se no gráfico 5. Estes dados reportam a um dia típico de inverno, dado ser a fase mais desfavorável em termos de consumos.

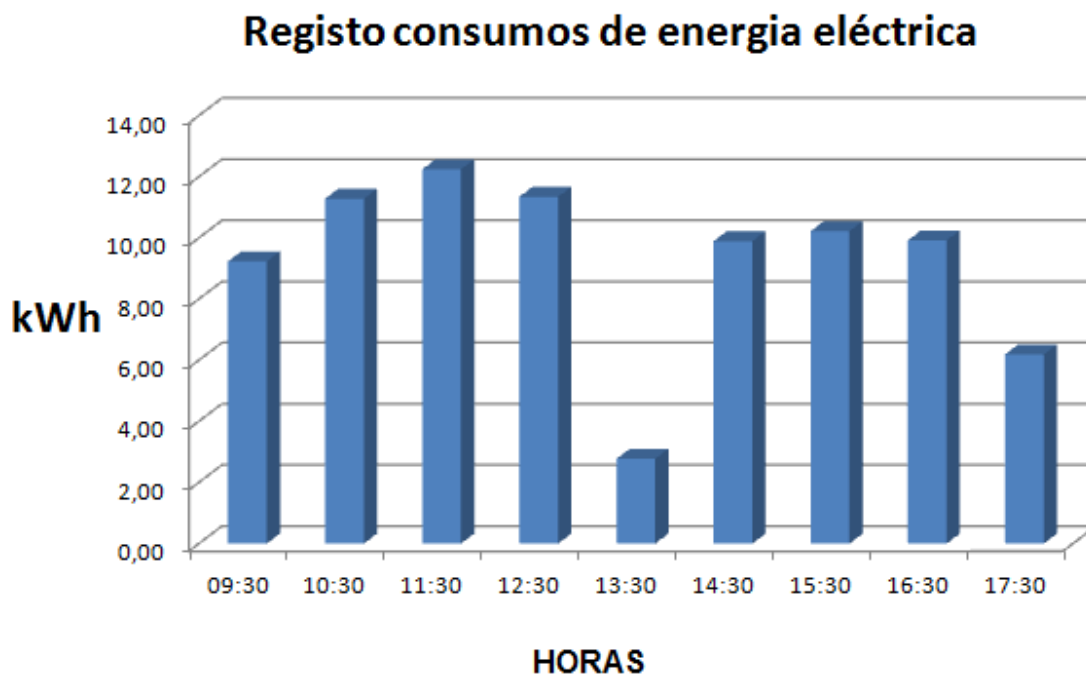


Gráfico 7 – Consumos eléctricos hora a hora em dia normal de trabalho

Através das observações efectuadas ao longo de vários dias, podemos afirmar que num dia normal de trabalho as luzes permanecem sempre acesas durante todo o dia. A ventilação vai funcionando de forma intercalar, em função dos processos de aplicação ou secagem, podendo também trabalhar os dois ventiladores em simultâneo. Podemos então definir que os consumos eléctricos se comportam conforme podemos verificar no gráfico 6.

### 3.3.3 Consumos Globais

Quando abordamos os consumos globais, facilmente se verifica que cerca de 81% dos consumos energéticos totais da cabine são referentes ao gás propano e por consequência ao seu processo de aquecimento. Por esta razão, estes deverão ser considerados prioritários na abordagem.

### Registo energético kWh/dia

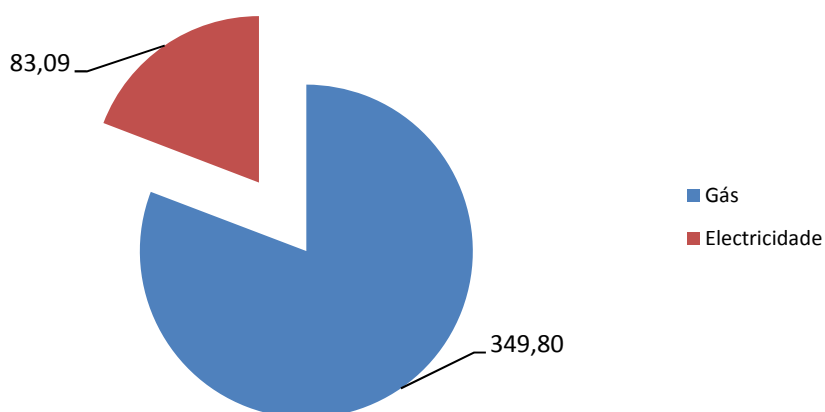


Gráfico 8 - Registo energético da cabine

### Registo energético por fonte kWh/dia

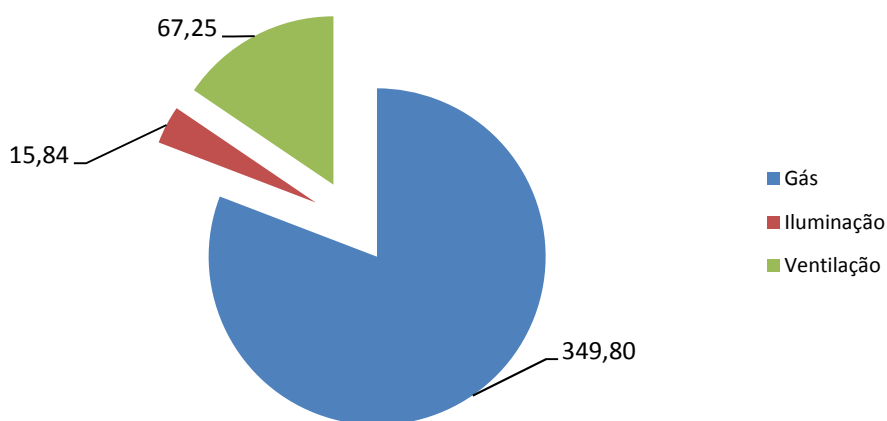


Gráfico 9 – Registo energético da cabine por fonte

### Custos diários da cabine [€]

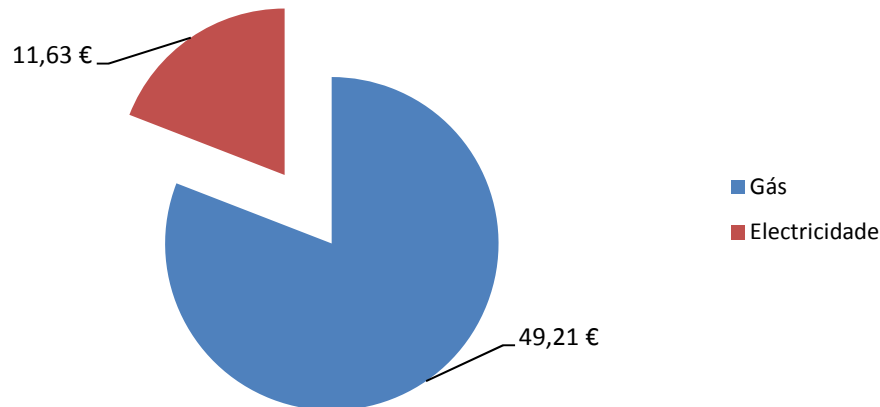


Gráfico 10 – Consumos diários da cabine, por fonte energética em €

Quando abordamos os custos diários associados a cada fonte verificamos que o peso do gás diminui para cerca de 72%, em resultado do custo unitário da energia. Contudo, através do gráfico 11, podemos verificar que o seu peso ainda assim é elevado e justifica uma análise mais aprofundada.

#### 3.3.4 Consumos específicos

Através da informação anterior, podemos deduzir os consumos específicos da cabine.

O peso dos consumos energéticos por fonte, conforme gráfico 11, apresentam-se da seguinte forma. Cerca de 81% da energia necessária está associada ao gás e apenas 19% à electricidade.

## Distribuição energética diária por fonte

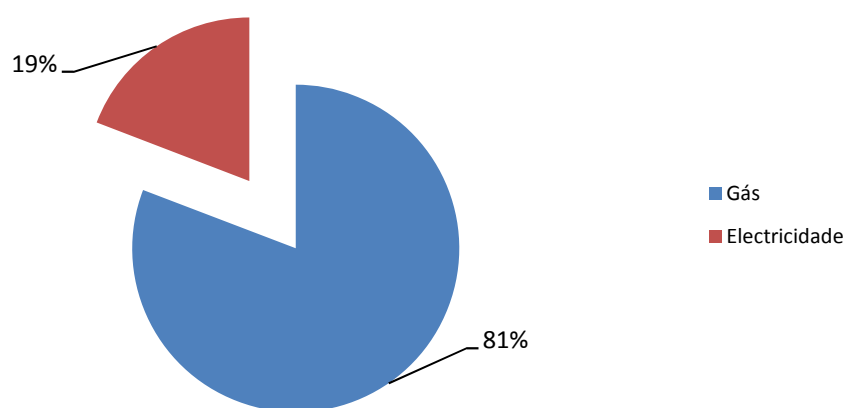


Gráfico 11 – Peso energético por fonte [Gás e Electricidade]

Quando reflectimos o custo energético a relação diminui dado o custo associado à energia eléctrica ser superior, conforme podemos analisar no gráfico 12.

## Distribuição do custo diário por fonte

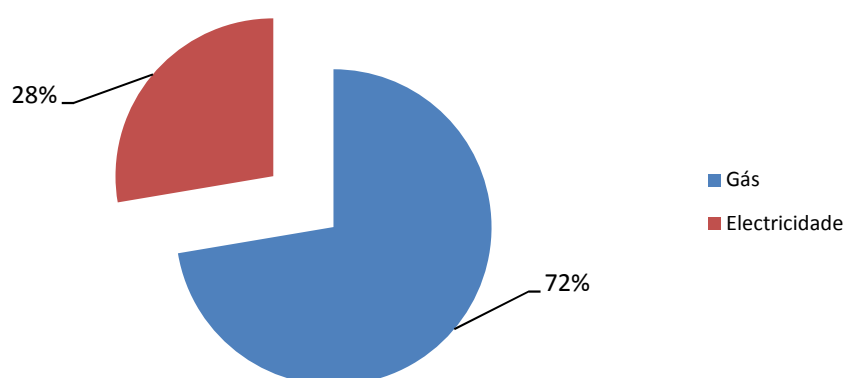


Gráfico 12 – Peso do custo diário por fonte [Gás e Electricidade]

O tempo de trabalho dos ventiladores corresponde a aproximadamente 4,5 horas diárias. Esta dedução obtem-se dividindo a energia da ventilação pela potência dos dois ventiladores. A iluminação encontra-se ligada praticamente durante todo o período da produção.

Na componente eléctrica o peso dos custos está associado à ventilação pelo que neste aspecto não há grandes medidas que se possam tomar.

### Distribuição de consumos eléctricos [kWh]

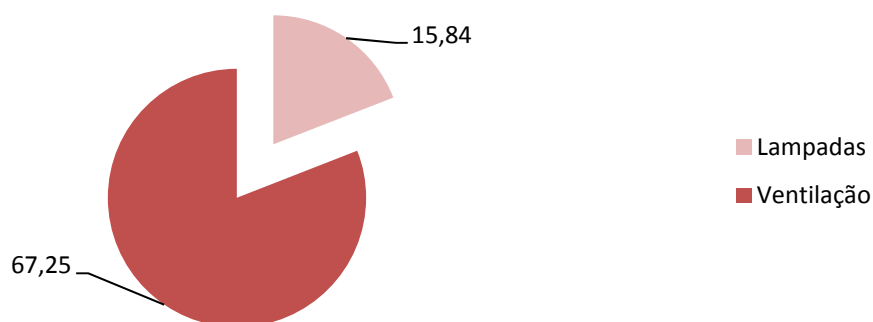


Gráfico 13 – Consumos eléctricos diários da cabine

### Distribuição diária de custos eléctricos [€]

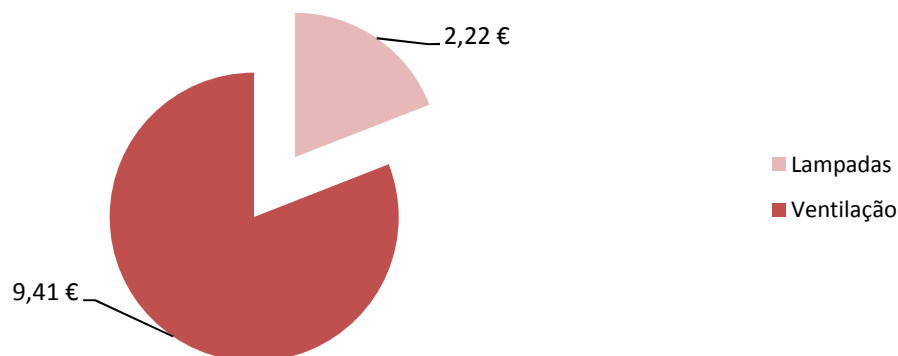


Gráfico 14 – Distribuição diária de custos eléctricos

### Consumo diários da cabine[kWh]

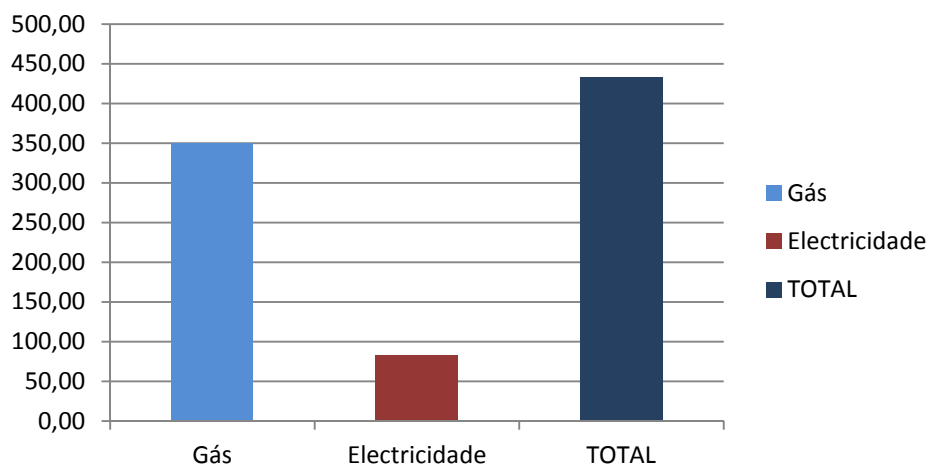


Gráfico 15 – Consumo médio diário da cabine

### Custos energéticos diários [€]

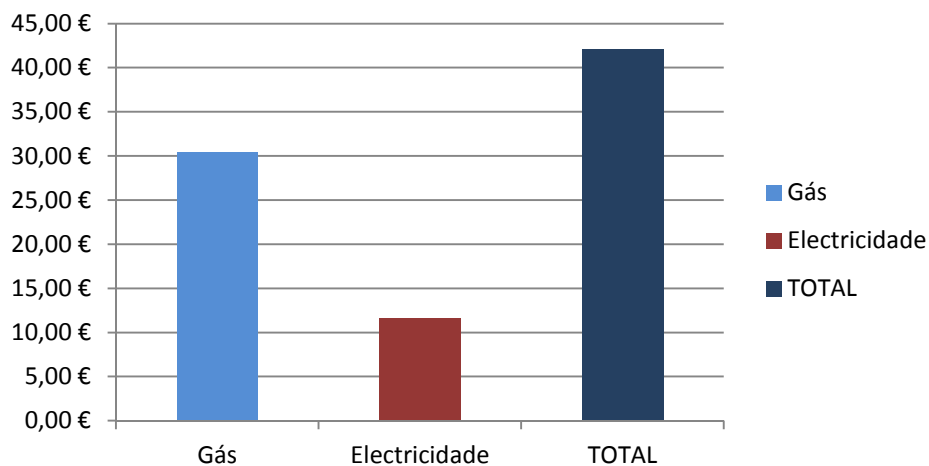


Gráfico 16 – Custos energéticos diários

Conforme já mencionado anteriormente, temos uma carga diária associada ao funcionamento da cabine de aproximadamente, 6,5h/dia associadas à aplicação e 1,5h/dia associada ao processo de secagem, ao que corresponde uma média de 5 processos dia.

Desta forma poderemos analisar através dos gráfico 17 e 18 o consumo específico por processo e os custos associados.

### Consumo energético por processo [kWh/dia/processo]

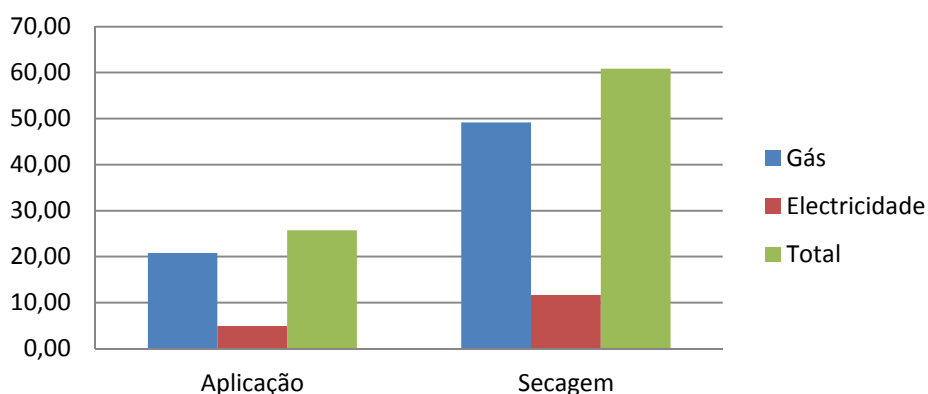


Gráfico 17 – Consumos energéticos por dia e por processo

Através das respectivas facturas da energia, retiramos o custo unitário associado a cada fonte, sendo:

- Custo energético associado ao gás propano é de 0,087 €/kWh.

Este valor é obtido com a divisão do custo do gás na factura (1,193 €/kg) pelo seu poder calorífico (13,72 kWh/kg)

- Custo energético associado à electricidade é de 0,14 €/kWh

### Custo energético por processo [€/dia/processo]

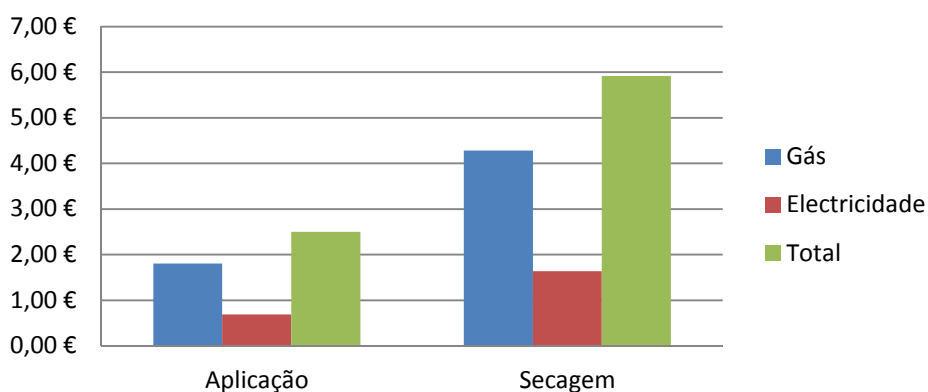


Gráfico 18 – Custo energético por dia e por processo



### **3.4 Análise ao comportamento térmico da cabine**

Neste ponto iremos conhecer melhor a cabine pintura, através da análise do comportamento das temperaturas no seu interior e identificando eventuais perdas térmicas.

Para a análise do comportamento de temperaturas no interior da cabine, recorreu-se ao relatório efectuado pelo Instituto de Soldadura e Qualidade no âmbito do programa de certificação de qualidade pela norma *NP EN ISSO 9001-2008*.

Finalmente, para análise de perdas recorreu-se à utilização de uma câmara termográfica “*Fluke Ti 25*”.

#### **3.4.1 Comportamento da temperatura no interior da cabine**

A certificação de qualidade no âmbito da norma *NP EN ISSO 9001-2008*, exige um controlo periódico das temperaturas no interior da cabine, pelo que a cada três anos são realizados ensaios. O objectivo destes ensaios é dar-nos a conhecer o comportamento da cabine para que sejam mantidos os níveis de qualidade adequados. Por exemplo, podemos verificar se determinada zona tem carência ou excesso de calor e se o termóstato trabalha dentro dos parâmetros definidos e se a sua inércia é adequada.

Os dados obtidos permitem também desenvolver históricos do comportamento e assim conhecer os pontos críticos aos quais deveremos estar mais atentos e proceder a correcções preventivas.

O relatório efectuado pelo Instituto de Soldadura e Qualidade (ISQ - EAUT 307/10, 2010), consistiu em efectuar duas leituras, uma para a temperatura de 20° C e outra para a temperatura de 60°C. Estas temperaturas foram estabelecidas por serem próximas do limite inferior e superior. O relatório tem ainda em consideração dois factores essenciais:



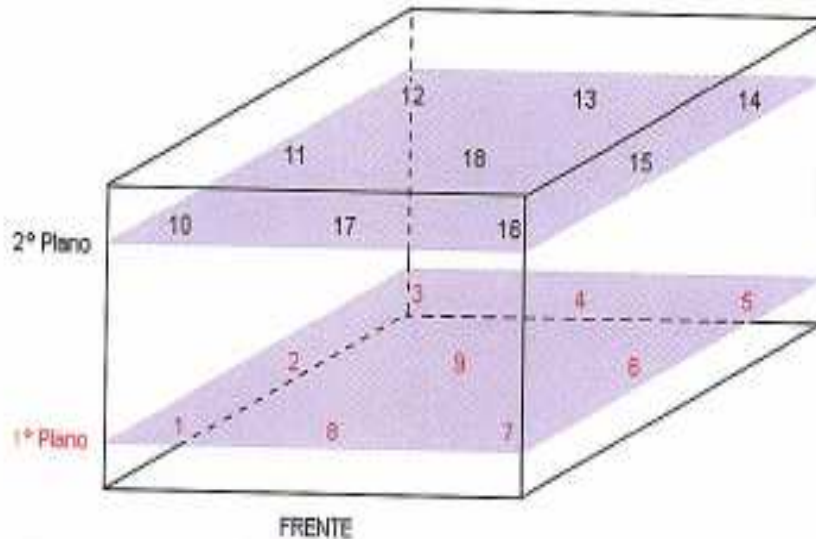
1. A temperatura mínima na fase de aplicação não deve situar-se abaixo dos 20°C
2. A temperatura superior não deve ultrapassar os 60°

Os dados referidos anteriormente são impostos pelo requisitante do relatório e vão de encontro às informações técnicas dos fabricantes de tintas para cada fase do processo, pois ultrapassados estes limites não é garantida a qualidade final.

O procedimento para os ensaios consiste:

- Colocação de 18 pontos de captação conforme ilustração 34;
- Cabine sem carga;
- Intervalos de captação de 30 segundos;
- Para a temperatura ambiente os valores das tabelas correspondem aos últimos 30 minutos do patamar de estabilização de temperaturas;
- Para a temperatura 60°C os valores das tabelas correspondem aos últimos 25 minutos do patamar de estabilização de temperaturas.

Posição dos Sensores no(a) Estufa de Pintura Automóvel



O 1º Plano foi colocado a cerca de 1000 mm da base da estufa  
 O 2º Plano foi colocado a cerca de 2000 mm da base da estufa

Ilustração 34 – Posição sensores do ensaio comportamental da cabine

(ISQ - EAUT 307/10, 2010)

O levantamento das temperaturas no interior da cabine vai fornecer-nos informação importante para que se conheça qual a estabilidade da mesma. Este conhecimento permite-nos adoptar as medidas adequadas ao bom funcionamento da cabine de forma a garantirmos uma boa qualidade final no processo de pintura.

**Mestrado em Energia e Climatização de Edifícios**

Temperatura registada	Leitura no equipamento (°C)	Padrão de temperatura (°C)					Temperatura regulada (°C)	Incerteza exp. (°C)
		Pos. 1	Pos. 2	Pos. 3	Pos. 4	Pos. 5		
Máxima	29	29,83	29,95	29,54	29,22	29,50	22	± 0,42
Mínima	29	29,27	29,27	29,10	28,91	29,00		
Máxima	64	57,87	58,83	57,40	57,29	56,62	60	± 0,50
Mínima	54	51,42	52,13	51,45	51,40	50,39		

Temperatura registada	Leitura no equipamento (°C)	Padrão de temperatura (°C)					Temperatura regulada (°C)	Incerteza exp. (°C)
		Pos. 6	Pos. 7	Pos. 8	Pos. 9	Pos. 10		
Máxima	29	30,07	30,08	29,91	30,37	29,65	22	± 0,42
Mínima	29	29,38	29,39	29,29	29,55	29,15		
Máxima	64	58,25	58,04	57,56	58,22	58,94	60	± 0,50
Mínima	54	51,86	51,47	51,47	51,90	52,62		

Temperatura registada	Leitura no equipamento (°C)	Padrão de temperatura (°C)					Temperatura regulada (°C)	Incerteza exp. (°C)
		Pos. 11	Pos. 12	Pos. 13	Pos. 14	Pos. 15		
Máxima	29	29,57	29,70	29,25	29,65	29,92	22	± 0,42
Mínima	29	29,13	29,13	28,94	29,09	29,42		
Máxima	64	60,50	60,78	60,91	60,39	60,97	60	± 0,50
Mínima	54	53,69	53,90	54,34	53,95	54,20		

Temperatura registada	Leitura no equipamento (°C)	Padrão de temperatura (°C)			Temperatura regulada (°C)	Incerteza exp. (°C)
		Pos. 16	Pos. 17	Pos. 18		
Máxima	29	29,87	29,67	30,37	22	± 0,42
Mínima	29	29,37	29,24	29,62		
Máxima	64	59,27	60,00	60,72	60	± 0,50
Mínima	54	52,81	53,19	53,83		

Tabela 1 – Dados do ensaio de temperaturas da cabine

*(ISQ - EAUT 307/10, 2010)*

A primeira situação que constatamos no relatório é o facto de a temperatura para o ensaio 1 se apresentar na ordem dos 29°C. Isto acontece porque o ensaio foi efectuado no verão, encontrando-se a temperatura exterior nesses valores.

Através do gráfico 9 podemos ver que neste primeiro ensaio a temperatura é constante durante todo o tempo. Verificou-se que os ensaios anteriores efectuados a cada 3 anos foram sempre requeridos nos meses de verão. Esta situação não se revela uma boa opção, dado que a temperatura exterior se encontra sempre acima dos 20°C. Assim sendo, não é possível analisar o

comportamento da cabine, dado que está sempre acima do valor de referência e nunca liga o aquecimento.

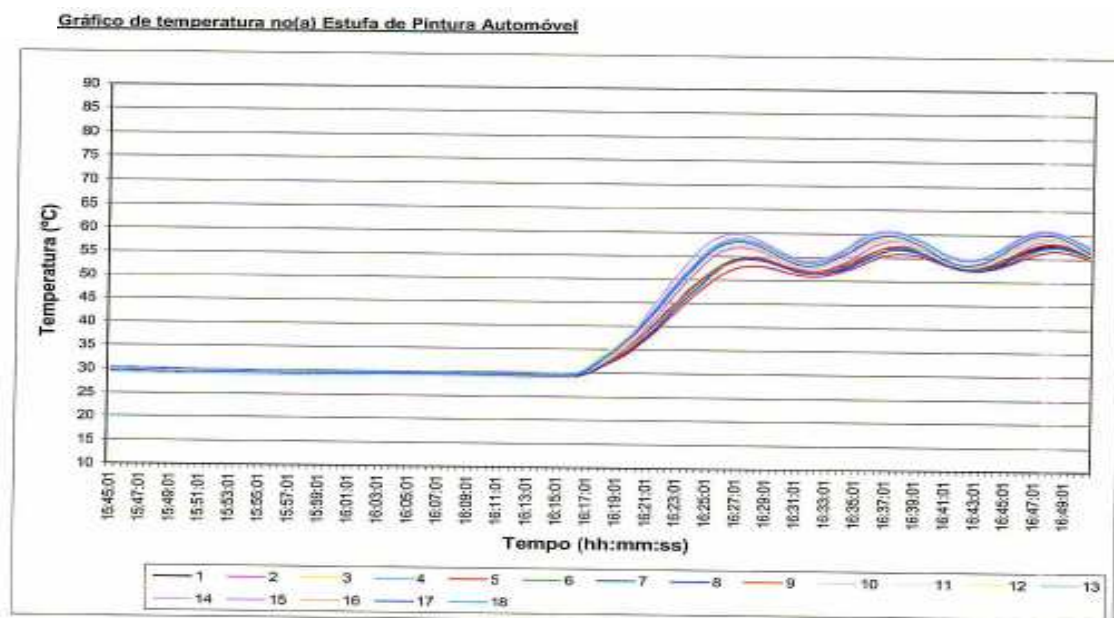


Gráfico 19 - Comportamento das temperaturas no interior da cabine

(ISQ - EAUT 307/10, 2010)

No processo de secagem já podemos retirar algumas informações mais concretas. Neste caso, os dados obtidos no ensaio efectuado permitem-nos verificar que embora o fluxo de ar insuflado na cabine seja descendente continua a verificar-se alguma estratificação vertical, sendo a temperatura junto ao pavimento inferior em cerca de 2,5°C. Além disso, verificamos também a existência de pontos onde é mais difícil atingir a temperatura de referência, pois as perdas são elevadas. A porta de acesso é exemplo disso, conforme podemos comprovar através dos pontos 1, 7, 8, 10, 16, e 17.

Podemos também verificar que a temperatura nunca chega aos 61°C, ou seja, mantém-se dentro da tolerância máxima permitida de 5°C acima da temperatura de secagem de 60°C. O que nos fornece a confirmação do bom funcionamento do termóstato.

A sensibilidade associada ao processo é relativamente boa, dado que nos pontos onde a inércia de temperaturas é maior, temos no máximo uma variação de temperatura de -7°C em relação à temperatura de referência.

De referir também que a temperatura máxima atingida é de 64 °C, sendo obtida num teste realizado no verão e na fase de secagem, onde a cabine se encontra regulada para 60°C, o que nos garante alguma segurança pois abaixo dos 65°C (temperatura máxima admitida para o processo).

### 3.4.2 Análise de perdas térmicas

Através da utilização da câmara termográfica “Fluke Ti 25” podemos analisar o comportamento da cabine no final do processo de secagem.

As ilustrações 35 e 36 mostram que na zona superior, junto aos filtros, temos acumulação de temperatura muito idêntica à da peça de secagem (ilustração 37). Verifica-se ainda a existência de pontes térmicas nos pilares de fixação dos painéis da cabine. Esta situação deve-se porventura à falta de isolamento térmico nestas zonas, facto que poderá ser melhorado.

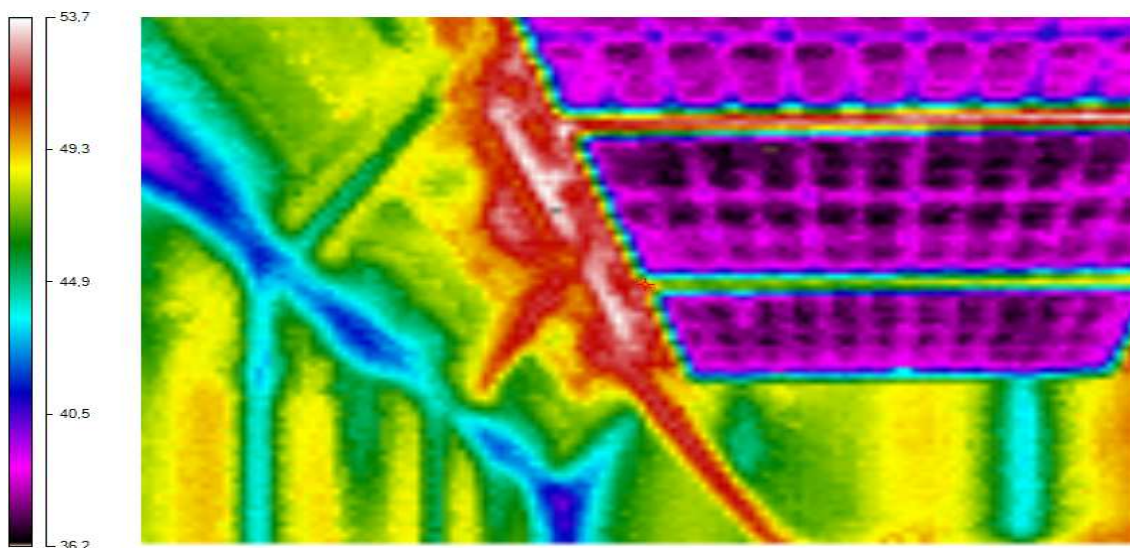


Ilustração 35 – Fotografia termográfica do interior da cabine

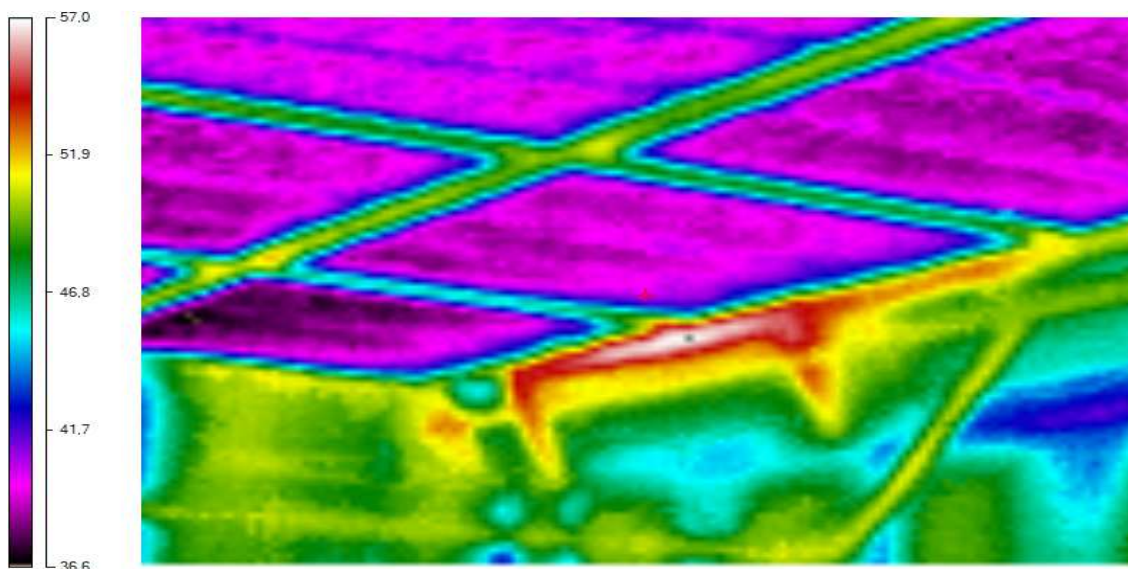


Ilustração 36 - Fotografia termográfica do interior da cabine

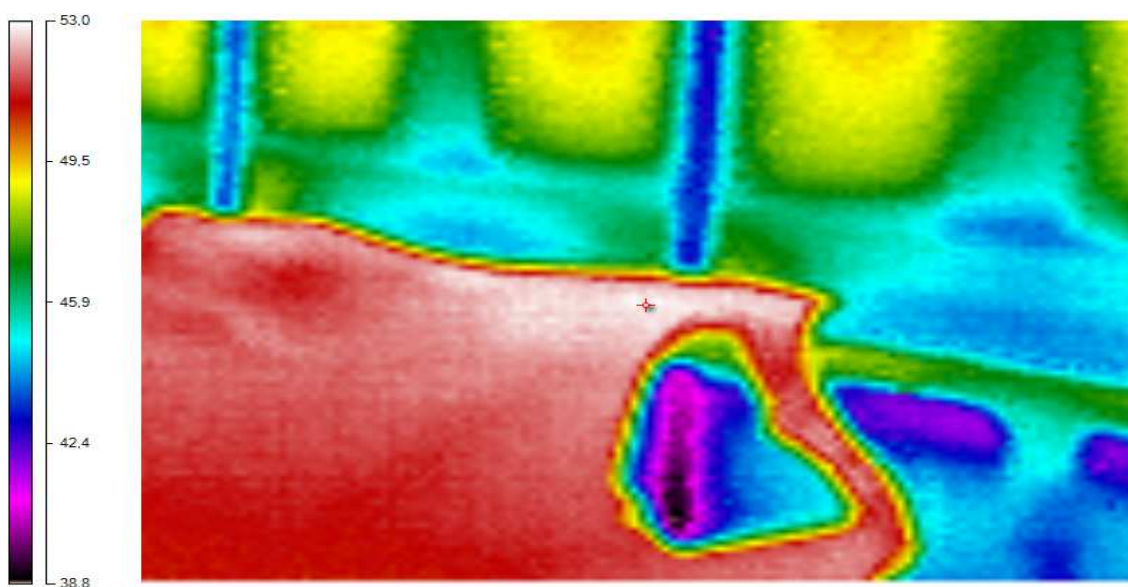


Ilustração 37 - Fotografia termográfica de peça em processo de secagem

Analisando perdas, estas são mais evidentes na zona da porta de acesso à cabine, dado que, com a utilização, as borrachas de vedação vão perdendo qualidade (ilustração 38) permitindo fugas. Também o facto de as portas serem de grandes dimensões origina empenos e consequentes más vedações (ilustração 39).

Tal como já foi afirmado anteriormente, deverá ser um ponto a verificar aquando das manutenções da cabine.

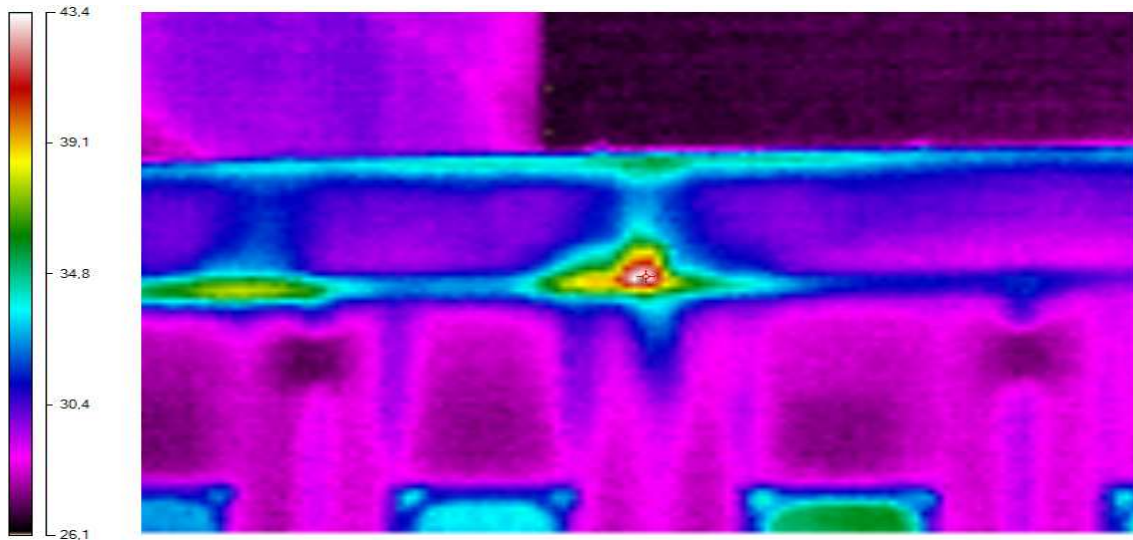


Ilustração 38 - Fotografia termográfica de perdas pela porta

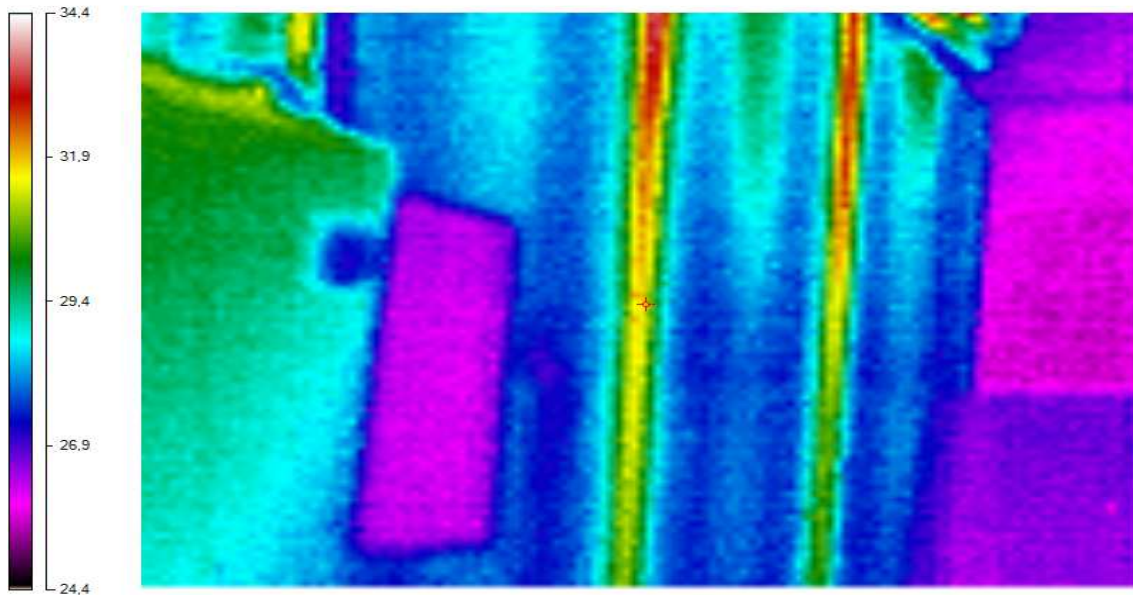


Ilustração 39 - Fotografia termográfica das perdas pelas junções das portas

A ilustração 39 mostra-nos as pontes térmicas existentes nas zonas de junção das placas.

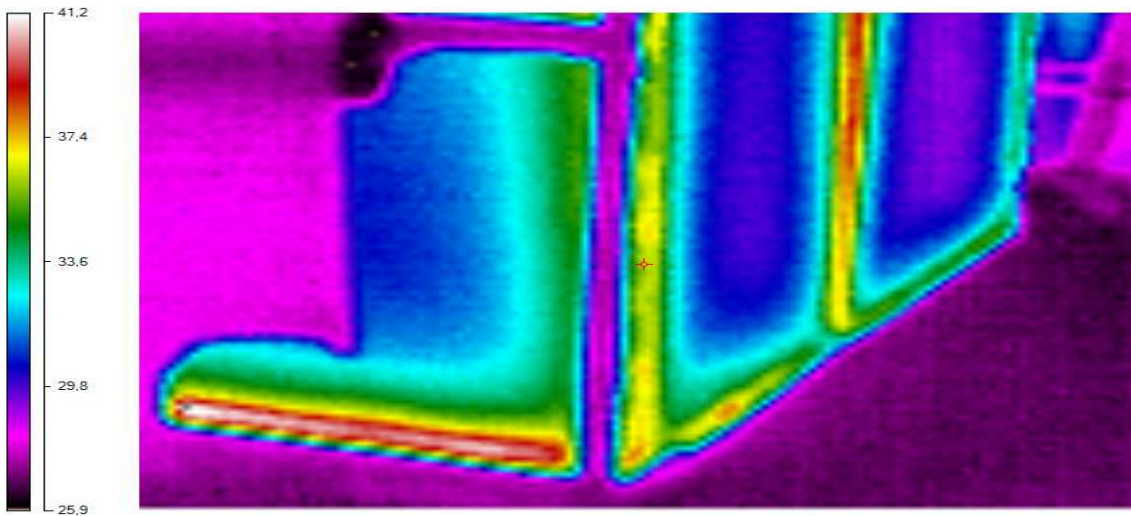


Ilustração 40 - Fotografia termográfica pontes térmicas

Na ilustração 41, através da imagem termográfica, podemos verificar as três condutas a diferentes temperaturas, sendo a de admissão a temperatura mais baixa.

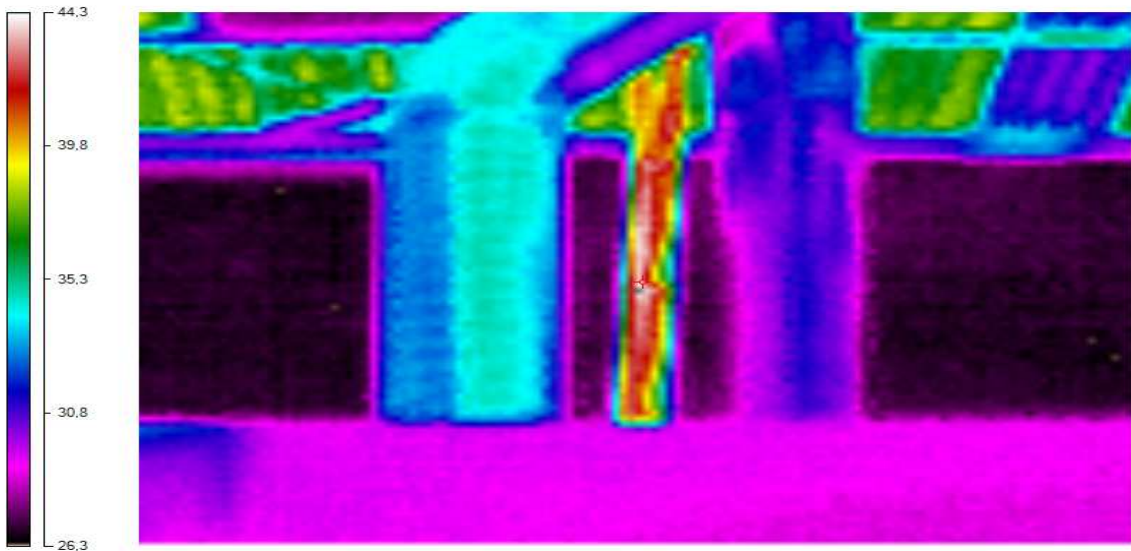


Ilustração 41 - Fotografia termográfica das chaminés

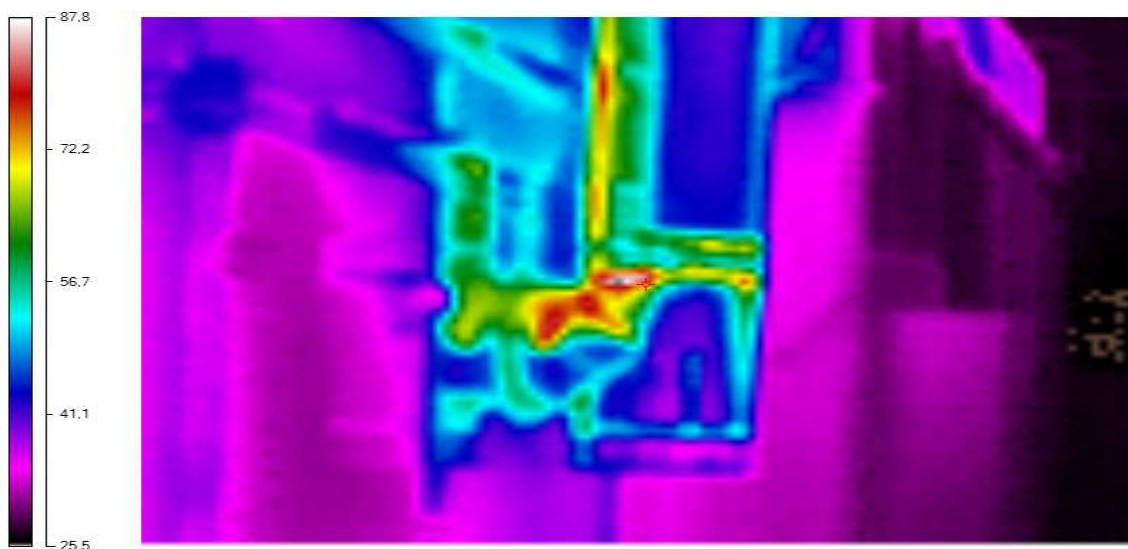


Ilustração 42 - Fotografia termográfica queimador

### 3.5 Conclusões

A informação recolhida na auditoria energética permitiu-nos conhecer a forma como a energia é utilizada no processo de pintura associado à reparação automóvel.

A carga de processos na cabine ao longo do ano é constante. Assim, com base nos registos efectuados ao consumo de gás propano, podemos facilmente afirmar que os consumos são mais significativos nos meses em que as temperaturas no exterior se encontram abaixo dos 20°C.

Nos meses onde se verificam temperaturas exteriores iguais ou superiores a 20°C, apenas se utiliza o aquecimento a gás propano para a fase de secagem.

A fonte de energia associada ao aquecimento apresenta-se com uma relação de cerca de 81% do total de energia associada ao consumo diário. Apenas 19% da energia total está associada à electricidade, conforme verificado no gráfico 11, e que é utilizada no sistema de iluminação e ventilação. Contudo, quando abordamos a questão dos custos, verificamos que a relação entre as fontes diminui passando o peso associado ao custo do aquecimento para cerca de 72%



e o peso da iluminação sobe para os 28%. Esta situação resulta do facto do custo unitário da energia associada ao gás ser substancialmente inferior à electricidade, alterando as relações entre elas.

Em relação à energia eléctrica a mesma representa apenas 18,8% da energia necessária à produção diária, estando cerca de 15,3% associada à ventilação e apenas 3,6% associada à iluminação.

Uma vez que a ventilação está directamente associada ao processo, é difícil reduzir os consumos associados à ventilação nas condições dos ventiladores actuais. Podemos apenas estar atentos pois a sua obstrução cria esforço adicional aos ventiladores.

Os consumos associados à iluminação, poderão ser ligeiramente reduzidos desligando-se as luzes na fase de secagem e utilizando-as apenas no processo de aplicação. Contudo, os ganhos deste procedimento serão diminutos.

A análise do comportamento térmico da cabine permitiu verificar que esta possui uma estabilidade de temperaturas no seu interior adequada, sobretudo no processo de secagem, dado que cumprimos sempre com as especificações técnicas das temperaturas necessárias aos processos. No entanto, deve-se ressaltar que será mais interessante do ponto de vista da análise que o promotor solicite este tipo de testes sempre no período de inverno. Isto porque o facto de se ter realizado o teste com temperatura exterior superior a 20 °C inviabilizou a análise na situação de aplicação.

Detectaram-se ainda zonas com existência de pontes térmicas que podem ser facilmente corrigidas.

Da análise efectuada constatou-se que se pode submeter o processo pintura a dois tipos de melhorias, consoante a sua natureza e aplicabilidade.

1. Melhorias de carácter imediato
2. Melhorias resultantes de estudo adicional

As medidas de carácter imediato, são medidas que não requerem grandes estudos ou investimentos já que são facilmente identificadas e corrigidas. Embora estas medidas melhorem a eficiência energética, têm ainda pouco



significado. Contudo, como são de fácil aplicação devem ser tomadas em consideração.

- Manutenção/substituição das borrachas de vedação da porta, pois verifica-se, quer na ilustração 26 quer na 38, que existem fugas na parte superior da porta originando assim perdas de calor. Poderá também existir ligeiro empeno das próprias portas dada a sua dimensão e o elevado grau de utilização. Assim, deverá ser devidamente inspeccionada toda a vedação das portas.
- A iluminação da cabine deverá permanecer acesa apenas na fase da aplicação.
- Os filtros deverão ter uma substituição tão regular quanto possível, dado que a sua obstrução origina um esforço nos ventiladores e um consequente aumento no consumo dos mesmos. Assim, aconselha-se que sejam verificadas semanalmente o seu estado e a resistência que oferecem ao fluxo de ar.
- Isolamento adicional nas zonas de pontes térmicas identificadas nas imagens termográficas das ilustrações 39 e 40.

Os restantes capítulos irão abordar o ponto 2, ou seja, serão apresentados estudos adicionais que analisem possíveis melhorias.



## **4 Modelo de simulação energética**

### **4.1 Introdução**

Neste capítulo irá construir-se um modelo matemático que simule as necessidades energéticas associadas ao processo de pintura na indústria de reparação automóvel.

Será calibrado o modelo através dos dados recolhidos associados ao consumo de energia e já analisados anteriormente. O modelo terá como objectivo permitir promover alternativas que produzam melhorias energéticas ao processo, nomeadamente outras formas de energia, isolamentos etc.

Como a maioria dos processos existentes na indústria são alimentados por gás propano, iremos utilizar como base para o nosso estudo esta fonte de energia. Isto porque, a cabine utilizada para estudo é também alimentada com esse combustível no seu processo de aquecimento.

Serão também procuradas opções economicamente viáveis que possam ser adaptadas à maioria dos sistemas a funcionar nas instalações existentes no mercado.

Além disso, vamos encontrar um sistema alternativo que permita nos períodos de Inverno manter a temperatura no interior da cabine perto dos 22°C, de forma a reduzirmos o funcionamento do equipamento principal e utiliza-lo apenas para os processos de secagem.

Assim sendo, vamos trabalhar para a solução de aquecimento da cabine a 22°C nos meses compreendidos entre Outubro e Maio.

### **4.2 Metodologia**

O modelo matemático para a simulação em causa, irá calcular as necessidades energéticas da cabine. Esta informação será descarregada na ferramenta



*Microsoft Excel*, onde serão inseridas as fórmulas de cálculo apresentadas ainda neste capítulo.

Para uma melhor percepção vejamos o exemplo para o dia 1 de Janeiro .

Mês	Dia	Hora	Text (°C)	HR
1	1	1	11,1	79
1	1	2	10,3	80
1	1	3	9,5	81
1	1	4	8,7	81
1	1	5	7,9	82
1	1	6	7,1	83
1	1	7	6,4	83
1	1	8	6,7	82
1	1	9	7,8	79
1	1	10	9,6	74
1	1	11	11,7	69
1	1	12	13,7	63
1	1	13	15,4	59
1	1	14	16,4	56
1	1	15	16,6	55
1	1	16	15,9	57
1	1	17	14,6	61
1	1	18	13,1	65
1	1	19	11,9	68
1	1	20	10,9	71
1	1	21	10,1	73
1	1	22	9,4	75
1	1	23	8,9	76
1	1	24	8,4	78

Tabela 2 – Dados do modelo de simulação para o dia 1 de Janeiro

Podemos analisar pela tabela 2 que temos os dados para o dia 1 de Janeiro, onde vemos a zona sombreada correspondente ao tempo aproximado de trabalho da cabine. Esta tabela fornece-nos a temperatura exterior numa base horária.

Adiante, ainda neste capítulo na tabela 3, são apresentadas as componentes de cálculo das respectivas cargas térmica da cabine numa relação diária.



Os dados obtidos através do *solterm* apresentam-se em registos de hora a hora durante todos os dias e todos os meses do ano. Para simular o período de trabalho, e de forma a que este seja o mais aproximado possível da realidade e válido para todos os anos, foi adoptado o seguinte procedimento. Para os meses de 31 dias tomou-se 21 dias úteis de laboração e para os meses com 30 dias adoptou-se 20 dias. Para Fevereiro considerou-se 19 dias. Assim, simula-se os dias efectivos de trabalho ao longo do ano.

A carga térmica total será a soma das cargas térmicas da envolvente, carga térmica associada à renovação de ar e a carga associada ao automóvel. No caso específico da cabine de pintura, as cargas térmicas referidas serão as perdas de calor que terão de ser repostas pelo sistema de aquecimento.

As perdas de calor através da envolvente foram determinadas utilizando a seguinte formulação:

$$Q_{env} = \sum A_i \cdot u_i \cdot \Delta T_i \text{ [W]} \quad (1)$$

$Q_{env}$  - [W]

$A_i$  - [ $m^2$ ]

$u_i$  - [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ]

$\Delta T_i$  - [ $^\circ C$ ]

A cabine tem as dimensões representadas na ilustração 43.

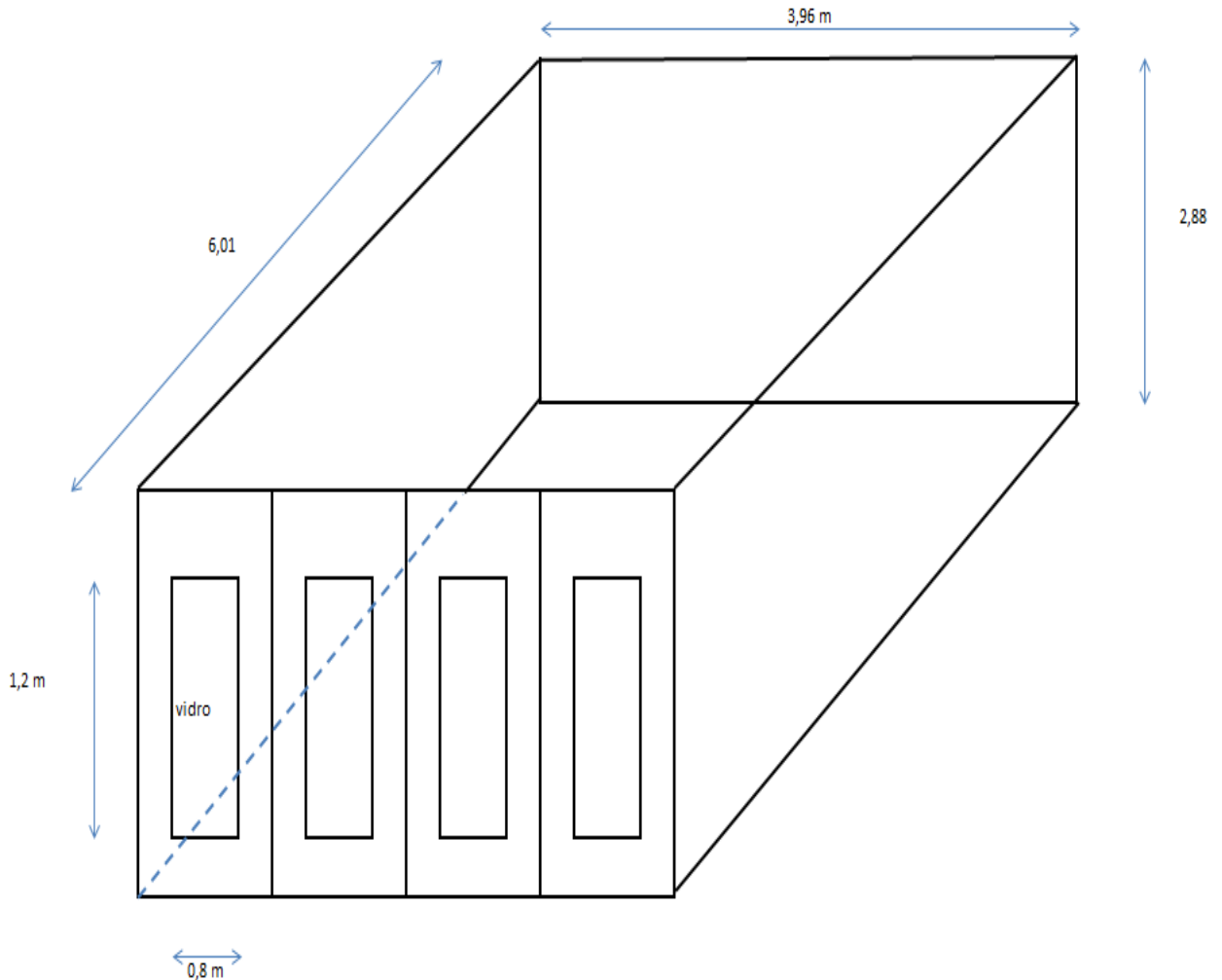


Ilustração 43 – Desenho da cabine com dimensões

O coeficiente global de transferência de calor global das paredes foi obtido conforme explicado na página 70. No entanto, para o cálculo da carga térmica da envolvente considerou-se que a cabine é constituída por paredes e tecto construídos com placas de chapa de 3 mm e com lã de rocha no interior. Considerou-se que as paredes da cabine possuem 80 mm de espessura e são constituídas conforme a ilustração 47.

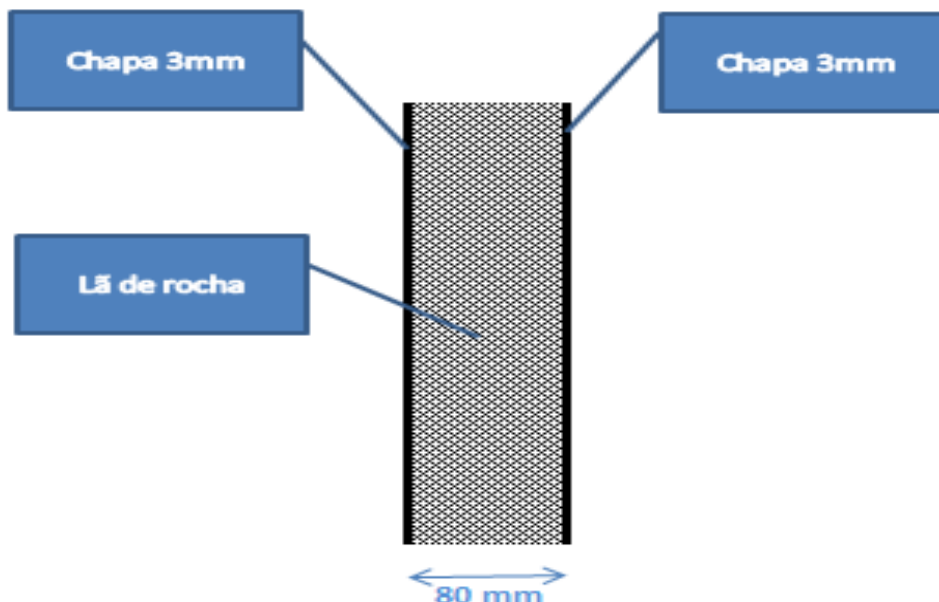


Ilustração 44 – Pormenor dos painéis de revestimento

Para os cálculos da carga térmica associada ao automóvel, considerou-se que a temperatura na chapa do mesmo se encontra inicialmente à temperatura ambiente. A massa média da chapa considerada é de 300 kg. Esta massa foi obtida através da adopção de valores experimentais com base na consideração da chapa exterior da viatura ou na soma das peças soltas a pintar. Este valor foi sendo ajustado através da simulação e do cruzamento com os consumos reais obtidos, de forma a se equilibrar o processo de simulação. A forma de cálculo utilizada foi a fórmula 4 apresentada adiante neste capítulo.

O caudal de ar associado à renovação ( $V$ ) é obtido através de medição efectuada. A carga térmica associada à renovação de ar tem por base a utilização da cabine com 5 processos associados à aplicação, fase em que se está a colocar ar exterior, (ver coluna 5 da tabela 3). Para o cálculo da carga térmica associada à renovação utilizou-se a fórmula 3 apresentada de seguida.

A massa associada ao automóvel é admitida em função dos processos a tratar diariamente, que em média corresponde a 5 processos, (ver coluna 9 tabela 3).



Para tal utilizaremos as expressões abaixo:

$$\text{Carga da envolvente:} \quad \mathbf{Q_e = A \cdot U \cdot \Delta T} \text{ [W]} \quad (2)$$

$$\text{Carga associada à renovação de ar:} \quad \mathbf{Q_{ra} = V \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta T} \text{ [W]} \quad (3)$$

$$\text{Carga associada ao automóvel:} \quad \mathbf{Q_v = m_{aut.} \cdot c_{p_{aut.}} \cdot \Delta T/t} \text{ [W]} \quad (4)$$

$$\text{Carga Total:} \quad \mathbf{Q = Q_e + Q_{ra} + Q_v} \text{ [W]} \quad (5)$$

em que:

**A** – área das superfícies da cabine com troca para o exterior  $[m^2]$

**U** – coeficiente de transmissão térmica  $[W/m^2 \cdot ^\circ C]$

**$\Delta T$**  – diferença de temperaturas ( $t_i - t_{ext.}$ )  $[^\circ C]$

**V** – caudal de ar associado à renovação  $[m^3/s]$

**$\rho$**  – massa volúmica do ar  $[Kg/m^3]$

**$c_p$**  – calor específico (ar e automóvel)  $[J/Kg \cdot ^\circ C]$

**$m_{aut.}$**  - massa associada ao automóvel/peças  $[Kg]$

**t** – tempo  $[s]$

*Calor específico ar ( $T_{med} = 300K$ ) = 1,0057 [kJ/kg. °C] (Anexo 2)*

*Calor específico do ferro = 0,452 [kJ/kg. °C] (Anexo 7)*

(Ozisik, 1990)

Para cálculo da carga da envolvente necessitamos de calcular o U coeficiente global de transferência de calor da estrutura da cabine. Para este cálculo utilizaremos as seguintes expressões:

Coeficiente de transmissão térmica:  $U = \frac{1}{R_t}$   $[W/m^2 \cdot ^\circ C]$  (6)

$$R_t = \sum \frac{e_i}{\lambda_i} + R_{si} + R_{se} \quad [m^2 \cdot ^\circ C/W] \quad (7)$$



Ilustração 45 – Resistência total da envolvente da cabine

Para o cálculo do coeficiente global de transferência de calor foram desprezados os vidros das portas.



em que:

**$R_t$**  – Resistência térmica total  $[m^2 \cdot ^\circ C/W]$

**$e_i$**  – Espessura do elemento i  $[m]$

**$\lambda_i$**  – Condutibilidade térmica do elemento i  $[m^2 \cdot ^\circ C/W]$

**$R_{si} + R_{se}$**  – Resistências térmicas superficiais interior e exterior  $[m^2 \cdot ^\circ C/W]$

$R_{si} = 0,13$   $[m^2 \cdot ^\circ C/W]$

$R_{se} = 0,04$   $[m^2 \cdot ^\circ C/W]$

NOTA: Apenas considerado para o efeito de cálculo o fluxo horizontal, para a cobertura considera-se  $R_{si}$  igual ao horizontal.

*(Curso de formação peritos qualificados no âmbito do Sistema de Certificação energética - Vertente RCCTE)*



Finalmente, o cálculo das necessidades energéticas foi determinado através do produto das cargas obtidas pelo tempo de funcionamento da cabine.

Estimou-se o período anual de funcionamento da seguinte forma:

- 9 horas de trabalho diárias (entre as 8:30 e as 17:30)
- 240 dias por Ano
- carga da cabine constante ao longo do ano
- média de 5 processos de pintura por dia

Aplicando no modelo o período de funcionamento da seguinte forma :

- durante 6 horas ao longo do dia temos carga associada à renovação, que corresponde ao tempo associado à aplicação
- 5 processos diários vamos associar à que entra na cabine

Através desta informação iremos definir no modelo de simulação os períodos onde teremos ventilação em funcionamento, quando entra massa na cabine para produção de forma a que se consiga simular o comportamento diário da cabine conforme exemplo da tabela 3.



#### 4.3 Dados de entrada

- Área da envolvente

$$A = 81,528 \quad [m^2]$$

- Coeficiente de transmissão de calor da envolvente

$$U = 0,5 \quad [W/m^2 \cdot ^\circ C]$$

- Temperaturas

$$\Delta T = t_i - T_{ext}$$

$$T_i = 22 \quad [^\circ C]$$

**T<sub>ext</sub>.** - Fornecida hora a hora através do *solterm*

**T<sub>aut</sub>.** - Foi considerado que a temperatura da chapa do automóvel se encontra à temperatura exterior.

Dado que o *solterm* fornece dados em TSV (Tempo Solar Verdadeiro) há necessidade de adequar o TSV à hora legal (Anexos TSV).

Para os cálculos fomos adequar a hora de início de actividade da cabine de pintura ao TSV que conforme podemos ver pelo Anexo TSV podemos adequar que a hora legal no Inverno se aproxima do TSV e no verão adoptamos a fórmula.

$$TSV = HL - 1 \text{ hora}$$

No entanto, o que pretendemos é sobretudo nos meses de Inverno, pois como vimos anteriormente é onde os consumos aumentam significativamente.

- Caudal de ar de renovação

$$V = 4,89 \quad [m^3/s]$$

Este caudal foi obtido através da medição efectuada pelo INEGI aquando da caracterização de emissões gasosas. Esta caracterização é efectuada a cada três anos a todas as vias de extracção de gases para o exterior. As verificações aos



afluentes gasosos emitidos para o exterior são de carácter obrigatório na actividade industrial, conforme legislação em vigor.

$\rho$  – (massa volúmica do ar) 1,1774 [kg/m<sup>3</sup>] (ANEXO 2)

$c_p$  – (calor específico do ar T<sub>méd</sub> = 300K) 1005,7 [J/kg . °C] (ANEXO 2)

#### 4.4 Resultados da simulação

A aplicação do modelo de simulação obteve a quantidade de energia necessária ao processo de pintura em cabine. Na tabela 3, pode-se ver o resumo dos resultados obtidos num dia normal de trabalho para as cargas envolventes, renovação e automóvel. Esta tabela, no modelo de simulação, é a sequência da tabela 2.

Carga envolvente				Carga renovação				Carga Automóvel				Q Total			
Area	U	Tint	Q	V	rho	cp	Q	m	cp	Tint	Taut		Q		
81,528	0,5	22	0	4,89	1,225	1005,7	0	0	452	22	11,1	0			
81,528	0,5	22	0	0	1,225	1005,7	0	0	452	22	10,3	0			
81,528	0,5	22	0	0	1,225	1005,7	0	0	452	22	9,5	0			
81,528	0,5	22	0	0	1,225	1005,7	0	0	452	22	8,7	0			
81,528	0,5	22	0	0	1,225	1005,7	0	0	452	22	7,9	0			
81,528	0,5	22	0	0	1,225	1005,7	0	0	452	22	7,1	0			
81,528	0,5	22	0	0	1,225	1005,7	0	0	452	22	6,4	0			
81,528	0,5	22	624	4,89	1,225	1005,7	92173	0	452	22	6,7	0	92797		
81,528	0,5	22	579	0	1,225	1005,7	0	300	452	22	7,8	535	1114		
81,528	0,5	22	505	4,89	1,225	1005,7	74702	0	452	22	9,6	0	75208		
81,528	0,5	22	420	0	1,225	1005,7	0	300	452	22	11,7	388	808		
81,528	0,5	22	338	4,89	1,225	1005,7	50002	0	452	22	13,7	0	50341		
81,528	0,5	22	269	0	1,225	1005,7	0	300	452	22	15,4	249	518		
81,528	0,5	22	228	4,89	1,225	1005,7	33737	0	452	22	16,4	0	33965		
81,528	0,5	22	220	0	1,225	1005,7	0	300	452	22	16,6	203	424		
81,528	0,5	22	249	4,89	1,225	1005,7	36749	0	452	22	15,9	0	36997		
81,528	0,5	22	302	0	1,225	1005,7	0	300	452	22	14,6	279	580		
81,528	0,5	22	363	4,89	1,225	1005,7	0	0	452	22	13,1	0	363		
81,528	0,5	22	0	0	1,225	1005,7	0	0	452	22	11,9	0			
81,528	0,5	22	0	0	1,225	1005,7	0	0	452	22	10,9	0			
81,528	0,5	22	0	0	1,225	1005,7	0	0	452	22	10,1	0			
81,528	0,5	22	0	0	1,225	1005,7	0	0	452	22	9,4	0			
81,528	0,5	22	0	0	1,225	1005,7	0	0	452	22	8,9	0			
81,528	0,5	22	0	4097	0	1,225	1005,7	287364	0	452	22	8,4	0	1654	293114

Tabela 3 – Dados do modelo para cálculo de cargas térmicas

No gráfico 20, é apresentado o consumo energético estimado pelo módulo durante o período de aplicação (temperatura a 22°C).

### Q necessária 22°C [kWh]

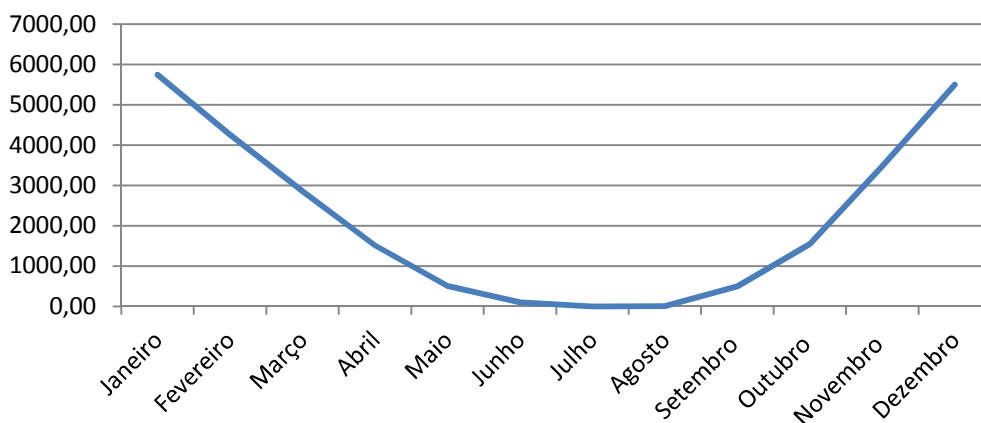


Gráfico 20 – Energia necessária ao processo de aplicação [22°C]

Vamos obter uma necessidade anual de energia, para o processo de aplicação, de 26028 kWh, em que 24909 kWh encontram-se compreendidos entre Outubro e Abril.

De forma a validarmos o modelo foi necessário fazer a simulação para as condições de aquecimento da cabine para o processo de secagem. Assim, adaptando o modelo às condições de temperatura a 60°C obtemos os dados que constam no gráfico 21.

### Q necessária 60°C [kWh]

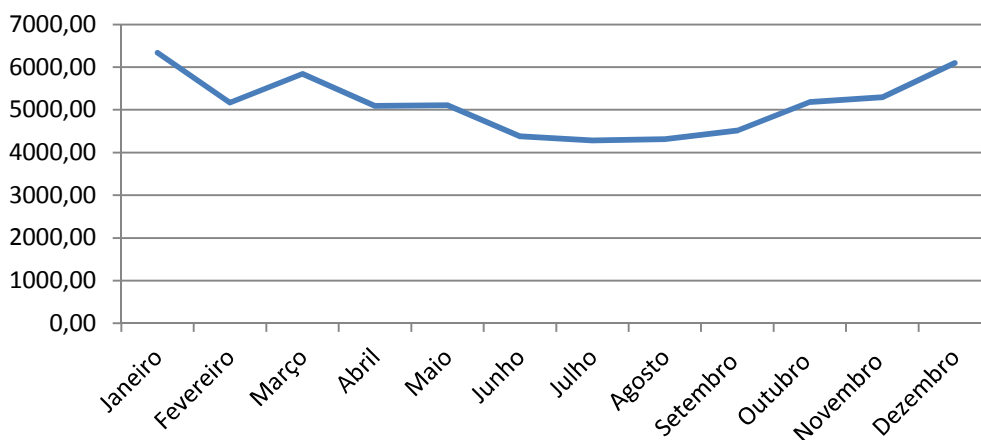


Gráfico 21 – Energia necessária ao processo de secagem [60°C]

**Mestrado em Energia e Climatização de Edifícios**

Para ficarmos com uma percepção da energia total simulada e compara-la com os registos obtidos, podemos analisar o gráfico 22 e verificar que os comportamentos são semelhantes.

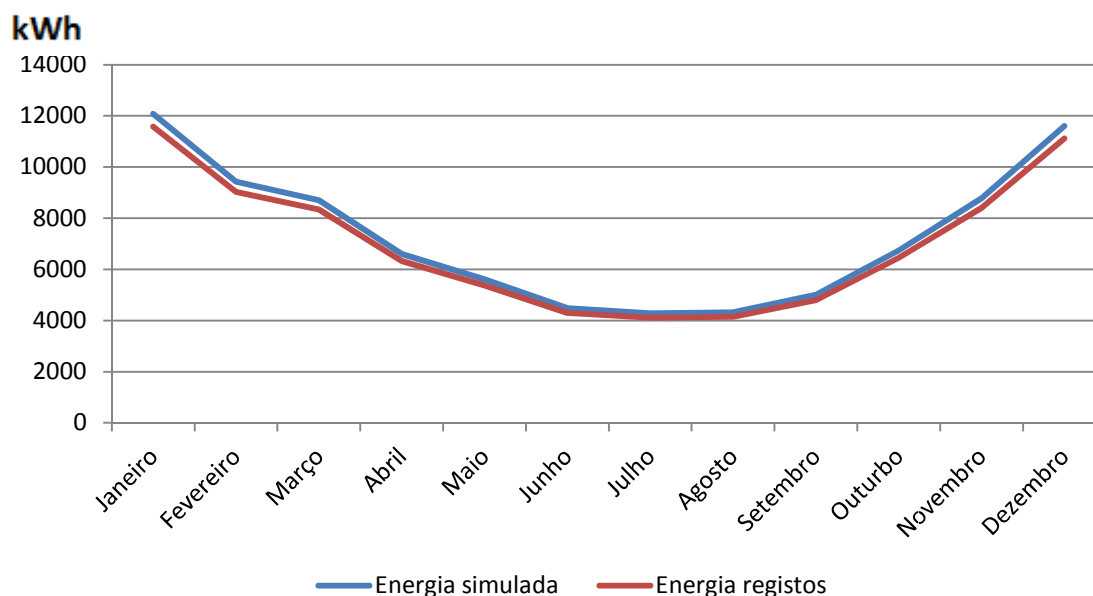


Gráfico 22 – Energia simulada Vs energia obtida nos registos

Para o processo de secagem obtemos uma necessidade anual de 61620 kWh.

Q necessária 60°C [Kwh]		Q necessária 22°C [kWh]		TOTAL [kWh]
Janeiro	6337	Janeiro	5747	12084
Fevereiro	5167	Fevereiro	4262	9429
Março	5845	Março	2858	8703
Abril	5092	Abril	1512	6604
Maio	5108	Maio	506	5614
Junho	4378	Junho	104	4481
Julho	4286	Julho	2	4289
Agosto	4314	Agosto	10	4324
Setembro	4517	Setembro	497	5013
Outubro	5185	Outubro	1549	6734
Novembro	5292	Novembro	3480	8772
Dezembro	6100	Dezembro	5501	11600
<b>ANUAL</b>	<b>61620</b>	<b>ANUAL</b>	<b>26.028</b>	<b>87648</b>

Tabela 4 – Resumo do resultado energético mensal e anual do modelo matemático

**Mestrado em Energia e Climatização de Edifícios**

Podemos verificar que a soma de ambas as componentes (secagem e aplicação), fornece-nos a necessidade anual de 87648 kWh/ano que, conforme podemos constatar no gráfico 23 quando comparado com os registos obtidos anteriormente obtemos um erro inferior a 5%. Assim, podemos considerar o modelo matemático como fiável.

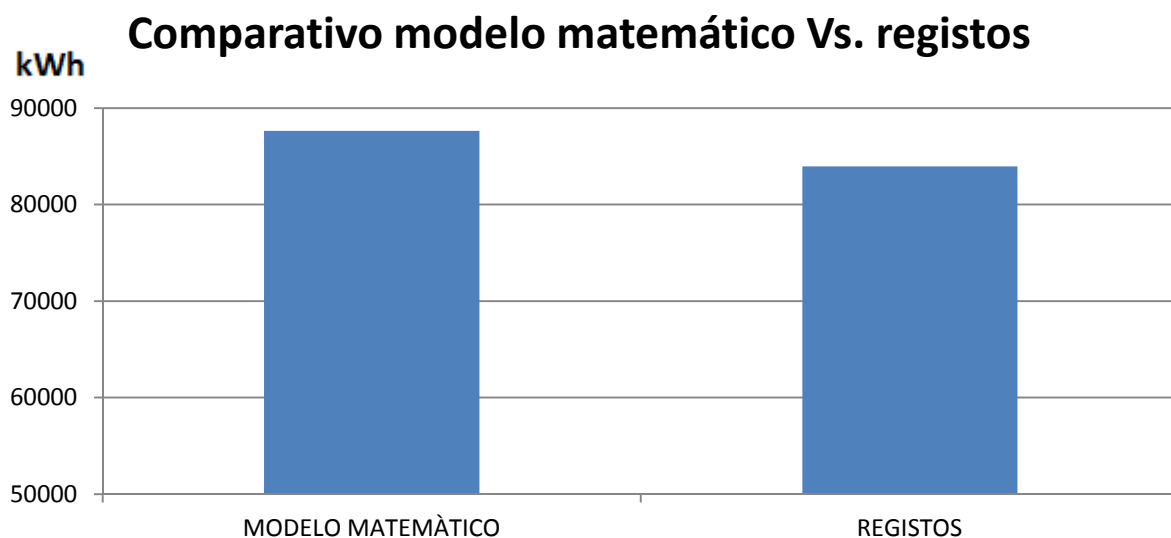


Gráfico 23 – Comparativo modelo matemático vs. Registos

Com base no modelo de simulação podemos assim afirmar, conforme gráfico 24, que cerca de 30% da nossa necessidade energética refere-se à fase de aplicação e cuja necessidade prende-se com o aquecimento da cabine para 22°C nos meses de inverno.

## Necessidades Energéticas kWh

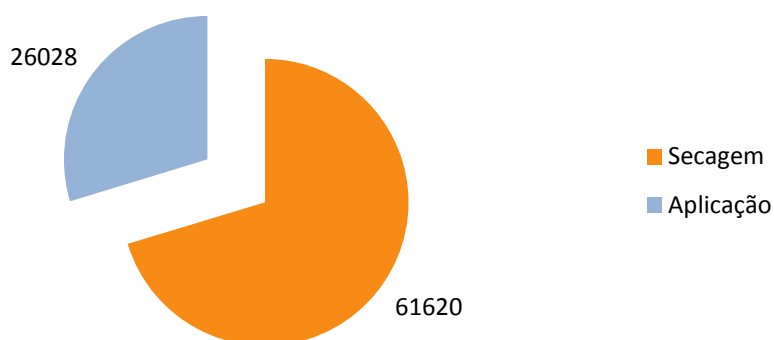


Gráfico 24 – Necessidades energéticas associadas ao aquecimento da cabine consoante processo

O período compreendido entre Outubro e Abril, tal como referido anteriormente representa através da simulação 24909 kWh de energia necessária na fase de aplicação. Se conseguirmos um sistema que forneça esta energia poderemos estar a considerar uma poupança de 1815 kg de gás o que corresponde a uma poupança de 2165,00 € imediata.

## 4.5 Conclusões

O modelo matemático revela um bom comportamento, obtendo-se um erro em comparação com os registos abaixo do 5%. Este modelo permite-nos adoptar diferentes condições de entrada de forma a traçarmos cenários alternativos no sentido de verificarmos quais as melhores opções em termos energéticos.



UNIVERSIDADE DO ALGARVE - INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA

**Mestrado em Energia e Climatização de Edifícios**



## **5 Fontes de Energia**

### **5.1 Introdução**

Neste capítulo, iremos analisar o gás propano como fonte de energia e compará-lo com outras fontes, nomeadamente gás natural, gasóleo e electricidade.

A utilização do gás propano, é geralmente a mais utilizada na indústria de reparação automóvel. Apresentar-se-á as vantagens e desvantagens de cada solução.

Na abordagem deste capítulo vamos utilizar o tempo de funcionamento do queimador correspondente aos consumos anuais apresentados anteriormente. Com a potência térmica da cabine, 235kW, fornecida pelos dados técnicos da mesma, com as características do combustível utilizado na queima para produção de calor e com o tempo de funcionamento do queimador, podemos simular os consumos energéticos das diferentes fontes e compará-los.

Para a simulação, utilizaremos uma folha de cálculo auxiliar em Excel onde adotaremos a seguinte metodologia.

Através das características do gás propano, que é o combustível utilizado actualmente na cabine de ensaio e do qual foram obtidos os registos de consumos, vamos simular a carga anual de funcionamento do queimador. Desta forma pretendemos que os resultados obtidos na simulação se aproximem dos obtidos nos registos para assim podermos validar a simulação.

Validada a simulação, iremos alterar as características dos combustíveis e verificar as diferenças de consumo para a mesma necessidade energética. Aos dados obtidos de cada simulação, atribuiremos o preço do combustível e obtemos o custo energético associado a cada fonte de produção de calor.

Vamos também analisar o processo de aquecimento da cabine utilizando painéis endotérmicos, onde electricidade surge como fonte de calor. Contudo, nesta análise a abordagem do tempo de trabalho teve de ser efectuada de forma diferente, pois o sistema possui uma potência instalada inferior, necessitando assim de mais tempo de trabalho para manter as temperaturas. A inércia às



oscilações de temperatura é superior, o que conduziu à necessidade de recorrer à informação de uma cabine real.

## **5.2 Sistemas alternativos**

Neste ponto analisaremos as possíveis alternativas ao gás propano como fonte de energia primária para o aquecimento da cabine. Simularemos ainda, para as cargas reais da cabine, a utilização de outros combustíveis, nomeadamente gás natural e gasóleo.

Serão também analisados os consumos associados à energia eléctrica na situação de uma cabine com painéis endotérmicos.

Sendo os sistema de aquecimento por painéis endotérmicos completamente diferente do sistema convencional de queima de combustível e dada a sua baixa utilização na industria em causa, necessitamos de uma breve abordagem introdutória para que possamos analisa-lo.

O sistema referido caracteriza-se pela colocação de painéis de infravermelhos nas cabines que vão ligando e desligando de forma automática para manter a temperatura desejada no interior da cabine. A cabine utiliza apenas como fonte de alimentação a energia eléctrica, como podemos ver nas ilustrações 43 e 44. A solução mista, esta sim mais utilizada, consiste em termos uma cabine normal usualmente alimentada a gás propano e no seu interior braços móveis com painéis de infravermelhos para secagem de zonas de pequena dimensão, conforme Ilustração 45.



Ilustração 46 – Cabine de infravermelhos em estado OFF

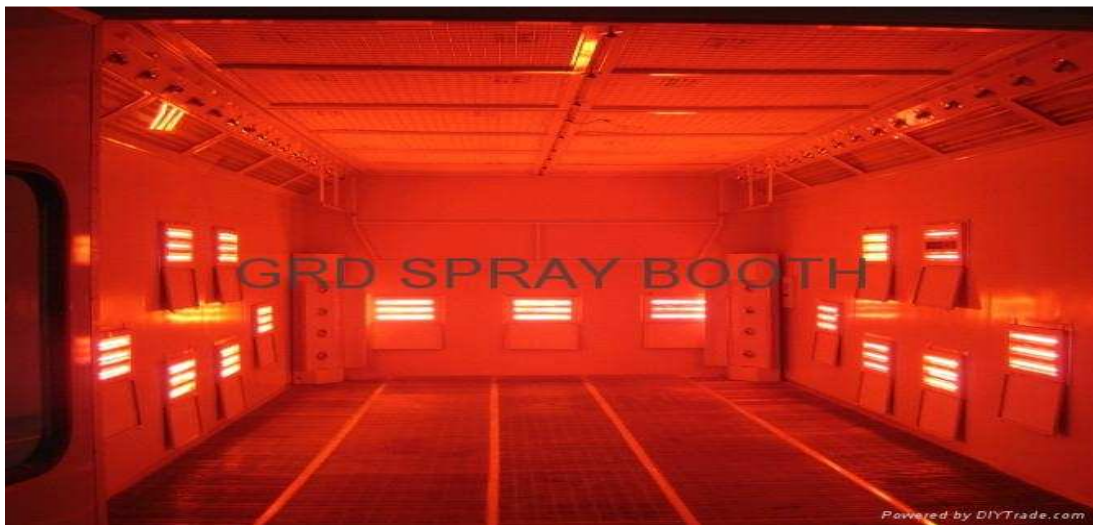


Ilustração 47 - Cabine de infravermelhos em estado ON

(Diy Trade Global B2B Trading Plataforf, 2012)



Ilustração 48 - Cabine mista, infravermelhos e gás

(Xindianlian Electric Appliance Equipment, 2012)

Iniciamos a nossa simulação com o levantamento das características dos combustíveis (tabela 2) que servem como fonte primária de energia. Sendo que no caso da solução de painéis endotérmicos vamos utilizar a potência instalada nos painéis.

Gás Natural	Gás Propano
PCS = 11,67 [kWh/m <sup>3</sup> ]	PCS = 13,84 [kWh/kg]
PCI = 10,54 [kWh/m <sup>3</sup> ]	PCI = 13,72 [kWh/kg]
Densidade relativa = 0,65	Densidade relativa = 1,55

Gasóleo	Painéis Endotérmicos
PCI = 11,86 [kWh/kg]	PCS = 30 [kW]
densidade = 0,89 [Kg/L]	
densidade = 890 [Kg/m <sup>3</sup> ]	

Tabela 5 – Propriedades dos combustíveis

Com a potência da cabine e com o tempo de utilização anual do queimador, obtemos a energia necessária. Assim, dividindo a energia pelo poder calorífico do combustível obtemos o seu consumo.

Potência térmica da cabine:	235	[Kw]
Preço do Gás Natural:	0,55	[€/m <sup>3</sup> ]
Preço do Gás Propano:	1,193	[€/Kg]
Preço do Gasóleo:	1,02	[€/lt]
Preço da energia elétrica:	0,14	[€/Kwh]
Nº de processo de Pintura/dia:	5	

Tabela 6 – Preços combustíveis

Com base na metodologia descrita no início do presente capítulo, vamos verificar que para o gás propano, com uma utilização diária do queimador de 1,5 h (conforme tabela 4), obtemos um consumo anual de 6164 kg/gás. Este consumo simulado quando cruzado com os consumos obtidos por registo obtém uma diferença inferior a 2%, o que nos transmite confiança na carga obtida pela simulação. Serão estes os dados da carga diária que iremos utilizar na comparação dos restantes combustíveis.

Funcionamento dos quimadores		
Nº médio de trabalho diário:	1,5	[h]
N.º de dias/semana:	5	[dias]
N.º de semanas/ano:	48	[semanas]
Funcionamento dos Painéis Endotérmicos		
Nº médio de trabalho diário:	4,8	[h]
N.º de dias/semana:	5	[dias]
N.º de semanas/ano:	48	[semanas]

Tabela 7 – Cargas de funcionamento

O valor das horas diárias de trabalho diário dos painéis endotérmicos foi encontrado mediante registos obtidos na cabine instalada na empresa Caetano Auto, situada em Rio de Mouro, Sintra, e foram facultados pela Empresa Lusilectra.

A tabela 5 apresenta de forma resumida os resultados obtidos referente aos consumos das soluções analisadas.

<b>Potência Térmica Anual:</b>	<b>84600</b>	<b>[kWh/Ano]</b>
<b>Consumo Anual de Gás Natural:</b>	<b>8027</b>	<b>[m3/Ano/cabine]</b>
<b>Consumo Anual de Gás Propano:</b>	<b>6164</b>	<b>[kg/Ano/cabine]</b>
<b>Consumo Anual de Gásóleo:</b>	<b>7131</b>	<b>[Kg/Ano/cabine]</b>
<b>Custo Anual do Gás Natural</b>		
	<b>4.414,61</b>	<b>[€/Ano/cabine]</b>
<b>Custo Anual do Gás Propano</b>		
	<b>7.354,04</b>	<b>[€/Ano/cabine]</b>
<b>Custo Anual do Gasóleo</b>		
	<b>8.172,93</b>	<b>[€/Ano/cabine]</b>
<b>Custo Anual Painéis Endotérmicos</b>		
	<b>4.838,40</b>	<b>[€/Ano/cabine]</b>

Tabela 8 – Resumo de consumos e custos por fonte

### Energia simulada Vs. Energia registada

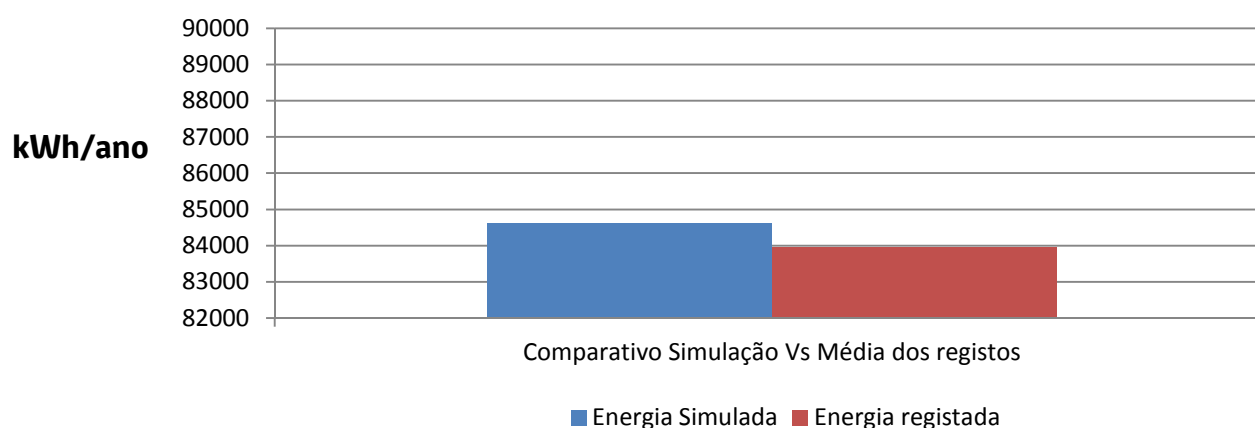


Gráfico 25 – Energia simulada Vs Média energia registada



## **5.4 Conclusões**

Esta análise permitiu-nos confirmar que a solução da utilização de gás propano, geralmente utilizada, não é das mais vantajosas. Contudo, acaba por ser a mais utilizada na generalidade da indústria, pois a utilização de gás natural que se revela mais vantajosa acaba muitas vezes por não ser considerada em função dos problemas relacionados com a disponibilização da rede de abastecimento.

Não podemos esquecer que os dados reportam ao valor actual dos combustíveis e electricidade, pelo que o cenário poderá alterar-se em função das flutuações de preços.

Os painéis endotérmicos revelam-se também uma boa solução, quer do ponto de vista de consumos quer nas emissões de CO<sub>2</sub>. Muitas vezes, estes sistemas não são utilizados pelo facto de exigirem um investimento inicial mais elevado e provocarem um nível de desconforto para o utilizador, pois encontra-se a trabalhar entre a fonte de calor e a viatura.

A manutenção do interior da cabine de painéis endotérmicos torna-se mais demorada. Isto porque necessitam de tampas para os emissores para que estes não se sujem na fase de aplicação. Contudo, isso acaba por não ser linear dado que se estivermos com necessidade de aquecer a 22°C para aplicação, as mesmas não podem estar fechadas, o que torna o processo pouco prático. Esta solução de aquecimento obriga o operador a estar constantemente a abrir e fechar tampas, o que causa alguma ineficiência. Este sistema não será alvo de estudo dado que é uma solução existente no mercado há bastante tempo e sem sucesso na sua aplicação.

A solução mista poderá revelar-se a melhor opção, pois nas situações de pequenos serviços pode-se recorrer às pontes endotérmicas para secagem localizada, evitando assim o aquecimento total da cabine e o consequente desperdício de energia. De momento, já se vêem algumas instalações industriais a utilizar este sistema.



Esta simulação permitiu-nos também analisar as condições estabelecidas na carga de trabalho que impusemos à cabine, pois para a simulação seguinte necessitamos de ter esta confirmação. Assim, verificamos que para as cargas impostas consumimos 6164 kg de gás por ano. Comparando com os registos obtidos na auditoria energética para 2010 e 2011 obtemos, respectivamente, os consumos de 6183 kg e 6058 kg de gás consumidos anualmente, o que nos assegura estarmos a utilizar cargas de trabalho adequadas na simulação.



## **6 Soluções estudadas**

### **6.1 Introdução**

O recurso às Energias Renováveis constitui uma solução para muitos problemas sociais associados ao consumo de combustíveis fósseis. O seu uso permite uma melhoria do nível de vida, em especial nos países sem reservas petrolíferas como Portugal, diminuindo a sua dependência económica e reduzindo os impactos negativos resultantes da queima dos combustíveis na sua utilização e transformação de energia

Neste capítulo iremos analisar quatro possíveis alternativas que contribuam para uma redução na factura energética anual dos processos em estudo e que minimizem a dependência associada ao consumo de combustíveis fósseis.

Serão indicadas de uma forma genérica a solução técnica a implementar e apresentadas vantagens e desvantagens tanto do ponto de vista técnico como económico.

As opções estudadas são as seguintes:

1. Sistema de captação solar
2. Sistema de recuperação de calor
3. Sistema misto adotando em simultâneo as duas anteriores
4. Recuperação energética produzida pelo trabalho do compressor de ar.

Estas opções foram escolhidas pelo facto de serem as que mais facilmente se podem adaptar à maioria das cabines existentes na indústria de reparação automóvel.

## 6.2 Sistema com coletores solares (opção 1)

### 6.2.1 Energia Solar

A maior fonte de energia disponível na Terra provém do sol. A energia solar é indispensável para a existência de vida na Terra, sendo o ponto de partida para a realização de processos químicos e biológicos. Por outro lado, a energia proveniente do Sol é das mais “amiga do ambiente”, podendo ser utilizada de diversas maneiras.

No centro do Sol ocorre um processo de fusão nuclear, no qual dois núcleos de hidrogénio se fundem com um de hélio, radiando para o espaço uma grande quantidade de energia. A energia proveniente desta fusão é radiada para o espaço em forma de ondas electromagnéticas, (Greenpro, Janeiro, 2004). Tendo em conta que o Sol se encontra a 143 milhões de quilómetros da Terra apenas uma pequena fracção da energia irradiada está disponível. No entanto a energia fornecida pelo Sol durante um quarto de hora é superior à energia utilizada, a nível mundial, durante um ano.

*(Greenpro, Janeiro, 2004)*

Os astrofísicos consideram que o sol tem aproximadamente 5 biliões de anos. Com uma expectativa de existência de 10 biliões de anos o sol pode ser considerado como fonte de energia para os próximos 5 biliões de anos. Assim, de uma perspectiva humana o sol apresenta uma disponibilidade ilimitada.

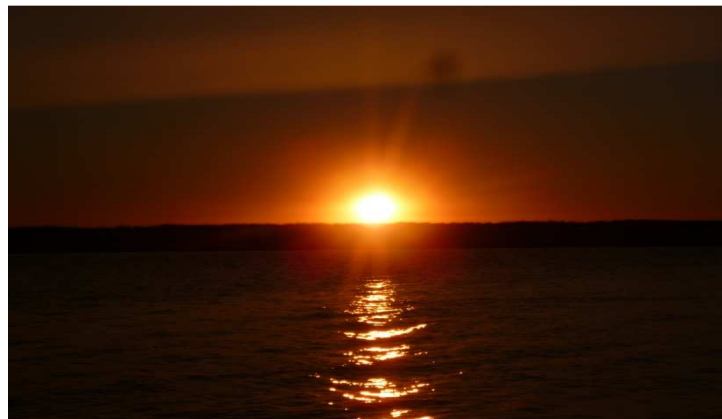


Ilustração 49 – O Sol – base para vida na terra



A energia irradiada pelo sol, para a atmosfera terrestre é praticamente constante. Esta energia irradiada ou intensidade de radiação é descrita como a constante solar relativa a uma área de  $1 \text{ m}^2$ . Esta constante está sujeita a pequenas alterações, provocadas pela variação da actividade solar (sun spots) e com a excentricidade da órbita da Terra. Estas variações, que se detectam para a gama dos raios UV são menores que 5%, e não são significativas para as aplicações de tecnologia solar. O valor médio da constante solar é  $E_0 = 1.367 \text{ W/m}^2$ .

**Caso de Estudo:** Energia irradiada, irradiação, quantidade de calor

A irradiação solar ( $E$ ) de 1.000 Watts por metro quadrado, significa a capacidade de irradiar uma potência  $\phi$  (1.000 W) numa superfície de  $1 \text{ m}^2$ , sendo a unidade de medida de potência o Watt. Quando a potência se define para uma superfície então é chamada de irradiação.

1 kW (Kilowatt) = 1.000 Watts =  $10^3 \text{ W}$

1 MW (Megawatt) =  $10^6 \text{ Watts} = 10^3 \text{ kW}$

1 GW (Gigawatt) =  $10^9 \text{ Watts} = 10^6 \text{ kW}$

1 TW (Terawatt) =  $10^{12} \text{ Watts} = 10^9 \text{ kW}$

Quando o Sol brilha com uma potência de 1.000 watts durante uma hora, produz 1 KW de trabalho por hora. No caso de se converter 100% desta energia em calor, então produz-se 1KWh de calor.

Potência irradiada:  $\phi$  (W)

Irradiação:  $E$  ( $\text{W/m}^2$ )

Quantidade de calor:  $Q$  (Wh/kWh)

*(Greenpro, Janeiro, 2004)*

Tendo apenas por base os dados astronómicos sabe-se que a energia solar disponível na Terra é muito variável. Para uma localização pré-estabelecida esta variação depende da latitude geográfica, do dia e do ano. Devido à inclinação do eixo da Terra os dias de verão são maiores que os dias de inverno, e as altitudes solares que o sol atinge são mais elevadas nos meses de verão do que no inverno.

A figura seguinte mostra a sequência de irradiação durante um dia em Lisboa numa placa horizontal com uma superfície de  $1 \text{ m}^2$ , para quatro dias ao longo do ano.

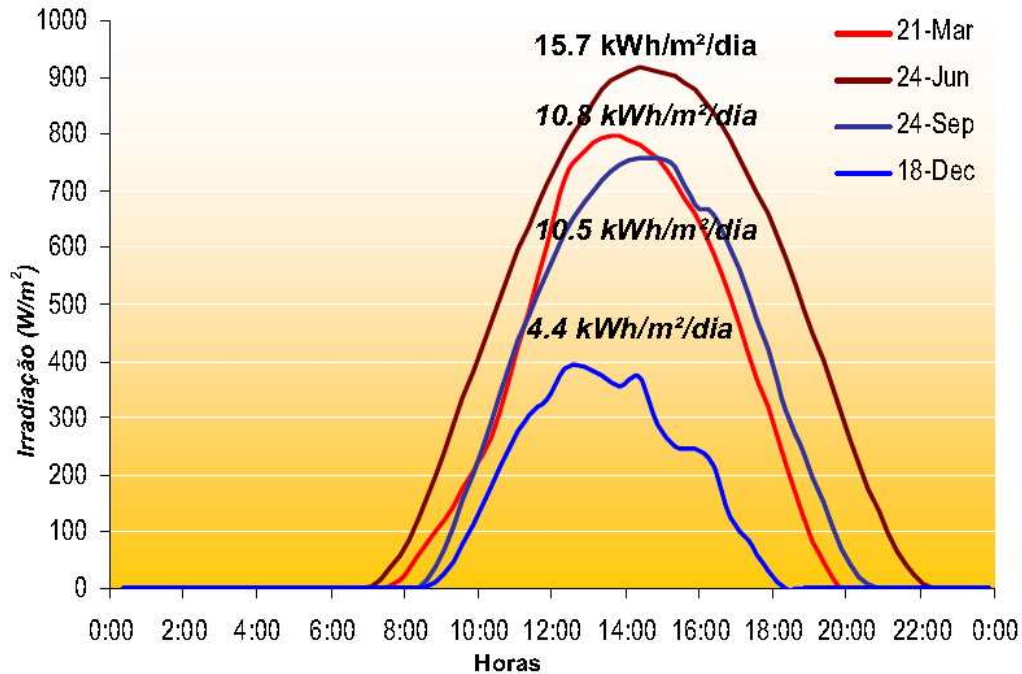


Ilustração 50 – Variação diária e valor global diário de irradiação

(Greenpro, Janeiro, 2004)

A radiação solar tem diversas componentes: a radiação solar directa  $E_{dir}$  proveniente do sol, que atinge a terra sem qualquer mudança de direcção e a radiação difusa  $E_{dif}$ , que chega aos olhos do observador através da difusão de moléculas de ar e partículas de pó. A radiação difusa inclui também a radiação reflectida pela superfície terrestre. A soma da radiação difusa e directa equivale à radiação solar global  $E_G$ .

$$E_G = E_{dir} + E_{dif} \quad (8)$$

Esta equação, caso não sejam referidas outras condições, refere-se à radiação sobre uma superfície horizontal.

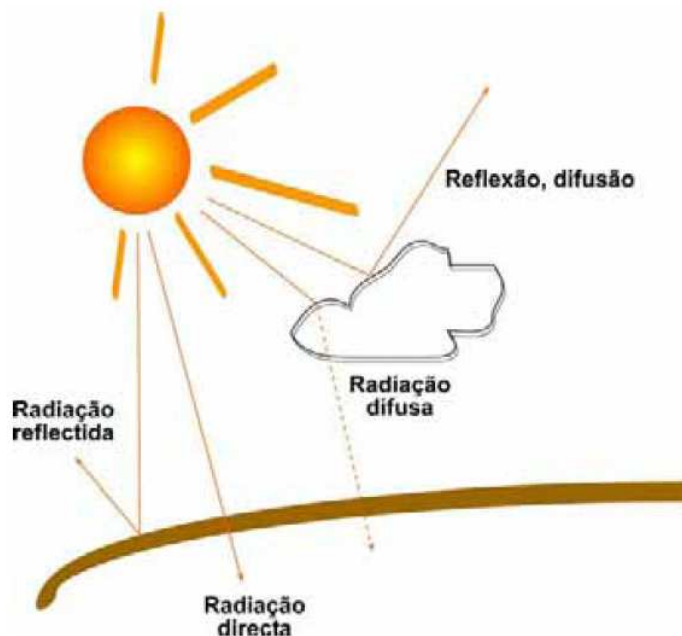


Ilustração 51 – Reflexão solar global e suas componentes

(Greenpro, Janeiro, 2004)

Quando o Sol se localiza verticalmente, acima de uma determinada localização, a radiação efectua o caminho mais curto através da atmosfera. Por outro lado, quando o Sol se encontra num ângulo mais baixo a radiação percorre um caminho mais longo, sofrendo a radiação solar uma maior absorção e difusão e estando disponível uma menor intensidade de radiação.

A nebulosidade ou o estado do céu é o segundo factor decisivo - depois das condições astronómicas - a afectar a disponibilidade de radiação solar. A energia irradiada tal como a quantidade de radiação difusa e directa varia com a quantidade de nuvens.

Com base em dados de irradiação difusa e directa, para a Cidade de Lisboa, ver ilustração 52, verifica-se que a proporção média da radiação solar difusa é de 40% da radiação global, sendo que nos meses de inverno esta proporção aumenta.

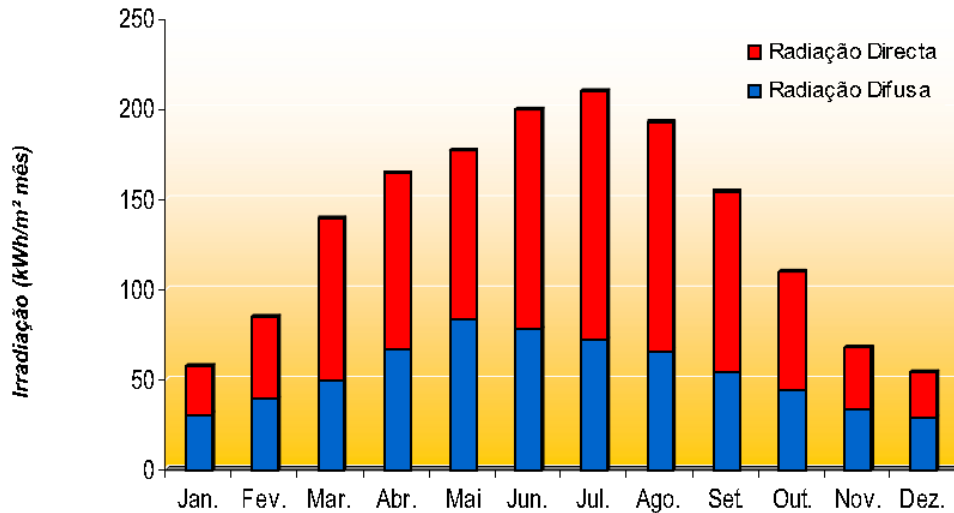


Ilustração 52 – Somatório mensal da irradiação solar global – directa e difusa para Lisboa

(Greenpro, Janeiro, 2004)

De forma a podermos adaptar à zona onde estamos a trabalhar existe assim a possibilidade de recorrermos a informações climáticas de cada local, conforme podemos ver nas ilustrações 53 e 54.

Um factor também bastante influente na captação da irradiação global solar é a influência da orientação dado que para diferentes ângulos de incidência do sol ao longo do ano, a uma determinada latitude, existe um valor máximo de radiação produzida que poderá ser obtido se a superfície receptora estiver inclinada a um determinado ângulo. O ângulo de inclinação óptimo, para os meses de Inverno (menor radiação) é maior que no Verão por causa da menor altura solar.

Adiante, quando abordarmos o caso prático de estudo, explicar-se-á em pormenor a transformação da radiação incidente numa superfície horizontal na radiação incidente numa superfície inclinada (formula 19).

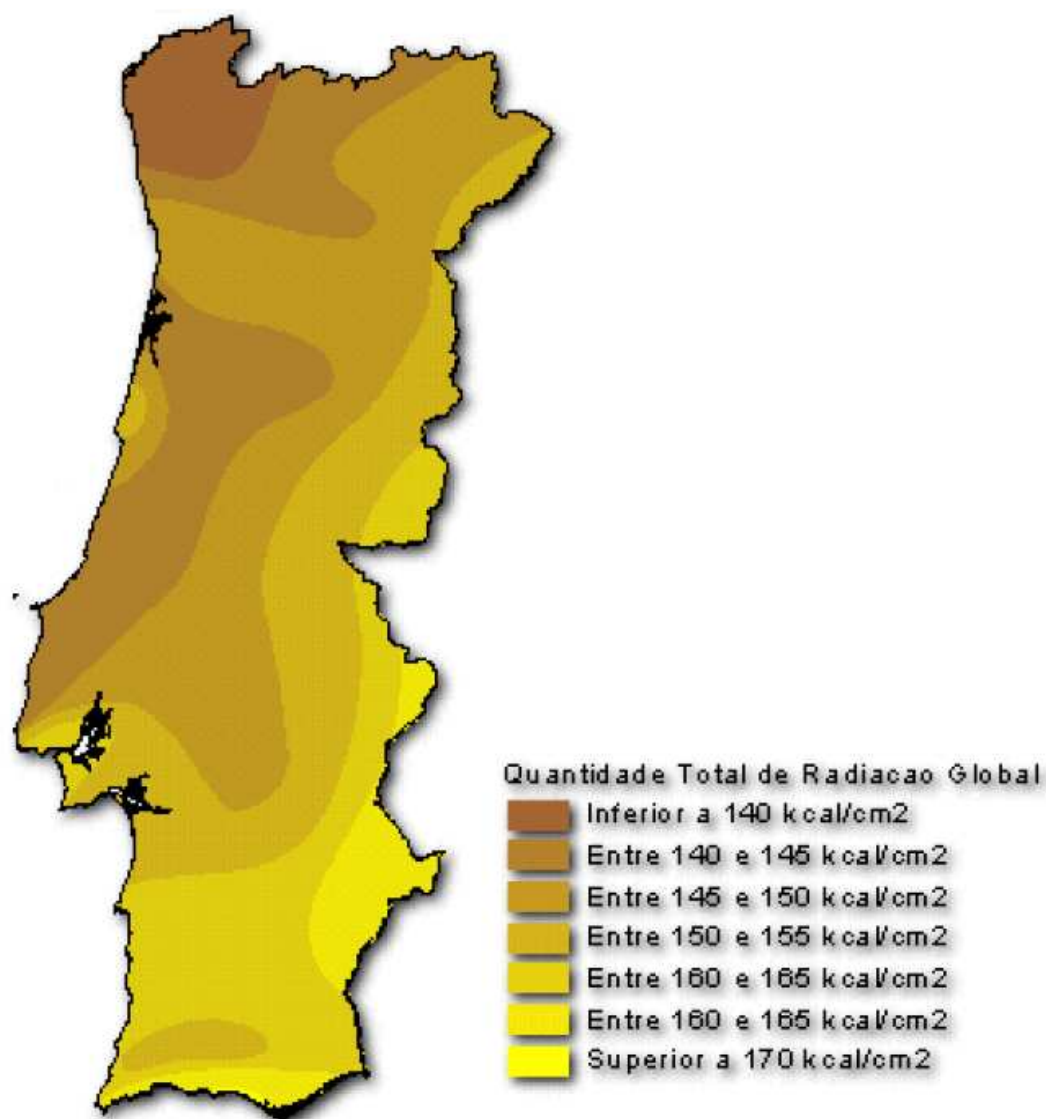


Ilustração 53 – Radiação global anual em Portugal

(Atlas do Ambiente, Instituto do Ambiente)

Para além da irradiação solar global o número de horas de luz (insolação) é também frequentemente utilizado para o dimensionamento dos sistemas solares. Em Portugal estes valores variam entre 1.800 e 3.100 horas por ano.

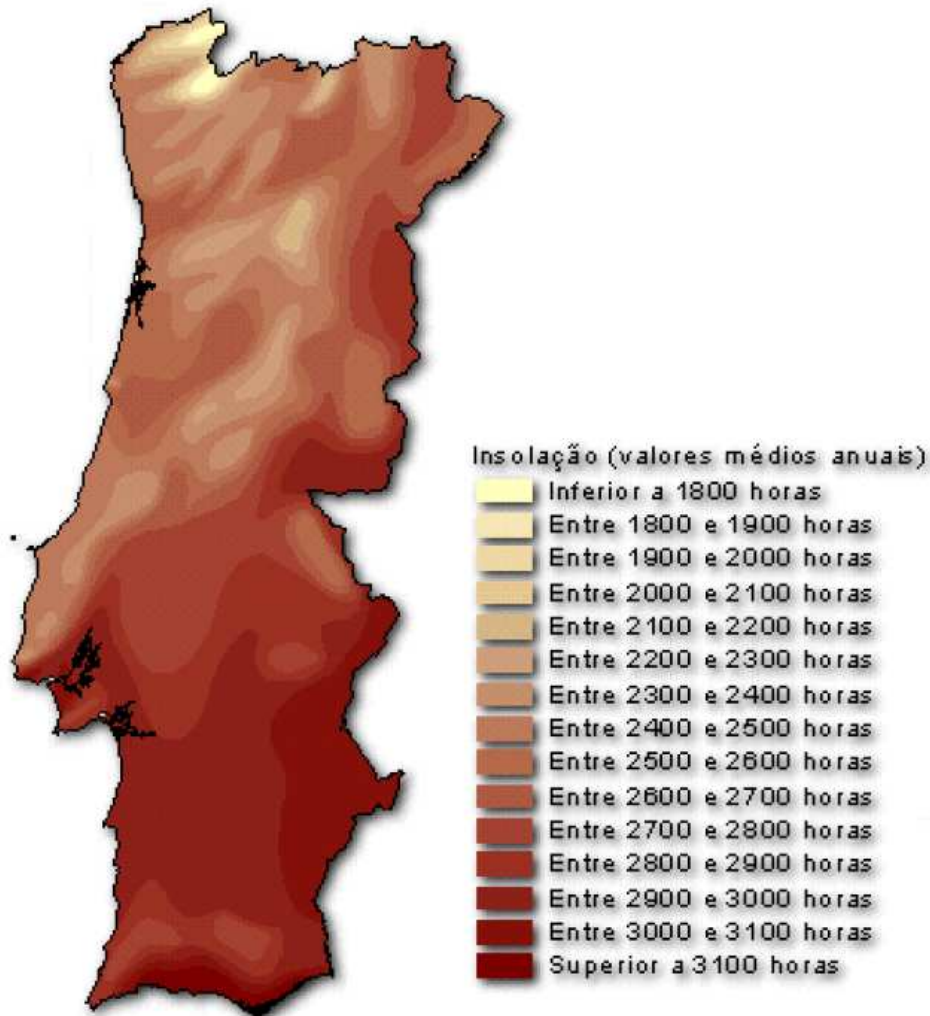


Ilustração 54 – Insolação global anual em Portugal

(Atlas do Ambiente, Instituto do Ambiente)

### 6.2.2 Componentes de um sistema solar térmico

Os colectores solares instalados nos telhados convertem a luz, que penetra através dos vidros (radiação de onda-curta), em calor. Estes colectores estabelecem a ligação entre a energia proveniente do sol e os utilizadores de água quente. O calor é gerado pela absorção dos raios solares através de uma placa metálica que se comporta como um corpo negro – a placa absorvora. Está é a componente mais importante do colector. Na placa absorvora está incorporado



um sistema de tubos que serve para transferir o calor gerado, para o fluido de transferência térmica, que por sua vez flui para o tanque de armazenamento de água quente. Geralmente este calor é transferido para a água potável através de um permutador de calor.

Ao arrefecer o fluido de transferência escoia através de uma segunda conduta de volta ao colector, enquanto a água potável entretanto aquecida sobe no tanque de armazenamento, criando uma estratificação térmica, na qual a água aquecida está no topo (onde está localizada a tomada de água quente) enquanto a água fria se encontra no fundo (onde está localizado o abastecimento de água para aquecimento).

A maioria dos sistemas solares, que são comercializados e instalados funcionam com um fluido de transferência térmica que é composto por uma mistura de água com anti-congelante para proteger os colectores do perigo de congelamento. Este líquido é composto por uma mistura de água e glicol, que circula num circuito fechado podendo ser utilizado em sistemas de transferência indirecta de calor através de um permutador.

O sistema de comando diferencial serve para activar a bomba de circulação do circuito solar, quando o diferencial de temperatura entre o colector e o tanque armazenamento atingir um valor pré-estabelecido. Quando este valor é atingido a bomba de circulação é activada e o fluido de transferência térmica no colector – que foi aquecido pelo sol – circula para o depósito de água potável, onde o calor é transferido para a água através do permutador de calor do sistema solar, localizado abaixo do sistema de apoio.

Com as dimensões consideradas standard para uma ou duas famílias (por pessoa, 1 a 2 m<sup>2</sup> de superfície colectora e aproximadamente 50 a 70 l de volume no tanque de armazenamento) a água potável pode ser praticamente toda aquecida no Verão, pelo sistema solar térmico. O sistema solar é normalmente dimensionado para proporcionar uma cobertura anual de cerca de 50% a 80% das necessidades de aquecimento da água. Os restantes 20% a 50% têm que ser fornecidos por um sistema de apoio do tipo convencional. A instalação deste sistema de apoio é efectuado no topo do tanque de armazenamento de água potável através dum permutador de calor. Outro factor decisivo para manter o nível de energia suplementar baixo prende-se com o pré-estabelecimento da

temperatura da água no depósito de armazenamento, ou seja, quanto menor a temperatura necessária, por exemplo 45°C, maior a proporção de aquecimento coberta pela energia solar e vice-versa.

A ilustração 55 mostra-nos a diversidade de colectores que podemos encontrar

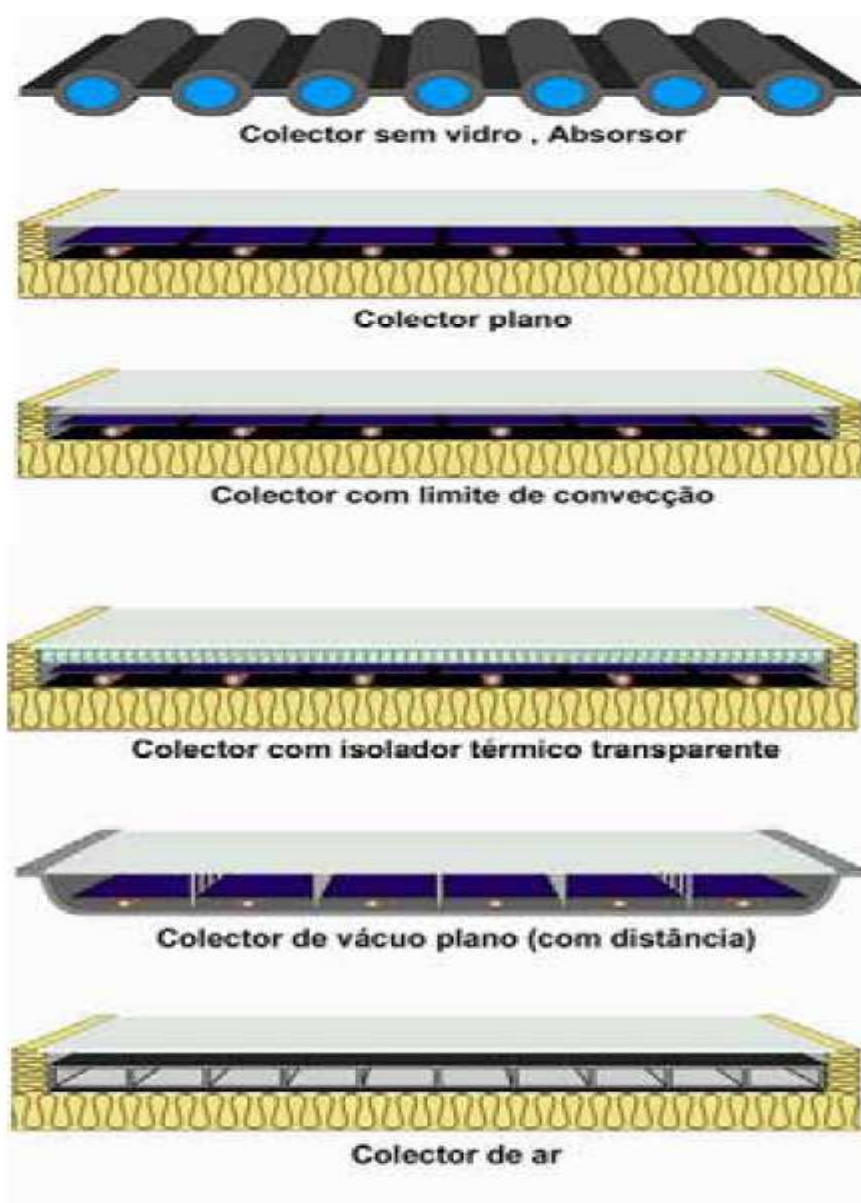


Ilustração 55 – Tipos de colectores

*(Atlas do Ambiente, Instituto do Ambiente)*

Para uma melhor percepção e sem se entrar em grades dissertações teóricas podemos definir o funcionamento do colector solar plano da seguinte forma.

A irradiação ( $E_0$ ) atinge a cobertura transparente e antes de entrar no colector uma pequena parte da energia ( $E_1$ ) é reflectida, nas superfícies internas e externas do vidro. A superfície selectiva do absorsor também reflecte uma pequena parte da luz ( $E_2$ ) e converte a radiação restante em calor. Com um bom isolamento térmico no colector e usando materiais isolantes não combustíveis, tais como a lã mineral e/ou poliuretano sem CFC, as perdas de energia através de condução térmica ( $Q_1$ ) são reduzidas ao máximo possível.

A cobertura transparente tem a função de reduzir perdas na superfície do absorsor, através de radiações térmicas e convectivas ( $Q_2$ ). Isto significa que perdas por conversão e irradiação ocorrem somente para o exterior através da cobertura de vidro aquecida.

Assim, da irradiação de energia solar ( $E_0$ ) e retirando os diferentes tipos de perdas ( $E_1$ ,  $E_2$ ,  $Q_1$  e  $Q_2$ ) fica o calor remanescente ( $Q_3$ ) que está disponível para ser utilizado no sistema.

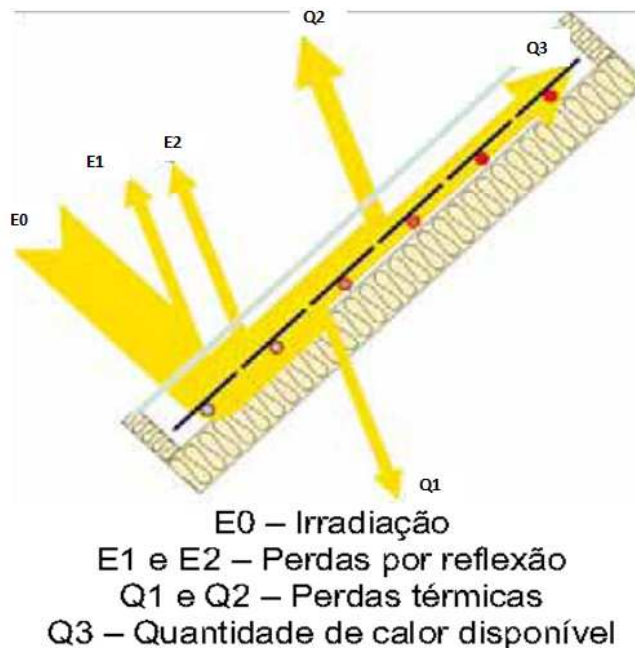


Ilustração 56 – Fluxos de energia num colector

(Atlas do Ambiente, Instituto do Ambiente)



A eficiência “ $\eta$ ” de um colector é definida como a taxa de energia térmica utilizada para o total da irradiação de energia solar:  $\eta = Q_N / E$ . A eficiência é influenciada pelas características do colector, mais precisamente pelas perdas por reflexão ( $E_1$  e  $E_2$ ) e térmicas ( $Q_1$  e  $Q_2$ ).

De forma a poder-se armazenar durante algum período a energia captada normalmente recorre-se aos depósitos de armazenamento.

### **6.2.3 Apresentação da solução solar proposta**

A proposta estudada visa a colocação de uma bateria de aquecimento na conduta de insuflação, instalada a montante do ventilador de insuflação. Esta bateria será alimentada por água quente à temperatura de 40°C, proveniente do sistema de painéis solares. O estudo do processo incidirá na aplicação, onde o trabalho será orientado para a colocação da cabine nos 22°C durante os meses de inverno.

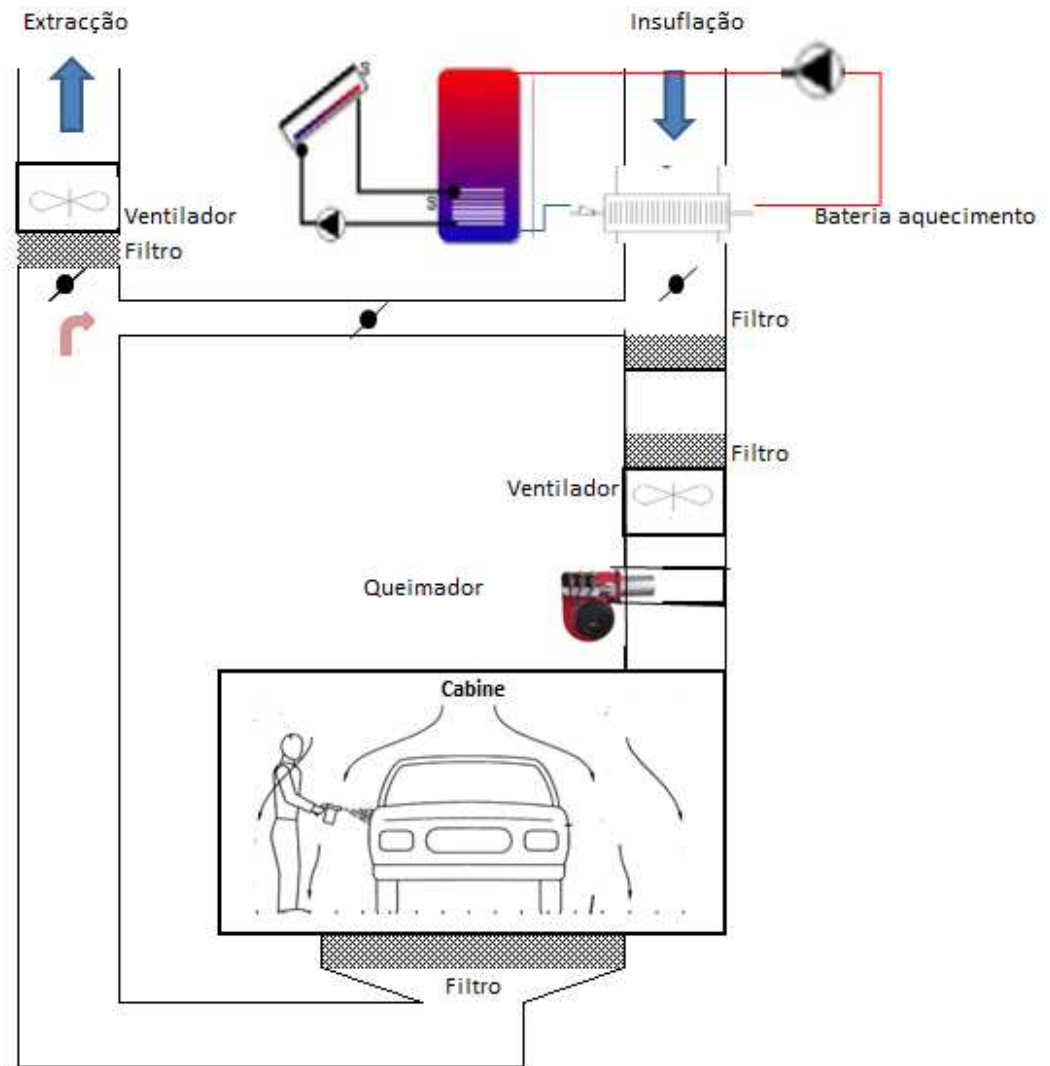


Ilustração 57 – Cabine com sistema auxiliar de aquecimento solar

Com base no modelo de simulação criado, vamos adaptá-lo ao cálculo de captação energética através de um sistema solar.

O coletor solar é um equipamento cuja a função é a captação da energia solar. Assim, está sujeito a diversas condições de trabalho que oscilam ao longo do dia e que depende das condições climatéricas que variam ao longo das estações do ano.



Para este balanço energético, fomos considerar as condições estacionárias, ou seja, valores médios para todos os parâmetros que intervêm. Consideramos o colector imóvel, recebendo a radiação solar uniformemente repartida e de forma constante, pelo qual circula o fluido térmico com um caudal determinado.

Balanço Energético do Colector:

$$P_i = P_u + P_p \quad (9)$$

$P_i$  - Energia incidente total por unidade de tempo

$P_u$  - Energia útil recolhida pelo fluido térmico

$P_p$  - Energia perdida por dissipação para o exterior

Temos que:

$$P_u = P_i - P_p \quad (10)$$

Sendo

$$P_i = A \times I_g \times \tau \times \alpha \quad (11)$$

$$P_p = A \times U_l \times (t_c - t_a) \quad (12)$$

$$P_u = A \times [I_g \times \tau \times \alpha - U_l \times (t_c - t_a)] \quad [\text{W}] \quad (13)$$

$A$  - Área da superfície do painel (corresponde à área de abertura transparente)  
[ $m^2$ ]

$I_g$  - Radiação global incidente no colector por unidade de área [ $\text{W}/m^2$ ]

$\tau$  - Transmitância da cobertura transparente

$\alpha$  - Absortância da placa absorvora



$t_c$  – Temperatura média da placa absorvora (°C)

$t_f$  - Temperatura média do fluido (°C)

$t_a$  – Temperatura ambiente (°C)

A temperatura média da placa absorvente  $t_c$  não se pode calcular de forma simples, mas pode conhecer-se com exactidão suficiente a temperatura  $t_f$  do fluido térmico no instante em que este circula pelo colector. Uma forma simples de obter esta temperatura é calcular a média da temperatura do fluido à entrada e à saída do colector.

$$t_f = \frac{(t_e + t_s)}{2} \quad (14)$$

Se substituirmos a temperatura da placa absorvora  $t_e$ , em princípio desconhecida, pela temperatura do fluido  $t_f$  temos de introduzir um factor de correcção,  $F'$ , chamado factor de irrigação, sempre inferior à unidade e que faz diminuir o valor de  $Q$ . Este factor depende do caudal do fluido e das características da placa.

A equação (15) transforma-se assim em:

$$P_u = F' \times A \times [I_g \times \tau \times \alpha - U_l \times (t_f - t_a)] \quad [W] \quad (15)$$

conhecida também como **equação de Bliss**.

Os colectores solares habitualmente existentes no mercado compreendem valores conforme tabela 6 (características dos coletores solares).



Tipo de Colector	CARACTERÍSTICAS (relativas à área de abertura)	
	$F' (\tau \alpha)$	$F' \times U_L (W/(m^2 \text{ } ^\circ\text{C}))$
NÃO SELECTIVO	0.7 - 0.8	8 - 9
SELECTIVO	0.7 - 0.8	4.5 - 6
C.P.C.	0.75	4.2 / 3.7 <sup>(1)</sup>

(1) Os dois valores de  $F' \times U_L$  para o colector C.P.C. correspondem a orientações NS e EW respectivamente do comprimento L

Tabela 9 – Características dos colectores solares

(Sociedade Portuguesa de energia Solar, Manual Instaladores INETI)

Pegando novamente na equação de Bliss e colocando-a na forma de entrada directa dos dados do quadro de característica, obtemos:

$$P_u = A \times [I_g \times F' \times (\tau \alpha) - F' \times U_L \times (t_f - t_a)] \quad [W] \quad (16)$$

Os coletores solares ensaiam-se geralmente num banco de provas sob condições estáveis de radiação solar, velocidade do vento, temperatura do fluido à entrada e temperatura ambiente.

Os resultados obtidos nos ensaios apresentam-se como rendimento do coletor,  $\eta$ , definido pela relação entre a energia captada e a fornecida:

$$\eta = P_u / (A \times I_g) \quad (17)$$

Substituindo  $P_u$  pelo seu valor na equação de Bliss:

$$\eta = F' \times (\tau \alpha) - (F' \times U_L) \times [(t_f - t_a) / I_g] \quad (18)$$

Para um caudal determinado e com  $(\tau \alpha)$  e  $U_L$  constantes, a equação desta curva característica do colector transforma-se com bastante exactidão numa recta.

As curvas são obtidas na certificação laboratorial efectuada aos coletores aquando da sua acreditação para comercialização. Devem também, ser fornecidas pelo próprio fabricante, para podermos assim deduzir as características térmicas do coletor.

Este tipo de modelo corresponde a uma aproximação linear, conforme verificamos no gráfico 11.

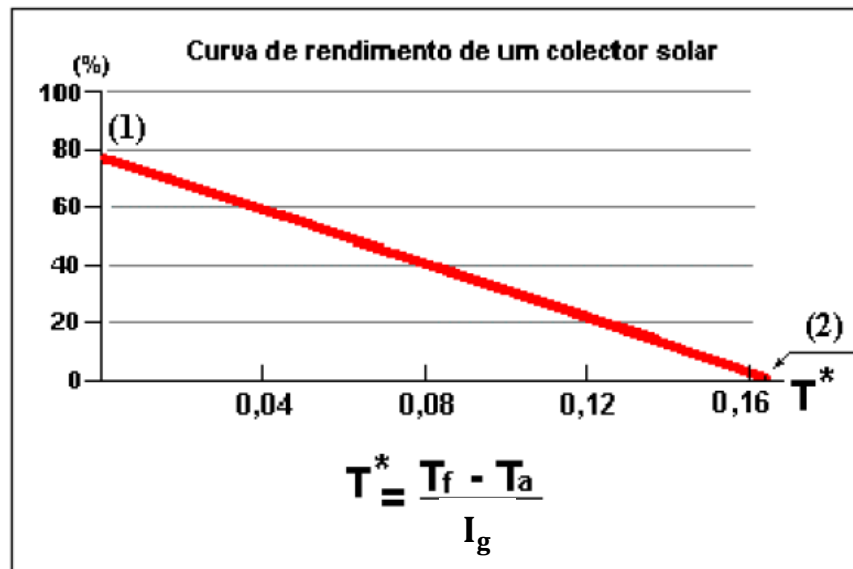


Gráfico 26 – Curva de rendimento coletor solar

(Sociedade Portuguesa de energia Solar, Manual Instaladores INETI)

Observando o quadro 11 pode verificar-se facilmente que o rendimento do coletor diminui à medida que a temperatura média do fluido  $t_f$  sobe. Quando  $T^*$  é nulo (a temperatura média do fluido é igual à temperatura ambiente) o rendimento designa-se por **rendimento óptico (1)**. Quando a temperatura de saída for igual à temperatura de entrada, o rendimento é nulo e o coletor atinge a **temperatura de estagnação (2)** (máxima temperatura que o coletor pode atingir para uma temperatura ambiente e radiação determinadas).

Como regra geral deve escolher-se o coletor de acordo com a temperatura de utilização pretendida para que o seu rendimento seja normalmente acima dos



40%. No quadro seguinte podemos verificar que tipo de colector se adequa a determinadas condições de utilização.

TIPO DE INSTALAÇÃO	TEMPERATURA de UTILIZAÇÃO	TIPO DE COLECTOR
Piscinas / Estufas	< 30 °C	plano sem cobertura plano (preto baço) plano (selectivo)
Águas Sanitárias e pré-aquecimento Industrial	< 60 °C	plano (preto baço) plano (selectivo) CPC (baixa concentração)
pré-aquecimento Industrial	> 60 °C	CPC (baixa concentração) CPC (alta concentração) Tubos de Vácuo Outros Concentradores

Tabela 10 – Caracterização do colector em função da instalação

(Sociedade Portuguesa de energia Solar, Manual Instaladores INETI)

Temos neste momento a informação necessária para que possamos simular a quantidade de energia captada pelo sistema solar. Assim, estamos em condições de assumir os parâmetros que pretendemos ter nos colectores.

Temos os seguintes dados:

$$A = 32,2 \quad [m^2]$$

Tal como já explicado anteriormente esta área de painéis foi obtida por processo iterativo onde fomos aumentando a área de painéis no modelo de simulação criado e de forma a obtermos um mínimo de 70% da energia necessária no processo de aplicação no período de Inverno.

$I_g$  - Fornecido pelo *solterm* para situação de Faro (hora a hora)

$t_f = 45 \text{ °C}$  (temperatura pretendida para o sistema)



$$F' \times (\tau\alpha) = 0,7$$

$$(F' \times U_l) = 4$$

Os dados obtidos através do *solterm*, permitem-nos obter a radiação diária directa e difusa numa superfície horizontal. Contudo, interessa-nos numa superfície inclinada, pois os colectores seriam instalados numa posição inclinada. Como o nosso interesse de obtenção de energia é sobretudo na situação de inverno, vamos adoptar uma inclinação para os painéis de 50°.

Assim, torna-se necessário transformar a radiação incidente numa superfície horizontal em radiação incidente numa superfície inclinada a 50°. A inclinação de 50° foi seleccionada dado estarmos numa situação onde necessitamos mais de energia no período de inverno, onde o sol anda numa posição mais horizontal e como tal é o ângulo que melhor se adequa às necessidades.

Numa base horária o valor da radiação global que atinge uma superfície inclinada é então:

$$I_t = I_D \cdot R_D + I_d \cdot \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + (I_D + I_d) \cdot \rho_g \cdot \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (19)$$

$I_D$  - Radiação directa incidente numa superfície horizontal

$I_d$  - Radiação difusa incidente numa superfície horizontal

$\beta$  - Ângulo da inclinação da superfície

$\rho_g$  - Índice de reflectividade do solo

$R_D$  - Razão entre a radiação directa em superfície inclinada e radiação directa em superfície horizontal.



O valor de  $R_D$  pode ser calculado para superfícies inclinadas para o equador, o que no hemisfério norte corresponde a superfícies com azimute solar nulo.

$$R_D = \frac{\cos(L-\beta) \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin(L-\beta) \cdot \sin \delta}{\cos L \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin L \cdot \sin \delta} \quad (20)$$

em que:

$L$  - Latitude do Local (Faro 37°)

$\beta$  - Inclinação da superfície de incidência (opção de estudo 50°)

$\delta$  - Declinação

$\omega$  - Ângulo horário, corresponde ao desfasamento angular desde Este a Oeste em relação ao eixo da terra cujo valor corresponde a 15° negativos pela manhã e positivos pela tarde.

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{(284+n)}{365}\right) \quad (21)$$

$$\omega = (TSV - 12) \times 15^\circ \quad (22)$$

A tabela 11 permite-nos verificar como aplicamos a base teórica no modelo de simulação o quais os resultados obtidos num dia típico .

Os valores de reflectividade do solo,  $\rho_g$  , segundo o método *Lui and Jordan (1963)* é de 0,2 quando não há neve e de 0,7 quando existe cobertura de neve.

Mestrado em Energia e Climatização de Edifícios

Text (°C)	$\delta$	$\omega$	Sup inclinada		Coletor solar		U [W/m <sup>2</sup> .°C]	Q [kWh]	Tc °C	Rend
			$R_D$	I (W/m2)	A m <sup>2</sup>	Tau Alfa				
11,1	-23,01	-165,00	0,82	0	32,2	0,7	4	-3722	40	0
10,3	-23,01	-150,00	0,79	0	32,2	0,7	4	-3825	40	0
9,5	-23,01	-135,00	0,72	0	32,2	0,7	4	-3928	40	0
8,7	-23,01	-120,00	0,60	0	32,2	0,7	4	-4031	40	0
7,9	-23,01	-105,00	0,34	0	32,2	0,7	4	-4134	40	0
7,1	-23,01	-90,00	-0,37	0	32,2	0,7	4	-4238	40	0
6,4	-23,01	-75,00	-7,11	0	32,2	0,7	4	-4328	40	0
6,7	-23,01	-60,00	4,05	180	32,2	0,7	4	-234	40	0
7,8	-23,01	-45,00	2,54	458	32,2	0,7	4	6177	40	0,418801
9,6	-23,01	-30,00	2,15	762	32,2	0,7	4	13261	40	0,540431
11,7	-23,01	-15,00	2,01	953	32,2	0,7	4	17832	40	0,581195
13,7	-23,01	0,00	1,97	1004	32,2	0,7	4	19251	40	0,595256
15,4	-23,01	15,00	2,01	774	32,2	0,7	4	14283	40	0,572909
16,4	-23,01	30,00	2,15	947	32,2	0,7	4	18314	40	0,600354
16,6	-23,01	45,00	2,54	877	32,2	0,7	4	16746	40	0,593233
15,9	-23,01	60,00	4,05	543	32,2	0,7	4	9126	40	0,522332
14,6	-23,01	75,00	-7,11	0	32,2	0,7	4	-3272	40	0
13,1	-23,01	90,00	-0,37	0	32,2	0,7	4	-3465	40	0
11,9	-23,01	105,00	0,34	0	32,2	0,7	4	-3619	40	0
10,9	-23,01	120,00	0,60	0	32,2	0,7	4	-3748	40	0
10,1	-23,01	135,00	0,72	0	32,2	0,7	4	-3851	40	0
9,4	-23,01	150,00	0,79	0	32,2	0,7	4	-3941	40	0
8,9	-23,01	165,00	0,82	0	32,2	0,7	4	-4006	40	0
8,4	-23,01	180,00	0,83	0	32,2	0,7	4	-4070	40	0

Tabela 11 – Resultados, energia captada para um dia típico

Desta forma, procedeu-se à simulação da energia captada pelo sistema solar. Com uma área de painéis solares de 32,2 m<sup>2</sup> podemos obter a energia cujos resultados podemos verificar através do gráfico 27.

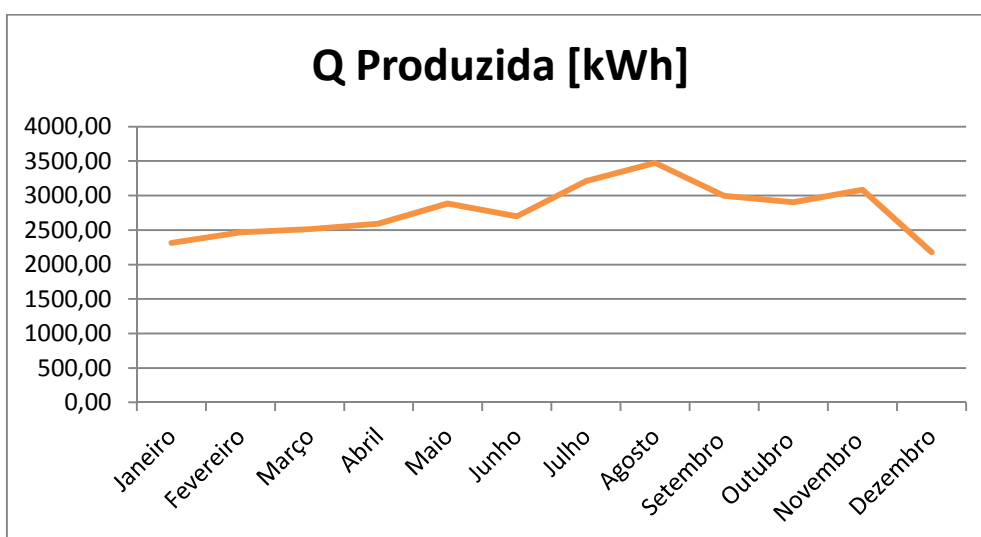




Gráfico 27 – Energia captada pelo sistema solar

Para as características do sistema, com a área de painéis de  $32,2 \text{ m}^2$ , e uma vez que há coincidência no período de consumo e captação, iremos adoptar dimensionamento do sistema de acumulação de  $40 \text{ l/m}^2$  de painel conforme (*Greenpro, Janeiro, 2004*).

Assim, o volume do depósito de acumulação é de 1250 l, ou seja,  $32,2 \text{ m}^2$  de painéis multiplicado por 40 l.

Dado que conhecemos a capacidade máxima produzida pelo sistema hora a hora, exemplo da tabela 11, para esse dia a produção máxima é de 19251 kWh. Assim, para os meses em causa iremos analisar qual a produção máxima e adaptar a bateria de aquecimento correspondente. Podemos definir a bateria de aquecimento ajustada à produção, pelo que optamos por uma bateria com uma potência de 80 kW, pois pela simulação o valor mais elevado de produção dos painéis é de 79kWh.

Desta forma, podemos então saber qual a quantidade de gás propano que podemos reduzir com a substituição dessa energia pela produzida nos painéis solares.

Sabemos que para manter a cabine de pintura nos  $22^\circ\text{C}$  durante os meses de inverno vamos gastar cerca de 1815 kg de gás propano. Visto que conseguimos através do sistema de captação solar produzir aproximadamente 18053 kWh, o que representa 1315 Kg de gás que pode ser poupado, podemos afirmar que atingiremos com este sistema uma poupança anual na ordem dos 22% do consumo.

	<b>Q necessária vs Q produzida</b>	
Outubro	1549	2903
Novembro	3480	3083
Dezembro	5501	2180
Janeiro	5747	2314
Fevereiro	4262	2466
Março	2858	2514
Abril	1512	2592
<b>TOTAL</b>	<b>24909 kWh</b>	<b>18053 kWh</b>
	1815 kg de gás	1315 kg de gás
	2.165,39 €	1.569,35 €

Tabela 12 – Energia necessária Vs Energia produzida [Para situação 22°C]

<b>22°C</b>	<b>Q necessária [kWh]</b>
Janeiro	5747
Fevereiro	4262
Março	2858
Abril	1512
Maio	506
Junho	104
Julho	2
Agosto	10
Setembro	497
Outubro	1549
Novembro	3480
Dezembro	5501
<b>ANUAL</b>	<b>26.028</b>

Tabela 13 – Energia necessária para 22°C, base anual.

Através do gráfico 28 podemos ver que ainda temos uma boa parcela de energia captada, entre Abril e Setembro, que poderá ser utilizada, pois as necessidades energéticas nesse período para o processo de aplicação ficam muito abaixo da capacidade produzida. Essa energia poderia ser reconduzida para outros processos, como por exemplo águas quentes sanitárias.

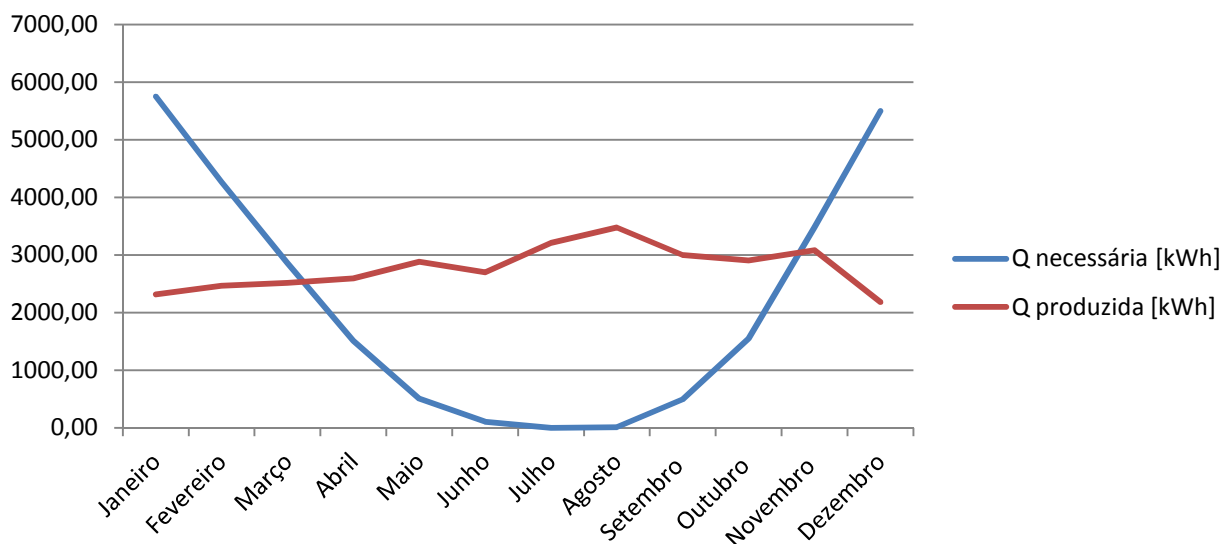


Gráfico 28 - Energia necessária Vs. Energia produzida para base 22°C

Se verificarmos que a necessidade energética no período de Inverno para colocar a cabine a 22°C se situa nos 24909 kWh (entre Outubro e Abril) e o sistema solar nesse período produz 18053 kWh, conforme gráfico 29, podemos afirmar que este sistema assumiria a responsabilidade em cerca de 72% da produção da energia necessária cabendo o restante ao gás propano.

No entanto, é sempre necessário analisar a solução do ponto de vista económico.

## Peso das fontes energéticas

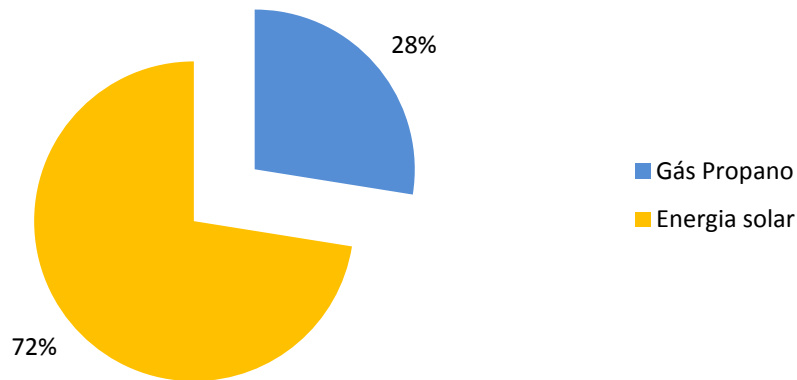


Gráfico 29 – Peso das fontes energéticas gás propano Vs. Energia solar

### 6.2.4 Análise da viabilidade económica ao sistema com colectores solares (opção 1)

Em seguida, iremos abordar as soluções do ponto de vista económico, pois é sobre este que recaem grande parte das decisões tomadas actualmente.

A análise económica foi realizada com base na seguinte informação:

- Valor do investimento obtido através de uma prospecção de preços a fornecedores dos respectivos equipamentos;
- Preço da cotação de gás actual;
- Taxa de inflação média dos últimos 10 anos, obtida no *Pordata*, ([www.pordata.pt](http://www.pordata.pt));
- Simulados custos de manutenção em função da informação obtida pelos fornecedores

De forma a analisar o investimento, recorreu-se ao cálculo do **Valor Actual Líquido** abaixo designado por VAL e a **Taxa Interna de Rentabilidade** designada



por TIR. Para o cálculo do VAL vamos estimar uma taxa efectiva anual de 10%, ou seja, a taxa mínima que nos propomos ganhar com este investimento.

Cálculo do VAL:

- $$VAL = \sum_{t=1}^n \frac{PA_t}{(1+i)^t} - I \quad (23)$$

t = tempo [anos]

Considerado 20 anos para análise

PA = Poupança Anual Obtida

i = taxa efectiva anual

I – Investimento inicial

Desta forma temos todas as variáveis para analisar as soluções do ponto de vista económico. Assim, fomos efectuar a análise do *cash-flow* com os pressupostos de investimento seguintes:

Investimento inicial: 20.200,00 €

Preço do gás propano em 2012: 1,193 [€/kg] actualizado anualmente com o valor da inflação

Taxa de inflação anual: 2,6%

Custos Associados à manutenção: 1% do investimento inicial, com respectiva actualização da inflação

Considerada energia poupada: 18053 [kWh/Ano]

Para o projecto em causa vamos fazer a análise para um período de vida útil de 20 anos, embora possa ser maior para estes investimentos.

Com estes dados, podemos verificar através do gráfico 30 que obtemos o retorno do investimento apenas no 13º ano.

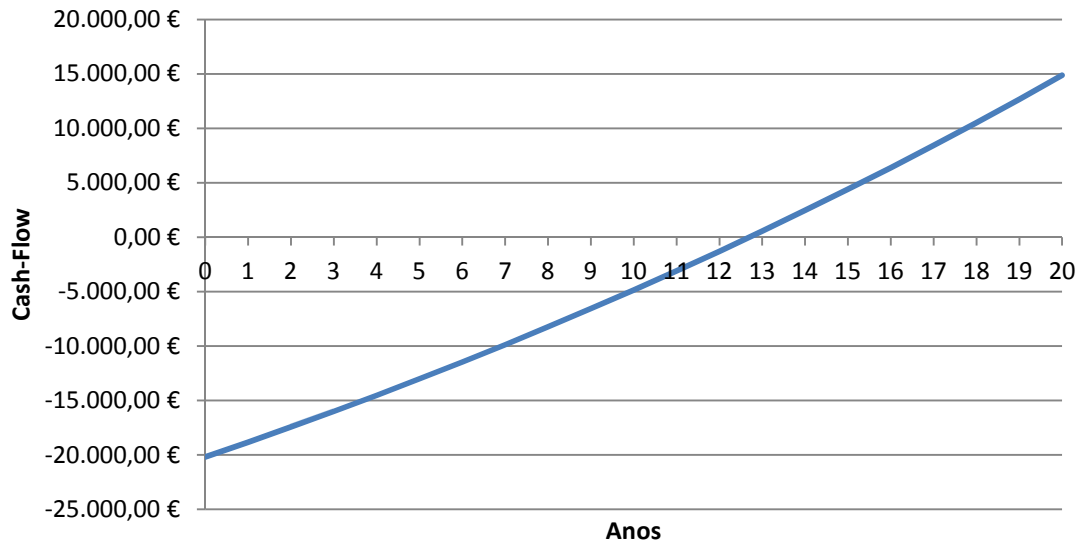


Gráfico 30 – Retorno do investimento, opção 1

Para as condições atrás descritas vamos obter o **VAL = -6366,53 €** o que nos indica que o projecto só por si não é viável.

A TIR é obtida através de interpolação linear de vários VAL, por exemplo para uma taxa de 10% obtemos o VAL negativo (-6366,53 €). Vamos efectuar cálculos para uma taxa de 2% e iremos obter um VAL positivo (8009,77 €). Assim, interpolando para VAL = 0 obtemos o respectivo TIR (ver abaixo). Desta forma chega-se à taxa de rentabilidade obtida no projecto.

TIR = 5,42%

O TIR obtido, tal como o VAL desaconselham o respectivo investimento.

Necessitamos assim de procurar outra solução que associada possa viabilizar o investimento no sistema solar.

## 6.3 Sistema de recuperação de calor (Opção 2)

### 6.3.1 Recuperação de calor

A opção 2 consiste na instalação de um recuperador de calor do tipo ar/ar entre as condutas de extracção e insuflação. O objectivo é o de pré aquecer o ar de insuflação aproveitando a energia no ar de extracção, sempre a temperatura do ar exterior se encontra abaixo dos 22°C.

O permutador de calor ar/ar é um equipamento simples que permite o cruzamento de fluxo de ar, sem contacto directo, por entre umas superfícies alhetadas que permite a troca de calor entre os respectivos fluxos.

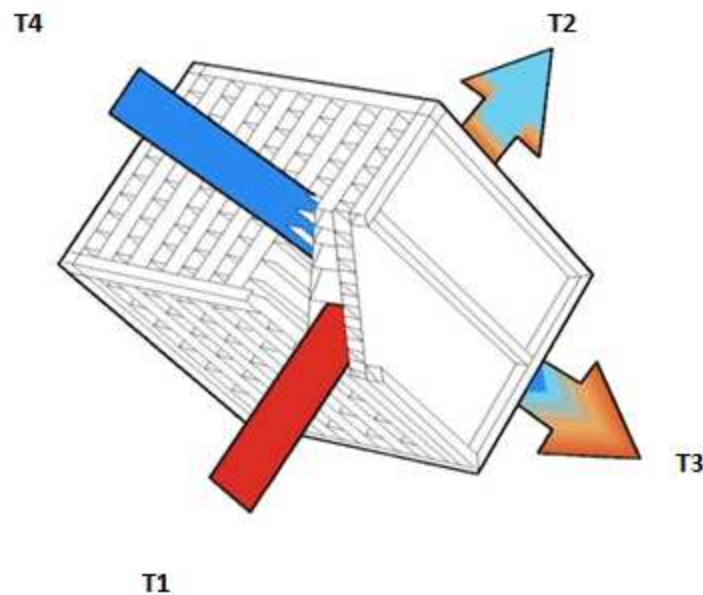


Ilustração 58 – Permutador Ar/Ar

(Finishing Academy by Global Finishing Solutions, 2011)

Nesta análise foi utilizado o mesmo modelo de simulação criado na ferramenta Excel construída para as simulações efectuadas anteriormente, mas adaptada às características da recuperação de calor. Será apresentada, de seguida, a base teórica para os cálculos efectuados.

Para análise da solução foram admitidas as seguintes características:

$$\dot{V} - 4,89 \quad [m^3/s]$$

$$\rho - (\text{massa volúmica do ar a } 300K) \quad 1,1774 \quad [kg/m^3]$$

$$c_p - (\text{calor específico do ar } T_{\text{méd}} = 300K) \quad 1005,7 [J/kg \cdot ^\circ C]$$

$$m - 5,84 \quad [kg/s]$$

Temperatura do ar na exaustão  $[T_0] = 22^\circ C$

Temperatura do ar na insuflação  $[T_i] =$  temperatura ambiente fornecida pelo *solterm*

Através do método da eficiência para um permutador em contracorrente podemos,

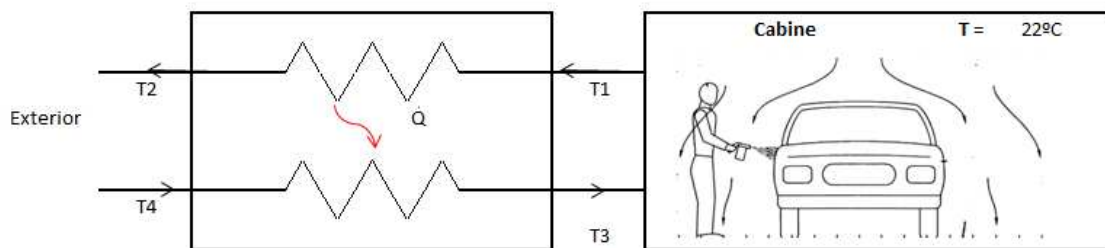


Ilustração 59 – Esquema funcionamento permutador calor

Cálculo da carga térmica total do permutador:

$$q_{rec\ máx} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{3'} - T_4) = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_1 - T_4) \quad (24)$$

$$q_{rec\ real} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_3 - T_4) \quad (25)$$

Para  $q_{rec\ máx}$  então  $T_{3'} = T_1$



Define-se eficiência  $\varepsilon$  com o rácio do calor efectivamente trocado pelo permutador e o calor que potencialmente poderia ser trocado se o permutador fosse infinito e operasse em contra corrente. Daí:

$$\varepsilon = \frac{q_{rec\ real}}{q_{rec\ máx}} \quad (26)$$

Assim, necessitamos de saber a eficiência e  $T_{ar\ quente, final}$

Ou,

$$\varepsilon = \frac{\dot{m} \cdot C_p \cdot (T_3 - T_4)}{\dot{m} \cdot C_p \cdot (T_1 - T_4)} \quad (27)$$

A eficiência pode-se obter com base nos permutadores existentes no mercado pelo que vamos admitir uma eficiência de 55%.

Assim, pode-se obter a  $T_{ar\ frio, final} = T_3$

$$0,55 = \frac{T_3 - T_4}{T_1 - T_4}$$

Através da fórmula acima já podemos obter o  $q_{máx}$  e as temperaturas que faltavam conhecer  $T_{ar\ frio, final}$ ,  $T_3$  (temperatura do ar de admissão no final).

### **6.3.2 Apresentação da solução de recuperador proposto**

Para a simulação utilizou-se o mesmo procedimento dos colectores solares de análise hora a hora e com dados retirados do *solterm*. No entanto, foram considerados apenas os períodos compreendidos entre Outubro e Abril, ou seja, o período necessário para pré-aquecer a cabine a 22°C para o processo de aplicação.

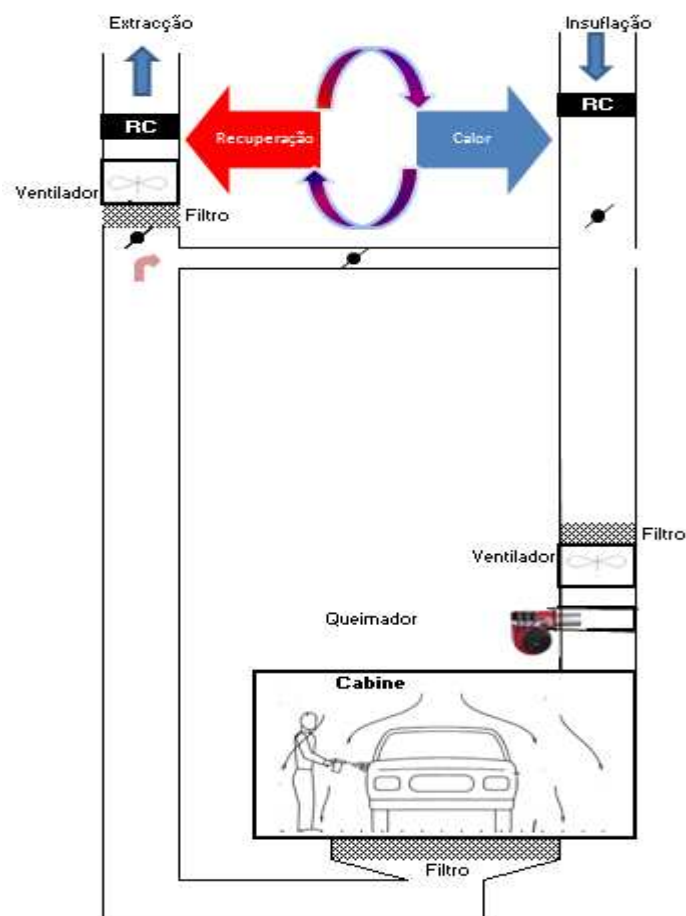


Ilustração 60 – Cabine com sistema auxiliar de recuperador de calor

Para que se pudesse simular a realidade do período de trabalho foram retirados os sábados e domingos, e foram simulados 5 processos diários na cabine, ou seja, foi adoptando o mesmo critério da simulação utilizado para o sistema solar, conforme podemos verificar na tabela 14.

### Mestrado em Energia e Climatização de Edifícios

Eficiência do Permutador		55%		Carga térm		Carga envolvente		Carga envolvente		Tar ext final	Tar frio final	Q	
Mês	Dia	Hora	Text (%)	HR	I	Id	m	Cp	Te	Qmax	[°C]	[°C]	[kWh]
			[°C]	[%]	[W/m <sup>2</sup> ]	[W/m <sup>2</sup> ]	[kg/s]	[J/kg. °C]	[°C]	[kWh]			20927876
1	1	1	11,1	79	0	0	5,84	1005,7	22	0	17,1	16,0	0,0
1	1	2	10,3	80	0	0	0	1005,7	22	0	16,7	15,6	0,0
1	1	3	9,5	81	0	0	0	1005,7	22	0	16,4	15,1	0,0
1	1	4	8,7	81	0	0	0	1005,7	22	0	16,0	14,7	0,0
1	1	5	7,9	82	0	0	0	1005,7	22	0	15,7	14,2	0,0
1	1	6	7,1	83	0	0	0	1005,7	22	0	15,3	13,8	0,0
1	1	7	6,4	83	0	0	0	1005,7	22	0	15,0	13,4	0,0
1	1	8	6,7	82	40	19	5,84	1005,7	22	89861	15,1	13,6	49423,7
1	1	9	7,8	79	148	90	0	1005,7	22	0	15,6	14,2	0,0
1	1	10	9,6	74	310	97	5,84	1005,7	22	72829	16,4	15,2	40055,8
1	1	11	11,7	69	426	95	0	1005,7	22	0	17,4	16,3	0,0
1	1	12	13,7	63	443	135	5,84	1005,7	22	48748	18,3	17,4	26811,6
1	1	13	15,4	59	288	216	0	1005,7	22	0	19,0	18,4	0,0
1	1	14	16,4	56	377	142	5,84	1005,7	22	32890	19,5	18,9	18089,7
1	1	15	16,6	55	307	101	0	1005,7	22	0	19,6	19,0	0,0
1	1	16	15,9	57	114	89	5,84	1005,7	22	35827	19,3	18,6	19704,9
1	1	17	14,6	61	24	19	0	1005,7	22	0	18,7	17,9	0,0
1	1	18	13,1	65	0	0	0	1005,7	22	0	18,0	17,1	0,0
1	1	19	11,9	68	0	0	0	1005,7	22	0	17,5	16,4	0,0
1	1	20	10,9	71	0	0	0	1005,7	22	0	17,0	15,9	0,0
1	1	21	10,1	73	0	0	0	1005,7	22	0	16,6	15,5	0,0
1	1	22	9,4	75	0	0	0	1005,7	22	0	16,3	15,1	0,0
1	1	23	8,9	76	0	0	0	1005,7	22	0	16,1	14,8	0,0
1	1	24	8,4	78	0	0	0	1005,7	22	0	15,9	14,5	0,0

Tabela 14 – Exemplo energia recuperada para 1 dia de trabalho

Somando a totalidade de dias úteis ao longo do ano iremos obter a energia recuperada, conforme tabela 15.

Q permutador	
14116	kWh
1029	kg de gás
1.227,60 €	

Tabela 15 – Energia recuperada

### Peso das fontes energéticas

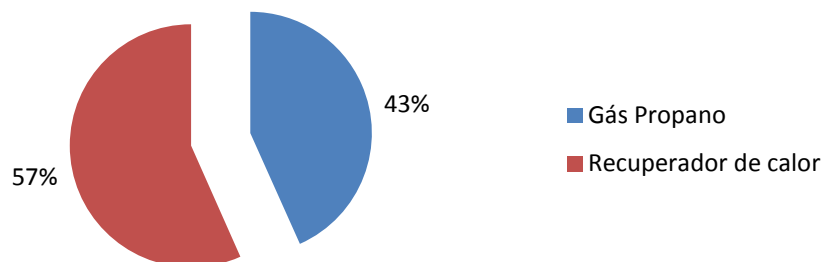


Gráfico 31 – Peso de fontes energéticas gás propano Vs. Recuprador de calor



### **6.3.3 Análise da viabilidade económica ao sistema com recuperador de calor (opção 2)**

Da mesma forma que fomos verificar a viabilidade económica para o sistema de painéis solares, também iremos analisar para o sistema com recuperador de calor.

Utilizando o mesmo formulário explicado no ponto 6.2.4, obtemos o seguinte:

Investimento inicial: 5.600,00 €

Este valor foi fornecido através de orçamento para os recuperadores, pela (DFD Instruments) para modelo Goupex model 106. Para o caudal de 17500 m<sup>3</sup>/h necessita de 3 módulos montados em paralelo.

Preço do gás propano em 2012: 1,193 [€/Kg].

Taxa de inflação anual: 2,6%.

Custos Associados à manutenção: 1% do investimento inicial, com respectiva actualização da inflação.

Considerada energia poupada: 14116 [kWh/Ano].

Foram considerados 20 anos para análise do investimento e utilizada a mesma taxa efectiva anual de 10% para cálculo do VAL.

Com estes dados, podemos verificar através do gráfico 30 que obtemos o retorno do investimento apenas no 5ºAno.

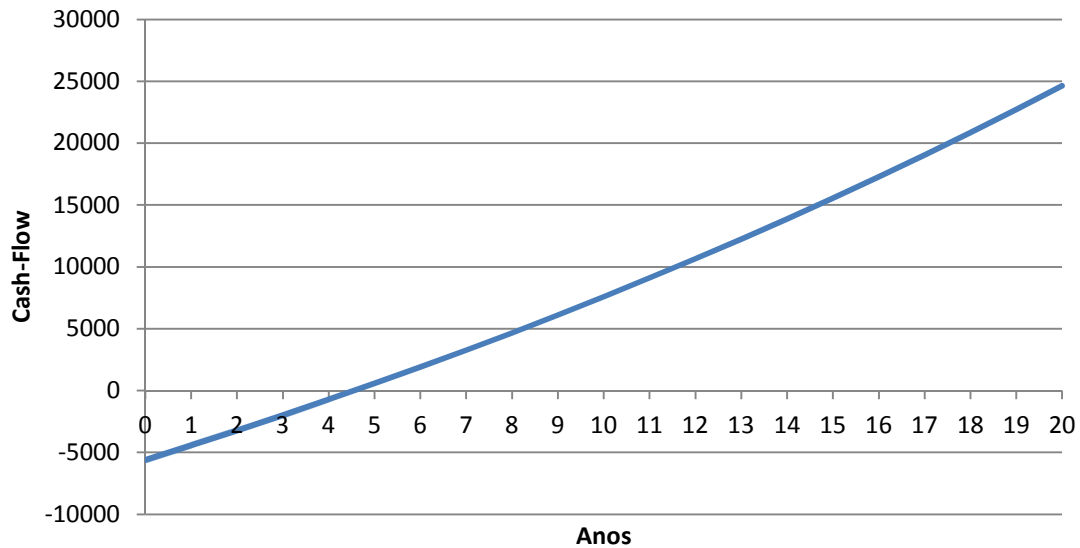


Gráfico 32 – Retorno do investimento opção 2

Para as condições atrás descritas vamos obter o **VAL = 6298,49 €** o que nos indica que o projecto é viável.

A TIR é obtida de 22,96, faz com se encare esta solução como uma boa solução, pois permite um nível de rentabilidade muito interessante. Este projecto tendo em conta o nível de investimento, o tempo de retorno e a rentabilidade que gera tem de ser encarado como uma solução bastante viável, talvez a melhor solução.

TIR = 22,96%

## 6.4 Sistema com colectores solares e recuperação de calor (Opção 3)

Nesta opção tendo em consideração que o sistema solar por si não é uma solução economicamente vantajosa, fomos então analisar a opção de juntar o recuperador de calor com um sistema de colectores solares. Assim, somando as duas opções podemos refazer os cálculos.

Para esta situação fomos associar ao sistema solar o recuperador de calor, conforme a ilustração 64.

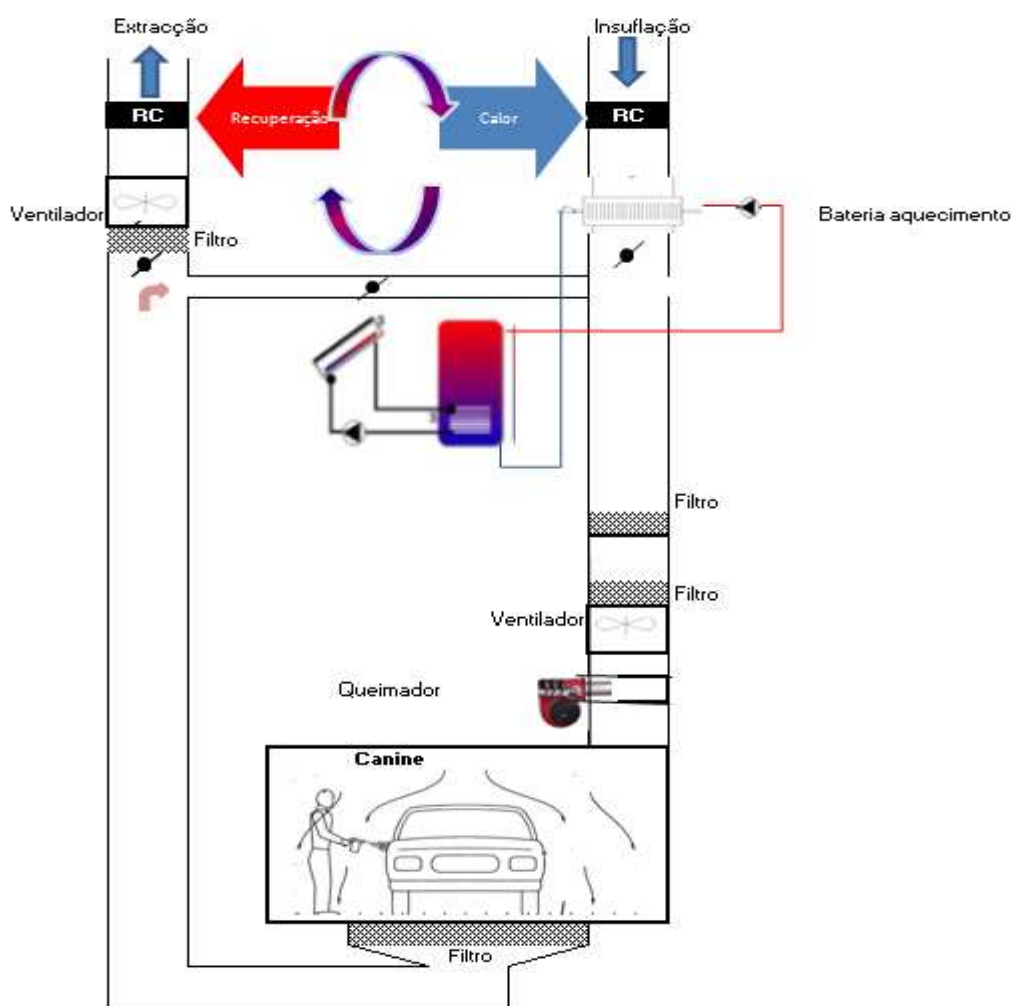


Ilustração 61 - Cabine com sistema auxiliar de colectores solares e recuperador de calor

Daí, conforme tabela 16 podemos verificar qual a necessidade energética que necessitamos retirar dos painéis solares.

	Q Recuperada	Q Necessária	Diferença entre a energia necessária e recuperada
	kWh/mês	kWh/mês	kWh/mês
Janeiro	2910	5747	2837
Fevereiro	2413	4262	1849
Março	1971	2858	887
Abril	1395	1512	117
Outubro	787	1549	762
Novembro	1851	3480	1629
Dezembro	2789	5501	2712

Tabela 16 – Resultado entre a energia recuperada e a efectivamente necessária

A diferença entre a energia necessária e a recuperada vai originar a nova necessidade energética. Com base nesta nova necessidade energética fomos assim reduzir a área de painéis solares e por consequência reduzir o investimento.

Com uma área de painéis correspondente a  $16,1m^2$ , ou seja, metade do proposto na opção 1 iremos obter produção energética constante da tabela 17 que se aproxima bastante das necessidades efectivas da solução com recuperador.

	Q Solar	Diferença entre a energia solar produzida e a nova necessidade energética
	kWh/mês	kWh/mês
Janeiro	1157	-1680
Fevereiro	1233	-616
Março	1257	370
Abril	1296	1179
Outubro	1452	690
Novembro	1541	-87
Dezembro	1090	-1621

Tabela 17 – Resultado entre a energia produzida e a necessária após recuperação

Como se pode ver na tabela 17 ficamos apenas dependentes de gás propano, para o processo de aquecimento da cabine a  $22^{\circ}C$ , nos meses a negativo.



Considerando que o recuperador de calor apenas é viável para a fase de aplicação dado que na de secagem estamos a fazer de recirculação, permite-nos quase anular a dependência do gás propano nos períodos de inverno, conforme podemos verificar na tabela 18.

Com aplicação de recuperador		
	Q necessária vs Qproduzida	
Outubro	1549	1549
Novembro	3480	3393
Dezembro	5501	1168
Janeiro	5747	4067
Fevereiro	4262	3646
Março	2858	2858
Abril	1512	2691
<b>TOTAL</b>	<b>24909 kWh</b>	<b>19372 kWh</b>
	1809 kg de gás	1412 kg de gás
	2.158,05 €	1.684,42 €

Tabela 18 - Sistema solar com recuperação de calor na extracção

De referir que para a respectiva tabela 18 considerou-se que nos meses onde há excedente de energia como é o caso de Março, Abril e Outubro apenas é considerado como energia produzida a efectivamente necessária.

## Distribuição de fontes energéticas

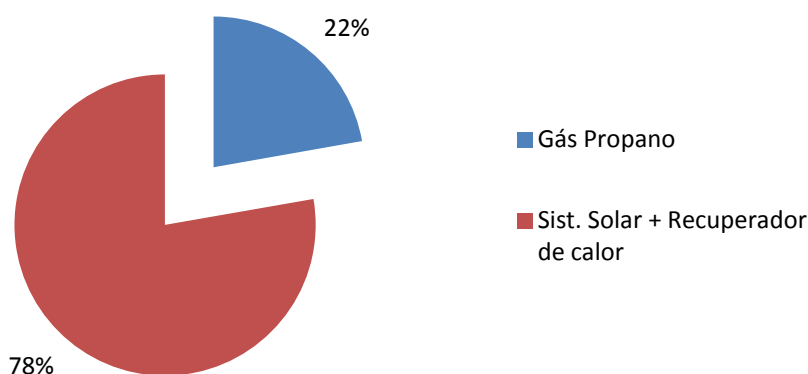


Gráfico 33 – Peso das fontes energéticas, Gás propano Vs Sist. solar + recuperador de calor

### 6.4.1 Análise da viabilidade económica ao sistema com recuperador de calor com sistema de coletores solares (opção 3)

Utilizando o mesmo método das opções anteriores vamos então estudar a viabilidade económica desta opção.

Investimento inicial: 15.700,00 €

Este valor corresponde a metade do valor orçamentado na opção 1 para o sistema de coletores solares adicionado ao valor de investimento do recuperador de calor.

Preço do gás propano em 2012: 1,193 [€/Kg].

Taxa de inflação anual: 2,6%.

Custos Associados à manutenção: 1% do investimento inicial, com respectiva actualização da inflação.

Considerada energia poupada: 19372 [kWh/Ano].

Foram considerados 20 anos para análise do investimento e utilizada a mesma taxa efectiva anual de 10% para cálculo do VAL.

Com estes dados, podemos verificar através do gráfico 30 que obtemos o retorno do Investimentos apenas no 7ºAno.

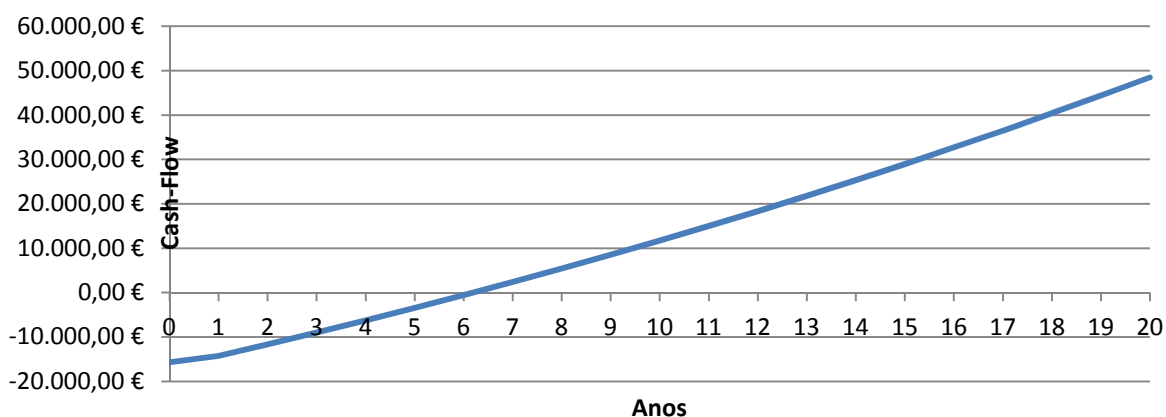


Gráfico 34 – Retorno do investimento opção 3

Para as condições atrás descritas vamos obter o **VAL = 9020,38 €** o que nos indica que o projecto é viável.

Para a taxa efectiva anual pretendida de 10%. Vamos obter um TIR bastante interessante .

TIR = 16,65%

A adaptação do recuperador ao sistema solar mostra-se uma boa solução, pois o recuperador no sistema veio viabilizar o sistema solar que de outra forma não seria viável.



## **6.5 Recuperação de calor do compressor (opção 4)**

Para se realizar trabalho implica obrigatoriamente a utilização de energia. Actualmente, muito se fala de fontes de energia (energia primária) - petróleo, electricidade, carvão, gás natural, energia solar, energia nuclear etc.

Neste capítulo iremos preocupar-nos particularmente com uma forma de energia final - **o ar comprimido**.

Nos diversos processos industriais a melhor opção de ferramenta de força e/ou controle é o ar comprimido, sendo utilizado como forma de energia de grande importância na indústria.

O ar comprimido é utilizado em larga escala na Indústria automóvel. No entanto, na grande maioria das instalações a energia térmica gerada na produção do mesmo é desaproveitada. Facto que nos dias de hoje é um desperdício que deve ser considerado e reaproveitado.

### **6.5.1 Compressores**

O desenvolvimento dos compressores acompanhou paralelamente o crescimento e as necessidades da indústria para ir ao encontro dos diferentes requisitos de volumes e pressões.

Os compressores podem ser classificados da seguinte forma:

- O tipo de tecnologia;
- Gama de débito;
- Pressão de descarga;
- Número de andares de compressão;
- Tipo de refrigeração (ar ou água);
- Lubrificação (com ou sem).

Quanto ao tipo de tecnologia, existem dois grupos básicos de compressores:

- Dinâmicos;
- Volumétricos.

Na indústria automóvel, na maioria dos casos, podemos encontrar dois tipos de compressores. Os compressores volumétricos rotativos de parafuso, utilizados em indústrias de maiores dimensões, e os compressores volumétricos alternativos de êmbolo, mais usuais nas pequenas empresas.

No caso prático em análise utiliza-se um compressor volumétrico tipo parafuso da marca CIATA, modelo RTB 30, com as características exposta na tabela 15.

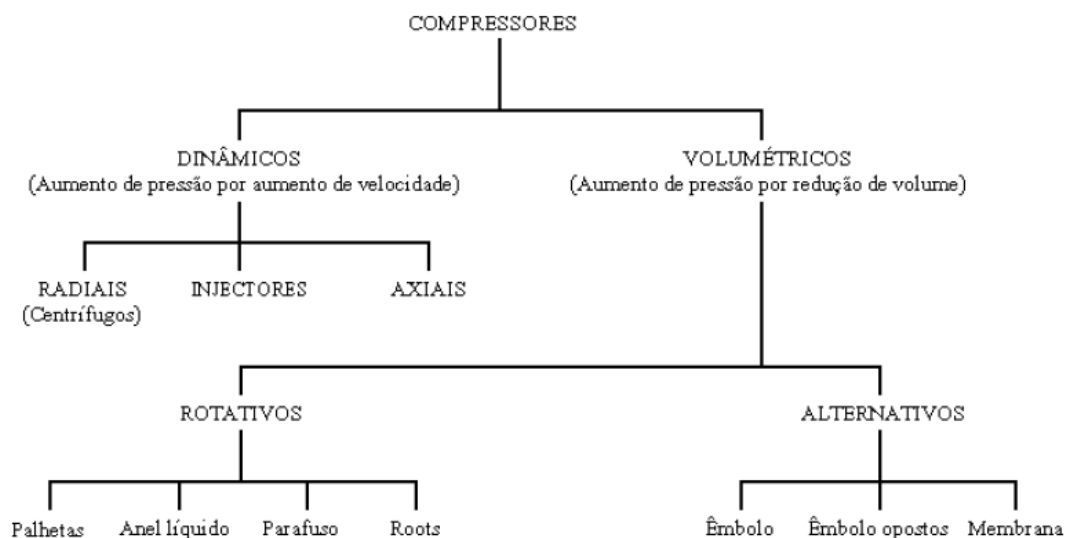


Ilustração 62– Tipos de compressores

(ADENE, Agência para a Energia, 2004)

### 6.5.2 Elementos principais numa instalação de produção de ar comprimido

Os principais elementos constituintes dos sistemas de produção de ar comprimido são os seguintes:

- Ar;
- Compressores;
- Arrefecedores (intermédio, posterior);
- Secadores (frigoríficos, adsorção, absorção);
- Reservatório de armazenamento de ar comprimido;
- Rede de distribuição;
- Filtros;

- Lubrificadores;
- Reguladores de pressão.

O equipamento standard para as instalações de compressores de ar de deslocamento positivo deve incluir um filtro de aspiração, um arrefecedor posterior e um reservatório de ar. Em muitas instalações, particularmente com certos compressores rotativos, é necessário instalar silenciadores de aspiração e possivelmente também de descarga, não sendo o caso da situação em concreto da instalação em estudo.

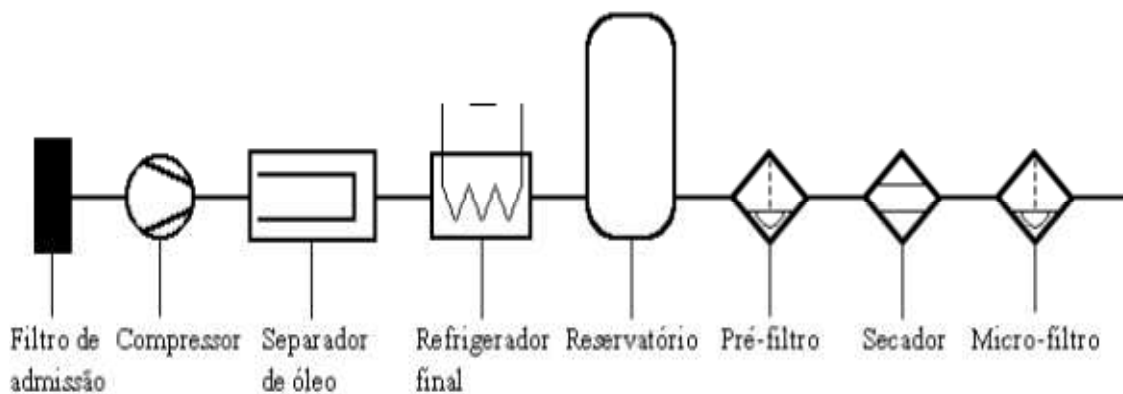


Ilustração 63– Esquema da Instalação de produção de ar comprimido

(ADENE, Agência para a Energia, 2004)

Os compressores alternativos podem necessitar igualmente de um silenciador de aspiração, não com o objectivo de reduzir o ruído, mas sim para amortecer as pulsações.

Os compressores dinâmicos não exigem a instalação de reservatório de ar e o uso de arrefecedores posteriores dependerá da aplicação específica. Devem ser instalados filtros de aspiração e por vezes é necessário incluir silenciadores de aspiração.

Nos **compressores dinâmicos** o ar é acelerado até uma determinada velocidade e conduzido para um difusor que converte a energia cinética em pressão. Existem três tipos de compressores dinâmicos que se distinguem basicamente pelo método como imprimem velocidade ao ar:



- Radiais (centrífugos)
- Axiais
- Injectores

Nos **compressores volumétricos** o ar é encerrado num espaço e a compressão é realizada por intermédio da redução do volume do espaço. Este método de compressão é realizado em dois tipos de compressores:

- Alternativos
- Rotativos

Dado que a instalação em causa está equipada com um compressor tipo parafuso, vamos então debruçar-nos sobre este compressor. Nos compressores de parafuso cerca de 85 a 90% da potência é consumida pelo rotor macho e os restantes 10 a 15% pelo rotor fêmea. Existem compressores de parafuso não lubrificados que produzem ar comprimido isento de óleo através da utilização de engrenagens de sincronização externas para os rotores macho e fêmea. Ao não existir fricção entre os rotores e a carcaça, não se requer lubrificação no interior da câmara de compressão. A utilização de compressores não lubrificados não elimina a necessidade da filtragem do ar. Além disto o investimento inicial e os custos de exploração são substancialmente superiores relativamente aos lubrificados.

Não há que recear pela presença de óleo no interior do compressor, tanto mais que o óleo desempenha três funções nobres: arrefece o ar durante a compressão, veda os rotores e lubrifica-os.

Há, sim, a necessidade de impedir a presença de óleo na rede de distribuição através da instalação de elementos filtrantes que actualmente permitem obter o grau de pureza que se pretenda.



### **6.5.3 Localização da instalação**

Os compressores deverão ser instalados numa sala ou edifício à parte, de um modo simples e prático, com baixos custos de instalação e funcionamento.

Uma instalação compressora necessita de cablagens e tubagens para a electricidade, água de refrigeração, ar de aspiração e comprimido, devendo ser instalada para que cada tubagem e cabo sejam facilmente acessíveis para reparações e ajustes.

Actualmente instalam-se os compressores com os equipamentos auxiliares e as tubagens de aspiração, o arrefecedor posterior (aftercooler) e, frequentemente, também os reservatórios, como unidades independentes, possibilitando para uma unidade para manutenção ou operação sem afectar o serviço prestado por outra unidade.

A aspiração dos compressores de reduzida capacidade realiza-se, normalmente, na própria sala de compressores, enquanto que, para os de maior dimensão a aspiração efectua-se no exterior da sala.

Deve efectuar-se a aspiração exterior a pelo menos três metros de altitude e sempre a um nível superior ao telhado para evitar reflexões do ruído. No extremo da tubagem de aspiração deve instalar-se uma malha protectora e uma campânula.

Se a aspiração é realizada no interior da sala, requer-se a existência de uma ventilação adequada.

É aconselhável a existência de uma tubagem de aspiração independente por compressor, não sendo recomendada a instalação de um colector de aspiração comum.

O arrefecedor não será abordado dado que é um equipamento que foi dispensado nesta instalação, assim vamos dar mais importância aos secadores de ar pois esse sim existe.



#### **6.5.4 Secadores**

A instalação de secadores tem como finalidade reduzir o ponto de orvalho do ar comprimido para valores compatíveis com a temperatura ambiente e com a sua aplicação.

A instalação de secadores que proporcionam um baixo teor de humidade apresentam, nos sistemas de ar comprimido, as seguintes vantagens:

- Redução até 30% do custo de instalação da rede de ar, pela não necessidade de dispositivos de eliminação de água;
- Redução até 25% dos gastos com a manutenção da rede, válvulas, ferramentas, devido ao risco mínimo de corrosão;
- Menores riscos de fugas de ar devidas à corrosão;
- Evita-se o arraste de lubrificante nas ferramentas;
- Maior qualidade dos produtos tratados no caso de aplicações sensíveis à água;
- Minimiza-se o risco de congelação em tubagens exteriores;
- Obtêm-se um ponto de orvalho constante, independentemente da carga.

Para rentabilizar o processo de secagem, requer-se um tratamento prévio do ar comprimido para que o mesmo cumpra as seguintes condições:

- temperatura inferior a 35o C (com o arrefecedor posterior consegue-se, normalmente, cumprir este requisito);
- isenção de óleo (é conseguido com a colocação de um filtro);
- isenção de partículas sólidas (é conseguido com a colocação de um filtro à entrada do secador).

#### **6.5.5 Reservatório de ar comprimido**

O reservatório de ar comprimido é instalado imediatamente depois do arrefecedor posterior e tem as seguintes funções:

- Armazenar o ar comprimido necessário para suprir as pontas de consumo que excedam a capacidade do compressor;



- Aumentar o arrefecimento do ar comprimido e recolher condensados e óleo;
- Amortecer as variações de pressão na rede de distribuição;
- Evitar os ciclos de carga e vazio ou paragem do compressor demasiado curtos;
- Amortecer a pulsação do ar comprimido produzido em compressores alternativos.

Os reservatórios deverão ser instalados, sempre que possível, no exterior da central de ar comprimido, num local fresco para facilitar o arrefecimento do ar e aumentar a condensação do vapor de água.

### 6.5.6 Volume do reservatório

As dimensões do reservatório dependem do débito do compressor, do sistema de regulação de caudal, da pressão de trabalho e das variações previstas no consumo de ar.

Para as pressões de trabalho mais vulgares, entre 7 e 9 bar, admitem-se como volumes orientadores de base os apresentados no quadro seguinte.

CONDIÇÕES	VOLUME DO RESERVATÓRIO (m <sup>3</sup> )
- consumos homogéneos - regulação carga parcial-vazio	um décimo do débito do compressor expresso em m <sup>3</sup> /min
- consumos irregulares - regulação automática	igual ao débito do compressor expresso em m <sup>3</sup> /min

Tabela 19 – Selecção de depósito de ar comprimido

(ADENE, Agência para a Energia, 2004)

### 6.5.7 Rede de distribuição

A rede de distribuição tem como função transportar o ar comprimido para os diversos utilizadores com a mínima introdução de perdas de carga e de fugas. Para evitar a ocorrência de excessivas perdas de carga e fugas, a rede de



distribuição deve ter a mínima extensão possível, a quantidade necessária e suficiente de acessórios e o diâmetro das condutas adequado.

As redes de distribuição devem ser dimensionadas de modo a que as perdas de carga entre a unidade compressora e o ponto de consumo mais afastado não excedam os 0,3 bar. Para instalações que cobram áreas bastante grandes é admissível uma perda de carga superior, no entanto esta nunca deverá ultrapassar os 0,5 bar. (ADENE, Agência para a Energia, 2004)

As perdas de carga devem-se a determinados factores e elementos que provocam resistência ao movimento do ar, dos quais se destacam os seguintes:

- A velocidade na secção da conduta;
- As uniões;
- As soldaduras;
- A rugosidade do interior das condutas;
- As curvas e os ângulos da rede;
- Os acessórios
- As válvulas;

$$\left( \frac{\log P_2}{\log P_1} - 1 \right) \times 100 = \text{Acréscimo no consumo de energia} \quad (28)$$

onde:  $P_1$  - Pressão absoluta de descarga do compressor para uma perda de carga mínima

$P_2$  - Pressão absoluta de descarga do compressor para uma perda de carga excessiva

*(ADENE, Agência para a Energia, 2004)*

É importante ter a noção de que a perda de carga varia substancialmente com o diâmetro adoptado da tubagem. Por exemplo, para um determinado caudal, a



redução do diâmetro numa tubagem para metade, provoca um incremento da velocidade do ar comprimido e, a perda de carga aumenta 39 vezes.

As velocidades admissíveis nas linhas de ar têm como valores normais entre os 6 e 10 m/s, que são suficientemente baixos para não criar excessivas perdas de carga e dificultar a separação da água. Nos ramais de tubagem curtos admitem-se maiores velocidades porque, sendo curtos, não produzem uma excessiva queda de pressão.

### 6.5.8 Energia recuperada no processo compressão do ar

A energia mecânica utilizada no ciclo de compressão é transformada em calor e, apenas 4% dessa energia permanece no ar comprimido. As perdas por radiação representam 2% e os restantes 94%, que geralmente são dissipados nos sistemas de refrigeração e que podem ser teoricamente recuperados. Na prática, segundo (ADENE, Agência para a Energia, 2004) é possível recuperar até 80% da energia consumida pelo compressor, na forma de água quente com 50°C-80°C ou ar quente com 50°C-60°C, permitindo a sua aplicação em águas quentes sanitárias, sistemas de aquecimento e acondicionamento ambiente, alimentação de caldeiras, etc.

No caso do compressor em estudo, podemos considerar o comportamento energético e económico aproximado conforme tabela 15.

Capacidade do compressor	215 m <sup>3</sup> /h
Potência do motor	22 kW
Rendimento do motor	0,95
Tempo de funcionamento considerado	2200 hora/Ano
Custo Energia Eléctrica	0,14 [€/kWh]
Energia consumida	48400 kWh
Factura energética anual	6776,00 €

Tabela 20 – Comportamento energético anual para compressor Ciata RTB 30



Vejam os então para o compressor em causa que quantidade de energia poderia recuperar com a aplicação de um sistema de recuperação de calor.

O compressor em causa produz aproximadamente 118 l/s de ar comprimido a 8 bar. Partindo de base que podemos recuperar 80% da energia consumida pelo compressor, por questões de segurança iremos desenvolver o nosso estudo partindo do princípio que apenas 60% da energia é recuperável para produção de água quente.

Então teríamos:

Calor dissipado em plena carga	20,7 kW
Calor recuperável	12,4 kW
Quantidade de energia recuperável	27298 kWh/Ano
Quantidade de gás poupado	1989 kg
Tempo de funcionamento considerado	2200 hora/Ano
Preço da energia que substitui	1,193 [€/kg]
Economia anual	2373,04 €

Tabela 21 – Economia potencial do aproveitamento energia térmica do compressor

É importante referir que as 2200 horas de funcionamento do compressor são retiradas da leitura do próprio equipamento e corresponde a cerca de 9 horas diárias por dia útil de trabalho.

O Registo de horas representa o ano 2011, de onde retiramos que tivemos cerca de 240 dias úteis de trabalho e que o compressor ligava às 08:00h e desligava por volta das 18:00h.

Recuperando 27298 kWh/ano através do compressor, podemos afirmar que esta fonte seria suficiente para manter a temperatura da cabine a 22°C durante todo o ano.

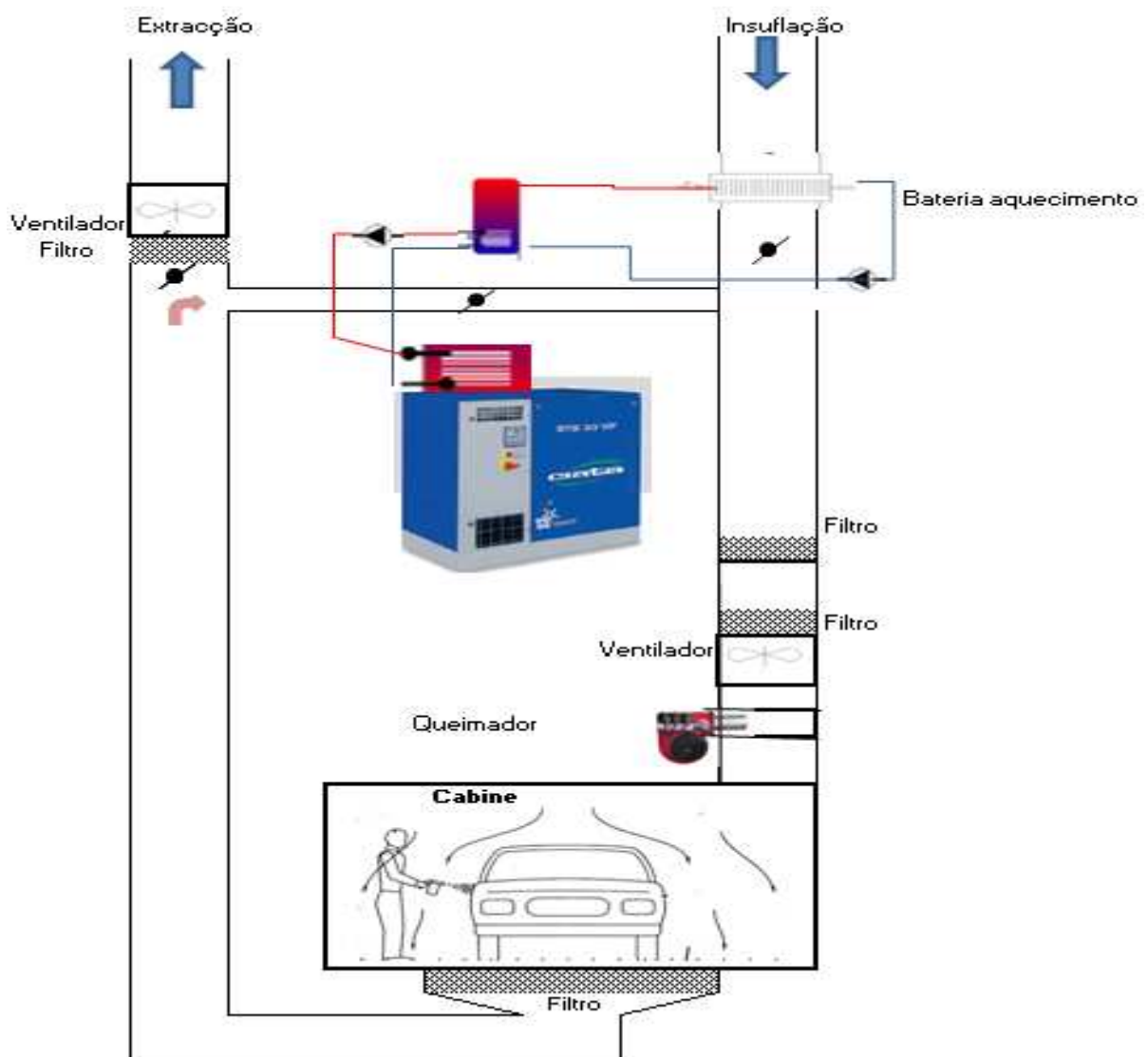


Ilustração 64– Compressor como sistema auxiliar.

### 6.5.9 Análise da viabilidade económica ao sistema com recuperador de calor do compressor (opção 4)

Vamos analisar a opção 4 do ponto de vista económico, para tal consideraram-se os seguintes dados:

Investimento inicial: 16000,00 €



Este valor foi fornecido através de estimativa efectuada com preços de 2 recuperadores de calor Ar/Água, tubagens e isolamentos, bomba de recirculação e serviço de instalação.

Considerada energia poupada: 27298 [kWh/Ano]

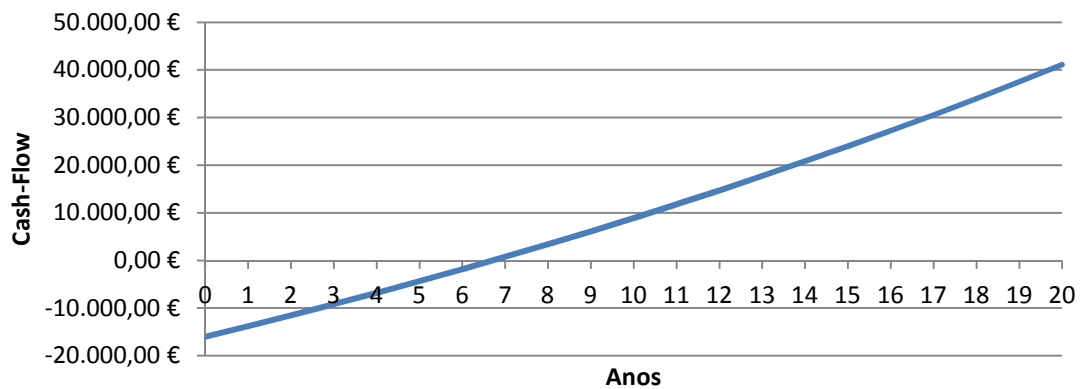


Gráfico 35 – Retorno investimento opção 4

VAL= 6484,52 €

TIR = 15,03%

Do ponto de vista económico esta é também uma boa solução.

## 6.6 Conclusão

Do ponto de vista energético constatamos que todas as soluções permitem poupanças energéticas significativas. A solução dois, onde é aplicado de forma isolada apenas o sistema de recuperação de calor nas condutas de extracção e insuflação, é a que consegue menores resultados do ponto de vista energético.

Podemos então definir que do ponto de vista energético existem diversas possibilidades que podem ser soluções viáveis, pois todas permitem ser instaladas com alguma facilidade nos sistemas convencionais actualmente em funcionamento. O grande factor que pode tornar as opções viáveis ou não, prende-se com o ponto de vista financeiro.

A análise económica realizada neste ponto permitiu-nos identificar as diferenças das soluções analisadas anteriormente. Verificamos assim que a solução dos painéis solares quando aplicado de forma isolada e para fazer face às necessidades energéticas do processo, torna-se economicamente inviável.

Através da tabela 19 podemos comparar as quatro opções estudadas e poderemos traçar opções que melhor se ajustam em função do investimento pretendido.

Comparativo				
	Opção 1	Opção 2	Opção 3	Opção 4
Período em Análise [Anos]	20	20	20	20
Taxa efectiva anual [%]	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%
Investimento inicial [€]	20.200,00 €	5.600,00 €	15.700,00 €	16.000,00 €
Retorno Investimento [Anos]	13	5	7	7
VAL [€]	-6.366,53 €	6.298,49 €	9.020,38 €	6.484,52 €
TIR [%]	5,42%	22,96%	16,65%	15,03%

Tabela 22 – Comparativo económico das soluções propostas

Podemos verificar que os investimentos em soluções de poupança energética são sempre vantajosos, pois acrescentam valor às organizações. Estes investimentos podem considerar-se seguros e com rentabilizações

interessantes a longo prazo. Outro fator importante que pesa também na tomada de decisão, reside no facto de diminuir a dependência do mercado petrolífero.

Na análise das opções apenas a opção 1 é talvez a única desaconselhável dado o valor do investimento inicial, sendo o VAL obtido negativo. Esta solução apenas poderia ser considerada caso se verificassem outras necessidades energéticas para além das estudadas neste trabalho, que aproveitassem o excesso de energia produzida nos meses de verão.

Para uma melhor comparação, vejamos a tabela 23 onde se apresenta o quadro resumo referente a cada opção estudada.

	Vantagens	Desvantagens
<b>Opção 1</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Redução da dependência de combustíveis fosse;</li> <li>- No período de Verão, muita energia disponível para outras aplicações.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elevado investimento inicial;</li> <li>- Tempo de retorno do investimento longo;</li> <li>- Maior parte da energia disponível fora do período de utilização.</li> </ul>
<b>Opção 2</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Investimento inicial interessante</li> <li>- Facilidade de adaptação ao sistema existente</li> <li>- Período de retorno de 5 anos</li> <li>- VAL e TIR interessantes;</li> <li>Redução de consumos de gás propano na ordem dos 20% anuais.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Existência de cabines recentes no mercado já com esta solução preconizada de origem;</li> <li>- Mantém uma dependência grande do gás propano como fonte auxiliar.</li> </ul>
<b>Opção 3</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diminuição considerável das necessidades de combustível fóssil auxiliar;</li> <li>- Energia disponível no Verão para outras aplicações;</li> <li>- VAL e TIR interessantes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dificuldades técnicas dado a particularidade da instalação</li> </ul>
<b>Opção 4</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Quantidade de energia disponível;</li> <li>- Praticamente anula a dependência a outros recursos energético para a fase de aplicação;</li> <li>- VAL e TIR interessantes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Particularidade e complexidade da instalação;</li> </ul>

Tabela 23 – Quadro resumo de vantagens e desvantagens de cada opção



UNIVERSIDADE DO ALGARVE - INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA

**Mestrado em Energia e Climatização de Edifícios**



## **Conclusão Final**

Na conclusão final, podemos afirmar que o presente trabalho atingiu os objectivos propostos dado que permitiu conhecer e analisar soluções que sejam alternativas energéticas e economicamente viáveis para o aquecimento das cabines de pintura automóvel.

Pode-se assim afirmar que existem soluções que possibilitam diminuir a dependência do gás propano, como fonte principal no fornecimento de energia, no processo de pintura automóvel.

A redução substancial da fonte energética através de sistemas de recuperação de energia ou a sua transferência para fontes energéticas que não dependam de combustíveis fósseis é, actualmente, um assunto de primordial importância para o sector. Quer do ponto de vista económico, quer do ponto de vista ambiental, as vantagens são claras.

A opção 1, sistema solar, não se revelou como uma boa opção em função dos resultados do ponto de vista económico.

A melhor solução de entre as opções estudadas é sem dúvida a opção 2, o sistema de recuperação de calor, pois assume características únicas que se destacam das demais e que se caracteriza pelo seguinte:

- Baixo investimento;
- Facilidade técnica de aplicação;
- Período de retorno relativamente curto, 5 anos;
- Muito boa rentabilidade.

A opção 3, sistema solar e recuperador de calor associados, são também uma boa opção, mas esta solução seria mais interessante caso existissem outras necessidades energéticas, como por exemplo águas quentes sanitárias.

A opção 4, sistema de recuperação de calor do trabalho do compressor, é também em uma opção interessante dado que esta fonte energética é completamente desperdiçada na maioria das instalações industriais existentes. Como vimos no estudo a energia que se pode reaproveitar é significativa. O



facto de não haver no mercado equipamentos concebidos e pensados para este tipo de solução, cria uma oportunidade, embora a sua dificuldade técnica associada ao valor do investimento possa reduzir a iniciativa das empresas.

As opções 2, 3 e 4, não só se apresentam como bons investimentos, como contribuem de forma significativa para a melhoria de emissões de CO<sub>2</sub>.

Conseguiu-se demonstrar que existem soluções técnica e economicamente viáveis, que podem reduzir os consumos desta actividade.

Constatou-se também que nem sempre é dada a importância devida aos factores energéticos nesta actividade. Pelo que, esperamos que o presente trabalho possa também servir o propósito de sensibilizar os intervenientes para a necessidade de reduzirmos o consumo energético, em especial proveniente de combustíveis fósseis e de reaproveitarmos os recursos disponíveis.

Se continuarmos a fazer o mesmo, iremos obter os mesmos resultados.

Este trabalho permite ainda deixar alguns pontos que possamos futuramente explorar e desenvolver, como:

- Dimensionamento dos sistemas propostos;
- Analisar a possibilidade do sistema solar aproveitar o excedente de energia no período de verão para aquecimento de águas quentes sanitárias ou outro sistema;
- Analisar sistemas a funcionar com 2 ou mais cabines em simultâneo.



## Referências

ADENE, Agência para a Energia. (2004). *Eficiência Energética na Indústria*. Gaia: ADENE.

Airless.com. (s.d.). *Airless.com*. Obtido de <http://www.airless.com.au/>

Benito, M., & António, J. (1992). *Apontamentos de Energia Solar-Sistemas solares activos*.

BP- Portugal. (2005). *Ficha de Informação do produto Gasóleo* .

BTT Car Tools Co. Ltd. (s.d.). Obtido de [http://www.alibaba.com/product-gs/424674014/Spray\\_Booth\\_For\\_Water\\_Based\\_Paint.html](http://www.alibaba.com/product-gs/424674014/Spray_Booth_For_Water_Based_Paint.html)

Çengel, Y. A. (2003). *Heat Transfer a practical approach*.

COMGÁS -Companhia de gás de São Paulo. (2011). *COMGÁS*. Obtido em 2011, de <http://www.comgas.com.br/#>

DFD Instruments. (s.d.). *Goupex*. Obtido em 03 de 2012, de <http://www.gupex.co.uk/main/index.php>

Diy Trade Global B2B Trading Plataforf. (2012). *Diytrade*. Obtido de <http://www.diytrade.com/china/manufacturer/697627/pl/122302-t-c/Automobile.html>

Duffie, J. A., & Bekman, W. A. (1990). *Solar Engineering of thermal process*. New york: john Wiley & Sons, Inc.

Echo Choice SA. (2006). *SoITerm 5.0*.

Finishing Academy by Global Finishing Solutions. (2011). Obtido em 2011, de Finishing Academy: [http://finishingacademy.com/training/Refinish/Module1/mod1\\_booth\\_history.html](http://finishingacademy.com/training/Refinish/Module1/mod1_booth_history.html)

Firat Spray booths. (2011). *Ilkemek*. Obtido de [http://www.ilkemek.com/ilkemek\\_en/bf.html](http://www.ilkemek.com/ilkemek_en/bf.html)

*Fundamentals ASHRAE and Books*. (1998).



*Fundamentals ASHRAE and Books.* (2009).

Gama Gases. (2007). *gamagases*. Obtido em 2012, de Gama Gases: [http://www.gamagases.com.br/propriedades\\_propano.htm](http://www.gamagases.com.br/propriedades_propano.htm)

Hangzhou Asia-City Machinery Co., Ltd. (s.d.). *Hangzhou Asia-City Machinery*. Obtido de <http://www.hz-yacheng.com/>

INEGI, Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Ambiental. (2011). *Caracterização de afluentes gasosos*. Faro: Caetano Auto Algarve S.A.

ISQ - EAUT 307/10, I. -R. (2010). *Caracterização temperaturas cabine pintura*. ISQ.

LULUSOSO. (s.d.). *LULUSOSO.COM*. Obtido de <http://www.lulusoso.com/>

Ministério da Economia e Inovação. (2007). Decreto-Lei n.º199/2007.

Ozisik, M. N. (1990). *Transferência de calor*. McGraw-Hill.

Pereira, M. C. (1998). *Energias renováveis - Opção inadiável*. SPES - Sociedade Portuguesa de Energia Solar.

SAIMATEC. (s.d.). *Saimatec*. Obtido em 2011, de [Saimatec.com.br](http://www.saimatec.com.br): <http://www.saimatec.com.br/produtos.php?pg=produtos.php&p=27>

Sociedade Portuguesa de energia Solar, Manual Instaladores INETI. *Conversão Térmica da Energia Solar*. Lisboa: Sociedade Portuguesa de energia Solar.

Spence, M. (1993). *Energia Solar*.

Xindianlian Electric Appliance Equipment, F. (03 de 2012). *Xindianlian Electric Appliance Equipment Factory*. Obtido em 03 de 2012, de <http://xindianlian.en.alibaba.com/productlist.html>

## Anexos

### 1. TSV

$$\text{TSV} = \text{UTC} + \text{CL} + \text{E}$$

- TSV – Tempo Solar Verdadeiro
- UTC- Tempo Universal Coordenado
- CL – Correção da longitude

$$\text{CL} = 4^{**}(\text{Longitude Greenwich} - \text{Longitude Lugar})$$

Longitude Greenwich=0

Longitude Lugar: Positivo a Oeste; Negativo a Este.

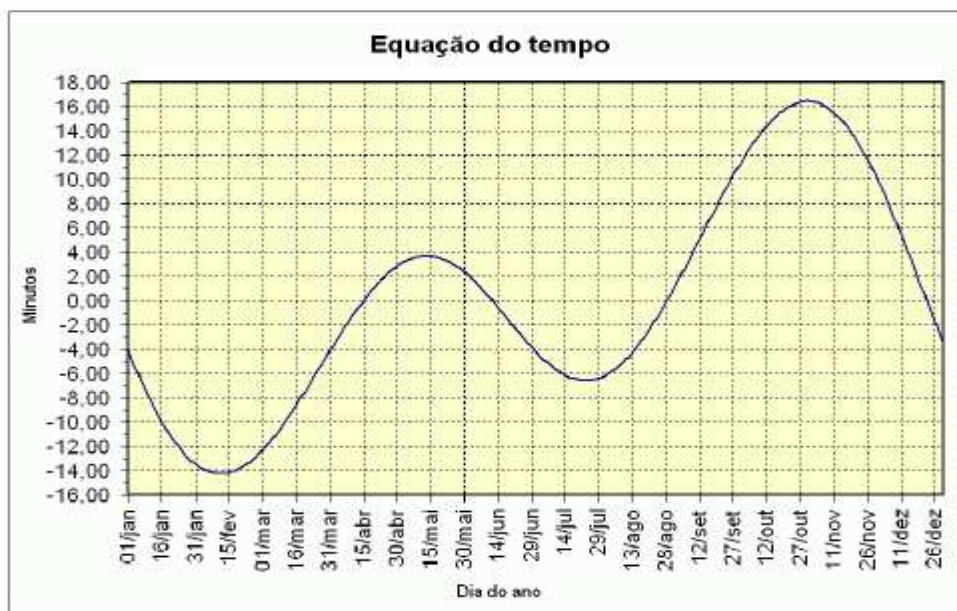
Subtrai-se 4 minutos por cada grau a Oeste. Soma-se 4 minutos por cada grau a Este.

- E - Equação do tempo (ver wikipédia)

#### Hora Legal

Inverno: Hora Legal=UTC

Verão: Hora Legal=UTC+1:00h



## 2. Propriedades físicas do Ar

Propriedades físicas de gases na pressão atmosférica							
T, K	$\rho$ , $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$c_p$ , $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$	$\mu$ , $\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$	$\nu$ , $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ $\times 10^6$	$k$ , $\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$	$\alpha$ , $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ $\times 10^4$	Pr
<b>Amónia, NH<sub>3</sub></b>							
220	0,9304	2,198	$7,255 \times 10^{-6}$	7,8	0,0171	0,2054	0,93
273	0,7929	2,177	9,353	11,8	0,0220	0,1308	0,90
323	0,6487	2,177	11,035	17,0	0,0270	0,1920	0,88
373	0,5590	2,236	12,886	23,0	0,0327	0,2619	0,87
423	0,4934	2,315	14,672	29,7	0,0391	0,3432	0,87
473	0,4405	2,395	16,49	37,4	0,0467	0,4421	0,84
<b>Ar</b>							
100	3,6010	1,0266	$0,6924 \times 10^{-5}$	1,923	0,009246	0,02501	0,770
150	2,3675	1,0099	1,0283	4,343	0,013735	0,05745	0,753
200	1,7684	1,0061	1,3289	7,490	0,01809	0,10165	0,739
250	1,4128	1,0053	1,488	9,49	0,02227	0,13161	0,722
300	1,1774	1,0057	1,983	15,68	0,02624	0,22160	0,708
350	0,9980	1,0090	2,075	20,76	0,03003	0,2983	0,697
400	0,8826	1,0140	2,286	25,90	0,03365	0,3760	0,689
450	0,7833	1,0207	2,484	28,86	0,03707	0,4222	0,683
500	0,7048	1,0295	2,671	37,90	0,04038	0,5564	0,680
550	0,6423	1,0392	2,848	44,34	0,04360	0,6532	0,680
600	0,5879	1,0551	3,018	51,34	0,04659	0,7512	0,680
650	0,5430	1,0635	3,177	58,51	0,04953	0,8578	0,682
700	0,5030	1,0752	3,332	66,25	0,05230	0,9672	0,684
750	0,4709	1,0856	3,481	73,91	0,05509	1,0774	0,686
800	0,4405	1,0978	3,625	82,29	0,05779	1,1951	0,689
850	0,4149	1,1095	3,765	90,75	0,06028	1,3097	0,692
900	0,3925	1,1212	3,899	99,3	0,06279	1,4271	0,696
950	0,3716	1,1321	4,023	108,2	0,06525	1,5510	0,699
1000	0,3524	1,1417	4,152	117,8	0,06752	1,6779	0,702
1100	0,3204	1,160	4,44	138,6	0,0732	1,969	0,704
1200	0,2947	1,179	4,69	159,1	0,0782	2,251	0,707
1300	0,2707	1,197	4,93	182,1	0,0837	2,583	0,705
1400	0,2515	1,214	5,17	205,5	0,0891	2,920	0,705
1500	0,2355	1,230	5,40	229,1	0,0946	3,262	0,705
1600	0,2211	1,248	5,63	254,5	0,100	3,609	0,705
1700	0,2082	1,267	5,85	280,5	0,105	3,977	0,705

(Ozisik, 1990)

### 3. Propriedades do gás propano

(Gama Gases, 2007)	
Calor de combustão, gás a 25°C e pressão constante para formar H <sub>2</sub> O (líquido) + CO <sub>2</sub> (gás).	2.220,03 kJ/mol; 530,60 kcal/mol.
Calor de combustão, gás a 25°C e pressão constante para formar H <sub>2</sub> O (gás) + CO <sub>2</sub> (gás).	2.044,01 kJ/mol; 488,53 kcal/mol.
Calor de combustão, líquido a 25 °C e pressão constante para formar H <sub>2</sub> O (líquido) + CO <sub>2</sub> (gás).	2.203,42 kJ/mol; 526,53 kcal/mol.
Calor de combustão, líquido a 25 °C e pressão constante para formar H <sub>2</sub> O (gás) + CO <sub>2</sub> (gás).	2.027,4 kJ/mol; 484,56 kcal/mol.
Calor latente de fusão a 85,5°C	3,534 kJ/mol; 19,1 kcal/kg.
Calor molar específico, gás a 101,325 kPa e 26,8°C a pressão constante.	74,01 J/(mol x K);
Calor molar específico, gás a 101,325 kPa e 26,8°C a volume constante.	64,81 J/(mol x K);
Calor molar específico, líquido a 25°C.	111,13 J/(mol x K); 26,56 cal/(mol x K)
Condutividade térmica, gás a 101,325 kPa e 25°C.	0,01674 W/(m x K); 40,0 x 10 <sup>-6</sup> cal/(s x cm x °C)
Condutividade térmica, líquido a -40°C.	0,1485 W/(m x K); 354,9 x 10 <sup>-6</sup> cal/(s x cm x °C)
Constante dielétrica a 0°C	1,61
Densidade absoluta, gás a 101,325 kPa e 20°C.	1,868 kg/m <sup>3</sup>
Densidade crítica	0,225 kg/dm <sup>3</sup>
Densidade relativa, gás a 101,325 kPa e 20°C (ar=1)	1,55
Densidade, líquido a pressão de saturação a 20°C.	0,5005 kg/L
Fator crítico de compressibilidade	0,271
Fórmula.	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
Limites de inflamabilidade no ar.	2,2-9,5% (molar)
Massa Molecular	44,0956
Ponto de ebulição a 101,325 kPa.	231,09 K; -42,1°C; -43,7°F
Ponto de fulgor.	169,15 K; -104°C; -155,2°F
Ponto triplo	85,44 K; -187,7°C; -305,9°F



Pressão crítica	4.266 kPa; 42,66 bar; 618,7 psia; 42,10 atm
Pressão de vapor a 21,1°C	853 kPa; 8,53 bar; 123,7 psia; 8,42 atm
Razão do calor específico, gás a 101,325 kPa e 25°C, Cp/Cv.	1,142
Solubilidade em água a 101,325 kPa e 18°C	6,5 cm <sup>3</sup> /0,1kg de água
Temperatura crítica	369,99 K; 96,8°C; 206,3°F
Temperatura de auto-ignição	741 K; 468°C; 874°F
Tensão superficial a -40°C	15,3 mN/m; 15,3 dyn/cm
Viscosidade, gás a 101,325 kPa e 20°C.	0,00790 cP.
Viscosidade, líquido a -40°C.	0,22 cP
Volume crítico	4,438 dm <sup>3</sup> /kg
Volume específico a 21,1°C e 101,325 kPa	530,6 dm <sup>3</sup> /kg; 8,5 ft <sup>3</sup> /lb

(Gama Gases, 2007)



## 4. Propriedades do gasóleo

### 9. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS

Valores típicos

PRODUTO:	Método de ensaio	Unidades	Gasoleo
Estado físico			líquido
Cor			âmbar claro
Odor			semelhante a gasóleo
Densidade a 15°C	ASTM D 1298	kg/m <sup>3</sup>	800 - 890
Viscosidade a 40°C	ASTM D 445	mm <sup>2</sup> /s	1 - 6
Ponto de ebulição/intervalo	ASTM D 86	°C	160 - 385
Ponto de inflamação (vaso fechado)	ASTM D 93	°C	>56
Límites de explosividade (superior e inferior)		%	0.6 - 6.5
Coefficiente de partição		Log10Pow	>3
Solubilidade em água		g/l	baixa solubilidade

(BP- Portugal, 2005)

## 5. Propriedades combustíveis

### Notas

Carvão PCI= 6250 kcal/kg=26 168 kJ/kg  
Fuelóleo PCI= 9600 kcal/kg= 40 193 kJ/kg  
Gasóleo PCI= 10 200 kcal/kg=36 086 kJ/l  
Gás natural PCI=9028 kcal/m<sup>3</sup> N= 37 800 kJ/m<sup>3</sup>N

(Ministério da Economia e Inovação, 2007)



## **6 . Propriedades do gás Natural**

### **Poder calorífico superior (PCS)**

Quantidade de calor produzida durante a combustão completa de uma unidade de volume ou massa de combustível.

Poder calorífico superior a 20°C e 1 atm: 9.000 kcal/m<sup>3</sup> a 10.200 kcal/m<sup>3</sup>.

Com relação a este documento, deve ser assumido o valor de 9.430 kcal/m<sup>3</sup> a 20°C e 1 atm.

### **Poder calorífico inferior (PCI)**

Quantidade de calor produzida durante a combustão completa de uma unidade de volume ou massa de combustível sem que ocorra a condensação do vapor de água nele contido.

Poder calorífico inferior a 20°C e 1 atm: 8.364 kcal/m<sup>3</sup> a 9.160 kcal/m<sup>3</sup>.

Com relação a este documento, deve ser assumido o valor de 8.600 kcal/m<sup>3</sup> a 20°C e 1 atm.

### **Densidade relativa**

A densidade relativa do gás natural é a relação existente entre seu peso específico e o peso específico do ar.

A densidade relativa do gás natural varia entre 0,59 e 0,65 (20°C), dependendo de sua composição.

Com relação a este documento, deve ser assumido o valor de 0,60.

(COMGÁS -Companhia de gás de São Paulo, 2011)

## 7 . Propriedades físicas dos metais.

Metal	Propriedades a 20°C				Condutividade térmica $k$ , W/(m · °C)								
	Ponto de fusão °C	$\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	$C_p$ , kJ/kg · °C	$k$ , W/m · °C	$\alpha$ , m <sup>2</sup> /s × 10 <sup>5</sup>	0°C	100°C	200°C	300°C	400°C	600°C	800°C	1.000°C
Alumínio													
Puro	660	2.707	0,896	204	8,418	202	206	215	228	249			
Duralumínio (Al-Cu), 94-96% Al, 3-5% Cu, traços de Mg		2.787	0,883	164	6,676	159	182	194					
Al-Si (Silumin, mancal de cobre), 86,5% Al, 1% Cu		2.659	0,867	137	5,933	137	144	152	161				
Al-Si (Alusil) 78-80% Al, 20-22% Si		2.627	0,854	161	7,172	157	168	175	178				
Al-Mg-Si, 97% Al, 1% Mg, 1% Si, 1% Mn		2.707	0,892	177	7,311	175	189	204					
Berílio	1.277	1.850	1,825	200	5,92								
Bismuto	272	9.780	0,122	7,86	0,66								
Cádmio	321	8.650	0,231	96,8	4,84								
Chumbo	328	11.373	0,130	35	2,343	35,1	33,4	31,5	29,8				
Cobre													
Puro	1.085	8.954	0,3831	386	11,234	386	379	374	369	363	353		
Bronze de alumínio 95% Cu, 5% Al		8.666	0,410	83	2,330								
Bronze 75% Cu, 25% Sn		8.666	0,343	26	0,859								
Latao vermelho 85% Cu, 9% Sn, 6% Zn		8.714	0,385	61	1,804	59	71						
Latao 70% Cu, 30% Zn		8.522	0,385	111	3,412	88	128	144	147	147			
Prata alemã 62% Cu, 15% Ni, 22% Zn		8.618	0,394	24,9	0,733	19,2	31	40	45	48			
Constantan 60% Cu, 40% Ni		8.922	0,410	22,7	0,612	21	22,2	26					
Estanho puro	232	7.304	0,2265	64	3,884	74	65,9	59	57				
Ferro													
Puro	1.537	7.897	0,452	73	2,034	73	67	62	55	48	40	36	35
Ferro forjado, 0,5% C		7.849	0,46	59	1,626	59	57	52	48	45	36	33	33
Aço													
(C máx ≈ 1,5%):													
Aço carbono		7.833	0,465	54	1,474	55	52	48	45	42	35	31	29
C ≈ 0,5%		7.801	0,473	43	1,172	43	43	42	40	36	33	29	28
1,0%		7.753	0,486	36	0,970	36	36	36	35	33	31	28	28
1,5%													

(Ozisik, 1990)