


## Programa de Capacitação em Energias Renováveis



OBSERVATÓRIO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS  
PARA A AMÉRICA LATINA E O CARIBE



---

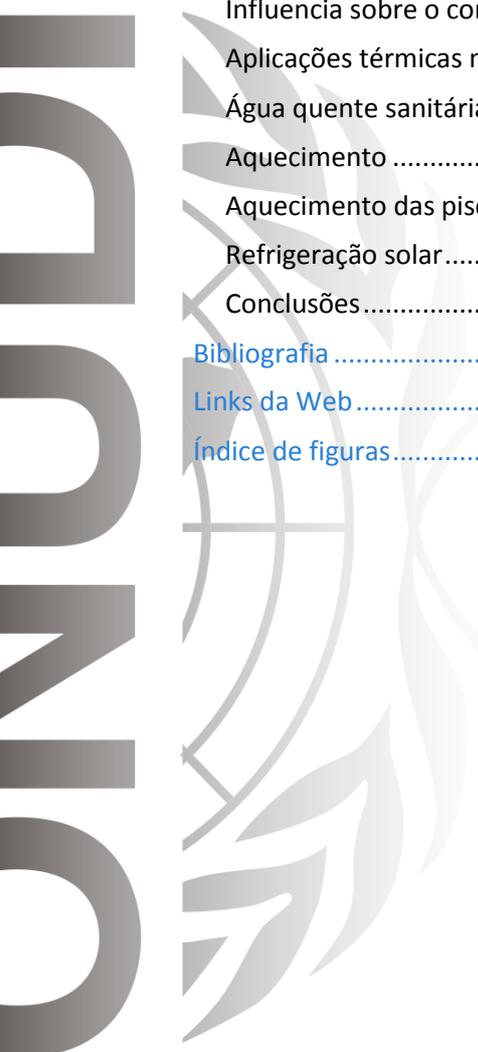
## Eficiência Energética em Edifícios

---

# Índice

Eficiência Energética em Edifícios.....	1
Objetivos do Módulo .....	1
1. A razão da eficiência energética na edificação .....	2
Introdução .....	2
A razão da eficiência energia na edificação.....	4
Aproveitamento solar passivo .....	5
Importância do desenho do ponto de vista energético .....	6
Diferença entre conforto térmico e economia de energia.....	8
Conclusões.....	9
2. Fundamentos para o condicionamento térmico de edifícios .....	10
Introdução ao condicionamento térmico e ambiental.....	10
Ambiente climático.....	10
Radiação solar .....	10
Movimento solar .....	11
Distribuição espectro-espacial da radiação .....	12
Irradiação solar sobre uma superfície arbitraria .....	14
Radiação de onda larga .....	15
Estados psicrométrico da atmosfera .....	15
Composição do ar. Ar seco e ar úmido del aire. ....	15
Variáveis que definem o estado psicrométrico da atmosfera .....	16
Diagrama psicrométrico.....	17
Estado térmico do solo .....	19
Vento .....	20
Transferência energética em edifícios.....	20
Condução .....	20
Convecção .....	22
Radiação.....	23
Transferência de massa.....	23
Balanço energético de um edifício .....	23
Conforto térmico .....	28
Transferência energética no conforto térmico .....	30
Estimação de conforto térmico global. Pmv e ppd. ....	32
Carta bioclimática.....	34

Conclusões.....	35
<b>3. Técnicas naturais de condicionamento em edifícios .....</b>	<b>36</b>
Introdução .....	36
A dificuldade do desenho passivo .....	36
Principais fatores do desenho energeticamente eficiente.....	37
Aplicação da energia solar passiva .....	39
Aquecimento.....	39
Refrigeração .....	40
Iluminação natural .....	40
Técnicas naturais para aquecimento.....	41
Orientação.....	42
Paredes e vãos conforme a orientação.....	42
Inércia térmica .....	43
Ganho solar .....	44
Técnicas naturais de refrigeração.....	49
Controle solar.....	50
Ventilação .....	52
Técnicas ativas de condicionamento.....	56
Técnicas evaporativas .....	56
Conduitos enterrados .....	57
Sistemas Radiantes .....	58
Conclusões.....	59
<b>4. Estudo energético teórico: simulação. ....</b>	<b>60</b>
Avaliação energética teórica .....	60
Métodos de simulação energética .....	62
Metodologia de um processo de simulação energética.....	64
Conclusões.....	66
<b>5. Avaliação energética de edifícios em condições reais de uso. Monitoramento .....</b>	<b>67</b>
Metodologia do monitoramento.....	67
Conhecimento prévio.....	67
Desenho e execução experimental .....	69
Análise dos dados experimentais.....	69
Modelos para o estudo analítico .....	69
Modelos estáticos .....	70
Modelos dinâmicos .....	71
Conclusões.....	71



6. Integração de sistemas solares ativos em edifícios .....	72
Introdução .....	72
Ambiente .....	73
Cálculo de sombras.....	74
Edifício .....	74
Módulos fotovoltaicos.....	77
Captadores solares térmicos .....	78
Influencia sobre o conforto da integração de sistemas solares ativos .....	81
Aplicações térmicas mais comuns em edifícios.....	81
Água quente sanitária.....	81
Aquecimento .....	82
Aquecimento das piscinas .....	83
Refrigeração solar.....	84
Conclusões.....	86
Bibliografia .....	87
Links da Web.....	89
Índice de figuras.....	90

# Eficiência Energética em Edifícios

## Objetivos do Módulo

O objetivo do módulo é capacitar os estudantes para realizar a análise energética dos edifícios, incorporando a estas técnicas de eficiência energética. O alcance do estudo abarca tanto os aspectos energéticos do desenho arquitetônico, como a incorporação ao mesmo de sistemas solares ativos de geração energética para climatização. Portanto, os principais objetivos do módulo são:

1. Compreender os conceitos de eficiência energética de edifícios, a influencia das variáveis do meio, como o clima, e a importância do desenho bioclimático.
2. Saber quais são os fundamentos das técnicas naturais de condicionamento térmico (chaminés solares, ganhos diretos ou indiretos, sombreamentos, uso da inercia térmica, ventilação natural, etc.) e sua aplicação orientada a estratégias de aquecimento e refrigeração.
3. Conhecer a metodologia e diferentes opções de programas informáticos existentes para realizar a análise energética de edifícios.
4. Aprender uma metodologia para o desenvolvimento de um projeto de eficiência energética em edifícios e desenvolver um caso prático.

# 1. A razão da eficiência energética na edificação

## Introdução

Numa época em que o consumo de energia se chegou a entender como um indicador de atividade e desenvolvimento de um país, esta falsa identidade foi extrapolada entre consumo e desenvolvimento a todos os sectores industriais e sociais, deixando num segundo plano os parâmetros da eficiência do consumo de energia sendo, no melhor dos casos, somente valorados pelos índices de rentabilidade em curto prazo. Esta situação leva a que a implantação real das medidas de eficiência energética seja de menor impacto que o desejável.

Um sistema de valoração da eficiência energética fundamentado exclusivamente no benefício económico a muito curto prazo, pode conduzir a uma concepção do bem-estar imediato sem tomar medidas para a continuidade do conforto social a médio e longo prazo, enquanto que uma valoração baseada em manter os índices de conforto e atividade utilizando técnicas eficientes de geração, transporte e consumo de energia, supõe manter, e incluso incrementar, tanto o conforto da sociedade como a produtividade do tecido industrial de um país, diminuindo o número de megavattios consumidos. A redução do consumo fundamentado na eficiência energética implica permitir um maior acesso do número da população à situação de conforto desejada, enquanto que a redução de custos de produção aumentaria a competitividade da indústria, podendo atuar como fator dinamizador da economia de um país, razão pela que a área da edificação tem um potencial enorme no campo da eficiência energética.

Entende-se por Eficiência Energética na Edificação a adequação do edificio ao entorno para reduzir sua demanda energética, assim como a utilização da energia solar para suprir os requerimentos energéticos dos edificios com relação ao aquecimento, refrigeração e iluminação com a finalidade de reduzir substancialmente o consumo energético de energia convencional. São edificios que ao reduzir a demanda de energia diminuem as emissões de CO<sub>2</sub> e outros agentes de poluição à atmosfera partindo da utilização da energia solar: “Edifícios que energeticamente se alimentam do sol”.

Os objetivos que devem atingir-se pela eficiência energética e a utilização da energia solar na edificação são:

- Propiciar as condições adequadas para conseguir edificios mais eficientes do ponto de vista energético tanto na obra nova, quanto na reabilitação da já existente, considerando o clima ao redor sem ser alheios a arquitetura do edificio.
- Favorecer a utilização dos recursos naturais renováveis para o condicionamento dos edificios, também conhecido como uso de técnicas naturais de condicionamento, considerando os componentes, as técnicas construtivas e a localização do edificio.
- Integrar os sistemas solares ativos de aquecimento térmico ou de produção de eletricidade como outro componente do edificio.

Isto consegue-se fazendo uso das técnicas arquitetônicas mais favoráveis ao clima na localização do edifício. Diferentes isolamentos, fachadas e distribuição de espaços, por exemplo, serão determinantes para rebaixar a demanda segundo os requisitos e condicionantes do meio circundante. Por outro lado, será indispensável a utilização da energia solar de forma passiva a través de uma arquitetura coerente energeticamente. Estas duas premissas se englobam como Arquitetura Bioclimática. Nesta arquitetura devem considerar-se as técnicas naturais de acondicionamento desde o desenho, para a obtenção de edifícios energeticamente eficientes.

Por outro lado, a utilização da energia solar ativa é proporcionada com a integração dos sistemas de energia solar para aplicações térmicas de aquecimento de fluidos e de produção de eletricidade, usando coletores solares térmicos e módulos fotovoltaicos como elementos que compõem o edifício. Esta integração deve ser considerada já nos primeiros passos do projeto, pois o desenvolvimento e difusão da energia solar ativa nos países industrializados passa por sua integração nos edifícios. Para estimular este desenvolvimento é preciso fazer com que os arquitetos e outros técnicos da construção conheçam os elementos disponíveis para sua integração.

A crescente preocupação social com tudo o que se relaciona com a economia energética e com o Meio Ambiente reflete-se no crescimento do setor da energia solar na edificação e no urbanismo. Neste setor a aplicação dos sistemas de transformação da energia solar em energia útil para a edificação apresenta uma grande perspectiva de ampliação.

No entanto, o desenho energeticamente consciente passa pelo aproveitamento dos recursos naturais do lugar onde se constrói. Para tanto, são necessárias as condições adequadas para que estes recursos possam ser usados. Assim, o urbanismo ou, em outras palavras, o planejamento urbanístico, é uma condição necessária a se considerar para utilizar a energia solar de forma global.

A primeira barreira apresentada no momento de desenhar um edifício consciente energeticamente é a estrutura urbana, que pode restringir ou facilitar as possibilidades do projeto. Portanto, para um adequado aproveitamento dos recursos naturais é preciso começar projetando uma cidade que permita aproveitar todas estas condições, isso é, uma Cidade Sustentável. É claro que o urbanista encontra problemas de índoles diversas, mas geralmente nunca tenta resolver o problema energético, cujos condicionantes não são extremamente exigentes.

Nos distintos temas que serão expostos a seguir pretende-se explicar, do modo mais amplo possível, os distintos modos existentes para economizar energia através de uma arquitetura coerente energeticamente. Isso será feito partindo dos princípios básicos dos fenômenos de transferência de energia e considerando os temas urbanísticos neste tipo de arquitetura concebida com técnicas naturais de condicionamento e de componentes utilizados nos edifícios. Logo se avaliará, através de simulação, seu comportamento energético e as condições reais de uso do edifício.

Ademais, serão expostos outros tipos de energias renováveis que devem ser incorporadas nos primeiros passos do desenho do edifício, principalmente em aplicações da energia solar, de forma técnica ou fotovoltaica, para que resultem em edifícios nos quais se consiga uma verdadeira econômica de energia convencional. Ao mesmo tempo, pretende-se evitar os problemas posteriores, do ponto de vista energético, produzidos na maioria das vezes pelas instalações de energia solar realizadas após a construção do edifício.

Ao longo dos distintos temas serão expostos os modos de economizar energia e manter o conforto térmico nos edifícios considerando o planejamento urbanístico e a estrutura urbana. No projeto não se incluem o conforto de iluminação e/ou acústico porque, ainda que devam ser considerados no momento de utilizar a iluminação natural, principalmente nos edifícios não residenciais, bem como de pesquisar a iluminação natural, prevenção de ruídos e outros problemas relacionados com a acústica (o que se realiza por distintos Organismos), na verdade fogem do tema principal, que é a econômica de energia através do desenho do invólucro dos edifícios. Desse modo, os temas de conforto de iluminação e acústico serão tratados somente nos temas de desenho de edifícios solares passivos.

Sobre os conceitos, modos e demais parâmetros que devem ser considerados neste tipo de arquitetura, coerentes do ponto de vista energético, será dada uma ampla visão ao longo das distintas Unidades que fazem parte do Temário deste curso. No entanto, antes é importante expor a situação energética atual para que se saiba de onde partimos e aonde devemos ir com a economia de energia. Desse modo, será feita uma síntese do gasto de energia convencional produzido, bem como da classificação destas energias em seus distintos tipos, oferecendo uma visão do panorama energético atual e perspectivas de futuro.

## A razão da eficiência energia na edificação

---

A situação herdada na edificação das décadas passadas, nos quais o custo do combustível era acessível, deu origem à construção de edifícios nos que se valorava quase em exclusividade os parâmetros estéticos, assumindo que a climatização estaria coberta pelos sistemas convencionais ativos, independentemente do consumo das toneladas equivalentes de petróleo que isso supõe. No obstante, já no 2008 a Agencia Internacional da Energia, no informe “Perspectivas sobre tecnologia energética”, definia possíveis cenários e estratégias até o 2050, e no qual se indica que as melhoras na eficiência energética nos edifícios, é uma das medidas que representa uma economia de major nível com menos custos nos cenários analisados. Por outro lado, o preço da energia é um fator determinante no interesse das inversões em eficiência energética, pelo que pode ser oportuna a gestão e criação, se for necessário, de instrumentos financeiros específicos.

Embora a reabilitação energética dos sistemas é fundamental, a major eficiência se consegue diminuindo a demanda; a energia mais econômica e que contamina menos é a que não se gera, pelo que as medidas encaminhadas à redução da demanda mediante atuações arquitetônicas sob o edifício, isto é, a Arquitetura Bioclimática, deverá ser o ponto de partida de toda reabilitação.

Quando falamos de Arquitetura Bioclimática mencionamos o aproveitamento dos recursos naturais adjacentes e a adequação do edifício ao clima, incorporando de maneira muito importante a Energia Solar nos edifícios. Assim, é necessário considerar os requerimentos térmicos e elétricos, isto é as

aplicações da Energia Solar Passiva, assim como a utilização da Energia Solar térmica de baixa temperatura e, para produzir eletricidade, os sistemas solares fotovoltaicos, que devem estar integrados fazendo parte do edifício.

Estas medidas deveriam contemplar o entorno não como algo hostil, e sim como um aliado com o qual intercambiar energia de forma consciente. Um dos fatores determinantes, para o correto aproveitamento dos recursos naturais do lugar onde se edifica, é a planificação urbanística do entorno. Se for realizada de forma energeticamente consciente, se darão as condições necessárias para favorecer o desenho bioclimático dos edifícios, enquanto que um planeamento energeticamente deficiente pode acarretar situações que dificultem notavelmente o aproveitamento dos recursos naturais, tais como impedir a acessibilidade solar aos elementos nos quais este recurso é altamente necessário.

Desse modo, temos dois aspectos a considerar: o aproveitamento solar passivo, que é resumido a continuação, e o aproveitamento solar ativo baseado em sistemas solares térmicos ativos, a saber, sistemas de conversão de radiação solar em energia térmica mediante mecanismos ativos. O amplo desenvolvimento tecnológico alcançado com o coletor solar de placa plana e os sistemas de armazenamento ensejou sua utilização mundial. Geralmente, a aplicação mais utilizada é a produção de água quente sanitária. Fazem parte de uma instalação solar o captador, o armazenador e o transporte de energia (condutos, bombas, trocadores) e, tão importantes quanto a correta escolha dos elementos que a integram, é a integração de todos no sistema.

## Aproveitamento solar passivo

---

O aproveitamento solar passivo está íntimamente unido com a eficiência energética. Para alcançar este objetivo, com relação à econômica de energia nos edifícios, sem reduzir os níveis de conforto térmico exigidos pelos indivíduos que o ocupam, nasceu um conceito mais amplo que engloba a utilização da energia solar passiva nos edifícios, denominada Arquitetura Bioclimática ou Arquitetura Energeticamente Consciente.

Assim, a Arquitetura Bioclimática pode ser definida como aquela que otimiza suas relações energéticas com o meio ambiente através de seu próprio desenho arquitetônico. Com esta definição pretende-se ir além do significado de termos como “Arquitetura solar” ou “Arquitetura passiva”, que correspondem a aspectos parciais do problema global.

Ainda que seja conhecida pelo nome de Arquitetura Bioclimática, é realmente uma Arquitetura plana e lisa, sem nenhum tipo de adjetivos, na qual o clima proporciona uma série de condições que devem ser consideradas no desenho arquitetônico.

Portanto, a Arquitetura Bioclimática pretende sentar as bases para a realização de edifícios racionalmente construídos, de modo que, com um consumo mínimo de energia convencional, mantenham-se constantes as condições de conforto requeridas. Para tanto, deve-se considerar as

estratégias de desenho que aproveitem de forma ideal as condições ambientais do meio (energia solar disponível, temperatura exterior, direção predominante do vento, etc.).

É evidente que esta utilização da energia solar é a mais natural e imediata, e também a mais antiga. Assim, as bases da arquitetura bioclimática estão na arquitetura popular. Contudo, a problemática mudou, e a tecnologia avança descobrindo novos materiais que incentivam o desenvolvimento da pesquisa no campo da edificação para conseguir, desse modo, um baixo consumo energético, que não represente uma aumento no trabalho do projetista.

No momento de projetar o edifício deve-se considerar os recursos naturais que podem ser utilizados como fontes ou sumidouros de calor, dependendo da aplicação que se deseje utilizar: aquecimento ou refrigeração. Consideram-se como fontes: os fatores climáticos externos (radiação solar, temperatura ambiente, umidade relativa e direção e velocidade do vento) e como sumidouros: a terra (condutos enterrados), a atmosfera e o céu (temperatura aparente).

Este modo de utilizar a energia solar de forma passiva é totalmente distinto a quando é utilizada de forma ativa, de maneira que é necessária uma instalação que pode estar ou não integrada no desenho do edifício. Na maioria das vezes é instalada depois de construído o edifício.

O aproveitamento térmico da energia solar de forma ativa precisa de um sistema coletor, de um fluido que transporte essa energia térmica, de um armazenador, de um trocador e de uma série de condutos, válvulas, controles, etc., que faz necessária uma manutenção para que a instalação funcione, bem como deve-se considerar a duração dos componentes e a amortização da instalação.

Diferentemente do aproveitamento passivo, não há manutenção e a duração é a do edifício. Ainda que o custo seja alto na construção, quando o edifício é solar passivo ou convencional, na maioria das vezes, como se verá nos próximos temas, este custo é amortizado em pouco anos ao considerar a econômica de energia obtida ao longo do tempo de uso do edifício.

Portanto, em resumo, no desenho devem-se considerar as técnicas solares passivas para conseguir uma economia energia e um conforto térmico mas, por vezes, com o desenho solar passivo não são obtidos os níveis de conforto térmico aos quais estamos acostumados, de modo que esta energia adicional necessária pode ser conseguida pela utilização do aproveitamento ativo da energia solar, ou por sistemas convencionais. Isso é, a utilização da energia solar de forma passiva ou ativa nos edifícios são dois modos complementares de aproveitar a energia solar. A dimensão desta complementaridade depende de cada projeto em concreto e, assim, existirão edifícios somente passivos e outros que sejam passivos e ativos ao mesmo tempo. Todas estas características estão englobadas no conceito de Arquitetura Bioclimática.

## Importância do desenho do ponto de vista energético

---

Já que o objetivo da Arquitetura Bioclimática é atenuar as diferenças de temperaturas no interior do edifício ao longo do ano, apesar das variações climáticas no exterior, quase sem intervenção de

sistemas mecânicos ou de geração interior, o desenho adquire uma grande importância, isso é, como será o invólucro do edifício, de que materiais está formado, como é sua orientação, etc.

Portanto, a Arquitetura Bioclimática se baseia no desenho, localização, orientação, climatologia e vegetação do meio, para assim poder captar, armazenar e distribuir a energia solar incidente na estrutura.

Por outro lado, quando os meios mecânicos são necessários, podendo ser solares ativos, a arquitetura bioclimática permite consumir uma quantidade reduzida de energia convencional.

Os exemplos da arquitetura bioclimática podem ser tomados da arquitetura popular, que reúne características básicas que deveriam ser consideradas no momento de projetar e construir as moradias, como são:

- adaptam-se ao clima,
- adaptam-se à natureza e à paisagem,
- adaptam-se à função (ou funções) para as quais estão construídas, respeitando uma escala humana,
- utilizam materiais locais, quando possível,
- a forma é resultado de uma experiência secular,
- é, geralmente, anônima,
- é de mínimo consumo energético,
- é uma construção econômica, principalmente de caráter artesanal,
- pode formar conjuntos urbanísticos homogêneos (núcleos rurais) adaptando-se à topografia do lugar,
- é uma arquitetura sem pretensões estéticas (para morar, não para ver).

Estes pontos estão inter-relacionados e podem ser resumidos nos seguintes conceitos:

- clima
- ser humano
- economia
- natureza

 experiência

Na verdade, a arquitetura atual, aproximadamente a partir dos anos 60, não considera todos estes conceitos porque, antes da crise energética, a energia era barata e o arquiteto projetava a partir do ponto de vista estético, sem considerar a energia que poderia ser necessária. Logo, seus projetos eram entregues a um engenheiro para calcular as instalações necessárias e dotar o edifícios das condições de conforto necessárias por meio de sistemas mecânicos adicionais, ignorando a localização do edifício e o clima com instalações, na maioria das vezes, muito grandes. No entanto, como o preço da energia sofreu uma mudança substancial, torna-se importante considerar no desenho do edifício todas as estratégias para fazer com que o usuário necessite menos energia convencional para estar confortável no edifício, seja residencial ou não.

## Diferença entre conforto térmico e economia de energia

---

Ainda que sejam conceitos totalmente distintos, devem ser considerados simultaneamente no desenho de edifícios energeticamente conscientes, já que é possível obter edifícios com uma grande economia de energia quando não se instala nenhum sistema de aquecimento ou de refrigeração, utilizando os materiais convencionais de construção e deixando flutuar livremente a temperatura do edifício. Contudo, na grande maioria das vezes, como ocorre nos edifícios convencionais e dependendo da climatologia exterior, não se conseguem temperaturas interiores dentro dos níveis de conforto aos quais estamos acostumados, já que podem variar muito.

Por outro lado, como acontece na maioria das construções convencionais atualmente existentes, os níveis de conforto são conseguidos com um grande gasto de energia convencional, já que ninguém se preocupou (nem o arquiteto em seus desenhos, nem aquele que calculou as instalações, nem mesmo o usuário quando comprou o edifício) em saber qual seria o valor a pagar pela energia necessária ao longo do tempo para obter as temperaturas de conforto a que está acostumado. Destaca-se que a noção de conforto é muito relativa e, por isso, buscam-se níveis de conforto térmicos aceitáveis pela maioria, conforme será explicado de maneira mais detida em outro tema.

## Conclusões

Nesta introdução pretendeu-se dar uma visão global da magnitude do problema da utilização da energia convencional na edificação e como é possível contribuir com a economia de energia considerando o conforto térmico e, ao mesmo tempo, reduzindo os impactos ambientais aos quais contribuem as energias convencionais. Ademais, expôs-se brevemente como é possível contribuir com uma edificação consciente do ponto de vista energético. Uma explicação muito mais detalhada será feita ao longo dos distintos temas deste módulo.

**Os dados expostos a partir deste ponto correspondem ao hemisfério norte. Quando se encontre no hemisfério sul é preciso trocar o “Sul” pelo “Norte”, por exemplo, com relação à orientação das fachadas.**

## 2. Fundamentos para o condicionamento térmico de edifícios

### Introdução ao condicionamento térmico e ambiental

---

Todos os seres vivos geralmente precisam de um hábitat adequado para o desenvolvimento de suas funções vitais, sendo a adaptação ao meio uma das características determinantes de sua subsistência. Esta adaptação implica, além das diferentes trajetórias evolutivas de cada espécie, o desenvolvimento/aplicação de técnicas que possibilitem esta integração. O homem, por seu caráter homeotérmico, sua notável carência de proteções naturais e sua ampla contribuição geografia, necessita um espaço envolvente que lhe permita subsistir confortavelmente.

Qualquer edifício, da fase de desenho a de exploração para a qual foi concebido, deve prever, do ponto de vista energético e de conforto térmico, os efeitos do clima sobre a avaliação termodinâmica do sistema. Já que os elementos passivos são parte integrante da construção, quando não são a própria construção, é preciso considerar os dados climatológicos do princípio da concepção em todas as etapas do projeto.

### Ambiente climático

---

Devemos considerar os edifícios como sistemas termodinâmicos abertos, em situação permanente de desequilíbrio e de paredes adiabáticas, capazes de trocar massa/energia com o meio; seu estado termodinâmico a cada instante é resultado de sua resposta às variações externas/internas do seu meio. Esta situação leva à necessidade de conhecer e prever as flutuações significativas do meio para chegar ao entendimento, predição e/o simulação do estado termodinâmico do edifício. Nas seguintes subseções serão estudados os parâmetros físicos que determinam o ambiente de um edifício.

#### Radiação solar

Toda atividade atmosférica tem como fonte energética o Sol. Sua distinta distribuição sobre a superfície terrestre cria os gradientes necessários para mobilizar a atmosfera e provocar seus intercâmbios com o solo. A atmosfera, que reflete, absorve e transmite a radiação solar recebida, fará com que esta seja menor no solo (no edifício) do que a recebida em sua superfície exterior. Do mesmo modo, a radiação incidente sobre o “invólucro” do edifício é parcialmente refletida de novo

ao exterior, parcialmente transmitida ao interior através de vãos e janelas e parcialmente absorvida e transformada em energia térmica, contribuindo assim com o balanço energético do edifício.

A análise da interação radiação solar-edifício torna-se especialmente importante em desenhos que incorporam elementos solares passivos (estufas, paredes trombe, etc.) ou ativos (coletores solares) e no desenho em que a análise de sombras é relevante.

Saber qual é a radiação solar global sobre os distintos parâmetros do edifício é imprescindível. No entanto, não se dispõe de dados desta magnitude para qualquer parâmetro que se possa imaginar, de modo que se faz necessária uma estimativa a partir de outras magnitudes, como a radiação solar global e direta.

### Movimento solar

É necessário referenciar as posições relativas do Sol e da Terra; para simplificar adota-se o modelo planetário de Ptolomeu, isso é, supõe-se que o Sol descreve um movimento de aparente rotação em torno da Terra; isto equivale a introduzir algumas perturbações na velocidade de rotação da Terra.

Para qualquer ponto da superfície terrestre, o meio dia solar define-se como o instante de tempo em que o Sol passa pelo plano meridiano do lugar, e a hora solar como o tempo contado a partir deste.

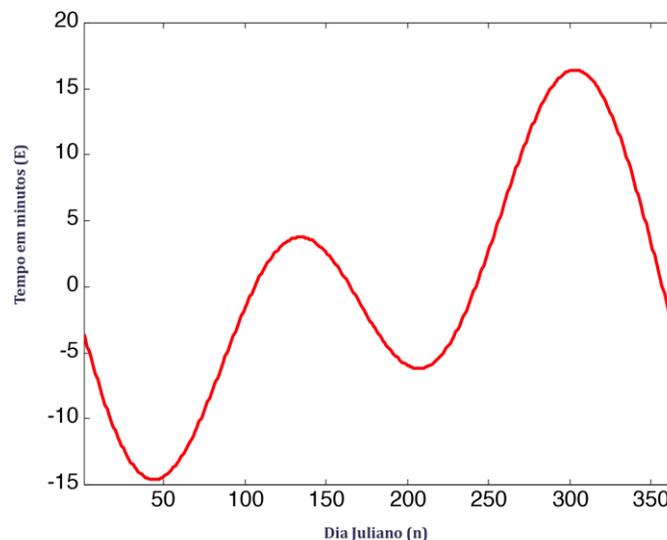


Figura 1. Equação do tempo em minutos (tempo em minutos (E)/dia juliano (n) (Fonte: CIEMAT)

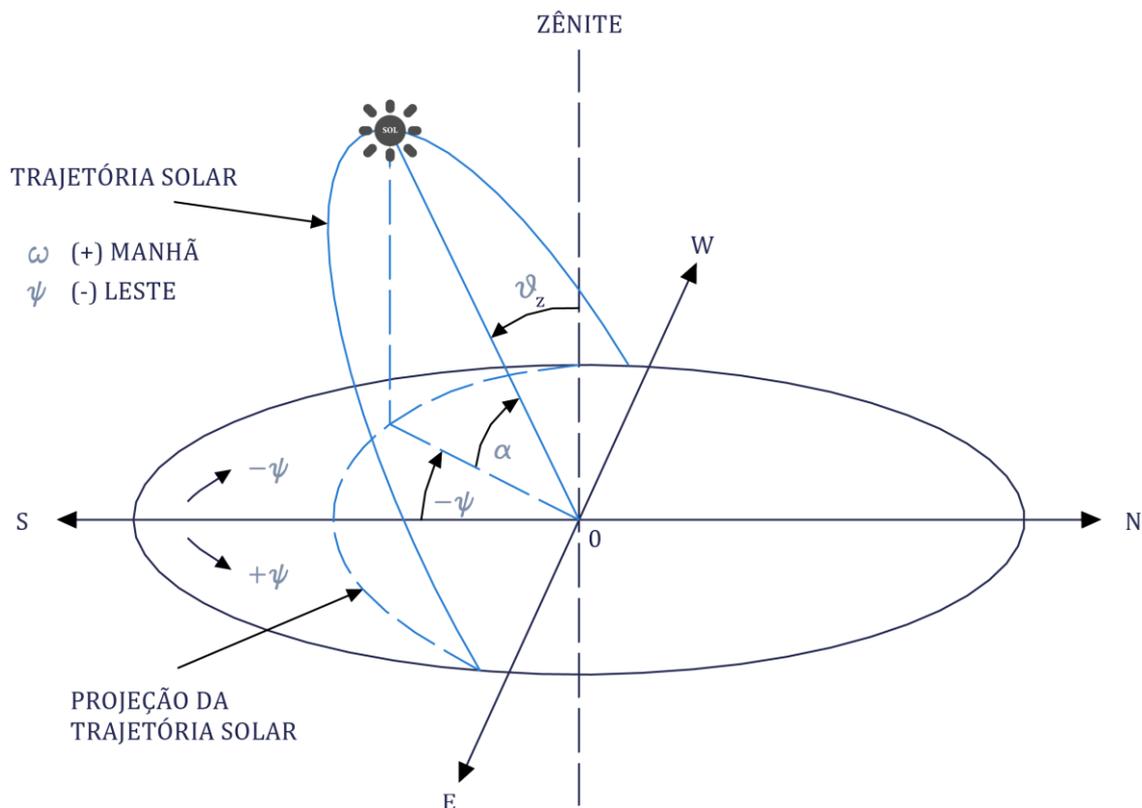


Figura 2. Ângulos zenitais e azimutais solares. (Fonte: CIEMAT)

A análise da posição relativa do Sol com relação a uma superfície qualquer ligada à Terra requer a escolha de um sistema de referencia; escolhemos um sistema inercial com origem no 'ponto  $p$ ' da superfície terrestre no qual se encontra o observador, definido pelos seguintes vetores:

$\mathbf{u}_r$  Vetor unitário segundo a normal à superfície da Terra em  $p$ .

$\mathbf{u}_\theta$  Vetor unitário tangente em  $p$  ao meridiano do lugar com o sentido de latitudes decrescentes.

$\mathbf{u}_\phi$  Vetor unitário tangente em  $p$  ao paralelo do lugar com orientação ao leste.

### Distribuição espectro-espacial da radiação

A radiação emitida pelo Sol em todas as direções é interceptada parcialmente pela Terra; considerando que nosso planeta está situada a uma distancia média do Sol de  $1.495 \times 10^{11}$  m., na qual se subtende um angulo solido de  $32'$ , seria possível afirmar que a intensidade que chega à

superfície exterior da atmosfera é praticamente constante. Denomina-se constante solar ( $I_{CS}$ ) à radiação solar sobre uma superfície plana normal ao vetor de posição do Sol localizada no limite superior da atmosfera terrestre. Esta constante tem um valor médio anual de 1372 W/m<sup>2</sup> que varia sazonalmente em  $\pm 3.3$  devido à excentricidade da órbita terrestre. Sua relação com o dia do ano dá-se pela seguinte equação:

$$I_{CS} = 1372 [1 + 0.033 \cos(2\pi n / 365.25)]$$

Sendo n o dia juliano.

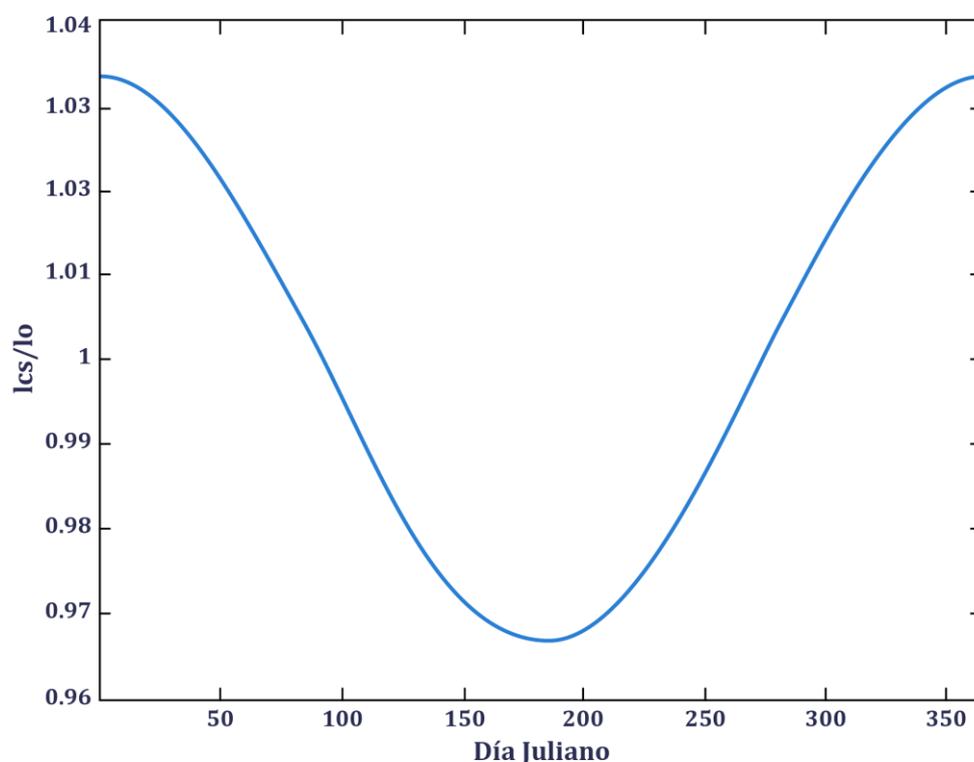


Figura 3. Variação da constante solar  $I_{cs}$  ao longo do ano. (Fonte: CIEMAT)

A radiação procedente do Sol está integrada por diferentes longitudes de onda. Desse modo, é útil saber, além de qual é a constante solar, qual é a distribuição espectral dessa. O espectro de radiação inclui **longitudes de onda** ( $\lambda$ ) que vão das 0.28 às 5 $\mu$ m.. Costuma-se dividir em três regiões ultravioleta ( $\lambda < 0.4 \mu$ m.), visível ( $0.4 < \lambda < 0.76 \mu$ m.) e infravermelho ( $\lambda > 0.76 \mu$ m.). É muito importante destacar que, ainda que o pico de maior intensidade de radiação corresponda à área visível (0.4  $\mu$ m.), a metade da energia solar emitida é radiação infravermelha.

Ao passar pela atmosfera, a radiação solar sofre diversos processos de atenuação e difusão como resultado de sua interação com os distintos componentes atmosféricos. Os efeitos mais apreciáveis

desta interação são a redução da energia radiante total disponível no solo com relação à disponível no limite superior da atmosfera e a modificação tanto das características espectrais, quanto das distribuição espacial da radiação.

No nível do solo podemos decompor a radiação solar em dois tipos ou componentes: radiação solar direta, a recebida do Sol sem sofrer nenhuma mudança de direção pela reflexão ou difusão, e radiação solar difusa, recebida do Sol depois de sofrer mudanças de direção ao atravessar a atmosfera.

No nível do solo podemos decompor a radiação solar em dois tipos ou componentes: radiação solar direta, a recebida do Sol sem sofrer nenhuma mudança de direção pela reflexão ou difusão, e radiação solar difusa, recebida do Sol depois de sofrer mudanças de direção ao atravessar a atmosfera.

### Irradiação solar sobre uma superfície arbitrária

Na irradiação solar global sobre uma superfície arbitrariamente orientada e inclinada podemos distinguir três tipos de componentes representados pelas seguintes magnitudes:

**Irradiação solar direta ( $I_b$ )**: irradiação solar sobre uma superfície plana normal ao vetor de posição do Sol, devida à componente direta da radiação solar.

**Irradiação solar difusa ( $I_d$ )**: irradiação solar sobre uma superfície plana horizontal devida à componente difusa da radiação solar.

**Irradiação solar global ( $I_g$ )**: irradiação solar sobre uma superfície plana horizontal devida às componentes direta e difusa da radiação solar. Está relacionada com as duas magnitudes anteriores através da equação:

$$I_g = I_b \cos\theta + I_d$$

Consideradas isotrópicas a irradiação difusa do céu e a irradiação difusa procedente do solo, a irradiação global sobre uma superfície plana define-se por:

$$I_T = I_b \cos\theta + \frac{1}{2} (1 + \cos\beta) I_d + \rho \frac{1}{2} (1 - \cos\beta) I_g$$

Na qual  $\rho$  é a **refletividade hemisférica** total do solo circundante e  $\beta$  é o **ângulo de inclinação da superfície com relação ao plano horizontal**. Do mesmo modo,  $\frac{1}{2} (1 + \cos\beta)$  e  $\frac{1}{2} (1 - \cos\beta)$  representam os fatores de visão superfície-céu e superfície-terra, respectivamente. Existem diversos modelos, mais complexos, que proporcionam uma estimativa mais exata da irradiação global sobre uma superfície qualquer considerando o caráter anisotrópico da irradiação difusa do céu (ex. Temps & Coulson, 1977; Klucher, 1979; Hay, 1985; Skartveit & Olseth, 1986; Gueymard, 1987; Pérez, 1983 e 1986).

## Radiação de onda larga

---

La radiación térmica es un proceso mediante el cual la energía calorífica pasa de un cuerpo a otro en A radiação térmica é um processo através do qual a energia calorífica passa de um corpo a outro em virtude da diferença de temperaturas existentes entre eles. Pode ser considerada energia eletromagnética e, como tal, propaga-se; no caso da radiação solar o comprimento da onda compreende-se no intervalo 0.28 – 5  $\mu\text{m}$ .

Neste tema enfoca-se especialmente o infravermelho térmico, radiação de longitude de onda entre 5 e 50  $\mu\text{m}$ . Esta energia radiante não se converte em energia calorífica até que não entre em contato com a superfície de um corpo. É, portanto, inevitável absorver parte desta energia. No entanto, o equilíbrio se reestabelece se consideramos que todo corpo cuja temperatura seja superior ao zero absoluto emite energia radiante, sendo esta uma função crescente de sua temperatura. Este balanço de energia radiante absorvida/emitada anula-se alcançando o equilíbrio térmico.

A radiação térmica emitida pelos corpos à temperatura próxima à ambiente se encontra quase totalmente contida dentro do infravermelho térmico (Lei de Stefan-Blotzman), sendo este o mecanismo de resfriamento da superfície terrestre. Com relação aos edifícios, os aportes radioativos de onda larga são menores do que os recebidos pela radiação solar, devido principalmente às temperaturas de emissão alcançadas nestes e às superfícies que os rodeiam. As perdas térmicas por radiação infravermelha são, geralmente, menos significativas do que as derivadas de mecanismos de condução e convecção. No entanto, estes intercâmbios não devem ser desconsiderados, principalmente em determinadas zonas áridas com céu limpo, nas que convenientemente utilizados constituem uma das mais importantes técnicas de refrigeração natural (resfriamento radiante).

## Estados psicrométrico da atmosfera

---

Nos contatos sólido-ar de um edifício podem ocorrer ocasionalmente fenômenos de condensação-  
evaporação do vapor de água atmosférico que representa uma transferência energética ar-edifício que as vezes pode não ser desprezível. Deveremos considerar que o transporte de massa nas interfaces ar-ar (vãos e janelas), com repercussões muito importantes no balanço energético do edifício, carrega consigo não apenas uma transferência de energia térmica interior-exterior, mas também uma transferência de vapor de água. Portanto, faz-se imprescindível a análise térmica ou energética do edifício, saber qual é o estado psicrométrico (temperatura e umidade) da atmosfera circundante.

### Composição do ar. Ar seco e ar úmido del aire.

O ar atmosférico contém grande quantidade de componentes gasosos e diferentes tipos de contaminantes, em condições normais poderíamos considerar que contém 75% de nitrogênio, 23% de oxigênio e o restante dióxido de carbono, argônio, etc., em proporções reduzidas; contém também uma determinada quantidade de vapor de água variável em função da localização

geografia. A quantidade máxima de vapor de água que contém 1m<sup>3</sup> de ar corresponde à saturação, que é função crescente da temperatura.

Quando falamos de ar seco nos referimos a uma atmosfera carente de vapor de água e de contaminantes; seu peso molecular aparente na escala do carbono 12 é 28.9645m e a constante dos gases deste ar é 287.055 J/Kg.K. O ar úmido é uma mistura de ar seco e vapor de água; o conteúdo de vapor de água varia de zero a um máximo dependente das condições de temperatura e pressão existentes (condição de saturação). O peso molecular da água é 18.01534 na escala do carbono 12, a constante dos gases para o vapor de água é 461,52 J/Kg.K.

#### Variáveis que definem o estado psicrométrico da atmosfera

A água pode ser encontrada de forma natural nos estados sólido, líquido e gasoso, dependendo das condições de temperatura e pressão. A **saturação** é um estado de equilíbrio entre os estados vapor-sólido ou vapor-líquido. A **pressão de saturação** do vapor de água no ar pode ser estimada, para uma interfase plana entre o ar úmido e a fase condensada, através da equação:

$$\ln(p_s) = -6353.6311 T^{-1} + 34.0493 - 0.01951 T + 1.2812 \cdot 10^{-5} T^2$$

Sendo **p<sub>s</sub>** a **pressão saturante** de vapor em Pa.

A proporção de vapor de água no ar atmosférico pode ser expressada mediante:

**Umidade absoluta (m<sub>v</sub>)** é a massa de vapor de água por unidade de volume de ar, costuma expressar-se em Kg/m<sup>3</sup>.

**Umidade específica (r)** é o conteúdo de vapor de água por unidade de massa de ar seco; expressa-se em Kg/Kg ou em g/kg conforme a equação:

$$r = m_v / m_a$$

Onde **m<sub>a</sub>** representa a massa de ar seco contida no mesmo volume que a massa de vapor **m<sub>v</sub>**.

**Umidade relativa (H<sub>r</sub>)**. A relação entre a quantidade de vapor contida no ar (m<sub>v</sub>) e a quantidade de vapor no ar saturado sob a mesma temperatura (massa de vapor saturado= m<sub>s</sub>) denomina-se umidade relativa ou estado higrométrico.

$$H_r = m_v / m_s$$

A temperaturas ordinárias, a pressão parcial do vapor de água no ar é tão pequena que em todas as aplicações práticas pode ser aceito, sem um grande erro, que se trata de um gás perfeito; por esta razão, a pressão parcial do vapor de água será proporcional à massa de vapor contida na unidade de volume, e a umidade relativa poderá ser expressada como o quociente entre a **pressão de vapor de água no ar (p<sub>v</sub>)** e a correspondente à saturação (p<sub>s</sub>), ambas sob a mesma temperatura:

$$H_r = p_v / p_s$$

Conhecida a umidade absoluta, a pressão parcial de vapor se calcula mediante a equação:

$$p_v V = m_v R T / M_v$$

Sendo  $m_v=18$  a massa molecular do vapor de água.

Fazendo o mesmo tratamento para o ar, considerando-o como uma mistura de gases perfeitos, a **pressão parcial de ar seco ( $p_a$ )** será:

$$p_a V = m_a R T / M_a$$

Onde  $m_a=28.96$  é a massa molar equivalente de ar.

Denomina-se **ponto de condensação ( $t_r$ )** a temperatura na qual o vapor de água se condensa quando o ar se resfria, mantendo constantes a pressão e a umidade absoluta. A temperatura de condensação é uma medida da umidade do ar. Nesta temperatura a pressão de saturação do vapor de água é a pressão parcial do vapor de água do ambiente.

A **temperatura de bulbo úmido** de uma massa de ar é a temperatura que esta massa alcançaria em contato com água líquida se, a uma pressão constante, mediante um processo isoentálpico, evaporássemos tanta água líquida quanto necessário para levar a massa de ar de referência à saturação

### Diagrama psicrométrico

Pode-se representar graficamente a relação entre as temperaturas de bulbo seco e úmido, umidade relativa e grau de umidade de misturas de ar e vapor de água sob uma pressão determinada (geralmente a 1 atm) nos chamados **diagramas psicrométricos**. Assim, um diagrama psicrométrico é uma representação gráfica das propriedades termodinâmicas do ar úmido, o que é especialmente útil em aplicações práticas. A escolha das coordenadas é arbitrária, em abscissas se representa a temperatura de bulbo seco e em ordenadas a umidade específica ou, alternativamente, a pressão parcial do vapor de água; as linhas verticais são, portanto, isotermas, e as horizontais são isolinhas de conteúdo de umidade ou de pressão parcial de vapor. Do mesmo modo, o diagrama contém linhas de entalpia constante e temperatura úmida (linhas retas de inclinação negativa) e linhas de umidade relativa constante (linhas curvas). Mollier foi o primeiro a utilizar diagramas deste tipo, com coordenadas de entalpia e umidade específica.

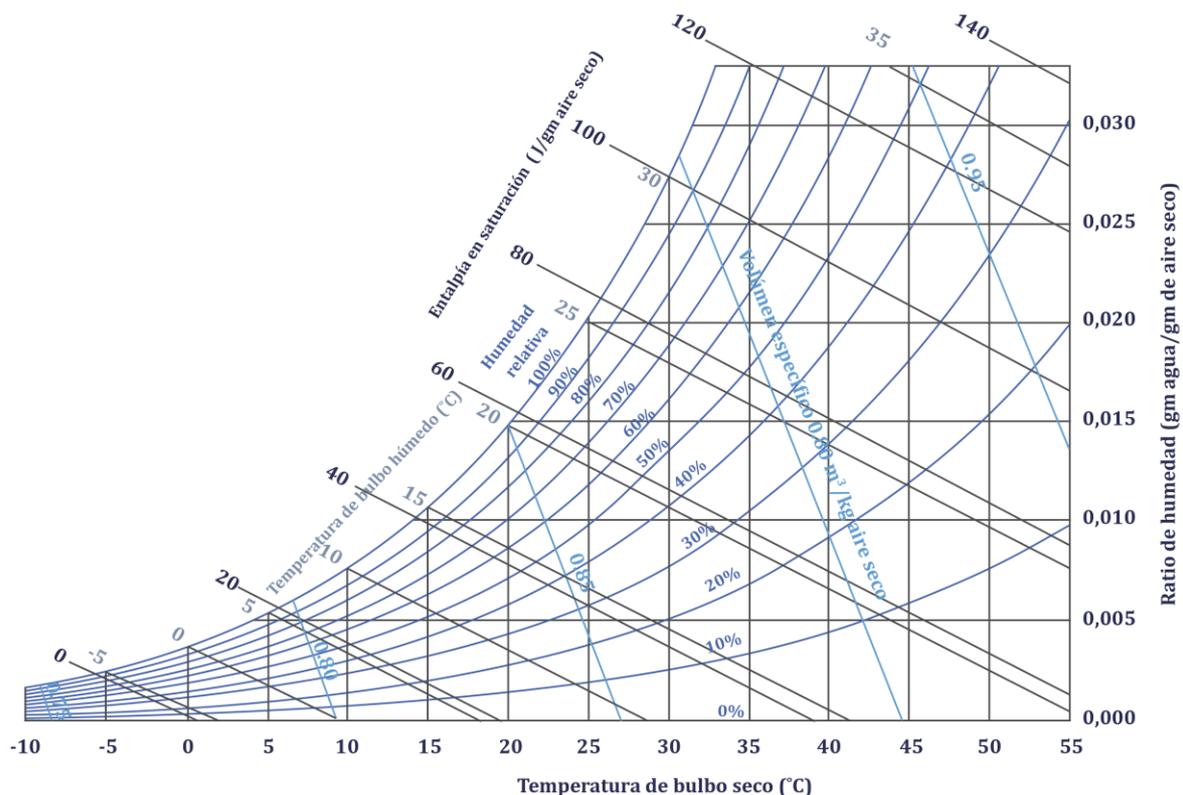


Figura 4. Diagrama psicrométrico a nível do mar.

Os usos mais comuns deste tipo de diagramas são:

- Determinação da umidade relativa e específica de uma massa de ar; conhecida sua temperatura de bulbo seco ( $t_s$ ) e úmido ( $t_h$ ), o estado higrométrico da massa de ar fica determinado pelo ponto de intersecção das isotermas  $t = t_s$  y  $t = t_h$ . A ordenada deste ponto define a umidade específica da massa de ar; a umidade relativa é definida pela linha de umidade relativa constante que passa pelo ponto.
- Determinação da umidade específica de uma massa de ar; conhecida sua temperatura de ponto de condensação, a ordenada do ponto de intersecção da isoterma  $t = t_r$  com a linha de saturação ( $H_r = 100\%$ ) é a que determina a umidade específica do ar.
- Determinação da umidade relativa de uma massa de ar que evolui à umidade específica constante.
- Determinação da temperatura seca e da umidade específica de uma massa de ar que evolui à umidade relativa constante.
- Determinação da quantidade de água evaporada ou condensada em um processo geral, etc.

Como exemplo, se temos um ar úmido com uma temperatura seca de  $20^\circ\text{C}$  e de bulbo úmido de  $15^\circ\text{C}$ , indica que a umidade relativa é de 60% e o volume específico da mistura é de  $0.873 \text{ m}^3/\text{Kg}$ ,

sendo a umidade específica de 0.08. O ponto de condensação se encontra (seguindo a horizontal até chegar à curva de saturação) a 12°C.

### Estado térmico do solo

Um dos intercâmbios energéticos entre o edifício e seu ambiente mais destacáveis é o produzido entre o edifício e o solo sobre o qual está assentado. A diferença de temperatura entre estes dois sistemas produz um gradiente térmico considerável.

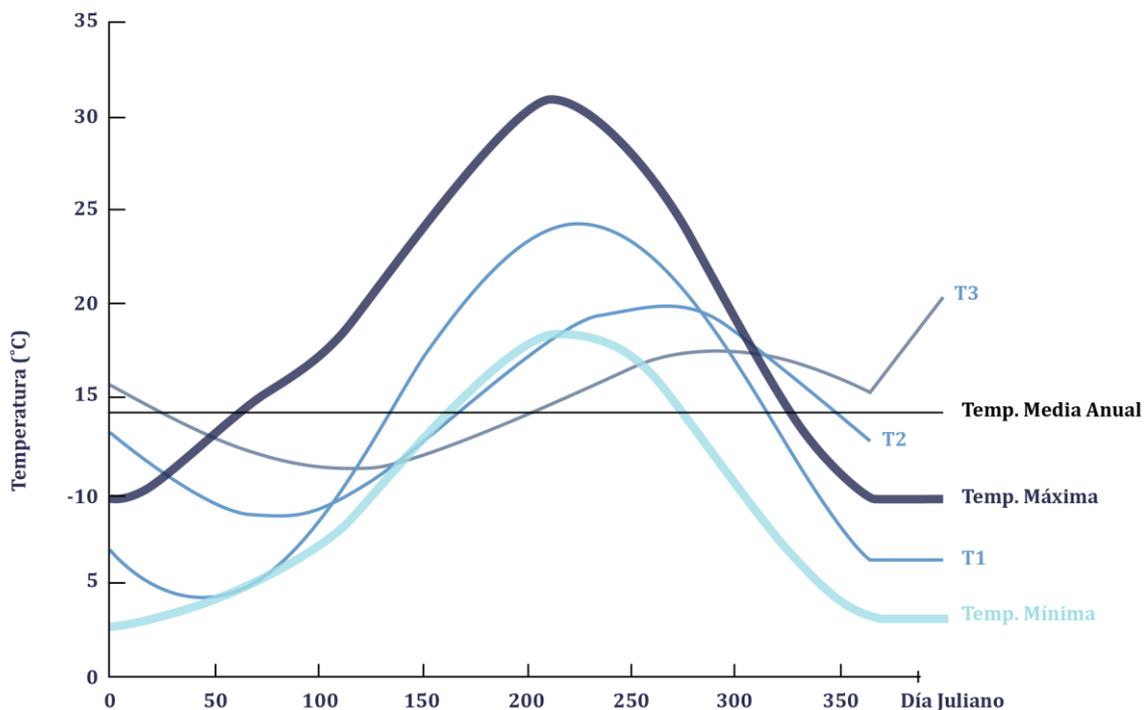


Figura 5. Exemplo de temperatura de solo para distintas profundidades (Fonte: CIEMAT)

A estimativa da denominada “*temperatura de solo*” não constitui um problema trivial. Sua determinação em solos homogêneos e contínuos é considerada um problema clássico dentro da teoria da condução do calor. Para sua solução devemos considerar o problema de um sólido semi-infinito com flutuações periódicas da temperatura superficial. Distintos pesquisadores durante as últimas décadas coletaram e analisaram dados de distintas localizações a fim de avaliar e detectar as deficiências da aplicação destes modelos teóricos.

Na figura anterior são representadas a temperatura média anual, máxima e mínima mensais (‘Tmax’ e ‘Tmin’) e temperatura do solo T1, T2 e T3 a uma profundidade 1, 2 e 3 m. da superfície para dados médios mensais.

## Vento

O vento é um elemento climático muito importante na arquitetura, além de sua incidência na estabilidade dos edifícios, deve-se considerar sua influencia no isolamento térmico e nas infiltrações. Os intercâmbios caloríficos nas paredes expostas ao vento são refletidos em um aumento dos coeficientes superficiais de transmissão de calor de paredes e coberturas. Sua repercussão é ainda maior em paredes pouco isoladas e especialmente nos aberturas envidraçadas.

O vento é gerado quando existe uma diferença de pressões entre dois pontos da superfície terrestre; é o resultado da ação de quatro forças: os gradientes de pressão atmosférica, a força centrífuga, a deflexão de Coriolis e as forças de atrito. A energia que o produz provém do Sol, seja diretamente (aquecimento da superfície terrestre), seja indiretamente (condensação do vapor de água). Caracteriza-se por sua velocidade e direção; a WMO definiu a velocidade do vento como um vetor tridimensional que apresenta espaço-temporalmente pequenas flutuações que sobrepõem um fluxo organizado a maior escala.

Como a componente vertical da velocidade do vento é relativamente reduzida quando comparada com os componentes horizontais, no campo em que nos movemos, geralmente, o vento pode ser considerado como um movimento exclusivamente horizontal (ainda que as vezes possam aparecer de forma local correntes oblíquas). Assim, no contexto do problema térmico, o vento é definido como uma magnitude vetorial bidimensional sobre um plano horizontal cuja direção se expressa em graus sexagesimais (azimute) contabilizados a partir do norte verdadeiro e seu módulo (também designado na prática como 'velocidade') em unidade do sistema internacional (m/s).

## Transferência energética em edifícios

Todos os fenômenos relacionados com o comportamento térmico dos edifícios são os mecanismos de transferência de calor. Estes fenômenos podem ser resumidos em quatro: condução, convecção, radiação e transferência de massa.

A seguir faremos um pequeno resumo dos mesmos. Para ampliar os conhecimentos relacionados com estes fenômenos existem livros de texto.

### Condução

Conhece-se como condução a transferência de energia de uma parte de um sólido a outra devido à diferença de temperatura existente entre ambas as partes. Isso é, se em um sólido dois pontos estão a diferente temperatura, entre estes pontos se estabelece um fluxo de energia do ponto com maior temperatura ao com menor. O valor deste fluxo dependerá também da diferença de temperaturas entre ambos pontos, das características do material: condutividade, densidade e capacidade calorífica.

Imaginemos uma parede em que um de seus lados está em contato com o interior do edifício, e oposto ao exterior.

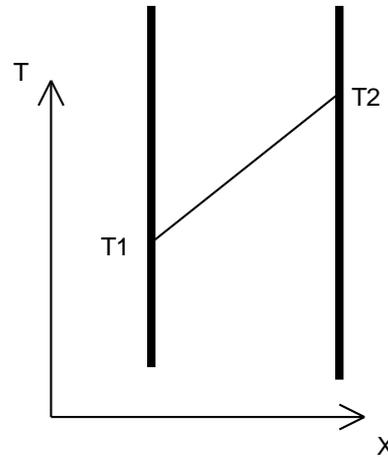


Figura 6. Transferência de energia em um sólido (Fonte: CIEMAT)

Então se estabelece um perfil de temperaturas que varia de um ponto a outro do sólido, produzindo-se uma cessão de energia (que se traduz em um aumento da temperatura da parte mais fria e um redução da mais quente) do foco quente ao frio.

Deve-se fazer uma precisão, as temperaturas T1 e T2 marcadas na figura anterior se referem a temperaturas superficiais da parede, não a do ambiente (ar).

Para um material K não é constante, mas varia com a temperatura. Assim, para a maioria de materiais e para a gama de temperaturas em que se move o edifício, bem como as condições meteorológicas, pode-se tomar K como uma constante sem cometer erros de consideração.

A relação matemática que liga o fluxo de energia com a diferença de temperaturas e os materiais é a seguinte:

$$q = K * (T_2 - T_1)$$

$$q = Mc \frac{dT}{dt}$$

Na qual M é a densidade do material, c a capacidade calorífica e K é a condutividade.

Portanto, há dois fenômenos relacionados com a condução: o armazenamento da energia e o gradiente de temperatura. Ambos dependem das características do material. Em seções posteriores veremos a influencia destes no controle térmico de espaços interiores.

### Convecção

O fluxo de energia estabelecido entre um sólido a temperatura  $T_0$  e o fluido em que está imerso a diferente temperatura  $T_1$  é o que se conhece como convecção, existindo um transvase de energia do elemento mais quente ao mais frio.

Geralmente, a temperatura do fluido é tida como independente do sólido, isso é, a temperatura do sólido variara dependendo da do fluido, não o contrario. Isto é certo quando o fluido tem uma massa infinitamente superior ao sólido (caso da atmosfera com relação ao edifício), mas não quando o fluido é estanco e sua massa é comparável ou menor do que a do sólido (caso do ar fechado em um quarto).

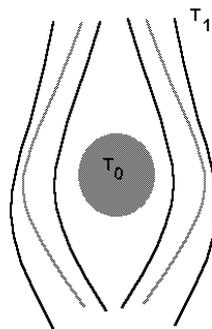


Figura 7. Transferência convectiva(Fonte: CIEMAT)

Assim, temos dois tratamentos muito diferentes da convecção em edifícios: a exterior e a interior. O primeiro somente afeta a temperatura da parede e o segundo modifica tanto a temperatura da parede, quanto a do ar do quarto.

A relação matemática é a seguinte:

$$q = h_c * (T_0 - T_1)$$

Na qual  $h_c$  é a o coeficiente de convecção que depende da velocidade do fluido com relação ao sólido, da rugosidade do sólido, das temperaturas de ambos, etc.

Assim como para a condutividade, densidade e capacidades caloríficas dos materiais existem excelentes valores, para os coeficientes de convecção não há valores fiáveis, já que dependem muito das condições de contorno de cada momento. Por outro lado, a medida experimental dos mesmos (e talvez nisto está seu desconhecimento) é muito difícil, devendo ser realizada sempre em condições de laboratório e sendo muito complicado extrapolar os resultados obtidos a condições reais.

### Radiação

Este fenômeno de transferência de energia não requer uma conexão material entre os elementos que intervêm para que seja produzido. Entre dois corpos pelo simples fato de estarem a temperaturas diferentes, estabelece-se um fluxo de energia do quente ao frio proporcional à diferença de temperaturas a quarta potência, isso é:

$$q = \varepsilon \sigma F (T_0^4 - T_1^4)$$

No qual  $\varepsilon$  é a emissividade do material,  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzman e  $F$  é o fator de forma, que tende um objeto com relação ao outro.

Este fenômeno pode ser determinante na consecução do conforto térmico em interiores, pois sua magnitude pode ser muito grande devido à dependência funcional com a temperatura. Desse modo, o controle sobre a temperatura interior das paredes é crucial tanto no inverno quanto no verão.

### Transferência de massa

Este é o fenômeno no qual estão contidos os fenômenos de ventilação, infiltração e comunicação entre peças produzidos no edifício e é o fluxo energético que se produz quando se misturam duas ou mais massas de ar a diferente temperatura. O complicado deste tema não é calcular a temperatura resultante da mistura, mas determinar com exatidão os diferentes volumes de ar que conformam a mistura.

Devido à complexidade matemática das relações existentes na literatura para a determinação da transferência de massa, sua resolução quase sempre é realizada de forma numérica através de computadores, porque na maioria dos casos estas equações não admitem uma solução analítica.

### Balço energético de um edifício

Para conseguir um melhor rendimento energético nas arquiteturas passivas, é fundamental reduzir, na medida do possível, tanto as perdas caloríficas no inverno, quanto os aportes indesejados no verão. Ademais, para manter uma situação de conforto térmico, devemos considerar uma série de fatores que influenciam de maneira relevante na consecução deste fim; como o intercambio térmico em um edifício depende fundamentalmente da diferença de temperaturas entre interior e exterior e as mudanças de estado psicrométrico são função também desta diferença, através de infiltrações, podemos considerar o conjunto de parâmetros meteorológicos como fatores extrínsecos ao edifício. Dentre estes fatores pode-se incluir também o grau de ventilação. Por outro lado, o comportamento dos edifícios diante das condições externas varia muito em função de suas características e geometrias, no que poderíamos denominar fatores intrínsecos. Para quantificar o rendimento energético do edifício, falaremos a partir de agora de nível de perdas, englobando neste termo tanto as perdas energéticas (calor) propriamente ditas, quanto os ganhos térmicos indesejados.

O fluxo global de perdas de uma zona é a soma de todos os fluxos de perdas através de todos os elementos desta zona. Existem principalmente quatro elementos fontes de perdas em um edifício: paredes opacas, janelas e porta, ventilação e singularidades.

### Las paredes y otros componentes planos

As paredes são componentes planos nos quais supõe-se que os fluxos de calor são perpendiculares às superfícies; em regime estático, o fluxo de calor que atravessa uma parede,  $\phi$ , é função da espessura de cada camada homogênea,  $e_i$ , e da condutividade do respectivo material,  $\lambda_i$ , bem como do valor dos coeficientes de intercambio superficiais de cada lado da parede  $h_i$  y  $h_e$ . Este fluxo também é proporcional à diferença de temperatura ( $T_i - T_e$ ) entre ambas zonas separadas pela parede:

$$\Phi_{i \rightarrow e} = KS(T_i - T_e)$$

Onde K é o coeficiente de transmissão de calor da parede que se avalia segundo:

$$1/K = 1/h_i + e_1/\lambda_1 + \dots + 1/h_e$$

A condutividade térmica de um material caracteriza sua capacidade para conduzir o calor; os metais são muito condutores com valores contidos no intervalo 10-100, os materiais de construção comuns (tijolos, concreto...) são razoavelmente condutores e possuem condutividades entre 0.1-10, enquanto os isolantes estão na gama 0.01-0.1. O valor de uma determinada propriedade termofísica varia muito dentro de uma mesma classe de material (ver Tabela 1).

MATERIAL	Condutividade (W/m K)	Densidade (Kg/m3)	Capacidade Caloríf. (J/Kg K)
<b>Concreto</b>	.35-1.75	1000-2400	880-920
<b>Gesso</b>	.25-.35	500-1000	800
<b>Tijolos</b>	1.15	1800-2000	800-1000
<b>Vidro</b>	.8-1.35	2210-3100	720-870
<b>Isolantes</b>	.01-.1	40-300	800-1400

Tabela 1: propriedades termofísicas de materiais diferentes

Os intercâmbios de ar por infiltrações ou ventilação são avaliados para saber qual é a vazão média de renovação do ar; se não se dispõe de outra informação, é normal tomar valores convencionais (entre 5-1-5 volumes habitáveis por hora, p.e.). O nível de perdas pode ser avaliado através da seguinte expressão:

$$\Phi_{i \rightarrow e} = C_a V_r (T_i - T_e)$$

Onde  $C_a$  é o calor específico do ar e é  $V_r$  o volume de ar renovado em m<sup>3</sup>/h.

As singularidades são determinadas pelas características tridimensionais que o fenômeno da condução térmica possui, bem como pelo contato térmico entre edifício e solo, fato que pode repercutir de maneira notável no comportamento térmico do edifício. Existem tabelas que proporcionam valores utilizáveis, se não existe informação melhor, para o primeiro tipo de singularidades; para o caso do contato com o solo, ainda que também existam fatores corretivos, estes não contemplam a contribuição dinâmica deste contato, fator de primeira importância.

Podemos avaliar o nível de perdas de um edifício através do coeficiente volumétrico de transmissão de calor,  $G$ , que sintetiza os fatores intrínsecos como: superfície de intercâmbio com o exterior, resistência térmica de superfícies opacas e transparentes e grau de renovação. Assim, as perdas de um edifício podem ser expressadas sinteticamente como:

$$\Phi = GV(T_i - T_e)$$

Onde  $G$  é deduzido considerando as contribuições de paredes e superfícies transparentes, conforme a equação correspondente, e a contribuição por infiltrações; retirando o fator comum  $(T_i - T_e)$ , dividindo por  $V$  e identificando:

$$G = \frac{\sum S_o K_o}{V} + \frac{\sum S_v K_v}{V} + C_a \frac{V_r}{V}$$

Expressão que não considera a capacidade térmica do edifício, os possíveis ganhos solares ou os ganhos internos, dentre outros.

Existem métodos de cálculo aproximado para avaliar os níveis de perdas em um edifício como o denominado Graus-dia (aplicável na avaliação de perdas no período de aquecimento. A partir de uma temperatura de base avalia os Graus-dia de aquecimento necessários).

Assim, devemos indicar três ações básicas dirigidas a reduzir o nível de perdas de um edifício:

- Otimização da superfície envidraçada (em função de sua orientação)
- Redução das pontes térmicas em paredes.

- Ventilação racional do edifício.

### Ganho solar

O ganho solar de um edifício resulta da soma dos ganhos solares de todos os elementos que o compõem, corrigido para considerar a capacidade do edifício de conservar essa energia. Os elementos de fechamento exteriores são propriamente coletores de radiação solar, através dos quais é possível conseguir os ganhos de calor por radiação. Atualmente são utilizados distintos procedimentos passivos que aproveitam a conversão fototérmica da energia solar; basicamente dois são os mecanismos principais de captação da energia solar em edifícios comuns:

- A radiação solar é absorvida pelas superfícies opacas exteriores, transformada em energia térmica e, uma parte desta energia, transmitida ao interior e outra parte remetida ao exterior.
- Radiação transmitida através de superfícies com vidro (efeito estufa), absorvida pelas superfícies interiores das paredes; a contribuição desta energia varia em função de que as paredes consideradas sejam interiores ou exteriores.

### A inércia térmica

A inércia térmica de um edifício representa a capacidade do mesmo para armazenar e devolver energia calorífica; esta característica depende das propriedades condutivas e capacidades dos materiais constitutivos e de suas quantidades e distribuição, além da natureza da excitação considerada.

Conforme analisado anteriormente, o fechamento de um edifício modifica o fluxo de calor entre o exterior e o interior do mesmo em função das características termofísicas dos materiais de que esteja composto. As principais características termofísicas que condicionam a evolução térmica do edifício são a resistência térmica e a capacidade térmica.

A capacidade térmica em um elemento de parâmetro homogêneo pode ser expressada como:

$$C = m c_i = (V \rho) c_i = S (e \rho) c_i$$

Na qual **C** representa o calor armazenado pelo grau de diferença de temperatura, **m** é a massa, **c<sub>i</sub>** calor específico do elemento considerado, **V** volume, **ρ** densidade, **S** superfície e **e** espessura. No caso de elementos heterogêneos, considera-se a contribuição de cada elemento em forma de soma ponderada.

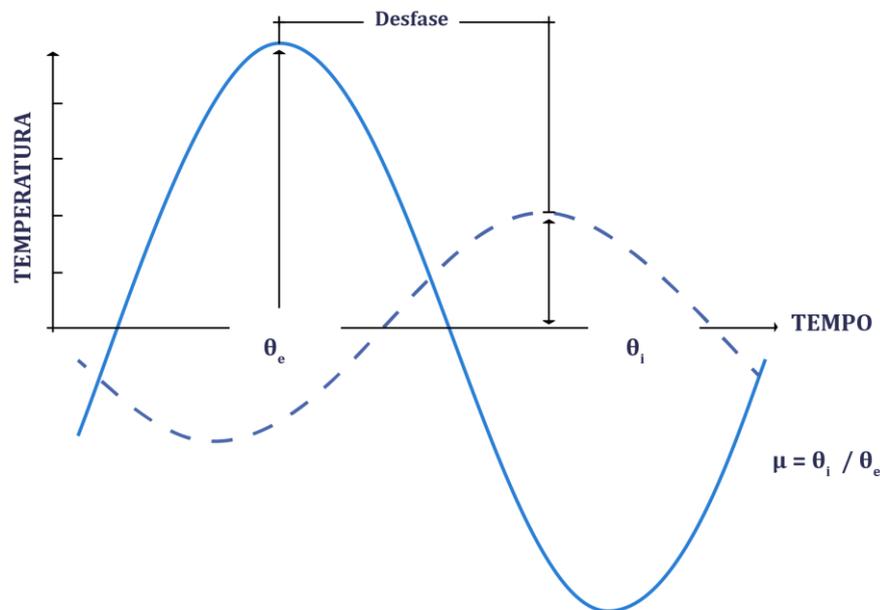


Figura 8. Desfase/amortização através de uma parede de onda térmica (Fonte: CIEMAT)

Em regime dinâmico, p.e. uma situação real de evolução livre, uma parede está submetida a oscilações periódicas da temperatura exterior e radiação solar, e como resultado as temperaturas interiores seguem um comportamento que é reflexo das exteriores, modificadas pelas características térmicas da parede; em um caso ideal no qual a parede esteja submetida a uma excitação de tipo periódica sinusoidal, a resposta, transcorrido um intervalo temporal suficiente, segue uma evolução periódica de tipo sinusoidal, amortizada e desfasada.

No caso de uma excitação sinusoidal de temperatura, a amplitude da onda na cara interna da parede é menor do que a existente em sua externa, reduzindo assim seu máximo e mínimo. O cociente entre a amplitude da onda interna  $\theta_i$  e a externa  $\theta_e$  de temperatura serve para medir a amortização  $\mu$ :

$$\mu = \theta_i / \theta_e$$

Existem, no entanto, expressões que permitem um calculo aproximado da amortização e intervalo de uma parede homogênea conhecidas a difusividade do material  $\sigma = C_p \lambda / \rho$ , a espessura da parede,  $e$ , e o período,  $T$ ; neste caso supomos que o calor se transmite somente em direção normal à parede, desconsiderando-se os efeitos da borda. Nestas condições:

$$\mu = \exp\left(-e\sqrt{\frac{\pi}{\alpha T}}\right) \quad \Delta = \frac{e}{2} \sqrt{\frac{T}{\alpha\pi}}$$

A relação entre a onda térmica superficial e a onda interior depende do período,  $T$ , de modo que uma parede, com umas características determinadas, pode amortizar uma onda cujo período seja  $T=24h$ . e, sem embargo, fazê-lo com outra de período  $T=8760h$ .

Na seguinte figura é possível apreciar a diferença na dinâmica de recuperação de um aporte solar segundo o nível de inércia de uma parede; neste caso, a inércia depende muito da posição relativa do isolante diante da excitação. Quando a absorção é realizada na cara interior e o isolante está situado na cara exterior, o material com capacidade térmica armazena facilmente a energia e a devolve lentamente ao interior, porque o isolante impede que seja feito ao exterior (dificuldade de sobreaquecimento); por outro lado, se é o isolante que recebe a excitação, a possibilidade de armazenar esta energia é escassa e a energia armazenada é devolvida ao ar ambiente (possibilidade de sobreaquecimento). Definitivamente, quanto maior for a inércia, maior será a capacidade de recuperação de um aporte solar devido a que existem poucos sobreaquecimentos.

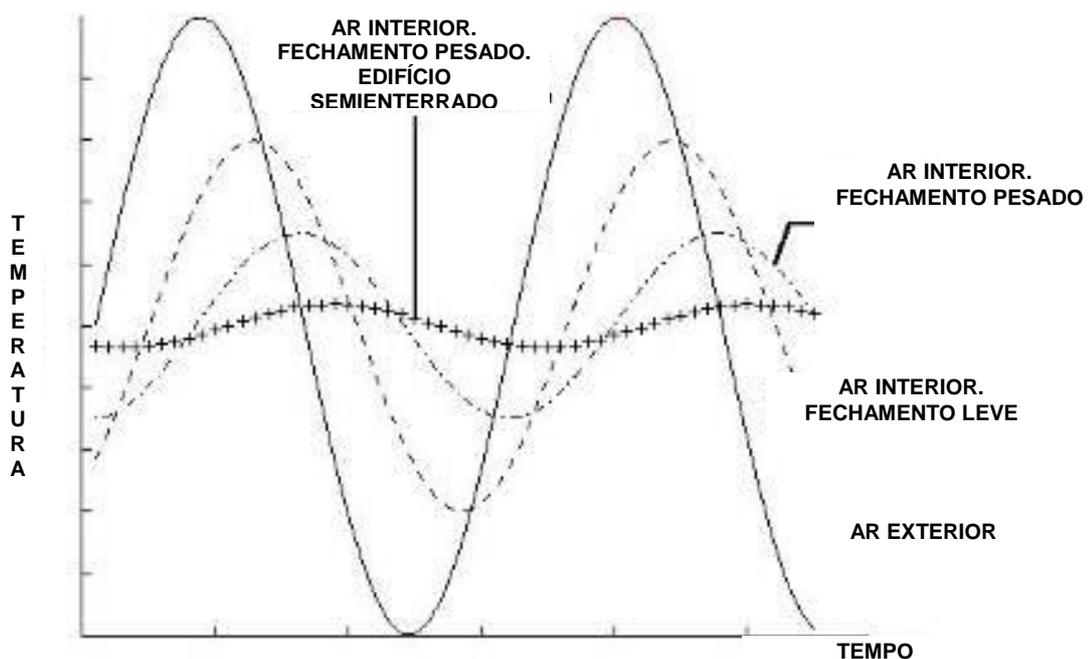


Figura 9. Efeito comparativo de distintas características inerciais (Fonte: CIEMAT)

## Conforto térmico

Colocando uma série de indivíduos nas mesmas condições térmicas, encontraremos diferenças de parecer sobre o estado de idoneidade da temperatura e umidade, ainda que haja uma maioria que opine do mesmo modo. Assim, é necessário abandonar posições deterministas com relação a definição do estado ideal de conforto e passar a abordar as faixas de conforto e porcentagens de indivíduos que estão no estado de conforto em determinadas condições.

Existe, portanto, um importante componente no estado de conforto que depende não apenas das condições térmicas, mas também do indivíduo e de seu estado. Tentar parametrizar as condições anímicas é uma tarefa impossível, mas é possível estudar as características físicas que afetam o conforto térmico.

O estado de conforto térmico se define como o valor nulo do balanço energético estabelecido entre o corpo humano e as condições exteriores que o rodeiam. Isso é, quando a quantidade de energia produzida pelo corpo humano é igual a soma dos fluxos de energia estabelecidos entre a pessoa e o exterior. Portanto, poder-se-ia definir como uma sensação neutra dos sentidos com relação às condições ambientais que o rodeiam.

	W/m <sup>2</sup>	met
<b>Descanso</b>		
Dormindo	40	0.7
Deitado	45	0.8
Sentado, quieto	60	1.0
De pé, relaxado	70	1.2
<b>Caminhando</b>		
3.2 km/h	115	2.0
4.3 km/h	150	2.6
6.4 km/h	220	3.8
<b>atividades de escritório</b>		
Lendo, sentado	55	1.0
escrevendo	60	1.0
datilografia	65	1.1
Arquivando, sentou	70	1.2
Arquivando, de pé	80	1.4
andando ao redor	100	1.7
Levantamento/ empacotando	120	2.1
<b>Driving/ Vôo</b>		
carro	60-115	1.2-2.0
Aeronave, rotina	70	1.2
Aeronave, aterrissagem de instrumento	105	1.8
Aeronave, combate	140	2.4
Veículo pesado	185	3.2
<b>Miscellaneous Atividades ocupacionais</b>		
cozinhando	95-115	1.6-2.0
tarefas domésticas	115-200	2.0-3.4
Sentado, movimentos pesados dos membros	235	4
Trabalho de máquina	235	4
Trabalho de máquina ligeira	235-280	4.0-4.8
Trabalho de máquina pesada		
<b>Miscellaneous Lazer e Entretenimento</b>		
Dança, social	140-255	2.4-4.4
Basquete	290-440	5.0-7.6

**Tabela 2: Valores da razão metabólica e eficiência mecânica**

Os seres humanos tendem a manter sua temperatura entre 36.5 e 37°C. O processo metabólico dos seres humanos produz um fluxo de energia que varia fundamentalmente devido à atividade, esta

energia deve ser eliminada conforme é produzida, porque quando é produzida a um ritmo maior do que eliminada, sente-se calor e, no caso contrário, a sensação térmica é de frio.

### Transferência energética no conforto térmico

A sensação de conforto térmico é produzida devido ao balanço energético entre o corpo humano e o meio que o envolve. Portanto, para fazer um estudo rigoroso do conforto será necessário analisar este balanço. É diferente a sensação de conforto do balanço neutro de energia, já que o corpo atua para igualar a zero este balanço. Se a atuação destes mecanismos é desmensurada (suor excessivo ou respiração), produz-se um estado de desconforto térmico.

Este balanço será o resultado da diferença entre os fluxos de energia que entram no corpo humano, menos os que saem do mesmo. Se o resultado desta diferença é positivo, significará que entra mais energia do que a que sai, de modo que a sensação será de calor, enquanto que se acontece o contrário, a sensação será de frio.

É evidente que uma situação de balanço energético distinto de zero não pode ocorrer de forma contínua no tempo, já que isto significa uma aumento (ou redução) da temperatura do corpo progressiva que nos levaria à morte. Assim, os seres vivos têm uma série de mecanismos de regulação térmica que serão detalhados em seguida.

Dentre os mecanismos de transferência energética podemos fazer uma distinção básica: os comuns a toda matéria (radiação, convecção e transmissão) e os próprios dos seres vivos (produção metabólica, sudoração e respiração).

### Sudoração

Um dos mecanismos próprios dos seres vivos é a eliminação de água, com a subsequente evaporação. Mediante este processo são eliminados 2.5 MJ por cada Kg. de água evaporada. Na sudoração existem dois processos: o primeiro é a difusão de água através da pele ( $H_D$ ) e o segundo a evaporação ( $H_{se}$ ). Portanto, o processo completo ( $H_e$ ) se expressará como:

$$H_e = H_D + H_{se}$$

sendo:

$$H_D = 0.32A_N(R_1\theta_s + R_2 - P_a)$$

com

$$R_1 = 4.066 \text{ mb}/^\circ\text{C y}$$

$$R_2 = -84.2 \text{ mb.}$$

$P_a$  é a pressão ambiente e  $H_{se} = 0.42A_N(H_M/A_N - 58)$

Este mecanismo, junto com a respiração, conforma a termo-regulação do corpo.

## Respiração

O segundo processo próprio dos seres vivos é a respiração. Como no caso anterior, existem dois sub-processos distintos: o primeiro se deve à perda de calor latente devido à diferença de concentração no vapor d'água entre o ar ambiente e o que é expulsado do interior do corpo humano. O segundo se deve ao intercâmbio de ar a diferente temperatura.

No primeiro caso:

$$H_{lr} = 1.7 \times 10^{-3} H_M (59 - P_a)$$

E no segundo:

$$H_{ld} = 1.4 \times 10^{-3} H_M (34 - \theta_a)$$

## Condução

É a transferência energética produzida da pele à superfície exterior da roupa. Evidentemente, depende da resistência térmica da roupa, que se caracteriza através do parâmetro  $I_{cl}$ , cujos valores dão-se conjuntamente com os de  $F_{cl}$ , na Tabela 2.

Tipo	Descrição	$I_{cl}$	$F_{cl}$
1	Nu	0	1.0
2	Calça curta	0.1	1.0
3	Calça curta e camiseta	0.3-0.4	1.05
4	Idem 3 com roupa interior leve	0.35	1.05
5	Calça comprida leve e camiseta	0.5	1.1
6	Moletom + roupa de esporte	0.6	1.1
7	Idem 5 com camisa	0.7	1.1
8	Terno com roupa interior leve	1.0	1.15
9	Idem 8 + capa de chuva	1.5	1.15
10	Terno com roupa interior pesada	1.5	1.15-1.2
11	Idem 10 + casaco e chapéu	1.5-2	1.3-1.4
12	Vestimenta polar	3-4	1.5

Tabela 3: Valores de coeficientes que influenciam na condução para diferentes tipos de vestimenta

## Convecção

A convecção é o segundo mecanismo de transferência energética comum a toda a matéria.

Quando um corpo está submerso em um fluido, a diferentes temperaturas, estabelece-se um intercambio energético entre o corpo e o fluido. O fluxo será no sentido de maior a menor temperatura, isso é, se o corpo está mais quente, cederá ao fluido e vice-versa. A relação matemática que rege este processo é:

$$H_c = A_N F_{cl} h_c (\theta_{cl} - \theta_a)$$

Onde  $\theta_a$  é a temperatura ambiente e  $\theta_{cl}$  é a temperatura da roupa, ambas em °C. O parâmetro  $h_c$  é o coeficiente de convecção, que depende da velocidade do vento, quando esta é maior que 0.1 m/s:

$$h_c = 2.38 (\theta_{cl} - \theta_a) \quad \text{para } v < 0.1$$

$$h_c = 12.1 \sqrt{v} \quad \text{para } v > 0.1$$

## Radiação

É especialmente importante se existem focos de alta temperatura (fogo em chaminés, exposição direta à radiação solar...), já que a quantidade de energia transferida é proporcional à diferença entre as potencias quartas das duas temperaturas. Chamando  $H_r$  a quantidade de energia transferida por radiação, esta se expressa como:

$$H_r = F_{ef} F_{cl} A_N \varepsilon \sigma (T_{cl}^4 - T_{mrt}^4)$$

Sendo  $F_{ef} = 0.696$  para atividades sedentárias e  $F_{ef} = 0.725$  em outros casos.  $F_{cl}$  é um fator que depende da vestimenta. Na tabela II é apresentada uma série de valores para este parâmetros, conjuntamente com o de condutividade da vestimenta ( $I_{cl}$ ). é a emissividade do corpo humano que pode tomar-se como 1, e  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzman.  $T_{cl}$ , é a temperatura superficial da roupa expressada em graus kelvin e  $T_{mrt}$  é a temperatura média radiante expressada nas mesmas unidades.

[Estimação de conforto térmico global. Pmv e ppd.](#)

Um dos índices mais utilizados é o PMV (Predicted Mean Vote) de Fanger, no qual se define uma escala de -3 a 3 conforme os graus mostrados na tabela 4

Frio	Fresco	Pouco fresco	Neutro	Pouco caloroso	Caloroso	Calor
-3	-2	-1	0	1	2	3

Tabela 4: Níveis de conforto conforme o PMV de Fanger

A equação que situa este parâmetro nas ordens referidas é:

$$PMV = \{ 0.3521^{-0.042\tau} + 0.032 \} [\tau(1-\eta) - 0.32 \{ R_1 \{ 35.7 - 0.0275\tau (1-\eta) \} + R_2 - P_a \} - 0.42\{\tau(1-\eta) - 58 \} - 1.4 \times 10^{-3}\tau (35 - \theta_a) - 0.0017 \eta(44-P_a) - 0.71\sigma F_{cl} \{ T_{cl}^4 - T_{mrt}^4 \} - F_{cl} h_c (\theta_{cl} - \theta_a)]$$

sendo:

$\tau = H_M/A_N$  = razón de generación metabólica/área del cuerpo humano.

$\eta = W/H_M$  = trabajo consumido/ $H_M$  (eficiencia mecánica externa).

Como vemos nesta equação, os parâmetros ambientais dos quais depende o conforto térmico são a velocidade do vento, a temperatura ambiente, a umidade e a temperatura media radiante. Todos os demais valores dependem do individuo (como sua vestimenta) e da atividade que esteja desenvolvendo.

O parâmetro PPD (porcentagem prevista de desconforto) calcula-se com base nos valores obtidos de PMV através da relação:

$$PPD = 100 - 0.5 * \exp\{- (0.335 * PMV^4 + 0.218 * PMV^2)\}$$

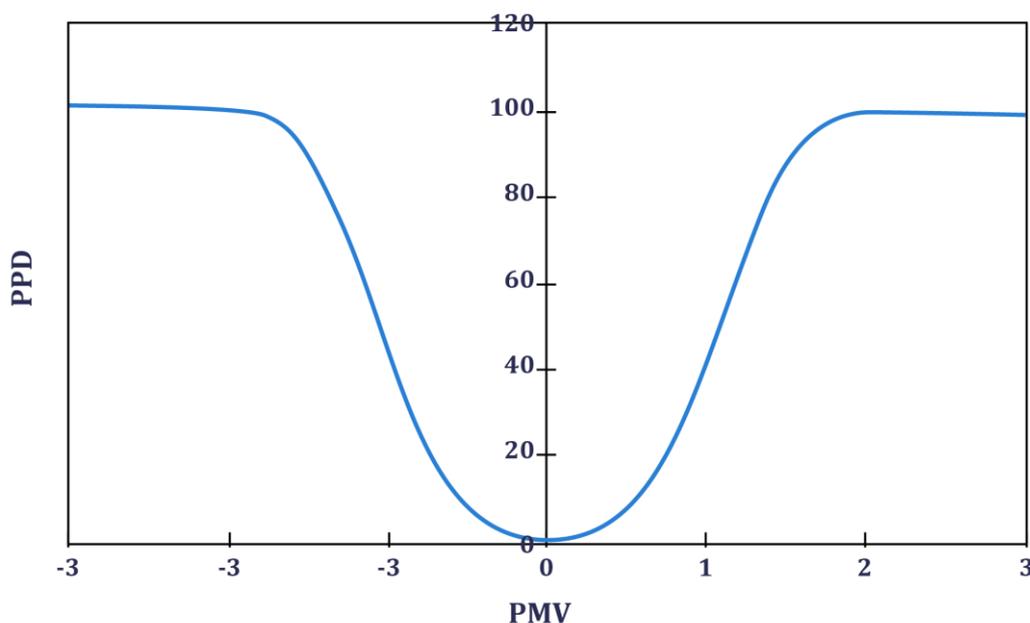


Figura 10. Evolução do PPD segundo o valor do PMV (Fonte: CIEMAT)

Esta relação se ajusta melhor do que o PMV, fazendo uma estimativa mais realista do grau de conforto. Estima a porcentagem de indivíduos que estaria fora das condições de conforto por um valor dado do PMV.

## Carta bioclimática.

Como resumo do que se acaba de expor, Givoni sintetiza todos os resultados em uma única carta bioclimática que, dependendo basicamente da temperatura e umidade exteriores, próprias da climatologia na área, dirige o desenho do edifício a fim de potencializar uma ou outra técnica passiva. Na seguinte figura apresenta-se esta carta.

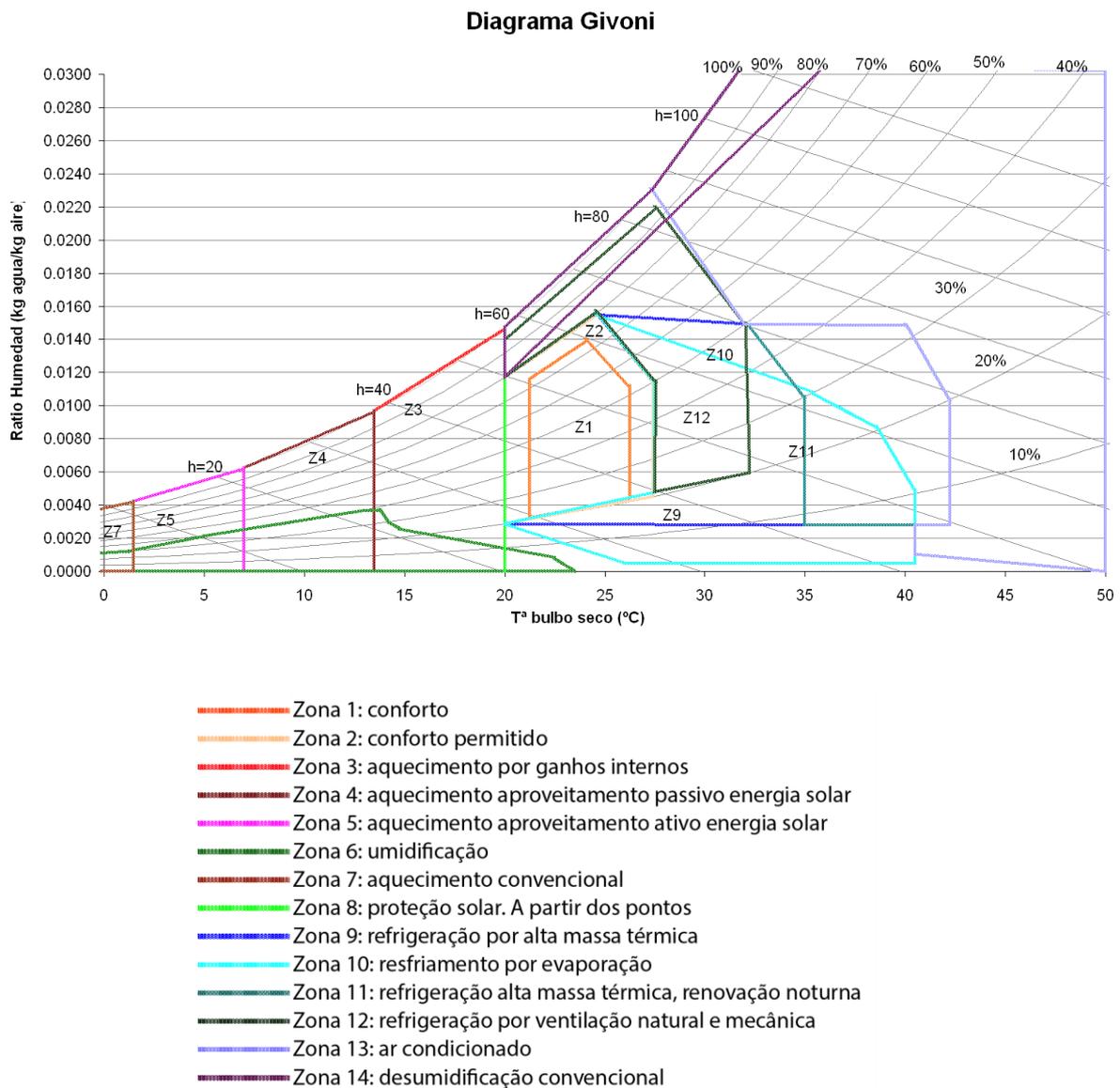


Figura 11. Carta Bioclimática de Givoni.

A numeração que corresponde a cada uma das áreas marcadas tem o seguinte significado:

**1 e 2.** Aumentar o isolamento, isso é, controlar os fluxos condutivos, evitar infiltrações, aumentar o ganho e minimizar os intercâmbios de ar (boa qualidade construtiva).

**3 e 15** Restringir os ganhos solares (sombreamento).

**6 e 8** Aumentar a ventilação natural. **8, 10 y 11** Procurar resfriamento evaporativo.

**7 y 10** Procurar resfriamento radioativo. **12 y 13** Restringir os fluxos condutivos.

## Conclusões

Neste capítulo foram repassados os fundamentos e conceitos básicos do condicionamento térmico de edifícios. Para um correto condicionamento, o desenho dos edifício deve ser adaptativo ao meio circundante, de modo que deve-se ter em conta os principais condicionantes e variáveis que influem no comportamento térmico do edifício:

- radiação e movimento solar.
- Estado psicométrico da atmosfera.
- Estado térmico do solo.
- Vento.

Todos estes elementos influem na transferência energética do edifício com o ambiente, que será estabelecida conforme os principais mecanismos de transferência: condução, convecção, radiação e transferência de massa.

Do equilíbrio destes mecanismos de transferência extrai-se o conseqüente balanço térmico, que influirá muito no rendimento energético nas arquiteturas passivas, fundamental para reduzir, na medida do possível, tanto as perdas caloríficas no inverno, quanto os aportes indesejados no verão, e conseguir o conforto térmico dos usuários.

Para otimizar o condicionamento térmico, introduz-se as principais ferramentas que assistem ao desenho no momento de considerar estes parâmetros, destacando-se a carta bioclimática de Givoni.

## 3. Técnicas naturais de condicionamento em edifícios

### Introdução

A energia solar apresenta vantagens: é renovável, não contamina e chega de forma difusa, isso é, está garantida a distribuição gratuitamente. A principal dificuldade para seu uso é a baixa potência que oferece por unidade de área, de modo que não se apresenta eficiente quando os requerimentos energéticos estão muito concentrados.

No entanto, longe de ser um problema, isto é uma vantagem para seu uso no condicionamento térmico de edifícios, já que para resolvê-lo cumprem-se os requisitos de distribuição espacial elevada com necessidades energéticas de baixa potência. Lembre-se que a constante solar é 1540 W/m<sup>2</sup>, e que um valor normal em nossas latitudes é de aproximadamente 800 W/m<sup>2</sup> nas horas centrais do dia. Se também consideramos que o consumo em edifícios (residenciais e não residenciais) pode alcançar em alguns países de 30 a 35% dos consumos energéticos totais, dependendo das áreas, estamos falando de ordens de magnitude que fazem pensar que qualquer aporte feito em economia energética na edificação representara uma importante economia em cifras totais.

Outro fenômeno que ocorreu nos últimos anos é o deslocamento do máximo consumo de energia elétrica do inverno ao verão, devido ao uso, cada vez mais generalizado, de aparelhos de ar condicionado, bem como a utilização de formas de energia distintas da elétrica para aquecimento no inverno.

Assim, parece evidente que o aproveitamento dos recursos naturais no condicionamento de espaços interiores é uma tarefa que apresenta potenciais de economia de alto interesse.

### A dificuldade do desenho passivo

A Termodinâmica indica que o modo natural de fluir a energia é do foco quente ao frio. Portanto, para que um edifício, de modo natural, receba energia calorífica (aquecimento) este deve ser o foco frio com relação a algum foco quente.

Em condições de inverno, o entorno do edifício está mais frio do que a temperatura de conforto que desejamos alcançar (em torno de 20°C). Por outro lado, o Sol é uma estrela cuja temperatura aparente é de 6000°C. Este será o foco quente.

O objetivo do desenho arquitetônico será obter a máxima energia deste foco quente, desenvolvendo componentes especiais para tanto, sem esquecer que na climatologia continental geralmente existe um importante período do verão no qual esta técnica pode ser contraproducente.

Para tanto, os efeitos de cada técnica devem ser avaliados em condições de verão e seus efeitos devem ser eliminados facilmente durante esta época, a não ser que também sejam benéficos.

Ao contrário do que no inverno, durante o verão pretende-se que o foco quente seja o edifício; portanto, devem-se buscar focos frios para poder eliminar a energia do edifício a esses focos frios.

Dependendo do foco frio considerado, será estudada uma técnica. Os focos frios serão: o solo a uma profundidade determinada, o gradiente de umidade entre o ambiente exterior e o interior, e o céu noturno.

As técnicas de refrigeração natural podem estar dedicadas a evitar os superaquecimentos. São as técnicas “preventivas”, como a ventilação e o sombreamento, ou as técnicas “curativas” (técnicas que procuram realmente refrigeração), como a refrigeração evaporativa e a refrigeração radioativa.

Ambos tipos de medidas não apenas não são incompatíveis, mas se recomenda seu uso simultâneo a fim de otimizar a eficiência do desenho. As preventivas evitam que a demanda do edifício seja muito grande e, portanto, que seja possível cubri-la com a segunda classe de medidas ou curativas.

Deve-se considerar que as técnicas de aquecimento e refrigeração naturais serão usadas para alcançar as condições de conforto no inverno e no verão, respectivamente. A utilização destas técnicas deve ser feita tendo em conta que seus efeitos devem anular-se na estação contrária, pois de outro modo podem ser contraproducentes.

## Principais fatores do desenho energeticamente eficiente

Em climas variáveis o desenho de edifícios energeticamente eficientes é complexo, podem existir épocas de frio intenso e épocas de calor intenso e, geralmente, necessita-se de refrigeração ou aquecimento. Portanto, as soluções adotadas no desenho do edifício devem cumprir uma função dupla. Este tipo de arquitetura bioclimática é conhecida como **Arquitetura da Complexidade**.

Na *época de aquecimento* o problema de aproveitar os recursos naturais pode ser dividido em três aspectos: captação, armazenamento e distribuição da energia solar.

Antes de captar a energia solar, deve-se considerar que o edifício precisa estar bem isolado para evitar, por uma parte, perdas de energia do interior e, em segundo lugar, evitar renovações de ar frio do interior – considerando que a ventilação é imprescindível para alcançar o conforto nos espaços fechados -.

O problema da captação da energia solar é solucionado com uma orientação adequada dos edifícios e com uma distribuição adequada das janelas. Deve-se considerar que as janelas abertas ao sul, onde se recebe radiação solar durante todos os dias do ano, terão uma captação máxima no inverno, e no verão, com um sistema elementar de proteções solares (toldos, guarda-sol...) é fácil evitar todo ganho direto de radiação solar.

O problema do armazenamento soluciona-se distribuindo adequadamente as massas de inércia térmica. Seguindo ao longo do dia a evolução da mancha solar através do interior do edifício, podemos induzir onde será produzido um máximo de captação, de modo que será conveniente usar neste lugares materiais com elevada inércia térmica – produto da densidade pela capacidade calorífica do material (tijolos, azulejos de cerâmica...). A vantagem de usar este tipo de materiais é que captam a energia nas horas de maior aporte, e devido ao efeito de desfase temporal esta energia é liberada nas horas em que há menor aporte energético. Isso é, um material com um desfase de doze horas teria sua máxima captação ao meio-dia solar e sua máxima cessação ao ambiente interior à meia-noite.

Finalmente, o problema da distribuição de energia resolve-se, parcialmente, com a distribuição adequada das massas de inércia e com o correto desenho da circulação do ar através das peças do edifício (correto desenho dos vãos de distribuição interior). Por outra parte, nem todas as peças do edifício requerem o mesmo tratamento, de modo que em uma casa a cozinha prescinde de considerações importantes com relação a captação de energia solar, já que é um lugar em que haverá importantes aportes energéticos devido às atividades culinárias. Do mesmo modo, os quartos são lugares de uso especial, já que existe uma proteção extra de roupa. Considerações semelhantes poderiam ser feitas com armazéns, despensas, garagens.

Em condições de verão, estas ideias mudam drasticamente, ainda que algumas das considerações continuem sendo válidas. O isolamento correto continua sendo um fator fundamental, do mesmo modo que no inverno evita a perda de energia do interior, no verão evita o ganho de energia do exterior. Ademais, as inércias térmicas têm um papel importante evitando que as temperaturas interiores subam de forma alarmante, mas esta estratégia deve estar acompanhada de uma adequada ventilação noturna que evite que o armazenamento de energia aumente dia a dia e acabe produzindo uma situação de desconforto continua no tempo.

No verão, as técnicas mais elementares são: o controle solar e as estratégias de ventilação. Além destas, existem técnicas mais sofisticadas que não apenas evitam o aquecimento, mas também produzem uma redução efetiva da temperatura do ar: técnicas evaporativas, condutos enterrados, etc.

No controle costuma ter um papel primordial a orientação das janelas. A janela não é apenas um elemento captador de energia, mas também uma fonte de iluminação natural, de modo que não deve ser considerada como um inimigo no verão, mas que proporciona, além da iluminação antes mencionada, a possibilidade de estabelecer ventilações que suavizem as condições interiores.

As estratégias de ventilação podem ser classificadas em vários tipos: ventilação cruzada, efeito chaminé e ventilação noturna.

Dependendo das temperaturas interiores e exteriores, poderá ser conveniente estabelecer correntes de ar dentro do espaço ocupado. Por outro lado, se foram consideradas as correntes preferentes de vento na área em que está o edifício, e dependendo delas se praticou uma correta estratégia de distribuição de vãos, será possível estabelecer correntes de ar efetivas no interior do edifício que o situem dentro das condições de conforto.

As estratégias de ventilação noturna são efetivas nos lugares em que existe um considerável salto térmico entre o dia e a noite, com elas é possível resfriar a estrutura do edifício a fim de evitar acumulações de energia.

O efeito chaminé é produzidos em edifícios em que a parte alta pode ser superaquecida, de modo que pela diferença de densidades entre o ar quente e frio produz-se um efeito de sucção que acelera as renovações de ar a partir do exterior.

Concluindo, podemos dizer que a *correta orientação* dos vãos, considerando tanto os ganhos solares quanto as correntes preferentes de vento, o uso de *isolamentos e massas de inercia adequados*, o desenho de *proteções* tanto para as correntes de vento desfavoráveis, quanto para o excesso de radiação solar direta, dão ao edifício características que o tornam especialmente eficiente no aproveitamento dos recursos naturais para a climatização interior.

## Aplicação da energia solar passiva

As aplicações proporcionadas pela utilização da energia solar passiva são: aquecimento, refrigeração e iluminação.

### Aquecimento

Deve-se considerar o *ganho de radiação solar*, portanto é determinante o vidro e outros materiais translúcidos ou transparentes de envidraçamento, por sua elevada transmitância à radiação solar (onda curta) e mínima à radiação de onda larga (efeito estufa). O ganho da radiação solar pode ser de distintas formas:

**Ganho direto** – pode ser: captação por envidraçamento sul, absorção e acumulação no parâmetros interiores do espaço e percepção por convecção e radiação dos mesmos. Para otimizar seu funcionamento é recomendável um adequado nível de isolamento em seu funcionamento diurno por meio de duplo envidraçamento, laminas de reduzida emitância e carpintaria que não constitua ponte térmico.

**Ganho semidireto:** é o que produzem os espaços conhecidos pelo nome de *espaços de amortização* entre o espaço exterior e o interior do edificio, dentro dos quais se encontram as *estufas* e os *átrios*.

Um tipo que está sendo utilizado atualmente com fins energético e de iluminação é o átrio ou pátio com vidros. Este espaço deve poder ser aberto e estar provido com dispositivos de sombra na época de verão, para não produzir sobreaquecimentos não desejados que gerem desconforto.

**Ganho indireto:** o aparato de absorção e acumulação se encontra entre captação e percepção, dentre os quais se encontram: a parede de trombe, a parede de Água e a Cobertura Estanque.

**Ganho separado:** neste tipo existe uma separação entre o espaço a aquecer e os componentes de captação, absorção e acumulação. Sua configuração é a de um coletor solar de ar, que utiliza um componente de captação e absorção que transmite o calor ao ar pela convecção a uma massa em

que se acumula o calor como: cantos arredondados, água, etc. O calor armazenado se transmite ao espaço a aquecer por meio do ar aquecido, que é transmitido diretamente ao ar ou ao componente de fechamento.

### Refrigeração

A refrigeração de edifício através da utilização passiva de energia solar é uma técnica que não está totalmente desenvolvida e surge para evitar os superaquecimentos ou as temperaturas interiores altas que no verão podem ser produzidas, gerando desconforto térmico na ausência de sistemas convencionais de refrigeração.

É importante considerar os distintos agentes ambientais que favorecem a transferência energética entre o edifício e o meio ambiente, estes são: o *céu*, a *atmosfera* e o *terreno*, conhecidos como *sumidouros de calor*. Em cada caso serão distintos os mecanismos a considerar.

As técnicas naturais mais gerais para refrigeração passiva podem ser resumidas em: ventilação natural, inércias térmicas, dispositivos de controle solar e fenômenos de evaporação. Bem como os elementos de construção integrados no edifício que, conforme a época do ano, podem favorecer os fenômenos de aquecimento ou de refrigeração, como os pátios, átrios, estufas, varandas, sacadas, etc.

### Iluminação natural

Consiste em proporcionar luz natural ao edifício a partir da radiação solar. A entrada de luz é uma técnica utilizada há muitos anos nas moradias, mas menos utilizada em edifícios não residenciais. Baseia-se em refletir a luz proveniente do sol ao interior, de modo que penetrem ou não os raios solares nas distintas épocas do ano.

O efeito que se pretende conseguir com os sistemas de iluminação natural é a adequada iluminação dos interiores, preferindo-se a uniformidade de iluminação em toda a superfície ao excesso de iluminação com muitos contrastes que provoquem deslumbramentos.

Os sistemas de iluminação natural podem ser classificados em:

- *componentes de condução*, espaços de luz intermediários (galerias, varandas, estufas...) e espaços de luz interiores (pátios, átrios, condutos de luz por reflexão especular...).
- *componentes de passagem*, estabelecem a conexão entre alguns componentes de condução e outros, são todos os tipos de aberturas comuns, *laterais*: janelas, sacadas, paredes translúcidas, paredes cortinas e *zênites*: claraboias e cúpulas.
- *Elementos de controle*, complementos dos componentes de passagem: toldos ou cortinas, telas rígidas como beirais, prateleiras de luz, peitoris e refletores, filtros solares do tipo de persianas, venezianas e obstruções solares como blackout.

## Técnicas naturais para aquecimento

Os fenômenos de transferência de energia que ocorrem espontaneamente na natureza sempre seguem a mesma direção: a cessão de energia do foco quente ao foco frio. Quando enfrentamos o problema do desenho de um edifício, a fim de fazer com que aproveite de forma ideal as condições naturais: radiação solar, temperatura ambiente, vento, umidade, etc., encontramos dois tipos de foco com relação ao edifício: um foco frio, que é o ar em que está imerso o edifício, e outro quente, que é o sol e que está a uma temperatura aparente de 5000°C.

A transferência de energia entre o sol e o edifício é feita através dos fenômenos de radiação, e entre o edifício e o ar, através do resto de fenômenos (condução, convecção e transferência de massas).

Por outro lado, o edifício atua como um filtro para as condições exteriores, de modo que atenua as variações produzidas no exterior, amortizando-as no interior. O edifício ideal seria aquele que, uma vez conseguidas as condições de conforto, fosse tão restritivo que toda variação fosse absolutamente amortizada no interior. Em outras palavras, aquele edifício que mantenha ao longo de todos os dias do ano a temperatura e umidade constantes. Este edifício se comportaria como uma caverna em um clima temperado, de modo que sempre teremos dois focos entre os quais se conceberá o balanço energético com relação ao edifício.

Em período de aquecimento, o balanço será positivo com relação ao sol, isso é, a transferência de energia será sempre do sol ao edifício, e negativo com relação ao ar circundante, de modo que o edifício cederá energia ao ar circundante. Portanto, o desenho do edifício deve fazer com que capte a maior energia solar possível, e ceda a mínima ao ambiente exterior.

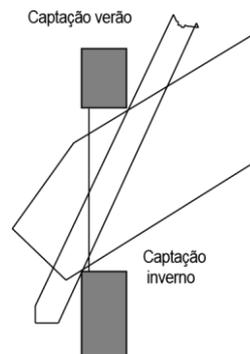
Desse modo, as estratégias em períodos de aquecimento podem ser resumidas em uma série de aspectos que precisam ser adequadamente conhecidos para realizar um desenho energeticamente eficiente. Estes são:

- elevas aberturas com vidros (janelas) para captação solar
- orientação sul (máxima captação no inverno)
- poucos vãos na fachada norte
- textura exterior do edifício pouco arrugada (diminuindo o coeficiente de convecção)
- propriedades óticas dos materiais de acabamento exterior com alto coeficiente de absorção para a máxima captação solar
- materiais de construção com elevada inercia térmica interior (armazenamento para posterior distribuição durante as horas que não existe captação solar direta,)
- Isolamento térmico adequado (4-8 cm) dependendo das áreas climáticas, para reduzir as perdas por condução
- Proteções moveis com isolamento para as aberturas com vidro, sempre pelo exterior, com boa hermética para evitar infiltrações de ar

Os conceitos básicos a serem considerados nas técnicas naturais para aquecimento são: massa térmica, isolamento, orientação.

### Orientação

Afirmou-se que o foco quente no caso do aquecimento passivo é o sol, de modo que devemos saber adequadamente qual é sua trajetória no céu a fim de orientar de forma ideal o edifício, para que tenha uma captação máxima no inverno, sem esquecer que esta captação pode ser um inimigo no verão e, portanto, deve ser mínima neste período de tempo.



**Figura 12. Captação solar em função do ângulo de incidência solar segunda as estações (Fonte: CIEMAT)**

É evidente que a posição de máxima captação de energia solar é aquela que a todo momento é perpendicular à incidência dos raios solares.

Desse modo, a orientação ideal das janelas é a sul no hemisfério norte, e a norte no hemisfério sul. As proteções solares a desenhar devem ser adequadas para não afetar a captação do inverno e evitar a captação do verão. Por outro lado, a relação entre área de janelas e superfície a acondicionar tem também uma importância capital para um aproveitamento ideal da radiação solar.

### Paredes e vãos conforme a orientação.

Se no hemisfério norte a orientação sul recebe durante todo o dia radiação solar, é evidente que a norte estará continuamente sombreada. Portanto, as condições térmicas desta área serão muito mais frias. Assim, deve-se evitar os vãos e ter um especial cuidado na colocação do isolamento térmico. Por outro lado, não é conveniente que seja uma área cega, já que deve-se prever a geração de correntes de ar para refrigerar no verão.

As fachadas leste e oeste recebem o sol pela manhã e pela tarde (dividindo ambos períodos a partir do meio-dia solar), respectivamente. Ambas fachadas são desfavoráveis no verão, já que a captação é muito difícil de evitar a não ser que se utilizem persianas que obstruam completamente a incidência solar. É especialmente desfavorável para o verão a orientação oeste, já que ao realizar a

captação de tarde, agregam-se também as elevadas temperaturas alcançadas no ambiente depois de muitas horas de insolação.

Do mesmo modo, não se deve esquecer que, dependendo das direções preferentes de vento de cada área, os vãos devem abrir-se de modo adequado para permitir as ventilações no verão, e proteger-se dos ventos frios no inverno.

Para um desenho ideal dos vãos, além do tamanho e orientação, deve-se instalar uma boa carpintaria para evitar, na medida do possível, as infiltrações de ar que são um foco de perdas contínuo e incontrollável.

Geralmente, o isolamento do edifício deve ser o adequado, já que este elemento protege dos resfriamentos no inverno e dos aquecimentos no verão.

### Inércia térmica

Ainda que estejam separadas em seções distintas, a orientação e as inercias térmicas estão sempre unidas devido a que a orientação do edifício mediatiza absolutamente as decisões posteriores de desenho. Desse modo, a adequada orientação do edifício é crucial para obter uma aproveitamento ideal dos recursos naturais. As massas de inercia térmica armazenam o calor e, posteriormente, o reemitem com um certo desfase temporal e com um certa atenuação, dependendo ambos das características dos materiais de que está composta.

As principais massas de inercia em um edifício estão nas paredes e solos. Uma adequada distribuição das massas de inercia térmica, combinada com um adequado isolamento e uma estratégia de ventilação correta, é crucial para conseguir um edifício confortável.

A radiação solar incidente sobre a superfície é parcialmente absorvida e parcialmente refletida, dependendo do material e da cor da parede. A energia absorvida é distribuída até o interior da parede através da condução ou até o exterior, através dos fenômenos de radiação e convecção.

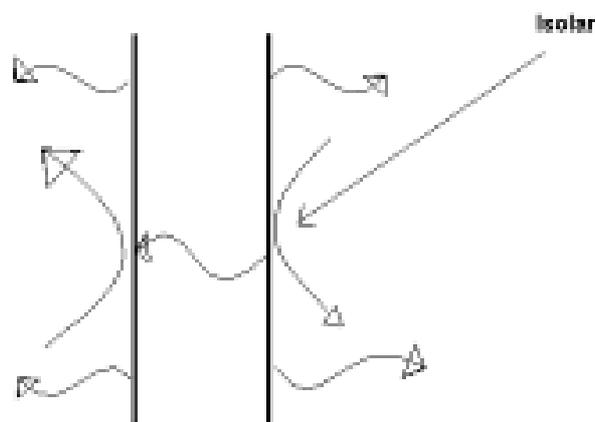


Figura 13. Absorção e reflexão da radiação solar incidente (Fonte: CIEMAT)

Uma parte da energia transmitida ao interior da parede é utilizada para aumentar a temperatura da parede, de modo que esta energia fica armazenada na mesma. Este é o efeito da inércia térmica: o armazenamento de energia através do aumento de temperatura da estrutura. Quando a onda térmica chega de um lado ao outro da parede, produzem-se dois fenômenos: uma amortização da quantidade de energia devido a que parte da mesma foi utilizada para aumentar a temperatura da parede, e um desfase temporal do pico da onda térmica que chega ao lado oposto por um retardo temporal.

Escolhendo adequadamente as características da parede (condutividade, densidade, capacidade calorífica e espessuras das distintas camadas) podemos chegar a obter desfases idôneos, p.e. 12h, de modo que a máxima quantidade de energia ao interior será produzida à meia-noite.

Deve-se considerar, ademais, que o uso do isolamento incide diretamente sobre o desenho das massas de inércia. Portanto, o desenho de uma parede deve considerar os dois fenômenos.

Deve-se considerar também que a aplicação de um isolamento em uma parede a parte em duas zonas: a anterior e posterior ao isolamento. Portanto, a inércia térmica que afetara a evolução térmica das condições interiores será aquela situada entre o isolamento e o interior, devido a que a capa isolante da parede atua como uma barreira para a energia.

Portanto, o desenho adequado da distribuição das massas de inércia está intimamente relacionado com a aplicação estratégica dos materiais isolantes. Em termos gerais, deve-se indicar que todas as superfícies expostas ao exterior devem estar dotadas de isolamento. Porém, se a parede está em contato com um espaço de amortização (estufa, parede de trombe, etc.) e recebendo grande quantidade de energia solar (orientação sul), é muito conveniente que não tenha isolamento, mas sim um grande poder de armazenamento de energia (tijolo maciço, concreto, etc.).

## Ganho solar

### O efeito estufa

Este efeito é a base principal para o aproveitamento solar no inverno. Produz-se ao utilizar o vidro como componente da construção. É uma combinação do ganho solar com a inércia térmica, aproveitando as características óticas do vidro.

O vidro é transparente à radiação de onda curta (radiação solar), enquanto é opaco à de onda larga (infravermelho térmico). Ao incidir a radiação solar sobre um vidro, esta se vê transmitida em uma porcentagem muito elevada, passando ao interior e incidindo sobre outros elementos (paredes e solo) que a absorvem.

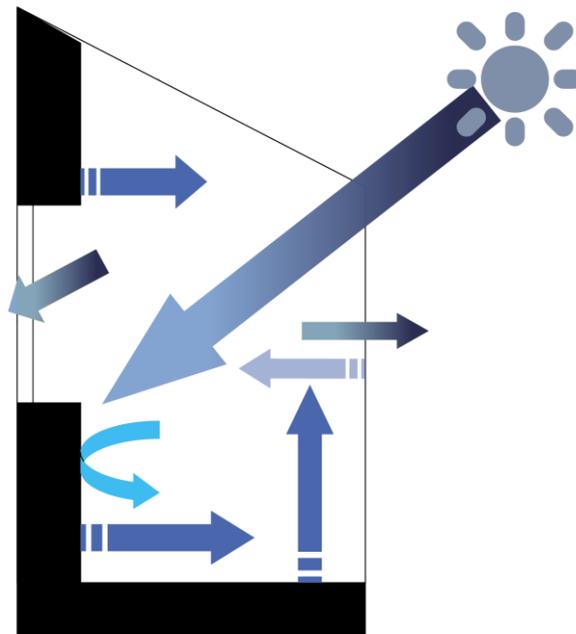


Figura 14. Funcionamento de uma estufa (Fonte: CIEMAT)

Estes elementos aumentam sua temperatura, emitindo por sua vez radiação de onda longa, que não pode escapar devido a opacidade do vidro a esta longitude de onda.

Por convecção, o ar do espaço estufa é aquecido e extrai energia dos elementos massivos (tetos, solo, paredes) alcançando uma temperatura muito elevada, inclusive em condições de ar exterior frio.

### Tipos de Componentes de Ganho Solar

#### Ganho Direto

É o modo mais simples de captação solar. O elemento é a *janela*, e apenas requer uma orientação adequada. Chama-se ganho direto porque não existem elementos intermediários entre a radiação solar e o espaço que se deseja aquecer, a não ser o vidro.

A diferença fundamental entre os desenhos consiste no lugar de colocação da janela, bem como em sua inclinação com relação à vertical, o tipo de vidro utilizável em cada um dos desenhos, dependendo do objetivo que se pretenda conseguir.

A inclinação dos vidros é um parâmetro que deve ser utilizado com muito cuidado para latitudes intermediárias e baixas (como é o caso da faixa mediterrânea), já que o ângulo de incidência solar no verão é muito elevado, de modo que os ganhos podem ser excessivos e produzir

superaquecimentos. Geralmente é aconselhável a posição vertical, sempre colocando sombreamentos.

Instalar janelas em diferentes níveis é uma solução muito adequada para iluminar e captar energia solar em peças do edifício que não estão conectadas à fachada sul.

#### Ganho indireto.

Conhece-se por este nome os componentes que, entre a radiação solar e o espaço que se deseja aquecer, colocam elementos que armazenam e, posteriormente, distribuem a energia. Assim como no caso anterior, o único fenômeno de transferência de calor que intervém é a radiação. Neste caso os fenômenos produzidos são a condução e a convecção.

Todos os componentes possuem uma parte massiva que armazena a energia solar captada, emitindo esta energia em forma de radiação térmica com um desfase temporal que depende das características dos materiais utilizados.

Basicamente, existem dois tipos de sistemas: o que exclusivamente tem uma parede massiva, após um vidro (que produz o efeito estufa, favorecendo o ganho energético da parede) e os que, ademais, combinam o armazenamento com a convecção introduzindo o ar quente no espaço que queremos aquecer.

Os desenhos variam quando realizados sobre uma parede vertical ou sobre o teto, mas o princípio de funcionamento é o mesmo.

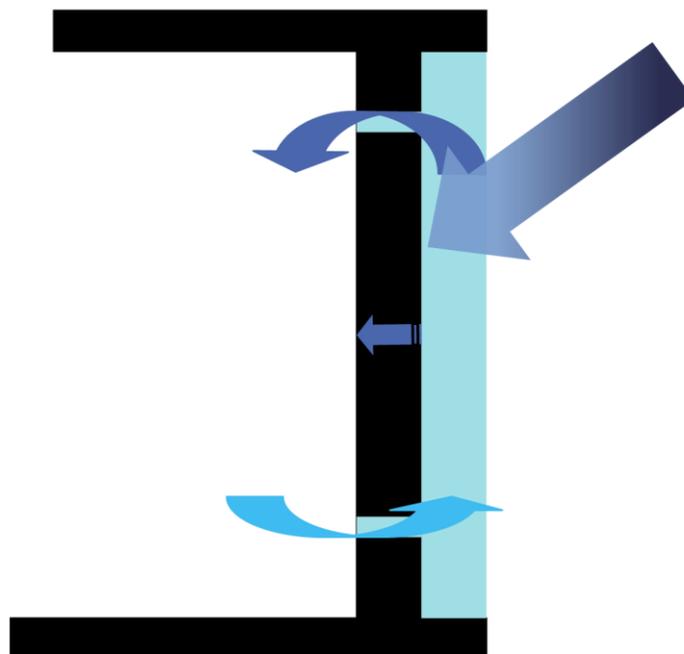


Figura 15. Esquema de parede de trombe (Fonte: CIEMAT)

Dentro deste tipo de técnicas se inclui a estufa adjacente. Existe um componente que tradicionalmente foi usado no desenho passivo conhecido como parede *de trombe* em honra ao arquiteto que o utilizou pela primeira vez.

Este componente consiste em uma parede massiva, sem isolamento e com cores escuras, para aumentar a absorção da radiação solar, diante da qual se coloca um vidro a fim de produzir o efeito estufa. A distancia entre o vidro e a parede é pequena, de modo que o volume de ar que será aquecido será também pequeno, alcançando temperaturas elevadas facilmente. Na parte inferior e superior da parede existem aberturas praticáveis de modo que, por convecção natural ou forçada (através de um ventilador controlado por um termostato), exista um espaço de ar quente do componente ao espaço habitado. Por sua vez, o ar que penetra no espaço estufa da *parede de trombe* está preaquecido porque foi tomado das condições interiores.

É evidente que este é um sistema que funciona exclusivamente em condições de inverno. Durante o verão as seguintes medidas preventivas devem ser adotadas sobre este componente:

- abrir o vidro para evita o efeito estufa.
- Evitar a condução de calor através da parede colocando isolamento pelo lado externo.
- Pintá-la com cores claras para evitar a captação de energia solar.

Neste ponto é necessário fazer o mesmo comentário d ganho direto. As soluções diferentes da vertical (soluções de teto) devem ser aplicadas com muito cuidado para conservar as condições de conforto durante o verão.

A necessidade de que a orientação seja para o sul para que os elementos de ganho solar sejam realmente efetivos será esclarecida no seguinte exemplo:

### Ganho Separado

Neste caso o sistema captador da energia solar está separado fisicamente do espaço que se pretende aquecer. A distribuição da energia é feita através do ar até o lugar da demanda.

As três técnicas têm pouco sentido isoladamente: devem ir acompanhadas de uma boa qualidade da construção e uma boa seleção dos materiais utilizados tanto na construção do componente, quanto no resto do edifício.

### O Vidro

Conforme observado, todas as soluções para o aproveitamento da energia solar no inverno se baseiam no uso dos vidros como elemento gerador do efeito estufa. Como o vidro é um elemento com condutividade elevada, ao mesmo tempo em que potencializa a captação solar, também favorece as perdas térmicas por condução, de modo que se deve ter cuidado com as dimensões da área com vidro.

Por outro lado, a tecnologia desenvolveu uma série de vidros cujo comportamento térmico é muito melhor do que o do vidro simples e que atualmente se encontram no mercado. Abordaremos os seguintes quatro tipos genéricos:

*O vidro duplo*, que consiste em dois vidros simples com uma câmara de ar entre ambos. Devido a que o ar é um condutor de calor ruim, o problema das perdas por condução se reduz consideravelmente. Além disso, devido à alta capacidade de transmissão do vidro, o ganho solar quase não é afetado.

*O vidro refletivo* possui um cobertura especial em seu lado externo de modo que reflete a radiação solar incidente e reduz sensivelmente os aportes solares ao interior do edifício.

Este tipo de vidro foi utilizado para configurar as paredes cortina que estão na moda nos edifícios de escritórios, reduzindo assim as demandas energéticas em refrigeração.

*O vidro absorvente*, como o refletivo, tem uma cobertura especial que absorve a radiação de onda larga (infravermelho térmico). Colocando o lado tratado na parte interna, evita-se perdas térmicas, pois o vidro tem um comportamento mais parecido ao de um parede do ponto de vista ótico. Então se aquece o vidro de modo que evita as perdas por condução.

*O vidro baixo emissivo*. A cobertura deste vidro é um material cuja emissividade é baixa, de modo que irradia e absorve pouca energia. É um vidro para condições de verão, já que mantém baixas temperaturas em condições de alta radiação.

O mais interessante destes vidros são as combinações que podem ser feitas usando estes materiais especiais de cobertura com vidros duplos. Assim, para um clima e edifício cujo principal problema seja a refrigeração, por exemplo um edifício de escritórios, cuja ocupação coincide com as horas de sol, que apresenta uma alta ocupação e muitos equipamentos trabalhando simultaneamente (de modo que as cargas internas são muito elevadas) e se localiza em Sevilla, terá carga de refrigeração inclusive no inverno. Usando para os envidraçamentos um vidro duplo, cujo lado externo seja refletivo e o lado interno um vidro baixo emissivo, apresentará um comportamento ideal para este tipo de condições.

Do mesmo modo, se o edifício apresenta a principal carga em aquecimento, a combinação de absorvente pelo interior e normal pelo exterior oferece excelentes resultados.

## O Átrio

Este elemento é um tipo independente, não porque se utilize uma técnica especial, mas porque é mais uma estrutura de bloqueio do que do edifício. Por outra parte, é um componente que apresenta bons resultados tanto em condições de inverno, quanto de verão.

Chama-se átrio a um pátio interior coberto por uma superfície de vidro e que, em seu pico, possui uma abertura móvel que deve estar fechada na época de aquecimento e aberta na de refrigeração.

Os principais efeitos produzidos em um átrio são:

- o efeito estufa durante a época de aquecimento, estando a abertura do pico fechada.
- O efeito chaminé durante a época de refrigeração, quando a abertura do pico está aberta.

Um terceiro fenômeno presente nas duas épocas é uma forte estratificação das temperaturas entre as partes baixas e alta do átrio.

Devido à incidência solar sobre as paredes interiores do pátio, o ar se aquece e tende a subir, já que a densidade do ar diminui com a temperatura. Este ar quente tende a permanecer na parte alta do átrio, de modo que forma uma estratificação das temperaturas, reduzindo na parte interior e aumentando com a altura.

Esta mesma estratificação é produzida em condições de verão, de modo que ao estar a parte mais alta do átrio aberta, este ar sai ao exterior, provocando uma sucção de ar a partir das áreas inferiores.

Esta sucção pode ser utilizada para provocar correntes de ar no interior dos edifícios, de modo que produzam melhores condições de conforto.



**Figura 16. Moradias de Proteção Oficial de Aguilar de Campo (Palencia), com átrio envidraçado com abertura superior (Fonte: CIEMAT)**

## Técnicas naturais de refrigeração

Como identificou-se anteriormente, a transferência natural do calor ocorre sempre do foco quente ao frio, e nunca de modo inverso, a não ser que se inclua no processo uma máquina térmica que consumirá, sempre (2º princípio da Termodinâmica) mais trabalho do que a energia que produza.

Assim, o problema da refrigeração passiva, entendido como “*reduzir a temperatura do ar em um determinado ambiente*”, é um problema de difícil solução se não se agrega nenhum sistema convencional de refrigeração. A refrigeração passiva em seu conceito mais amplo se dedica ao desenvolvimento de desenhos arquitetônicos que mantenham as condições de conforto no edifício, sem necessidade de um consumo energético em sistemas convencionais de ar condicionado.

O principal problema da chamada refrigeração passiva, ou técnicas naturais para refrigeração, é evitar que o espaço habitado se superaqueça (temperaturas superiores a 28°C são superaquecimentos importantes). Tem, portanto, uma primeira tarefa meramente preventiva. A defesa de superaquecimentos é realizada principalmente através de três mecanismos: proteção solar, ventilação e massa térmica.

Todas estas técnicas se agrupam sob a epigrafe de refrigeração gratuita (*'free cooling'* é a expressão inglesa utilizada normalmente na bibliografia). É preciso indicar que estas técnicas são as primeiras a serem aplicadas em um desenho consciente do ponto de vista energético.

Contudo, devido à climatologia ou às cargas internas do edifício, pode ser necessário um aporte extra de energia para conseguir o conforto térmico. Este aporte pode ser conseguido a base dos ares condicionados comuns, ou mediante o uso de uma série de técnicas naturais obtidas buscando sumidouros de energia. Isso é, lugares para poder dissipar o calor excedente do edifício.

- São três os sumidouros de calor que vamos a abordar:
- A temperatura do solo a uma profundidade determinada, através de tubos enterrados.
- O estado higrotérmico do ar exterior: evaporando água se obterá ar mais fresco.
- A temperatura aparente do céu noturno, que é muito baixa, utilizando radiadores e a água como fluido de transferência de calor ou o ar.

### Controle solar

Refere-se ao uso de diferentes tipos de proteções solares utilizadas para evitar a incidência direta da radiação sobre o edifício, ou partes do mesmo. Devido a que a principal fonte de energia é o sol, no verão deve-se procurar fazer com que penetre a mínima quantidade de energia possível dentro do recinto a controlar.

Segundo a hora em que incida o Sol sobre as diferentes fachadas do edifício, terá maior relevância seu sombreamento:

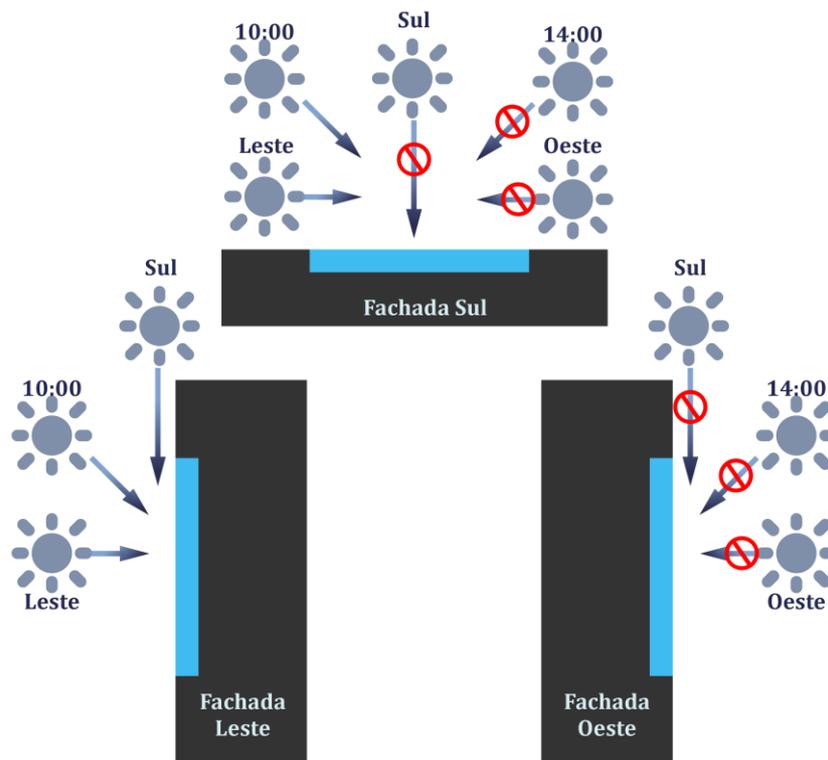


Figura 17. Incidência solar horária (hemisfério norte) (Fonte: CIEMAT)

Radiação solar do leste: ao amanhecer a radiação solar incide quase perpendicularmente sobre as fachadas orientadas ao leste, mas devido a que a esta hora costuma corresponder a temperatura ambiente mínima, não é imprescindível proteger-se desta radiação solar.

Radiação solar do sul: ao meio-dia o Sol alcança sua altura máxima, e a temperatura ambiente está próxima de alcançar seu máximo. É importante proteger os vãos da fachada sul desta radiação.

Radiação solar do oeste: durante o entardecer o Sol perde altura no céu, entrando perpendicularmente pelos vãos das fachadas orientadas ao oeste, sendo muito deslumbrante e incomodo. O sombreamento destes vãos para o Sol do oeste é muito conveniente.

Existe uma grande quantidade de elementos de proteção solar: cortinas, persianas, toldos, etc. Em uma primeira divisão, se diferenciam em proteções fixas e móveis.

As *proteções fixas* fazem parte da própria estrutura do edifício: retranqueos, aleros (tanto verticais quanto horizontais), sacadas, etc. Deve-se ter especial cuidado com o desenho destes elementos, já que devem proteger no verão, mas deixar passar a radiação solar no inverno.

As *proteções móveis* costumam ter um controle manual, dependendo da preferencia do usuário e das condições climáticas.

Como norma geral, todas as proteções solares devem ser exteriores ao vidro da janela, devido a que quando são interiores a radiação penetra no espaço a controlar e se produzem superaquecimentos. A necessidade de proteções exteriores faz com que aumentem os problemas, já que devem ser instalados materiais resistentes ao tempo.

Ademais, existe uma proteção natural que é o uso de *vegetação de folha caduca* diante dos vãos com vidros. Este tipo de proteção apresenta uma vantagem adicional sobre as artificiais. Sendo a planta um ser vivo, tem um mecanismo termorregulador que faz com que se mantenha constante sua temperatura diante das mudanças externas e procura, além da proteção da incidência solar, uma suavização das condições ambientais. É importante que a vegetação seja de folha caduca, porque deste modo esta povoada no verão, produzindo o efeito protetor, e no inverno não tem folhas, deixando penetrar os raios solares.

Por outro lado, como a zona norte está sombreada continuamente, se nesta fachada desenha-se um pátio ou uma varanda que a ocupe, geramos um espaço completamente sombreado e com um certo volume de ar que estará a uma temperatura menor do que a ambiente. Assim, conseguem-se efeitos benéficos: manter fresca a parede norte e dispor de uma massa de ar à temperatura adequada para distribuí-la posteriormente no interior da moradia. Esta distribuição é possível usando técnicas adequadas de ventilação.

### Ventilação

A ventilação em um edifício no verão tem vários objetivos: adequar as condições ambientais às exigências de conforto e evacuar a energia armazenada nas massas de inércia térmicas para evitar o superaquecimento paulatino do edifício.

Provocar intercâmbios de ar do interior com o exterior será benéfico somente no caso de que a temperatura exterior do ar seja menor do que a do interior. Do contrário, estaríamos aquecendo o ambiente. Por outro lado, deve-se considerar que para alcançar o estado de conforto não é importante somente a temperatura ambiente, mas também a velocidade do ar e a temperatura média radiante, que depende em maior medida da temperatura superficial das paredes do que da do ar.

Dentro desta técnica de refrigeração natural podemos distinguir vários tipos: simples, cruzada, noturna e por efeito chaminé. De todas elas, a menos eficiente e mais fácil de utilizar é a ventilação simples, que requer velocidades exteriores de vento elevadas e uma boa orientação do vão com relação ao sentido desta velocidade.

### Ventilação simples

Com esta técnica o número de renovações de ar conseguido é pequeno. Na figura se esquematiza este processo. Como se pode ver, existe uma única abertura através da qual, e por diferença de pressões, o ar entra e sai.

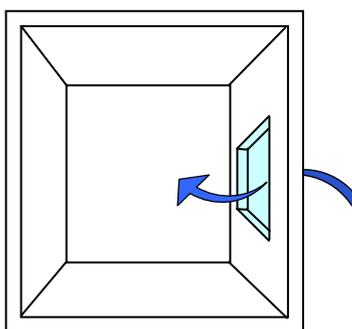


Figura 18. Ventilação simples (Fonte: CIEMAT)

Para que este efeito seja eficiente, a orientação do vão com relação à direção do vento deve coincidir. Do contrário, o efeito é muito pobre.

Se o vão está em contato com uma zona especialmente protegida de isolamento (lembre-se dos pátios abertos ou varandas na fachada norte de que nos referíamos na seção anterior) o efeito pode ser muito benéfico, já que o intercâmbio produzido é com uma massa de ar que está pré-condicionada.

### Ventilação cruzada

Estabelece-se este tipo de ventilação quando existem vãos entre duas fachadas diferentes, sem que haja obstruções interiores entre ambos vãos. Isso é, quando é possível estabelecer uma linha ininterrupta entre as duas aberturas. Na figura anexa se apresenta um esquema simples, mas muito ilustrativo.

Na seguinte figura se apresenta o caso em que as fachadas em que estão localizados os vãos são opostas, com este tipo de configuração consegue-se um maior número de renovações de ar.

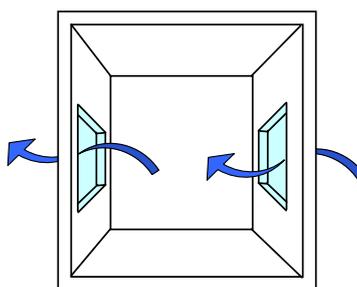


Figura 19. Ventilação cruzada (Fonte: CIEMAT)

Este tipo de ventilação pode ser incomoda porque a velocidade do vento interior pode ser elevada, isto acontece quando a velocidade do ar é maior do que 1m/seg. Como principal consequência deve-se estar atentos a que o desenho do edifício preveja vãos nas fachadas para que possa estabelecer este tipo de ventilação.

Para um correto desenho dos vãos, e a escolha das fachadas nas quais inseri-los, é imprescindível conhecer as direções preferentes de vento na área, bem como as possíveis telas que afetarão a incidência do vento sobre as mesmas.

### Ventilação noturna

A ventilação noturna tem a principal missão de aproveitar o resfriamento de temperaturas que geralmente ocorrem durante a noite para evacuar a energia armazenada nas massas de inércia térmica do edifício.

É evidente que durante o transcurso do dia a estrutura da parede se aquece devido à incidência solar. Se esta energia armazenada não é eliminada, o edifício aumentará paulatinamente sua temperatura, de modo que será inabitável.

Este efeito é notado na maioria dos edifícios convencionais: quando começa o verão o edifício é fresco, mas na medida em que avança vai aumentando sua temperatura, chegando a acontecer de que as condições exteriores sejam frescas (um dia fresco de verão ou durante a noite) e o edifício mantenha temperaturas fora do limite de conforto.

A eliminação desta energia é produzida fundamentalmente por dois mecanismos: radiação à céu noturno e convecção entre o ar exterior e as paredes do edifício. A temperatura aparente do céu em uma noite despejada de verão pode estar em torno de 15 a 20°C abaixo da temperatura ambiente, portanto, atende aos conceitos do capítulo 1 de fundamentos. Ademais, a quantidade de energia cedida pela parede é proporcional à diferença de temperaturas à quarta potência, o que gera uma importante perda de energia por este conceito.

### Efeito chaminé

Consiste no remate de ar provocado quando existe um gradiente térmico considerável a diferentes alturas. Este efeito apresenta uma grande eficiência com relação ao número de renovações de ar provocada. Ademais, é praticamente independente das condições exteriores, já que o próprio efeito gera as condições necessárias para que seja produzido

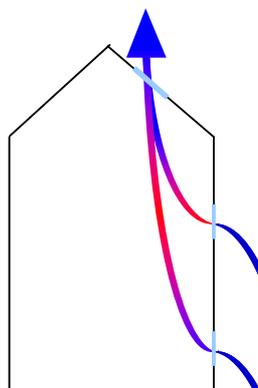


Figura 20. Efeito chaminé (Fonte: CIEMAT)

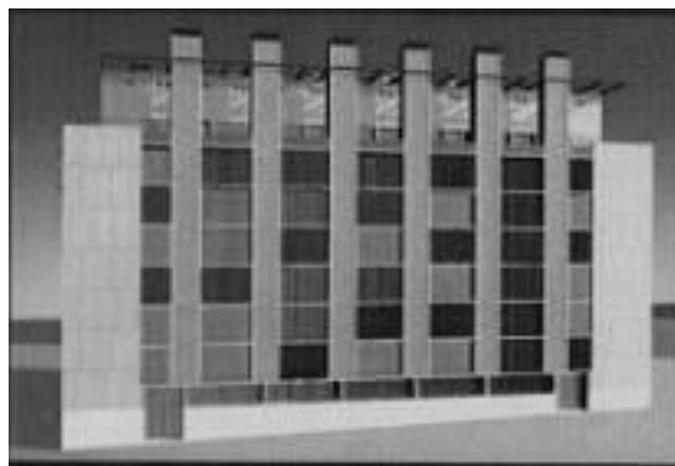
A figura representa um edifício seccionado, no qual a parte superior é de vidro, tendo um importante ganho solar. Devido a este ganho de energia, o ar sofre um importante aumento de temperatura, que se traduz em uma diminuição da densidade e, portanto, tende a subir e escapar pelas aberturas superiores. Isto produz um efeito de sucção do exterior ao interior nos vãos inferiores, criando correntes cruzadas de ar.

Se o ar procedente do exterior é coletado de uma área pré-condicionada, o efeito resultante pode ser ideal para manter as condições de conforto.

Este tipo de elemento é ambivalente, já que tem um funcionamento igualmente positivo no inverno apenas com o fechamento das aberturas superiores e inferiores, deixando que se produza o efeito estufa.



**Figura 21. Chaminé solar experimental com inercia térmica instalada no Laboratório de Ensaios de Componentes de Edificação (PSA, Almería) para caracterização energética destes sistemas.**



**Figura 22. Bloco de moradias no Oeste de San Fermín (Madri) com chaminés solares integradas na fachada oeste. (Fonte: CIEMAT)**

## Técnicas ativas de condicionamento

---

Nesta seção consideram-se uma série de técnicas que produzem uma redução real na temperatura do ar.

### Técnicas evaporativas

Os sistemas evaporativos consistem em misturar o ar seco com água para que esta, ao evaporar, extraia a energia do ar e reduza sua temperatura, aumentando simultaneamente a umidade.

Imaginemos que o edifício está imerso em um ambiente seco e muito quente. Se o ar com estas características passa através de uma lâmina de água (pano úmido ou fonte de gotas micronizadas...), o ar resultante sofrerá uma umidificação e uma redução de temperatura proporcional à umidade ganha. Deve-se desenhar corretamente o dispositivo umidificador, porque se supera 80% da umidade relativa, as condições de conforto podem ser afetadas.

O potencial desta técnica é muito elevado, porque a quantidade de energia absorvida pela água para evaporar é de aproximadamente 570 cal/grama, o que produz uma redução considerável da temperatura do ar, já que esta energia é eliminada da massa de ar.

Distinguimos dois tipos de sistemas evaporativos: diretos e indiretos.

Os sistemas diretos injetam a água diretamente no ar a refrigerar, enquanto os indiretos injetam a água para resfriar o ar que não será usado para refrigerar diretamente o espaço interior, mas que através de intercâmbios de calor resfriará o ar que pretendemos condicionar.

#### a) Sistemas diretos

O sistema direto tem mais capacidade de reduzir a temperatura do ar a refrigerar, pois elimina um intercâmbio de calor dentro do sistema, eliminando assim uma eficiência que sempre será menor do que 1. Contudo, devido a que este estado de conforto depende não apenas da temperatura, mas também da umidade, deve-se ter cuidado para não ultrapassar os limites tolerados de umidade.

A necessidade de controlar os níveis de umidade faz com que os sistemas sejam mais caros devido a inclusão de controles automáticos. Desse modo, esta técnica é recomendável apenas em climas muito secos.

Utilizam-se basicamente dois sistemas para umedecer o ar:

- Micronizadores de água, de modo que o ar seco passe através do jato de água pulverizada.
- Meios porosos úmidos, através dos quais passa o ar seco.

Uma vez resfriado o ar, e utilizado na refrigeração da área desejada, este não poderá circular novamente através do circuito evaporador porque possuirá o nível máximo de umidade permitido par ao conforto. Assim, os sistemas diretos não tem nenhum tipo de circulação em circuito fechado.

Estes sistemas geralmente localizam-se como uma fase previa à compressão para pré-condicionar o ar exterior e sua eficiência varia dependendo:

- Do volume total do meio poroso, distinguindo entre a seção (S) e a largura do meio (L).
- Da área do poro (DC).
- Da velocidade (vazão) do ar que o atravessa.

## **b) Sistemas Indiretos.**

Este sistema apresenta duas vantagens diante do direto:

Aproveita a totalidade do potencial de resfriamento do ar, pois leva o ar à saturação alcançando, portanto, a temperatura de bulbo úmido.

O ar refrigerado para consumo no espaço habitado pode voltar a circular, já que não se agrega nenhum conteúdo de água e a eficiência do sistema subirá de forma considerável.

Por outro lado, apresenta a vantagem de que o ar refrigerado por evaporação não é o que se utiliza para consumo, mas este, através de um permutador de calor, refrigera um circuito secundário de ar que se destinará a refrigerar o edifício.

### Conduitos enterrados

A técnica de tubos enterrados consiste em enterrar uma série de tubos feitos de um material com uma condutividade elevada (metálicos ou de cimento), de modo que através deles circule ar. Este ar será coletado no interior do edifício e passará pelos tubos para novamente entrar no edifício a uma temperatura inferior. É necessário coletar ar do exterior para realizar as necessárias renovações de ar novo, evitando assim a contaminação do ar usado.

Isto se deve a que o solo apresenta um gradiente térmico que, em torno dos 14m de profundidade, deixa a temperatura praticamente constante ao longo do ano e iguala a temperatura media anual da área estudada.

Durante os meses de verão, para profundidades iguais ou inferiores a 3m, a temperatura do solo é de cerca de 22°C (o máximo se alcança em outubro), de modo que é aproveitável para produzir efeitos refrigerantes. Se, além disso, a parte do solo na qual será aplicada a técnica está sombreada, a redução da temperatura de 4m é de ao redor de 2°C.

Ademais, quando se realizam tratamentos especiais como, por exemplo, irrigar a área utilizada, ou quando esta área tem na altura dos tubos lençóis freáticos, a eficiência do sistema aumenta claramente.

A eficiência da técnica depende:

- Da temperatura do solo, que será inferior quanto mais profundos estejam enterrados.
- Do tratamento da superfície exterior que contém os tubos. Os diferentes tratamentos são: sombreamento do espaço do solo em que estão enterrados a fim de reduzir a temperatura na mesma profundidade. Assim evita-se a saturação do solo em torno dos tubos (devido à cessão de calor dos tubos ao solo). Podem-se utilizar técnicas como a circulação de ar durante a noite ou a irrigação do solo para aumentar o conteúdo de umidade no solo.
- Do diâmetro dos tubos.
- Do comprimento total do tubo através do qual passará o ar.
- Da vazão do ar que circula através dos tubos (o que é semelhante para um diâmetro determinado da velocidade de circulação do fluido).

A eficiência global do sistema dependerá, em primeiro lugar, do tipo de solo sob o qual estejam enterrados os tubos; da vazão; do diâmetro dos tubos e do comprimento total dos tubos.

### Sistemas Radiantes

Neste caso, o meio frio é o céu noturno, cujas temperaturas são menores do que a ambiente. Através do mecanismo de radiação, será emitida energia de uma superfície que está no nível do solo (radiador) ao céu. Portanto, o radiador se resfriará. Colocamos um fluido em contato com este radiador, ar ou água que, por convecção, se resfriará.

Esta técnica apresenta sua máxima efetividade durante horas nas quais, normalmente, o edifício não demanda refrigeração, isso é, durante a noite. Assim, faz-se conveniente armazenar a energia, a capacidade refrigeradora, para utilizá-la quando o edifício a demande.

O valor da temperatura do céu depende das condições atmosféricas, já que não devem existir elementos que absorvam e emitam radiação de onda curta como o CO<sub>2</sub>, o vapor de água ou os aerossóis. Em resumo, requer-se uma atmosfera despejada (sem nuvens) e clara (com poucos contaminantes).

Por outro lado, o material do qual estão constituídos os radiadores será determinante no rendimento do sistema. Os radiadores podem ser de duas classes, dependendo do tipo de fluido que transporta a energia: de água e de ar.

A eficiência do sistema varia com:

- As condições climatológicas. Fundamentalmente afetará a velocidade do vento, já que o intercâmbio convectivo aumenta consideravelmente aquecendo o radiador. Assim, é recomendável colocar telas de vento nos radiadores.
- A eficiência dos radiadores que, por sua vez, depende: do tipo de fluido, do diâmetro dos tubos interiores e da vazão do fluido.
- O tipo de armazenamento térmico.
- A eficiência do intercâmbio entre o armazenamento e a demanda.

## Conclusões

---

As técnicas naturais de condicionamento de edifício estão fundamentadas principalmente no uso da energia solar em benefício do rendimento energético do edifício e do aproveitamento dos recursos naturais no condicionamento de espaços interiores, com potenciais de economia de alto interesse.

O aproveitamento da energia solar, particularmente, e as condições climáticas de modo geral, apresenta uma série de desvantagens em climas em que as diferenças entre as distintas estações são muito grandes. Para estes climas, deverão ser desenhadas estratégias passivas cujos benefícios no verão não prejudiquem no inverno, e vice-versa.

Do mesmo modo, no capítulo foram repassadas as aplicações proporcionadas pela utilização da energia solar passiva: aquecimento, refrigeração e iluminação, com as principais técnicas e mecanismos para otimizar seu uso.

## 4. Estudo energético teórico: simulação.

A análise energética de um edifício permite saber não apenas qual é seu comportamento durante um período de tempo determinado, mas também avaliar seu comportamento futuro. Para tanto, identifica-se o edifício como um sistema complexo que pode ser resolvido de duas maneiras: direta, através da **simulação**, e invertida, através do **monitoramento**. Um modelo de simulação é uma representação abstrata de um sistema real que permite avaliar e prever o comportamento energético de um desenho. O monitoramento é uma metodologia empírica baseada no registro de dados físicos e analisa o comportamento do sistema.

Este texto se focará nos **métodos de simulação** de edifícios, com os quais serão explicadas diferentes formas de prever teoricamente o comportamento térmico de um desenho, sob condições climáticas concretas.

A finalidade deste capítulo é dar ao leitor um leque das possibilidades existentes neste tema, escolhendo a solução mais apropriada ao problema proposto. O objetivo é obter edifícios melhores do ponto de vista energético. Dispondo de um desenho otimizado, e com o uso de materiais adequados, é possível reduzir consideravelmente o consumo energético, mantendo as condições de conforto interior.

A simulação é apresentada como um excelente apoio ao usuário, especialmente nas fases iniciais do desenho, ao permitir avaliar do ponto de vista energético as diferentes possibilidades para um problema concreto. Neste texto serão analisadas diferentes opções construtivas vendo como os programas de simulação podem ajudar no desenho.

### Avaliação energética teórica

---

A primeira pergunta que se faz na hora de realizar uma avaliação teórica é saber o que é e para que serve. Simular é representar um sistema real, através de outro mais simples, que permita analisar suas características e prever seu comportamento. Este procedimento pode ser utilizado em distintos campos: edificação, automobilismo, aeronáutico, ambiental, acústico, etc., através do uso de diferentes softwares de simulação. Para tanto, cria-se um modelo que represente o sistema real fixando desde o princípio os objetivos e as metas perseguidas. Com base nisto, estabelecem-se as condições de contorno e as limitações do sistema de equações que caracterizam o modelo.

A análise de um edifício através destes programas de simulação permite, a partir das primeiras etapas do desenho e antes da construção do mesmo, prever seu comportamento energético. Esta metodologia oferece a possibilidade de avaliar diferentes possibilidades de construção do edifício sob condições climáticas concretas, otimizando o desenho mais eficiente. Também facilita as análises de sensibilidade para avaliar os parâmetros mais influentes no edifício.

Com a simulação é possível avaliar a econômica de energia que representa cada estratégia de aproveitamento de energia solar. Para tanto, identifica-se o edifício como um sistema complexo cujos componentes são paredes, janelas, sistemas de aquecimento, refrigeração e iluminação, etc. O sistema é definido pelas propriedades térmicas e óticas de seus componentes, bem como pelas condições de contorno determinadas pelo ambiente do edifício (condições climáticas, obstáculos circundantes, etc.). As relações existentes entre as distintas partes do sistema e entre este e o meio são regidas pelas leis de transferência de calor (condução, convecção e radiação) e de massa (ventilação).

Os principais mecanismos de transferência de calor a considerar são:

- a condução através de paredes e janelas,
- a condução ao solo em sótãos e paredes enterradas,
- a convecção externa entre as superfícies exteriores e o ar exterior (normalmente forçada pelo vento),
- a convecção interna entre as superfícies interiores e o ar interior (convecção natural, devida ao aquecimento do ar por alguma fonte de calor),
- a radiação solar, ou radiação de onda curta, que costuma ser um ganho para o edifício,
- a radiação de onda larga das paredes exteriores ao céu, edifício circundantes e solo, bem como entre as paredes interiores em função de suas temperaturas.

Todos estes intercâmbios de calor estão acoplados no edifício e não podem ser calculados de forma independente. Adicionalmente, os processos de intercambio térmico dependem do tempo, devido às flutuações das excitações tanto externas, quanto internas, de modo que equações do modelo devem considerar a dependência temporal. Para poder considerar estes aspectos são utilizados programas de simulação dinâmica de edifícios, como TRNSYS, DOE-2, EnergyPlus ou Lider.

O comportamento energético de um edifício ao longo de um período de tempo pode ser simulado elaborando um modelo matemático que, através das equações gerais de transferência de calor e massa, seja capaz de reproduzir de modo fiável sua resposta sob condições reais. Para o correto funcionamento do modelo é necessário definir algumas entradas: uma série completa de dados climáticos da área, a geometria e as características térmicas do edifício.

A função matemática que descreve o modo se constrói com base em sistemas de equações acopladas, definindo suas condições de contorno. Os modelos se diferenciam entre si, basicamente, no modo de resolver estes sistemas de equações, utilizando diferentes formas de definição do sistema e usando diferentes métodos numéricos de resolução das equações.

## Métodos de simulação energética

Dentre as múltiplas classificações que podem ser feitas, optou-se por dividir os modelos de simulação em três grupos: estáticos, de correlação e dinâmicos, cobrindo assim os três níveis de complexidades apresentados na literatura.

Os métodos estáticos são os que adotam as hipóteses mais restritivas com relação ao campo de aplicação do modelo, bem como a quantidade e fiabilidade dos resultados obtidos. Os mais usados são o método de graus-dia, que permite avaliar a carga térmica dos edifícios e otimizar o desenho do invólucro, e o método bin, que é utilizado quando alguns parâmetros que definem o cálculo do consumo energético em um edifício não possam garantir um valor constante.

O método graus-dias baseia-se no cálculo de uma temperatura de balanço e sua comparação com a temperatura exterior. Têm-se necessidades de aquecimento quando a temperatura exterior é inferior à de balanço de inverno (18°C). Do mesmo modo, definem-se os graus-dia de verão mudando a temperatura de balanço a 24°C e considerando somente os termos em que a temperatura exterior é maior do que esta. Nesta estação, os resultados são menos exatos, porque o edifício pode ser ventilado considerando as janelas abertas. Este método obtém os graus-dia necessários para o cálculo das necessidades energéticas do edifício.

O principal erro cometido neste modelo, agravado no verão, é que considera um condicionamento constante e contínuo dos edifícios. Este problema é solucionado com o método estático de intervalos (método bin), no qual se realiza um cálculo semelhante, mas considerando tanto intervalos quanto situações diferentes se apresentem. Seriam obtidas  $n$  equações diferentes, uma para cada intervalo. O consumo total seria definido pela soma de todos os intervalos considerados.

Os métodos de correlação baseiam-se em simplificações obtidas a partir do estudo sistemático de diversos fenômenos, utilizando geralmente como fonte de informação os métodos mais detalhados de simulação energética de edifícios (métodos dinâmicos). Do mesmo modo, utilizam leis empíricas simples, com um caráter geral. Este tipo de programas (PASSPORT, CEV...) funcionam aceitavelmente em condições de aquecimento, mas para períodos de refrigeração apresentam sérias deficiências. Isto se deve a que é difícil extrapolar o tratamento da ventilação à leis de correlação simples. Do mesmo modo, o efeito da inércia térmica é crítico em condições de verão.

Os métodos de simulação dinâmicos são os que maior complexidade apresentam, já que requerem uma definição exaustiva do edifício e uma resolução a tempos de passagem curtos do sistema de equações concebido (normalmente de uma hora). Todos eles precisam da entrada de uma quantidade considerável de informação e, portanto, seu manuseio é complicado.

Existem vários programas válidos para calcular, de maneira dinâmica, a resposta energética do edifício. Dentre os programas mais representativos encontram-se: energy+, DOE, desenvolvidos pelo Departamento de Energia dos EUA; ESP-r, desenvolvido por vários grupos de trabalho da Comissão da União Européia, TRNSYS, desenvolvido pela Universidade de Wisconsin, PASSPORT+, LIDER de

aplicação oficial na Espanha, etc. Estes programas incluem em seus cálculos uma grande quantidade de sub-rotinas que permitem analisar componentes especiais e sistemas.

Existem dois modos básicos de resolução do problema: o *método de balanço de energia* e o *método dos fatores de ponderação*. O método de balanço de energia discretiza o volume total do edifício em volumes pequenos. Em cada uma das superfícies de contorno deste volume, propõe-se e resolve-se a equação de conservação de energia, usando métodos de aumento finitos ou diferenças finitas para resolver o sistema de equações. Alguns modelos que usam o método de balanço de energia são ESP-r, DOE, etc.

O método dos fatores de ponderação se baseia na resolução das equações diferenciais discretas concebidas na seção anterior através das transformadas Z (transformada de Laplace para sistemas contínuos). Estas funções proporcionam, para cada equação proposta, uma resolução em função de fatores de peso. Existem dois tipos. Em temperatura e em fluxos de calor.

Códigos como o S3PAS, PASSPORT+, TRNSYS, usam uma técnica mista entre os dois métodos dinâmicos explicados, propõem a equação de balanço de energia e representam os elementos constitutivos do edifício (paredes, tetos, janelas...) através de funções de transferência que utilizam posteriormente para resolver instantaneamente os sistemas de equações. Este método apresenta vantagens de tempo de calculo e, ademais, permite popularizar os métodos devido a que podem ser executados em um PC.

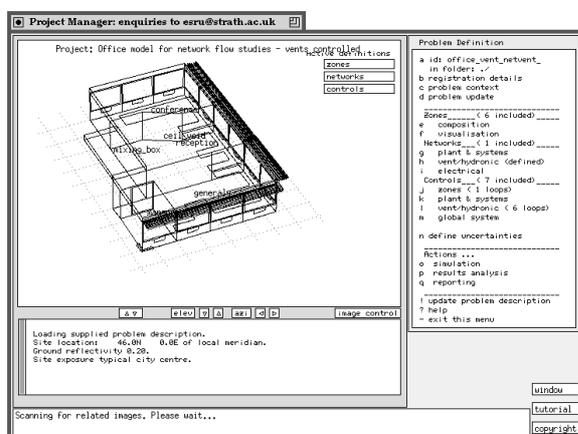


Figura 23. Interface gráfica do programa ESP-r

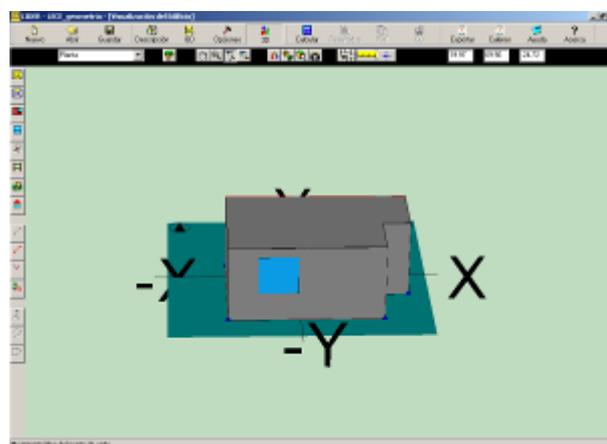


Figura 24. Interface gráfica do programa Lider

## Metodologia de um processo de simulação energética

---

A simulação de um sistema completo consta de 3 fases ou blocos:

- a *definição geométrica*, construtiva e operacional do edifício e seus sistemas, para a qual os modelos de simulação desenvolveram um software específico para edifícios.
- O *bloco de simulação*, no qual se propõe e resolve o sistema de equações que representam o edifício. Esta parte está intimamente relacionada com a definição previa.
- Por fim, o bloco de *análises de resultados*, no qual é possível obter diferentes níveis de informação, dependendo dos objetivos a serem cumpridos.

O bloco de resolução das equações (o modelo de simulação propriamente dito) diferencia a qualidade entre modelos. O fato de que alguns sejam mais utilizados do que outros se deve à simplicidade na introdução dos dados de entrada e a que a análise de resultados proporciona as saídas requeridas.

Um esquema básico de um processo de simulação segue os seguintes passos:

- Estabelecer as metas e delimitar os limites que se quer obter após a simulação do sistema.
- Escolher o programa mais adequado a nossas necessidades.
- Estudos das características do software e modelo escolhido.
- Introdução das variáveis climatologias representativas do lugar.
- Definição do período de simulação e do intervalo de tempo de passagem.
- Desenho do edifício: geometria, parâmetros construtivos, etc.
- Zoneamento de espaços com comportamento térmico idêntico.
- Horários de cargas e uso do edifício.
- Especificação dos sistemas do edifício.
- Escolha das variáveis de saída que se deseja obter.
- Simulação do sistema.
- Comprovação e interpretação dos resultados.

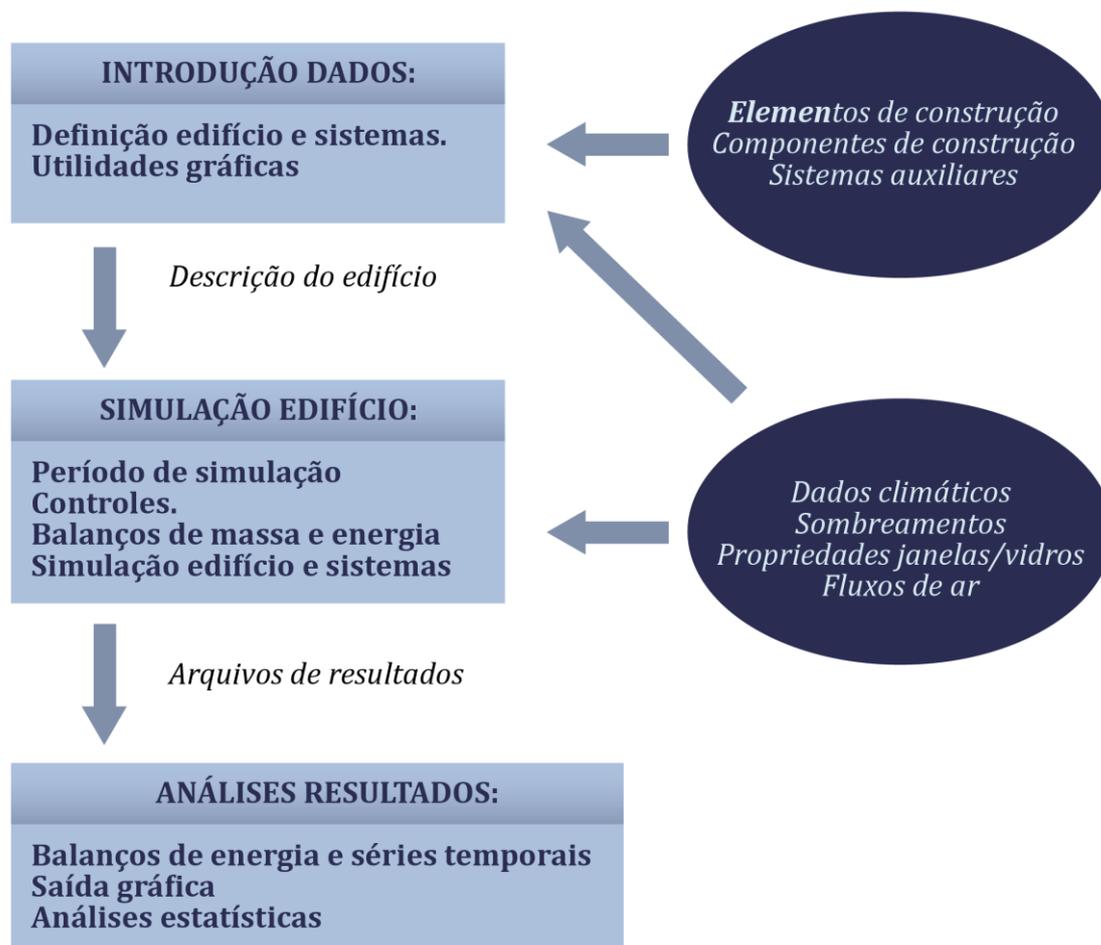


Figura 25. Processo de simulação

Os resultados obtidos pelos modelos de simulação devem ser comprovados e verificados para demonstrar sua fiabilidade e para estudar as possibilidades de aperfeiçoar sua implementação. O primeiro passo é comprovar a fiabilidade do modelo matematicamente e fisicamente, obtendo resultado coerentes. Posteriormente, será necessário validar empiricamente, verificando a bondade do modelo teórico implementado nos programas com a análise experimental do mesmo sistema. Para tanto, comparam-se os resultados obtidos com as duas metodologias.

## Conclusões

---

- A melhora da qualidade dos edifícios do ponto de vista energético não é uma tarefa estéril, já que o potencial de economia de energia convencional apresentado é muito grande e, quando aplicada de forma massiva, esta economia pode ser realmente espetacular.
- A análise energética de edifícios apresenta em suas duas vertentes (simulação e monitoramento) excelentes ferramentas que permitirão futuramente melhorar a qualidade de construção dos edifícios.
- A simulação se apresenta como um excelente apoio ao desenhador, que lhe permite, dependendo do modelo escolhido, avaliar do ponto de vista energético diferentes soluções de um mesmo problema construtivo.
- O potencial de economia representado pelo uso deste tipo de ferramentas é muito elevado.
- Para o cumprimento real da economia estimada, é preciso não apenas que o desenhador projete adequadamente, mas que o executor da obra a realize conforme o projeto.
- Para garantir a economia obtida teoricamente será necessário estimular normativas que forcem uma boa qualidade da construção. Neste sentido, o monitoramento revela-se como uma poderosa ferramenta para determinar as economias produzidas, bem como a qualidade da construção.

## 5. Avaliação energética de edifícios em condições reais de uso. Monitoramento

A avaliação energética empírica (experimental), ou Monitoramento, é realizada através da medida da resposta energética do edifício às condições exteriores, sendo utilizada em auditorias energéticas, na depuração de modelos teóricos ou na reabilitação de edifícios através de um diagnóstico de avarias.

### Metodologia do monitoramento

O Monitoramento consiste na instalação de sensores no interior e no exterior de cada edifício para realizar o acompanhamento e a coleta de dados e, através de um balanço energético, saber qual é o comportamento energético destes edifícios.

Para obter resultados fiáveis de uma campanha experimental é necessário cuidar certos detalhes, a fim de que as medidas não sejam uma mera constatação qualitativa da evolução térmica das condições interiores. Para tanto é necessário conceber uma série de passos sistemáticos que permitam obter uma série de dados úteis.

#### Conhecimento prévio

Antes de conceber um experimento concreto em um edifício é preciso saber qual é o comportamento esperado do edifício em função do clima ao qual estará submetido, bem como as características construtivas, geométricas e térmicas do mesmo.

Para tanto é necessário ter dados fiáveis do clima da zona, realizar um exame visual a fim de conhecer a localização real e evitar o que possa modificar as condições climáticas gerais da área, dispondo do projeto de execução do arquiteto para extrair as medidas e composição de paredes, janelas, teto, solo, distribuição interior, etc.



Figura 26. Passos sistemáticos para a avaliação energética experimental

Todos estes detalhes são necessários para realizar uma ANÁLISE DE SENSIBILIDADE para:

- ⚙️ 1. Otimizar o desenho passivo do edifício:

Buscar os parâmetros construtivos que tornam mais eficiente o comportamento energético (tamanho de projetores solares, espessura de isolamento, etc.)

- ⚙️ 2. Obter as variáveis mais significativas, como:

- os fluxos mais relevantes de energia (condutivos, infiltrações, radioativos...) e assim conceber os experimentos e medidas adequadas para conhecer estes fluxos.
- As variáveis que são irrelevantes ao comportamento do edifício e podem ser evitadas, economizando assim esforço humano.

### Desenho e execução experimental

Uma vez conhecida a resposta térmica do edifício sob diferentes condições e determinados quais são os fluxos energéticos críticos, é possível definir o tipo de experimentos, quantas variáveis há e com que precisão e frequência devem ser medidas.

Em condições normais o desenho do experimento deve resolver as seguintes questões:

- número, qualidade e posição dos sensores a instalar.
- Instalação de um abrigo meteorológico no edifício para saber qual é a climatologia específica.
- Frequência de leitura e de armazenamento dos dados.
- Em qual medida serão armazenados (somente medidas, ou também máximas, mínimas, desvio típico, etc.)
- Estratégias de ventilação pré-determinadas (ou de sombreamento).

Logo serão instalados os sensores e começa a funcionar a campanha de medidas executando os experimentos pré-desenhados. Armazenar de forma muito racional os dados é importante para uma correta avaliação posterior.

### Análise dos dados experimentais

Inicialmente, deve-se fazer a depuração dos dados, eliminando os erros e preenchendo as lacunas de modo a obter-se séries temporais o mais grandes possível.

O comportamento do sistema está determinado por uma série de variáveis de entrada. Estas entradas produzem saídas que são função das mesmas. No caso de um edifício, podemos considerar como entrada a potência de aquecimento e como saída a temperatura do ar.

## Modelos para o estudo analítico

No momento de analisar os valores das variáveis registradas, realizam-se diferentes análises: estudo das condições de conforto no interior através de balanços térmicos e comparação com os consumos energéticos, avaliação das condições térmicas nos dias tipo, caracterização energética do edifício através de modelos estativos e dinâmicos. Cada um destes modelos produz informação diferente, mas complementar, que será mais ou menos interessante, conforme a informação que se deseja obter.

A abstração do problema leva a um sistema físico dinâmicos com entradas e saídas: como entradas deve-se distinguir entre dinâmicas e estáticas. São dinâmicas aquelas que variam com o tempo

(radiação, temperatura, umidade relativa, velocidade do vento...) e estáticas aquelas que permanecem inalteráveis com o tempo (como as propriedades óticas e térmicas dos materiais de construção: condutividade, calor específico...). Toma-se como saída alguma variável dinâmica que dependa das entradas como, por exemplo: a temperatura interior do edifício ou de uma área concreta do mesmo. O sistema é dinâmico porque tanto as entradas, quanto as saídas, dependem do tempo. Ademais, devido à inércia do sistema, uma mudança produzida em uma das entradas, por vezes, não repercutirá imediatamente na saída, mas pode levar consigo um efeito retardado (o que podemos denominar “delay”). Matematicamente, um modelo que descreve uma resposta dinâmica deste tipo se denomina “Função de Transferência”.

Mediante técnicas de identificação e funções de transferência de séries temporais, é possível representar, por exemplo, a temperatura interior como uma função das variáveis de entrada (radiação, temperatura exterior...). Isso é, analisando as medidas experimentais poderá saber não só o que acontece no tempo de monitoramento, mas o que acontecerá no futuro.

Para a análise dos resultados experimentais foram utilizados os seguintes modelos:

#### Modelos estáticos

Estes modelos não proporcionam um conhecimento extenso, nem das características do edifício, nem de seu funcionamento, mas permite extrair uma informação fiável do comportamento do sistema. Os modelos se baseiam no comportamento médio do sistema (edifício), eliminando deste modo a parte dinâmica dos fenômenos térmicos.

Com este tipo de modelo, a partir da medida das temperaturas interior e exterior, do consumo em energia auxiliar e da radiação solar, podemos obter o coeficiente global de perdas efetivo e a abertura solar efetiva, características do edifício que permitem estimar a qualidade construtiva (UA) e a qualidade do desenho passivo com relação ao aproveitamento de energia solar (As).

Os resultados obtidos através da utilização deste modelos são:

- condições interiores de conforto.
- Valores de extrapolação de consumo a longo prazo.
- Economia de energia de alguns casos diante de outros.
- Abertura solar efetiva, o termo efetivo se refere à quantidade de energia solar que para aquecer o espaço, mas sem gerar reaquecimento no sistema.
- Coeficiente global de perdas com o exterior e com o interior do próprio edifício.

A principal deficiência estaria determinada pela falta de informação sobre a fração de carga fornecida por energia solar, já que não é possível saber quais são os principais fluxos de energia.

### Modelos dinâmicos

São mais complexos. Com eles é possível analisar o edifício com mais profundidade, mas necessitam mais dados e que se conheça melhor o comportamento experimental do edifício.

Saber qual é a informação dinâmica do sistema é *crucial em condições de verão*, já que em todos os casos os edifícios, nesta época do ano, funcionam em evolução livre e obtém-se uma série de características do edifício de grande utilidade, que servem para qualificar o edifício do ponto de visto de aproveitamento solar.

Os resultados obtidos são:

- Fluxos principais de energia
- Econômica produzida pelo aproveitamento de recursos naturais
- Melhorias no desenho do edifício
- Informação extensa do funcionamento do edifício

Tempos de atraso, sobre o conforto do edifício, do sistema de aquecimento, do ganho solar.

## Conclusões

Essencialmente, podem-se extrair as seguintes conclusões:

- Os monitoramentos realizados servem não apenas para avaliar a economia energética produzida devido ao aproveitamento da energia solar, mas também para caracterizar o edifício e torna-lo comparável com outros. Além disso, servem para deduzir se foi construído de acordo com as especificações do projeto, podendo servir como ferramenta empírica de certificação da qualidade do edifício.
- Para garantir o bom funcionamento de um desenho deve-se evitar a manipulação do usuário, pois na maioria dos casos em que a intervenção do usuário era necessária, esta não se realizava, fazendo com que excelentes desenhos não se ajustassem às expectativas esperadas.
- A intuição no desenho deve estar apoiada por cálculos para o correto dimensionamento dos componentes do edifício, ou é possível que se cometam erros importantes. O uso de códigos de simulação é de grande ajuda nesta fase.
- Com metodologias bem definidas e contrastadas, o monitoramento pode ser uma arma muito eficaz contra a construção defeituosa, porque podem ser obtidas características básicas do edifício através de uma experimentação simples e de fácil aplicação, passível de ser contrastada com as especificações do construtor, promotor ou desenho.

## 6. Integração de sistemas solares ativos em edifícios

### Introdução

Em muitos casos, quando pretende-se dotar um edifício com sistemas de energia solar, seja térmica ou fotovoltaica, estas instalações são compreendidas como um valor agregado ao edifício. Ainda que seja positivo considerar a energia solar como um valor agregado, isso é, algo que aporta valor, mas sem o qual o edifício seria o mesmo, o conceito de integração arquitetônica pretende fazer com que, pelo menos os elementos exteriores da instalação (captadores térmicos e módulos fotovoltaicos), sejam considerados como um elemento construtivo adicional dentro do edifício. Isto implicaria que a energia solar fosse incluída já nos primeiros momentos da concepção do edifício e, do mesmo modo que um arquiteto escolhe entre uma cobertura determinada com ardósia ou concreto, pode considerar utilizar módulos fotovoltaicos ou captadores térmicos.

No entanto, como com qualquer outro material construtivo, deve-se considerar seus efeitos sobre o edifício, especialmente no balanço energético do mesmo, cálculo de cargas, etc.

A integração deve ser considerada no sistema solar como um componente adicional do edifício, mas é um componente que gera energia de forma ativa e, portanto, deve ser integrado também nos sistemas convencionais.

Em todos os casos, não se pode esquecer da utilização dos sistemas passivos, do desenho de sistemas de correto aproveitamento da radiação incidente para iluminação ou para aquecer o edifício, ou do uso de sombreamento adequados e ventilação natural. Estes podem conseguir efeitos surpreendentes sobre a redução da demanda do edifício e, como é sabido, a energia que menos contamina é a que não é consumida.

Os objetivos, desse modo, serão:

- Conseguir uma adequada integração arquitetônica dos elementos da instalação.
- Desenhar os sistemas solares ativos como uma parte adicional do sistema convencional.
- Analisar a influencia da integração sobre as condições de conforto e eficiencia.
- Reduzir os custos em comparação com uma instalação não integrada.

Cada sistema solar, como cada edifício, deve ser estudado individualmente. Existem tantas soluções, quanto instalações, ainda que haja pautas gerais de aplicação comum.

Existem condicionantes que, combinados, dão a cada obra a singularidade aqui abordada e que devem ser analisados em cada caso. Por sua importância, cabe destacar o clima e a acessibilidade solar como condições do ambiente, e a ocupação de espaços, considerações estéticas e a integração com sistemas convencionais, como condições do edifício.

## Ambiente

---

Aspectos fundamentais como a quantidade de radiação solar ou a temperatura ambiente dependem do lugar em que se localizará o edifício. Mas não só influem no número de metros quadrados do captador ou do módulo que deve ser instalado para cobrir as necessidades de desenho, mas também na idoneidade do método de integração.

Por exemplo, se o lugar em que se quer realizar a instalação é uma área fria com importantes precipitações de neve, a integração horizontal sobre a cobertura plana provavelmente não será a melhor opção, já que ao cobrir-se de neve os elementos de captação serão reduzidos notavelmente nos períodos do ano com produção aceitável.

Por outro lado, a integração em fachada evitaria este problema, ao mesmo tempo em que poderia ter efeitos benéficos sobre o conforto interno. Ademais, a quantidade de radiação incidente na fachada vertical também é reduzida diante de outras inclinações.

Como comentou-se anteriormente, cada caso merece um estudo pormenorizado das vantagens e inconvenientes apresentados.

O que é comum a todos os casos é que o sul geográfico é a orientação privilegiada para a captação solar, ainda que, como será visto, desvios do sul puro tampouco têm efeitos dramáticos em todos os casos.

A acessibilidade solar é, sem dúvida, outra condicionante fundamental para o desenho. Se não se garante um mínimo de acesso solar, perde-se o propósito da instalação de sistemas solares. Outra análise consiste na carência de possibilidade de receber o Sol, se é por fatores interno ou por fatores externos, em muitos casos dependentes de um ambiente urbano concebido pensando-se mais no aproveitamento do espaço do que no que fazer com esse espaço habitável.

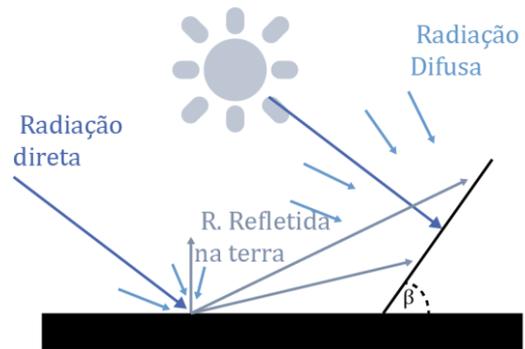
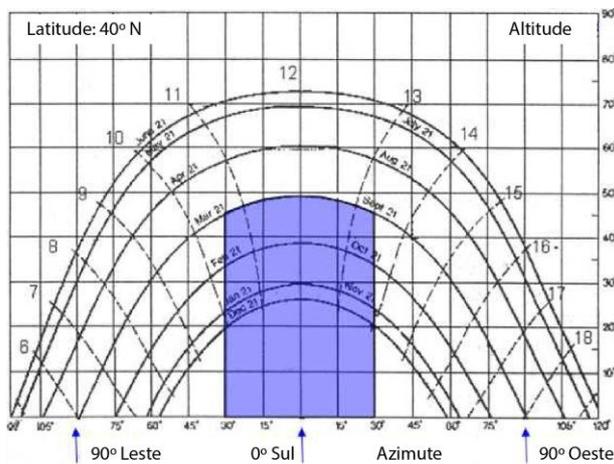


Figura 27. Cálculo de sombras (Fonte: CIEMAT)

## Cálculo de sombras

O estudo da acessibilidade solar deve incluir os dois aspectos. Em primeiro lugar deve-se fazer um estudo das sombras projetadas pelos edifícios ou outras obstruções do meio. Existem diversos métodos para realizar esta análise, como programas de simulação que calculam as sombras projetadas sobre o edifício durante as 8760 horas do ano, ou o uso de cartas solares com as quais é possível estudar situações determinadas de alto interesse.

## Edifício

Também é importante fazer um estudo das sombras projetadas por todos os elementos do edifício. Em alguns casos ocorrem situações nas quais cornijas, cabines, torres de resfriamento, etc., projetam sombras sobre os captadores solares durante a maior parte do ano. Mais incongruente, se é possível, é ver filas de captadores que fazem sombra uns sobre outros.

Por outro lado, no momento de realizar o desenho de um edifício, poucos arquitetos consideram a possibilidade de incluir um sistema solar como parte das instalações. Assim, quando os usuários desejam instalá-lo posteriormente, deve-se adequar a colocação dos coletores a um imóvel que não foi desenhado para tanto, o que complica a realização. Muitos destes problemas poderiam ser solucionados com a realização de uma pré-instalação na fase de construção.

Quando se propõe a integração arquitetônica no edifício, deve-se levar em conta considerações estéticas e de eficiência. Ainda que a estética tenha um forte componente pessoal, existem pautas

que fazem com que algo seja mais ou menos atrativo. Dois dos parâmetros que mais influem sobre a eficiência são a orientação e a inclinação. Isto deve ser conjugado com os espaços disponíveis, fundamentalmente a cobertura (plana ou inclinada) e a fachada.

A prática mais comum é a instalação dos sistemas com o edifício terminado, sobrepondo camadas ao invés de realizar o projeto de arquitetura e energias alternativas de forma paralela e consecutiva. Como consequência, a imagem da configuração arquitetônica é alterada, ao mesmo tempo em que se provoca um sobre-custo devido à sobreposição de camadas.

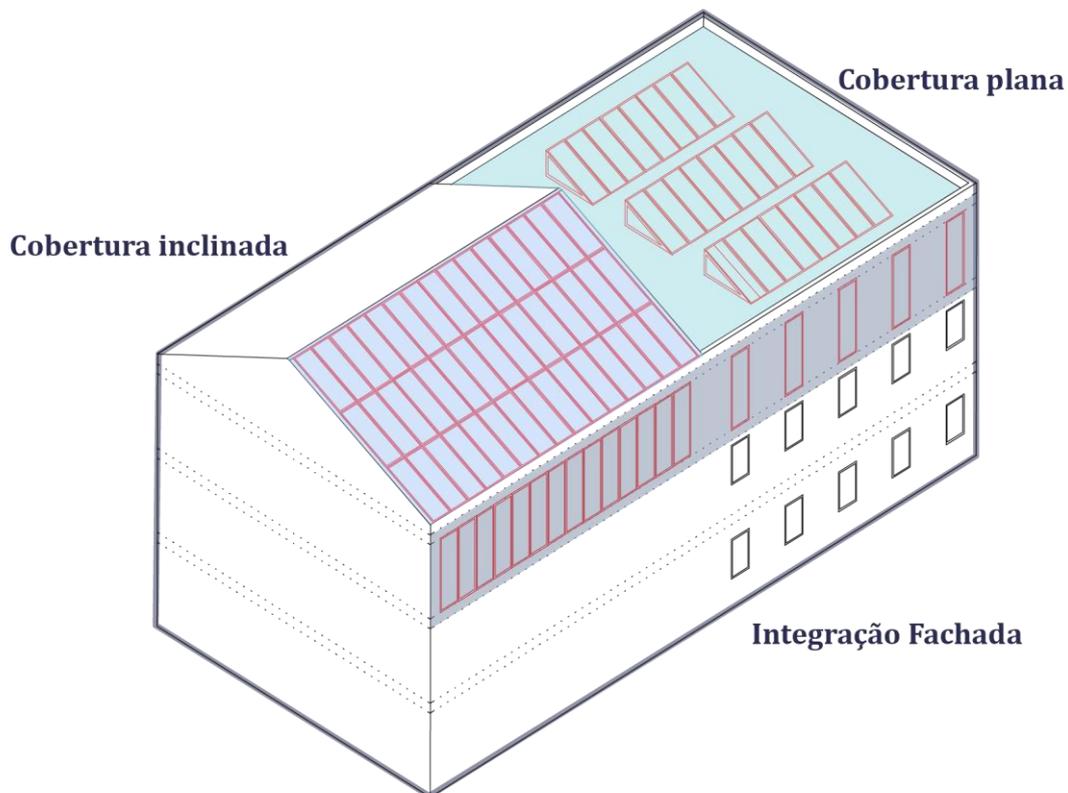


Figura 28. Disposição normal de sistemas solares (Fonte: CIEMAT)

Assim, não apenas existem limitações técnicas, mas um dos fatores mais importantes é a estética. Por mais energeticamente eficiente que seja uma instalação solar, se não se busca um resultado estético da mesma, dificilmente será realizada. Ademais, devem-se buscar soluções economicamente factíveis, de modo que à economia de energia possa somar-se a substituição de materiais convencionais.

O uso dos elementos de captação solar como sombreamento permite atuar sobre as necessidades de refrigeração do edifício, ao mesmo tempo em que joga com a luz das diferentes áreas evitando,

por exemplo, os deslumbramento produzidos pela incidência direta da radiação, conseguindo espaços de iluminação natural difusa muito mais adequados para lugares de trabalho.

A situação ideal seria poder desenhar a cobertura com as características mais adequadas para a instalação. Podendo-se dar ao campo de coletores a orientação e inclinação idôneas, conseguem-se resultados energéticos ideais. Se os captadores ou módulos são montados horizontalmente sobre uma cobertura plana, deve-se analisar e solucionar os problemas que poderiam ocorrer pela acumulação de água ou neve sobre eles.

Em todas as instalações é preciso conseguir um processo de montagem simples e que permite uma manutenção simples e econômica. Do estado da cobertura transparente depende, em alto grau, o comportamento da instalação solar, de modo que deve-se considerar no desenho a possibilidade de sua limpeza.

Quando os módulos ou os captadores estão integrados no involucro do edifício, deve-se considerar o estresse térmico que sofrerão ao longo de sua vida, e tomar as medidas oportunas (juntas de dilatação, etc.).

Através de simulações dinâmicas ao longo das 8760 horas do ano, podemos avaliar a importância dos desvios com relação ao sul geográfico, ou variações na inclinação dos captadores térmicos ou dos módulos fotovoltaicos sobre a produção energética da instalação, e quantificar em que casos vale a pena assumir estas perdas. Desta forma, é possível obter que, de modo geral, variações da inclinação dos geradores solares de 15° e 40° ensejam variações de menos de 10% na produção bruta anual em instalações típicas de edifícios. Do mesmo modo, desvios de 25° sobre o sul geográfico podem ser assumidos sem grandes consequências para a instalação.

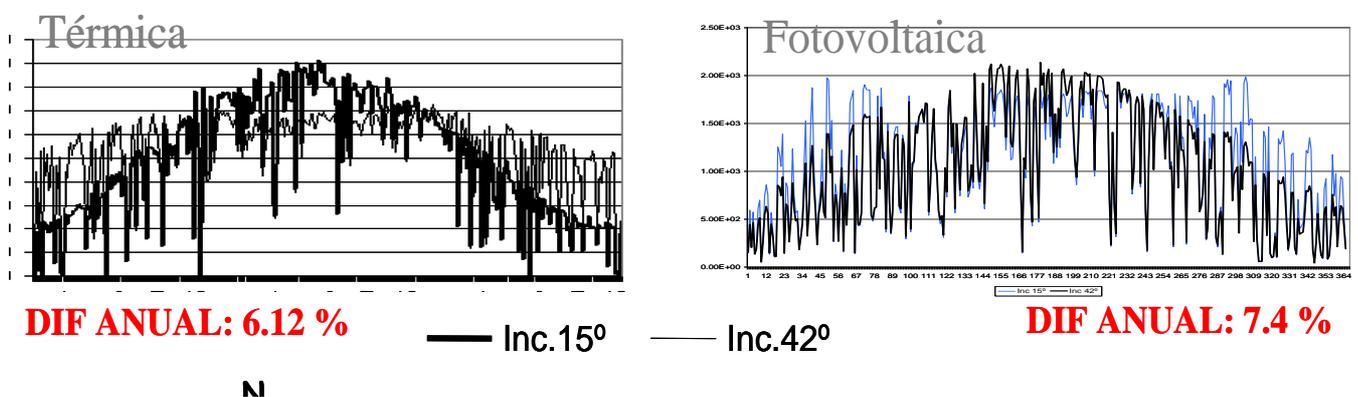


Figura 29. Exemplo da influencia da orientação e inclinação sobre a produção. (Fonte: CIEMAT)

Isto não quer dizer que não tenha sentido instalar captadores solares ou módulos fotovoltaicos em posição vertical em fachadas, ou horizontas, sobre coberturas. Do mesmo modo, é possível ter sentido utilizá-los como guarda-sóis verticais em fachadas leste ou oeste, a fim de evitar deslumbramento matinais ou vespertinos.

## Módulos fotovoltaicos

É muito importante considerar a finalidade da instalação. Não é a mesma coisa uma central fotovoltaica exclusivamente desenhada para conseguir o máximo de produção, do que um edifício cuja finalidade primordial é que o habitem pessoas. O que sim é importante em ambos os casos é um correto dimensionamento e um calculo estrito dos sistemas.

Para a integração de sistemas fotovoltaicos existe uma variada gama de produtos, do módulo opaco, que pode ser encontrado com diferentes tipos de bordas ou cores de células, a módulos semitransparentes de diferentes tecnologias ou, inclusive, telhas fotovoltaicas.

Para conseguir dispositivos fotovoltaicos com valores de corrente e tensão conformes com as necessidades de geração da maior parte das aplicações, as células se agrupam em módulos, conectando-se entre si em série e/ou paralelo. No módulo, ademais, as células estão protegidas elétrica e mecanicamente, bem como dos efeitos do tempo, porque estão inseridas em um material encapsulante (normalmente um polímero transparente chamado EVA ou etileno-vinil-acetato) e cobertas por um vidro de baixa absorção na face anterior e outro polímero isolante da umidade na face posterior (ou por outro vidro). As bordas do módulo estão seladas com uma junta de silicone e insertadas em uma moldura que normalmente é de alumínio.

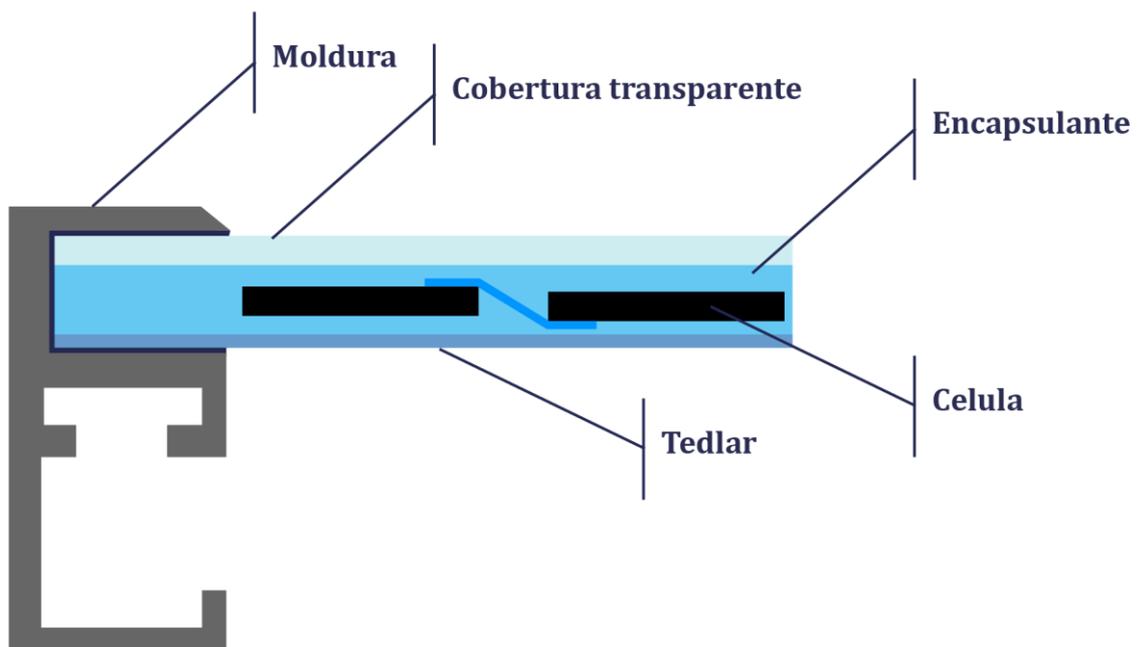


Figura 30. Composição típica de um módulo fotovoltaico

Ainda que existam módulos com diferentes tipos, o mais comum, composto de silício cristalino poderia estar constituído por entre 30 e 36 células de um tamanho entre 0.1 e 0.5 cm<sup>2</sup>, conectadas em série e com uma potencia pico de cerca de 50 ou 60Wp.

Dependendo da aplicação e dos critérios de desenho, será escolhido o tipo adequado de módulo. Pode-se optar por distintas tecnologias de módulos, atendendo a critérios de desenho, preço ou espaço disponível.

Quando utilizados módulos de silício amorfo conseguem-se superfícies de aspecto homogêneo que poderão ser opacas ou semitransparentes (até 50%). Deve-se considerar que a potência efetiva do módulo diminui ao aumentar a transmitância deste, e é preciso encontrar um equilíbrio ideal entre o grau de transparência e o rendimento elétrico.

Optando-se pela tecnologia cristalina, as células que compõem o módulo serão totalmente opacas, podendo jogar com a transparência a cor do encapsulante da face posterior das células e o espaçamento entre elas. Em muitas aplicações é comum que o fabricante atenda o pedido dos arquitetos, que podem desenhar seus módulos para integração em edifícios ou outras construções.



**Figura 31. Dois edifícios com módulos PV semitransparentes na fachada. CIEMAT**

Uma das opções é a instalação conectada à rede, na qual obtém-se ingressos derivados da venda da energia gerada. O outro tipo de instalações são os sistemas isolados, nos quais gera-se energia para autoconsumo. Normalmente estas instalações incluem um subsistema de acumulação e o lugar de sua instalação deve ser planejado no momento de desenhar o edifício, assim como se prevê a sala de caldeiras.

## Captadores solares térmicos

Existem diferentes tipos de captadores solares, mas os mais utilizados são os captadores solares de placa plana e os tubos de vácuo. Devido a que a maior parte de metros quadrados instalados

atualmente são do primeiro tipo, centrar-nos-emos nestes, ainda que a muitas ideias presentes neste documento sejam aplicáveis aos demais modelos de captador.

Um captador solar é um elemento simples, mas que deve suportar condições de trabalho muito duras (climatologia, mudanças e temperatura drásticas, etc.) e garantir uma duração no tempo maior do que dez anos, para que possam ser amortizados e consiga-se uma rentabilidade do sistema. Os captadores de alta eficiência são mais complexos e o mercado ao qual se destinam, mais reduzido.

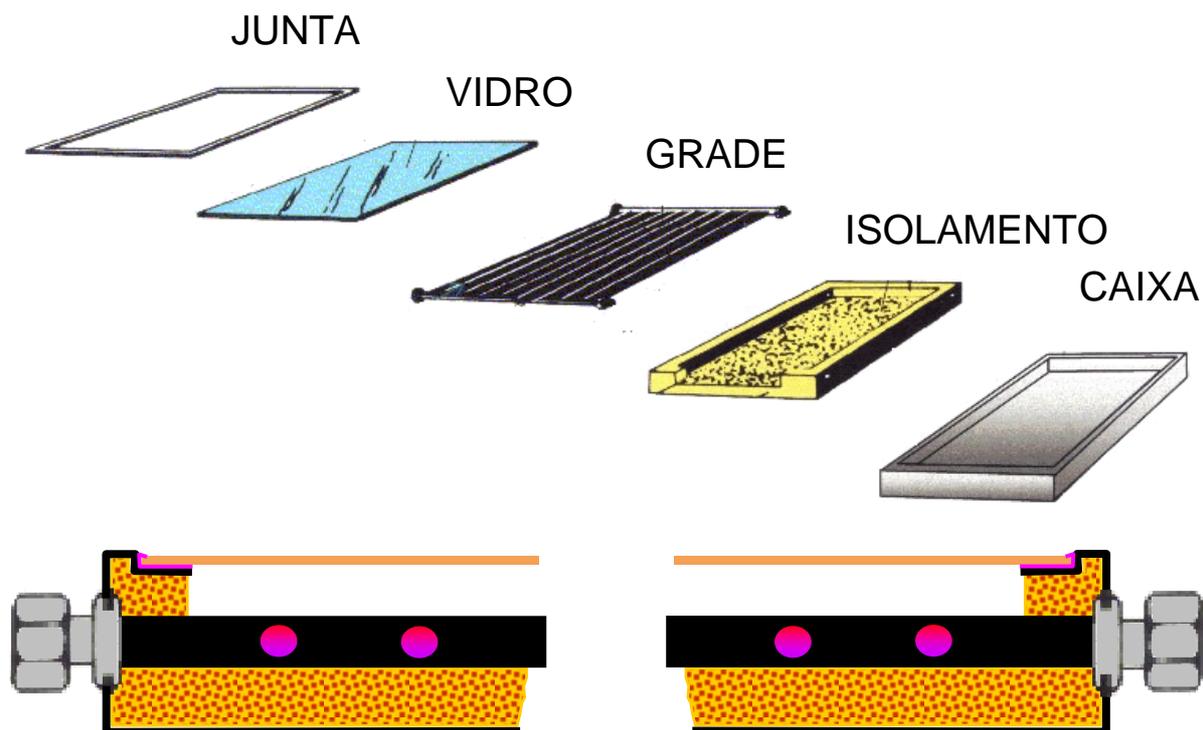


Figura 32. Diferentes partes de um captador de placa plana, CPP

Dos elementos que compõem um captador de placa plana, no momento da integração arquitetônica três são fundamentais: a caixa de embalagem, o isolamento e a cobertura transparente. Deve-se saber qual é sua composição e características para evitar complicações no processo de integração.

Os materiais mais utilizados como isolantes do absorvente costumam ser fibras de vidro e lã mineral. Ambas aguentam altas temperaturas, considerando que a lã mineral possui menos condutividade. Na prática, utiliza-se uma lamina impermeável entre o absorvente e o isolamento para evitar a umidade. Ademais, costuma-se ser de tipo reflexivo (lamina de alumínio) para reduzir as perdas de radiação no caso de existir uma pequena câmara de ar entre absorvente e isolante.

Material	Condutividade (W/m°C)	Temperatura máxima
<b>Poliestireno extrudido</b>	0.030	80° C
<b>Lã mineral</b>	0.040	450° C
<b>Fibra de vidro</b>	0.053	430° C
<b>Espuma rígida de poliuretano</b>	0.029-0.030	90 a 110° C

Tabela 5: Propriedades de materiais isolantes

O materiais mais utilizados como cobertura transparente são o vidro e alguns plásticos, sendo o vidro utilizado na maioria dos captadores. Nem todos os vidros são aplicáveis, este deve ter determinadas características para melhorar sua eficiência, como um baixo conteúdo em sais de ferro para aumentar a transmitância e que esteja temperado a fim de melhorar suas propriedades mecânicas.

<b>Vidro</b>	Vantagens	{ baixo conteúdo de sais de ferro, temperado.
	Desvantagens	{ peso, fragilidade, condutividade térmica.
<b>Plásticos</b>	Vantagens	{ Menor peso, menor fragilidade, menor condutividade térmica.
	Desvantagens	{ coeficiente de dilatação linear elevado, má resistência à temperaturas, instabilidade química, deterioração diante da radiação ultravioleta.

#### Características de materiais de cobertura transparente.

A caixa sustenta o absorvente, o isolamento e a cobertura transparente, conseguindo fazer com que o captador seja um elemento compacto. Suas dimensões, peso, desenho, tipo de conexões, etc., são fundamentais para conseguir um bom resultado com relação a sua integração no edifício no qual se localizam.

A caixa deve ser rígida, resistente à corrosão em condições exteriores e contemplar proteção contra as dilatações provocadas por variações de temperatura. Os materiais mais utilizados são o alumínio e o aço galvanizado, ainda que também se utilizem aço inoxidável, plásticos, madeira e, em desenhos especiais, os próprios da construção do edifício (concreto ou tijolos).

## Influencia sobre o conforto da integração de sistemas solares ativos

---

Deve-se considerar que integrar sistemas ativos ao involucro do edifício pode influenciar nas condições de conforto do mesmo. Em algumas ocasiões, as consequências podem ser positivas para alguns usos, e negativas para outros.

Um exemplo dá-se com a integração de captadores solares planos na fachada de um edifício de moradias. Neste caso, teremos como parte do fechamento um sistema ativo que pode alcançar temperatura de 60 ou 80°C em operação, e muito superiores quando parado. Esta situação pode contribuir para cobrir parte da demanda de aquecimento, mas sem dúvida aumentara a refrigeração.

Uma análise dos resultados através do balanço energético do edifício permitira saber qual é o resultado da integração e adotar as medidas necessárias. Se o aumento de consumo de refrigeração é maior do que a redução em aquecimento, será necessário evitar essa situação. Na maioria dos casos é melhor adotas medidas passivas como, por exemplo, ter uma câmara de ar ventilada que permita evacuar o ar quente não desejado no verão para recuperá-lo no inverno.

## Aplicações térmicas mais comuns em edifícios

---

As aplicações em que se podem utilizar a energia solar térmica aumentaram com o passar do tempo e com a eficiência dos captadores. Em principio somente era utilizado para aquecer a água de uso sanitário, mas cada vez mais se utilizam como sistema de aquecimento em piscinas (nas quais o rendimento das instalações solares é excelente) ou em um campo mais inovador como o da refrigeração solar. Existem outras aplicações dos sistemas solares térmicos utilizados em processos produtivos e agrícolas, mas este tema se centra naquelas que podem ser encontradas em edifícios residenciais ou escritórios.

### Água quente sanitária

---

A aplicação mais conhecida e implantada para os sistemas solares térmicos é o aquecimento da água sanitária (ACS) necessária nos edifícios. A temperatura que requer o ACS é de cerca de 45°C, ideal para conseguir um bom rendimento dos captadores solares. O uso anual desta aplicação obriga a utilizar os captadores que trabalham bem durante todo o ano (poucas perdas) a uma temperatura de trabalho do fluido de transferência de calor de aproximadamente 60°C. Os CPP são os mais utilizados para estas aplicações, somente recorrendo a captadores mais eficiente quando as condições climáticas são muito adversas.

Existe uma grande variedade de configurações em função das aplicações concretas e do tamanho da instalação:

- Instalações pequenas (unifamiliares).
- Instalações grandes de ACS (hospitais, hotéis, etc.).
- Instalações de moradias multifamiliares. Configuração com acumulação central e caldeira mural individual.
- Instalações de moradias multifamiliares. Configuração com acumulação central e aquecimento individual.

## Aquecimento

Na aquecimento pode-se optar por dois sistemas. Em primeiro lugar, por utilizá-lo como pré-aquecimento de um sistema convencional que use um fluido de transporte do calor (fan-coil, radiadores convencionais), ou utilizar todo o potencial do sistema solar térmico com a instalação de um solo radiante.

O solo radiante utiliza água a baixa temperatura (entre 35°C e 45°C), o que o torna ideal para os sistemas solares térmicos. Este é um sistema de aquecimento utilizado para distribuição e calor, tubos de polietileno reticulados embutidos na camada de argamassa que se encontra sob o solo de uma edificação pela qual circula água quente. O calor da água se transmite ao solo através dos condutos e o solo, por sua vez, cede calor ao ambiente.

Por dispor de uma grande superfície de radiação, a temperatura da água é muito menor do que no caso de radiadores nos quais a superfície quente é menor.

A temperatura de impulsão do circuito do solo radiante é de 42°C e a de retorno é de 34°C. A radiação emitida ao ambiente interior do edifício está em torno de 60W/m<sup>2</sup>, dependendo das condições de temperatura interior.

Algumas das características de uma instalação de solo radiante são:

- O aquecimento pelo solo radiante é auto-regulável. O fenômeno de auto-regulação representa uma grande economia de energia, porque o calor é radiado somente onde é necessário. Se a temperatura do habitáculo aumenta a vários graus, o salto térmico é reduzido na mesma proporção. De forma natural e imediata, a energia consumida na aquecimento por radiação é reduzida de um valor nominal de 60 a cerca de 35W/m<sup>2</sup> ou menos.

- A massa de uma placa de concreto pode ser utilizada como armazém de calor. Este armazenamento de calor pode alimentar o edifício durante um tempo quando a energia não está disponível, como costuma acontecer nos sistemas solares térmicos.
- A distribuição de temperaturas conseguida na sala, mantendo uma maior temperatura no nível do solo e reduzindo-a com a altura. Deste modo, não se aproveita a energia aquecendo desnecessariamente a parte alta da estância. Isto significa que o solo radiante também é um sistema muito adequado para o aquecimento de lugares altos.
- O solo radiante é o sistema de aquecimento que melhor se ajusta às condições de bem estar térmico estabelecidas no RITE em sua ITE 02.2.1, com relação ao gradiente térmico, conforme a altura e velocidade de circulação do ar.
- A montagem do Solo Radiante é realizada durante a construção ou reabilitação da moradia. Uma vez levantada a partição.

Quando se utiliza um sistema solar térmico para um solo radiante, também é utilizado para a produção de ACS, de modo que devem utilizar-se dois acumuladores, um para cada instalação (ou dois permutadores em um acumulador no circuito primário). O mercado oferece diferentes soluções para um uso misto de aquecimento e ACS.

Deve-se ter em conta que no caso de instalações mistas de aquecimento e ACS é preciso dar prioridade à produção de ACS sobre o aquecimento.

## Aquecimento das piscinas

Outra aplicação amplamente difundida é o aquecimento de piscinas. Uma piscina requer geralmente que se mantenha a temperatura da água em torno de 25°C a 28°C.

Uma piscina descoberta não aquecida tem um ciclo anual de temperatura que varia conforme o clima e a localização geográfica. Na maior parte dos casos, a atividade das piscinas descobertas limita-se aos três meses de verão. Aquecendo a água com uma instalação solar é possível alargar a utilização até cinco ou seis meses. Neste caso, utilizam-se principalmente captadores de polipropileno sem cobertura transparente pelos quais circula a água da piscina, pois as perdas são pequenas devido à temperatura do fluido de transferência de calor (inferior a 28°C) e às condições climática benéficas quando se requer o uso da piscina.

Instalações solares parecidas podem ser utilizadas também para aquecer as piscinas cobertas. Obviamente, já que as piscinas cobertas são utilizadas todo o ano, é preciso que o sistema solar sempre esteja acompanhado de um sistema de aquecimento tradicional, ou que se utilizem captadores solares com maior eficiência como os CPP.

Para a circulação do fluido através dos captadores é possível utilizar-se a bomba da depuradora ou dispor de outra exclusivamente para o ciclo solar. O uso da bomba da depuradora diminui o custo da instalação, mas implica que a bomba esteja funcionando ainda que não seja necessária a depuração

a água, enquanto uma bomba independente para o sistema costuma necessitar uma menor potência e, portanto, menor consumo.

Outra possibilidade é acoplar a piscina como outra aplicação a um sistema solar térmico utilizado para ACS e aquecimento. Esta possibilidade é muito interessante, já que o sistema poderia utilizar o aquecimento da piscina como segurança para evitar o superaquecimento nos meses de maior radiação solar e menores perdas.

## Refrigeração solar

Nos últimos anos as necessidades de refrigeração nos edifícios aumentaram, tanto por uma maior exigência nas condições de conforto, quanto pelo aumento das cargas térmicas. Como a maior parte dos consumos de refrigeração são abastecidos com equipamentos acionados por eletricidade, o aumento da demanda está provocando picos de carga consideráveis nas redes elétricas.

Atualmente existe tecnologia cuja viabilidade foi demonstrada tecnicamente para produzir refrigeração através de energia solar. Além das vantagens ambientais inerentes ao uso dessa fonte energética, cabe destacar a coincidência entre a máxima demanda e a máxima radiação solar.

Geralmente é um sistema que se complementa muito bem com as necessidades de refrigeração, pois quanto maior é a necessidade de refrigeração, maior é a radiação solar disponível. Sua utilização de forma geral permitirá durante os meses de verão reduzir os picos de consumo que tantos problemas geram às redes de distribuição elétrica.

A máquina de absorção é uma bomba de calor, isso é, um equipamento que permite traspasar o calor a partir de uma fonte com baixa temperatura a outra fonte com maior temperatura, com um pequeno consumo de energia adicional. Com estes sistemas se resfria uma zona (interior de um edifício) retirando o calor a outra que possua maior temperatura (exterior ao edifício). Na máquina de absorção um absorvente químico (LiBr) e um gerador térmico substituem a função do compressor por uma bomba para proporcionar a troca de pressão. Prescindindo do compressor, o consumo elétrico descende de maneira importante.



Figura 33. Foto de máquina de absorção

Os ciclos de absorção funcionam com um par de fluidos com afinidade físicoquímica, na qual uma das substâncias se dissolve na outra. Produzi-se o resfriamento secando uma das duas substâncias da solução através da aplicação de calor (separando os dois fluidos) e, logo, reabsorvendo-a na solução.

Os dois pares de refrigerantes mais usados são:

- Brometo de lítio – água: brometo de lítio como substância absorvente e água como refrigerante.
- Amoníaco – água: a água como absorvente e o amoníaco como refrigerante.

A temperatura de ativação da absorção nos sistemas de simples efeito está entre 80°C e 95°C. O coeficiente de rendimento de uma máquina de absorção é de 0.7, isso é, a energia de refrigeração útil é obtida através do sistema solar térmico em 70%.

As máquinas de absorção requerem um sistema para dissipar ao exterior o calor absorvido pela dissolução refrigerante-absorvente. A dissipação pode ser produzida através de uma torre de refrigeração, através da cessão de calor ao solo (tubos enterrados) ou por cessão de calor a uma piscina. Existem também modelos de pequena potência que dissipam o calor através de aerotermos.

## Conclusões

As técnicas naturais de condicionamento de edifícios representam uma grande economia energética, mas geralmente não podem isoladamente alcançar os requerimento de conforto estabelecidos como padrão. Para atingir estes requerimento é possível recorrer a sistemas convencionais de abastecimento energético ou, como se propõe no presente capítulo, podem-se integrar sistemas solares ativos aos edifícios.

A integração deve considerar o sistema solar como um componente adicional do edifício, mas é um componente que gera energia de forma ativa e, portanto, deve ser integrado também aos sistemas convencionais. Para integrar estes elementos e sistemas, os objetivos devem ser:

- conseguir uma adequada integração arquitetônica dos elementos na instalação, considerando a disposição dos sistemas em cobertura plana, inclinada ou em fachada.
- Desenhar os sistemas solares ativos como uma parte adicional do sistema convencional.
- Analisar a influencia da integração sobre as condições de conforto e eficiência.
- Reduzir custos em comparação de uma instalação não integrada.

Para conhecer melhor estes sistemas, descrevem-se em detalhes os módulos fotovoltaicos e os captadores solares térmicos, bem como suas principais aplicações.

## Bibliografia

- ASRHAE. "Fundamentals handbook", caps. 6 y 13 (1985). American Society of Heating; Refrigerating and Air-conditioning Engineers Inc., Atlanta GA.
- BARUCH GIVONI, Man Climate and Architecture – Applied Science Publishers, Ltd – Londres 1976.
- Building-Integrated Photovoltaics, Kiss Cathcart Anders Architects, P.C. NREL Technical Monitor: Robert Farrington. NREL/TP-472-7851UC Category: 1600 DE95004056. CADDET, Technical Brochure No. 78.
- CLARKE J. et al. ESP-r A program for building energy simulation. Version 8 series. The PASSYS project. Contract JOUE-CT90-0022.CEC.
- DUFFIE, J.A. & BECKMAN, W.A. (1980). "Solar engineering of thermal processes". John Wiley & sons., New York NY.
- Fanger, P.O.L. Thermal Comfort Analysis and applications in environmental engineering. MacGraw Hill N.Y. 1970.
- GUEYMARD, C. (1987). "An isotropic solar irradiance model for tilted surfaces and its comparison with selected engineering algorithms". Solar Energy 38, pags. 367-386.
- HAY, J.E. & MCKAY, D.C. (1985). "Estimating solar irradiance on inclined surfaces: A review and assessment of methodologies". Solar Energy 3, pags. 203-240.
- HERAS, M.R.; MARCO, J.: "Comportamiento Energético de Edificios Solares Pasivos. Plan de Monitorización del Instituto de Energías Renovables". Ed .CIEMAT. Madrid 1990.
- HERAS, M.R.; MARCO, J.: "Informe final de las viviendas experimentales para el aprovechamiento pasivo de la Energía Solar en Alpera (Albacete)". Informe Final Técnico: IER-R2A01-IT-ESP-02-0. Oct. 1990.
- HERAS, M.R.; SAN ISIDRO, M.J.; ZARZALEJO, L; JIMENEZ, M. J. "Meduca Project. Energetic Evaluation of UAL building". (Final Report)". Informe Técnico: DER-ESE-AECED-46114-IT-1-0, 18-4-01.
- IEA CADDET Renewable Energy Technologies, Mini-Review of Active (Thermal) Solar Energy 1995' CADDET Renewable Energy Centre, ETSU, Harwell, Didcot, Oxon OX11 0RA, United Kingdom, (1996).
- IEA. task IV – "Development of a inSolation handbook and instrumental package. An introduction to meteorological measurements and data handling for solar energy applications". DOE/ER-0084, U.S. Department of Energy. Washington D.C. 1980.

- INGERSOL, L.R., Zobal, O.J (1954). "Heat conduction with engineering, geological and other applications". Revised edition, Madison, WI, University of Wisconsin Press.
- IQBAL, M. (1983). "An introduction to solar radiation". Academic Press, Toronto.
- JIMÉNEZ, M.J.; SAN JUAN C. FERRER J.A. OLMEDO R. HERAS M.R. "Diseño de la monitorización del cielo. Propuesta inicial de sensores y puntos de medida." Informe ARFRISOL. 2006.
- LEFEBVRE, D.G. (1994). "Fundamentos sobre clima y arquitectura: II Transferencia energética". Curso energía solar en la edificación. IER-CIEMAT.
- MARCO, J. Y M.R. HERAS. "Experiencia española en la evaluación energética de edificios solares pasivos". Rev. Montajes e Instalaciones. Marzo 1992. pp 105-114.
- SAN ISIDRO, M.J.; ZARZALEJO, L.F.; HERAS, M.R: "Barrio Goya Project (Thermie Program) Energetic Evaluation of Barrio Goya Buildings (Final Report)" Informe Técnico: DER-ESE-AECED-46111-IT-1-1, 10-5-01.
- Serra, R.: Clima, Lugar y Arquitectura. Manual de Diseño Bioclimático" Ediciones CIEMAT – Madrid 1989.
- Solar Energy R&D in the European Community. Series A. Volume 6. Solar Collectors. Test Methods and Design Guidelines.
- T. R. Sharpe, C.D. Porteous and W.J.K. MacGregor, Integrated solar thermal upgrading of multi-storey housing blocks in Glasgow, Environmentally friendly cities, Proceedings of PLEA '98, Lisbon, Portugal, June 1998, pgs 287-290, James & James Science Publishers Ltd. (1998).
- T.Müller, W.Wagner, M.Köhl, B.Orel, K.Höfler: Colourface-Coloured Facades for Solar Heating System and Building Insulation.
- Varios autores: La Energía Solar en la Edificación – Editorial CIEMAT – 2005.
- Victor Olgyay: Arquitectura y Clima: Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas. Editorial Gustavo Gili, Barcelona, 1998.

- Jorge Alberto Rosas-Flores, Dionicio Rosas-Flores, David Morillón Gálvez, Saturation, energy consumption, CO2 emission and energy efficiency from urban and rural households appliances in Mexico, Energy and Buildings, Volume 43, Issue 1, January 2011, Pages 10-18, ISSN 0378-7788, 10.1016/j.enbuild.2010.08.020.
- Gaudy Bravo, Eduardo González, Thermal comfort in naturally ventilated spaces and under indirect evaporative passive cooling conditions in hot–humid climate, Energy and Buildings, Volume 63, August 2013, Pages 79-86, ISSN 0378-7788, 10.1016/j.enbuild.2013.03.007.
- A.P. Melo, D. Cóstola, R. Lamberts, J.L.M. Hensen, Assessing the accuracy of a simplified building energy simulation model using BESTEST: The case study of Brazilian regulation, Energy and Buildings, Volume 45, February 2012, Pages 219-228, ISSN 0378-7788, 10.1016/j.enbuild.2011.11.007.

## Links da Web

- <[http:// www.codigotecnico.org/](http://www.codigotecnico.org/)>. Página web del Código Técnico para la Edificación.
- <[http://www.eere.energy.gov/buildings/tools\\_directory/](http://www.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/)>. Página web del US Department of Energy.
- <<http://www.ibpsa.org/>>. Página web del Internacional Building Performance Simulation Association (IBPSA).
- <<http://www.idae.es/>>. Página web del Instituto para la Diversificación y Ahorro Energético (IDAE).
- <[http:// www.ciemat.es/](http://www.ciemat.es/)>. Página web del Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT).

## Índice de figuras

Tabela 1: propriedades termofísicas de materiais diferentes .....	24
Tabela 2: Valores da razão metabólica e eficiência mecânica.....	29
Tabela 3: Valores de coeficientes que influenciam na condução para diferentes tipos de vestimenta .....	31
Tabela 4: Níveis de conforto conforme o PMV de Fanger .....	32
Tabela 5: Propriedades de materiais isolantes .....	80

---

Figura 1. Equação do tempo em minutos (tempo em minutos (E)/dia juliano (n) (Fonte: CIEMAT) ...	11
Figura 2. Ângulos zenitais e azimutais solares. (Fonte: CIEMAT).....	12
Figura 3. Variação da constante solar Ics ao longo do ano. (Fonte: CIEMAT) .....	13
Figura 4. Diagrama psicométrico a nível do mar. ....	18
Figura 5. Exemplo de temperatura de solo para distintas profundidades (Fonte: CIEMAT).....	19
Figura 6. Transferência de energia em um sólido (Fonte: CIEMAT) .....	21
Figura 7. Transferência convectiva(Fonte: CIEMAT).....	22
Figura 8. Desfase/amortização através de uma parede de onda térmica (Fonte: CIEMAT) .....	27
Figura 9. Efeito comparativo de distintas características inerciais (Fonte: CIEMAT) .....	28
Figura 10. Evolução do PPD segundo o valor do PMV (Fonte: CIEMAT).....	33
Figura 11. Carta Bioclimática de Givoni. ....	34
Figura 12. Captação solar em função do ângulo de incidência solar segunda as estações (Fonte: CIEMAT) .....	42
Figura 13. Absorção e reflexão da radiação solar incidente (Fonte: CIEMAT).....	43
Figura 14. Funcionamento de uma estufa (Fonte: CIEMAT).....	45
Figura 15. Esquema de parede de trombe (Fonte: CIEMAT) .....	46
Figura 16. Moradias de Proteção Oficial de Aguilar de Campo (Palencia), com átrio envidraçado com abertura superior (Fonte: CIEMAT).....	49
Figura 17. Incidência solar horaria (hemisfério norte) (Fonte: CIEMAT) .....	51
Figura 18. Ventilação simples (Fonte: CIEMAT) .....	53
Figura 19. Ventilação cruzada (Fonte: CIEMAT).....	53
Figura 20. Efeito chaminé (Fonte: CIEMAT) .....	54

Figura 21. Chaminé solar experimental com inercia térmica instalada no Laboratório de Ensaios de Componentes de Edificação (PSA, Almería) para caracterização energética destes sistemas.....	55
Figura 22. Bloco de moradias no Oeste de San Fermín (Madri) com chaminés solares integradas na fachada oeste. (Fonte: CIEMAT) .....	55
Figura 23. Interface gráfica do programa ESP-r .....	63
Figura 24. Interface gráfica do programa Lider .....	63
Figura 25. Processo de simulação .....	65
Figura 26. Passos sistemáticos para a avaliação energética experimental .....	68
Figura 27. Cálculo de sombras (Fonte: CIEMAT).....	74
Figura 28. Disposição normal de sistemas solares (Fonte: CIEMAT) .....	75
Figura 29. Exemplo da influencia da orientação e inclinação sobre a produção. (Fonte: CIEMAT) .....	76
Figura 30. Composição típica de um módulo fotovoltaico .....	77
Figura 31. Dois edifícios com módulos PV semitransparentes na fachada. CIEMAT .....	78
Figura 32. Diferentes partes de um captador de placa plana, CPP.....	79
Figura 33. Foto de maquina de absorção.....	85

*Ferrer, J.A., Garrido, A. (2013). Eficiência Energética em Edifícios*