



UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Alfonso Aparicio Vega

Funcionamiento óptimo de sistema de AQS solar com backup eléctrico

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

14/07/2014



Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Funcionamento óptimo de sistema de AQS solar com backup eléctrico

Alfonso Aparicio Veja

Júri: António Paulo Mendes Breda Dias Coimbra, Álvaro Filipe Peixoto Cardoso de
Oliveira Gomes, Tony Richard de Oliveira de Almeida

14/07/2014

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, em primeiro lugar, aos meus país e irmã, pelo seu apoio constante e confiança infinita, todas as coisas boas que venham são graças a vocês.

Ao meu avô Jaime, pelos seus conselhos e ânimos para que estudasse. Eu sei que onde estejas, estarás muito orgulhoso de mim.

Aos familiares que ainda não mencionei, por fazer-me sentir sempre o vosso carinho.

Agradeço a minha namorada, por ser como é, nunca cambies.

Aos amigos de sempre e aos que apareceram neste maravilhoso ano, por deixar-me viver o vivido ao vosso lado.

Ao meu tutor, por guiar-me até aqui.

O contínuo crescimento de população e junto com a, cada vez, maior demanda de energia fazem que os recursos energéticos procedentes do petróleo, até agora os mais utilizados, estejam a esgotar-se. Além do seu esgotamento, ao queimar este tipo de combustíveis para obter a energia, está-se emitindo CO₂ e outros gases à atmosfera, contribuindo ao chamado efeito estufa, tão presente hoje em dia, provocado pela barreira que fazem estes gases, retendo a radiação do sol e produzindo um aquecimento global.

O dito no parágrafo anterior faz que as pessoas tentemos de buscar alternativas a estes combustíveis, as chamadas energias renováveis. Entre estas energias estão a hidráulica, a eólica, a energia dos mares, a solar térmica e fotovoltaica... Esta dissertação vai estar centrada na energia solar, especificamente no seu aproveitamento para aquecimento de água.

Dito estudo tem três partes, a primeira corresponde ao dimensionamento da superfície de painéis, a segunda à uma breve análise ambiental e a terceira estará orientada a um estudo de caráter económico, realizando uma análise de distintos sistemas de apoio à instalação solar.

Palavras-chave: solar térmica, água quente sanitária, AQS, dimensionamento, aquecimento água, sistemas de apoio AQS

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| LISTA DE FIGURAS | 1 |
| LISTA DE TABELAS | 2 |
| LISTA DE ABREVIACÕES | 3 |
| i. INTRODUÇÃO | 4 |
| ii. OBJETIVOS | 6 |
| iii. DESCRIÇÃO DO MODELO | 7 |
| iii.i DIMENSIONAMENTO | 7 |
| iii.i.i Estudo das necessidades de AQS | 7 |
| iii.i.ii Estudo da radiação..... | 8 |
| iii.i.iii Verificação das perdas..... | 8 |
| iii.i.iv Método F-chart..... | 13 |
| iii.ii ANÁLISE AMBIENTAL | 16 |
| iv. CASO PRÁTICO | 17 |
| iv.i DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO | 17 |
| iv.ii APLICAÇÃO DO MODELO | 23 |
| iv.ii.i Dimensionamento..... | 24 |
| iv.ii.ii Estudo ambiental | 34 |
| v. ANÁLISE DIÁRIA | 40 |
| v.i EXPLICAÇÃO DA FERRAMENTA EXCEL | 40 |
| v.ii SIMULAÇÃO E ESTUDO COM DADOS REAIS | 45 |
| v.iii ANÁLISE DE RESULTADOS | 48 |
| vi. CONSIDERAÇÕES FINAIS | 49 |
| BIBLIOGRAFIA | 51 |
| ANEXO 1: Dados meteorológicos | 52 |
| ANEXO 2: Padrões de consumo | 53 |
| ANEXO 3: Tabelas para o cálculo das perdas por sombras | 55 |

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ângulo de inclinação do painel

Figura 2. Ângulo de azimute do painel

Figura 3. Método gráfico para cálculo de perdas por orientação e inclinação

Figura 4. Diagrama de trajetórias do sol.

Figura 5. Esquema de instalação

Figura 6. Esquema de um painel solar.

Figura 7. Bomba centrífuga

Figura 8. Trocador de calor placas

Figura 9. Tanque acumulador solar

Figura 10. Estratificação num acumulador de AQS

Figura 11. Esquema da instalação para um sistema de apoio mediante resistência elétrica

Figura 12. Cálculo gráfico das perdas por orientação e inclinação

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Perdas máximas admissíveis (CTE)

Tabela 2. Dados iniciais

Tabela 3. Consumo de AQS

Tabela 4. Demanda de energia mensal térmica para AQS

Tabela 5. Radiação numa superfície horizontal em Coimbra. Fonte: NASA

Tabela 6. Coeficientes k para a correção de radiação numa superfície inclinada. Fonte: IDAE

Tabela 7. Valores de k para uma de 25° e latitude +40°

Tabela 8. Energia térmica solar disponível em Coimbra

Tabela 9. Perdas máximas admissíveis (CTE) no caso de integração arquitetónica

Tabela 10. Resumo das perdas por inclinação, orientação e sombras, e comparação com os valores do CTE

Tabela 11. Cálculo de D1

Tabela 12. Cálculo de D2

Tabela 13. Fração solares mensais

Tabela 14. Energia útil captada

Tabela 15. Demanda AQS

Tabela 16. Energia fornecida pela instalação solar e pelo sistema de apoio

Tabela 17. Redução de emissões de CO₂ e consumo de combustível

Tabela 18. Características dos combustíveis

Tabela 19. Tarifário gás natural

Tabela 20. Resultados análise diária

Tabela 21. Resultados análise conservadora

LISTA DE ABREVIACÕES

AQS: Água quente sanitária

CTE: Código Técnico de Edificación

IDAE: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

RCCTE: Reglamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

i. INTRODUÇÃO

O aumento contínuo do consumo de energia a nível mundial provocado pelo crescimento da população, unido ao crescimento do consumo “per capita” dos recursos energéticos, requer uma constante busca de novos recursos e sistemas que possam atender essa demanda, tanto seja qualitativa ou quantitativa.

Embora existam muitas alternativas energéticas, algumas delas não tem sido todavia suficientemente utilizadas, seja por limitações técnicas ou económicas, ou porque o seu desenvolvimento e utilização prática foi apenas parcial. De fato, a maior parte da energia é obtida a partir dos chamados combustíveis fósseis, compostos principalmente de petróleo e seus derivados (gasolina, diesel, querosene, óleo combustível, etc.), gás natural e carvão.

Enquanto no início da sua exploração, esses recursos eram considerados ilimitados e o impacto ambiental era insignificante, estas considerações mudaram agora dramaticamente, principalmente devido ao aumento do consumo de energia com tal intensidade que os impactos ambientais já não podem ser menosprezados. Ao mesmo tempo é cada vez mais difícil de satisfazer o consumo, impondo à necessidade de encontrar e explorar depósitos combustíveis de acesso cada vez mais difícil.

Os recursos energéticos são utilizados pelo homem para satisfazer algumas das suas necessidades básicas na forma de calor e trabalho. O calor é necessário para aplicações como climatização de espaços, cozinhar alimentos ou a produção ou transformação de alguns produtos químicos. O trabalho é usado para uma variedade de processos onde se tem que superar as forças que se opõem ao levantamento de uma massa em um campo gravitacional, deformar um corpo ou fazer fluir um líquido ou gás. Calor e trabalho são, portanto, duas necessidades básicas para a vida diária do humano. Mas, para uma sintonia perfeita entre tecnologia e natureza, é necessário o desenvolvimento de outras fontes de energia menos agressivas para o meio ambiente.

Entre as possíveis alternativas, a utilização direta do Sol para o aquecimento de água será o enfoque principal deste trabalho.

Ao estender-se através do espaço em todas as direções, a energia radiante do Sol reparte-se em uma esfera fictícia, cujo centro é o Sol e cujo raio cresce a mesma velocidade que a própria radiação. Assim, a intensidade num ponto sobre a referida superfície esférica, ao repartir-se a energia solar sobre uma área a cada vez maior, é muito menor quanto maior é o raio da mesma. O

valor aproximado desta intensidade à distância na que se encontra o nosso planeta a partir do Sol é chamada constante solar, e é 1367 W/m^2 . A verdade é que a constante solar sofre pequenas variações, porque a distância entre a Terra e o Sol não é estritamente constante, devido a que a órbita da Terra não é circular, mas sim elíptica. A camada atmosférica é um obstáculo à livre passagem de radiação, devido a vários efeitos que incluem a reflexão na parte superior das nuvens e a absorção parcial por diferentes moléculas de ar. Isso faz que a radiação que atinge a superfície terrestre, mesmo em dias claros e atmosfera muito limpa, raramente é superior a 1000 W/m^2 .

Nosso objetivo é aproveitar ao máximo os efeitos físicos da radiação, adaptando a utilização dos dispositivos de captação da energia solar, a fim de obter a energia na forma que é exigida para cada necessidade. Dois dos aproveitamentos mais difundidos referem-se à conversão de radiação solar em energia térmica e fotovoltaica. Neste projeto incidirá-se sobre o primeiro, tentando captar com coletores solares planos a radiação solar máxima para a produção de água quente num determinado edifício.

A razão pela qual a produção de água quente sanitária por energia solar é a aplicação mais adequada para as características da mesma é porque o intervalo de temperaturas que são necessárias atingir, entre 40°C e 60°C , coincide com o intervalo de maior eficiência dos coletores solares. Para além disso, é uma necessidade que deve ser satisfeita durante os doze meses do ano, pelo que o investimento no sistema vai ter um retorno mais rápido do que no caso de aplicações sazonais, tal como o aquecimento no inverno, ou aquecimento de piscinas no verão.

ii. OBJETIVOS

Os objetivos do projeto são desenhar e estudar uma instalação solar térmica para a produção de AQS numa vivenda unifamiliar na cidade de Coimbra. É um objetivo triplo, pois inclui o dimensionamento do conjunto de coletores, a análise do consumo de energia auxiliar e a análise meio ambiental e de poupança de combustível. Ênfase especial será dada à utilização mais adequada do sistema de *backup* elétrico.

Para fazer isso, deveremos encontrar e calcular os seguintes parâmetros:

- Os dados meteorológicos (temperatura externa, radiação solar, velocidade do vento)
- Consumo e aquecimento de água quente sanitária (Temperatura AQS, temperatura da água da rede, demanda diária de AQS)
- Instalação solar proposta (coletores solares, circuito primário, fluido de trabalho, trocadores, circuito secundário e sistemas de armazenamento)
- Balanço de energia (demanda mensal e anual de energia, assim como o cálculo das contribuições de origem solar que podem ser obtidas)
- Preços de diversos combustíveis (eletricidade, butano, gasóleo)
- Padrões de consumo de AQS da família em questão.

iii. DESCRIÇÃO DO MODELO

Para a simulação e avaliação do comportamento da instalação em questão, vamos fundamentarmos no método de F-Chart, criado por John A. Duffie e William A. Beckman [6] e utilizado para calcular a cobertura de um determinado sistema de energia solar térmica, ou seja, a sua contribuição à aportação de calor total necessária para cobrir as necessidades, e o seu rendimento médio num período de tempo.

iii.i DIMENSIONAMENTO

Além do método de F-Chart, o qual seguiremos pelas instruções do IDAE, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, [4], teremos como referencia o regulamento português RCCTE, Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios [3], o qual nos determina as necessidades de AQS no caso de consumo residencial, junto com outros pontos do IDAE e o CTE, Código Técnico de Edificación [2], da regulação espanhola, principalmente por ter incluído um método simples para calcular as perdas por inclinação, orientação e sombras. A seguir, a explicação do modelo:

iii.i.i Estudo das necessidades de AQS

O consumo de AQS estimado é determinado segundo o tipo de edifício que se quer estudar e segundo o número de pessoas.

Neste caso, o RCCTE indica que para edifícios residenciais, o consumo é de 40 litros por habitante. Agora, sabendo as pessoas que farão uso de AQS e os litros que são precisos por pessoa, estaremos em posição de calcular a demanda de energia de AQS mensal, mediante a seguinte equação, extraída do Pliego de Condiciones Térmicas de Instalaciones de Baja Temperatura do IDAE [4]:

$$DE_{mês,i} = 1,16 \times 10^{-3} \times D_{dia} \times N_{dias,i} \times C_p \times \rho \times (T_{AQS} - T_{rede,i}) \quad (1)$$

- $DE_{mês,i}$: Demanda energética mensal (kWh)
- D_{dia} : quantidade de água quente necessária (m^3 / dia).
- $N_{dias,i}$: número de dias que tem o mês correspondente.
- C_p : calor específico da água. (kcal/kg.K)
- ρ : densidade da água. (kg/m^3)
- T_{AQS} : temperatura de consumo de AQS ($^{\circ}C$)

- $T_{rede,i}$: temperatura média mensal de água da rede (°C)

Para rematar com esta seção, faltaria estabelecer uma fração ou cobertura solar requerida. No nosso caso, a família solicitou obter, como mínimo, a metade da energia através da instalação solar.

iii.i.ii Estudo da radiação

Uma vez que a fonte energética usada é a energia solar, é de vital importância para o projeto conhecer a “quantidade” de energia disponível na localização do edifício, assim como as sombras que se produzam ou outro tipo de dados que são importantes, como a inclinação e orientação dos painéis.

A quantidade de energia que o sol proporciona é o que chamamos radiação, e trabalharemos utilizando valores médios mensais. Estes valores de radiação são os que correspondem à energia em kilowatt-hora que incide sobre um metro quadrado de superfície horizontal num dia médio de cada mês.

Obter estes dados não é uma tarefa difícil, pois há várias bases de dados que podemos utilizar para obter estes valores.

Uma vez recolhidos os valores de radiação para cada mês, é preciso realizar uma correção destes valores, pois na maior parte dos casos reais a estudar, a disposição dos painéis solares não é horizontal. Estes costumam ter uma determinada inclinação ou estar integrados arquitetonicamente. Por isso é necessário realizar esta correção nos valores de radiação, segundo a latitude e a inclinação.

A radiação solar sobre uma superfície inclinada é obtida a partir da seguinte formulação:

$$I(\beta) = k \times I(0^\circ) \quad (2)$$

- $I(\beta)$ representa o valor da radiação numa superfície inclinada.
- K representa o fator de correção.
- $I(0^\circ)$ representa o valor da radiação numa superfície horizontal.

Neste caso, no CTE [podemos atostar umas tabelas nas que estão representados os valores de k , em função da latitude e da inclinação. Estas tabelas serão as que utilizaremos.

iii.i.iii Verificação das perdas

A inclinação e a orientação dos coletores pode diferir das ideais. Embora tal desvio possa ser aceitável, as perdas por esta causa devem encontrar-se dentro do limite máximo

admissível. Ambas características são definidas pelos parâmetros β (ângulo de inclinação) e α (o azimute), que são definidos como segue:

- Ângulo de inclinação, β : Ângulo formado pela superfície do painel com o plano horizontal.

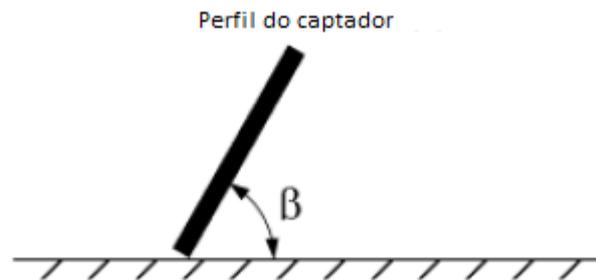


Figura 1. Ângulo de inclinação do painel

- Azimute, α : ângulo entre a projeção sobre o plano horizontal da perpendicular à superfície do painel e o meridiano do lugar. Tomará o valor de 0° para o Sul, 90° para o oeste e -90° para o leste.

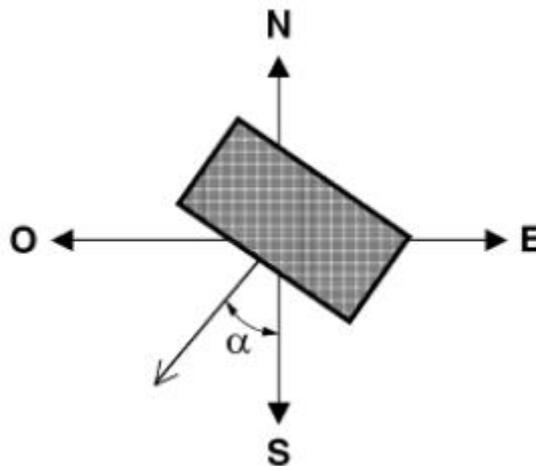


Figura 2. Ângulo de azimute do painel

Além disso, as perdas máximas permitidas são refletidas na Tabela 1:

Tabela 1. Perdas máximas admissíveis (CTE)

| Caso | Orientação e inclinação | Sombras | Total |
|---------------------------------|--------------------------------|----------------|--------------|
| General | 10% | 10% | 15% |
| Superposição | 20% | 15% | 30% |
| Integração arquitetônica | 40% | 20% | 50% |

- Perdas por inclinação dos painéis

Para o cálculo de perdas devido à inclinação dos painéis, utiliza-se a seguinte fórmula, [4]:

$$P (\%) = 100 \cdot (1,2 \cdot 10^{-4} \cdot (\beta - \beta_{opt})^2 + 3,5 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha^2) \quad (3)$$

Segundo o CTE, a inclinação ótima dos painéis (β_{opt}) é a seguinte:

- A latitude geográfica para uma demanda anual constante.
- A latitude geográfica +10 ° para uma demanda preferente de inverno.
- A latitude geográfica -10 ° para uma demanda preferente de verão.

- Perdas devidas à inclinação mais a orientação

Para obter as perdas devidas à inclinação e orientação utilizamos um método gráfico [2]:

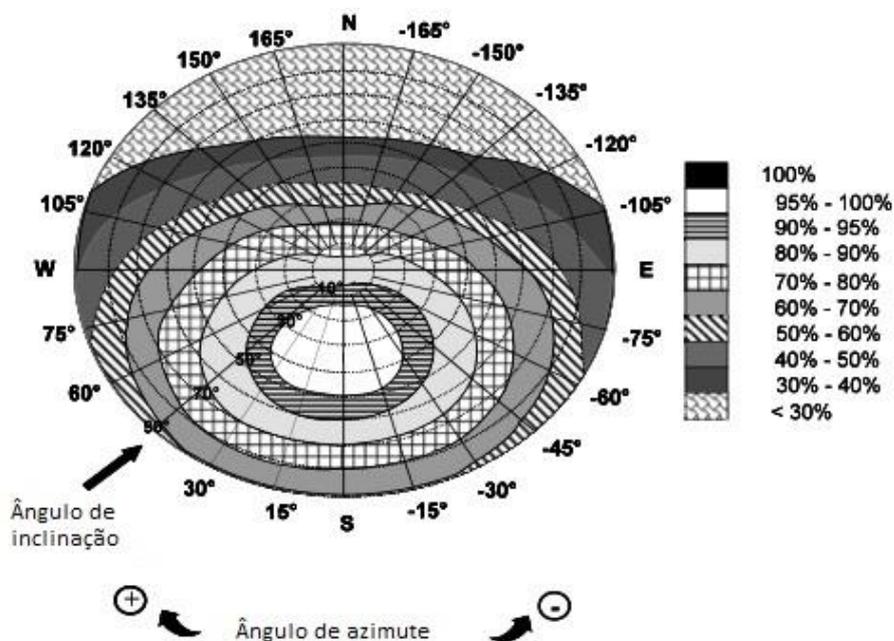


Figura 3. Método gráfico para cálculo de perdas por orientação e inclinação

Neste método gráfico, entramos na circunferência com o ângulo de orientação dos nossos painéis e com o da inclinação, obtendo assim um ponto em alguma região identificada como está indicado à direita na figura 3. Comprovando a região do nosso ponto, saberemos a percentagem de perdas com que trabalharemos.

Se o valor de perdas é inferior ao máximo permissível, podemos continuar o processo, noutro caso deveríamos trocar o ângulo de orientação ou de inclinação até trabalhar com umas perdas aceitáveis.

- Perdas por sombras

O procedimento para o cálculo das perdas por sombras consiste na comparação do perfil de obstáculos que afeta à superfície de painel com o diagrama de trajetórias do sol.

O primeiro que temos que fazer é localizar os principais obstáculos que afetam os painéis, em termos das suas coordenadas de azimute (ângulo de desvio respeito à direção sul) e elevação (ângulo de inclinação respeito ao plano horizontal). Quando o obstáculo estiver localizado, devemos de representar o seu perfil no diagrama que se segue [4], onde se amostra o conjunto de trajetórias do sol ao longo de todo o ano. Este diagrama é válido para localizações da Península Ibérica ou Baleares. Em caso de fazer o estudo noutros lugares, o diagrama deveria ser modificado.

O conjunto de trajetórias encontra-se dividido em porções, delimitadas pelas horas solares e identificadas por uma letra e um número (A1, A2,..., D14).

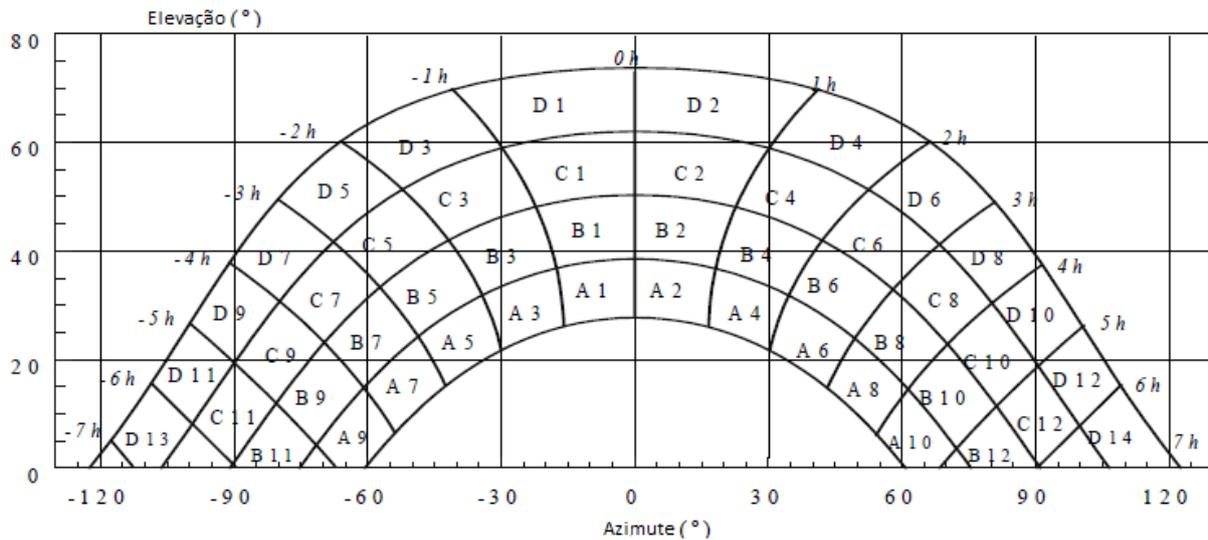


Figura 4. Diagrama de trajetórias do sol

Cada uma das porções da figura representa o percurso do sol num certo intervalo de tempo, e tem, portanto, uma certa contribuição à radiação solar que incide sobre a superfície de estudo. Assim, o feito de que um obstáculo tape uma das porções supõe uma perda de radiação, em particular aquela que seja interceptada pelo obstáculo. Deve escolher-se para o cálculo a tabela de referência mais adequada.

A comparação do perfil de obstáculos com o diagrama de trajetórias do sol permite calcular as perdas por sombras de radiação solar global que incide sobre a superfície ao longo do ano. Para isto temos de somar as contribuições das partes do painel que sejam total ou parcialmente ocultas pelo perfil de obstáculos representado. No caso de ocultação parcial, utiliza-se um fator de sombreamento (fração oculta respeito do total da porção) mais próximo aos valores: 0,25, 0,50, 0,75 ou 1.

As tabelas incluídas no anexo 3 referem-se a distintas superfícies caracterizadas pelos seus ângulos de inclinação e orientação (β e α , respetivamente). Deve escolher-se aquela que resulte mais adequada à superfície em estudo. Os números que estão em cada caixa correspondem à percentagem de radiação solar que se teria perdido se a porção correspondente fosse interceptada por um obstáculo.

Em caso de obter uma percentagem de perdas inferior ao máximo permissível, estamos em disposição de continuar com o estudo da instalação. Em caso contrário, a localização dos painéis não é correta, e teremos que buscar outra posição para a dita superfície coletora.

iii.i.iv Método F-chart

Para desenvolver o método, é necessário trabalhar com os valores de consumo mensais calculados. Uma vez obtidos os valores de consumo energética de AQS mensal, estamos em disposição de começar a aplicar o método.

Sua aplicação consiste em calcular o valor da fração solar atingida para cada mês, f , e com estes valores, obter a energia útil captada pela instalação solar em questão.

A equação utilizada neste método pode ser vista na seguinte fórmula,[6]:

$$f = 1,029D_1 - 0,065D_2 - 0,245D_1^2 + 0,0018D_2^2 + 0,0215D_1^3 \quad (4)$$

A sequência que geralmente se segue no cálculo é a seguinte, [402]:

1. Avaliação do consumo energética mensal de AQS.
2. Avaliação da radiação solar sobre a superfície inclinada de coletores.
3. Cálculo do parâmetro D_1 .
4. Cálculo do parâmetro D_2 .
5. Elaboração da gráfica f .
6. Valoração da cobertura solar mensal.
7. Valoração da cobertura solar anual e formação de tabelas.

O parâmetro D_1 expressa a relação entre a energia absorvida pelo captador de placa plana e o consumo calorífico ou de energia térmica de AQS por mês:

$$D_1 = \text{Energia absorvida pelo captador} / \text{consumo de energia de AQS}$$

A energia absorvida pelo captador vem dada pela seguinte expressão:

$$E_a = S_c \cdot \eta_o \cdot MAI \cdot FC_{int} \cdot R_l \cdot N \quad (5)$$

onde:

S_c = Área do captador (m^2)

η_o = Rendimento ótico do coletor, de acordo com a folha de dados do fabricante. É a ordenada na origem da curva característica do coletor.

MAI = modificador do ângulo de incidência. Em geral pode-se tomar como constante: 0,96 (superfície transparente simples) ou 0,94 (superfície transparente dupla). No nosso caso tomaremos o valor de 0,96.

FC_{int} = fator de correção do conjunto captador-permutador. O IDAE recomenda tomar o valor de 0,95.

R_1 = Insolação diária média mensal incidente sobre a superfície de captação por unidade de área (kJ/m^2)

N = Número de dias no mês

O parâmetro D_2 expressa a relação entre as perdas de energia no coletor, para uma determinada temperatura e demanda de energia de AQS para um mês:

$$D_2 = \text{energia perdida através do coletor} / \text{demanda de energia de AQS}$$

A energia perdida pelo coletor vem dada pela seguinte expressão:

$$E_p = S_c \cdot K_{glob} \cdot FC_{int} \cdot (100 - t_{amb}) \cdot FC_{acum} \cdot FC_{AQS} \cdot 24 \cdot N_{dias} \quad (6)$$

onde:

S_c = Área do captador (m^2)

K_{glob} = coeficiente de perda de calor total do coletor solar. É calculado mensalmente com base na fórmula:

$$K_{global} = k_1 + k_2 (T_m - T_{amb}) \quad (7)$$

- k_1 e k_2 são os coeficientes linear e quadrático de perdas do coletor, dados pelo fabricante de painéis solares escolhido. No nosso caso, $k_1=3,78 \text{ W}/(m^2.K)$ e $k_2=0,0156 \text{ W}/(m^2.K^2)$. Como T_m (temperatura média dentro do painel) utilizaremos a temperatura de AQS, 60°C .

t_{amb} = Temperatura ambiente média diária.

FC_{acum} = Fator de correção do acumulador. É calculado usando a fórmula dada no IDAE, da seguinte forma:

$$FC_{acum} = (V_{acum}/S_c/75)^{-0,25} \quad (8)$$

- Com uma relação de $50 \text{ l/m}^2 \leq V_{\text{acum}}/S_c \leq 180 \text{ l/m}^2$

FC_{AQS} = Fator de correção por temperatura. É calculado usando a fórmula dada no IDAE da forma que segue:

$$FC_{\text{AQS}} = 11,6 + 1,18 t_{aq} + 3,86 t_r - 2,32 t_{amb} / (100 - t_{amb}) \quad (9)$$

onde:

t_{aq} = temperatura mínima de AQS.

t_r = temperatura da água da rede

t_{amb} = temperatura ambiente média mensal

Depois de ter obtido D_1 e D_2 , pela aplicação da equação inicial calcula-se a fração de carga calorífica mensal fornecida pelo sistema solar.

Assim, a energia útil captada cada mês, Q_u , tem o valor:

$$Q_u = f Q_a \quad (10)$$

onde:

Q_a = consumo calorífico mensal de AQS

Através do mesmo procedimento desenvolvido para um mês, calcularemos a cobertura solar para todos os meses do ano. A relação entre a soma das coberturas mensais e a soma dos consumos de AQS determinará a cobertura anual do sistema:

$$\text{Cobertura solar anual} = \sum_{u=1}^{u=12} Q_u / \sum_{u=1}^{u=12} Q_a \quad (11)$$

Por último, o rendimento anual do sistema está definido como a relação entre a soma das coberturas mensais e a soma do produto da superfície de captação pela radiação mensal:

$$\text{Rendimento anual do sistema} = \sum_{u=1}^{u=12} Q_u / (\sum_{u=1}^{u=12} S_c \cdot I(\beta)_{\text{mês}}) \quad (12)$$

iii.ii ANÁLISE AMBIENTAL

Uma vez dimensionada a superfície de coletores, estamos em posição de analisar a instalação no que diz respeito ao meio ambiente. Neste sentido, o estudo vai estar centrado no cálculo da quantidade de combustível para fornecer certa quantidade de energia e no cálculo das emissões de CO₂ à atmosfera.

- Cálculo da quantidade necessária de combustível

A expressão que vamos a utilizar para calcular a quantidade de combustível que precisamos para atender certa demanda de energia é a seguinte:

$$Q = V \cdot PCI \cdot \eta_{caldeira} \quad (13)$$

Onde:

- Q: Energia de AQS que precisamos fornecer
- V: Volume de combustível necessário para produzir toda essa energia (Q)
- PCI: Poder calorífico inferior do combustível empregado na instalação
- $\eta_{caldeira}$: Rendimento da caldeira. Depende do tipo de caldeira e do combustível empregado.

Da equação anterior, conhecemos rendimentos de caldeiras e poderes caloríficos de distintos combustíveis, pelo tanto, a única variável desconhecida é o gasto de combustível (V):

$$V = \frac{Q}{PCI \cdot \eta_{caldeira}} \quad (14)$$

- Cálculo das emissões de CO₂

As emissões calculam-se de forma simples a partir do cálculo de combustível e os fatores de emissão de CO₂ [14] para distintos combustíveis, em unidades: kgCO₂/Nm³ ou kgCO₂/kg de combustível. Fazendo uma conta fácil, multiplicando a quantidade de combustível obtida pelo fator de emissão, obtemos os kg de CO₂ que são emitidos para a atmosfera.

iv. CASO PRÁTICO

Após o modelo exposto, vai-se demonstrar a sua validade com um exemplo de um caso real. Antes de começar a trabalhar com o nosso modelo, é necessário estabelecer uma série de hipóteses e um contexto onde desenvolver dito modelo.

Neste caso, uma família composta por 4 membros, tem interesse na colocação de painéis solares na sua futura vivenda. A intenção de família é residir na cidade de Coimbra, no distrito português do mesmo nome.

A família tem o desejo de saber a superfície de painel solar que vai precisar para fornecer metade da energia necessária para AQS. Uma vez conhecidos os metros quadrados de superfície coletora que vão precisar, no caso de que lhes fora rentável, quererão saber qual seria o sistema de apoio ou *backup* mais benéfico economicamente.

O membro da família encarregado de decidir a rentabilidade da instalação tem claro que a orientação que devem ter os painéis é ao sul, enquanto a inclinação será de 25°, situados no telhado, evitando assim a presença de elementos que façam sombras.

No caso de resultar rentável a opção dos painéis solares, a família optaria por uma instalação simples, a qual vai ser descrita a seguir:

iv.i DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO

O esquema da instalação solar de AQS, com os seus componentes principais, é o seguinte:

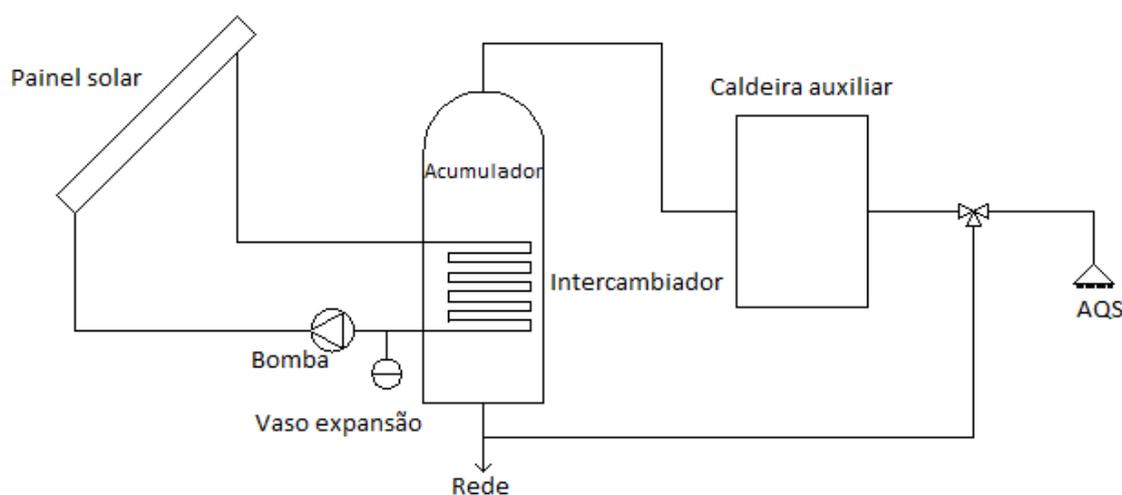


Figura 5. Esquema de instalação

O sistema de produção de AQS solar, baseia seu funcionamento na absorção da energia do sol para o aquecimento final de um determinado volume de água.

Quando a radiação solar incide nos coletores, estes começam a absorver essa radiação, elevando assim a temperatura dos mesmos. No momento em que a temperatura nos coletores e no fluido neles contido é superior à temperatura de acumulação, o sistema de controle põe a bomba de circulação em funcionamento. O fluido quente do circuito primário é bombeado para o permutador de calor, que está dentro do tanque acumulador de água. No permutador, no interior do tanque, produz-se a troca de calor entre a água quente procedente dos coletores e a água fria do tanque. A água do interior do acumulador, agora aquecida, desloca-se para a parte superior do tanque de acumulação, enquanto isso o fluido de transferência de calor retorna aos coletores para ser aquecido de novo e repetir dessa forma o ciclo. O sistema seguirá em funcionamento até que a temperatura dos coletores seja inferior a um valor estabelecido previamente e não seja possível a transferência de calor à água do acumulador.

A instalação de AQS está constituída por dois circuitos distintos, denominados circuito primário e circuito secundário, respetivamente. Na seguinte seção, mostram-se e explicam-se os distintos componentes de cada circuito:

- **Circuito primário**

Nele estão os coletores solares, o vaso de expansão e uma bomba que impulsiona o fluido do circuito primário através do mesmo. Está relacionado com o circuito secundário por um trocador de calor.

Painéis solares

É o elemento fundamental da instalação. O seu papel é o de capturar a energia solar incidente e comunicá-la ao fluido que flui através do circuito secundário.

Existem diferentes tipos de captadores, embora o mais comum, é o de placa plana.

O painel de placa plana está formado por quatro elementos principais:

- Coberta transparente. Sobre ela incidem os raios do sol, provocando o efeito estufa. Para além disso, reduz as perdas e garante a vedação do captador na união com a carcaça e as juntas. São fabricados de vidro ou de plástico transparente.

- Placa absorvente. Sua missão é receber radiação solar, transformá-la em calor e transmiti-la ao fluido de transferência de calor. Existem diferentes modelos, sendo os mais típicos os formados por uma placa metálica soldada sobre uma grelha de tubos ou duas placas metálicas separadas uns milímetros entre as quais circula o fluido de transferência de calor.
- Isolamento. Para reduzir a perda de calor através do interior do coletor, estão colocadas capas de isolamento tanto nos lados coma na parte posterior. Ao isolamento são-lhe exigidas certas características como por exemplo: tem de ser capazes de suportar temperaturas de até 150°C, não soltar vapores a ação do calor e não perder sus qualidades isolantes em caso de molhar-se.
- Caixa ou carcaça. Contém e suporta todos os elementos anteriores e os protege contra a intempérie. Deve ser capaz de resistir as variações de temperatura, a corrosão e degradação química.



Figura 6. Esquema de um painel solar.

A radiação solar que chega ao captador, passa pela cobertura transparente e transfere-se ao fluido que circula pelo mesmo.

Vaso de expansão

A sua função é a de absorver as dilatações do fluido contido num circuito fechado, causadas pela subida da temperatura. Os vasos de expansão podem ser abertos ou fechados.

Bomba

As bombas de circulação são acionadas por um motor elétrico, capaz de fornecer uma quantidade de energia suficiente para fazer circular o fluido através do circuito, superando as perdas de carga existentes no mesmo.



Figura 7. Bomba centrífuga

Fluido de transferência de calor

É o fluido ao qual se transfere a energia recebida pelo captador. Os fluidos como água ou dissoluções da mesma com álcoois (quando as temperaturas que devem suportar estão por abaixo de 0°C) são os mais empregados. As dissoluções são utilizadas em instalações onde a água para o consumo do circuito secundário não tem nenhum contacto direto com o fluido de transferência de calor.

Posteriormente, expor-se a forma de obter a concentração de dissolução precisa.

A transferência de energia entre a água e a dissolução é feita através de um trocador de calor.

Trocador de calor

Colocam-se numa instalação solar quando pretende-se transferir o calor de um fluido para outro sem que eles sejam misturados. Desta forma, os dois circuitos são independentes.

Os trocadores usados numa instalação solar são trocadores líquido-líquido, e podem ser internos ou externos ao tanque acumulador.

Segundo a sua construção, são classificados em trocadores helicoidais, de feixe de tubos, de dupla envolvente e de placas.

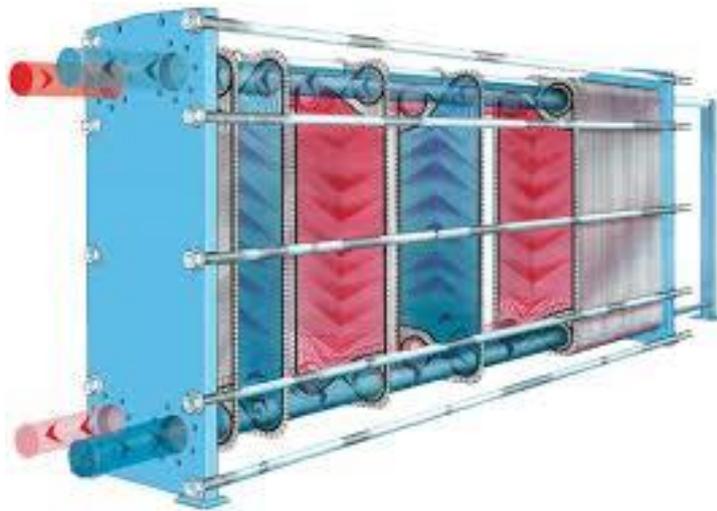


Figura 8. Permutador de calor de placas

- **Circuito secundário**

Nele encontra-se a parte do trocador de calor pela que circula a água de consumo junto com o depósito de água quente. Possui, da mesma forma do circuito primário, uma bomba de impulsão.

À saída do tanque coloca-se um sistema de backup que entra em funcionamento quando o sistema solar não tem sido capaz de aquecer a água até a temperatura de consumo. Este tipo de backups, acostumam a ser os de caldeiras de gás/óleo. No caso de sistemas de backup elétricos, o próprio sistema está dentro do tanque acumulador de água quente, em forma de resistência elétrica.

Acumulador de água quente

Este elemento é usado para ajustar o consumo à produção de AQS.

A necessidade de energia não é sempre coincidente no tempo com a absorção a partir do sol, de modo que é necessário ter um sistema de acumulação que atenda a demanda em momentos de pouca ou nenhuma radiação solar. Assim como na produção solar em épocas de pouco consumo ou nulo.

Para os sistemas térmicos utiliza-se um depósito-acumulador onde se armazena energia em forma de água quente.

O uso de tanques verticais tem a vantagem de promover a estratificação da água (a água a maior temperatura situa-se no topo do tanque de armazenamento e a água a menor temperatura na parte inferior).



Figura 9. Tanque acumulador solar

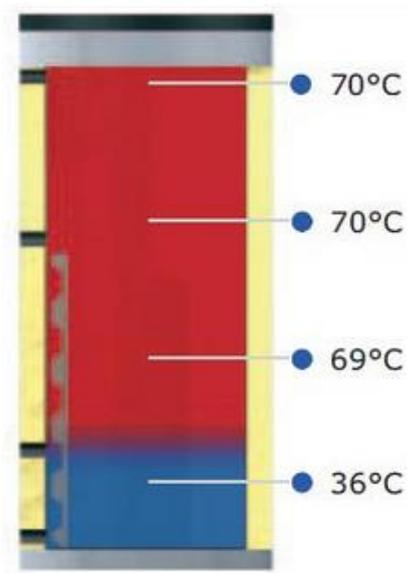


Figura 10. Estratificação num acumulador de AQS

Outros elementos

Tanto no circuito secundário como no circuito primário, ademais dos elementos principais já mostrados, podemos encontrar distintos elementos que melhoram o funcionamento da instalação:

- Isolamento de tubagens e tanque.
- Tubagens
- Válvulas e acessórios.
- Purgadores.
- Instrumentação (termômetros, termostatos, manômetro e hidrômetro...).

É importante destacar o fato de que esta configuração de instalação solar é dependente do sistema de *backup* que resulte mais recomendável para a família. No caso de que a utilização de um sistema de apoio mediante energia elétrica seja o mais rentável, através de uma resistência, dita resistência não poderia ser colocada no exterior do tanque, mas sim no interior dele, pelo qual, a configuração mudaria um bocado. Dita configuração seria a da Figura 11:

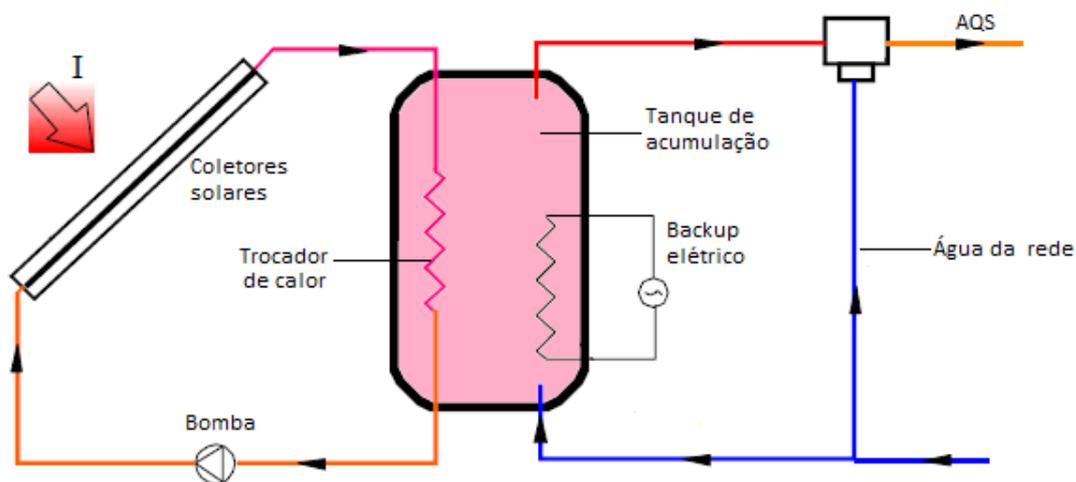


Figura 11. Esquema da instalação para um sistema de apoio mediante resistência elétrica

iv.ii APLICAÇÃO DO MODELO

Antes de iniciar o estudo do caso real, na Tabela 2 mostra-se um resumo dos dados iniciais:

Tabela 2.Dados iniciais

| Cidade | Coimbra |
|-------------------------------|---------------------|
| Latitude | 40° 12' 4.58" N |
| Longitude | 8° 24' 27.86" W |
| Tipo de edifício | Vivenda unifamiliar |
| Número de habitantes | 4 |
| Orientação do captador | Sul |
| Inclinação do captador | 25° |
| Existência de sombras | Não |

iv.ii.i Dimensionamento

Também é preciso fazer um esquema com o processo iterativo empregado para obter a superfície de coletores (metros quadrados de coletor) que necessita a família para alcançar a fração solar desejada:

1. Cálculo da demanda de AQS
2. Estudo da radiação
3. Estudo e valoração das perdas por sombras, inclinação e inclinação
 - a. Se as perdas estão por abaixo do valor máximo permissível, podemos continuar com o processo.
 - b. No caso de que as perdas estejam por cima do valor máximo permissível, temos de variar a inclinação, orientação ou localização dos painéis, e pelo tanto, voltar a calcular a radiação e valorar as perdas.
4. Seleção da fração solar desejada pelo usuário
5. Seleção de uma superfície de painel, S_c , para iniciar o cálculo de f
6. Cálculo do parâmetro D_1
7. Cálculo do parâmetro D_2

8. Cálculo de f

- a. Se o f calculado fosse menor que o estabelecido no ponto 4, voltamos ao ponto 5 e trocamos a superfície de painel por outra maior, repetindo o cálculo até alcançar o valor de f desejado
- b. Se o f calculado fosse igual ou maior que o estabelecido no ponto 4, a superfície de painel selecionada é adequada e podemos continuar o processo

9. Cálculo do rendimento do sistema

ESTIMAÇÃO DA DEMANDA DE ENERGIA DE AQS MENSAL

Estabelecemos a demanda diária de AQS a 60°C segundo o RCCTE, para uma vivenda unifamiliar. Assim mesmo, o consumo de AQS estimado toma-se segundo o valor recomendado pelo RCCTE, de 40 litros por pessoa e dia.

O consumo de AQS da vivenda será:

Tabela 3. Consumo de AQS

| | |
|--|------------------------------------|
| Nº de vivendas | 1 |
| Nº total de residentes | 4 |
| Consumo de AQS por pessoa e dia | 40 |
| Consumo total de AQS | 160 l ou 0,160 m ³ /dia |

Com estes dados sobre a demanda de AQS diária e os dados da temperatura de água da rede supostos de forma aproximada, estamos em disposição de obter a demanda de energia de AQS mensal e anual.

Considera-se que a temperatura de água de acumulação para fornecimento de AQS é de 60°C. Para obter as demandas, multiplica-se a demanda diária pelo número de dias de cada mês, e pela diferença de temperaturas entre AQS e água da rede, segundo a fórmula 15:

$$DE_{mês,i} = 1,16 \times 10^{-3} \times D_{dia} \times N_{dias,i} \times C_p \times \rho \times (T_{AQS} - T_{rede,i}) \quad (15)$$

Onde C_p é o calor específico da água e ρ é a densidade da água:

$C_p = 1 \text{ kcal/kg.}^\circ\text{C}$;

$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$.

Na Tabela 4 apresentam-se os dados da demanda de energia térmica para cada mês:

Tabela 4. Demanda de energia mensal térmica para AQS

| Mês | Trede(°C) | Ddia (m3/dia) | Nmes(dias) | Dmes(m3) | De (kWh) |
|--------------|-----------|---------------|------------|----------|-----------|
| Jan | 15 | 0,16 | 31 | 4,96 | 258,912 |
| Fev | 15 | 0,16 | 28 | 4,48 | 233,856 |
| Mar | 15 | 0,16 | 31 | 4,96 | 258,912 |
| Abr | 17 | 0,16 | 30 | 4,8 | 239,424 |
| Mai | 17 | 0,16 | 31 | 4,96 | 247,4048 |
| Jun | 17 | 0,16 | 30 | 4,8 | 239,424 |
| Jul | 19 | 0,16 | 31 | 4,96 | 235,8976 |
| Ago | 19 | 0,16 | 31 | 4,96 | 235,8976 |
| Set | 19 | 0,16 | 30 | 4,8 | 228,288 |
| Out | 17 | 0,16 | 31 | 4,96 | 247,4048 |
| Nov | 17 | 0,16 | 30 | 4,8 | 239,424 |
| Dez | 17 | 0,16 | 31 | 4,96 | 247,4048 |
| Total | | | 365 | 58,4 | 2912,2496 |

Como se pode ver na tabela, obtemos uma demanda de energia térmica anual de 2912,2496 kwh. Uma das hipóteses de início era que devemos obter uma fração solar de 0.5, por petição da família, o que quer dizer que a metade da energia que precisam os consumidores deve ser fornecida pelo sol. Segundo isto, o sol deve proporcionar, como mínimo, 1456,1248 kwh ao ano.

CÁLCULO DA RADIAÇÃO

Ao estar fundamentado na energia solar, é de vital importância para o projeto conhecer a “quantidade” de energia disponível na localização do edifício, assim como as sombras que se produzam ou outro tipo de dados que são importantes, coma a inclinação e orientação dos paineis.

Estabelecía-mos que não existem obstáculos ao redor do edifício em questão, pelo tanto, não há problemas com a possível existência de sombras, as quais reduziriam a radiação disponível para o captador solar. No mesmo apartado víamos que a orientação dos painéis é de 0° sul, com uma inclinação de 25°.

A quantidade de energia que o sol proporciona é o que chamamos radiação, e trabalharemos utilizando valores meios mensais. Estes valores de radiação são os que correspondem à energia em kilowatt-hora que incide sobre um metro quadrado de superfície horizontal num dia meio de cada mês. Ditos dados são apresentados na seguinte tabela:

Tabela 5. Radiação numa superfície horizontal em Coimbra. Fonte: NASA

| Radiação meia mensal sobre uma superfície horizontal (kWh/m ² .dia) | | | | | | | | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------------|
| Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez | Meia anual |
| 2 | 2,96 | 4,38 | 5,49 | 6,61 | 7,66 | 7,63 | 6,65 | 5,05 | 3,41 | 2,14 | 1,74 | 4,65 |

Estes valores foram atopados na base de dados da NASA [13] e correspondem a medidas tomadas durante 22 anos, no ponto de coordenadas, Lat +40° Lon +8°, as quais são muito similares às de Coimbra, Lat +40°12'05'' Lon +8°24'28''.

Na maior parte dos casos reais a estudar, a disposição dos painéis solares não é horizontal. Estes acostumam ter uma determinada inclinação ou estar em integração arquitetónica. Por isso é preciso realizar uma correção nos valores de radiação, segundo a latitude e a inclinação.

A radiação solar sobre uma superfície inclinada é obtida a partir da seguinte formulação:

$$I(\beta) = k \times I(0^\circ) \quad (16)$$

- $I(\beta)$ representa o valor da radiação numa superfície inclinada.
- K representa o fator de correção.
- $I(0^\circ)$ representa o valor da radiação numa superfície horizontal.

A tabela que está a seguir, apresenta os diferentes coeficientes k para cada mês e inclinação, para localizações na latitude +40°.

Tabela 6. Coeficientes k para a correção de radiação numa superfície inclinada. Fonte: IDAE

LATTITUD = 40°

| Incli. | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 5 | 1,07 | 1,06 | 1,05 | 1,03 | 1,02 | 1,01 | 1,02 | 1,03 | 1,05 | 1,08 | 1,09 | 1,09 |
| 10 | 1,14 | 1,11 | 1,08 | 1,05 | 1,03 | 1,02 | 1,03 | 1,06 | 1,1 | 1,14 | 1,17 | 1,16 |
| 15 | 1,2 | 1,16 | 1,12 | 1,07 | 1,03 | 1,02 | 1,04 | 1,08 | 1,14 | 1,21 | 1,25 | 1,24 |
| 20 | 1,25 | 1,2 | 1,14 | 1,08 | 1,03 | 1,02 | 1,03 | 1,09 | 1,17 | 1,26 | 1,32 | 1,3 |
| 25 | 1,3 | 1,23 | 1,16 | 1,08 | 1,02 | 1 | 1,02 | 1,09 | 1,19 | 1,3 | 1,38 | 1,36 |
| 30 | 1,34 | 1,26 | 1,17 | 1,07 | 1,01 | 0,98 | 1,01 | 1,09 | 1,2 | 1,34 | 1,43 | 1,41 |
| 35 | 1,37 | 1,28 | 1,17 | 1,06 | 0,98 | 0,95 | 0,98 | 1,07 | 1,21 | 1,37 | 1,47 | 1,45 |
| 40 | 1,39 | 1,29 | 1,16 | 1,04 | 0,95 | 0,92 | 0,95 | 1,05 | 1,21 | 1,39 | 1,5 | 1,48 |
| 45 | 1,4 | 1,29 | 1,15 | 1,01 | 0,91 | 0,88 | 0,92 | 1,03 | 1,2 | 1,39 | 1,52 | 1,5 |
| 50 | 1,41 | 1,28 | 1,13 | 0,98 | 0,87 | 0,83 | 0,87 | 0,99 | 1,18 | 1,39 | 1,54 | 1,52 |
| 55 | 1,4 | 1,27 | 1,1 | 0,94 | 0,82 | 0,78 | 0,82 | 0,95 | 1,15 | 1,38 | 1,54 | 1,52 |
| 60 | 1,39 | 1,24 | 1,07 | 0,89 | 0,77 | 0,72 | 0,77 | 0,9 | 1,12 | 1,36 | 1,53 | 1,51 |
| 65 | 1,37 | 1,21 | 1,03 | 0,84 | 0,71 | 0,66 | 0,71 | 0,85 | 1,07 | 1,34 | 1,51 | 1,5 |
| 70 | 1,34 | 1,17 | 0,98 | 0,78 | 0,64 | 0,59 | 0,64 | 0,79 | 1,02 | 1,3 | 1,49 | 1,47 |
| 75 | 1,3 | 1,13 | 0,92 | 0,72 | 0,57 | 0,52 | 0,57 | 0,73 | 0,97 | 1,25 | 1,45 | 1,44 |
| 80 | 1,25 | 1,08 | 0,86 | 0,65 | 0,5 | 0,45 | 0,5 | 0,66 | 0,9 | 1,2 | 1,41 | 1,4 |
| 85 | 1,2 | 1,02 | 0,8 | 0,58 | 0,43 | 0,37 | 0,42 | 0,58 | 0,84 | 1,14 | 1,35 | 1,35 |
| 90 | 1,14 | 0,95 | 0,73 | 0,5 | 0,35 | 0,29 | 0,34 | 0,5 | 0,76 | 1,07 | 1,29 | 1,29 |

Para uma inclinação de 25° e latitude +40°, os valores de k que obtemos são os seguintes:

Tabela 7. Valores de k para uma de 25° e latitude +40°

| | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez | Meia anual |
|---|-----|------|------|------|------|-----|------|------|------|-----|------|------|------------|
| k | 1,3 | 1,23 | 1,16 | 1,08 | 1,02 | 1 | 1,02 | 1,09 | 1,19 | 1,3 | 1,38 | 1,36 | 1,1775 |

A seguir, adjunta-se uma tabela com os dados de energia térmica disponível em Coimbra:

Tabela 8. Energia térmica solar disponível em Coimbra

| MES | DIAS | Radiação horizontal (kwh/m2.dia) | k(25°) | Radiação a 25° (kwh/m2.dia) | Radiação mensal (kwh/m2) |
|-----|------|-------------------------------------|--------|--------------------------------|-----------------------------|
| JAN | 31 | 2 | 1,3 | 2,60 | 80,60 |
| FEV | 28 | 2,96 | 1,23 | 3,64 | 101,94 |
| MAR | 31 | 4,38 | 1,16 | 5,08 | 157,50 |
| ABR | 30 | 5,49 | 1,08 | 5,93 | 177,88 |
| MAI | 31 | 6,61 | 1,02 | 6,74 | 209,01 |
| JUN | 30 | 7,66 | 1 | 7,66 | 229,80 |
| JUL | 31 | 7,63 | 1,02 | 7,78 | 241,26 |
| AGO | 31 | 6,65 | 1,09 | 7,25 | 224,70 |
| SET | 30 | 5,05 | 1,19 | 6,01 | 180,29 |
| OUT | 31 | 3,41 | 1,3 | 4,43 | 137,42 |

| | | | | | |
|------------|----|------|------|------|---------|
| NOV | 30 | 2,14 | 1,38 | 2,95 | 88,60 |
| DEZ | 31 | 1,74 | 1,36 | 2,37 | 73,36 |
| ANO | | | | | 1902,36 |

CÁLCULO DAS PERDAS POR INCLINAÇÃO, SOMBRAS E ORIENTAÇÃO

A inclinação escolhida para os nossos coletores é diferente da ideal. Para que tal desvio seja aceitado, as perdas por esta causa devem encontrar-se dentro do limite máximo admissível.

Ao caso estar colocados no telhado da vivenda, em integração arquitetónica, os painéis terão uma inclinação de 25 °, o qual não é o valor ideal. O limite máximo de perdas admissível é o indicado na tabela 9:

Tabela 9. Perdas máximas admissíveis (CTE) no caso de integração arquitetónica

| Caso | Orientação e inclinação | Sombras | Total |
|---------------------------------|--------------------------------|----------------|--------------|
| General | 10% | 10% | 15% |
| Superposição | 20% | 15% | 30% |
| Integração arquitetónica | 40% | 20% | 50% |

Enquanto à orientação, os painéis estarão orientados cara ao sul, sendo esta a orientação ideal (no hemisfério norte)

Pelo tanto, a efeitos de calcular as perdas, os dados da nossa instalação são:

- Inclinação: 25°.
- Orientação: 0°.
- Sombras: Não há sombras.
- Disposição: Integração arquitetónica.

Uma vez que a instalação encedra-se no caso de integração arquitetónica, as perdas devem ser inferiores a 40%, devido à inclinação e orientação, e 20% pelas sombras, com um máximo de

50% no total. Com esses dados podemos calcular as perdas de orientação e inclinação e ver estamos dentro dos limites estabelecidos pelo CTE.

PERDAS POR INCLINAÇÃO DOS PAINÉIS

Para o cálculo de perdas devido à inclinação dos painéis, recordamos a fórmula 17:

$$P(\%) = 100 \cdot (1,2 \cdot 10^{-4} \cdot (\beta - \beta_{opt})^2 + 3,5 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha^2) \quad (17)$$

O β_{opt} dos nossos painéis é 40° , o mesmo ângulo aproximadamente que tem a latitude da localização do edifício, considerando que a família terá uma demanda de AQS constante, sem destacar inverno ou verão.

$$P(\%) = 100 \cdot (1,2 \cdot 10^{-4} \cdot (25-40)^2 + 3,5 \cdot 10^{-5} \cdot 0^2) = 2,7 \%$$

PERDAS DEVIDAS À INCLINAÇÃO MAIS A ORIENTAÇÃO

Para obter as perdas devidas à inclinação e orientação utilizamos o método gráfico da Figura 12 :

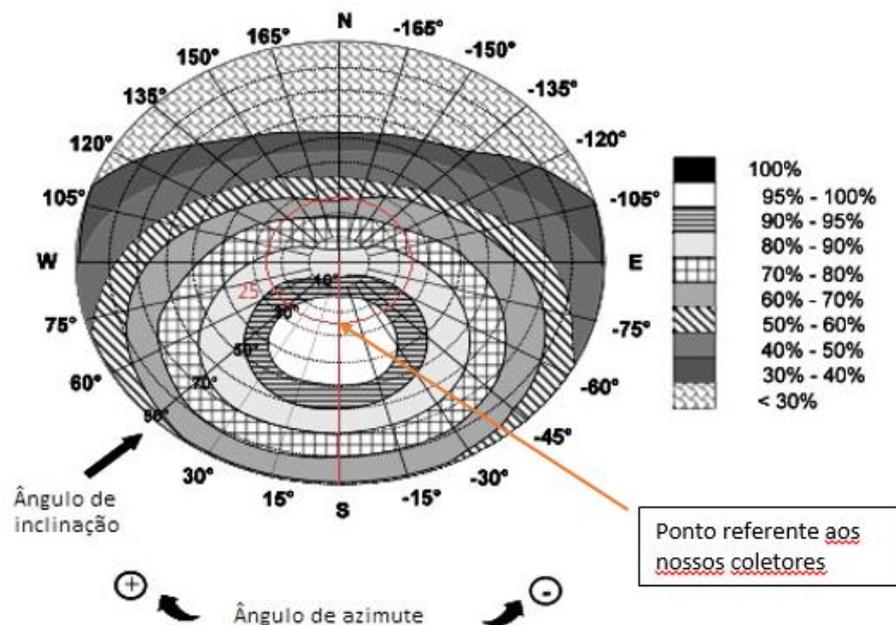


Figura 12. Cálculo gráfico das perdas por orientação e inclinação

Para obter a percentagem de perdas por orientação e inclinação, desenvolvemos o método gráfico da seguinte maneira:

1. Localizamos o raio da circunferência que se corresponde com o ângulo de orientação dos nossos coletores, neste caso, 0° sul (raio colorido de vermelho).
2. Localizamos a circunferência correspondente ao ângulo de inclinação de 25° (circunferência colorida de vermelho).
3. O ponto onde se cortam o raio correspondente ao ângulo de orientação e a circunferência correspondente ao ângulo de inclinação é o ponto que estamos a buscar, e neste caso, vendo a lenda na parte direita, encontra-se na zona de aproveitamento de energia entre 95% e 100%, é dizer, temos um valor de perdas de entre 0% e 5%.

PERDAS POR SOMBRAS

No caso de colocar os painéis sobre o telhado, não existiriam edifícios ou outros elementos que fizeram de obstáculo cara a nossa instalação, e pelo tanto, não teríamos a presença de sombras que reduziram a radiação incidente nos coletores. Por isso não é preciso desenvolver o método gráfico do CTE, e as perdas por sombras são de um 0%.

RESUMO DE PERDAS

Depois de estudar o que ocorre com as perdas devidas a desvios nos ângulos de inclinação e orientação respeito dos ideais, podemos construir a seguinte tabela na que comparamos os valores obtidos com os valores máximos permissíveis presentes no CTE para o nosso caso:

Tabela 10. Resumo das perdas por inclinação, orientação e sombras, e comparação com os valores do CTE

| | Valores CTE | Valores obtidos |
|---|--------------------|------------------------|
| Perdas por inclinação | ... | 2,70% |
| Perdas por orientação e inclinação | 40% | 0%-5% |
| Perdas por sombras | 20% | 0% |
| Perdas totais | 50% | 0%-5% |

Uma vez elaborada a tabela, vemos que estamos muito longe dos valores de perdas máximas. Pelo tanto, podemos seguir com o estudo do projeto.

MÉTODO F-CHART

Para começar a desenvolver o método F-Chart, devemos fixar um valor de fração solar mínimo a alcançar. Este valor é pedido pela família solicitante do estudo, a qual quer obter, no pior dos casos, a metade da energia necessária para AQS mediante energia solar. Pelo tanto, o valor de f anual mínimo que devemos obter é de 0,5.

Começamos o estudo com a superfície de painel mais pequena possível, supondo a instalação de 1 painel, o que significaria uma superfície (S_c) de 2,3 m².

Em primeiro lugar, temos que calcular o parâmetro D_1 , para cada mês. Foi escolhido um valor de rendimento ótico de 0.803, valor perto dos valores comuns que dão os fabricantes. Na tabela a seguir apresentam-se os resultados obtidos para D_1 :

Tabela 11.Cálculo de D_1 .

| Mês | S_c | η_0 | FC_{int} | MAI | Radiação solar média diária (kWh/m ² .dia) | Dias/mês | D_1 |
|-----|-------|----------|------------|-------|---|----------|------------|
| Jan | 2,3 | 0,803 | 0,95 | 0,96 | 2,6 | 31 | 0,52434977 |
| Fev | 2,3 | 0,803 | 0,95 | 0,96 | 3,6408 | 28 | 0,73425102 |
| Mar | 2,3 | 0,803 | 0,95 | 0,96 | 5,0808 | 31 | 1,02466012 |
| Abr | 2,3 | 0,803 | 0,95 | 0,96 | 5,9292 | 30 | 1,2513762 |
| Mai | 2,3 | 0,803 | 0,95 | 0,96 | 6,7422 | 31 | 1,4229624 |
| Jun | 2,3 | 0,803 | 0,95 | 0,96 | 7,66 | 30 | 1,61666696 |
| Jul | 2,3 | 0,803 | 0,95 | 0,96 | 7,7826 | 31 | 1,72266607 |
| Ago | 2,3 | 0,803 | 0,95 | 0,96 | 7,2485 | 31 | 1,60444389 |
| Set | 2,3 | 0,803 | 0,95 | 0,96 | 6,0095 | 30 | 1,33019322 |
| Out | 2,3 | 0,803 | 0,95 | 0,96 | 4,433 | 31 | 0,93559851 |
| Nov | 2,3 | 0,803 | 0,95 | 0,96 | 2,9532 | 30 | 0,6232821 |
| Dez | 2,3 | 0,803 | 0,95 | 0,96 | 2,3664 | 31 | 0,49943612 |

Depois de obter os valores de D_1 mensais, temos que fazer o mesmo com D_2 , obtendo a seguinte tabela:

Tabela 12.Cálculo de D_2

| Mês | S_c | K_{global} | F_{cint} | T_{amb} | FC_{acum} | FC_{acs} | D_2 |
|-----|-------|--------------|------------|-----------|-------------|-------------|------------|
| Jan | 2,3 | 4,566396 | 0,95 | 9,59 | 0,963695378 | 1,305731667 | 3,26178965 |

| | | | | | | | |
|------------|-----|---------|------|------|-------------|-------------|------------|
| Fev | 2,3 | 4,56546 | 0,95 | 9,65 | 0,963695378 | 1,305058107 | 3,25727571 |
| Mar | 2,3 | 4,5366 | 0,95 | 11,5 | 0,963695378 | 1,283841808 | 3,11886981 |
| Abr | 2,3 | 4,49916 | 0,95 | 13,9 | 0,963695378 | 1,344622532 | 3,29830646 |
| Mai | 2,3 | 4,4196 | 0,95 | 19 | 0,963695378 | 1,283209877 | 2,90885256 |
| Jun | 2,3 | 4,35096 | 0,95 | 23,4 | 0,963695378 | 1,223655352 | 2,58243266 |
| Jul | 2,3 | 4,3026 | 0,95 | 26,5 | 0,963695378 | 1,28244898 | 2,69338873 |
| Ago | 2,3 | 4,30572 | 0,95 | 26,3 | 0,963695378 | 1,285264586 | 2,70860979 |
| Set | 2,3 | 4,36812 | 0,95 | 22,3 | 0,963695378 | 1,338532819 | 3,01706894 |
| Out | 2,3 | 4,42272 | 0,95 | 18,8 | 0,963695378 | 1,285763547 | 2,92390067 |
| Nov | 2,3 | 4,49448 | 0,95 | 14,2 | 0,963695378 | 1,341212121 | 3,27506739 |
| Dez | 2,3 | 4,5444 | 0,95 | 11 | 0,963695378 | 1,376404494 | 3,52507751 |

O seguinte passo é calcular a fração solar mensal. Os resultados são apresentados na seguinte tabela:

Tabela 13. Fração solares mensuais

| Mês | f |
|------------|-------------|
| Jan | 0,454785092 |
| Fev | 0,611223904 |
| Mar | 0,792638681 |
| Abr | 0,9275702 |
| Mai | 0,993323901 |
| Jun | 1,066243291 |
| Jul | 1,110985738 |
| Ago | 1,0650823 |
| Set | 0,953605346 |
| Out | 0,729711296 |
| Nov | 0,531575211 |
| Dez | 0,450027307 |

Agora já estamos em disposição de calcular a energia útil captada cada mês:

Tabela 14. Energia útil captada

| Mês | QU_{solar}, mês |
|------------|--------------------------------|
| Jan | 117,7493178 |
| Fev | 142,9383773 |
| Mar | 205,2236663 |
| Abr | 222,0825675 |
| Mai | 245,753101 |
| Jun | 255,2842336 |
| Jul | 262,0788692 |
| Ago | 251,2503584 |
| Set | 217,6966573 |

| | |
|--------------|-------------|
| Out | 180,5340773 |
| Nov | 127,2718634 |
| Dez | 111,3389159 |
| Anual | 2339,202005 |

Por último, calculamos a fração solar anual e o rendimento do sistema:

$$f_{anual} = 0,8032$$

$$\eta_{sistema} = 0,5346$$

Como podemos observar, a fração anual obtida, de 0.8, é maior que a mínima exigida, de 0.5, por isso, a superfície de coletores que devemos instalar é de 2.3 m², sendo necessário um só coletor.

iv.ii.ii Estudo ambiental

O uso de energias renováveis não é apenas uma fonte de redução de custos, mas principalmente uma fonte de poupança de emissões e poluição. Dada a situação mundial atual, em que todos somos conscientes dos danos que se está a fazer desde há muito tempo ao planeta e os efeitos da mudança climática, é preciso orientar o estilo de vida das pessoas para um consumo mais eficiente e menos danoso. Além da poupança económica em termos de combustível que deixamos de “queimar” para obter energia, é muito importante o corte de emissões de CO₂ e de todos os aspetos contaminantes (resíduos, poluição do solo, visual e acústica) que não só supõe benefícios a nível meio ambiental, senão que implica também uma poupança nos custos para a indústria.

A dita redução de emissões de CO₂ é o que realmente suporta estas tecnologias de aproveitamento de recursos renováveis, e o que as faz verdadeiramente rentáveis desde um ponto de vista ambiental. Conseguindo um consumo das energias tradicionais mais tolerante com a atmosfera e o meio em geral, contribuiria-se individualmente à luta contra a degradação do nosso planeta.

A principal consequência da implementação das energias renováveis é a redução do conhecido efeito estufa. O efeito estufa é o fenómeno pelo qual certos gases, que são componentes de uma atmosfera planetária, retém parte da energia emitida pelo solo ao ser aquecido pela radiação solar. Ele afeta a todos os corpos planetários que têm atmosfera.

De acordo com o consenso científico atual, o efeito estufa está a ser acentuado na Terra pelo aumento da concentração dos chamados gases com efeito de estufa: vapor de água (H₂O), dióxido

de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxidos de nitrogênio (NO_x), os clorofluorcarbonetos (CFCl₃) e ozono da troposfera. A radiação solar passa através deles, mas retêm e conservam o calor da radiação infravermelha refletida pela superfície do solo, aumentando assim a temperatura da atmosfera. O CO₂ é responsável de quase um 30 % do efeito.

Este fenómeno impede que a energia solar recebida constantemente pela Terra volte imediatamente para o espaço, produzindo a escala planetária um efeito semelhante ao que ocorre num invernadouro.

Ademais da redução de emissões de CO₂ e o já dito benefício que isto acarreta, existe outra vantagem de levar a cabo instalações baseadas em recursos renováveis, a poupança de combustíveis fósseis. Como tínhamos dito na introdução, o contínuo aumento do consumo de recursos energéticos por parte da população está a provocar o esgotamento dos combustíveis de origem fóssil, que antes eram considerados ilimitados. Pelo tanto, a poupança em termos de combustível é um fato a ter em conta e que devemos quantificar.

Esta seção tem como objetivo estimar qual é a redução das emissões de CO₂ liberado na atmosfera e a poupança de combustível como resultado da implementação de um sistema solar térmico para atender a demanda de água quente do edifício em questão, tendo em conta vários sistemas de apoio como podem ser o gás natural, o gasóleo, a biomassa ou o butano.

ENERGIA APORTADA PELOS DIFERENTES SISTEMAS

Apresenta-se a continuação uma tabela com a carga calorífica mensal, é dizer, a energia em kWh necessária para fornecer a demanda da família em termos de AQS:

Tabela 15. Demanda AQS

| Mês | De (kWh) |
|-------|-----------|
| Jan | 258,912 |
| Fev | 233,856 |
| Mar | 258,912 |
| Abr | 239,424 |
| Mai | 247,4048 |
| Jun | 239,424 |
| Jul | 235,8976 |
| Ago | 235,8976 |
| Set | 228,288 |
| Out | 247,4048 |
| Nov | 239,424 |
| Dez | 247,4048 |
| Anual | 2912,2496 |

Depois de calcular a fração solar anual da instalação, sabemos que de toda essa energia para elevar a água da rede à temperatura desejada para AQS, um 80,32% é fornecida pela energia solar captada nos coletores, e um 19,68% fornecido pelo sistema auxiliar. Então a energia fornecida por cada sistema é a seguinte:

Tabela 16. Energia fornecida pela instalação solar e pelo sistema de apoio

| Solar(kWh) | Apoio(kWh) |
|------------|------------|
| 2339,12 | 573,13 |

Com a intenção de fazer um estudo comparativo entre dispor ou não dispor de uma instalação solar, vamos a começar fazendo um estudo meio ambiental no caso de não dispor de coletores solares.

ESTUDO SEM INSTALAÇÃO SOLAR

Estabelecendo a hipótese de não ter feito a instalação solar, toda a energia precisa para o abastecimento de AQS da família tem de ser fornecida pelo sistema de apoio ou *backup*, é dizer, o sistema de apoio deve aportar 2912,25 kWh.

Como a família pede uma comparação entre várias opções de *backup*, vamos fazer o estudo uma por uma, calculando a quantidade de combustível que se precisaria e a quantidade de CO₂ que se emite à atmosfera.

CÁLCULO DA QUANTIDADE NECESSÁRIA DE COMBUSTÍVEL

Utilizaremos a equação (13) para calcular a quantidade de combustível precisa no período de um ano, e sabendo a quantidade de combustível poderemos calcular as emissões de CO₂. Faremos isto com cada um dos seguintes combustíveis:

GÁS NATURAL

- PCI = 9054 kcal/m³ = 10,53 kWh/m³
- $\eta_{\text{caldeira}} = 109 \%$
- Fator de emissão: 2,16 kg CO₂/ m³ gás natural (em condições normais)

A quantidade de combustível será:

$$V = 2912,25 \text{ kWh} / (10,53 \text{ kWh/m}^3 * 1,09) = 253,73 \text{ m}^3 \text{ de gás natural}$$

As emissões de CO₂ serão:

$$253,73 \text{ m}^3 \text{ gás natural} * 2,16 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3 \text{ gás natural} = 548,06 \text{ kg CO}_2 \text{ emitidos à atmosfera}$$

GASÓLEO

- PCI = 11,78 kWh/kg
- $\eta_{\text{caldeira}} = 88 \%$
- Fator de emissão: 2,79 kg CO₂/ l gásóleo (a 15°C)
- d(densidade) a 15°C = 900 kg/m³

A quantidade de combustível será:

$$V = 2912,25 \text{ kWh} / (11,78 \text{ kWh/kg} * 0,88) = 280,93 \text{ kg de gásóleo} = 312,15 \text{ l de gásóleo}$$

As emissões de CO₂ serão:

$$312,15 \text{ l de gásóleo} * 2,79 \text{ kg CO}_2/\text{l gásóleo} = 870,90 \text{ kg CO}_2 \text{ emitidos à atmosfera}$$

BUTANO

- PCI = 12,44 kWh/kg
- $\eta_{\text{caldeira}} = 109 \%$
- Fator de emissão: 2,96 kg CO₂/ kg gás butano (em condições normais)

A quantidade de combustível será:

$$V = 2912,25 \text{ kWh} / (12,44 \text{ kWh/kg} * 1,09) = 214,77 \text{ kg de butano}$$

As emissões de CO₂ serão:

$$214,77 \text{ kg de butano} * 2,96 \text{ kg CO}_2 / \text{kg butano} = 635,72 \text{ kg CO}_2 \text{ emitidos à atmosfera}$$

BIOMASSA

O caso da biomassa é um tanto especial, pois no caso da biomassa pura, a sua utilização tem umas emissões consideradas neutras, isto é devido a que as emissões de CO₂, ao proceder de um carbono retirado da atmosfera no ciclo biológico, não alteram o equilíbrio da concentração de carbono atmosférico, e pelo tanto, não acrescentam o efeito estufa. O seu uso ajuda a reduzir as emissões de CO₂ à atmosfera, sempre no caso de substituir a um combustível fóssil. O fator de emissão para este combustível é considerado de 0 kg CO₂/ kg biomassa, por isso não teremos que calculá-lo.

- PCI = 3,87 kWh/kg
- $\eta_{\text{caldeira}} = 90 \%$

A quantidade de combustível será:

$$V = 2912,25 \text{ kWh} / (3,87 \text{ kWh/kg} * 0,90) = 836,13 \text{ kg de biomassa}$$

ESTUDO COM INSTALAÇÃO SOLAR

Como dissemos anteriormente, o fato de utilizar uma instalação a base de energias renováveis supõe uma redução no consumo de combustíveis fósseis. Da tabela 16 podemos extrair a redução no consumo de combustível, passando essa quantidade de energia a ser fornecida pela instalação solar. Assim, se antes tínhamos que fornecer mediante a combustão de algum combustível os 2912,25 kWh que precisa a família para AQS, agora temos uma quantidade significativamente menor, de 573,13 kWh, a qual deve ser aportada por um sistema auxiliar de *backup*. A continuação vamos fazer o estudo dos diferentes tipos de *backup*, de forma mais resumida, para rematar analisando os benefícios que obtemos ao optar por uma instalação solar:

GÁS NATURAL

A quantidade de combustível será:

$$V = 573,13 \text{ kWh} / (10,53 \text{ kWh/m}^3 * 1,09) = 49,93 \text{ m}^3 \text{ de gás natural}$$

As emissões de CO₂ serão:

$$49,93 \text{ m}^3 \text{ de gás natural} * 2,16 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3 \text{ gás natural} = 107,85 \text{ kg CO}_2 \text{ emitidos à atmosfera}$$

GASÓLEO

A quantidade de combustível será:

$$V = 573,13 \text{ kWh} / (11,78 \text{ kWh/kg} * 0,88) = 55,29 \text{ kg de gasóleo} = 61,43 \text{ l de gasóleo}$$

As emissões de CO₂ serão:

$$61,43 \text{ l de gasóleo} * 2,79 \text{ kg CO}_2/\text{l gasóleo} = 171,39 \text{ kg CO}_2 \text{ emitidos à atmosfera}$$

BUTANO

A quantidade de combustível será:

$$V = 573,13 \text{ kWh} / (12,44 \text{ kWh/kg} * 1,09) = 42,27 \text{ kg de butano}$$

As emissões de CO₂ serão:

$$42,27 \text{ kg de butano} * 2,96 \text{ kg CO}_2/\text{kg butano} = 125,12 \text{ kg CO}_2 \text{ emitidos à atmosfera}$$

BIOMASSA

A quantidade de combustível será:

$$V = 573,13 \text{ kWh} / (3,87 \text{ kWh/kg} * 0,90) = 164,55 \text{ kg de biomassa}$$

A seguir apresenta-se uma tabela com um resumo da poupança de combustível e emissões produzida:

Tabela 127. Redução de emissões de CO₂ e consumo de combustível

| Poupança | Gás natural(m3) | Gasóleo(l) | Butano(kg) | Biomassa (kg) |
|-------------------------------------|------------------------|-------------------|-------------------|----------------------|
| Combustível | 203,8 | 250,72 | 172,5 | 671,58 |
| Emissões CO₂ (kg) | 440,21 | 699,51 | 510,6 | 0 |

v. ANÁLISE DIÁRIA

Depois de realizar a análise ambiental, através de um estudo com uma base temporal anual precisamos de fazer outro tipo de análise, mais fina no tempo, para poder decidir entre um sistema de apoio ou outro, atendendo neste caso a razões económicas.

A motivação de levar a cabo uma análise deste tipo é, principalmente, o fato de a energia elétrica poder ter preços distintos segundo a hora do dia e quer a quantidade de energia solar usada quer a capacidade de usar a eletricidade em períodos de tempo em que é mais barata estão relacionados com a utilização da água quente ao longo do tempo (dia). Por isso, devemos estudar comparativamente as distintas possibilidades que nos dá o sistema de *backup* por resistência elétrica, aquecendo por exemplo, horas antes do consumo, relativamente ao aquecimento instantâneo dos sistemas de backup convencionais (mediante caldeira de gás natural, gasóleo,...). Mediante este “jogo” com a resistência elétrica e dependendo da forma com é usada a água quente ao longo do dia, é possível chegar a situações em que seja suficiente aquecer durante a noite, quando o preço da energia elétrica é menor ou até nem ser necessário nenhuma utilização do sistema de backup. Tudo isto depende do padrão de consumo do cliente em questão, pois um cliente que consuma sobretudo AQS pela noite, num mês de pouca radiação solar, provavelmente terá que ligar o *backup* em horas nas que a energia elétrica não seja tão barata.

Para realizar este estudo foi desenvolvida uma ferramenta em EXCEL para cada caso, diferenciando entre a análise do sistema de apoio mediante energia elétrica e os convencionais, pois têm um enfoque distinto desde o ponto de vista matemático, o qual será explicado na seção seguinte, mas o seu objetivo principal é obter um valor de temperatura de água no interior do acumulador para cada intervalo de tempo no que dividamos o dia.

v.i EXPLICAÇÃO DA FERRAMENTA EXCEL

Como foi dito na seção anterior, foram desenvolvidas duas ferramentas EXCEL distintas para os dois tipos de aquecimento já mencionados, mas estas ferramentas têm vários pontos em comum, como se explica a seguir.

Pontos em comum entre as duas ferramentas

Em primeiro lugar, a análise é feita com uma base diária, tomando intervalos de 15 minutos.

Os dados meteorológicos também são comuns às duas ferramentas, sendo estes dados valores médios mensais. Enquanto à radiação, diferenciamos entre a quantidade de energia que chega ao

painel, e a quantidade de energia térmica que somos capazes de transmitir à água de depósito, para isso utilizaremos a seguinte fórmula, de uma forma muito aproximada:

$$Q_{flu} = Q_{sol} \times \eta_{col} \times \xi_{int} \times S_c \quad (16)$$

Na que:

- Q_{flu} = Quantidade de energia que se lhe transmite à água
- Q_{sol} = Quantidade de energia solar que chega ao painel
- η_{col} = Rendimento médio anual do painel solar, calculado como segue:

$$\eta_{col} = a - b \frac{\Delta T}{I} \quad (17)$$

- a: Rendimento ótico do painel
 - b: Coeficiente de perdas lineares
 - ΔT : Diferença de temperatura entre a temperatura na entrada do coletor e a temperatura ambiente
 - I: Radiação
- ξ_{int} = Eficiência do trocador calor
 - S_c = Superfície de painel

Os padrões de consumo, ainda que na análise de sistemas de backup convencionais apenas afetam ao resultado final, também são comuns às duas ferramentas. Foram estudados 6 padrões de consumo diferentes (anexo 2):

- 1) Padrão com consumos repartidos entre manhã, tarde e noite.
- 2) Padrão com maior consumo pela manhã.
- 3) Padrão com maior consumo pela noite.
- 4) Padrão com maior consumo pela tarde.
- 5) Padrão com consumos iguais na manhã, tarde e noite.
- 6) Padrão com consumos similares unicamente na manhã e na noite.

Por último, falta mencionar os dados correspondentes ao acumulador, ou seja o volume do depósito, a superfície do depósito e o coeficiente de transferência de calor, também comuns nos dois casos.

ANÁLISE DIÁRIA SEM EE

A característica mais significativa para nós destes sistemas de *backup* é o aquecimento instantâneo que se produz numa caldeira. Pelo tanto, estes sistemas são mais simples de estudar, pois o único que temos que observar é a temperatura da água que temos no tanque no intervalo prévio ao

consumo. A energia necessária, que deve proporcionar o *backup*, será a que possibilite elevar a temperatura da água no depósito até a temperatura de AQS desejada

Em cada intervalo de tempo em se divide o dia, podem existir 4 situações diferentes:

1. Não há consumo de AQS nem radiação solar

Neste caso, a temperatura no tanque cambia devido às perdas térmicas pela superfície do depósito. Se a temperatura ambiente perto do depósito é menor que a da água no interior dele, a temperatura da água baixa, se é maior, sobe.

A variação da temperatura segue a seguinte fórmula:

$$T_1 = \frac{-S_{dep} \times U_{dep} \times (T_0 - T_{amb}) \times \Delta t}{V \times C_p} + T_0 \quad (18)$$

- T_1 : Temperatura da água no interior do depósito no instante t_1 (°C)
- S_{dep} : Superfície do depósito (m²)
- U_{dep} : Coeficiente de transferência de calor do depósito (kW/m².°C)
- T_0 : Temperatura no instante t_0 (°C)
- T_{amb} : Temperatura ambiente média do mês correspondente (°C)
- V : Volume ou massa de água acumulação (kg)
- C_p : Calor específico da água (kJ/kg.°C)
- Δt : Intervalo de tempo (s)

2. Não há radiação mas sim temos consumo de AQS (C)

A variação da temperatura da água no interior do tanque deve-se às perdas térmicas pela superfície do depósito e à mistura com a água fria da rede que entra para repor a água que sai cara o consumo. A temperatura de uma mistura de fluidos que estão a distinta temperatura calcula-se da seguinte maneira. A quantidade de calor que perde a massa de água quente é igual à quantidade de calor que ganha a massa fria. Assim, a temperatura final da água no depósito será:

$$(m_t - m_c) \times C_p \times (T_t - T_f) = m_c \times C_p \times (T_f - T_r) \quad (19)$$

$$T_f = \frac{(m_t - m_c) \times T_t + m_c \times T_r}{m_t} \quad (20)$$

- T_f : Temperatura da água depois da mistura
- T_t : Temperatura no tanque antes de produzir-se a mistura
- T_r : Temperatura da água da rede, que entra no depósito
- m_t : Quantidade de água equivalente ao volume do depósito
- m_c : Quantidade de água que sai cara consumo, e pelo tanto, quantidade de água que entra para repor esse consumo

- $m_t - m_c$: Este termo representa a quantidade de água que fica no depósito quando temos um consumo m_c . É a quantidade de água que se mistura com a água da rede, m_c .

A temperatura no instante t_1 é:

$$T_1 = \frac{(m_t - m_c) \times T_0 + m_c \times T_r}{m_t} - \frac{S_{dep} \times U_{dep} \times (T_0 - T_{amb}) \times \Delta t}{V \times C_p} \quad (21)$$

O primeiro termo da equação corresponde à temperatura resultante de misturar uma quantidade de água $m_t - m_c$, a temperatura T_0 , com uma quantidade de água m_c , a temperatura da água da rede .

3. Existe radiação mas não há consumo

A água do depósito aumenta a sua temperatura devido ao aquecimento que produz o sol, superando significativamente às perdas de térmicas pela superfície do depósito:

$$T_1 = T_0 + \frac{Q_{flu}}{V \times C_p} - \frac{S_{dep} \times U_{dep} \times (T_0 - T_{amb})}{V \times C_p} \quad (22)$$

- Q_{flu} : Quantidade de calor transmitida à água acumulada (kJ)

4. Existem tanto radiação como consumo

É o caso mais complexo, pois devemos ter em conta a mistura no interior do depósito, o aquecimento solar e as perdas:

$$T_1 = \frac{(m_t - m_c) \times T_0 + m_c \times T_r}{m_t} + \frac{Q_{flu}}{V \times C_p} - \frac{S_{dep} \times U_{dep} \times (T_0 - T_{amb}) \times \Delta t}{V \times C_p} \quad (23)$$

Com esta análise, obtemos a temperatura da água acumulada em cada intervalo de 15 minutos no que se divide cada dia, pelo tanto, quando tenhamos consumo, saem do depósito os litros desejados, e são aquecidos na caldeira auxiliar até a temperatura de AQS. Deste jeito calculamos facilmente a energia a proporcionar pelo *backup*, e a partir de esta energia, o custo económico.

ANÁLISE DIÁRIA COM *BACKUP* ELÉTRICO

O aquecimento através de *backup* elétrico é um bocado diferente ao aquecimento mediante sistemas convencionais, como se mostra na figura 11, pois a água é aquecida diretamente no interior do depósito. Porém, a resistência elétrica não aquece toda a água, só aquece a água que se encontra em cima dela. Este fato é difícil de avaliar no *EXCEL*, seria preciso utilizar um *software*

mais potente. Por isso chegou-se a uma solução aproximada, a qual será apresentada posteriormente.

A ferramenta desenvolvida permite-nos estudar a temperatura da água no interior do tanque em cada intervalo de tempo, com a diferença de que podemos simular a ligação do *backup* quando nós achamos que é necessário, variando assim a temperatura da água acumulada. Deste jeito, a ligação da resistência num momento do dia determinado tem um custo de energia elétrica, variável segundo a tarifa escolhida pelo usuário. Se sumamos os custos de cada intervalo no que ligamos o *backup*, obteremos o custo diário do nosso sistema auxiliar por energia elétrica, e poderemos compará-lo com os outros sistemas baseados em caldeiras auxiliares.

Enquanto à análise matemática, temos oito opções diferentes para estudar. Quatro delas são as mesmas que na seção anterior, que correspondem aos momentos no que o *backup* está desligado. Evitaremos a sua explicação para não cair em repetições, mas sim vão ser mostradas as outras quatro opções, correspondentes aos momentos nos que ligamos a resistência elétrica:

1. Não temos consumo nem sol e o *backup* está ligado

A temperatura no intervalo t_1 é a temperatura no intervalo t_0 mais o incremento de temperatura produzido pelo aquecimento elétrico, tendo em conta as perdas térmicas no depósito:

$$T_1 = T_0 + \frac{(Pot_b - (S_{dep} \times U_{dep} \times (T_o - T_{amb}))) \times \Delta t}{V \times C_p} \quad (24)$$

- Pot_b : Potencia elétrica da resistência de apoio (kW)

2. Há radiação solar, assim como consumo, e a resistência esta ligada

Aqui, temos um dobre aquecimento da água misturada no interior do depósito, produzido pelos aquecimentos elétrico e solar:

$$T_1 = \frac{Pot_b - (S_{dep} \times U_{dep} \times (T_o - T_{amb})) \times \Delta t}{V \times C_p} + \frac{Q_{flu}}{V \times C_p} + \frac{(m_t - m_c) \times T_o + m_c \times T_r}{m_t} \quad (25)$$

3. Não há consumo de AQS, mas temos radiação solar e o *backup* está ligado

Neste suposto também temos um dobre aquecimento, solar e elétrico, mas não temos mistura com água da rede, a temperatura inicial é a do intervalo anterior:

$$T_1 = T_0 + \frac{Q_{flu}}{V \times C_p} + \frac{(Pot_b - (S_{dep} \times U_{dep} \times (T_o - T_{amb}))) \times \Delta t}{V \times C_p} \quad (26)$$

4. Temos consumo e não há radiação solar, com o *backup* ligado

Misturamos a água do interior do depósito com a água fria da rede, para compensar a saída de água cara consumo, e aquecemos eletricamente com a resistência:

$$T_1 = \frac{(m_t - m_c) \times T_0 + m_c \times T_r}{m_t} + \frac{(Pot_b - (S_{dep} \times U_{dep} \times (T_o - T_{amb}))) \times \Delta t}{V \times C_p} \quad (27)$$

Após realizar esta análise, teremos para cada padrão de consumo e para cada mês, a sequência de ligado ou desligado da resistência elétrica que permita satisfazer as necessidades do cliente em termos de AQS.

v.ii SIMULAÇÃO E ESTUDO COM DADOS REAIS

Uma vez explicado o funcionamento da ferramenta *EXCEL*, procedemos à sua “posta” em marcha mediante a implementação de dados reais, mas antes é preciso aclarar algumas hipóteses utilizadas à hora de fazer as simulações:

- Coma foi dito na seção anterior, o *backup* elétrico não aquece toda a água do depósito, mas sim o faz com uma quantidade menor. É muito importante ter em conta este fato, pois em termos de energia consumida, não é o mesmo aquecer toda a massa de água do depósito que a metade por exemplo. Este fenómeno poderia ser simulado de ter empregado um *software* mais potente, mas ao empregar o *EXCEL*, a melhor opção atingida é fazer uma equivalência energética entre aquecer uma determinada porção da água acumulada no depósito até a temperatura de AQS (60°) indicada no RCCTE e aquecer toda a água do depósito até a uma temperatura inferior. Esta temperatura inferior é a que devemos ter na água do depósito em cada instante no que tenhamos consumo de AQS. O cálculo feito foi o seguinte:

$$m_d \times C_p \times (T_e - T_{mr}) = m_e \times C_p \times (T_{AQS} - T_{mr}) \quad (28)$$

- $m_d = 200$ l. (massa de água que cabe no depósito)
- T_e : Temperatura equivalente, é a incógnita
- $T_{mr} = 17^\circ\text{C}$ (temperatura média da água da rede)
- $m_e = 60$ l. (massa de água que aquece o backup elétrico)
- $T_{AQS} = 60^\circ\text{C}$ (temperatura de AQS recomendada pelo RCCTE)

Após fazer o cálculo resulta uma temperatura equivalente, $T_e = 29,9^\circ\text{C} \approx 30^\circ\text{C}$

- Com o objetivo de apreciar as diferenças entre aquecer água num mês de verão e faze-lo num mês de inverno, deixamos um primeiro dia sem aquecimento auxiliar, permitindo que unicamente o sol aqueça a água, assim, a temperatura da água no depósito no início do dia no que se levam a cabo as simulações é mais elevada num mês caloroso, Julho por exemplo, que noutra como Fevereiro, influenciando as necessidades energéticas de AQS para cada mês.

- Outra aproximação feita antes de iniciar a simulação é o cálculo de um rendimento médio do painel, devido à dificuldade de calculá-lo para cada intervalo de tempo. Os dados utilizados foram os seguintes:

- $\eta_0=0,803$
- $a_1=3,78 \text{ W/m}^2\cdot\text{°C}$
- $T_{\text{cin}}=45\text{°C}$ (temperatura média na entrada do painel)
- $T_{\text{amb}}=17,18\text{°C}$ (temperatura ambiente média anual)
- $I=311,86 \text{ W/m}^2$ (insolação anual média corrigida)

Assim, o rendimento médio assumido como constante para o nosso estudo é de:

$$\eta = 0,803 - 3,78 \times \frac{45 - 17,18}{311,86}$$

$$\eta = 0,4658$$

A seguir indicam-se os dados utilizados para fazer as simulações:

- $V_{\text{acum}} = 200 \text{ l.}$
- $S_{\text{acum}} = 6 \text{ m}^2$
- $U_{\text{acum}} = 1 \text{ W/m}^2\cdot\text{°C}$
- $C_p(\text{água}) = 4,1813 \text{ kJ/kg}\cdot\text{°C}$
- $T_{\text{AQS}} = 60\text{°C}$ (RCCTE)
- $T_e = 30\text{°C}$
- $\xi_{\text{int}} = 0,8$ (eficiência do trocador de calor)
- $S_c = 2,3 \text{ m}^2$ (superfície de painel)
- $\text{Pot}_b = 2,2 \text{ kW}$
- $T_r =$ Temperatura média mensal da água da rede. É de 15° no inverno, 19° no verão e 17° em outono e primavera.
- Poder calorífico inferior, preços e rendimentos dos combustíveis e das respetivas caldeiras:

Tabela 18. Características dos combustíveis

| | Gás natural | Gasóleo | Butano | Biomassa |
|--|----------------------------|----------------|----------------------------|----------------------------|
| PCI | 10,7 (kWh/m ³) | 11,78 (kWh/kg) | 12,44 (kWh/kg) | 3,87 (kWh/m ³) |
| η_{caldeira} | 1,09 | 0,88 | 1,09 | 0,9 |
| Preço | * ver tabela | 1,308 €/l | 17,50 €/bombona 12,5 kg | |

- Tarifário do gás natural

Tabela 19.Tarifario gas natural

| Escalão | m3/ano | Termo tarifário fixo (€/mês) | Energia (€/kWh) | Termo tarifário fixo (€/dia) |
|-----------|------------|------------------------------|-----------------|------------------------------|
| Escalão 1 | 0-220 | 2,11 | 0,0768 | 0,0695 |
| Escalão 2 | 221-500 | 3,56 | 0,0726 | 0,117 |
| Escalão 3 | 501-1000 | 5,27 | 0,0677 | 0,1732 |
| Escalão 4 | 1001-10000 | 5,53 | 0,0664 | 0,1819 |

Na seguinte tabela apresentam-se os resultados dos custos anuais segundo o padrão de consumo para cada sistema de apoio e para as três tarifas possíveis no aquecimento por resistência elétrica. Como foi dito anteriormente, temos em conta só o segundo dia depois de ter aquecido a água do depósito unicamente mediante a energia solar no primeiro dia, com a intenção de que tenham efeito as condições climáticas de cada mês. As simulações foram realizadas em EXCEL:

Tabela 20.Resultados analice diaria

| RESULTADOS ANÁLISE DIÁRIA | | | | | | |
|----------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| TARIFA SIMPLES | | | | | | |
| | Padrão 1 | Padrão 2 | Padrão 3 | Padrão 4 | Padrão 5 | Padrão 6 |
| €/ano | 124,54728 | 180,686 | 139,84256 | 132,27896 | 121,94204 | 134,8842 |
| TARIFA BI-HORÁRIA | | | | | | |
| | Padrão 1 | Padrão 2 | Padrão 3 | Padrão 4 | Padrão 5 | Padrão 6 |
| €/ano | 92,839615 | 113,078625 | 96,90208 | 104,2294 | 95,700605 | 94,941935 |
| TARIFA TRI-HORÁRIA | | | | | | |
| | Padrão 1 | Padrão 2 | Padrão 3 | Padrão 4 | Padrão 5 | Padrão 6 |
| €/ano | 91,888885 | 113,150895 | 94,15395 | 100,51008 | 92,333175 | 93,678255 |
| GÁS NATURAL | | | | | | |
| | Padrão 1 | Padrão 2 | Padrão 3 | Padrão 4 | Padrão 5 | Padrão 6 |
| €/ano | 157,929117 | 165,311259 | 155,966494 | 153,55829 | 156,300868 | 160,77574 |
| GASÓLEO | | | | | | |
| | Padrão 1 | Padrão 2 | Padrão 3 | Padrão 4 | Padrão 5 | Padrão 6 |
| €/ano | 310,043969 | 324,732724 | 306,138804 | 301,347037 | 306,804131 | 315,708091 |
| BUTANO | | | | | | |

| | Padrão 1 | Padrão 2 | Padrão 3 | Padrão 4 | Padrão 5 | Padrão 6 |
|----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| €/ano | 245 | 245 | 227,5 | 227,5 | 227,5 | 245 |
| BIOMASSA | | | | | | |
| | Padrão 1 | Padrão 2 | Padrão 3 | Padrão 4 | Padrão 5 | Padrão 6 |
| €/ano | 148,907349 | 155,962037 | 147,031783 | 144,730402 | 147,351325 | 151,627703 |

v.iii ANÁLISE DE RESULTADOS

Em primeiro lugar, podemos observar entre as alternativas enquanto a sistemas convencionais que a biomassa e o gás natural som as mais atrativas, ficando o butano e o gasóleo como dois sistemas de muito custo em comparação com os outros. Analisando os resultados deste tipo de sistemas, vemos que apenas há variação entre o custo para diferentes padrões de consumo, devido a que o aquecimento feito assim é ao instante.

Se comparamos as opções disponíveis entre os sistemas convencionais e o aquecimento elétrico, este último é claramente a opção mais apetecível para quase todos os padrões e tarifas estudadas. Só no caso do padrão 2, com um consumo dominante na manhã, e tarifa simples, resulta menos custoso utilizar um sistema de apoio mediante caldeira de gás natural ou biomassa.

Analisando agora o aquecimento mediante *backup* elétrico, mediante três tipos de tarifa [12], é simples apreciar que uma tarifa com vários preços segundo a hora do dia resulta muito mais atrativa que uma tarifa constante, como é a tarifa simples, para qualquer tipo de padrão. Entretanto, as outras duas tarifas, bi-horária e tri-horaria, têm custos parecidos para todos os padrões, mas é a tri-horária a que proporciona um menor custo monetário, sobretudo nos padrões 3,4 e 5 (predomina o consumo pela noite, pela tarde e consumo constante, respetivamente).

Agora bem, a análise do sistema de apoio por resistência elétrica foi feito de forma idílica e pouco real, pois é impossível predizer qual vai ser exatamente a disponibilidade de energia solar que vamos a ter, e pelo tanto, é impossível ligar o *backup* sempre no momento oportuno. Por isso foi feita uma segunda análise, mais conservadora, na que repetimos a sequência de ligado-desligado do *backup* para o mês mais frio, neste caso Dezembro, para todos os meses. Os resultados foram os seguintes:

Tabela 22. Resultados análise conservadora

| TARIFA SIMPLES | | | | | | |
|--------------------|----------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | Padrão 1 | Padrão 2 | Padrão 3 | Padrão 4 | Padrão 5 | Padrão 6 |
| €/ano | 337,4206 | 368,0952 | 368,0952 | 306,746 | 337,4206 | 337,4206 |
| TARIFA BI-HORÁRIA | | | | | | |
| | Padrão 1 | Padrão 2 | Padrão 3 | Padrão 4 | Padrão 5 | Padrão 6 |
| €/ano | 242,5863 | 278,420175 | 240,438275 | 240,438275 | 242,5863 | 242,5863 |
| TARIFA TRI-HORÁRIA | | | | | | |
| | Padrão 1 | Padrão 2 | Padrão 3 | Padrão 4 | Padrão 5 | Padrão 6 |
| €/ano | 235,6805 | 273,6624 | 241,281425 | 230,079575 | 238,430775 | 238,430775 |

Neste caso, a tarifa simples deixa de ser uma opção ante qualquer sistema de apoio convencional. Enquanto às tarifas bi-horária e tri-horária, seguem sendo rentáveis frente ao gásóleo, mas passam ser mais custosas que os sistemas mediante biomassa ou gás natural. O caso do butano é mais estudável, pois para padrões com consumos repartidos entre manhã, tarde e noite ou manhã e noite, as tarifas bi-horária e tri-horária continuam sendo a melhor opção, enquanto padrões com consumos dominantes na manhã, tarde ou noite, ou constantes nas três, são agora mais adequados ao apoio mediante butano.

vi. CONSIDERAÇÕES FINAIS

- Entre os distintos sistemas de *backup* mediante caldeira, já vimos que os mais rentáveis eram a biomassa e o gás natural. A decisão entre um e outro dependerá da situação geográfica do consumidor, pois pode haver lugares onde seja muito difícil fazer chegar o gás ou abastecer-se de biomassa.
- Após a análise diária, vimos que o sistema de apoio mediante *backup* elétrico era muito mais vantajoso que o resto de sistemas mediante caldeira. Isto pode ocorrer devido à evidente vantagem de ligar o *backup* nas horas onde a energia era mais barata, frente ao aquecimento instantâneo dos sistemas mediante caldeira. A prova disto é que quando foram feitas as simulações sem ter em conta a possibilidade de ligar o *backup* quando nós quisermos, as tarifas de energia elétrica não são tao vantajosas.

- Deve-se ter em conta que os resultados estão sujeitos às aproximações e simplificações realizadas, devido às limitações do EXCEL na simulação de fenómenos contínuos, coma a estratificação no depósito de água. Isto invita a um futuro trabalho empregando software mais potente.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Simulação de Cargas Elétricas no Contexto de Condicionamento da Procura de Energia Elétrica, Álvaro Filipe Peixoto Cardoso de Oliveira Gomes, 1995
- [2] Código Técnico de la Edificación (CTE), Documento Básico de Ahorro de Energía, 2006
- [3] Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), 2006
- [4] Pliego de Condiciones Térmicas de Instalaciones de Baja Temperatura, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2009
- [5] Simulation of a solar domestic water heating system, with different collector efficiencies and different volumen storage tanks, Delfín Silió Salcines, Carlos Renedo Estébanez and Valentín Castañera Herrero, 2007
- [6] Solar Engineering of Thermal Processes, Duffie&Beckman, 1980
- [7] www.repsol.com
- [8] www.enercost.eu/pt
- [9] www.averbiom.org
- [10] Decreto-Lei nº89/2008 do 30 de Maio
- [11] www.galp.com
- [12] www.edpsu.pt
- [13] <https://eosweb.larc.nasa.gov/>
- [14] Guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero, Oficina catalana del canvi climàtic

ANEXO 1: Dados meteorológicos

| Radiação média diária mensal sobre uma superfície horizontal (kWh/m ² /dia) | | | | | | | | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------------|
| Jan | Fev | Mar | Avr | Mai | Jun | Jul | Aug | Set | Out | Nov | Dez | Média anual |
| 2 | 2,96 | 4,38 | 5,49 | 6,61 | 7,66 | 7,63 | 6,65 | 5,05 | 3,41 | 2,14 | 1,74 | 4,64 |

| Temperatura média mensal da água da rede (°C) | | | | | | | | | | | |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Jan | Fev | Mar | Avr | Mai | Jun | Jul | Aug | Set | Out | Nov | Dez |
| 15 | 15 | 15 | 17 | 17 | 17 | 19 | 19 | 19 | 17 | 17 | 17 |

| Radiação média diária mensal sobre uma superfície inclinada 25° (kWh/m ² /dia) | | | | | | | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------------|
| Jan | Fev | Mar | Avr | Mai | Jun | Jul | Aug | Set | Out | Nov | Dez | Média anual |
| 2,6 | 3,64 | 5,08 | 5,93 | 6,74 | 7,66 | 7,78 | 7,25 | 6,01 | 4,43 | 2,95 | 2,37 | 5,20385 |

| Radiação média mensal sobre uma superfície inclinada 25° (kWh/m ²) | | | | | | | | | | | | |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|-----------|
| Jan | Fev | Mar | Avr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez | Total |
| 80,6 | 102 | 158 | 178 | 209 | 230 | 241 | 225 | 180 | 137 | 88,6 | 73,4 | 1902,3579 |

| Temperatura ambiente média mensal (°C) | | | | | | | | | | | |
|--|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|-----|
| Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
| 9,59 | 9,65 | 11,5 | 13,9 | 19 | 23,4 | 26,5 | 26,3 | 22,3 | 18,8 | 14,2 | 11 |

ANEXO 2: Padrões de consumo





ANEXO 3: Tabelas para o cálculo das perdas por sombras

Tabla V-1

| $\beta = 35^\circ$ $\alpha = 0^\circ$ | A | B | C | D |
|--|------|------|------|------|
| 13 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,03 |
| 11 | 0,00 | 0,01 | 0,12 | 0,44 |
| 9 | 0,13 | 0,41 | 0,62 | 1,49 |
| 7 | 1,00 | 0,95 | 1,27 | 2,76 |
| 5 | 1,84 | 1,50 | 1,83 | 3,87 |
| 3 | 2,70 | 1,88 | 2,21 | 4,67 |
| 1 | 3,15 | 2,12 | 2,43 | 5,04 |
| 2 | 3,17 | 2,12 | 2,33 | 4,99 |
| 4 | 2,70 | 1,89 | 2,01 | 4,46 |
| 6 | 1,79 | 1,51 | 1,65 | 3,63 |
| 8 | 0,98 | 0,99 | 1,08 | 2,55 |
| 10 | 0,11 | 0,42 | 0,52 | 1,33 |
| 12 | 0,00 | 0,02 | 0,10 | 0,40 |
| 14 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 |

Tabla V-2

| $\beta = 0^\circ$ $\alpha = 0^\circ$ | A | B | C | D |
|---|------|------|------|------|
| 13 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,18 |
| 11 | 0,00 | 0,01 | 0,18 | 1,05 |
| 9 | 0,05 | 0,32 | 0,70 | 2,23 |
| 7 | 0,52 | 0,77 | 1,32 | 3,56 |
| 5 | 1,11 | 1,26 | 1,85 | 4,66 |
| 3 | 1,75 | 1,60 | 2,20 | 5,44 |
| 1 | 2,10 | 1,81 | 2,40 | 5,78 |
| 2 | 2,11 | 1,80 | 2,30 | 5,73 |
| 4 | 1,75 | 1,61 | 2,00 | 5,19 |
| 6 | 1,09 | 1,26 | 1,65 | 4,37 |
| 8 | 0,51 | 0,82 | 1,11 | 3,28 |
| 10 | 0,05 | 0,33 | 0,57 | 1,98 |
| 12 | 0,00 | 0,02 | 0,15 | 0,96 |
| 14 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,17 |

Tabla V-3

| $\beta = 90^\circ$ $\alpha = 0^\circ$ | A | B | C | D |
|--|------|------|------|------|
| 13 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,15 |
| 11 | 0,00 | 0,01 | 0,02 | 0,15 |
| 9 | 0,23 | 0,50 | 0,37 | 0,10 |
| 7 | 1,66 | 1,06 | 0,93 | 0,78 |
| 5 | 2,76 | 1,62 | 1,43 | 1,68 |
| 3 | 3,83 | 2,00 | 1,77 | 2,36 |
| 1 | 4,36 | 2,23 | 1,98 | 2,69 |
| 2 | 4,40 | 2,23 | 1,91 | 2,66 |
| 4 | 3,82 | 2,01 | 1,62 | 2,26 |
| 6 | 2,68 | 1,62 | 1,30 | 1,58 |
| 8 | 1,62 | 1,09 | 0,79 | 0,74 |
| 10 | 0,19 | 0,49 | 0,32 | 0,10 |
| 12 | 0,00 | 0,02 | 0,02 | 0,13 |
| 14 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,13 |

Tabla V-4

| $\beta = 35^\circ$ $\alpha = 30^\circ$ | A | B | C | D |
|---|------|------|------|------|
| 13 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,10 |
| 11 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,06 |
| 9 | 0,02 | 0,10 | 0,19 | 0,56 |
| 7 | 0,54 | 0,55 | 0,78 | 1,80 |
| 5 | 1,32 | 1,12 | 1,40 | 3,06 |
| 3 | 2,24 | 1,60 | 1,92 | 4,14 |
| 1 | 2,89 | 1,98 | 2,31 | 4,87 |
| 2 | 3,16 | 2,15 | 2,40 | 5,20 |
| 4 | 2,93 | 2,08 | 2,23 | 5,02 |
| 6 | 2,14 | 1,82 | 2,00 | 4,46 |
| 8 | 1,33 | 1,36 | 1,48 | 3,54 |
| 10 | 0,18 | 0,71 | 0,88 | 2,26 |
| 12 | 0,00 | 0,06 | 0,32 | 1,17 |
| 14 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,22 |

Tabla V-5

| $\beta = 90^\circ$ $\alpha = 30^\circ$ | A | B | C | D |
|---|------|------|------|------|
| 13 | 0,10 | 0,00 | 0,00 | 0,33 |
| 11 | 0,06 | 0,01 | 0,15 | 0,51 |
| 9 | 0,56 | 0,06 | 0,14 | 0,43 |
| 7 | 1,80 | 0,04 | 0,07 | 0,31 |
| 5 | 3,06 | 0,55 | 0,22 | 0,11 |
| 3 | 4,14 | 1,16 | 0,87 | 0,67 |
| 1 | 4,87 | 1,73 | 1,49 | 1,86 |
| 2 | 5,20 | 2,15 | 1,88 | 2,79 |
| 4 | 5,02 | 2,34 | 2,02 | 3,29 |
| 6 | 4,46 | 2,28 | 2,05 | 3,36 |
| 8 | 3,54 | 1,92 | 1,71 | 2,98 |
| 10 | 2,26 | 1,19 | 1,19 | 2,12 |
| 12 | 1,17 | 0,12 | 0,53 | 1,22 |
| 14 | 0,22 | 0,00 | 0,00 | 0,24 |

Tabla V-6

| $\beta = 35^\circ$ $\alpha = 60^\circ$ | A | B | C | D |
|---|------|------|------|------|
| 13 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,14 |
| 11 | 0,00 | 0,00 | 0,08 | 0,16 |
| 9 | 0,02 | 0,04 | 0,04 | 0,02 |
| 7 | 0,02 | 0,13 | 0,31 | 1,02 |
| 5 | 0,64 | 0,68 | 0,97 | 2,39 |
| 3 | 1,55 | 1,24 | 1,59 | 3,70 |
| 1 | 2,35 | 1,74 | 2,12 | 4,73 |
| 2 | 2,85 | 2,05 | 2,38 | 5,40 |
| 4 | 2,86 | 2,14 | 2,37 | 5,53 |
| 6 | 2,24 | 2,00 | 2,27 | 5,25 |
| 8 | 1,51 | 1,61 | 1,81 | 4,49 |
| 10 | 0,23 | 0,94 | 1,20 | 3,18 |
| 12 | 0,00 | 0,09 | 0,52 | 1,96 |
| 14 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,55 |

Tabla V-7

| $\beta = 90^\circ$ $\alpha = 60^\circ$ | A | B | C | D |
|---|------|------|------|------|
| 13 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,43 |
| 11 | 0,00 | 0,01 | 0,27 | 0,78 |
| 9 | 0,09 | 0,21 | 0,33 | 0,76 |
| 7 | 0,21 | 0,18 | 0,27 | 0,70 |
| 5 | 0,10 | 0,11 | 0,21 | 0,52 |
| 3 | 0,45 | 0,03 | 0,05 | 0,25 |
| 1 | 1,73 | 0,80 | 0,62 | 0,55 |
| 2 | 2,91 | 1,56 | 1,42 | 2,26 |
| 4 | 3,59 | 2,13 | 1,97 | 3,60 |
| 6 | 3,35 | 2,43 | 2,37 | 4,45 |
| 8 | 2,67 | 2,35 | 2,28 | 4,65 |
| 10 | 0,47 | 1,64 | 1,82 | 3,95 |
| 12 | 0,00 | 0,19 | 0,97 | 2,93 |
| 14 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,00 |

Tabla V-8

| $\beta = 35^\circ$ $\alpha = -30^\circ$ | A | B | C | D |
|--|------|------|------|------|
| 13 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,22 |
| 11 | 0,00 | 0,03 | 0,37 | 1,26 |
| 9 | 0,21 | 0,70 | 1,05 | 2,50 |
| 7 | 1,34 | 1,28 | 1,73 | 3,79 |
| 5 | 2,17 | 1,79 | 2,21 | 4,70 |
| 3 | 2,90 | 2,05 | 2,43 | 5,20 |
| 1 | 3,12 | 2,13 | 2,47 | 5,20 |
| 2 | 2,88 | 1,96 | 2,19 | 4,77 |
| 4 | 2,22 | 1,60 | 1,73 | 3,91 |
| 6 | 1,27 | 1,11 | 1,25 | 2,84 |
| 8 | 0,52 | 0,57 | 0,65 | 1,64 |
| 10 | 0,02 | 0,10 | 0,15 | 0,50 |
| 12 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,05 |
| 14 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,08 |

Tabla V-9

| $\beta = 90^\circ$ $\alpha = -30^\circ$ | A | B | C | D |
|--|------|------|------|------|
| 13 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,24 |
| 11 | 0,00 | 0,05 | 0,60 | 1,28 |
| 9 | 0,43 | 1,17 | 1,38 | 2,30 |
| 7 | 2,42 | 1,82 | 1,98 | 3,15 |
| 5 | 3,43 | 2,24 | 2,24 | 3,51 |
| 3 | 4,12 | 2,29 | 2,18 | 3,38 |
| 1 | 4,05 | 2,11 | 1,93 | 2,77 |
| 2 | 3,45 | 1,71 | 1,41 | 1,81 |
| 4 | 2,43 | 1,14 | 0,79 | 0,64 |
| 6 | 1,24 | 0,54 | 0,20 | 0,11 |
| 8 | 0,40 | 0,03 | 0,06 | 0,31 |
| 10 | 0,01 | 0,06 | 0,12 | 0,39 |
| 12 | 0,00 | 0,01 | 0,13 | 0,45 |
| 14 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,27 |

Tabla V-10

| $\beta = 35^\circ$ $\alpha = -60^\circ$ | A | B | C | D |
|--|------|------|------|------|
| 13 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,56 |
| 11 | 0,00 | 0,04 | 0,60 | 2,09 |
| 9 | 0,27 | 0,91 | 1,42 | 3,49 |
| 7 | 1,51 | 1,51 | 2,10 | 4,76 |
| 5 | 2,25 | 1,95 | 2,48 | 5,48 |
| 3 | 2,80 | 2,08 | 2,56 | 5,68 |
| 1 | 2,78 | 2,01 | 2,43 | 5,34 |
| 2 | 2,32 | 1,70 | 2,00 | 4,59 |
| 4 | 1,52 | 1,22 | 1,42 | 3,46 |
| 6 | 0,62 | 0,67 | 0,85 | 2,20 |
| 8 | 0,02 | 0,14 | 0,26 | 0,92 |
| 10 | 0,02 | 0,04 | 0,03 | 0,02 |
| 12 | 0,00 | 0,01 | 0,07 | 0,14 |
| 14 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,12 |

Tabla V-11

| $\beta = 90^\circ$ $\alpha = -60^\circ$ | A | B | C | D |
|--|------|------|------|------|
| 13 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,01 |
| 11 | 0,00 | 0,08 | 1,10 | 3,08 |
| 9 | 0,55 | 1,60 | 2,11 | 4,28 |
| 7 | 2,66 | 2,19 | 2,61 | 4,89 |
| 5 | 3,36 | 2,37 | 2,56 | 4,61 |
| 3 | 3,49 | 2,06 | 2,10 | 3,67 |
| 1 | 2,81 | 1,52 | 1,44 | 2,22 |
| 2 | 1,69 | 0,78 | 0,58 | 0,53 |
| 4 | 0,44 | 0,03 | 0,05 | 0,24 |
| -6 | 0,10 | 0,13 | 0,19 | 0,48 |
| 8 | 0,22 | 0,18 | 0,26 | 0,69 |
| 10 | 0,08 | 0,21 | 0,28 | 0,68 |
| 12 | 0,00 | 0,02 | 0,24 | 0,67 |
| 14 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,36 |