

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Fachadas vivas – Desenvolvimento de Protótipo de Sombreamento Passivo

Noa Leandro Romão Estes

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Dissertação orientada por:
Miguel Centeno Brito

2018

Resumo

A crescente procura de soluções que promovam a eficiência energética nos edifícios potencializa o aparecimento de alternativas aos sistemas existentes. No âmbito da redução dos ganhos solares e maximização da disponibilidade de luz natural, foi desenvolvido um protótipo de controlo solar com um material inteligente, o polietileno, que tem memória de forma e funciona simultaneamente como sensor e atuador.

O protótipo procura replicar uma fachada viva, contemplando um elemento vertical opaco com envidraçado e um estore veneziano com movimento fototrófico. O sombreamento é dinâmico, alternando entre obstrução total e parcial, conforme a radiação solar incidente e temperatura ambiente. O mecanismo de controlo solar é constituído por uma placa de polietileno interligada a uma alavanca e a um sistema de cabos que regulam a inclinação das lâminas do estore. O protótipo é uma alternativa ao controlo manual nativo do dispositivo de sombreamento, tratando-se de um sistema passivo pois não consome energia elétrica nem combustível.

Os ensaios experimentais ocorreram no *Campus Solar* da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, durante os meses de agosto e setembro, com a fachada orientada a nascente. Foram testadas e avaliadas diferentes afinações do mecanismo para operar em intervalos de temperaturas distintos. As fases de ativação e desativação do sombreamento foram bem sucedidas, tendo as lâminas percorrido praticamente toda amplitude angular ao longo de cerca de uma hora, variando entre 0° e 76°, respetivamente, estore aberto e fechado. Exposta ao sol, a placa de polietileno atingiu 53.5°C e expandiu 2.1 milímetros, que foram alavancados para um deslocamento dos cabos de inclinação em 48 milímetros.

Palavras-Chave:

Sombreamento solar dinâmico, sistema passivo, termo-mecânico, material com memória de forma, fachadas responsivas

Abstract

The growing demand for solutions that promote energy efficiency in buildings potentiates the emergence of alternatives to existing systems. In the scope of reducing solar gains and maximizing the availability of daylight, a solar control prototype was developed with a smart material, polyethylene, which has shape memory and functions simultaneously as a sensor and actuator.

The prototype seeks to replicate a living facade, contemplating an opaque vertical element with glazing and a venetian blind with phototropic movement. The shading is dynamic, alternating between total and partial obstruction, according to incident solar radiation and ambient temperature. The solar control mechanism consists of a polyethylene plate interconnected to a lever and to a system of cables that regulate the blind's slat tilt. The prototype is an alternative to the native manual control of the shading device, being a passive system because it consumes neither electric energy nor fuel.

The experimental tests took place in the Solar *Campus* of the Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, during the months of August and September, with the facade facing East. Different tunings of the mechanism have been tested and evaluated to operate at different temperature ranges. The shading activation and deactivation phases were successful, with the slats covering almost the entire angular range over about an hour, from 0 ° to 76 °, respectively, open and closed blinds. Exposed to the sun, the polyethylene plate reached 53.5 ° C and expanded 2.1 millimeters, which were leveraged for a displacement of the tilt cables by 48 millimeters.

Keywords:

Dynamic solar shading, passive system, thermal mechanical, shape memory material, responsive facades

Índice

Resumo.....	i
Abstract	ii
Índice.....	iii
Índice de Figuras	iv
Índice de Tabelas.....	v
Agradecimentos.....	vii
Simbologia e Notações.....	ix
Capítulo 1 – Introdução.....	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Estrutura da dissertação.....	2
Capítulo 2 – Fundamentação teórica.....	3
2.1. Estado da Arte	3
Capítulo 3 – Fachada Viva.....	9
3.1. Conceito	9
3.2. Dispositivo de Sombreamento	10
3.2.1. Controlo Automático Passivo.....	10
3.2.2. Radiação Solar.....	11
3.3. Dimensionamento	12
3.3.1. Balanço Energético	12
3.3.2. Expansão Térmica	13
3.3.3. Alavanca.....	15
3.4. Componentes.....	16
3.4.1. Porta com Envidraçado	16
3.4.2. Estore Veneziano.....	17
3.4.3. Placa Expansora	18
3.4.4. Alavanca.....	19
3.4.5. Fio de Ligação.....	20
3.4.6. Afinação	21
Capítulo 4 – Ensaio Experimentais.....	23
4.1. Localização	23
4.2. Instrumentação	24
4.3. Metodologia	27
4.3.1. Procedimento Experimental	27
4.3.2. Tratamento de Dados Experimentais	28
4.3.2.1. Radiação Global Incidente	29

4.3.2.2. Deslocamento do Fio de Ligação	31
4.3.2.3. Variação do Comprimento da Placa Expansora	33
4.4. Resultados	34
4.5. Discussão.....	41
4.5.1. Limitações Experimentais	41
Capítulo 5 – Futuros desenvolvimentos	43
Capítulo 6 - Conclusão.....	45
Referências Bibliográficas	47
Anexos.....	49
Anexo A	49
Anexo B	53
Anexo C	54
Anexo D	55

Índice de Figuras

Figura 1 - Estore veneziano exterior com estante de luz (imagem à esquerda) e com revestimento seletivo (imagem à direita). Fonte: [4].	4
Figura 2 – Sala de exposição/escritório da Kiefer em Bad Gleichenberg, Áustria (imagem à esquerda) e Torres Al Bahar em Abu Dabi, Emirados Árabes Unidos (imagem à direita). Fonte: [5].	4
Figura 3 – Vidro eletrocromático da View Dynamic Glass. Fonte: [7].	5
Figura 4 – Vidro com pcm e prismas refletores da GlassX. Fonte: [8].	5
Figura 5 – Controlo solar através de um material com memória de forma (sma) – SmartScreen. Fonte: [9].	6
Figura 6 – Controlo solar através de um material com memória de forma (sma) – Harvest Shade Screen. Fonte: [10].	6
Figura 7 - Controlo solar através de um material com memória de forma – Wax Actuator with Sun Shade. Fonte: [11].	7
Figura 8 – Esboço de um protótipo de seguimento solar passivo - SEGSOL. Fonte: [12]	7
Figura 9 - Esboço da Fachada Viva.	9
Figura 10 – Modelo de estore veneziano e pontos de aplicação de força de tração para novo controlo. Adaptado de [15].	10
Figura 11 – Irradiância numa superfície vertical, para diferentes azimutes, no início e fim do verão.	11
Figura 12 - Irradiância que atravessa o dispositivo de sombreamento com as lâminas na horizontal, para diferentes azimutes, no início e fim do verão.	12
Figura 13 - Variação do comprimento da placa expansora na vertical e horizontal para diferentes azimutes no dia 21 de junho.	14
Figura 14 - Relação da distância entre os braços da alavanca.....	15
Figura 15 – Porta de madeira com envidraçado apoiada por esquadros metálicos.	16
Figura 16 – Estore veneziano interior de lâminas metálicas.	17
Figura 17 - Detalhes da placa expansora.....	19

Figura 18 – Esquemática da alavanca para três estados do fio de ligação.	19
Figura 19 – Detalhes da alavanca.	20
Figura 20 - Detalhes do fio de ligação	21
Figura 21 - Detalhe do mecanismo de controlo de inclinação: sistema de afinação.	22
Figura 22 - Representação da estação meteorológica e Fachada Viva no Campus Solar da FCUL.	23
Figura 23 - Na imagem à esquerda – Webcam (em baixo), Microscópio digital (em cima). Na imagem à direita – módulos fotovoltaicos e sensor de temperatura sobre a Placa Expansora.	24
Figura 24 - Ibutton e pen usb DS9490.	24
Figura 25 - Equipamentos de registo de imagens: Webcam e Microscópio digital	25
Figura 26 - Configuração de um circuito de medição de tensão, por divisor de tensão, de um módulo fotovoltaico.	25
Figura 27 - Representação da estação meteorológica do Campus Solar da FCUL.	26
Figura 28 - Representação do movimento de inclinação de uma lâmina vista de perfil.	31
Figura 29 - Exemplo de uma amostra vídeo do movimento de inclinação das lâminas do estore.	32
Figura 30 - Exemplo da medição do ângulo das lâminas. Imagem à esquerda – início do deslocamento. Imagem à direita – ângulo medido entre a lâmina e a Fachada Viva.	32
Figura 31 - Exemplo de uma amostra vídeo da expansão da placa com o microscópio digital. .	33
Figura 32 - Exemplo de medição da expansão da placa. Imagem à esquerda – ponto de medição, de referência e valor de escala. Imagem à direita – valores medidos de expansão da placa e de deslocamento do referencial.	34
Figura 33 – Temperatura e variação de comprimento da placa expansora para um ensaio de ativação do sombreamento seguido pela respetiva desativação.	35
Figura 34 – Coeficiente de expansão térmica linear da placa expansora para um ensaio de ativação do sombreamento seguido pela respetiva desativação.	36
Figura 35 – Fator solar do vão envidraçado da Fachada Viva durante a ativação do sombreamento.	36
Figura 36 – Vantagem mecânica da alavanca para um ensaio de ativação do sombreamento seguido pela respetiva desativação.	37

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Constantes físicas da placa expansora, PE-HWU.	13
Tabela 2 – Expansão térmica linear para o controlo da inclinação dos dispositivos de sombreamento orientados a este e a oeste e valores utilizados para o seu cálculo.	15
Tabela 3 - Especificações dos equipamentos de medição de radiação solar da estação meteorológica [13].	27
Tabela 4 - Representação da aquisição e tratamento de dados para avaliação experimental da Fachada Viva.	28
Tabela 5 – Resumo do procedimento experimental dos processos de ativação e desativação do mecanismo de controlo do sombreamento.	28
Tabela 6 - Resultados experimentais dos ensaios de ativação.	39
Tabela 7 - Resultados experimentais dos ensaios de desativação.	40

Agradecimentos

A aprendizagem é uma jornada interminável que se torna mais profícua quando acompanhada.

Em primeiro lugar, quero agradecer ao meu orientador, Dr. Miguel Centeno Brito, pela simpatia e disponibilidade com que me guiou neste trabalho.

À Dr.^a Marta Panão, pelos conselhos, o apoio e especialmente por ter aguçado o meu interesse na área de Energia em Edifícios.

Ao Ricardo da oficina da FCUL, pelas horas incansáveis em que estive ao meu lado na construção do protótipo desenvolvido.

Finalmente, não posso deixar de agradecer a todos os que partilharam esta etapa tão importante da minha vida, família, amigos e colegas.

Simbologia e Notações

α	Absortividade
α_s	Elevação Solar
α_L	Inclinação das lâminas
β	Inclinação
γ	Ângulo Azimutal
δ	Declinação Solar
ε	Emissividade
η_{mec}	Eficiência mecânica
θ_i	Ângulo de Incidência
θ_z	Ângulo Zenital
ρ	Massa Volúmica
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
φ	Azimute Solar
Φ	Latitude
ω	Ângulo horário Solar
Ω	Resistência
A_s	Área de superfície
$c_{b,c}$	Comprimento do braço de carga
$c_{b,e}$	Comprimento do braço de esforço
c_p	Calor específico
C_s	Coefficiente solar
CET	Coefficiente de Expansão Térmica
D_C	Distância Percorrida pelos Cabos de Inclinação
DHI	<i>Diffuse Horizontal Irradiance</i>
DNI	<i>Direct Normal Irradiance</i>
E_{in}	Energia que Entra no Volume de Controlo
E_{oT}	<i>Equation of Time</i>
E_{out}	Energia que Sai do Volume de Controlo
ΔE_{st}	Varição de Energia Armazenada num Volume de Controlo
F	Fulcro
FCUL	Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
F_c	Força de Carga
F_e	Força de Esforço
GHI	<i>Global Horizontal Irradiance</i>

GVI	<i>Global Vertical Irradiance</i>
h_c	Coeficiente Convectivo
I	Corrente
l	Espessura da Placa
L	Largura das Lâminas
L	Comprimento da Placa
LL	<i>Local Latitude</i>
LSTM	<i>Local Meridian Standard Time</i>
LT	<i>Local Time</i>
N	Dias do ano
PV	Fotovoltaico
T	Temperatura
V	Volume
V	Tensão
VM	Vantagem Mecânica

Capítulo 1 – Introdução

1.1. Enquadramento

A humanidade ao longo da sua história foi confrontada com inúmeros desafios que estiveram a par com avanços tecnológicos. Será no decorrer do século XXI que terão de ser criadas bases de sustentação para um mundo superpovoado e com maiores exigências de recursos que ameaçam o nosso futuro. Face ao crescimento do consumo energético estão a ser adotadas políticas que visam melhorar a eficiência energética nos vários setores. O setor de edifícios representa 30% do consumo de energia final mundial [1] e poderá aumentar 50% até 2050, no entanto há a possibilidade de limitar esse crescimento até 10% aplicando medidas que promovam a sustentabilidade energética dos edifícios [2]. A aposta tem passado pela eficiência energética dos equipamentos e pelo isolamento térmico das envolventes dos edifícios.

A fachada dos edifícios atua como um elemento regulador das condições ambientais, nos ganhos e perdas de calor, na admissão de luz natural e na renovação de ar. Até ao século XX o tipo de construção era adequado ao local, porém com a evolução tecnológica, a arquitetura transformou-se e suportou outras soluções construtivas com sistemas mecânicos e elétricos. As edificações contemporâneas, muitas vezes isoladas e com grandes áreas de envidraçados, têm revelado problemas de sobreaquecimento que podem ser corrigidos com estratégias de sombreamento solar, vitais para a redução do consumo energético em climatização, otimização da luz ambiente e conforto térmico e visual. Tradicionalmente o controlo solar nos edifícios passa por sistemas fixos e móveis manuais. Contudo têm sido exploradas outras soluções que permitem dar uma resposta mais eficaz às variações diárias e sazonais das condições climáticas. Neste contexto tem surgido um maior enfoque sobre conceitos como a arquitetura bioclimática, edifícios inteligentes e fachadas responsivas. Os avanços na pesquisa e desenvolvimento no controlo de ganhos solares têm resultado no aparecimento de sistemas cinéticos e materiais inteligentes, com ou sem recurso a dispositivos eletro-mecânicos.

1.2. Objetivos

O trabalho apresentado nesta dissertação explora um sistema de controlo de ganhos solares através de um material com memória que atue simultaneamente como sensor e atuador. Pretende-se um mecanismo de controlo autónomo que opere mediante a expansão térmica de um sólido pela incidência de radiação solar. Este trabalho consiste numa primeira reflexão sobre a viabilidade da integração de um mecanismo de controlo, automático mas passivo, a estores venezianos exteriores, como estratégia de arrefecimento passivo.

Neste contexto foram definidos os seguintes objetivos:

- Identificar o grau de inovação do projeto, através de um estudo do estado da arte;
- Desenvolver e construir um automatismo de controlo passivo de estores venezianos que atue conforme a incidência de radiação na fachada;
- Montar uma instalação experimental no Campus Solar da FCUL;
- Avaliar a funcionalidade e o desempenho do protótipo através dos resultados obtidos.

1.3. Estrutura da dissertação

A dissertação encontra-se estruturada em seis capítulos:

No presente capítulo, **Capítulo 1**, é realizado o enquadramento geral do estudo, com destaque para importância do controlo solar nos ganhos térmicos dos edifícios. São ainda definidos os principais objetivos a alcançar com o desenvolvimento da dissertação.

No **Capítulo 2** apresentaram-se as principais soluções de sombreamento atualmente consideradas e as respetivas características técnicas, tendo sido ainda analisadas alternativas aos dispositivos mais comuns.

No **Capítulo 3** é abordado o conceito do protótipo e justificada a pertinência do automatismo do controlo solar. É descrito como o sistema foi dimensionado e detalhados os elementos que compõem a *Fachada Viva*.

No **Capítulo 4**, é apresentada a atividade experimental e os resultados obtidos. Foram ainda tecidas considerações sobre as limitações experimentais que condicionaram o funcionamento do protótipo e os resultados.

No **Capítulo 5**, são propostas soluções para as questões levantadas no capítulo anterior e recomendações de outros parâmetros a avaliar experimentalmente.

Finalmente, no **Capítulo 6**, apresentam-se as principais conclusões do trabalho desenvolvido.

No **Anexo A**, está apresentado código *Matlab* para a avaliação da radiação solar no *Campus* da FCUL, para a determinar a radiação solar que atravessa o envidraçado com as lâminas na horizontal e para o dimensionamento do protótipo.

No **Anexo B**, está apresentado código para ler os sinais analógicos do Arduino e calcular a voltagem gerada pelos dois módulos fotovoltaicos durante os ensaios experimentais.

No **Anexo C**, está apresentado código *Matlab* para determinar a radiação incidente numa superfície vertical tendo por base dados da estação meteorológica do *Campus Solar* da FCUL.

No **Anexo D**, estão representados os gráficos dos ensaios experimentais para os processos de ativação e desativação do sombreamento da *Fachada Viva*.

Capítulo 2 – Fundamentação teórica

2.1. Estado da Arte

Desde cedo se percebeu a importância da orientação solar para os ganhos térmicos dos edifícios e esse princípio refletiu-se nas primeiras cidades pela sua disposição e organização. Privilegiando o recurso solar foi igualmente necessário controlá-lo nos períodos quentes. Nas civilizações clássicas o sombreamento fixo era feito através de beirados, pórticos ou galerias, e o móvel por dispositivos simples, com telas presas por cordas, ou lonas suspensas com argolas passíveis de serem recolhidas. Atualmente as opções para sombreamento solar são vastas e podem ser bastante mais sofisticadas, embora os dispositivos mais comuns continuem a ser simples, seja pelos custos ou desconforto com novas tecnologias.

O controlo solar pode ser exterior, interior ou com vidros avançados. Os sistemas de sombreamento móveis exteriores são mais eficazes quando comparados aos interiores, pois a radiação solar é obstruída e dispersa antes de chegar ao vidro, ao invés de o atravessar e ficar retida no interior, criando assim um efeito de estufa.

Por norma, os dispositivos podem ser controlados manual ou automaticamente, sendo que os sistemas automatizados representam um maior investimento que poderá ser recuperado com poupança energética na climatização e iluminação. Esse tipo de controlo pode ser integrado em sistemas de gestão de energia em edifícios, que monitorizam as condições interiores com sensores de temperatura, humidade, ocupação, luz natural, e que juntamente com dados de previsões meteorológicas, ditam o funcionamento dos equipamentos AVAC, luminária e sombreamento.

Há muitos produtos no mercado que incorporam motores elétricos para a automatização do controlo solar, tais como, estores, persianas, telas de rolo e cortinas. Uma das soluções mais comuns são os denominados estores venezianos.

É habitual encontrar este tipo de sombreamento em habitações e em escritórios, pois pode-se enquadrar em diversos tipos de projetos, pelo seu design moderno, por ser possível aplicar em vãos de dimensões consideráveis e pelo manuseamento/funcionamento ser simples e fácil. As lâminas dos estores apresentam uma grande variedade cromática, de materiais e forma, permitindo adequar-se ao design e função. Outra vantagem deste dispositivo é ter a opção de um segundo movimento, além do estore recolher, as lâminas mudam de ângulo podendo assim estarem posicionadas por forma a bloquear totalmente a radiação direta (ângulo de corte), proporcionar uma visão parcial do exterior e difundir a luz natural para o espaço interior.

A *Figura 1* mostra-nos dois exemplos que melhoram o desempenho deste sistema. As lâminas da seção superior atuam como uma estante de luz e refletem a mesma para o interior, reduzindo assim o uso iluminação artificial. Estas podem estar revestidas com uma tinta seletiva para que reflitam apenas a luz visível e absorvam a radiação ultravioleta e infravermelha, mitigando os ganhos térmicos e consumos energéticos com arrefecimento.

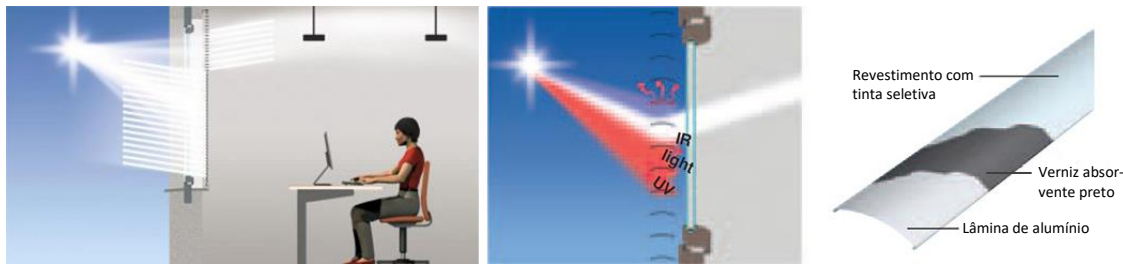


Figura 1 - Estore veneziano exterior com estante de luz (imagem à esquerda) e com revestimento seletivo (imagem à direita). Fonte: [4].

Além dos produtos atualmente comercializados, têm aparecido gradualmente mais exemplos de edifícios com fachadas dinâmicas, compostos por sistemas mais complexos que são personalizados para cada projeto por equipas de engenheiros e arquitetos. A *Figura 2* apresenta dois edifícios com diferentes tipos de sistemas mecânicos cinéticos.



Figura 2 – Sala de exposição/escritório da Kiefer em Bad Gleichenberg, Áustria (imagem à esquerda) e Torres Al Bahar em Abu Dabi, Emirados Árabes Unidos (imagem à direita). Fonte: [5].

Estes edifícios têm fachadas dinâmicas controladas por sistemas centrais que comandam eletronicamente partes móveis para se dobrarem conforme as condições exteriores, melhorando o conforto dos seus ocupantes e a sustentabilidade energética. Na fase de conceção destas fachadas é preciso ter em conta como o clima pode afetar o seu desempenho e longevidade para evitar que as partes móveis fiquem obstruídas ou que se dê a sobrecarga dos pontos de articulação, bem como garantir alternativas caso os sistemas falhem e as fachadas fiquem estáticas. Mais do que disporem de soluções eficazes, estes edifícios pretendem ser ícones de arquitetura, representando elevados investimentos, o que leva a uma discussão mais ampla de tópicos como o “custo de utilização” e o “custo de ciclo de vida”. Além do investimento inicial é necessário ponderar os encargos com a manutenção e operação, atualmente a fachada do Institut du Monde Arabe em Paris está imobilizada devido aos incombortáveis custos.

O desenvolvimento e a maturação dos materiais inteligentes possibilitam outras abordagens para a composição das fachadas responsivas, dadas as suas características adaptativas e dinâmicas, podendo ser: eletrocromáticos, eletroluminescentes, higróativos, fotocromáticos, piezoelétricos, termocrómicos, termoelétricos, termostáticos, ligas com memória de forma (SMA, do inglês *shape memory alloys*) e materiais de mudança de fase (PCM, do inglês *phase changing materials*)

[6]. Alguns destes materiais têm um grande potencial para serem empregues no controlo solar, seja em vidros avançados ou na cinética do sombreamento.

Os vidros eletrocromáticos variaram as suas propriedades óticas e conseqüentemente a cor, mantendo a transparência, absorvendo a radiação solar e irradiando o calor e brilho para o exterior. Estes contêm películas compostas por metais de transição que mudam o seu estado de oxidação quando aplicada uma pequena tensão elétrica (menos de 5 Volts). Revertendo a polaridade da tensão o vidro volta a ficar totalmente transparente. Os utilizadores ou sistemas de controlo podem definir qual o nível de escurecimento, sendo essa a principal vantagem relativamente aos comuns vidros com películas, pois limitam a disponibilidade de luz natural e os ganhos solares e na estação de aquecimento.

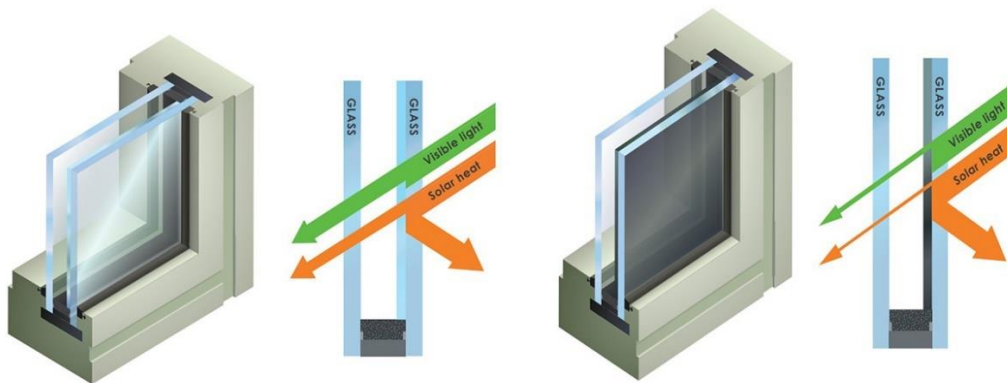


Figura 3 – Vidro eletrocromático da View Dynamic Glass. Fonte: [7].

O vidro da GlassX (Figura 4) funciona como proteção contra o sobreaquecimento, armazenamento térmico e conversor de energia, numa unidade transparente altamente isolada, equiparando-se a uma parede, com um coeficiente de transmissão térmica de $0.48 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$. Trata-se de um sistema passivo que dispõe de um elemento que muda de fase com a variação de temperatura (PCM) e prismas que refletem a radiação para ângulos solares superiores a 40° . O elemento PCM é o cloreto de cálcio hexahidratado que está num pano estreito e tem uma capacidade térmica equivalente a uma parede de betão com 20 cm de espessura. Durante os dias de verão o elemento PCM absorve o calor, reduzindo a temperatura interior, libertando-o à noite e como a altura solar é maior a radiação é refletida pelos prismas. No inverno os ganhos solares são maximizados pois o prisma permite que a radiação passe para ângulos inferiores a 35° .

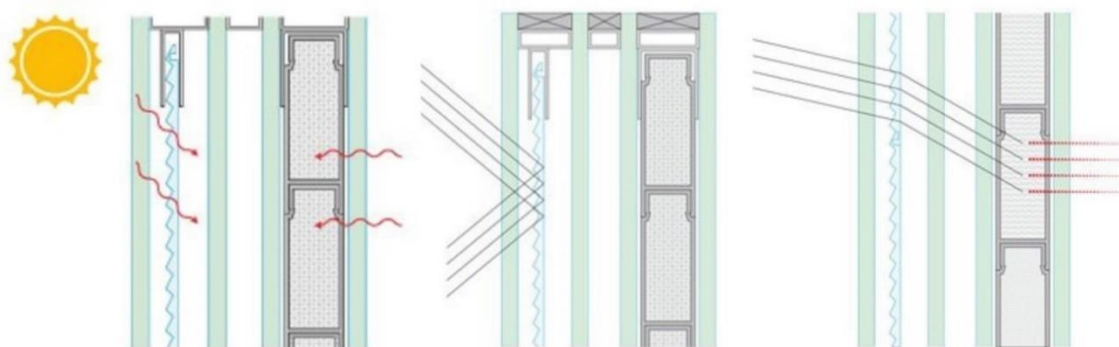


Figura 4 – Vidro com pcm e prismas refletores da GlassX. Fonte: [8].

O sistema de sombreamento SmartScreen (Figura 5) é uma tela de rolo com aberturas, por onde a luz solar atravessa, que são reguladas, mediante a temperatura interior de um espaço, através de uma mola superelástica e com memória de forma (SMA). Essa mola tem uma constante elástica variável e está oposta a outra, cuja dureza é fixa, e ambas estão num permanente jogo de forças. Quando a temperatura interior passa os 21°C, a mola com a elasticidade variável empurra a segunda gradualmente, até que aos 26°C o sombreamento é total. Com a redução de temperatura o processo reverte-se.

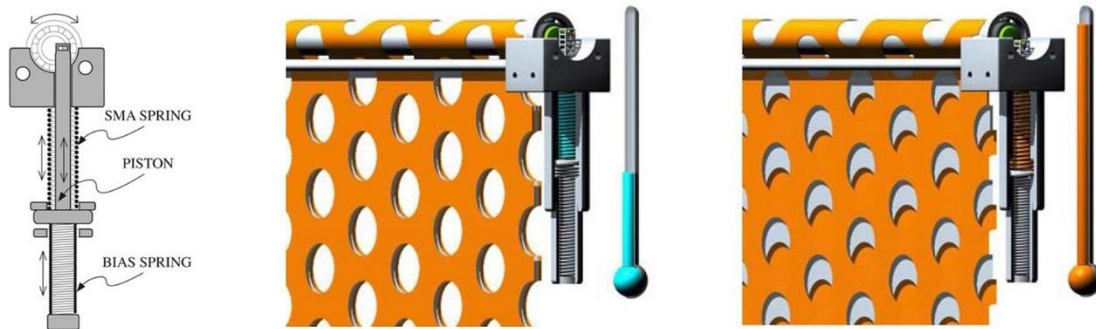


Figura 5 – Controlo solar através de um material com memória de forma (sma) – SmartScreen. Fonte: [9].

O Harvest Shade Screen (Figura 6) é um estore veneziano com lâminas plásticas que fecham o espaço entre si por rotação dos seus eixos. O movimento ocorre pela resposta de uma liga, superelástica e com memória de forma, à variação da temperatura ambiente e radiação solar. A liga é um fio que está ligado a uma mola e transforma-se no intervalo de temperatura entre os 15°C e os 30°C. O sistema opera praticamente num ciclo diurno, ao invés de ter uma resposta 1:1, porque a liga foi sujeita a um processo de têmpera que criou um gradiente de temperatura, de cerca de 10°C, entre a mudança de fase da martensita e austenite que suavizando o tempo de resposta do material.

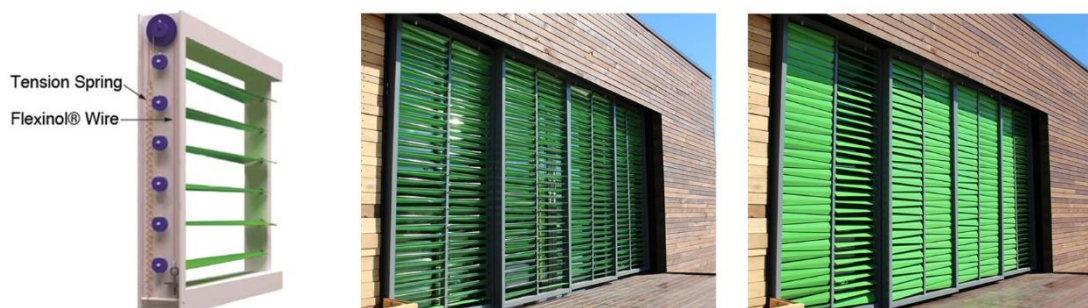


Figura 6 – Controlo solar através de um material com memória de forma (sma) – Harvest Shade Screen. Fonte: [10].

A Zomeworks Corporation desenvolveu um mecanismo passivo de sombreamento que consiste num cilindro preenchido com cera que derrete com aumento da temperatura e empurra um pistão que por sua vez está ligado a um sistema hidráulico que controla a inclinação de uma pala (Figura

7). O cilindro está exposto ao sol e tem cor escura e abas refletoras para maximizar a absorção solar. A pala retorna à posição inicial quando a cera muda de fase passando do estado líquido ao sólido.



Figura 7 - Controle solar através de um material com memória de forma – Wax Actuator with Sun Shade. Fonte: [11].

Os materiais com memória de forma têm múltiplas aplicações na robótica e na indústria biomédica, automóvel e aeroespacial. No âmbito deste estudo e alicerçado nessa característica, considerou-se ainda um sistema de seguimento solar passivo, como um exemplo relevante na conceção do protótipo a desenvolver.

O protótipo em análise pretende que uma superfície plana, no topo da estrutura, esteja continuamente normal ao ângulo de incidência solar. O sistema tem três placas de alumínio que, mediante a exposição solar, originam um deslocamento causado pela sua expansão térmica (Figura 8). As placas estão fixas a um mecanismo de alavancas que multiplica esse deslocamento resultando na inclinação da superfície. É de referir que as placas têm cerca de 4 metros e durante os ensaios experimentais o comprimento variou aproximadamente 5 milímetros [13].

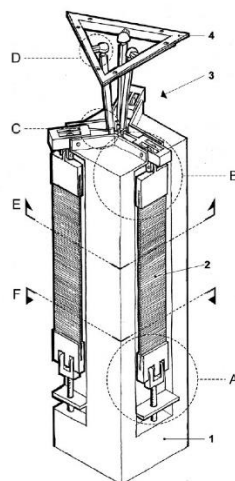


Figura 8 – Esboço de um protótipo de seguimento solar passivo - SEGSOL. Fonte: [12]

Perante a escolha entre um sistema ativo ou passivo, no controlo solar dinâmico, é preciso considerar que o sistema passivo têm a vantagem de não ter eletrónica associada, nem o respetivo consumo energético que reduziria a sua eficiência global, mas tende a ser menos preciso nas suas condições de atuação. Independentemente da escolha, o controlo autónomo deve ser adaptado às necessidades dos utilizadores, caso contrário estes irão agir de forma a contornar as medidas de controlo, seja para apreciar a vista ou para ter privacidade, o que poderá levar ao sobreaquecimento e maior consumo energético.

Os profissionais envolvidos nos projetos de edifícios têm de fazer uma avaliação rigorosa dos sistemas de sombreamento a implementar e dos fatores inerentes aos custos e benefícios. O setor procura envidraçados que sejam *net energy gainers* ou *zero-energy*, produtos isolados que apresentam ganhos solares úteis maiores do que as perdas. Há projetos-piloto que demonstraram que os sistemas de controlo solar dinâmico podem poupar até 60% de energia com a iluminação, 20% com o arrefecimento e 26% no pico de eletricidade [14]. Este tipo de sistemas são quase sempre dispendiosos numa perspetiva de eficiência energética mas oferecem outros benefícios que não somente energéticos. De facto, estudos apontam a qualidade e disponibilidade de luz como fator de produtividade, saúde e bem-estar.

Atendendo a que o protótipo desenvolvido neste trabalho possibilita a integração de um controlo passivo a um dispositivo de sombreamento existente, mantendo a opção do controlo nativo, a solução proposta tem um carácter inovador e competitivo, embora, como se verificará, não é uma solução discreta, nem tem uma resposta imediata quando comparado a outros sistemas motorizados dotados de sensores ou previamente programados.

Capítulo 3 – Fachada Viva

3.1. Conceito

O design do mecanismo de controlo da inclinação assenta primordialmente em três princípios, a *lei da conservação da energia*, *expansão térmica* e *vantagem mecânica*, aplicados a um sistema dinâmico de forças e tensões, composto por uma placa de expansão térmica, uma alavanca, estores e cabos. Os estores venezianos e o mecanismo de controlo da inclinação, automático e passivo, são instalados numa porta com envidraçado, recriando assim uma *Fachada Viva*. O mecanismo de controlo da inclinação consiste numa placa de expansão térmica com uma alavanca na extremidade ligada aos cabos de inclinação por fios - *Figura 9*. A ativação do controlo dá-se pelo aumento de temperatura da placa e subsequente expansão do seu comprimento. Por constrangimento da face inferior da placa, esta exerce pressão sob a alavanca e desloca-a, resultando na tração dos fios de ligação e inclinação das lâminas. A desativação sucede-se com a redução da temperatura da placa, o que provoca a sua contração e a reversão do movimento da alavanca para a posição inicial, folgando o fio de ligação e, pela ação da gravidade, devolvendo as lâminas a uma inclinação nula.

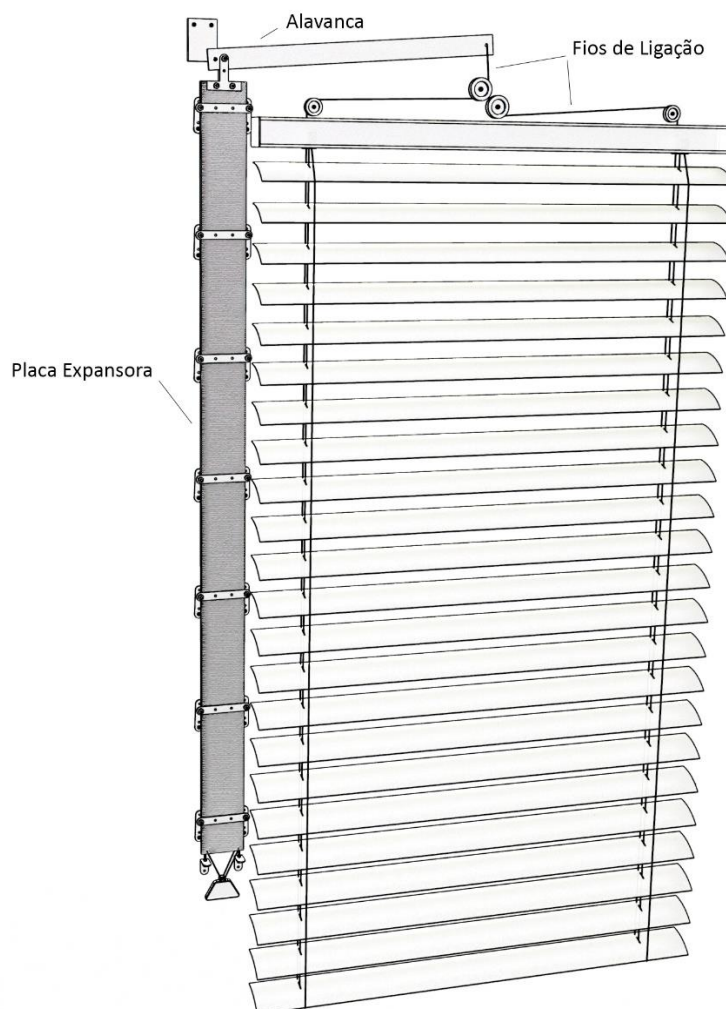


Figura 9 - Esboço da *Fachada Viva*.

3.2. Dispositivo de Sombreamento

O protótipo é baseado num sistema de estores venezianos interiores de controlo manual. Estes estores são constituídos por lâminas de alumínio, orientáveis por um sistema de roldanas que está alojado num invólucro superior, e instalado pelo exterior no topo do caixilho da janela. A inclinação das lâminas é controlada por uma varinha basculante que gira no sentido horário, ou anti-horário, e que está ligada a dois cabos externos às lâminas, ligados horizontalmente em cada uma para as suster. Estas também podem ser recolhidas totalmente ou fixas em posições intermédias através de um freio. A calha inferior do estore age como um peso e é ligada a toda a unidade por dois cabos de elevação que atravessam as lâminas por orifícios nas suas extremidades.

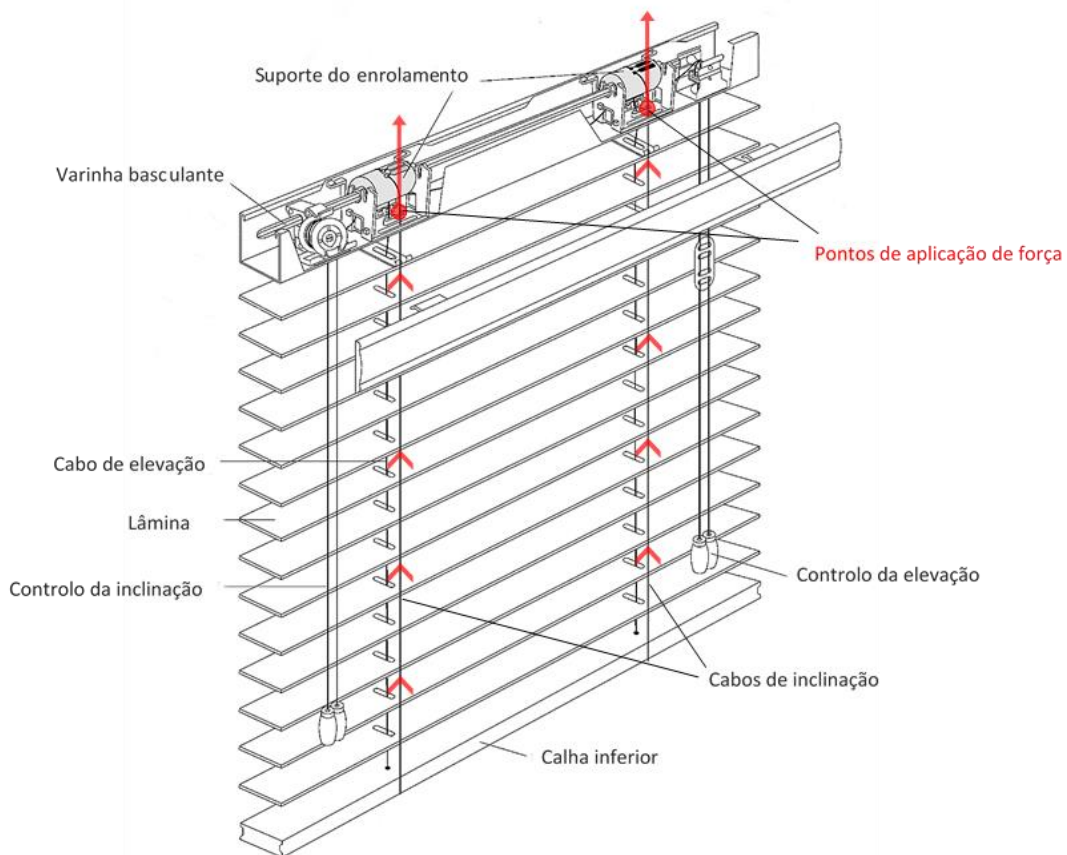


Figura 10 – Modelo de estore veneziano e pontos de aplicação de força de tração para novo controlo. Adaptado de [15]

3.2.1. Controlo Automático Passivo

Projetou-se um novo controlo da inclinação das lâminas, independente do existente, através de forças de tração aplicadas aos cabos de inclinação posteriores. Desta forma mantém-se a possibilidade de recolher e orientar as lâminas com o controlo de raiz. A Figura 10 ilustra os cabos dinâmicos e os respetivos pontos de aplicação de força. Essa força é resultante da dilatação térmica de uma placa de polietileno (PE-HWU), imposta por um aumento de energia interna, e respetiva variação do comprimento.

Consideram-se os estores fechados quando a distância entre as lâminas é nula, o que corresponde a uma tração, antes da ligação ao suporte do enrolamento, de 4.8 cm dos cabos de inclinação. Deste modo, ao inclinar as lâminas até à sua amplitude máxima, o obscurecimento e sombreamento é garantido. Na ausência de tensão, por ação gravítica, as lâminas reclinam-se para a sua posição inicial, perpendicular ao envidraçado.

3.2.2. Radiação Solar

Este sistema de sombreamento permite uma redução dos ganhos solares na estação convencional de arrefecimento, os meses junho, julho, agosto e setembro. A Figura 11 apresenta a irradiância numa superfície vertical, com várias orientações, no início e fim da estação do verão. Esses valores foram determinados conforme descrito na seção 4.3.2.1, tendo por base dados de irradiância num plano horizontal, de um ano meteorológico de referência, na localidade de Lisboa (38.73N, -9.15W) [16].

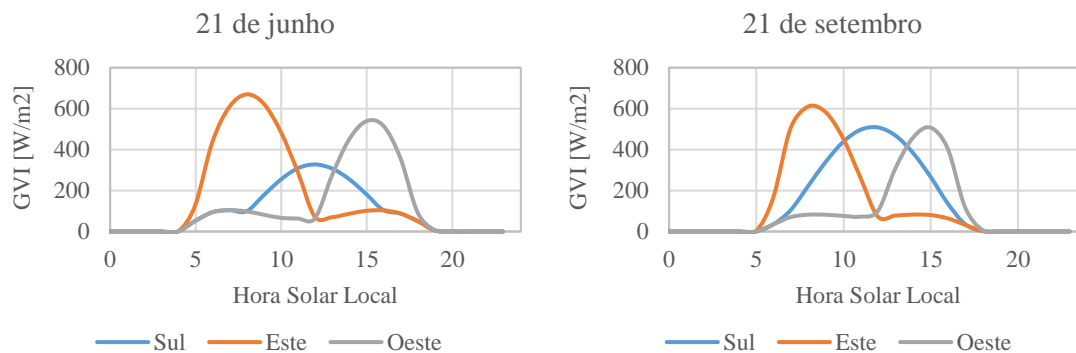


Figura 11 – Irradiância numa superfície vertical, para diferentes azimutes, no início e fim do verão.

O controlo do sombreamento é particularmente importante no início da estação de arrefecimento nas fachadas orientadas a nascente e poente. Nestas direções o ângulo de incidência (θ_i) é menor do que na direção sul, justificando-se assim valores de irradiância mais elevados. Com o decorrer da estação a elevação solar diminui e torna-se mais pertinente a existência de sombreamento nas fachadas a sul. Uma solução possível para reduzir os ganhos solares nestas fachadas é empregar palas horizontais. As lâminas do estore veneziano têm o mesmo efeito nessa posição, restringindo a radiação solar com maiores ângulos de incidência.

Considerando a largura (L) e espaçamento (H) das lâminas, a radiação incidente no envidraçado com as lâminas na horizontal (GVI_{inc}), em função da elevação solar (α_s) é descrita pela Equação 1:

$$GVI_{inc} = DNI_{\beta,\gamma} \frac{H - L \operatorname{tg} \alpha_s}{H} + DHI_{\beta,\gamma} \quad (1)$$

É relevante notar que a radiação solar incidente assim determinada não contempla a refletividade das lâminas, pelo que os valores apresentados estão por defeito. As lâminas quando estão na

horizontal refletem a radiação direta (DNI) de ângulos superiores ao ângulo de corte, 43.8°. Pela *Figura 11 e 12* verifica-se que os estores venezianos suprimem cerca de metade da irradiância incidente, todavia, tratando-se da estação de arrefecimento, pretende-se rejeitar toda a radiação solar possível. O controlo da inclinação das lâminas do protótipo é mais pertinente em dispositivos instalados em fachadas orientadas a nascente e a poente, pois a sul os picos de irradiância solar são nivelados para baixos valores.

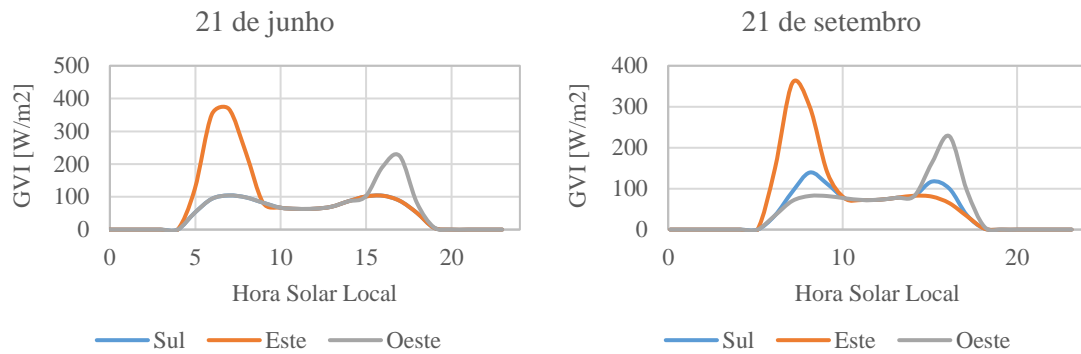


Figura 12 - Irradiância que atravessa o dispositivo de sombreamento com as lâminas na horizontal, para diferentes azimutes, no início e fim do verão.

3.3. Dimensionamento

3.3.1. Balanço Energético

A variação de temperatura da placa expansora é imposta pelas condições meteorológicas e características do material, pelo que foi necessário recorrer a modelos apresentados em [17] para o estudo de casos de transferência de calor. Pela 1ª Lei da Termodinâmica sabe-se que a diferença entre a energia que entra num sistema (E_{in}) e a que sai (E_{out}) é igual à variação da sua energia interna (ΔE_{stg}). Este princípio de conservação de energia, pode ser representado pela *Equação 2*:

$$\Delta E_{stg} = E_{in} - E_{out} \quad (2)$$

Para estimar a temperatura da placa (T), em regime transiente, e sujeita a condições variáveis, aplicou-se o método da capacitância global, tendo por base os seguintes pressupostos:

- O volume de controlo recebe energia térmica por radiação solar e troca calor com a sua envolvente por radiação e convecção;
- Desprezam-se trocas de calor por condução e gradientes internos de temperatura;
- Uma face da placa é adiabática;

Obtém-se assim, pelo desenvolvimento de (2), a expressão:

$$\rho V c_p \frac{dT}{dt} = \alpha G H I_{\beta, \gamma} A_S - h_c (T - T_{\infty}) A_S - \epsilon \sigma (T^4 - T_{\infty}^4) A_S \quad (3)$$

em que no termo da direita, as parcelas referem-se à radiação incidente, perdas por convecção e perdas por radiação, respetivamente. Nesta expressão, σ é a constante de Stephan-Boltzmann [$5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$], T_∞ a temperatura envolvente [K], e os valores de densidade (ρ), espessura (l), capacidade térmica (cp), emissividade (ε) e absorvidade (α) são características físicas da placa expansora, indicados na Tabela 1. O coeficiente de convecção natural (h_c) para gases varia entre $2 - 25 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ [17].

O volume (V) é igual a lA_s , pelo que, removendo o termo área de superfície (A_s), obtém-se a Equação 4 :

$$\rho l cp \frac{dT}{dt} = \alpha GHI_{\beta,\gamma} - h_c(T - T_\infty) - \varepsilon\sigma(T^4 - T_\infty^4) \quad (4)$$

Tabela 1 - Constantes físicas da placa expansora, PE-HWU.

Parâmetro	Valor	Referência
ρ	950 kg/m ³	[18]
cp	1300 J/(kg.K)	[19]
ε	0.92	[20]
α	0.94	
l	0.008 m	

3.3.2. Expansão Térmica

Ao elevar a energia térmica de um corpo, o seu volume expande como consequência do aumento da agitação das suas moléculas. Tendo em conta apenas a dimensão do comprimento da placa, é possível determinar a expansão térmica linear (ΔL) em função da variação de temperatura (ΔT), do comprimento inicial (L_0) e do coeficiente de expansão térmica (CET):

$$\Delta L = L_0 \text{ CET } \Delta T \quad (5)$$

A variação do comprimento da placa foi analisada recorrendo aos dados horários de temperatura ambiente e de irradiância [16] numa superfície vertical e horizontal. Numa primeira instância procurou-se perceber qual das posições auferia uma melhor resposta no controlo da inclinação nas orientações nascente e poente. Fixando o coeficiente de convecção em $10 \text{ [W}/\text{m}^2\text{K}]$, determinou-se a temperatura da placa, para cada instante, através da Equação 5.

A solução foi calculada por métodos computacionais, sendo que os valores horários foram interpolados e posteriormente reduzidos novamente, pela média horária, para facilitar a sua análise. A expansão térmica foi então estimada pela Equação 5 considerando o coeficiente de expansão térmico linear médio do PE-HWU ($1.8 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}\text{K}^{-1}$) [18] e o comprimento inicial, que foi ajustado à temperatura ambiente da primeira hora da série de dados, considerando que a placa tem 1000 mm a 25°C.

A Figura 13 representa a variação do comprimento da placa expansora. Podemos observar que em ambas as orientações é mais proveitoso posicionar a placa expansora na vertical. Na orientação

este a placa vertical expande mais cedo, o que é conveniente pois a elevação solar é menor no período da manhã e os estores devem estar fechados. A fase de contração também ocorre antes da placa expansora na horizontal, rejeitando assim a radiação direta para maiores ângulos de incidência, mesmo com as lâminas na horizontal, o que permite a entrada de luz natural. A oeste, a placa não necessita de expandir imediatamente pois a radiação mantém-se com ângulos elevados, como tal é desejável que a inclinação das lâminas aconteça mais tarde e que estas se mantenham abertas.

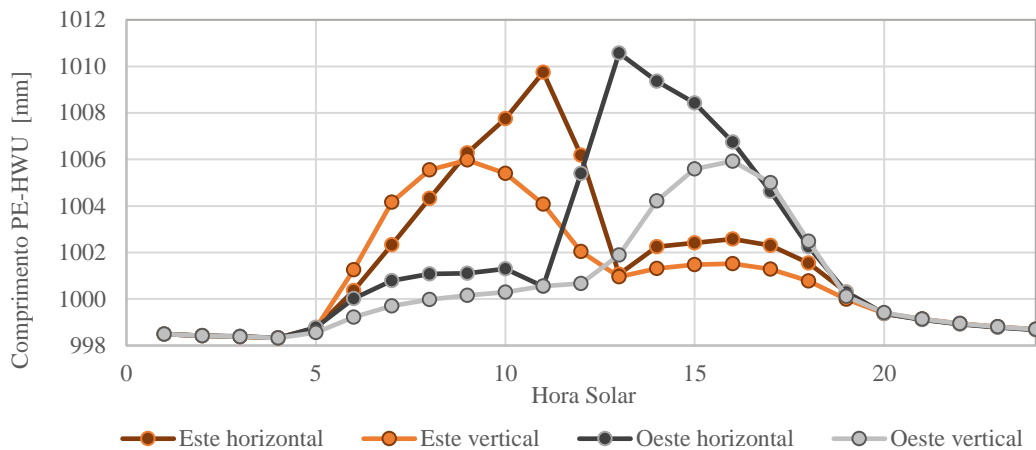


Figura 13 - Variação do comprimento da placa expansora na vertical e horizontal para diferentes azimutes no dia 21 de junho.

Demarcada a posição da placa, procedeu-se à presciência do comportamento na vertical ao longo da estação de arrefecimento. Prevê-se um limite do comprimento da placa de 1007.1 mm, com uma variação máxima, ao longo da estação, de 10.11 mm.

O controlo da inclinação opera num intervalo de temperatura (ΔT) em que as temperaturas inicial e final da placa correspondem, respetivamente, ao início do deslocamento dos cabos de inclinação e aos estores estarem completamente fechados. A temperatura final foi calculada pelo desenvolvimento da *Equação 4* em regime estacionário:

$$-\varepsilon\sigma T^4 - h_c T + \alpha GHI + h_c T_\infty + \varepsilon\sigma T_\infty^4 = 0 \quad (6)$$

A *Equação 6* considera constantes a irradiância (GHI) e a temperatura envolvente (T_∞). Definiram-se dois critérios: o primeiro critério assenta na recomendação da ativação de dispositivos de sombreamento móvel quando a radiação incidente na fachada excede os 300 W/m², conforme o requisito para o cálculo das necessidades de arrefecimento segundo o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS), do Decreto-Lei nº 118/2013 [21]; o segundo critério estabelece a temperatura envolvente, como a temperatura média ambiente para valores de irradiância entre 280 e 320 W/m², tendo sido considerado o mesmo valor para a temperatura inicial. Determinada a temperatura final (T), tem-se a variação de temperatura e a respetiva expansão térmica linear – dada pela *Equação 5*, responsável pela inclinação total das lâminas do estore - Tabela 2.

Tabela 2 – Expansão térmica linear para o controle da inclinação dos dispositivos de sombreamento orientados a este e a oeste e valores utilizados para o seu cálculo.

	<i>GHI</i> (W/m ²)	<i>T</i> _∞	<i>T</i> _{inicial}	<i>T</i> _{final}	ΔT	<i>L</i> _{inicial} (mm)	ΔL
			(°C)				
Este	300		24.21	41.84	17.63	999.86	3.17
Oeste			27.77	45.18	17.41	1000.50	3.13

A diferença entre a temperatura ambiente, para o intervalo de radiação designado, e a temperatura final é semelhante para as duas orientações, com variações de comprimento de apenas 3.17 mm e 3.13 mm. Considerando que o deslocamento dos cabos de inclinação deverá ser de 48 mm, a dilatação da placa é insuficiente para garantir esse deslocamento. É pois necessário uma alavanca por forma a multiplicar o comprimento da expansão e garantir a inclinação máxima das lâminas.

3.3.3. Alavanca

As alavancas são máquinas simples que trabalham sob o princípio da *vantagem mecânica*, beneficiando da razão entre a força de esforço de um braço rígido, capaz de rodar num ponto fixo (fulcro), e a força de carga. A posição do fulcro e dos pontos de força varia conforme a vantagem pretendida: distância, velocidade e força. A alavanca concebida é de classe 3, com o ponto de força de esforço entre o fulcro e o ponto de força de carga - *Figura 14*.

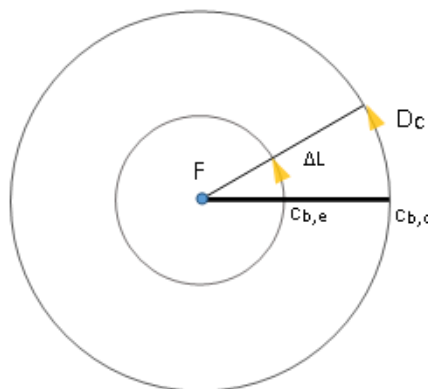


Figura 14 - Relação da distância entre os braços da alavanca.

A *vantagem mecânica* (VM) na distância é dada pelo quociente do comprimento do braço de carga (*c*_{b,c}), pelo comprimento do braço de esforço (*c*_{b,e}). A relação mantém-se entre a distância percorrida pelos cabos de inclinação (*D*_C) e a expansão térmica linear (ΔL) - *Equação 7*:

$$VM_d = \frac{c_{b,c}}{c_{b,e}} = \frac{D_C}{\Delta L} \quad (7)$$

Com *D*_C = 48 mm e pelos resultados da expansão da placa ΔL , apresentados na Tabela 2, a *vantagem mecânica* necessária é de 15.15 para um dispositivo orientado a este e de 15.34 para oeste.

É de notar que os valores de VM_d acarretam um aumento da força de esforço (F_e), imposta pela força de carga (F_c). A expansão da placa PE-HWU resulta numa força de compressão (F_{comp}) igual à força de esforço.

$$F_e = F_c VM_d \quad (8)$$

$$F_e = F_{comp} \quad (9)$$

Quanto maior a VM_d , maior será o stress mecânico imposto ao corpo por forças de compressão, podendo comprometer a expansão térmica útil da placa, que se traduz em D_c , ou seja, será necessário uma vantagem mecânica maior para compensar eventuais perdas.

3.4. Componentes

Nesta secção apresentam-se as especificações técnicas do sistema *Fachada Viva*, bem como pressupostos e condicionantes para a construção do protótipo. O sistema desenvolvido é composto por seis elementos: porta com envidraçado, estore veneziano, placa de expansão térmica, alavanca, fio de ligação.

3.4.1. Porta com Envidraçado

A opção de instalar o protótipo de sombreamento passivo numa porta com envidraçado deve-se à possibilidade de simular uma fachada com envolvente opaca e translúcida, e por ser um sistema móvel capaz de ser transportado para o *Campus Solar* para ensaios experimentais.



Figura 15 – Porta de madeira com envidraçado apoiada por esquadros metálicos.

A porta é de interior, com 2100 mm por 900 mm, composta por aglomerado de madeira e revestido com folha de madeira. Possui um vidro simples incolor de 6 mm de espessura com 1000 mm por 700 mm. Esta é apoiada por quatro esquadros angulares em aço para que se possa sustentar na vertical durante os ensaios.

3.4.2. Estore Veneziano

O protótipo é baseado num estore veneziano de interior. A decisão de o colocar no exterior deve-se ao objetivo de estudar a aplicabilidade do controlo passivo em estores exteriores, mas também por ser a melhor estratégia no controlo solar. O fator solar deste tipo de dispositivo de sombreamento é menor no exterior do que no interior [22].

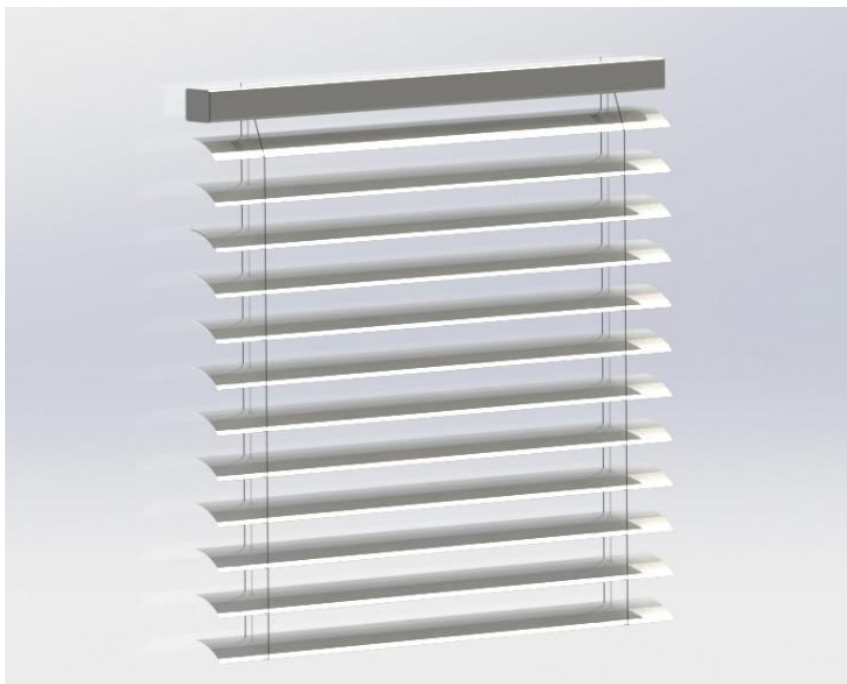


Figura 16 – Estore veneziano interior de lâminas metálicas.

O dispositivo de sombreamento tem 1200 mm de altura por 800 mm de largura, e é constituído por 25 lâminas de alumínio de cor branca, ligeiramente arqueadas, com 90 mm por 50 mm. O invólucro do sistema de roldanas tem dois orifícios que fixam o dispositivo em escáfulas, de aço zincado, aparafusadas à porta. Por forma a não sobrecarregar o sistema de controlo de inclinação proposto foi retirado a calha inferior dos estores venezianos (ver detalhe *Figura 10*).

Tipicamente as lâminas de alumínio brancas têm uma absorptância solar de 0.25 e uma refletância de 0.75. Quando as lâminas estão abertas refletem radiação indesejada para o interior do edifício mas quando fechadas são mais eficazes do que lâminas escuras. Como o coeficiente de absorção solar é maior para cores escuras, as lâminas, expostas ao sol, têm uma temperatura à superfície mais elevada, o que aumenta as trocas radiativas com o envidraçado e conseqüentemente os ganhos térmicos. Cores com uma refletância de 50% são um bom compromisso entre a proteção do calor de verão e a luz natural incidente [4].

3.4.3. Placa Expansora

O conceito de expansão térmica linear não é comumente aplicado a mecanismos desta dimensão, uma vez que a expansão da maioria dos materiais é muito reduzida e por isso de difícil aplicação. Para este sistema propõe-se a utilização de um polietileno de alta densidade (PE-HWU) com um coeficiente de expansão linear bastante elevado (10-100 $\mu\text{m/K}$). Trata-se de um material que possui diversas características que se adequam às necessidades do protótipo [18]: isotrópico; robusto e resistente ao desgaste; boa capacidade de deslizamento; alta durabilidade; resistente a microorganismos e a incrustações; impermeável (a baixa absorção de água evita que aumente de volume); elevada proteção UV; não sofre stress mecânico significativo no intervalo de temperatura 50 a 80°C; alta resistência à tensão, compressão e tração.

A instalação da placa expansora teve as seguintes considerações:

- Maior área da placa exposta ao sol para que o sistema seja mais rápido a responder à irradiância, logo o sistema de fixação tem de ter a menor área possível sobre a placa;
- A dimensão é adaptada à fachada e o comprimento é tal que não seja preciso uma *Vantagem Mecânica* demasiado elevada, ao ponto de gerar demasiado stress mecânico;
- A ligação entre a placa e a alavanca não é direta para não se dar desgaste do material;
- Constrangimento de uma extremidade para que a expansão do seu volume resulte no deslocamento de um ponto;
- Ferragens de cor metálica para refletir a radiação solar.

A placa expansora é um paralelepípedo que, à temperatura de 25°C, tem 1000.0 ± 0.5 mm de comprimento, 80.0 ± 0.5 mm de largura e 8.10 ± 0.01 mm de espessura. É fixa verticalmente na fachada com uma folga, para reduzir o atrito durante a contração da placa e manter a mobilidade.

Devido à força de compressão imposta pela alavanca e pelo aumento da temperatura da placa, são usadas cintas, ao longo do seu comprimento, sem a estrangular, por forma a obter um maior aproveitamento da sua expansão térmica e contornar a ductilidade gerada pelo stress mecânico.

A instalação é feita com a maior face da placa paralela à fachada e assente sobre conjuntos de dois esquadros de junção, de aço galvanizado, sobrepostos para elevá-la 4 mm, e atarraxados a outros esquadros de junção, que atravessam a placa expansora, com a função de cintas.

A ligação entre a placa expansora e a alavanca dá-se por duas ferragens de conexão em T, de também em aço galvanizado, unidas por um parafuso com rosca parcial. Após ensaios preliminares verificou-se que o peso da placa se revelou insuficiente na desativação da inclinação, pelo que se anexou um peso de 1 kg na parte inferior para garantir que a placa não fique suspensa.

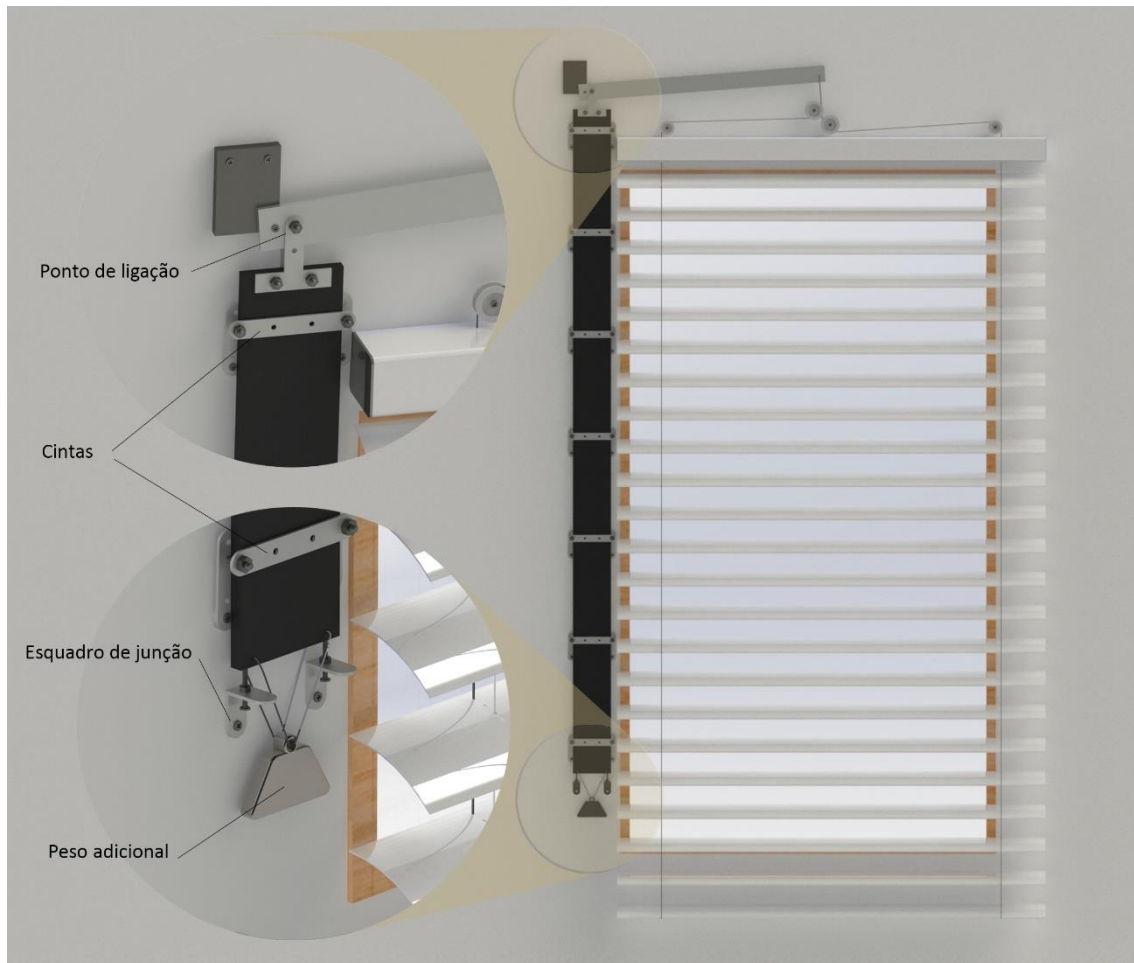


Figura 17 - Detalhes da placa expansora.

3.4.4. Alavanca

A alavanca é uma barra de aço fixa na parte superior da placa expansora e do invólucro das roldanas do estore. A alavanca é definida pelos pontos de esforço (P_E), de carga (P_C) e fulcro (F), assumindo duas posições extremas. A posição inferior é delimitada por uma roldana e a superior pela folga dos pontos P_E e P_C . O fio de ligação está em tensão quando os três pontos estão nivelados. Nessas condições a placa encontra-se constringida na sua face inferior e exerce pressão sob a alavanca.

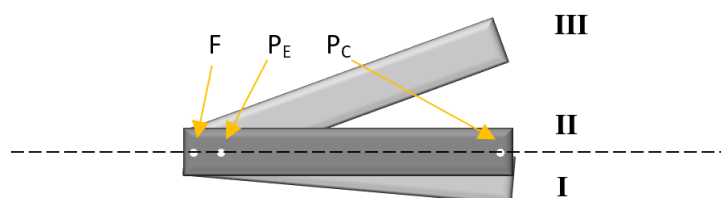


Figura 18 – Esquemática da alavanca para três estados do fio de ligação.

A posição inferior da alavanca significa que a placa expansora tem uma temperatura inferior à temperatura de início de ativação da inclinação e o fio de ligação encontra-se lasso. Na posição horizontal a temperatura da PET é igual à de início da ativação e caso aumente, o fio de ligação desloca-se. A posição superior é restringida pela divergência da direção da força da PET, que tem um movimento vertical, com o movimento circular imposto pelo fulcro da alavanca. Quando a distância entre o ponto de carga II e III é maior do que 48 mm, as lâminas recolhem ligeiramente.

Após os primeiros testes experimentais, a expansão prevista da placa não se refletiu no deslocamento desejado. Dadas as perdas mecânicas considerou-se majorar a *vantagem mecânica*, por tentativa, para de 31, com o comprimento entre F e P_E de 15 mm e de 465 mm entre F e P_C. A alavanca tem 470 mm por 40 mm e 4 mm de espessura. Atendendo à força que o fulcro é sujeito, foi reforçada a base onde este está assente com uma placa de alumínio com 20 mm de espessura, uma vez que a porta não conferia a estabilidade necessária com o seu material constituinte (Figura 19).

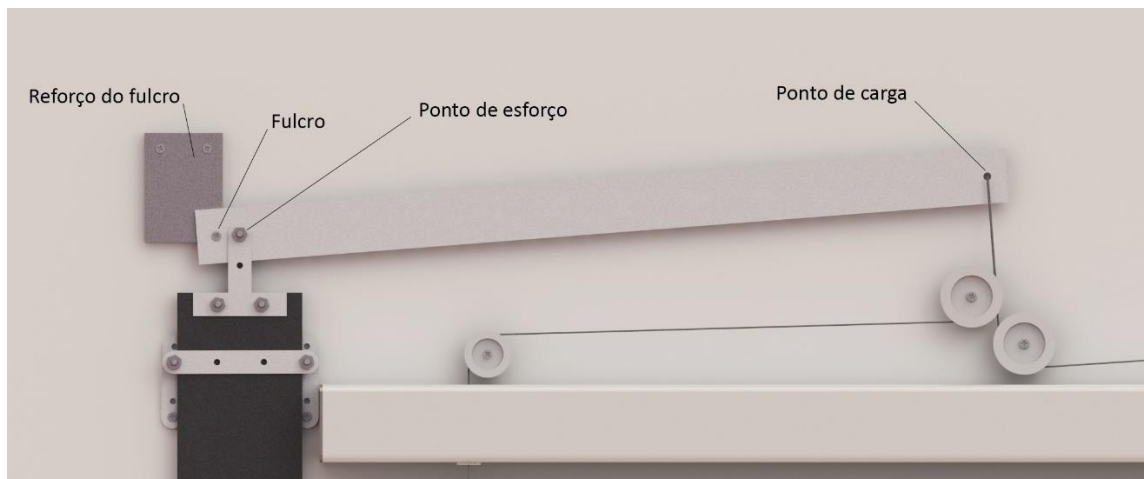


Figura 19 – Detalhes da alavanca.

3.4.5. Fio de Ligação

A ligação entre a alavanca e os cabos de inclinação das lâminas é exercida por um fio, não elástico, que se desdobra em dois, percorrendo um conjunto de roldanas que finaliza num encadeamento na vertical com os cabos de inclinação posteriores.

As roldanas por baixo do ponto de carga da alavanca estão dispostas de modo a não ser perdido qualquer deslocamento com a tração do fio de ligação, promovendo também a simetria do movimento de ambos os cabos e conseqüentemente do sombreamento. A roldana em cada extremidade tem o propósito de evitar que o fio de ligação esteja em fricção com o suporte superior do estore veneziano.

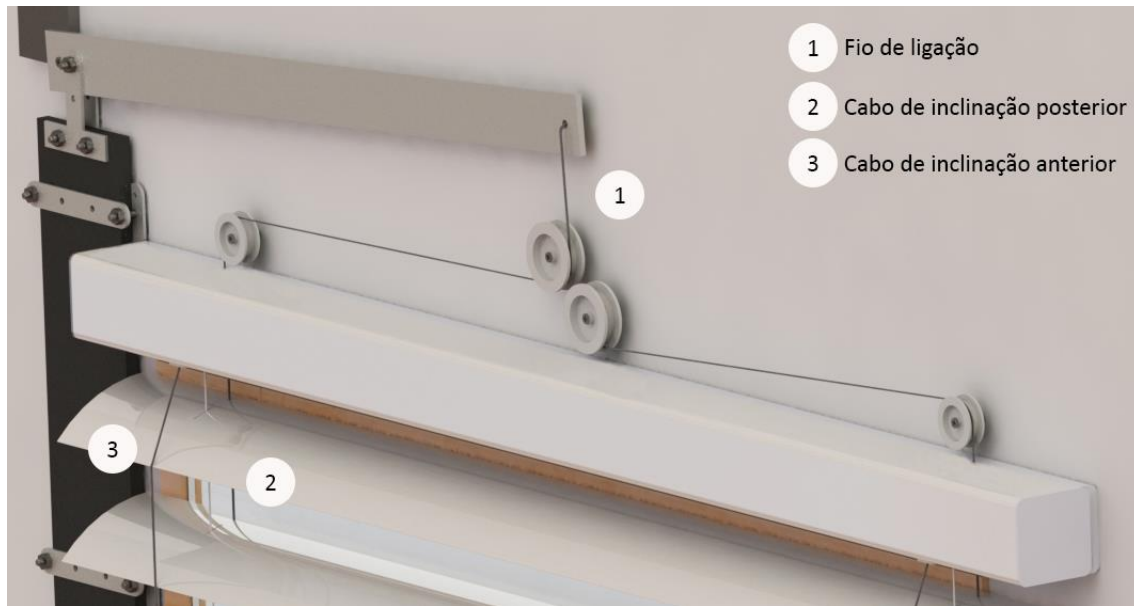


Figura 20 - Detalhes do fio de ligação

3.4.6. Ajuste

O sistema de ajuste permite regular o mecanismo de controle da inclinação para que seja ativado com a placa expansora a diferentes temperaturas. Este sistema é formado por dois esquadros angulares, dois parafusos e duas porcas, todas em aço. Os esquadros foram fixos a 15 mm da placa, com a alavanca na horizontal, posição II – Figura 18 e a placa a 20°C. Este comprimento possibilita nivelar os parafusos em diversas posições, garantindo a variação máxima do comprimento da placa durante a estação de verão, 10.1 mm.

A placa expansora pode estar assente sobre os parafusos ou estar suspensa pela ligação à alavanca, forçando-a para a posição I – Figura 18. Considerando o coeficiente de expansão do PE-HWU, cada milímetro de distância dos parafusos à base da placa corresponde ao aumento de 5.55°C de temperatura.



Figura 21 - Detalhe do mecanismo de controlo de inclinação: sistema de afinação.

Capítulo 4 – Ensaio Experimentais

4.1. Localização

Os ensaios decorreram no *Campus Solar* da FCUL dada a possibilidade de montar a instalação experimental próxima da estação meteorológica. O local, com as coordenadas 38.76° Norte e 9.16° Oeste, tem grande disponibilidade solar e os obstáculos envolventes não comprometem o estudo do protótipo. A *Figura 22* ilustra onde as localizações da *Fachada Viva* e da estação meteorológica. De referir que foi considerado um afastamento mínimo entre ambas, por forma a não perturbar o registo de dados da estação.



Figura 22 - Representação da estação meteorológica e Fachada Viva no Campus Solar da FCUL.

O trabalho experimental exigiu o recurso de diversos equipamentos, nomeadamente para garantir a verticalidade da *Fachada Viva*, através de um nivelador de bolha, e registar a sua orientação com uma bússola. Seguem-se os equipamentos utilizados na aquisição de dados pertinentes para a avaliação do protótipo:

- Sensor de temperatura na placa de expansão térmica;
- Webcam e microscópio digital com zoom 220x;
- Dois módulos fotovoltaicos com 1 V e 500 mA;
- Placa de Arduino;
- Placa de ensaio (Breadboard);
- Computador portátil;
- Estação Meteorológica.

4.2. Instrumentação

A configuração experimental está representada na *Figura 23*. As webcams foram fixas à porta recorrendo a grampos e suportes metálicos. Os módulos fotovoltaicos foram colocados com a mesma orientação, na face interior da fachada e paralelamente à mesma, sendo que um deles se encontra totalmente exposto à radiação solar e o outro, por detrás do vão envidraçado e do sistema de sombreamento. O sensor de temperatura foi assente na superfície da placa PE-HWU exposta à radiação com uma fita metálica refletora.

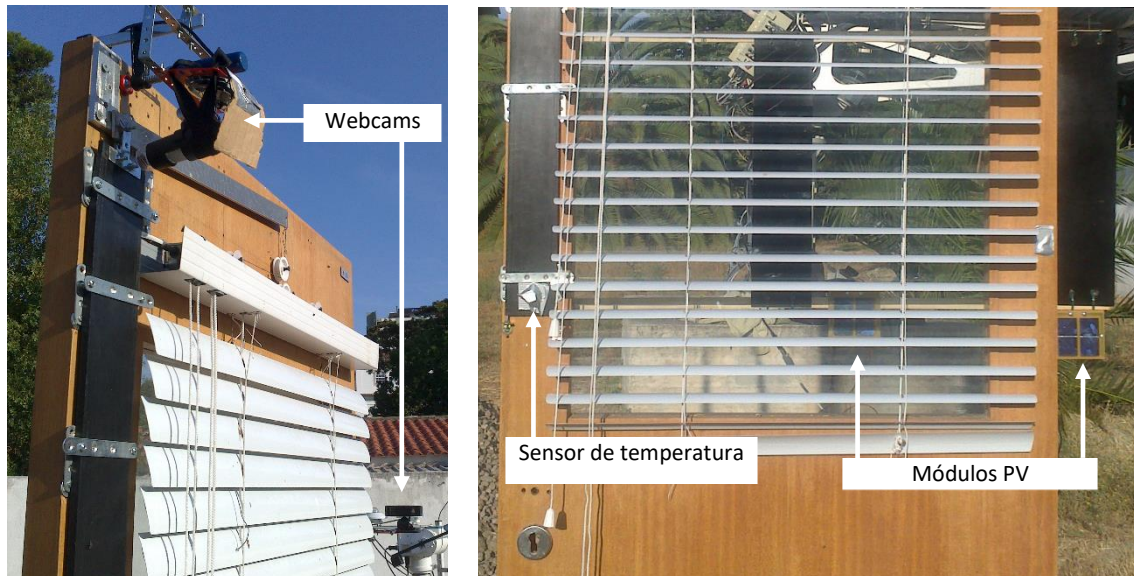


Figura 23 - Na imagem à esquerda – Webcam (em baixo), Microscópio digital (em cima). Na imagem à direita – módulos fotovoltaicos e sensor de temperatura sobre a Placa Expansora.

O sensor de temperatura é um Ibutton - *Figura 24*, com datalogger capaz de registo periódico de dados e de exportação para análise posterior. Trata-se de um equipamento portátil e autónomo, de pequena dimensão, com processador, memória interna e bateria. Para comunicar com um computador é agregado a uma *pen usb* apropriada e pela interface *1-Wire* é possível configurar a taxa de amostragem e recolher os dados com *Timestamp* (carimbo de data e hora). Segundo a *datasheet*, a precisão é inferior a 0.5 °C quando opera entre -10 °C e 65 °C [23] – *Anexo B*.



Figura 24 - Ibutton e pen usb DS9490.

Durante os ensaios as webcams estavam ligadas ao computador e recorreu-se ao software ContaCam para a gravação vídeo em simultâneo e com *Timestamp*. O microscópio digital filmou a expansão da placa expansora com um zoom de 20x sobre a aresta superior, e a webcam registou o perfil das lâminas do estore. Ambas as câmaras possuem uma resolução elevada, o que permite reduzir os píxeis de cada frame e consequentemente o erro das medições nas análises posteriores.



Figura 25 - Equipamentos de registo de imagens: Webcam e Microscópio digital .

Foram registados valores de tensão gerada nos módulos fotovoltaicos, por incidência de radiação solar, utilizando uma placa de Arduino, ligada via usb a um computador, e uma placa de ensaio. Cada módulo PV tem nos seus polos parafusos que fixam os cabos de ligação à placa de ensaio. A configuração do circuito de eletrónica para um módulo fotovoltaico está representada na Figura 26.

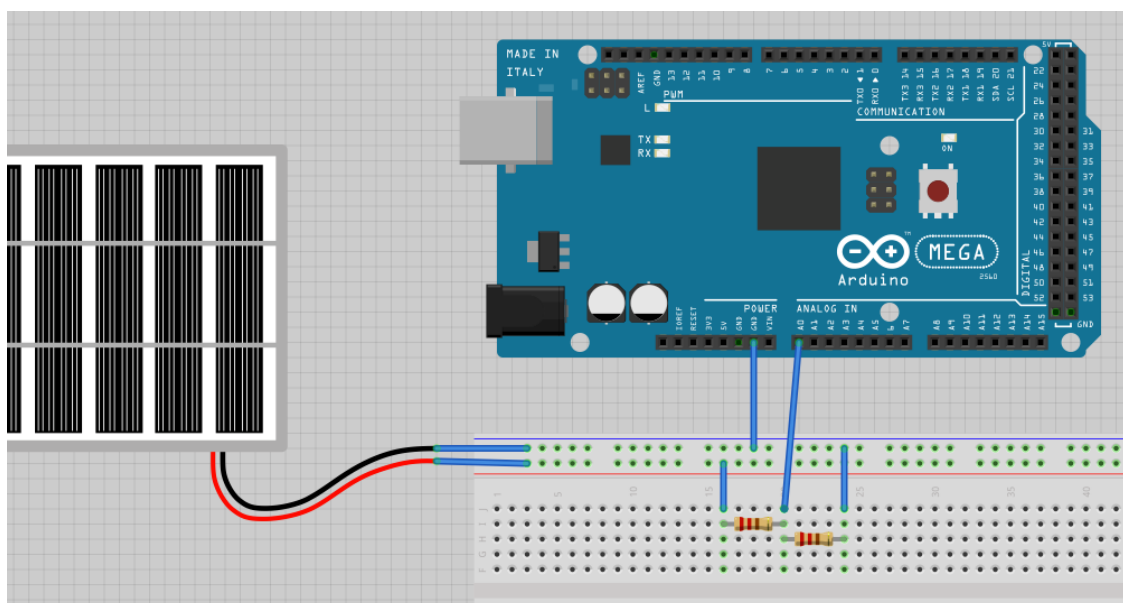


Figura 26 - Configuração de um circuito de medição de tensão, por divisor de tensão, de um módulo fotovoltaico.

O circuito foi montado para a carga máxima dos módulos PV. Pela lei de Ohm e pelas características de tensão e corrente dos módulos PV, sabe-se que a resistência necessária é de 2Ω . A tensão é monitorizada criando uma tensão de saída proporcional à tensão de entrada, num rácio de 1:2. Para tal aplica-se um divisor de tensão entre duas resistências de 1Ω ligadas em série, o que permite medir a queda de tensão entre a terra da placa de Arduino e a entrada analógica. Os valores lidos pelo pinos analógicos variam entre 0 e 1023, correspondendo o valor máximo a 5 V, através desta escala é possível obter os valores de tensão.

$$V_{\text{registado}} = \text{valor lido} \times \frac{5 \text{ V}}{1023} \times 2 \quad (10)$$

No período de ensaio é executada no computador, em simultâneo com o Arduino, o software *CoolTerm*. Esta ferramenta é uma aplicação que permite registar os dados digitais da porta de série onde está ligado o Arduino.

A estação meteorológica instalada no *Campus Solar* permitiu a caracterização das condições ambiente durante o período experimental. Esta é dotada de um seguidor solar automático e de instrumentos de medição (*Figura 27*). Foram adquiridos dados de temperatura ambiente, radiação direta no plano normal, radiação difusa e global no plano horizontal. Os dados são registados num *data logger Campbell* a cada 5 segundos e enviados via Ethernet para um computador, que por sua vez calcula valores médios, máximos e mínimos para cada minuto.

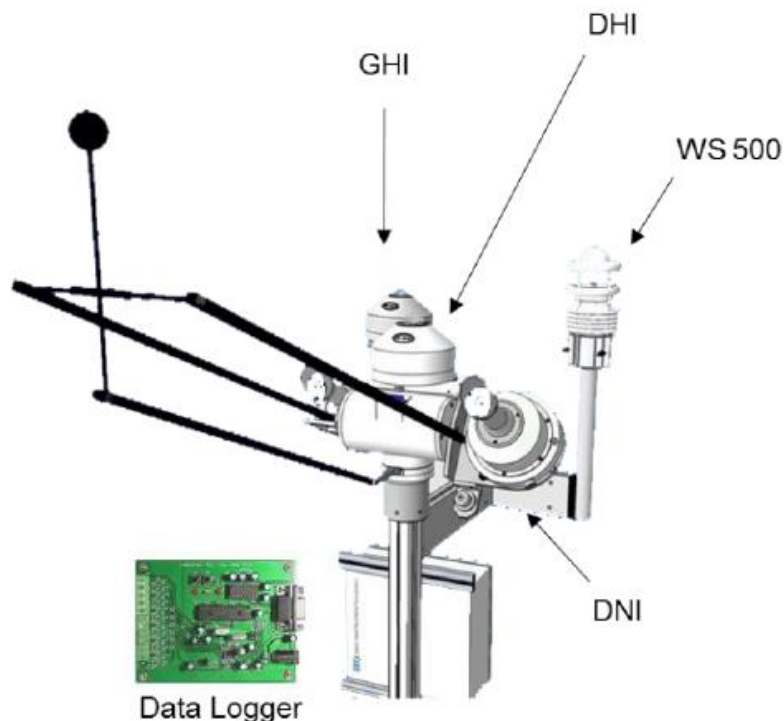


Figura 27 - Representação da estação meteorológica do *Campus Solar* da FCUL.

A radiação é medida por um sistema do tipo termopilha. A luz solar entra no dispositivo e é gerado calor, onde a irradiância absorvida é proporcional a uma diferença de tensão, que é convertida em W/m^2 . Este sistema é a base de funcionamento dos piranômetros e piréliometro instalados na estação. A radiação global no plano horizontal (GHI) é medida por um piranómetro assente no topo do tripé e a radiação difusa (DHI) é medida por outro piranómetro sombreado por uma esfera montada num seguidor solar. A radiação direta no plano normal (DNI) é medida por um piréliometro agregado ao seguidor que tem um sensor solar. A Tabela 3 resume as principais especificações dos equipamentos para medição da radiação solar.

Tabela 3 - Especificações dos equipamentos de medição de radiação solar da estação meteorológica [13].

Especificações	Piranómetro	Piréliometro
Intervalo Espetral	285 a 2800 nm	200 a 4000 nm
Intervalo Irradiância	0 a 1400 W/m^2	0 a 2000 W/m^2
Campo de Visão	180°	$\pm 2,5^\circ$
Incerteza	0,66 %	0,69 %

O sensor meteorológico (WS-500), além de ter capacidade de adquirir dados de temperatura ambiente, tem sensores de pressão atmosférica, humidade relativa, velocidade e direção do vento. A medição da temperatura entre 50 e 60 °C apresenta uma incerteza inferior a ± 0.2 °C [13].

4.3. Metodologia

4.3.1. Procedimento Experimental

O sistema *Fachada Viva* foi desenhado com o intuito de rejeitar a radiação solar sobre o envidraçado, alternando dinamicamente de estado para beneficiar do máximo de luz natural na ausência de incidência solar na fachada. Os principal objetivo dos ensaios experimentais foi o teste dessa funcionalidade, com a ativação da inclinação das lâminas e a reversibilidade para a posição horizontal, bem como avaliar os parâmetros que definem o controlo do sombreamento.

Foram monitorizados as seguintes variáveis experimentais:

- Dados de irradiância (DNI e DHI);
- Temperatura ambiente (T_∞);
- Temperatura da placa expansora (T_P);
- Variação do comprimento da placa expansora (ΔL_{PE});
- Deslocamento do fio de ligação (ΔL_{fl});
- Tensão gerada pelos módulos PV (V).

A Tabela 4 apresenta as características das medidas dessas grandezas.

Tabela 4 - Representação da aquisição e tratamento de dados para avaliação experimental da *Fachada Viva*.

Parâmetros	DNI e DHI	T_{∞}	T_P	ΔL_{PE}	ΔL_{fI}	V
Equipamento de medição	Estação Meteorológica*		Ibutton*	Microscópio digital	Webcam	Módulos PV*
Taxa de amostragem	1 min		1 s			
Formato da amostragem	Xls		Txt	Mp4		Txt
Software de tratamento de dados	Excel Matlab	Excel	1-Wire Excel Matlab	ContaCam VLC AutoCAD Excel	Arduino CoolTerm Excel Matlab	

*Taxa de amostragem definida pelo utilizador.

Os ensaios experimentais tiveram lugar durante o mês de agosto e de setembro. A ativação do mecanismo de sombreamento foi avaliada durante o período da manhã, com orientação nascente, para que a radiação incidente nos módulos PV fosse a mais aproximada entre ambos, o que significa que a altura solar deve ser a mais próxima de 0, paralelo às lâminas do sistema. Nessa altura do ano a posição da instalação experimental no Campus Solar encontra-se sombreada pela envolvente a Este aquando do nascer do sol. O coberto vegetal, edifícios e a própria topografia do local permitiram que o ensaio com menor altura solar fosse de 14.16° . A reversibilidade da posição das lâminas foi testada para o maior ângulo (α_L) que estas alcançam durante a ativação. Nesse instante, o ensaio da ativação é interrompido e a *Fachada Viva* é rodada por forma a placa expansora ficar totalmente sombreada. Dá-se então início ao ensaio da desativação do sombreamento que se prolonga enquanto a inclinação das lâminas diminuir.

A preparação de cada registo experimental pressupõe que a *Fachada Viva* esteja normal ao plano horizontal e que o mecanismo de controlo do sombreamento seja afinado.

Tabela 5 – Resumo do procedimento experimental dos processos de ativação e desativação do mecanismo de controlo do sombreamento.

Procedimento	Parâmetros de análise	Azimute da <i>Fachada Viva</i>	Início do Ensaio
Ativação	T_{∞} , T_P , ΔL_{PE} , ΔL_{fI} , V , DNI e DHI	Favorável à incidência solar	$GVI > 0$, $\alpha_L = 0$
Desativação	T_{∞} , T_P , ΔL_{PE} , ΔL_{fI}	Simétrico à posição solar	α_L máximo

4.3.2. Tratamento de Dados Experimentais

A apresentação e análise de resultados teve por base a escala de 1 min, pelo que foram utilizados os valores médios de cada minuto de DNI , DHI e T_{∞} , fornecidos pela estação meteorológica, e foram calculados os valores médios de cada minuto de T_P e de V , registados a cada segundo.

Os dados de tensão registados permitem determinar, de uma forma aproximada, o coeficiente solar do vão envidraçado com a proteção ativada. A corrente de um módulo PV medida em curto-circuito é proporcional à radiação incidente, desta forma, a razão entre a corrente do módulo na *Fachada Viva* e a do módulo totalmente exposto à radiação solar, permite obter a cada instante a fração de radiação que atravessa o sistema vidro e sombreamento.

$$CS = \frac{I_{\text{Fachada Viva}}}{I_{\text{módulo exposto}}} \quad (11)$$

Para obter a corrente, aplica-se a lei de Ohm ao circuito configurado na Figura 26, sabendo que a resistência total do circuito é de 2Ω , temos:

$$I [A] = \frac{V_{\text{registado}}}{2 \Omega} \quad (12)$$

As seções que se seguem detalham como se avaliaram, para os vários ensaios experimentais, a irradiância incidente no protótipo, os valores da variação do comprimento da placa expansora e do deslocamento do fio de ligação. Uma vez determinados todos os parâmetros experimentais é possível uma melhor compreensão sobre como estão relacionados entre si e como definem o mecanismo de sombreamento da *Fachada Viva*.

4.3.2.1. Radiação Global Incidente

Os dados recolhidos pela estação meteorológica correspondem à irradiância direta (DNI_0) e difusa (DHI_0) numa superfície horizontal. As relações apresentadas nesta seção são discutidas em detalhe em [24]. A expressão geral da radiação global incidente numa superfície, com uma dada inclinação com a horizontal (β) e orientação segundo um determinado azimute (γ), é a seguinte:

$$GHI_{\beta,\gamma} = DNI_{\beta,\gamma} + DHI_{\beta,\gamma} \quad (13)$$

No caso de estudo presente, trata-se uma superfície vertical com a horizontal ($\beta = 90$) e com azimute variável a cada ensaio experimental. As componentes da radiação solar podem ser assim desenvolvidas:

$$DNI_{\beta,\gamma} = DNI_0 \cos \theta_i \quad (14)$$

$$DHI_{\beta,\gamma} = DHI_0 \frac{1}{2} (1 + \cos \beta) \quad (15)$$

$$DHI_{\beta=90,\gamma} = DHI_0 \frac{1}{2} \quad (16)$$

A radiação direta ($DNI_{\beta,\gamma}$) é função do ângulo de incidência (θ_i), o ângulo definido entre a normal de uma superfície inclinada e os raios solares.

$$\cos \theta_i = \sin \alpha \cos \beta + \cos \alpha \sin \beta \cos(\gamma - \varphi) \quad (17)$$

Para $\beta = 90$:

$$\cos \theta_i = \cos \alpha \cos(\gamma - \varphi) \quad (18)$$

O ângulo de incidência varia com a trajetória solar. É possível caracterizar o movimento aparente do sol, para um dado local e hora, através do azimute solar (φ) e altura solar (α) – equações (19) e (20). O azimute solar é o ângulo da projeção do sol no plano horizontal com a orientação Sul, em que foi utilizada a notação nascente negativo. A altura solar é dada pelo ângulo entre o sol e o horizonte.

$$\varphi = \cos^{-1} \left(\frac{\sin \alpha \sin \phi - \sin \delta}{\cos \alpha \cos \phi} \right) \quad (19)$$

$$\alpha = \sin^{-1}(\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \omega \cos \phi) \quad (20)$$

onde (ϕ) é a latitude local, (δ) a declinação solar e (ω) o ângulo horário solar.

O ângulo horário solar é a hora solar local (LST) convertida para graus:

$$\omega = 15^\circ(\text{LST} - 12) \quad (21)$$

Por sua vez temos:

$$\text{LST} = \text{LT} + \frac{\text{TC}}{60} \quad (22)$$

A hora solar local é dada pela hora local (LT) e pelo fator de correção (TC). O fator de correção depende da latitude local (LL), da hora local standard meridiana (LSTM) e da equação do tempo (EoT):

$$\text{TC} = 4(\text{LL} - \text{LSTM}) + \text{EoT} \quad (23)$$

$$\text{LSTM} = 15^\circ \times \Delta\text{GMT} \quad (24)$$

$$\text{EoT} = 9.87 \sin(2B) - 7.53 \cos(2B) - 1.5 \sin(B) \quad (25)$$

$$B = \frac{360}{365}(\text{Jd} - 81) \quad (26)$$

Em Portugal continental a variação do Tempo Médio de Greenwich (ΔGMT) é de +1 nos meses com horário de verão e de 0 nos restantes. O dia Juliano (Jd) é o número de dias desde o início do ano, está compreendido entre [1, 365].

A declinação solar é o ângulo formado entre os raios e o plano do equador, e varia entre +23° 27' e -23° 27', ocasião dos solstícios. Obtém-se pela seguinte expressão:

$$\delta = 0.4093 \sin \left(2\pi \frac{284 - \text{Jd}}{365} \right) \quad (27)$$

4.3.2.2. Deslocamento do Fio de Ligação

O movimento de inclinação das lâminas do estore veneziano, quando observado de perfil, faz com que estas, descrevam uma rotação aparente. Trata-se na realidade de um movimento linear, em que ambas as extremidades das lâminas se deslocam ao longo de dois eixos perpendiculares. Serve a *Figura 28* de ilustração para melhor compreender esse movimento, uma lâmina do estore é simbolizada por um segmento de reta a amarelo, apresentada em duas posições, horizontal e inclinada.

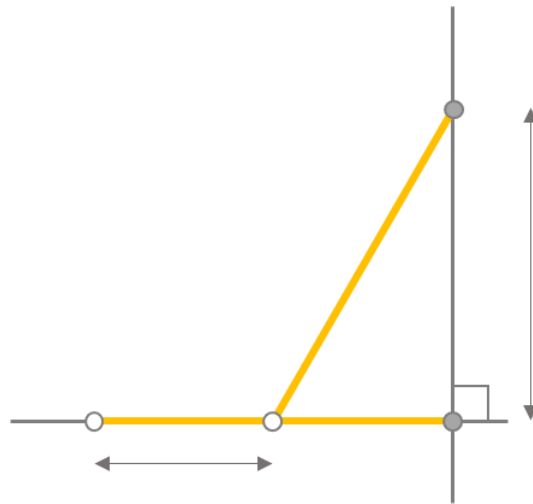


Figura 28 - Representação do movimento de inclinação de uma lâmina vista de perfil.

A distância na vertical, percorrida pela extremidade da lâmina é idêntica ao deslocamento do fio de ligação. É possível calcular esse deslocamento (ΔL_{fI}), para qualquer ângulo da lâmina (α_L), através de uma simples relação trigonométrica:

$$\Delta L_{fI} = \sin \alpha_L L \quad (28)$$

É de recordar que a largura da lâmina (L) é de 50 mm, valor igual ao deslocamento máximo teórico ($\alpha_L = 90^\circ$).

O registo vídeo do perfil das lâminas permite determinar o deslocamento do fio de ligação para um dado instante (Figura 29). O vídeo é reproduzido e numa fase de maior movimento das lâminas, o ecrã é captado a cada minuto, seguindo-se amostragens a cada 5 minutos. Não foi mantido o mesmo critério de amostragem para cada ensaio pois tiveram diferentes períodos de resposta.



Figura 29 - Exemplo de uma amostra vídeo do movimento de inclinação das lâminas do estore.

A imagem captada é importada para o *software AutoCad* para ser medido o ângulo de inclinação da lâmina. Assumiu-se o pressuposto que a *Fachada Viva* está nivelada com o plano horizontal e é traçada uma reta coincidente com a vertical da mesma. É traçada uma segunda reta entre as extremidades da lâmina e é medido o ângulo compreendido entre as duas. Na imagem à esquerda da Figura 30, a lâmina encontra-se perpendicular à *Fachada Viva* antes da ativação do controlo do sombreamento. Convencionou-se a ativação como angular crescente com o plano horizontal, assim, o valor medido, presente na imagem à direita da Figura 30, é o ângulo complementar de α_1 . É utilizado o mesmo método para determinar o deslocamento do fio de ligação nos processos de ativação de desativação.



Figura 30 - Exemplo da medição do ângulo das lâminas. Imagem à esquerda – início do deslocamento. Imagem à direita – ângulo medido entre a lâmina e a *Fachada Viva*.

4.3.2.3. Variação do Comprimento da Placa Expansora

O mecanismo de controlo do sombreamento, tem por base uma alavanca que é definida por dois pontos móveis e um fixo. O ponto de esforço tem um deslocamento teórico, correspondente à expansão da placa, que é equivalente ao deslocamento das arestas superiores da placa. O microscópio digital é fixo de modo a registar essa variação de comprimento, enquadrando no mesmo plano, durante o ensaio experimental, a aresta superior da placa e uma régua, com uma escala mínima de 1 mm, fixa à *Fachada*.



Figura 31 - Exemplo de uma amostra vídeo da expansão da placa com o microscópio digital.

A placa expande livremente sem entrar em contato com a régua pois está apenas parcialmente assente na *Fachada Viva*. Após testes prévios aos ensaios experimentais, concluiu-se que com um zoom de 20x seria possível garantir o registo da expansão máxima.

Durante a reprodução vídeo é captado o ecrã, com uma amostragem idêntica às medições dos ângulos das lâminas, e cada imagem é importada para o *software AutoCad*. Antes de cada processo, de ativação e desativação, são marcados dois níveis (*A* e *B*) e é medido o comprimento de 1 mm para conhecer a escala das dimensões reais (*C*) – identificados a cor de laranja na Figura 32. O nível *A* pertence à aresta da placa, como tal, varia, e é escolhido por ser facilmente identificável. O nível *B* é marcado sobre a régua e tem a função de referencial, pois na maioria dos ensaios a posição do microscópio digital revelou-se instável.

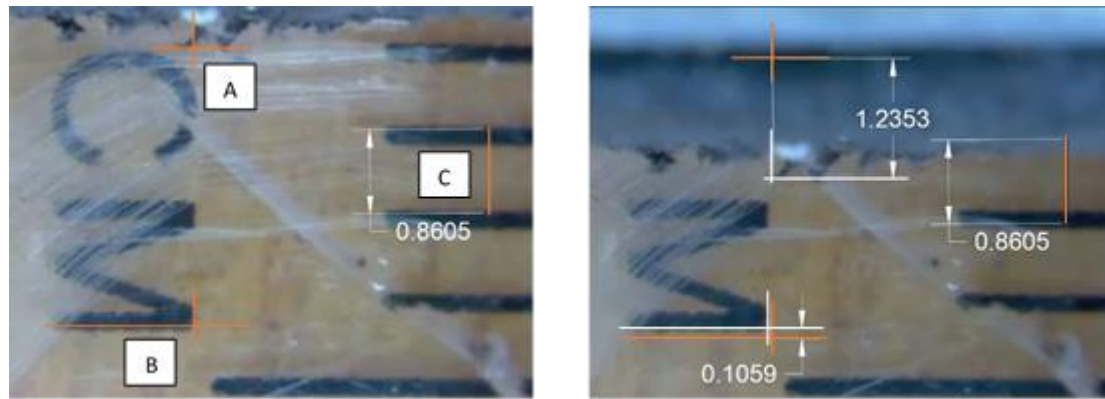


Figura 32 - Exemplo de medição da expansão da placa. Imagem à esquerda – ponto de medição, de referência e valor de escala. Imagem à direita – valores medidos de expansão da placa e de deslocamento do referencial.

Na imagem à direita da *Figura 32* estão marcados, com traço branco, os novos níveis após a expansão da placa. Neste exemplo, é de notar que a placa deslocou-se 1.2353 mas o referencial também variou 0.1059. Assim, a variação do comprimento da placa é dado pela diferença destes valores e pelo produto do fator de escala (1/0.8605). Este pode ser calculado para cada medição pela seguinte expressão genérica:

$$\Delta L_{PE} = (\Delta A \pm \Delta B) \times \text{fator de escala} \quad (29)$$

4.4. Resultados

O primeiro ensaio experimental no *Campus Solar* demonstrou a capacidade do sistema de ativar totalmente o sombreamento, no entanto, a subsequente reversão da posição das lâminas para a posição horizontal, não ocorreu. Pela análise da temperatura da placa expansora ao longo do ensaio, verificou-se que esta não igualou a temperatura de ativação. Para validar a mecânica da reversibilidade procedeu-se a um novo ensaio no final do dia. Desta feita orientou-se o protótipo a poente e deu-se início ao ensaio após as lâminas atingirem um ângulo máximo. A reversibilidade foi comprovada na ausência de radiação solar, com a temperatura da placa expansora a aproximar-se da temperatura de ativação do ensaio anterior.

Pretendeu-se testar a sensibilidade do controlo do sombreamento afinando o sistema com a placa expansora a diferentes temperaturas. O procedimento experimental foi aplicado em 12 ensaios distintos, 6 de ativação da inclinação das lâminas do estore e 6 da reversibilidade da posição, totalizando 204 medições do deslocamento do fio de ligação e ângulo das lâminas.

Para uma melhor compreensão dos dados registados e medidos, definiu-se para cada ensaio da ativação três momentos:

- [1]. O minuto anterior ao início do deslocamento;
- [2]. A radiação direta deixar de incidir no envidraçado, recorrendo aos vídeos dos perfis das lâminas;
- [3]. As lâminas atingirem o ângulo máximo do ensaio.

Nos ensaios de desativação definiu-se:

[4]. O momento imediato após inverter a posição da *Fachada Viva* face ao sol

[5]. As lâminas atingirem o ângulo mínimo do ensaio.

A representação global dos resultados é apresentada na em tabelas nesta seção e os gráficos que se seguem ilustram os parâmetros experimentais considerados para um dado ensaio. Os gráficos correspondentes aos restantes ensaios encontram-se no Anexo D.

Na manhã de dia 2 de setembro, o sistema foi novamente afinado à temperatura ambiente com a placa expansora a 19°C. A ativação do sombreamento deu-se às 8:41 com a placa expansora a 25.2°C. Por observação do vídeo do perfil das lâminas, a placa esteve totalmente exposta à radiação direta durante cerca de 21 minutos até à ativação e 60 minutos até às lâminas atingirem o ângulo máximo do ensaio. Esse ângulo corresponde à temperatura e variação de comprimento máxima da placa expansora, 44.9°C e 1,8 mm, respetivamente. O ensaio de desativação teve a duração de 36 minutos, tendo a placa estabilizado aos 32.6°C, variando apenas 0.5 mm de comprimento (Figura 33).

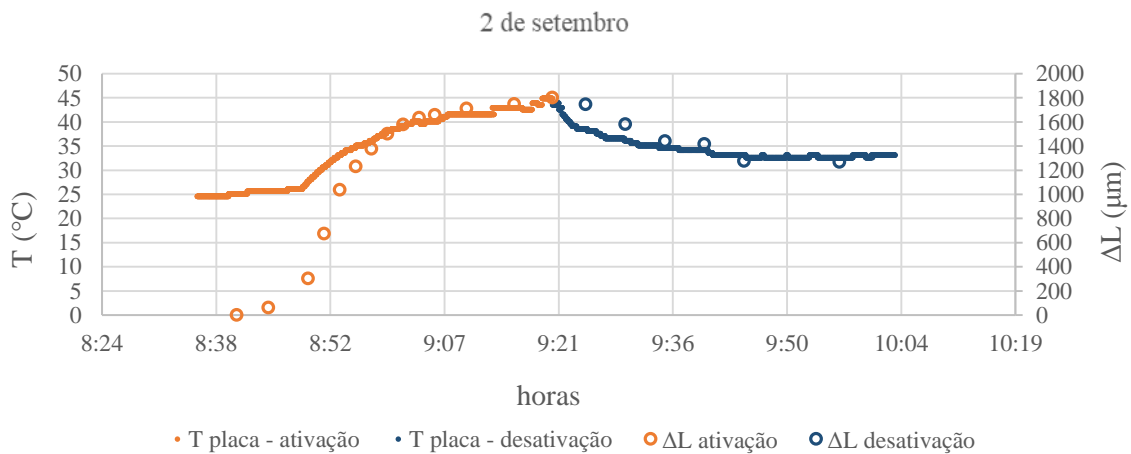


Figura 33 – Temperatura e variação de comprimento da placa expansora para um ensaio de ativação do sombreamento seguido pela respetiva desativação.

O comportamento da placa expansora não é linear, como se pode observar na *Figura 34*, que representa o coeficiente de expansão térmica da placa expansora. Na ativação, a variação de comprimento por grau é maior inicialmente, reduzindo progressivamente para maiores variações de temperatura. Na desativação ocorre o inverso. A linha de tendência na ativação dá-nos um *CET* de $107.0 \mu\text{m}^\circ\text{C}^{-1}$ e de $36.6 \mu\text{m}^\circ\text{C}^{-1}$ para a desativação, com coeficientes de determinação respetivos de 0.998 e 0.793.

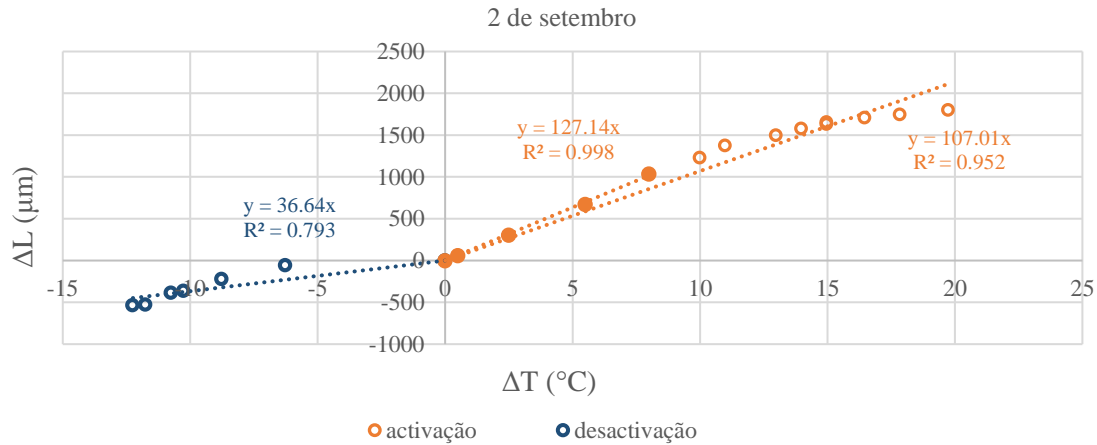


Figura 34 – Coeficiente de expansão térmica linear da placa expansora para um ensaio de ativação do sombreamento seguido pela respetiva desativação.

A percentagem de radiação solar que é transmitida através do dispositivo de sombreamento e do envidraçado, teve um máximo registado de 87.7% às 8:49, com as lâminas a um ângulo de 5.9°, e atingiu um valor mínimo, igual ou menor que 9.6% , com as lâminas a 75.3° às 09:21 - *Figura 35*.

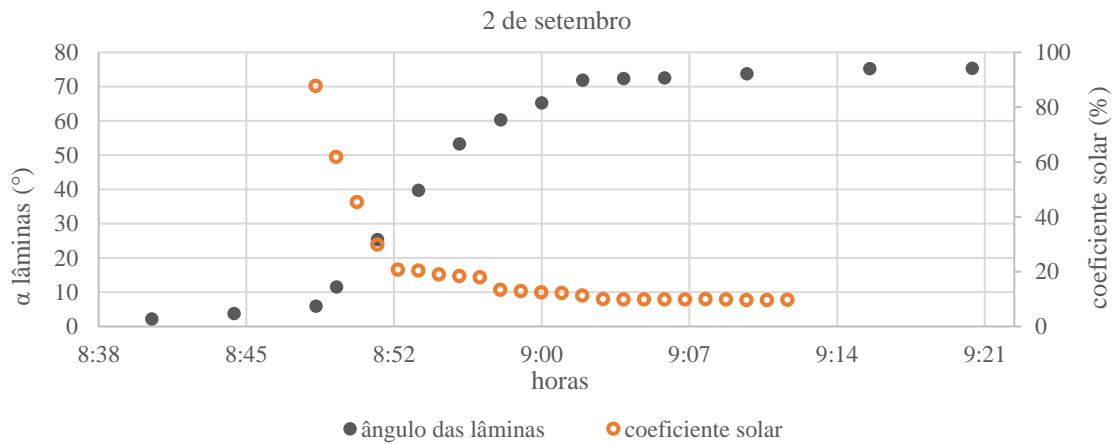


Figura 35 – Coeficiente solar do vão envidraçado da *Fachada Viva* durante a ativação do sombreamento.

A vantagem mecânica da alavanca foi determinada pela regressão linear da variação do comprimento da placa expansora com o deslocamento do fio de ligação. No ensaio de ativação a relação entre as variáveis é linear com VM igual a 28.7 e um coeficiente de determinação de 0.999, e na desativação VM é de 22.8 com um coeficiente de determinação de 0.84 - *Figura 36*.

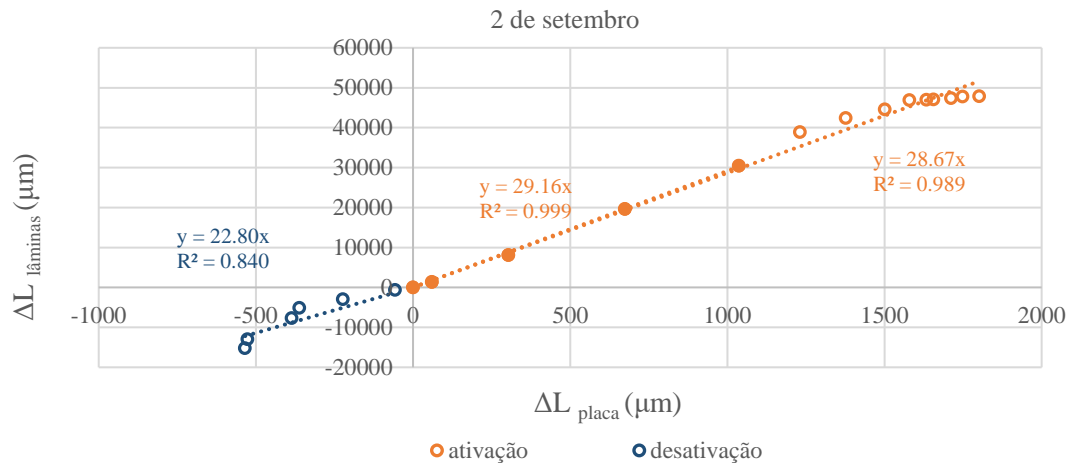


Figura 36 – Vantagem mecânica da alavanca para um ensaio de ativação do sombreamento seguido pela respectiva desativação.

As Tabela 6 e Tabela 7 apresentam os resultados experimentais relevantes. Os ensaios experimentais da ativação do sombreamento decorreram nas condições propostas no procedimento experimental. A *Fachada Viva* foi orientada a nascente entre os azimutes (γ) -60° e -109° e a altura solar foi superior ao ângulo de corte, 43.8° apenas no 4º ensaio. A placa expansora esteve à temperatura ambiente, no intervalo de 19.6°C e 24.6°C , com uma radiação global incidente entre 106.3 W/m^2 e 555.5 W/m^2 , em que os valores de radiação foram maioritariamente superiores ao recomendado para ativação dos dispositivos de sombreamento [21]. O ensaio mais longo teve a duração de 85 minutos e o menor de 39 minutos.

A ativação do sombreamento resultou num ângulo máximo das lâminas (α_L) entre 47.6° e 75.9° sendo que a radiação direta deixou de incidir no envidraçado desde os 49.0° . O coeficiente solar (c_s) determinado foi inferior a 10% quando afinado à temperatura de 19°C e de 16% quando afinado a 33°C . Para tal a placa expansora teve uma variação de temperatura (ΔT_{PE}), entre a ativação e o ângulo máximo das lâminas, de 12.8°C a 25.4°C , alcançando uma temperatura máxima de 53.5°C . A maior variação de comprimento (ΔL_{PE}) por ensaio foi entre 1.1 mm e 2.1 mm, tendo os fios de ligação sido deslocados ($\Delta L_{fl,\alpha L}$) entre 36.9 mm e 48.5 mm. Pelo rácio da variação do comprimento experimental com a variação do comprimento teórica expectável, obtêm-se o que se designou por rendimento mecânico. O rendimento mecânico na ativação variou entre 46.0% e 68.9%. O coeficiente de expansão térmica linear (CET), deduzido pela regressão linear de ΔT_{PE} e ΔL_{PE} , foi entre $84.6 \mu\text{m}^\circ\text{C}^{-1}$ e $110.3 \mu\text{m}^\circ\text{C}^{-1}$. A vantagem mecânica (VM) obtida variou entre 24.4 e 31.2, esta foi deduzida pela regressão linear de ΔT_{PE} e $\Delta L_{fl,\alpha L}$.

Os ensaios de desativação do sombreamento cumpriram o procedimento definido, com exceção do ensaio 2 em que a *Fachada Viva* foi orientada a poente. Nos restantes ensaios, a nascente, a placa expansora esteve sombreada à temperatura ambiente, no intervalo de 22.2°C e 29.7°C . O ensaio mais longo teve a duração de 85 minutos e o menor de 19 minutos.

A desativação resultou num ângulo mínimo (α_L) entre 0° e 57.7° para uma variação de temperatura (ΔT_{PE}) de -9.4°C a -16.4°C , alcançando uma temperatura mínima de 28.6°C . A maior variação de comprimento (ΔL_{PE}) por ensaio foi entre -0.5 mm e 1.7 mm, tendo os fios de ligação sido deslocados ($\Delta L_{fl,\alpha L}$) entre -15.2 mm e -46.7 mm. O rendimento mecânico na desativação variou

entre 24.2% e 74.7%. O coeficiente de expansão térmica e a vantagem mecânica tiveram valores entre e $36.6 \mu\text{m}^\circ\text{C}^{-1}$ e $120.8 \mu\text{m}^\circ\text{C}^{-1}$, e entre 22.8 e 34.6.

Tabela 6 - Resultados experimentais dos ensaios de ativação.

Ensaio	1			2			3			4			5			6		
data	27/ago			28/ago			2/set			3/set			4/set			18/set		
γ [°]	-60			-109			-78			-74			-75			-71		
T_{calib} [C°]	18.7			18.7			19.0			32.6			32.6			32.6		
horas	09:20	09:24	10:19	08:19	08:38	09:10	08:41	08:54	09:20	09:10	09:48	10:35	08:48	09:25	09:50	08:43	08:56	09:27
T_{amb} [C°]	20.0	20.1	22.2	19.6	20.0	20.2	ND*			ND*			ND*			21.6	22.1	24.6
GVI_v [W/m ²]	458.0	466.6	492.2	106.3	515.5	555.5	409.2	418.6	431.5	459.4	485.8	448.3	333.7	404.6	414.3	ND*		
α_s [°]	36.8	37.6	47.9	23.12	26.81	33.1	28.6	31.1	36.1	34.0	41.2	49.7	29.7	36.8	41.5	26.6	29.1	34.9
α_L [°]	7.3	33.2	75.9	0.0	46.3	70.5	2.2	39.8	75.3	0.0	24.3	63.1	0.0	32.3	47.6	0.0	49.0	74.0
fs [%]	48.7	21.7	8.8	53.9	10.4	4.6	87.7	20.3	9.6	ND**			91.9	81.9	16.4	ND**		
T_{PE} [C°]	28.9	33.9	52.2	25.2	40.6	45.6	25.1	33.1	44.9	38.7	47.4	51.6	38.1	50.6	53.5	25.2	40.7	50.6
ΔT_{PE} [C°]	5.1		23.3	15.8		20.5	8.0		19.7	8.7		12.8	12.5		15.4	15.5		25.4
ΔL_{PE} [mm]	0.6		2.0	1.4		1.9	1.0		1.8	0.8		1.6	1.1		1.5	1.3		2.1
$\Delta L_{fl,PE}$ [mm]	18.4		63.0	42.1		59.6	32.2		55.9	26.3		49.3	34.1		45.6	40.9		65.3
$\Delta L_{fl,\alpha L}$ [mm]	27.4		48.5	36.2		47.1	30.5		47.9	20.6		44.6	26.7		36.9	37.7		48.1
$\Delta L_{PE, teórico}$ [mm]	0.9		4.2	2.8		3.7	1.4		3.6	1.6		2.3	2.2		2.8	2.8		4.6
η_{mec} [%]	65.3		48.4	51.3		52.4	27.9		49.3	45.8		68.9	50.9		53.1	52.6		46.0
CET	115.3		88.9	78.6		88.4	127.1		107.0	91.0		110.3	84.0		87.9	76.4		84.6
VM	39.6		31.2	25.7		25.8	29.6		28.3	22.4		26.6	22.9		24.4	28.0		25.5

ND* - Dados não disponíveis.

Tabela 7 - Resultados experimentais dos ensaios de desativação.

Ensaio		1		2		3		4		5		6	
data		27/ago		27/ago		2/set		3/set		4/set		18/set	
T_{calib}	[C°]	18.7		18.7		19.0		32.6		32.6		32.6	
horas		10:19	11:25	19:25	19:44	09:21	09:57	11:22	11:56	10:48	11:30	09:55	11:20
T_{amb}	[C°]	22.2	24.6	26.7	26.1	ND*		ND*		ND*		24.2	29.7
α_s	[°]	43.8	55.5	9.8	6.2	32.3	39.3	50.9	56.3	42.6	50.1	32.8	32.8
α_L	[°]	75.9	38.5	43.7	0.0	75.3	57.7	51.2	11.0	42.1	7.3	74.1	5.2
T_{PE}	[C°]	52.2	35.8	38.0	28.6	44.9	32.6	49.7	39.1	51.1	41.2	47.6	34.6
ΔT_{PE}	[C°]	-16.4		-9.4		-12.3		-10.5		-10.0		-12.9	
ΔL_{PE}	[mm]	-0.7		-1.2		-0.5		ND**		-0.8		-1.7	
ΔL_{fi,PE}	[mm]	-23.1		-37.4		-16.6		ND**		-25.6		-53.9	
ΔL_{fi,αL}	[mm]	-30.4		-34.6		-15.2		-32.3		-28.2		-46.7	
ΔL_{PE, teórico}	[mm]	-3.0		-1.7		-2.2		-1.9		-1.8		-2.3	
η_{mec}	[%]	25.2		71.7		24.2		ND**		46.2		74.7	
CET		45.3		120.8		36.6		ND**		84.3		120.6	
VM		31.3		30.2		22.8		ND**		34.6		29.4	

ND* - Dados não disponíveis.

4.5. Discussão

4.5.1. Limitações Experimentais

O procedimento experimental contemplava que o início da ativação do sombreamento ocorresse momentos antes da incidência de radiação solar direta sobre a placa expansora. Não foi possível determinar com exatidão esse momento pois os obstáculos circundantes a nascente impedem que a exposição total da placa à radiação solar seja num curto espaço de tempo. Por a incidência ser interrompida, os parâmetros experimentais definidos não foram avaliados durante esse período de exposição. A taxa de amostragem e a capacidade de memória deste dispositivo limita a duração do ensaio experimental, como tal, nos ensaios cuja afinação foi feita a maiores temperaturas utilizaram-se dois *Ibuttons* para o registo da temperatura da placa expansora.

A disposição da montagem experimental impossibilitou o registo vídeo contínuo entre a ativação e desativação. Os valores medidos através desses registos são pois imprecisos. A webcam que filmou o perfil das lâminas não está devidamente centrada, o ângulo medido tem erro associado à perspetiva e há pouco contraste entre as lâminas e o pano de fundo.

Relativamente ao microscópio digital, o seu suporte esteve instável durante os ensaios experimentais induzindo um maior erro nas medições.

O módulo solar fotovoltaico instalado atrás do vidro tem uma pequena dimensão logo o posicionamento entre os segmentos das lâminas é preponderante para o coeficiente solar determinado.

O suporte do enrolamento do estore veneziano oscila a posição quando a *Fachada Viva* é deslocada, como está ligado ao fio de ligação foi necessário para cada novo ensaio orientar as lâminas com os cabos de inclinação, influenciando a tensão dos fios de ligação. Outro fator que dificulta a comparação entre ensaios com a mesma afinação, prende-se com um erro de conceção do sistema de afinação, pois quando a placa expansora tem temperaturas mais baixas do que a da afinação, poderá ficar suspensa, presa pelo fulcro e roldana que sustentam a alavanca. Assim, com o aumento de temperatura a placa assenta novamente nos parafusos que poderão não estar garantidamente na mesma posição.

Verificou-se também que a solução adotada para limitar uma das extremidades da placa expansora condicionou o sucesso da desativação. É de salientar a importância da afinação do protótipo, sendo desejável que a ativação se dê a uma temperatura igual à temperatura ambiente máxima do dia para que na ausência de radiação direta a desativação seja completa. A afinação do sistema pressupõe que os fios de ligação estejam em tensão quando a alavanca está na horizontal, contudo, no ensaio de dia 2 de setembro o sistema foi afinado à temperatura de 19.0°C e a ativação deu-se aos 25.2°C, 6.2°C acima da temperatura de afinação. Tal poderá ser por os fios não estarem devidamente em tensão, por a expansão inicial da placa não se traduzir num deslocamento (perdas mecânicas), ou por a temperatura registada à superfície da placa expansora não corresponder à temperatura média do seu volume.

A placa expansora é um material com baixa condutividade térmica e elevada capacidade térmica, sendo por isso possível existirem gradientes térmicos que justifiquem os ângulos das lâminas não corresponderem na ativação e desativação. Os valores experimentais do coeficiente de expansão térmica linear são consideravelmente mais baixos quando comparados ao valor médio teórico do PE-HWU. Pela análise dos gráficos experimentais constata-se que esse coeficiente é por vezes

maior no início da ativação e no final da desativação. É possível explicar esse comportamento pela maior ductilidade da placa expansora para temperatura mais elevadas, que aliadas às forças de compressão impostas pela alavanca, fazem com que a placa dobre e fique em contato com as cintas que a delimitam, criando uma força de atrito contrária ao deslocamento na desativação. A discrepância dos resultados da expansão térmica linear na ativação e desativação deve-se à placa continuar a ter ganhos radiativos através da porta onde está assente, uma vez que esta continua exposta ao sol, bem como pela histerese do material, onde a capacidade de preservar a deformação com a variação de temperatura é maior no processo de arrefecimento. Com afinações a temperaturas mais altas essa diferença de valores não é tão notória pois as perdas de calor são maiores, os gradientes térmicos menos expressivos e o sistema está em compressão máxima.

Nas Tabela 6 e Tabela 7 estão apresentados os valores calculados do deslocamento dos fios de ligação ($\Delta L_{fl,PE}$) segundo a variação de comprimento da placa com o fator multiplicativo da vantagem mecânica dimensionada. Os valores obtidos foram por vezes superiores ao deslocamento calculado pelo ângulo das lâminas, o que poderá sugerir que nos ensaios em que o ângulo das lâminas é máximo, os fios de ligação foram deslocados mais do que o afastamento entre as lâminas (48 mm) e o conjunto das lâminas foi puxado, impondo uma maior pressão junto ao fulcro e possivelmente deformando o parafuso de aço que serve de eixo.

Capítulo 5 – Futuros desenvolvimentos

O protótipo desenvolvido tem um grande potencial de aplicação mas carece de múltiplas alterações por forma a o funcionamento desejado e reproduzível. De seguida são apresentadas soluções e alternativas para algumas questões já discutidas e também recomendações de outros parâmetros a avaliar experimentalmente.

A alavanca desenvolvida está sujeita a forças de compressão nos pontos de articulação, pelo que se sugere alargar a reentrância do ponto de esforço para evitar pressão sobre o fulcro e o deslocar da placa ao longo do plano horizontal. No sentido de aliviar pressões, adicionais e desnecessárias, propõe-se instalar um travão no fio de ligação para que este não se desloque mais que 48 mm e nas situações em que a amplitude da alavanca é maior o subsequente deslocamento é compensado por uma mola. No entanto é possível explorar outros tipos de alavancas, como por exemplo a multiplicação hidráulica, ou impor a rotação mais próxima do centro das lâminas e assim poder reduzir o tamanho da placa ou diminuir a vantagem mecânica e conseqüente deformação.

As características da placa expansora são determinantes para a capacidade de resposta do sistema. Seria profícuo estudar outras geometrias capazes de sustentar maiores forças de compressão, bem como outros materiais. Os materiais devem ter histerese mecânica quase nula, ser resistentes ao choque térmico, ser dúcteis, com alta absorvidade e baixa emissividade e refletividade. O polietileno PE-HWST [18] sofre stress mecânico em intervalos de temperatura mais elevados, possibilitando assim recorrer a lentes, tipo *Fresnel*, que com uma maior área do que a placa expansora aumentaria o gradiente máximo de temperatura, ou a abas refletoras, dessa forma a desativação seria completa mesmo para temperaturas ambiente elevadas. Para promover as perdas convectivas e a desativação ser mais célere, é necessário um maior afastamento da placa relativamente à superfície onde está assente.

O sistema de afinação revelou-se pouco fiável. É pois essencial fixar a placa expansora com dois parafusos inclusos que por sua vez são enroscados aos dois esquadros angulares. Esta solução melhoraria a reversibilidade da posição das lâminas pois não depende do peso da placa e do peso acoplado para contrariar as forças de atrito. Foram realizados ensaios com uma afinação a uma temperatura mais alta para retardar o sistema de sombreamento, outra abordagem seria após afinação para uma dada temperatura, mover os cabos de inclinação para as lâminas ficarem com um ângulo negativo. Assim é possível para temperaturas ambiente mais elevadas, e na ausência de radiação direta, os ângulos serem mais próximos de zero, promovendo a entrada de luz natural.

O desafio numa nova prototipagem será perceber como aplicar o automatismo a um dispositivo de sombreamento mais pesado, estores venezianos exteriores, e contornar a dificuldade da vantagem mecânica que pressupõe também um aumento do stress mecânico.

Em futuros ensaios experimentais deverá ser avaliado o coeficiente de expansão térmica linear do material, sem lhe ser imposto qualquer carga, para comparar com o valor teórico e melhor compreender quais as perdas do deslocamento no sistema de controlo do sombreamento. Recomenda-se também traçar um diagrama de histerese mecânica, causada pela inércia térmica e pela fricção entre as partes móveis, e realizar testes de fadiga termo-mecânica com e sem carga.

Para um maior rigor das amostragens utilizar mais do que um sensor de temperatura na placa expansora e um extensómetro. A previsão do controlo do sombreamento requer desenvolver um modelo teórico com os coeficientes de perdas e ganhos ajustados aos ensaios experimentais.

Capítulo 6 - Conclusão

A implementação de sistemas dinâmicos para o controlo solar de ganhos solares é uma estratégia importante para a eficiência energética dos edifícios, garantindo conforto térmico e visual. Estes benefícios traduzem-se em poupança energética, diminuição de emissões de dióxido de carbono, saúde e produtividade dos seus ocupantes.

A evolução da nanotecnologia e dos materiais compósitos permitem repensar a forma como se vê a física, não apenas através de automatismos complexos. Os materiais inteligentes, como os *shape memory alloys* e os *wax motors*, operam em gamas de temperaturas específicas e predefinidas, recorrendo apenas a energia térmica. Este pressuposto foi a inspiração para a conceção do automatismo passivo para controlo de ganhos solares apresentado nesta dissertação.

Os objetivos propostos foram alcançados, desenvolveu-se o conceito, construiu-se um protótipo funcional que foi avaliado experimentalmente demonstrando com sucesso a prova de conceito. A avaliação revelou quais os pontos mecânicos críticos: afinação, pontos de articulação, tensão dos fios de ligação, stress da placa expansora; e a influência das perdas mecânicas nos valores teóricos do coeficiente de expansão térmica e da vantagem mecânica da alavanca. Os ensaios experimentais demonstraram a dificuldade em afinar o controlo do protótipo para que este opere como um sensor à radiação solar. Ao invés das lâminas terem um comportamento fototrófico, o aumento da temperatura ambiente faz com que a dinâmica seja praticamente a do ciclo diurno. Globalmente a ativação demorou menos de 1 hora, com uma radiação global incidente superior a 348 W/m^2 . Nesse período a placa expansora atingiu uma temperatura de 53.5°C , uma diferença de temperatura ambiente de 30°C e uma expansão de 2.1 milímetros, conseguindo deslocar os previstos 48 mm do fio de ligação. No melhor ensaio conjunto, a ativação seguida da desativação, as lâminas atingiram 74° e 85 minutos depois estavam com 5°, nesse momento a placa tinha 34.6°C , mais 5°C do que a temperatura ambiente.

O mecanismo proposto distingue-se de outros automatismos passivos existentes porque o utilizador dispõe de um controlo alternativo sobre o dispositivo de sombreamento para se adequar às suas necessidades e por ter o elemento motor/sensor no exterior, que faz com que o sistema seja proactivo no controlo solar em vez de reativo, pois é sensível à radiação solar e não apenas à temperatura ambiente. Tirando partido do movimento do sistema há a oportunidade de integrar nas lâminas do estore estantes de luz ou módulos fotovoltaicos.

Referências Bibliográficas

- [1] I. E. Agency, “Energy Efficiency Training Week Where to start : Energy efficiency potential in buildings,” 2016.
- [2] I. E. Agency, “Transition to Sustainable Buildings,” *Exec. Summ.*, 2013.
- [3] North Solar Screen, “Solar Shades: Enjoy The View Without The Harm.” [Online]. Available: <http://northsolarscreen.com/category/blog/>.
- [4] WAREMA, “Sun Shading Systems Catalogue 2012/2013,” 2012.
- [5] K. Zvironaite, A. Knol, and S. Kneepens, “A playful way through the world of moving facades.”
- [6] R. Loonen, “Climate Adaptive Building Shells,” Eindhoven University of Technology, 2010.
- [7] “View - Dynamic Glass.” [Online]. Available: <https://viewglass.com/assets/pdfs/igu-data-sheet-us.pdf>. [Accessed: 15-Mar-2017].
- [8] “GlassX.” [Online]. Available: <http://www.glassxpcm.com/how-glassx-works/>. [Accessed: 15-Mar-2017].
- [9] M. Decker and P. Yeadon, “SmartScreen: Controlling Solar Heat Gain with Shape-Memory Systems,” 2009.
- [10] J. Grinham, R. Blabolil, and J. Haak, “Harvest shade screens: programming material for optimal energy building skins,” 2014.
- [11] Zomeworks Corporation, “Wax Actuator with a Sun Shade.” [Online]. Available: <http://www.zomeworks.com/research-development/wax-actuators/>. [Accessed: 27-Mar-2017].
- [12] F. Fulchir, B. M. R. de Carvalho, and R. P. P. Dias, “PT 105900,” 2013.
- [13] D. S. Pereira, “Avaliação de Desempenho de Protótipo de Seguimento Solar Passivo Biaxial Resumo,” Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 2015.
- [14] I. E. Agency, “Technology Roadmap,” 2013.
- [15] “No Title.” [Online]. Available: <http://www.felton.com.my/feltonblinds/c-timber.php>. [Accessed: 14-Mar-2017].
- [16] Energyplus, “Weather Data by Location All Regions - Europe WMO Region 6 - Portugal.” [Online]. Available: https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/PRT//PRT_Lisboa.085360_INETI. [Accessed: 01-Mar-2016].
- [17] F. P. Incropera, D. P. Dewitt, and T. L. Bergman, *Fundamental of Heat and Mass Transfer*. 2007.
- [18] G. Eriks, “Product Information PE-HWU / PE-HWST,” 1995.
- [19] “The Engineering ToolBox.” [Online]. Available: http://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-d_391.html.
- [20] Solar Mirror, “Absorptivity & Emissivity table.” [Online]. Available:

<http://www.solarmirror.com/fom/fom-serve/cache/43.html>.

- [21] M. Ambiente Ordenamento do Território da Energia e da Solidariedade Emprego e Segurança, *Portaria n.º 349-D/2013 de 2 de dezembro*, vol. 1ª, no. 233. 2013.
- [22] M. Economia e Emprego, “Despacho n.º 15793-K/2013 de 3 de dezembro,” *Diário da República*, vol. 2.ª série, no. 234, 2013.
- [23] I. Maxim, “Datasheet Ibutton DS1923.” [Online]. Available: <https://www.maximintegrated.com/en/products/digital/data-loggers/DS1923.html#popppdf>. [Accessed: 26-Mar-2017].
- [24] “PV Education.” [Online]. Available: <http://www.pveducation.org>. [Accessed: 10-Jan-2017].

Anexos

Anexo A

Código *Matlab* para a avaliação da radiação solar no *Campus* da FCUL, para a determinação da radiação solar que atravessa o envidraçado com as lâminas na horizontal e para o dimensionamento do protótipo.

```
clear all; clc; close all;

%%
%Escolher orientação e direcção
betha=90;%ângulo vertical com a horizontal: vertical=90°
direction=90;%Sul=0; Este=90; Oeste=90
%%
dados=xlsread('Dados ATM e RAD (INETI 2005 - ficheiro epw -Energy Plus) ');
LT=dados(:,1);
Jd=dados(:,2);
TC=dados(:,3);
TC_r=TC';
DHI=dados(:,4);
DNI=dados(:,5);

%Local (°)
LAT=38.8;%latitude
LL=-9.16;%longitude

%Local Standart Time Meridian: LSTM=15°*dT_GMT,
LSTM=zeros(8760:1);

for i=1:8760%rows
    if i>2041 && i<7249%mudança de hora 27/03 à 1 am e 30/10 à 1 am
        LSTM(i)=15;%verão dT_GMT=+1
    else
        LSTM(i)=0;
    end
end

%hour angles (°)
LSTM=LSTM';
B=(Jd-81)*360/365*pi()/180;
EoT=9.87*sin(2*B)-7.53*cos(B)-1.5*sin(B);%Equation of Time
TCf=4*(LL*pi()/180-LSTM)+EoT;%Time Correction Factor (min)
LST=LT+TCf/60;%Local Solar Time
HRA=(LST-12)*15;%Hora solar angular || HRA=(LT-12)*15;

%declination of solar zenith angle (rad)
delta=0.4093*sin(2*pi()*((284-Jd)/365));

%Solar Elevation (°)
elev=asin(sin(delta)*sind(LAT)+cosd(HRA)*cosd(LAT).*cos(delta));
elev=radtodeg(elev);
elev(elev<0)=0;%rejeita altura solar negativa
max_elev=max(elev);

%Solar Azimuth
```

```

solar_az=abs(acosd((sind(elev)*sind(LAT)-sin(delta))./(cosd(elev)*...
cosd(LAT)))).*sign(HRA);

%Solar Irradiation on a surface (Wh/m^2)
costheta=sind(elev).*cosd(betha)+cosd(elev).*sind(betha).*...
cosd(direction-solar_az);

DNI_s=DNI.*costheta;
DNI_s(DNI_s<0)=0;%rejeita DNI negativo

DHI_s=DHI*0.5*(1+cosd(betha));%vertical
GHI_s=DNI_s+DHI_s;

%%
%Estação de arrefecimento
%Elevacao, Radiacao e Temperatura - horas de verão

DNI_verao=DNI_s(4105:6336);
DHI_verao=DHI_s(4105:6336);
elev_verao=elev(4105:6336);
TC_verao=TC(4105:6336);
LST_verao=LST(4105:6336);
GHI_verao=DNI_verao+DHI_verao;
%%
%Radiação solar que atravessa as lâminas qd na posição horizontal
d_E=50;%largura das lâminas em mm
H=48;%espaçamento entre as lâminas em mm

Gi=zeros(2232:1);
A=zeros(2232:1);

for i=1:2232%rows
    A(i)=d_E*tand(elev_verao(i));
    if A(i)>=H
        Gi(i)=DHI_verao(i);
    else
        Gi(i)=DNI_verao(i)*((H-E*tand(elev_verao(i)))/H)+DHI_verao(i);
    end
end

Gi=Gi';%Radiação incidente
%%
%GHI para a placa instalada na horizontal
% mudar sinal < para fachada a este e > para fachada a oeste
for i=1:2232
    if HRA(i)<0
        DNI_verao(i)=DNI_verao(i);
    end
end

GHI_verao_EO=DNI_verao+DHI_verao;
%%
%Temperatura media p/ 280<GHI_vertical<=320 para o verao

TC_m_p=(GHI_verao_EO>280 & GHI_verao_EO<320);
TC_m=TC_verao(TC_m_p);
TC_M=mean(TC_m);
TK_M=TC_M+273.15;

```

```

%%
%caracteristicas da placa PE-HWU
thickness=0.008;
wide=0.08;
ro=950;%PE-HWU
cp=1300;%J/kg.K ?
CET=1.8*10^-4;% 1/(m*K)
emissividade=0.92;
const=emissividade*(5.67*10^-8);
abs=0.94;
k=0.38;%conductivity

%%
T0=25+273.15;% temperatura da placa para L0
L0=1;% comprimento em mm
T1=TC_verao(1)+273.15;
L1=L0-L0*CET*(T0-T1);%m
V=wide*thickness*L1;
As_r=L1*wide;
As=As_r*2+thickness*wide*2;
ct=ro*V*cp;
Lc=V/(As+As_r);
Bi=0.1;
%hc=Bi*k/Lc;%garantir que Tsup=Tinterior
hc=10;
%Bi=hc*Lc/k;

%Determina a temperatura de PE-HWU pelo método da Capacitância Geral
% Com interpolação de Tamb e de Ggabs de min em min e media para
segundo
TK=273.15+TC_verao;
TK_seg=interp(TK,3600); %hora para segundos
GHI_verao_seg=interp(GHI_verao_EO,3600);%hora para segundos
tmax=8035200;
dt=1;
t=1:dt:tmax;
Tp_s=zeros(8035200,1);
N=length(t); %n° de pontos

for i=1:N-1
    Tp_s(1)=TK_seg(1);
    Tp_s(i+1)=Tp_s(i)+((abs*GHI_verao_seg(i)-hc*(Tp_s(i)-TK_seg(i))-
const*(Tp_s(i)^4-TK_seg(i)^4))/(Lc*ro*cp))*dt;
    if Tp_s(i+1)<TK_seg(i)
        Tp_s(i+1)=TK_seg(i);
    else
        end
end

Tp=(mean(reshape(Tp_s-273.15,3600,[])))'; %Esta média serve para
reduzir o tamanho do vector T_p

%%
%Análise simplificada p/ det Tplaca c/ G=300 e Tamb=25°C hc=10

%polynomial coefficients
p(1)=-const;
p(2)=0;
p(3)=0;
p(4)=-hc;

```

```
p(5)=300*abs+hc*TK_M+const*(TK_M)^4;
q=roots(p); %Calcula as raizes do polinómio
for k=1:1:size(q) %Avalia as soluções
    if imag(q(k))==0 && real(q(k))>=0
        Tp_AS=real(q(k)); % Devolve a solução real e positiva
    else
    end
end

%%
%Determina o comprimento da placa
L=zeros(2232:1);
dL=zeros(2232:1);
L(1)=L1*1000;
for i=1:2231
    L(i+1)=L(i)+L(i)*CET*(Tp(i+1)-Tp(i));
    dL(i+1)=L(i)-1000;
end
dL=dL'; %mm
L=L';
```


Anexo B

Código para ler os sinais analógicos do Arduino e calcular a voltagem gerada pelos dois módulos fotovoltaicos durante os ensaios experimentais.

```
int panelPv_1=A0; //Assigning panelPv_1 to A0
int readValue_1; //Declaring readValue Variable
float Voltage_1; //Declare Voltage Variable
int panelPv_2=A1; //Assigning panelPv_1 to A1
int readValue_2; //Declaring readValue Variable
float Voltage_2;
unsigned long startTime = 0;
void setup() {
  pinMode(panelPv_1, INPUT); //Declare panelPV an input
  pinMode(panelPv_2, INPUT); //Declare panelPV an input
  Serial.begin(9600); //Start Serial Port
}
void loop() {
  unsigned long loopTime = millis() - startTime; //Calculate the time since last time the cycle
  was completed
  if (loopTime <= 7200000) //Check if the time is less than 40 minutes (in
  millis), and if so, run loop
  {
    readValue_1=analogRead(panelPv_1); //Read 'panelPv' and put value in readValue
    readValue_2=analogRead(panelPv_2); //Read 'panelPv' and put value in readValue
    Voltage_1=2*(5./1023.)*readValue_1; //Calculating the real voltage
    Voltage_2=2*(5./1023.)*readValue_2; //Calculating the real voltage
    Serial.print(Voltage_1); //Print results to serial monitor
    Serial.print(",");
    Serial.println(Voltage_2); //Print results to serial monitor
    delay(1000); //Delay 1000 milliseconds
  }
}
```

Anexo C

Código *Matlab* para determinar a radiação incidente numa superfície vertical tendo por base dados da estação meteorológica do *Campus Solar* da FCUL.

```
Jd=241;%Julian day (28 august)
orientation=-109;% 0° South (negative to East)

LAT=38.8; % Local Latitude (°)
LL=-9.16; % Local longitude (°)

dados=xlsread('Ensaio_28_08_16_sunrise','dados_est_meteo+matlab');
LSTM=15;%Local Standart Time Meridian: LSTM=15°*dT_GMT, GMT+1
B=Jd*360/365;
EoT=9.87*sin(2*B)-7.53*cos(B)-1.5*sin(B);%Equation of Time
TC=4*(LL-LSTM)+EoT;%Time Corretion Fator (min)
LT=dados(:,12);%Local time
LST=LST+TC/60;%Local Solar Time
HRA=15*(LST-12);%Hour Angle

%declination of solar zenith angle (rad)
delta=0.4093*sin(2*pi()*((284-Jd)/365));

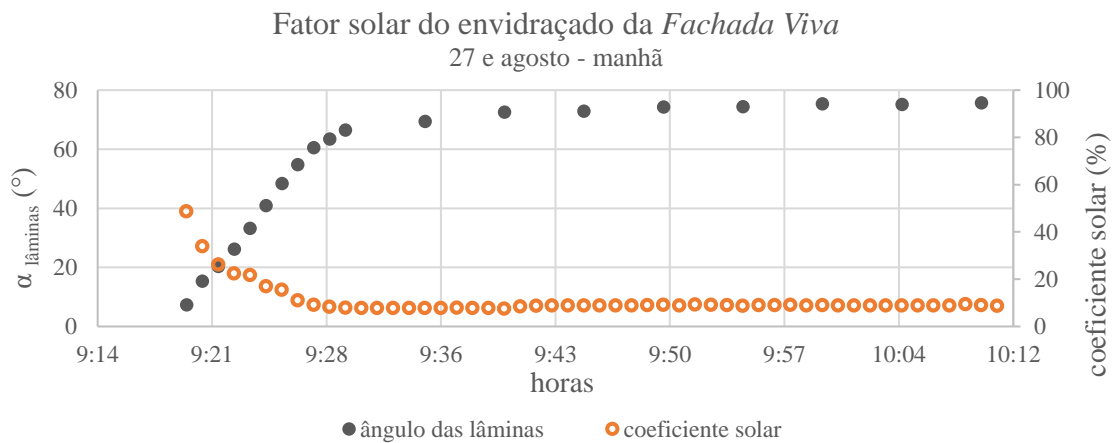
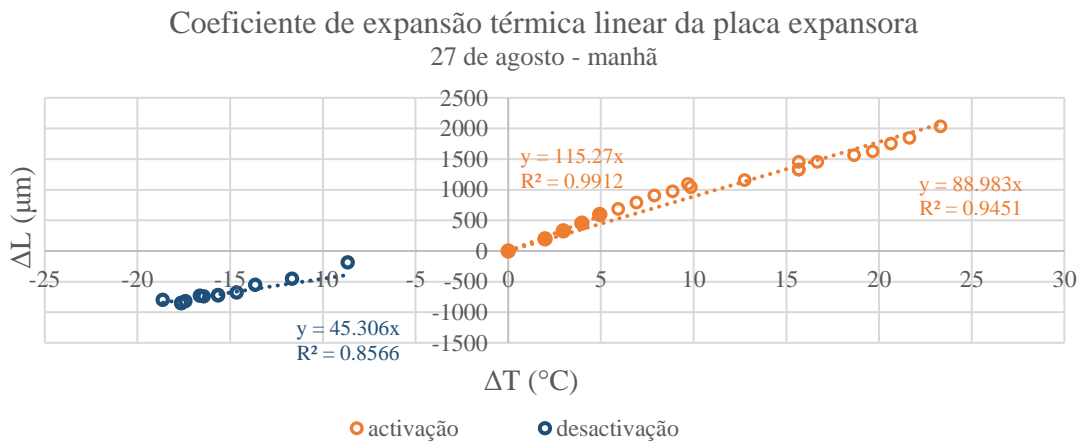
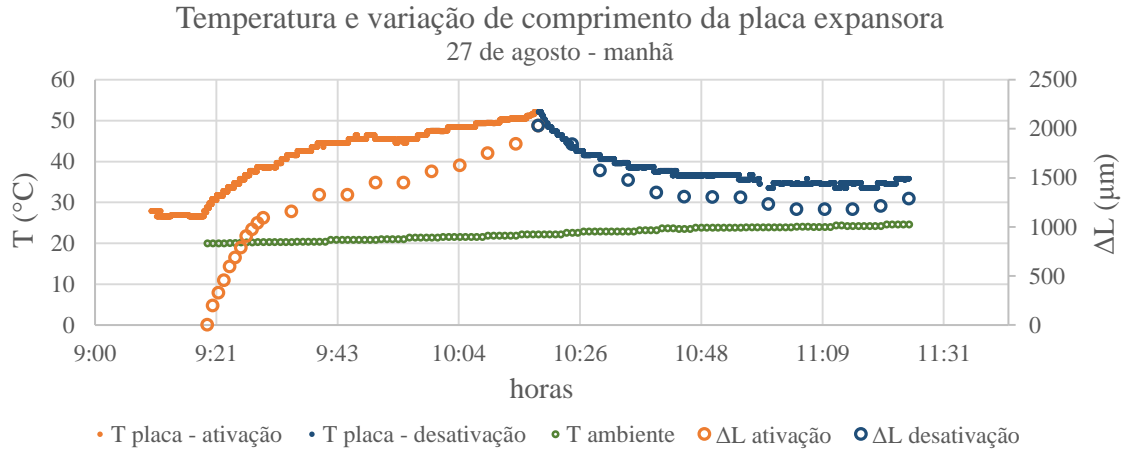
%Solar Elevation (°)
elev=asin(sin(delta)*sind(LAT)+cosd(HRA)*cosd(LAT).*...
    cos(delta));
elev=radtodeg(elev);
elev(elev<0)=0;%rejets solar elevation negative values

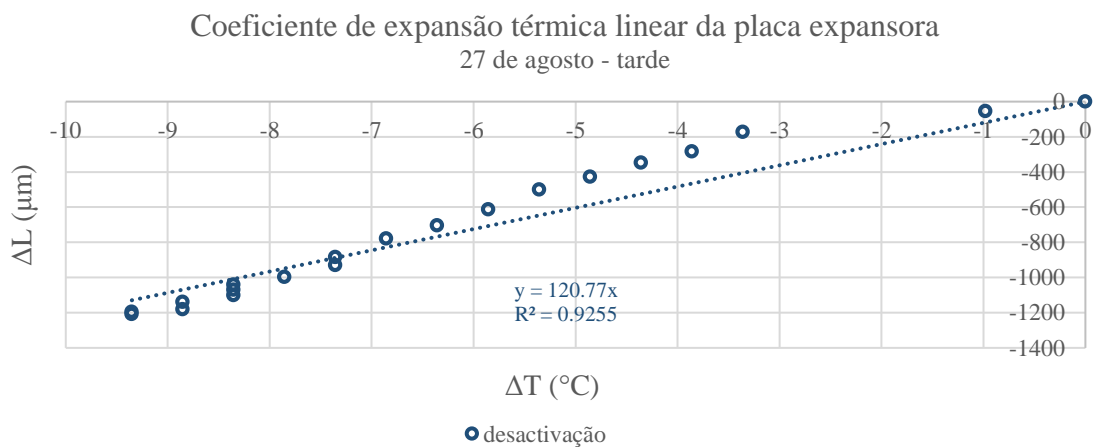
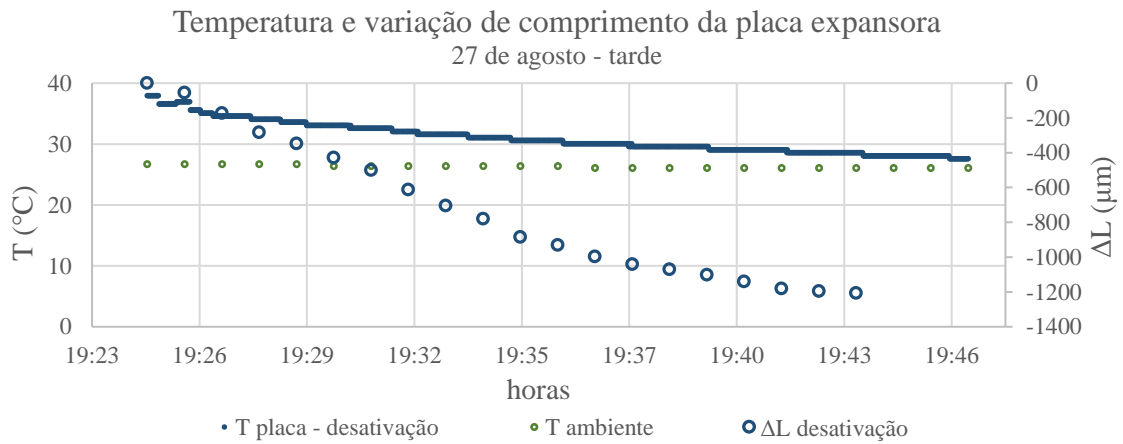
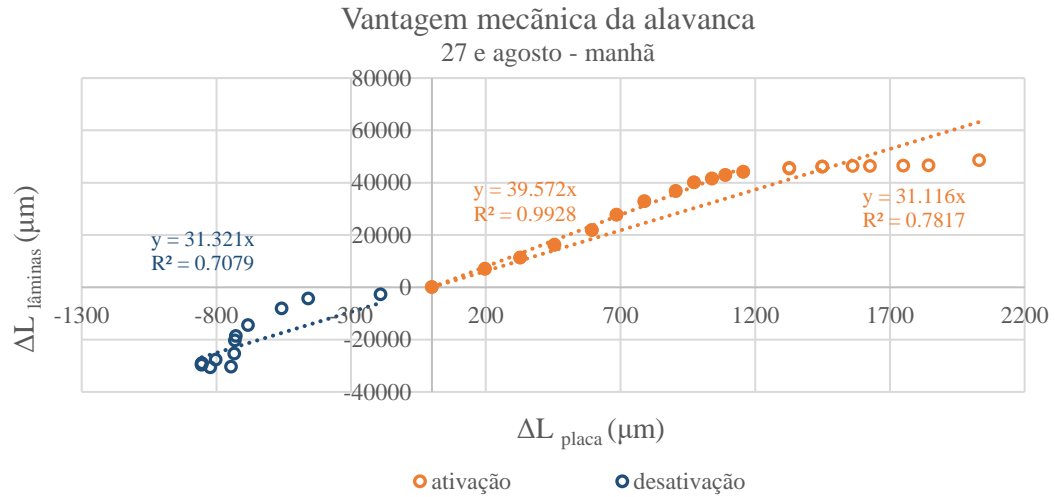
%Solar Azimuth
solar_az=abs(acosd((sind(elev)*sind(LAT)-sin(delta))./(cosd(elev)*...
    cosd(LAT)))).*sign(HRA);

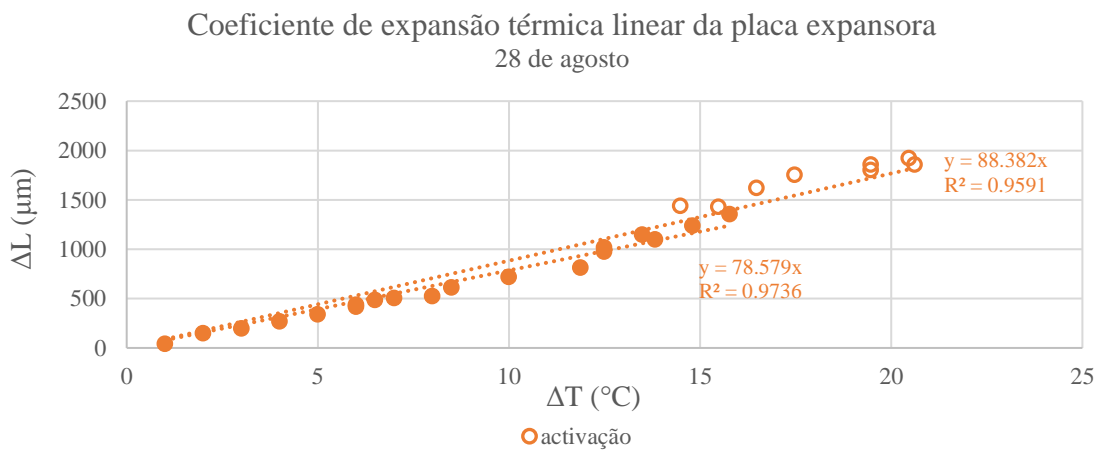
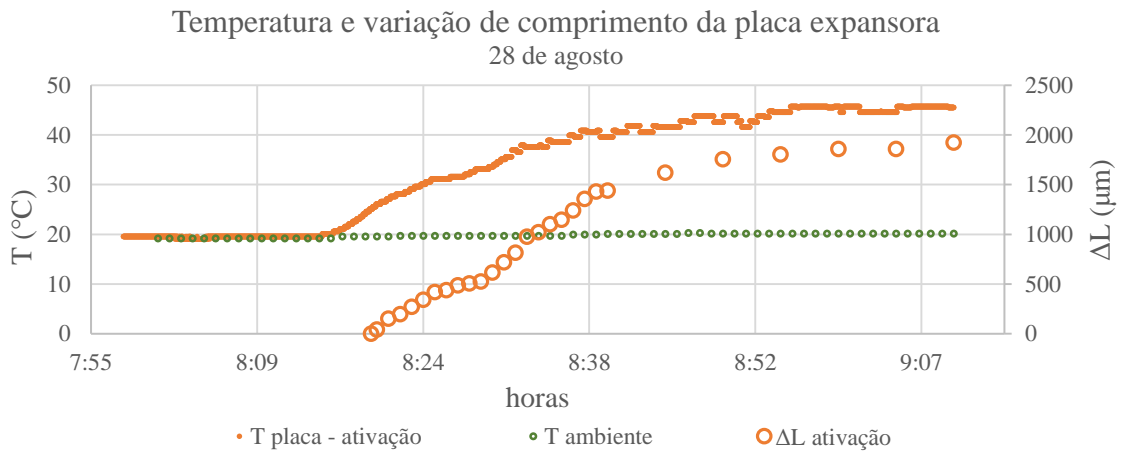
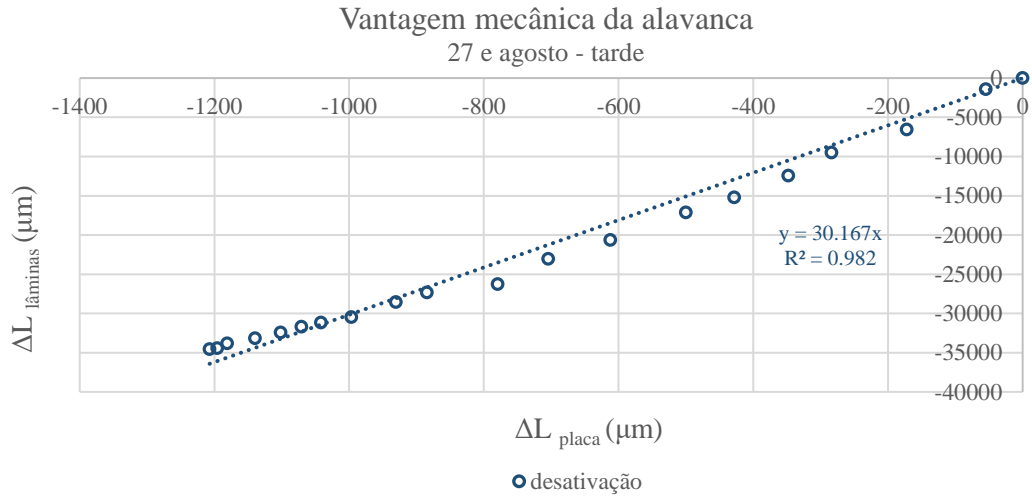
%Solar Irradiation on a surface (Wh/m^2)
betha_h=0;%horizontal surface angle
betha_v=90;%vertical surface angle with horizontal plane
costheta_h=sind(elev).*cosd(betha_h)+cosd(elev).*sind(betha_h).*...
    cosd(orientation-solar_az);
costheta_v=sind(elev).*cosd(betha_v)+cosd(elev).*sind(betha_v).*...
    cosd(orientation-solar_az);
DHI=dados(:,2);
DNI=dados(:,3);
DNI_sup_h=DNI.*costheta_h;
DNI_sup_v=DNI.*costheta_v;
DNI_sup_v(DNI_sup_v<0)=0;%rejeita DNI negativo
DHI_sup_h=DHI;
DHI_sup_v=DHI*0.5;%vertical
GHI=DNI_sup_h+DHI_sup_h;
GHI_v=DNI_sup_v+DHI_sup_v;
```

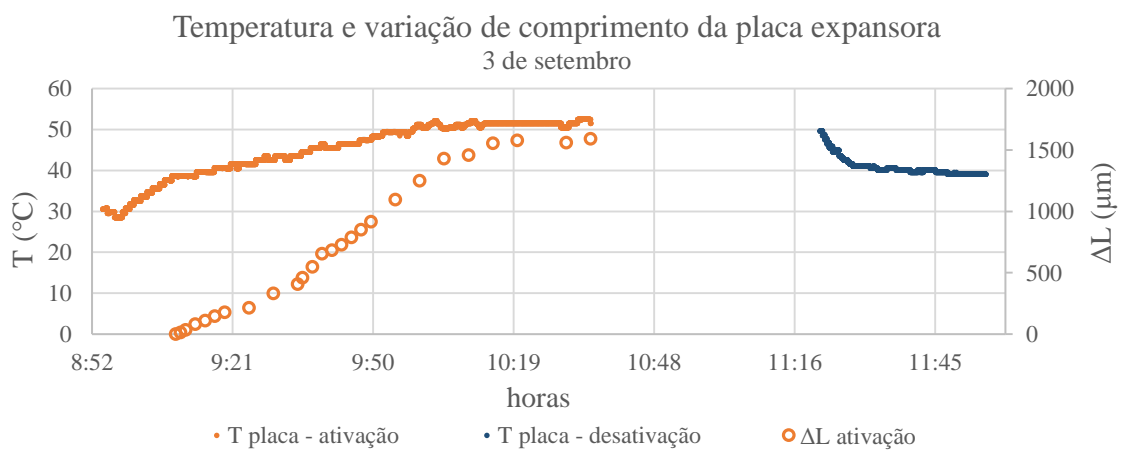
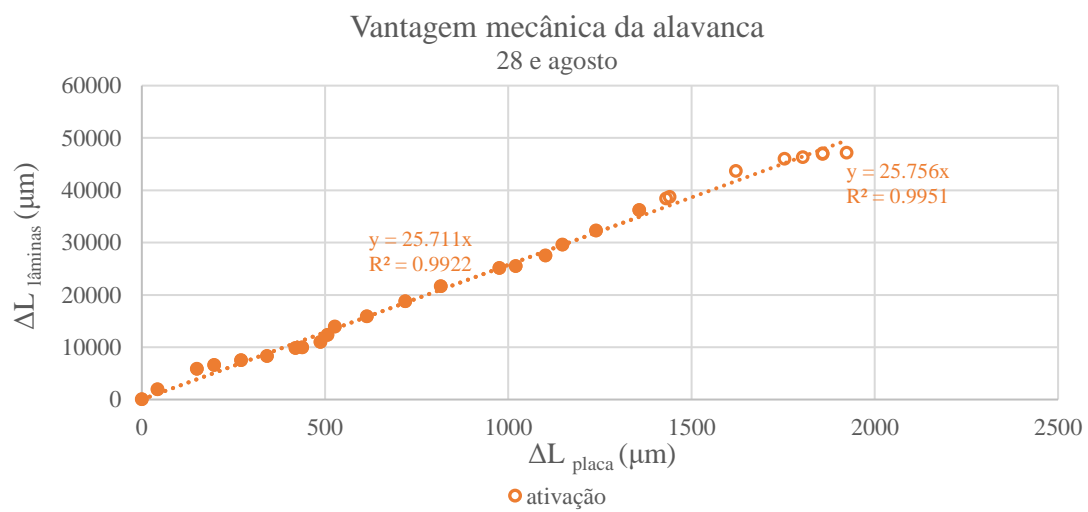
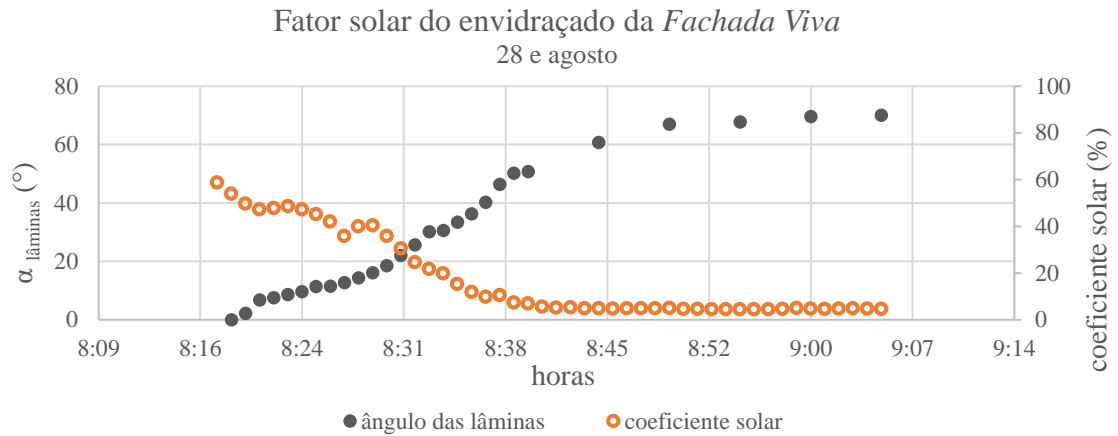
Anexo D

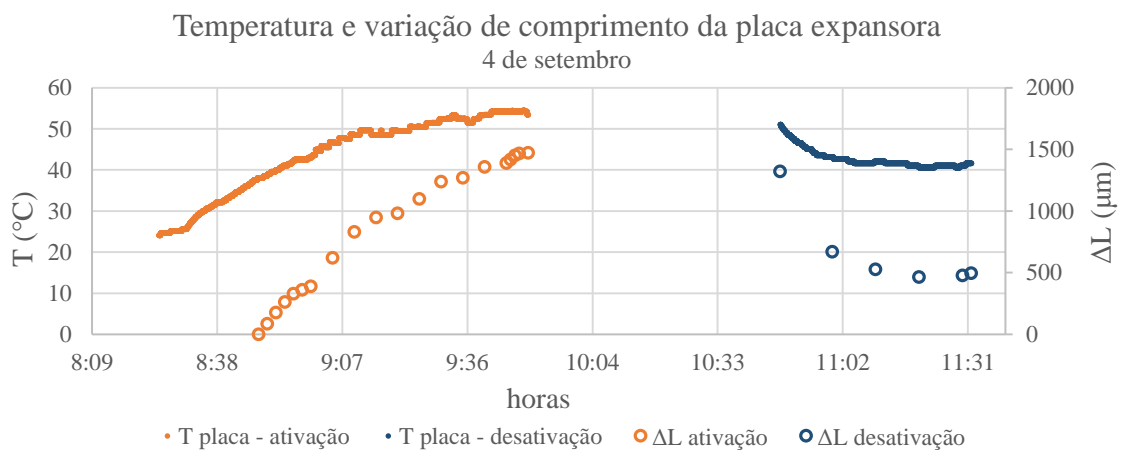
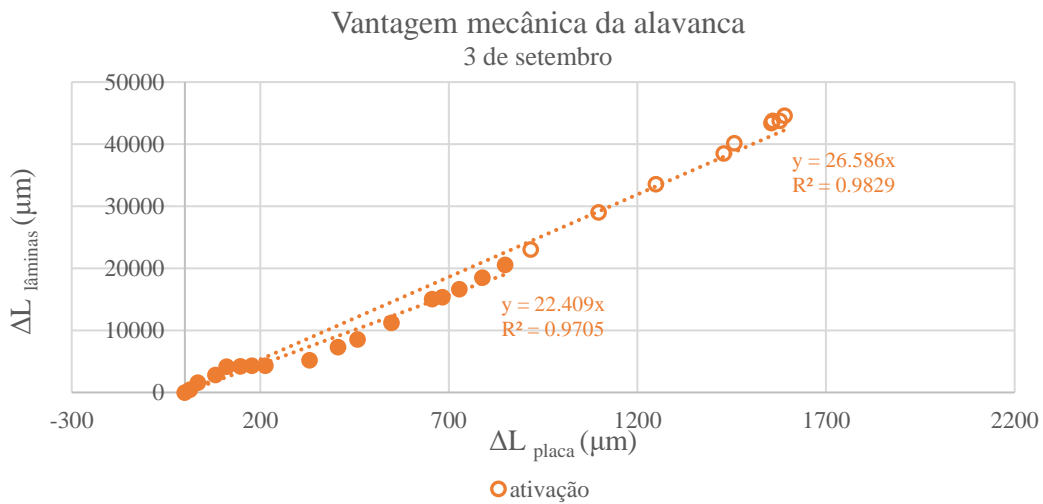
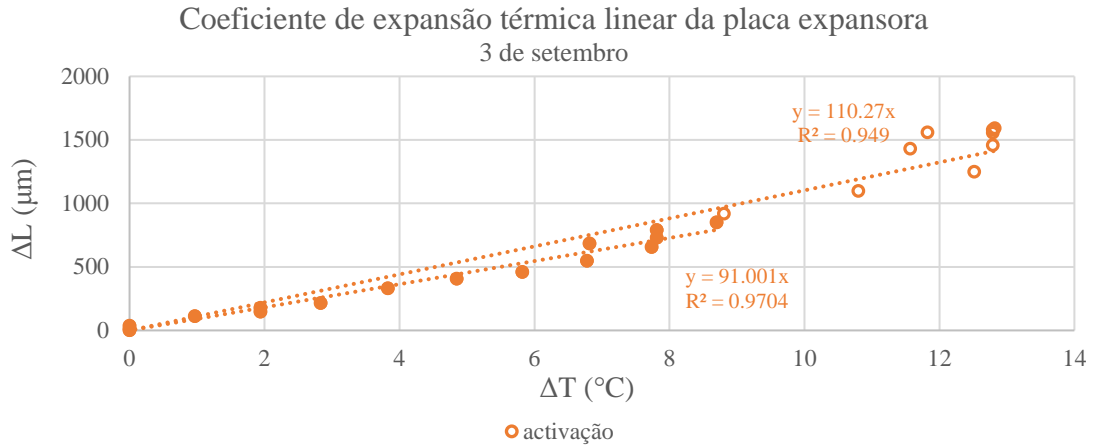
Gráficos dos ensaios experimentais para os processos de ativação e desativação do sombreamento da *Fachada Viva*.



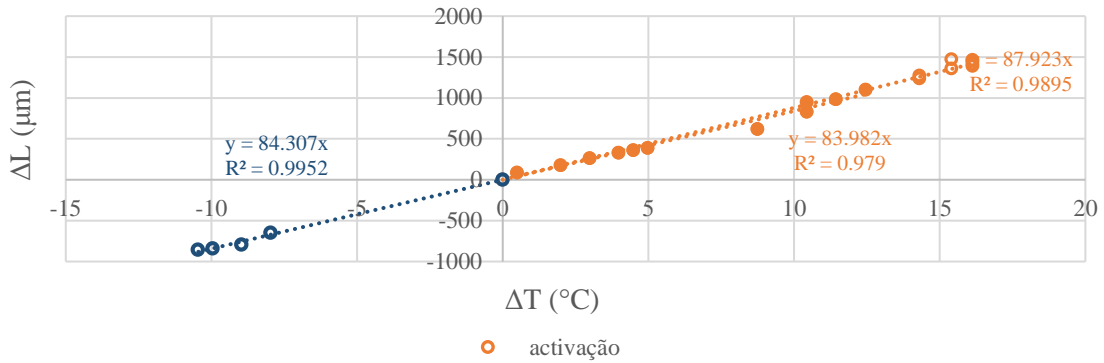




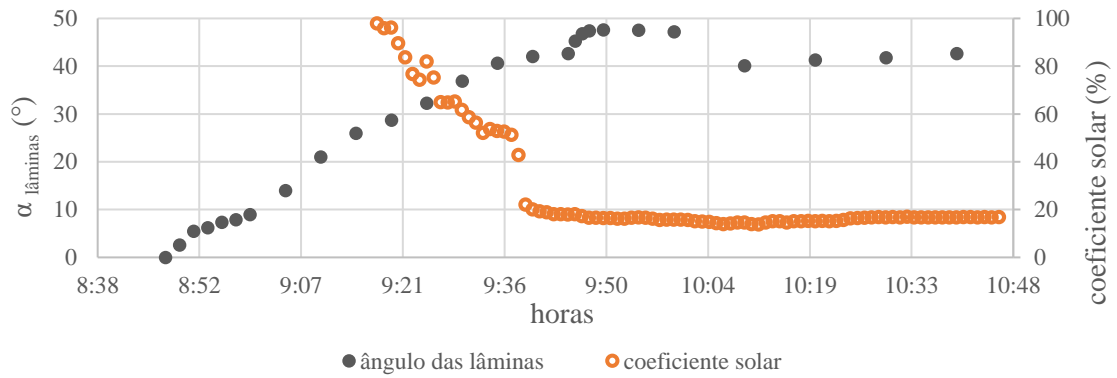




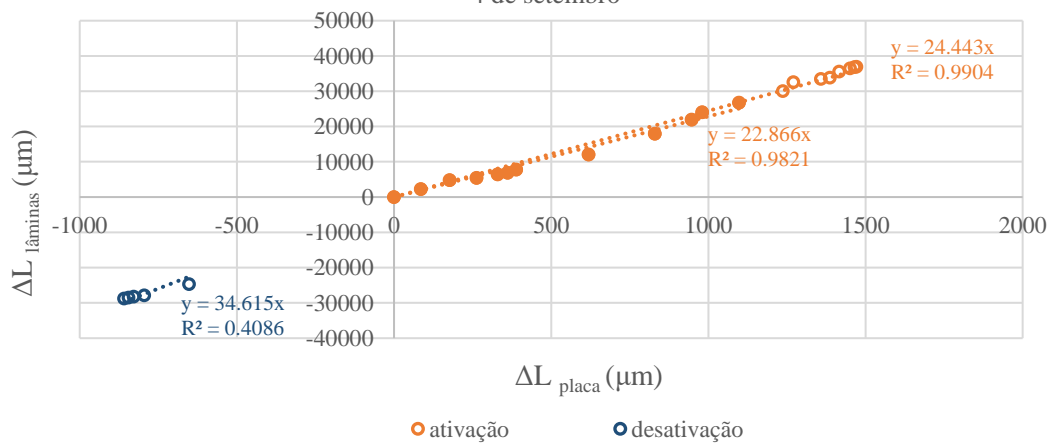
Coeficiente de expansão térmica linear da placa expansora
4 de setembro



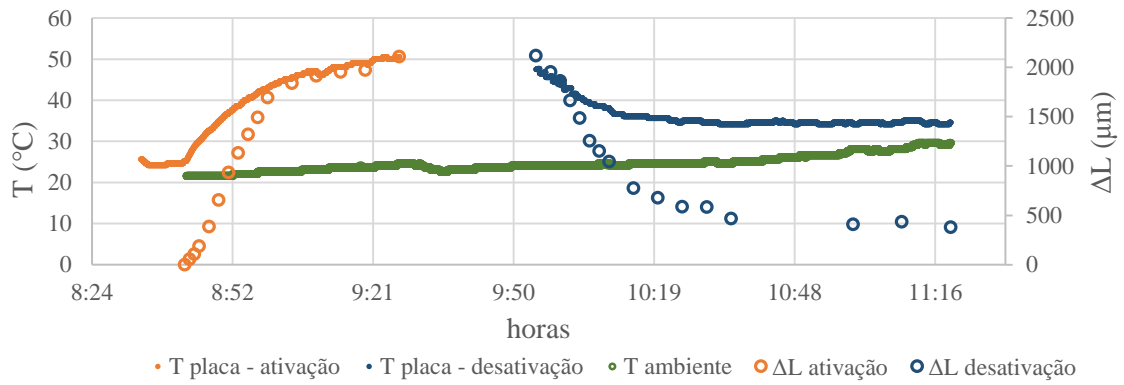
Fator solar do envidraçamento da *Fachada Viva*
4 de setembro



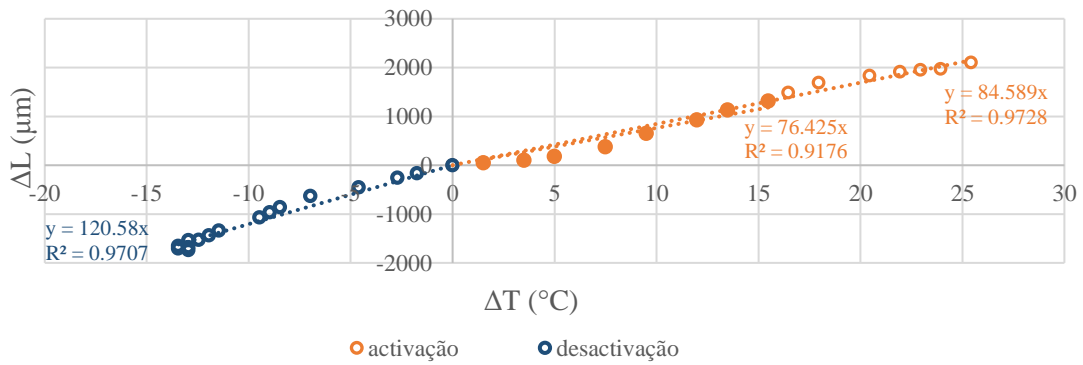
Vantagem mecânica da alavanca
4 de setembro



Temperatura e variação de comprimento da placa expansora
18 de setembro



Coefficiente de expansão térmica linear da placa expansora
18 de setembro



Vantagem mecânica da alavanca
18 de setembro

