

LUÍS SÉRGIO WILKE MÜHLEN

Balanço térmico de edifício com coletor solar térmico na fachada

Monografia apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São  
Paulo para obtenção do título de  
Especialista em Energias Renováveis,  
Geração Distribuída e Eficiência  
Energética.

São Paulo

2017

LUÍS SÉRGIO WILKE MÜHLEN

## Balanço térmico de edifício com coletor solar térmico na fachada

Monografia apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São  
Paulo para obtenção do título de  
Especialista em Energias Renováveis,  
Geração Distribuída e Eficiência  
Energética.

Área de concentração:

Energias renováveis

Orientador:

Prof. Dr. Daniel Setrak Sowmy

São Paulo

2017

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Daniel Setrak Sowmy pelas aulas excepcionais e diferenciadas apresentadas durante o curso, além da orientação para a elaboração desta monografia.

Agradeço à minha família por me dar o apoio necessário para fazer este curso de especialização.

Agradeço à Mariana por ficar ao meu lado durante a elaboração deste texto, apesar de não me ajudar a escrever este agradecimento.

## RESUMO

Esta monografia apresenta uma análise de sensibilidade monoparamétrica aplicada a um sistema de aquecimento solar de água para banho instalado em um prédio residencial fictício localizado na cidade de São Paulo, com coletores de fachada. A análise foi centrada em parâmetros relacionados ao desempenho do sistema solar, comparados entre si por meio do fator solar; e relacionados ao conforto térmico nos apartamentos, com comparação feita por meio da alteração na carga térmica sensível e por meio de um fator de conforto térmico derivado do PMV. As simulações foram feitas usando o software TRNSYS16 e dados meteorológicos no formato TMY2. Concluiu-se haver forte dependência da fonte dos dados meteorológicos e forte queda no fator solar por conta do posicionamento vertical dos coletores. A área de coletor e a eficiência dos mesmos tiveram impactos intermediários, enquanto que as características do reservatório não interferiram significativamente. A orientação noroeste foi a que resultou no maior fator solar. O uso de coletores desacoplados termicamente resultou em uma redução de 46% na carga térmica derivada da influência externa aos apartamentos, enquanto que coletores acoplados resultaram em um aumento significativo da carga térmica.

Palavras chave: Aquecimento solar de água. Apartamentos residenciais. Coletores para fachada. Carga térmica.

## ABSTRACT

This study presents a monoparametric sensitivity analysis applied to a domestic hot water solar system installed in a fictitious residential building located in the city of São Paulo, utilizing façade collectors. The analysis is performed for parameters related to the performance of the solar system, compared by means of the solar factor; and related to thermal comfort inside the apartments, with a comparison made by means of the alteration of the sensitive heat load and by means of a thermal comfort factor derived from the PMV. The simulations were performed with the software TRNSYS16 and with meteorological data in the TMY2 format. It was concluded that there is a strong dependency on the meteorological data utilized and a deep drop of the solar factor related to the vertical positioning of the collectors. The collector area and their efficiency amounted for intermediate impacts, while the reservoir characteristics didn't interfere significantly. The Norwest direction was found to be the one resulting in the highest solar factors. The use of thermally uncoupled collectors resulted in a 46% reduction in the thermal load portion derived from external influence on the apartments, while coupled collectors resulted in significant increase in thermal load.

**Keywords:** Water solar heating. Residential apartments. Façade collectors. Heat load.

## Sumário

1	Introdução.....	8
1.1	Perspectiva futura de crescimento da demanda .....	8
1.2	Caracterizações da energia.....	10
1.2.1	Energias renováveis .....	10
1.2.2	Energias Limpas .....	11
1.2.3	Geração distribuída.....	13
1.2.4	Otimização da demanda.....	13
1.3	Energia Solar.....	15
1.4	Verticalização, relação área do telhado por habitante .....	16
1.5	Procedimentos metodológicos .....	19
1.6	Objetivos .....	20
2	Revisão Teórica.....	21
2.1	Transferência de calor em coletores solares .....	21
2.1.1	Condução e convecção .....	22
2.1.2	Radiação .....	25
2.2	O sistema solar térmico.....	29
2.2.1	O coletor e sua eficiência.....	30
2.2.2	Reservatórios, estratificação e recomendações de volume.....	33
2.3	Consumo de água quente .....	35
2.4	Carga térmica.....	36
3	Revisão bibliográfica e Estado da Arte .....	39
3.1	Redução da carga térmica .....	42
3.2	Dimensionamento .....	44
3.3	Estética.....	46
3.4	Modelamento .....	49
3.5	Sobreaquecimento e conforto térmico .....	50
4	Modelo e simulações.....	54
4.1	Sobre o TRNSYS.....	54
4.2	Dados climáticos no formato ano padrão.....	56
4.3	O prédio a ser simulado e sua representação no TRNSYS.....	58
4.4	Simulações .....	61
5	Resultados e discussão .....	65
5.1	Simulações voltadas ao fator solar.....	65

5.2	Simulações voltadas à carga térmica e conforto .....	71
6	Considerações finais.....	77
Anexo 1	.....	80
Referências	.....	83

## 1 Introdução

A energia nos move. Esta frase é verdadeira para muitas interpretações. Pelos olhos da física clássica, pode ser vista em seu sentido literal, ao relacionar energia, massa, aceleração, força, deslocamento. Para um biólogo, a energia alimenta o metabolismo que sustenta a vida, levando à incessante busca de alimento por todos os seres vivos. Por um viés figurativo, a frase pode remeter ao desenvolvimento tecnológico da humanidade, tendo a energia um papel central nos grandes progressos das civilizações: do fogo que aquece, ilumina, derrete o metal, ao vento que mói o grão e propela as embarcações, dos motores a vapor que carregaram trens e revoluções, ao aproveitamento radioativo que alimenta usinas, submarinos, bombas e controvérsias. A energia mobiliza nações para a guerra, leva o homem ao confronto e à morte. Na ficção, o homem mais inteligente do mundo busca a fonte infinita de energia para trazer uma era de paz.

Mas para alguns a energia tem uma importância a mais, ela nos move a estudá-la, a imaginá-la, a nos especializarmos. Ela é nossa motivação, nossa carreira, nossa contribuição ao mundo. É nossa aliada e nossa inimiga, dela buscamos extrair cada ponto percentual, que representa quantias colossais de investimentos e possivelmente de retornos.

A presente monografia aborda o estudo específico do aproveitamento energético solar para o aquecimento residencial de água para banho em fachadas verticais de prédios de apartamentos por meio de análises de sensibilidade realizadas através de simulações utilizando o software TRNSYS.

### 1.1 Perspectiva futura de crescimento da demanda

Hoje, o consumo de energia de uma população é relacionado positivamente à qualidade de vida. O uso da energia está presente na busca da saúde e da longevidade, na locomoção, no conforto, na cultura e no conhecimento, na comunicação, no lazer, no trabalho. Para a tecnologia, a energia alimenta o desenvolvimento, a fabricação, o uso e o descarte. A população humana global ainda deve crescer tanto, e frações enormes ainda sofrem do que pode ser chamado gentilmente de um potencial para o desenvolvimento. Temos a ambição de aumentar o consumo energético *per capita* do mundo, mas o nosso mundo não para de crescer, por isso prevemos uma demanda energética de crescimento exponencial que, por sua vez, traz a energia à tona como um dos grandes temas atuais.



Bem ou mal, governos tentam priorizar a pauta energética, que se torna uma questão de segurança nacional. A disponibilidade energética precede e sustenta o desenvolvimento. Não se pode esperar a demanda surgir para então buscar supri-la. Quando o Brasil traça planos para os próximos cinco, dez ou vinte anos, com cenários que buscam abranger os mais distintos rumos possíveis, a certeza que se tem é que, se não for instalada a estrutura para atender à demanda energética do cenário otimista, ele não irá se concretizar.

A International Energy Agency (IEA) [1] fornece estatísticas sobre padrões de oferta e demanda de energia mundiais e regionais. Um simples olhar sobre os gráficos abaixo de evolução da demanda explicita o motivo do alarde: o consumo mundial de energia cresce e cresceu muito por décadas.

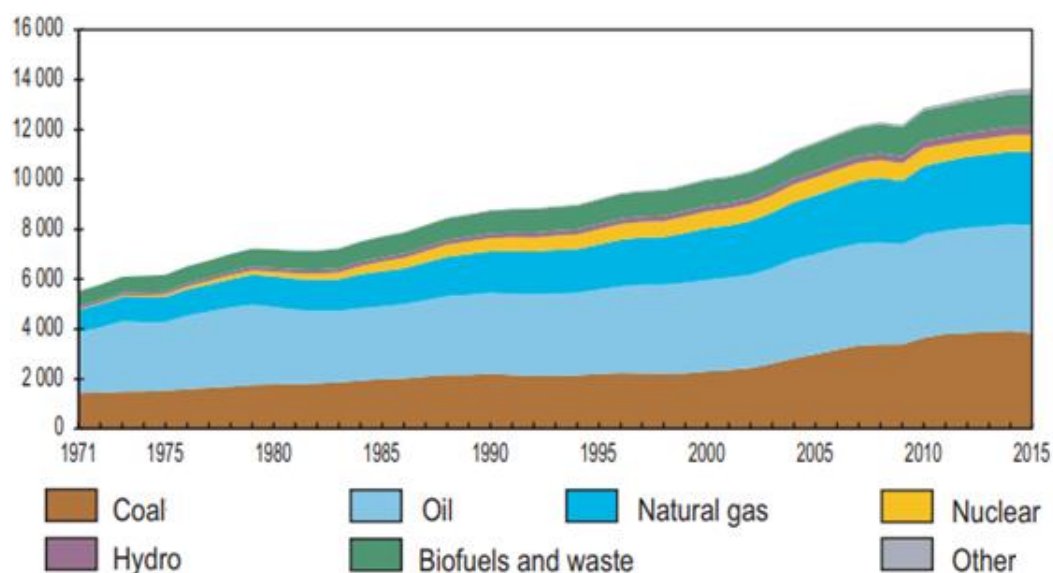


Figura 1: Consumo energético mundial primário de 1971 até 2015 por combustível [Mtoe] [1].

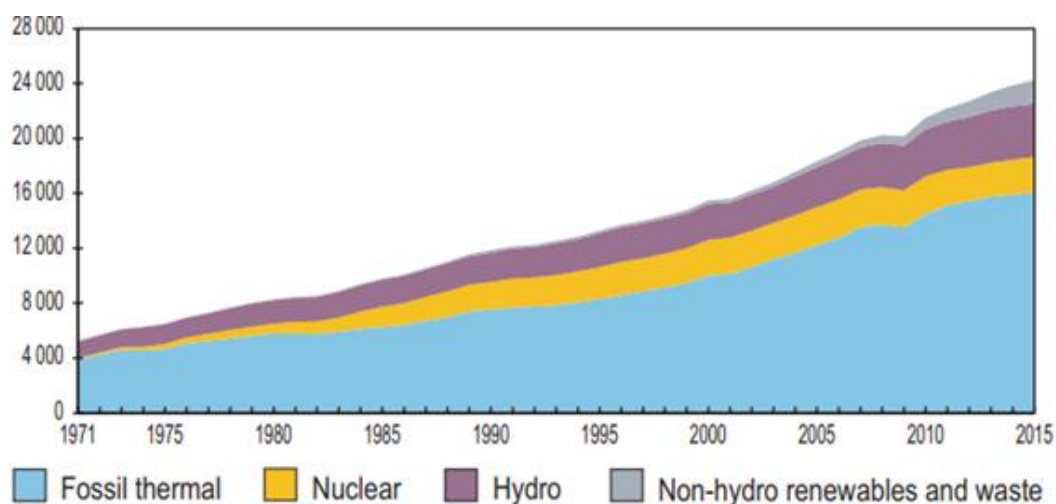


Figura 2: Geração mundial de eletricidade de 1971 até 2015 por combustível [TWh] [1].

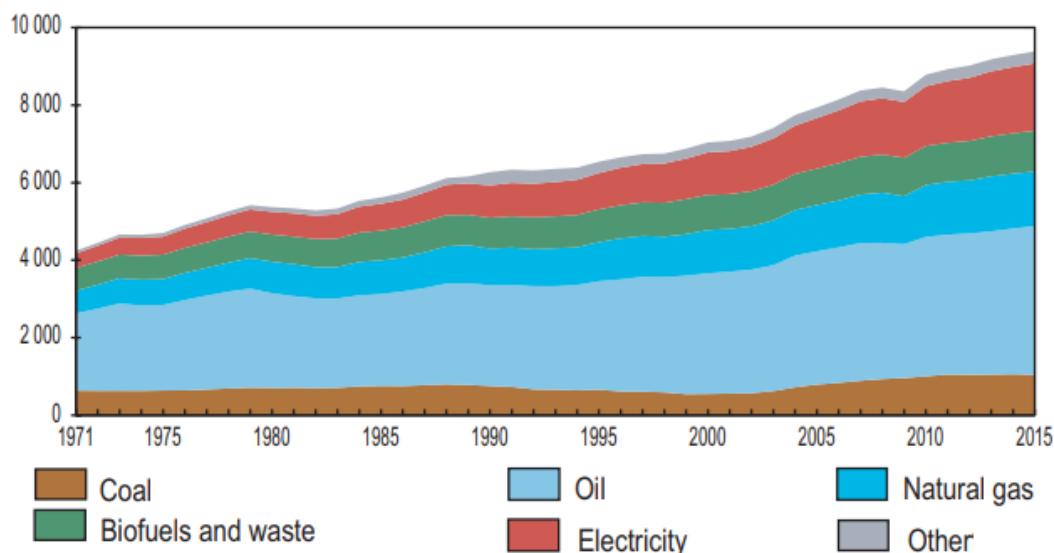


Figura 3: Consumo total final mundial entre 1971 e 2015 por combustível [Mtoe] [1].

## 1.2 Caracterizações da energia

Como se não bastasse o peso e a importância que a energia tem para a sociedade como um todo, deriva do importantíssimo discurso ecológico mais um grau de complexidade: anexamos a ela adjetivos, caracterizações. A energia passa a ser limpa, verde, renovável, fóssil, poluente, perigosa, entre tantos outros que ainda se combinam, se sinergizam, se anulam. Enquanto na termodinâmica a energia é apenas um número, um joule, que se transfere, mas não se cria ou se destrói, para o planeta a energia é uma história. De onde ela veio e para onde ela vai são questões que parecem se sobrepor à forma como ela se manifesta. Um kilowatt-hora elétrico oriundo de uma usina tem um valor econômico, moral e publicitário distinto do kilowatt-hora de outra usina, mesmo não sendo possível garantir a precedência de cada elétron que se junta a tantos outros em uma rede de transmissão; assim como são distintos os valores atribuídos aos usos destes elétrons, variando drasticamente se usados para processar bits de dados em um computador ou se para aquecer gramas de água em um chuveiro.

### 1.2.1 Energias renováveis

Temperatura, pressão e tempo são três grandezas fundamentais para a cinética química. Quando matéria orgânica de eras atrás foi exposta a ambientes de alta temperatura, altíssima pressão e doses de tempo fora de escalas intuitivamente compreensíveis por humanos, supostamente ocorreram sistemáticos rearranjos moleculares que em demais situações seriam bastante improváveis. Átomos de carbono se uniram em cadeias ordenadas, de comprimentos variáveis, cercadas de átomos de

hidrogênio, formando ligações atômicas repletas de preciosa energia química potencial, oriunda do calor emanado pelo cerne do planeta.

Quando a interferência humana toma proporções tais que se extrapolam os limites da regeneração passiva do planeta e do natural, a causa ambiental ganha força e o termo sustentabilidade é cunhado como a nobre causa que engloba a preservação do ambiente e o futuro dos nossos descendentes. É então que esses depósitos de hidrocarbonetos que alimentaram a máquina do desenvolvimento recente da civilização humana, amplamente conhecidos como combustíveis fósseis, se tornaram o exemplo mais didático da insustentabilidade pela não-renovabilidade, uma promessa de esgotamento e declínio para as gerações futuras. Não se pode contar com um combustível que leva milhões de anos para se formar.

O renovável se baseia e faz sentido para uma ordem de grandeza de tempo definida. O calor emanado pelo núcleo do planeta, oriundo de sua formação enquanto astro celeste, gradualmente se esvai. A radioatividade dos metais mais pesados da natureza se degrada em meias-vidas de eras geológicas e a perspectiva de sua escassez está para além do horizonte. Até o Sol, astro-rei do nosso cantinho do universo, não passa de uma bateria de proporções monumentais, fadada ao esgotamento pelo qual já passaram incontáveis estrelas. Ainda assim, para a escala da civilização humana, estas três fontes primárias de energia acumulada acabam definidas como renováveis: podem ser usadas sem prejudicar nossa capacidade futura de continuar usando-as. Da energia solar, em particular, deriva a energia que alimenta os ciclos hídricos, os ventos e a fotossíntese, de forma que estes processos naturais e seus derivados tornam-se também renováveis.

### 1.2.2 Energias Limpas

Mas a segurança de um estoque confiável de fontes energéticas não garante a nossa sustentabilidade. A vida, em suas manifestações individuais, está restrita a se manter e a se retroalimentar apenas em condições ambientais favoráveis e estáveis. O ser humano, singularidade da natureza, é perito no desenvolvimento de instabilidades danosas. Potencializadas pelo exponencial crescimento populacional, estas instabilidades ameaçam a nós mesmos, sendo assim não-sustentáveis. É dado destaque à poluição, que envenena, corrói e desequilibra balanços variando de ordem microbiológica a estratosférica. Entretanto, foi somente quando o dióxido de carbono, uma molécula simples e corriqueira, parte integral do ciclo da vida, se tornou um poluente crítico devido à sua crescente concentração na atmosfera, passando a ser protagonista de uma ameaça

ao equilíbrio e à sustentabilidade em escala global, que o discurso energético tomou rumos sem precedentes.

O efeito estufa, fruto de interações entre a energia solar, a atmosfera e a superfície terrestre, processo fundamental para a obtenção das condições térmicas às quais a vida em nosso planeta se moldou e se tornou dependente, está em desequilíbrio por conta de alterações na composição do ar. Polêmicas de lado, a emissão de certos gases, encabeçados pelo CO<sub>2</sub> por sua abundância e por seu papel como condição final do carbono após uma combustão, intensifica o efeito estufa, deslocando o equilíbrio que desfrutamos para um lado de maiores temperaturas globais e trazendo as temidas e malquistas mudanças climáticas.

Concretiza-se assim a caracterização dos combustíveis fósseis como insustentáveis: não renováveis e formadores de quantidades abundantes de um poluente de consequências negativas globais. Isto sem entrar no mérito das tensões econômicas e geopolíticas decorrentes da sua presença limitada a acúmulos mal distribuídos, que motivaram guerras fomentadas por disputas disfarçadas pelo viés religioso.

A sua substituição como fonte energética se tornou o pilar central da causa ambiental, com uma ressalva: a sua abundância e suas ótimas características como insumo energético não motivaram o desenvolvimento e refino de alternativas. Desencadeia-se então uma corrida para a evolução das tecnologias já conhecidas, popularizadas como fontes alternativas, para que alcancem níveis de eficiência, custos, escalas e confiabilidade suficientes para assumirem o desafio de alimentarem uma demanda brutal e sempre crescente.

Mas o adjetivo limpo atribuído às fontes de energia é relativo. Não caímos no erro de traçar linhas rígidas para questões tão complexas como o balanço ecológico, que engloba proporções tão grandes quanto se deseje alcançar. Hoje o gás natural, combustível fóssil, acúmulo de carbono isolado na crosta terrestre que retorna à atmosfera após sua queima, é visto como uma solução menos poluente. E com razão, a relação entre energia disponível por átomo de carbono no gás natural é mais favorável que a dos combustíveis fósseis mais pesados, além das concentrações muito inferiores de outros poluentes. Hidrelétricas, turbinas eólicas, painéis fotovoltaicos, turbinas maremotrizes, reatores nucleares, cultivos de biomassa: todos prejudicam o ambiente de uma forma ou de outra, seja no início ou no fim do ciclo de vida, na operação ou no fornecimento. Se hoje as referências do combustível sujo são o petróleo e o carvão, esperemos que

possamos nos dar o luxo de constantemente aumentar o rigor e gradualmente substituir cada tecnologia que temos por uma mais limpa.

### 1.2.3 Geração distribuída

Ganhos de escala são parte da estratégia para o aumento de competitividade em toda uma variedade de setores, incluindo o da energia. De turbinas e motores maiores que disfrutam de pontos de eficiência a mais, passando por sistemas mais rentáveis de distribuição e de transporte de insumos e de combustíveis, até estações transformadoras compartilhadas, a escala viabiliza os empreendimentos. Entretanto, o grande empreendimento também é o que afeta de forma mais incisiva os seus arredores: assim como a barragem de uma hidrelétrica monumental alaga regiões inteiras, as maiores usinas termelétricas e os mais extensos campos fotovoltaicos irão afetar desproporcionalmente sua vizinhança. Soma-se a isto a necessidade de posicionar-se próximo da fonte de combustível ou de uma área onde a natureza favorece a produção, e temos usinas muito distantes dos grandes centros de consumo. Para a rede elétrica isto se traduz em extensas linhas de transmissão que, ironicamente, consomem parcela dos ganhos de escala obtidos.

A geração distribuída é aquela caracterizada por sua baixa densidade espacial e pela proximidade com o consumidor final. Sua distribuição permite que o ambiente consiga absorver os impactos negativos de forma mais elástica, dentro de sua capacidade regenerativa, e a proximidade com o consumidor pode compensar a perda de eficiência atribuída à perda da escala. Entretanto, estes ganhos são limitados e, se o conceito for aplicado a tecnologias demasiado impactantes, pouco se consegue além de trazer a poluição para a proximidade das pessoas. Os benefícios se sobressaem para tecnologias inerentemente pouco concentradas e pouco impactantes, como o aproveitamento solar e dos ventos.

### 1.2.4 Otimização da demanda

Reduzir o consumo energético pode ser tão vantajoso quanto aumentar a geração, ou até mais. A aplicação das técnicas de eficiência energética pode ser vista como equivalente a uma energia sustentável distribuída. Da mesma forma como uma geração de energia sustentável invariavelmente tem algum impacto negativo se olhada pelo ponto de vista apropriado, muitas técnicas de eficiência energética também terão pontos

negativos. Ainda assim, podem ser consideradas uma das melhores abordagens para atendimento da demanda energética.

Uma outra abordagem em relação à otimização da demanda diz respeito ao uso de fontes energéticas mais adequadas do ponto de vista do sistema amplo. Um ponto em que isto se torna apropriado é justamente o aquecimento de água doméstico. No Brasil, está difundido o uso de aquecimento elétrico para água do banho ao invés do aquecimento a gás, e isto pode ser considerado um mau uso da eletricidade, que tem como seu grande forte a versatilidade de aplicações.

A primeira pergunta seria, por que é melhor usar um combustível fóssil no lugar de eletricidade, quando a eletricidade brasileira vem principalmente de usinas hidrelétricas, renováveis? Pode-se responder a isto argumentando que as hidrelétricas estão saturadas e precisam de termoeletricas para complementar a oferta, então uma redução do consumo elétrico não se traduziria em menor uso das hidrelétricas, mas sim em uma redução do consumo de combustíveis fósseis. Uma usina a gás natural hipotética gera energia elétrica com uma eficiência de 40% e o chuveiro elétrico tem eficiência de 95%, de forma que, ignorando outras perdas como transmissão por simplicidade, teríamos uma eficiência total limitada a 38%. O mesmo gás poderia ser queimado na casa do usuário para aquecer água com eficiência de 85%. O salto de eficiência é tamanho que, mesmo com uma comparação bastante simplificada, fica claro que o chuveiro elétrico é, de um ponto de vista amplo, mau uso da energia elétrica.

A segunda pergunta poderia ser, por que este mau uso não se reflete no custo do aquecimento a gás e do elétrico? Uma resposta é que o custo deste mau uso é distribuído para todos os consumidores de energia elétrica, ficando diluído, desassociado do usuário individual. A energia elétrica do chuveiro não tem o custo da energia termoeletrica, e sim o custo proporcional das várias usinas do mercado gerador de energia, da mesma forma que os outros usos, mesmo os bons usos da energia elétrica, também o têm. Mas que não haja engano, com uma parcela tão grande da população brasileira fazendo uso de chuveiro elétrico, o usuário individual paga por isto na forma de uma conta de luz mais elevada em todos os seus outros usos.

Sem um atrativo financeiro claro para o usuário, somando-se o custo inicial de outra ordem de grandeza comparado ao chuveiro elétrico, o sistema de aquecimento a gás entra apenas no nicho do conforto por conta da potência fornecida, que se traduz em um banho caudaloso a altas temperaturas.

### 1.3 Energia Solar

A energia do Sol chega até nós na forma de energia eletromagnética, ondas que não precisam de um substrato para se propagarem, sendo assim capazes de viajar através do vácuo espacial. Esta energia é composta por um espectro de frequências, ou seja, o Sol emite ondas numa ampla faixa de frequências em proporções diferentes, mas praticamente constantes.

Do ponto de vista do observador na superfície terrestre, os mais importantes efeitos que afetam a potência solar disponível são a atmosfera, que age como um filtro; o ângulo de incidência, que se traduz numa “concentração” de energia; e o sombreamento. Assim, para um usuário que se posiciona de forma a não estar sendo sombreado e a estar perpendicular à direção dos raios solares, o único grande fator que influencia a potência recebida é a atmosfera, que naturalmente e constantemente filtra porções da radiação incidente proporcionalmente à distância percorrida pelo raio solar, e que pode ter pontualidades como nuvens que agem como filtros intermitentes.

Assim, a energia solar está disponibilizada de forma bastante previsível, ainda que inerentemente intermitente por conta do maior efeito de sombra que nos afeta: a noite; e de forma excepcionalmente bem distribuída pelo planeta, imune a complicações geopolíticas. Seu uso não acarreta consequências negativas significativas, a poluição inerente ao uso da luz solar é a sombra gerada, e o seu uso não acarreta o esgotamento da sua fonte. Se excluirmos o ciclo de vida do coletor ou painel solar, temos uma fonte energética limpa, renovável, consequentemente sustentável e ainda distribuída.

Derivam da energia solar outras fontes consideradas renováveis: os ventos, os rios e os cultivos de biomassa. Uma analogia pode ser feita com a transmissão de energia através das cadeias alimentares. Quando um ser vivo se alimenta de outro, apenas uma pequena parcela da energia consumida pelo ser vivo alimento é aproveitada pelo ser vivo alimentado. Assumindo uma estimativa simplista para a ordem de grandeza da energia transmitida entre os níveis da cadeia alimentar de 10%, podemos dizer que se um coelho come uma área de vegetação e uma raposa come dez coelhos ao longo de dias, podemos afirmar que a raposa consumiu aproximadamente 10 áreas de vegetação para alimentar uma necessidade energética de apenas uma área. Se um ser humano desejasse se incluir nesta cadeia alimentar, precisaria de uma área 10 vezes maior se criasse coelhos do que se consumisse vegetação, e 100 vezes maior se decidisse se alimentar de raposas.

De forma similar, ao fazer uso de energia eólica, hidrelétrica ou de biomassa, estamos fazendo uso indireto de uma quantidade de energia solar muito maior do que a

que estamos aproveitando. Para criar uma corrente de ar em uma região, ou uma chuva, foi necessário expor uma área enorme à luz solar, toda uma área oceânica, por exemplo. Por que, então, não fazer uso desta energia solar que alimenta os demais ciclos? As maiores desvantagens da energia solar são a sua baixa densidade, a impossibilidade técnica de transportá-la distâncias maiores do que as obtidas por um espelho em uma usina concentradora, e a impossibilidade de estocá-la em sua forma natural.

Estas tecnologias derivadas da energia solar podem ser vistas como respostas a estas deficiências: o aproveitamento eólico é como um transporte da energia solar, do oceano para as áreas costeiras, além de um concentrador; o uso do potencial hidráulico, do ciclo hidrológico, é um potente concentrador e uma forma limitada de estoque; e uma plantação de biomassa gera insumo energético concentrado, transportável e estocável.

Como explicitado até este ponto, existe um mau uso de energia na forma de aquecimento elétrico de água para banho e para outras atividades domésticas além de uma matriz energética vasta e espaçada, alimentada por fontes insustentáveis, seja pelo uso de combustíveis finitos, seja pelo impacto ambiental local ou global. Esta matriz tende a se tornar mais e mais “suja” a medida que a demanda aumenta, por conta da dificuldade de expandir o parque hidrelétrico para atender a uma perspectiva de aumento permanente da demanda. Por outro lado, o aproveitamento solar é uma tecnologia que gera calor a temperaturas suficientes para o banho e que é limpa, renovável, distribuída, acessível em todo o território nacional, simples e relativamente barata.

Assim, a união de todos os conceitos apresentados nesta introdução aponta para a direção de uma solução extremamente elegante de um problema de proporções significativas: a difusão do uso de aquecimento solar para água de banho.

Como principais dificuldades temos as deficiências da energia solar: baixa concentração, ou seja, baixo valor de potência por área, de forma que o fácil aproveitamento está atribuído a uma baixa concentração populacional; e a impossibilidade técnica intrínseca da energia solar de ser estocada em sua forma original, que é contornada com reservatórios de água quente.

#### 1.4 Verticalização, relação área do telhado por habitante

Uma das carências inerentes da energia solar, conforme mencionado, é sua baixa concentração, que faz com que seu uso domiciliar esteja restrito a concentrações populacionais igualmente baixas, já que o consumo energético de uma edificação residencial está intimamente relacionado à quantidade de moradores. Surge, então, uma



situação em que o aproveitamento residencial da energia solar, inerentemente simples, chega a um limite, a partir do qual são necessários refinamentos para atender à demanda. Este limite costuma aparecer em prédios de apartamentos, solução arquitetônica para alta concentração populacional, para os quais a área de telhado onde os coletores e painéis solares podem ser instalados mais facilmente é limitada e possivelmente insuficiente para atender toda a sua população.

Soma-se a isso as dificuldades técnicas que aparecem quando a distância entre os coletores e os usuários da água quente ficam maiores, tão extensas quanto a altura do prédio. Longas distâncias verticais implicam grandes gradientes de pressão e alta superfície de contato da tubulação, promovendo perdas térmicas elevadas.

Uma resposta a este contratempo é o aproveitamento solar das fachadas do prédio, já que as mesmas têm áreas proporcionais ao número de apartamentos e, conseqüentemente, à população.

Este aproveitamento, no entanto, esbarra em uma série de dificuldades técnicas e estéticas que tem motivado muitas pesquisas, conforme será apresentado no capítulo 2. As principais dificuldades são uma menor potência e menor eficiência do coletor por conta de seu posicionamento na vertical, distante da visada perpendicularidade com os raios solares; dificuldade de acesso para instalação e manutenção; e uma maior exposição visual às pessoas que estão do lado de fora, seja no nível da rua ou nos apartamentos vizinhos, exposição esta considerada prejudicial por conta da precariedade estética dos coletores usuais, que prejudica a aparência do prédio.

Diante de uma situação de restrição da área útil para aproveitamento solar, pode surgir a questão de qual tecnologia solar priorizar: térmica ou fotovoltaica. A fotovoltaica é uma das estrelas da atualidade, símbolo do desenvolvimento com responsabilidade ambiental que permite ao usuário a possibilidade de fazer a sua parte para a proteção do ambiente, independente do que faz o coletivo. Não cabe aqui discutir o quão limpa é esta tecnologia, dado seu ciclo de vida turbulento, mas nota-se uma tendência a querer priorizar o fotovoltaico em detrimento do solar térmico. Isto pode ser pela dificuldade de adaptar um sistema de água quente para uma construção já concluída, preocupação inexistente para a instalação do sistema fotovoltaico. Mas para a grande fatia da população brasileira que faz uso de chuveiro elétrico e de outros aparelhos elétricos para aquecimento de água, esta priorização da geração própria de eletricidade é inapropriada pela diferença brutal de eficiência entre estas duas alternativas: painéis fotovoltaicos aproveitam menos do que 20% da luz incidente, ficando próximos dos 12% em muitos

casos, enquanto o coletor térmico costuma ter eficiências acima de 60%. Isto significa que, para energizar um chuveiro elétrico, é necessária uma área de painéis fotovoltaicos aproximadamente cinco vezes maior do que a área que seria usada pelos coletores térmicos. Dado o custo inicial significativamente mais alto do sistema fotovoltaico, ficam claras as vantagens de priorizar o sistema térmico até que a demanda de água quente esteja atendida, ou ao menos atendida em grande parte.

O uso de aquecimento solar em prédios de apartamentos residenciais traz algumas complicações do ponto de vista da atribuição financeira. Primeiro, temos uma desassociação entre quem paga pelo sistema e quem usufrui da economia gerada. Os prédios são usualmente construídos por construtoras especializadas, para quem o empreendimento tem apenas a função de trazer lucro. O sistema solar predial precisa de infraestrutura que alcance todos os apartamentos, trazendo custos e complexidade ao projeto, mas quem se beneficia será o usuário que economizará energia elétrica. Seria de se esperar que o custo fosse simplesmente repassado para o comprador, mas aparentemente o sistema solar não é um atributo valorizado o suficiente para justificar um aumento no preço, principalmente em construções de baixo padrão. O problema se intensifica quando ocorre uma segunda desassociação, o dono do apartamento aluga para terceiros. Esta falta de incentivo leva alguns legisladores a regular o setor e a exigir a instalação de infraestrutura para sistema de aquecimento solar, ou até mesmo o sistema completo, em novos empreendimentos. Um exemplo é o decreto nº 49.148 de 2008 que regulamenta esta exigência para a cidade de São Paulo.

Em segundo lugar, temos uma dificuldade de cobrar de forma justa o consumo da água quente dos moradores. Não cobrar leva ao desperdício, que leva à falta de água quente de baixo custo para todos, dada a restrição de capacidade do sistema. Dependendo da forma como o sistema é montado, a medição da vazão de água por si só pode trazer erros por conta da variação de temperatura que pode ocorrer. Sistemas com aquecedor central de suporte e recirculação para minimizar o volume da água “perdida” das tubulações, que está fria, mas é cobrada como quente, pecam pelo excesso de perdas nas tubulações, que aumentam os custos coletivamente. Aquecedores de apoio individuais, ou mesmo chuveiros elétricos para apoio, minimizam as perdas, mas aumentam o custo e a complexidade. Um sistema de medição completo deveria medir vazão e temperatura da água que entra nos apartamentos e da água que retorna. Têm-se ainda dificuldades técnicas para nivelar as pressões e temperaturas em faixas de alturas muito amplas, como em prédios muito altos.

O sistema de coletores de fachada pode minimizar a complexidade do sistema como um todo, pois podem ser instalados sistemas pequenos para poucos andares, possivelmente sistemas individuais para cada andar. Embora certamente haja outros desafios a serem resolvidos, como o custo de instalar múltiplos reservatórios, esta ainda pode ser entendida como uma solução que virá a facilitar o acesso da tecnologia, principalmente em edifícios muito altos, os quais já sofrem com a falta de área horizontal para atender toda a população.

### 1.5 Procedimentos metodológicos

O desenvolvimento desta monografia é uma análise de sensibilidade de parâmetros assumidos como relevantes baseado no desenvolvimento teórico e na revisão bibliográfica. A análise é gerada por meio de simulações realizadas utilizando o software TRNSYS16, descrito mais detalhadamente no capítulo que descreve a modelagem, usando como padrão de comparação uma combinação de valores obtidos da aplicação do método simplificado de dimensionamento proposto na norma ABNT NBR 15569:2008 [2] e valores padrões sugeridos pelo software.

Esta monografia está dividida didaticamente em 6 capítulos, com o intuito de propiciar uma sequência e uma continuidade ao raciocínio desenvolvido. No capítulo 1 - Introdução foi apresentado o conceito do coletor térmico solar de fachada como uma resposta à demanda por fontes de energia sustentáveis em um cenário de elevada concentração humana. A busca pelo bom uso da energia disponível motiva os aperfeiçoamentos dados a uma tecnologia milenar quando é exigido da mesma que se adapte a uma configuração não ideal para permitir a sua inclusão no formato caótico que é o ambiente urbano de alta performance.

O capítulo 2 - Revisão Teórica traz ao leitor os princípios físicos e construtivos que serão a base do desenvolvimento central. É feita uma união intercalada das descrições dos efeitos que afetam o funcionamento e a otimização do coletor térmico solar e do estudo de conforto térmico com o formulário integrado ao programa de simulação TRNSYS, que é a ferramenta central para a obtenção dos resultados propostos por este estudo. Neste capítulo são introduzidos os pontos críticos que motivam estudos e melhorias para o sistema do coletor térmico solar de fachada trabalhados nos capítulos seguintes.

O capítulo 3 - Revisão bibliográfica e Estado da Arte traz os principais desenvolvimentos e linhas de pesquisa recentes a respeito do tema central que é o coletor

solar de fachada. É dado contexto aos estudos e são expostos os pontos mais interessantes para o desenvolvimento deste trabalho, como por exemplo o efeito do coletor para a redução da carga térmica da edificação. Fica evidenciado o alto nível técnico e a criatividade dos pesquisadores dedicados a inovar em aspectos que variam do técnico ao estético.

O capítulo 4 - Modelo e simulações apresenta mais a fundo a ferramenta TRNSYS e a forma como o problema a ser desenvolvido foi parametrizado e adaptado para a linguagem do software. São descritas as motivações para as simulações que foram realizadas, a configuração padrão da qual derivam as análises de sensibilidade e os principais parâmetros usados para comparar cenários distintos.

O capítulo 5 - Resultados e discussão traz as diversas tabelas de resultados gerados pelas análises de sensibilidade obtidas por meio das simulações. Os resultados são comparados para a determinação dos parâmetros mais relevantes e são buscadas explicações para as situações mais interessantes encontradas. Primeiro são apresentados os resultados referentes à performance do sistema solar e em seguida os resultados referentes à análise do conforto térmico. São dados valores monetários para os efeitos mais importantes.

Por fim, o capítulo 6 - Considerações finais faz um balanço do trabalho, refazendo brevemente o caminho percorrido e salientando os resultados mais relevantes.

## 1.6 Objetivos

O objetivo central desta monografia é realizar, por meio de simulações, análises de sensibilidade dos principais parâmetros envolvidos no desempenho de um sistema solar térmico para aquecimento de água instalado na fachada de um prédio residencial na cidade de São Paulo. Além de buscar traçar relações de causa e efeito para aspectos relacionados à performance do sistema, é dada atenção especial ao conforto térmico nos apartamentos adjacentes aos coletores solares, para testar a hipótese de que o coletor causa uma alteração significativa no perfil das trocas térmicas da edificação com o ambiente externo. Busca-se uma ordem de grandeza para a economia potencial na conta de energia elétrica devido à redução do uso do aparelho de ar condicionado para poder compará-la à economia gerada pelo aquecimento da água para banho.

## 2 Revisão Teórica

Neste capítulo serão apresentados os principais conceitos teóricos abordados no decorrer desta monografia. Serão descritas as principais fórmulas e, quando apropriado, será apresentada a metodologia usada pelo programa TRNSYS para a simulação dos diversos efeitos envolvidos no funcionamento do sistema solar para aquecimento de água para banho.

### 2.1 Transferência de calor em coletores solares

Sistemas solares para aquecimento de água são essencialmente transferidores de energia térmica. A energia solar térmica é emitida na forma de radiação e interceptada pelo absorvedor do coletor, de onde é transferida para um fluido térmico, normalmente a própria água, que por sua vez é transportada para um reservatório e então para o misturador do chuveiro, onde sua temperatura é reduzida à temperatura do banho por meio de diluição com água fria. Em todas estas etapas podem ser aplicados os conhecimentos da termodinâmica, como a conservação de energia e a transferência de calor.

A temperatura é a manifestação macroscópica da vibração dos átomos e moléculas. Esta vibração atômica pode ser vista como uma energia potencial contida na matéria e é inerente à matéria a tendência de igualar potenciais energéticos quando interagindo com os seus arredores. Desta forma, dois corpos com temperaturas diferentes possuem uma diferença de potencial térmico que tende a se minimizar espontaneamente na forma da transferência do calor do corpo mais quente para o corpo mais frio. A taxa desta transferência, em unidade de energia por tempo, é contida por o que pode ser entendido como uma resistência térmica e é incentivada pela magnitude da diferença de potencial térmico, ou seja, pela diferença de temperaturas. Posto desta forma, pode ser feita diretamente uma analogia com a energia elétrica, para a qual um potencial elétrico gera uma corrente de intensidade variando conforme a resistência elétrica entre os polos positivo e negativo. Esta analogia vai muito além de uma didática para entendimento do processo da transferência do calor, ela permite o uso da simbologia e de equações análogas às usadas no modelamento elétrico, mais especificamente a primeira lei de Ohm.

Uma diferença convencionalmente adotada entre os modelos é o posicionamento do termo ‘área da seção transversal’. Na condução elétrica através de um elemento resistivo, a resistência é dada como uma característica do material, a resistividade,

multiplicada pelo comprimento deste material e dividido pela área da sua seção transversal. A área da seção transversal é, então, inclusa no termo ‘resistência’.

$$R_{el} = \frac{\rho \cdot l}{A} \quad [ 2.1 ]$$

$$i = \frac{U_{el}}{\frac{\rho \cdot l}{A}} = \frac{U_{el}}{R_{el}} \quad [ 2.2 ]$$

Já no modelo adotado para a representação da transferência de calor, o termo ‘área da seção transversal’ é transferido para o termo ‘taxa de troca de calor’, ‘Q’, que então se torna ‘fluxo de calor’, ‘q’, ou então é mantido como um termo separado. Ainda, é usual o uso do inverso da resistência térmica equivalente do sistema, que então recebe o nome de ‘coeficiente global de troca de calor’, ou ‘U’. Por fim, a característica do material adotada é equivalente à transmissibilidade, inverso da resistividade.

$$R'_{term} = \frac{l}{\rho^{-1} \cdot A} = \frac{R_{term}}{A} = \frac{1}{U \cdot A} \quad [ 2.3 ]$$

$$Q = \frac{\Delta T}{\frac{l}{\rho^{-1} \cdot A}} = \frac{A \cdot \Delta T}{R_{term}} = U \cdot A \cdot \Delta T \Leftrightarrow \frac{Q}{A} = q = U \cdot \Delta T \quad [ 2.4 ]$$

De forma análoga, elementos resistivos em série possuem suas resistências individuais somadas para a determinação de uma resistência térmica equivalente, e elementos resistivos em paralelo têm os coeficientes individuais de troca de calor somados para a determinação do coeficiente global de troca de calor.

Uma vez conhecidos os mecanismos de transferência de calor, poderemos modelar o coletor solar como um sistema de elementos resistivos, para então determinar sua eficiência e demais parâmetros de interesse.

### 2.1.1 Condução e convecção

O mecanismo de transferência mais básico é a condução térmica. Nele, moléculas transferem energia térmica diretamente para moléculas vizinhas, como é observado quando aquecemos uma extremidade de uma barra metálica e o calor se espalha por toda o seu comprimento. É intuitivo supor que quanto mais interação entre as moléculas ou

átomos, ou quanto mais próximos eles estão uns dos outros, mais fácil será esta transferência térmica, de forma que sólidos costumam ter menores resistências térmicas de condução que líquidos, que por sua vez têm menores resistências térmicas de condução que gases. Ao mesmo tempo, quanto mais longo o caminho a ser percorrido pelo fluxo térmico, mais tempo ele levará para se completar.

Desta forma, podemos definir o coeficiente de troca de calor por condução, ' $U_k$ ', como o quociente da característica do material 'condutibilidade térmica', ' $k$ ', pelo comprimento a ser percorrido na direção da diferença de potencial térmico ou de temperatura.

$$U_k = \frac{1}{R_k} = \frac{k}{l} \quad [ 2. 5 ]$$

Este efeito é observado na transferência de calor entre a chapa do absorvedor e a face interna do tubo por onde passa a água a ser aquecida, componentes do coletor solar, assim como através de todos os materiais por onde ocorrem as perdas de calor, como os materiais isolantes e as paredes do coletor, da tubulação e do reservatório. Na análise do conforto térmico de um ambiente, o calor através das paredes ocorre por condução.

A convecção é um efeito de transferência de calor associado a um fluxo de matéria, sendo assim inerentemente um mecanismo apenas dos fluidos. Ela resulta da soma dos efeitos da condução térmica e do transporte de matéria: a energia térmica de uma molécula é transmitida por condução para a molécula vizinha, mas então esta molécula vizinha se desloca pelo fluxo de fluido até uma posição distante, levando consigo a energia térmica. Na interação entre uma parede sólida e o fluxo de um fluido, a transferência de calor é potencializada porque a molécula aquecida se desloca e cede seu lugar à uma molécula não aquecida, de forma que o gradiente térmico se mantém elevado. Ainda, pode ocorrer do fluxo de matéria favorecer o choque das moléculas, facilitando a condução.

O efeito da transferência por convecção é dividido em dois tipos: quando o fluxo de matéria é primariamente causado por uma variação de densidade causada pelo aquecimento do fluido, fruto da própria transferência de calor, a chamamos de convecção natural; por outro lado, quando o fluxo é causado primariamente por um efeito independente da troca de calor, por exemplo um ventilador soprando ar, a chamamos de convecção forçada.

Quantifica-se a convecção por meio do termo coeficiente de troca de calor por convecção, ' $h_c$ ', que por sua vez depende das características do material e do fluxo. A caracterização do fluxo ocorre de duas formas, simplificadamente: a forma como ele se desenvolve, e o trajeto que ele percorre. Da caracterização do desenvolvimento do fluido deriva duas categorias de fluxo importantes: o fluxo laminar e o fluxo turbulento. Durante um fluxo laminar, o fluido flui ordenadamente, já o fluxo turbulento é caótico, com turbilhões e mudanças de direção. Para a mesma vazão, as velocidades pontuais de um fluxo turbulento são maiores que as de um fluxo laminar porque o comportamento caótico faz partes do fluido se deslocarem também em direções não alinhadas ao fluxo principal. Este efeito faz com que fluxos turbulentos favoreçam a transferência de calor por convecção. Sucintamente, o desenvolvimento do fluxo é medido pelo adimensional número de Reynolds, enquanto que a combinação do desenvolvimento do fluido com o trajeto percorrido e características do fluido (número de Prandtl) é condensada na forma do adimensional número de Nusselt, que é a razão entre a capacidade convectiva e condutiva de um fluxo para um comprimento característico ' $L$ '.

O coeficiente de troca de calor por convecção é então obtido combinando a informação do número de Nusselt com o coeficiente de troca de calor por condução. O número de Nusselt por sua vez é obtido da união de informações a respeito da geometria do fluxo, do número de Reynolds e do número de Prandtl.

$$U_c = h_c = \frac{k}{L} \cdot Nu(Re, Pr, geometria) \quad [ 2.6 ]$$

No sistema de aquecimento solar térmico, observa-se a convecção na transferência da energia térmica da parede interna dos tubos do absorvedor para o fluido térmico, em geral a água. Ao mesmo tempo, todas as superfícies sólidas aquecidas que estão em contato com o ar ambiente irão perder calor por convecção. Ambos os efeitos podem ser por meio de convecção natural ou forçada. No estudo do conforto térmico, quando o ar exterior está mais quente que o interior, as transferências da energia térmica do ar externo para a parede e dela para o ar interno ocorrem por convecção. O mesmo pode ocorrer no sentido contrário caso as temperaturas se invertam. Ao mesmo tempo, a convecção forçada intensifica a perda de calor do corpo humano para o ar ambiente, de forma que fluxos de ar causam sensação de temperatura mais baixa do que a real temperatura do ar.



No TRNSYS existe a possibilidade de utilizar coeficientes de troca de calor por convecção inseridos manualmente ou usar um cálculo automático para o caso de convecção natural. Neste segundo caso, o coeficiente será calculado como na Eq. [ 2. 7 ] e os parâmetros conforme Tabela 1.

$$h_c = K(T_{superfície} - T_{ar})^a$$

$$h_c \left[ \frac{kJ}{h \cdot m^2 \cdot ^\circ C} \right] \quad [ 2. 7 ]$$

*Tabela 1: Parâmetros usados para o cálculo do coeficiente de troca de calor por convecção pelo TRNSYS [3].*

	K [kJ/(h·m <sup>2</sup> ·°C <sup>1+a</sup> )]	a
Superfície vertical	1,25	0,25
Superfície horizontal		
Face para cima aquecendo	2,11	0,31
Face para baixo resfriando		
Face para cima resfriando	1,87	0,25
Face para baixo aquecendo		

### 2.1.2 Radiação

O terceiro modo de transferência de calor, a radiação, é o menos intuitivo e possivelmente o mais complexo, mas ao mesmo tempo o mais importante para sistemas solares, já que é a forma como a energia térmica do Sol é transmitida para a superfície da Terra. Simplificadamente, átomos constantemente transformam partes proporcionais de sua energia térmica em ondas eletromagnéticas, que serão chamadas de luz por questão de didática, e que são emitidas indistintamente para todos os lados. Quando esta luz atinge outro átomo e ela é absorvida, a energia térmica foi transmitida. Mas este outro átomo está simultaneamente emitindo sua própria luz, de forma que o fluxo resultante entre dois átomos dependerá da diferença de temperatura dos mesmos, prevalecendo o fluxo na direção do átomo mais quente para o mais frio.

O fluxo de calor por condução difere dos demais por ser proporcional à diferença das temperaturas elevadas à quarta potência. Do ponto de vista amplo, a constante de proporcionalidade é bastante complexa, dependendo das características dos dois materiais que estão trocando calor, da geometria e das temperaturas de cada um. Entretanto, para resolver problemas de engenharia, normalmente são assumidas simplificações bastante

poderosas, como os corpos serem corpos negros (corpos com comportamento ideal do ponto de vista da radiação emitida e absorvida), ou ao menos os corpos serem cinzas, quando emitem e absorvem radiação de forma similar ao corpo negro, mas com intensidade reduzida de uma constante.

Ainda, corpos podem emitir e absorver radiação diferentemente dependendo da direção de incidência da onda, mas simplifica-se para não haver esta distinção, os corpos são considerados difusos. Como os corpos na superfície da Terra estão a temperaturas muito abaixo da temperatura do Sol, não cabe neste trabalho entrar em maiores detalhes a respeito da intensidade da troca de calor por radiação, que acaba simplificada nas formulações de energia solar a um fluxo unidirecional, uniforme espacialmente, que é reduzido dependendo das condições atmosféricas. Uma exceção será a troca de calor do coletor e das paredes externas da edificação com o céu, que se dá exclusivamente por radiação e será vista adiante. Assim, o fluxo de calor por radiação independe da temperatura do corpo quando comparado ao Sol e, nas outras situações, quando a temperatura do corpo é relevante, é dado pela Eq. [ 2. 8 ] onde a constante de Stefan-Boltzmann, ‘ $\sigma$ ’, é igual a  $5,67 \cdot 10^8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$  e  $F_{1-2}$  é o fator de vista da área 2 do ponto de vista da área 1.

$$q_r = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{1-2}} + \frac{A_1}{A_2} \cdot \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2}} \quad [ 2. 8 ]$$

Quando a razão entre as áreas é muito pequena, como por exemplo um objeto comparado ao céu, a relação  $A_1/A_2$  é aproximada para zero. Ainda, nesta situação, o fator de vista  $F_{1-2}$  pode ser aproximado para 0,5 quando a superfície é vertical e para 1 quando a superfície é horizontal. Para o caso da superfície vertical, este valor indica que metade da linha de visão do mesmo é o céu e a outra metade, presumidamente, é o solo, estando a superfície na altura do horizonte. Dependendo da forma do horizonte e da altura da superfície, este valor pode variar.

Ondas eletromagnéticas não dependem de um substrato para se propagarem, razão pela qual a energia solar consegue atravessar o vácuo espacial para nos alcançar na Terra. Entretanto, quando atravessa um meio material ou uma superfície, podem ocorrer três efeitos principais: absorção, transmissão ou reflexão.

A absorção concretiza a transferência de calor para o meio e a transmissão é a não interação com o meio. Já a reflexão é uma mudança de direção do fluxo luminoso ao atingir uma interface entre dois meios distintos, de forma que a componente da direção que é paralela à superfície se mantém inalterada, mas a componente perpendicular inverte seu sentido, o que pode ser percebido como uma alteração macroscopicamente ordenada de direção se a superfície for bastante lisa. Uma variação deste efeito é o espalhamento, que ocorre quando a luz é refletida em partículas ou moléculas dispersas em um volume, sem formar uma superfície, de forma que o resultado é uma distribuição aparentemente aleatória da luz. Este efeito ocorre, por exemplo, na atmosfera e é a razão pela qual todo o céu está iluminado de dia e não enxergamos o breu espacial.

Deriva disto a definição de três grandezas dos materiais, a transmissibilidade ' $\tau$ ', a absorvância ' $\alpha$ ' e a refletância ' $\rho$ ', que indicam para qual fração da luz tais efeitos ocorrem. Porém a luz pode ser gerada em uma amplíssima faixa de frequências, sendo a energia da frequência função da temperatura e das características do corpo emissor, e frequências de luz diferentes irão reagir de formas distintas quando interagindo com substâncias diferentes.

Assim, um material pode ter valores distintos de cada uma destas três grandezas para frequências de luz diferentes. Sempre para uma dada frequência, a soma destas três grandezas deve ser igual a 1, indicando que a totalidade da luz naquela frequência foi absorvida, refletida ou transmitida. O mesmo ocorre para ângulos de incidência distintos.

Resulta disto que para algumas frequências alguns materiais são opacos, ou seja, a transmissibilidade é zero, enquanto que para outras frequências, o mesmo material pode ser translúcido, ocorrendo alguma quantidade de transmissão. É o caso do vidro, usado como superfície superior de coletores solares fechados: para luz em alta frequência, em torno da região do visível, como a emitida pelo Sol, o vidro é translúcido, permitindo à luz entrar no coletor. Porém a luz emitida pelo absorvedor, que está a uma temperatura muito mais baixa que o Sol, está em baixa frequência, infravermelha, faixa para qual o vidro é opaco. Esta característica do vidro efetivamente aprisiona a luz solar para que seja aproveitada ao máximo pelo coletor. Similarmente, a incidência luminosa a um ângulo de incidência baixo, próximo de ser paralelo à superfície, encontrará um vidro com alta refletividade, enquanto que a mesma luz incidindo perpendicularmente será praticamente toda transmitida.

Para a aplicação das trocas térmicas por condução no coletor solar, dá-se foco à interação da luz solar com o vidro e com o absorvedor, e em menor grau às interações

com o céu. O TRNSYS aceita quantificar a perda do valor do produto da transmitância do vidro com a absorbância do absorvedor, ‘ $\tau\alpha$ ’, por conta da variação do ângulo de incidência por meio dos parâmetros  $b_0$  e  $b_1$ , aplicados à Eq. [ 2. 9 ]. Estes parâmetros devem ser fornecidos pelo fabricante do coletor ou calculados com base na informação da variação de  $\tau\alpha$  para ao menos dois ângulos de incidência distintos. Quando apenas um valor é fornecido, tipicamente para  $\theta = 50^\circ$ , é recomendado aproximar  $b_1$  para zero. Os valores padrões usados pelo TRNSYS são  $b_0 = 0,2$  e  $b_1 = 0$ .

$$\frac{\tau\alpha_\theta}{\tau\alpha_{normal}} = 1 - b_0 \left( \frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) - b_1 \left( \frac{1}{\cos \theta} - 1 \right)^2 \quad [ 2. 9 ]$$

É considerado o efeito da variação de  $\tau\alpha$  por conta do ângulo de incidência para três fontes de radiação: a direta, a refletida do solo e a do céu. Para o cálculo do fator de correção para a radiação direta, usa-se na Eq. [ 2. 9 ] com  $\theta$  igual ao ângulo de incidência da radiação direta no coletor. Para a radiação refletida do solo usa-se  $\theta = \theta_{solo}$  e para a radiação do céu usa-se  $\theta = \theta_{céu}$ , dados em graus, conforme Eqs. [ 2. 10 ] e [ 2. 11 ], onde  $\beta$  é o ângulo do coletor com a horizontal.

$$\theta_{solo} = 90,00 - 0,5788 \cdot \beta + 0,002693 \cdot \beta^2 \quad [ 2. 10 ]$$

$$\theta_{céu} = 59,68 - 0,1388 \cdot \beta + 0,001497 \cdot \beta^2 \quad [ 2. 11 ]$$

O fator global de correção de  $\tau\alpha$  para o ângulo de incidência é então calculado conforme Eq. [ 2. 12 ]:

$$\frac{\tau\alpha}{\tau\alpha_n} = \frac{I_b \frac{\tau\alpha_b}{\tau\alpha_n} + I_d \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \frac{\tau\alpha_c}{\tau\alpha_n} + \rho_s \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \frac{\tau\alpha_s}{\tau\alpha_n}}{I_T} \quad [ 2. 12 ]$$

Onde:

- $b$  refere-se à radiação direta
- $d$  refere-se à radiação difusa na horizontal
- $c$  refere-se ao céu
- $s$  refere-se ao solo
- $n$  refere-se à direção normal

- T refere-se ao total incidente no coletor
- I é a irradiação [kJ/(h·m²)]
- ρ é a refletividade

O cálculo da temperatura do céu é importante para as perdas da edificação, que afetarão o conforto térmico. O TRNSYS considera o céu como uma superfície negra ideal e calcula  $T_{\text{céu}}$  [K] a partir da emitância do céu limpo, ' $\varepsilon_0$ ', e do fator de cobertura das nuvens, ' $C_{\text{nuvens}}$ ', conforme Eq. [ 2. 13 ]:

$$T_{\text{céu}} = T_{\text{amb}}(\varepsilon_0 + 0,8(1 - \varepsilon_0)C_{\text{nuvens}})^{0,25} \quad [ 2. 13 ]$$

A emitância do céu limpo  $\varepsilon_0$  é determinada como função da temperatura de orvalho, ' $T_{\text{orv}}$ ' [°C], das pressões atmosféricas e ao nível do mar, ' $p_{\text{atm}}$ ' e ' $p_0$ ' [Pa], respectivamente, para uma dada hora do dia (de 0 a 24) conforme Eq. [ 2. 14 ]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_0 = & 0,711 + 0,005T_{\text{orv}} + 7,3 \cdot 10^{-5}T_{\text{orv}}^2 \\ & + 0,013 \cos\left(2\pi \frac{\text{hora}}{24}\right) + 12 \cdot 10^{-5}(p_{\text{atm}} - p_0) \end{aligned} \quad [ 2. 14 ]$$

Já o fator de cobertura das nuvens é obtido do quociente entre a irradiação difusa na horizontal e a irradiação total na horizontal, conforme Eq. [ 2. 15 ]. Para os períodos noturnos, é feita uma extrapolação das últimas horas da tarde.

$$C_{\text{nuvens}} = \left(1,4286 \frac{I_d}{I_{T,\text{horiz}}} - 0,3\right)^{0,5} \quad [ 2. 15 ]$$

## 2.2 O sistema solar térmico

Um sistema solar térmico para aquecimento de água para banho possui, em sua forma mais simples, coletores solares, um reservatório para água quente e tubulações, como exemplificado na Figura 4. Refinamentos usuais incluem uma bomba para circulação de água, um sistema de controle com sensores de temperatura, resistor de apoio e válvulas de segurança. Ainda, sistemas mais complexos podem usar um fluido de transporte térmico que não é a própria água para banho, sendo então necessário usar um trocador de calor que é, em geral, embutido no reservatório.

O sistema sem bomba opera por termossifão, mecanismo pelo qual a água aquecida pelo coletor, menos densa, sobe para o reservatório, necessariamente posicionado acima do coletor. Já a parcela mais fria da água do reservatório, mais densa, tende a descer até a entrada do coletor, fechando o ciclo. Esta categoria de sistema não requer automação ou alimentação elétrica, mas a vazão é reduzida, de forma que o coeficiente de troca por convecção é baixo e a temperatura do absorvedor acaba sendo mais elevada. Ainda, este sistema deve ser montado de forma a minimizar as perdas de carga, que se tornam proibitivas em sistemas maiores.

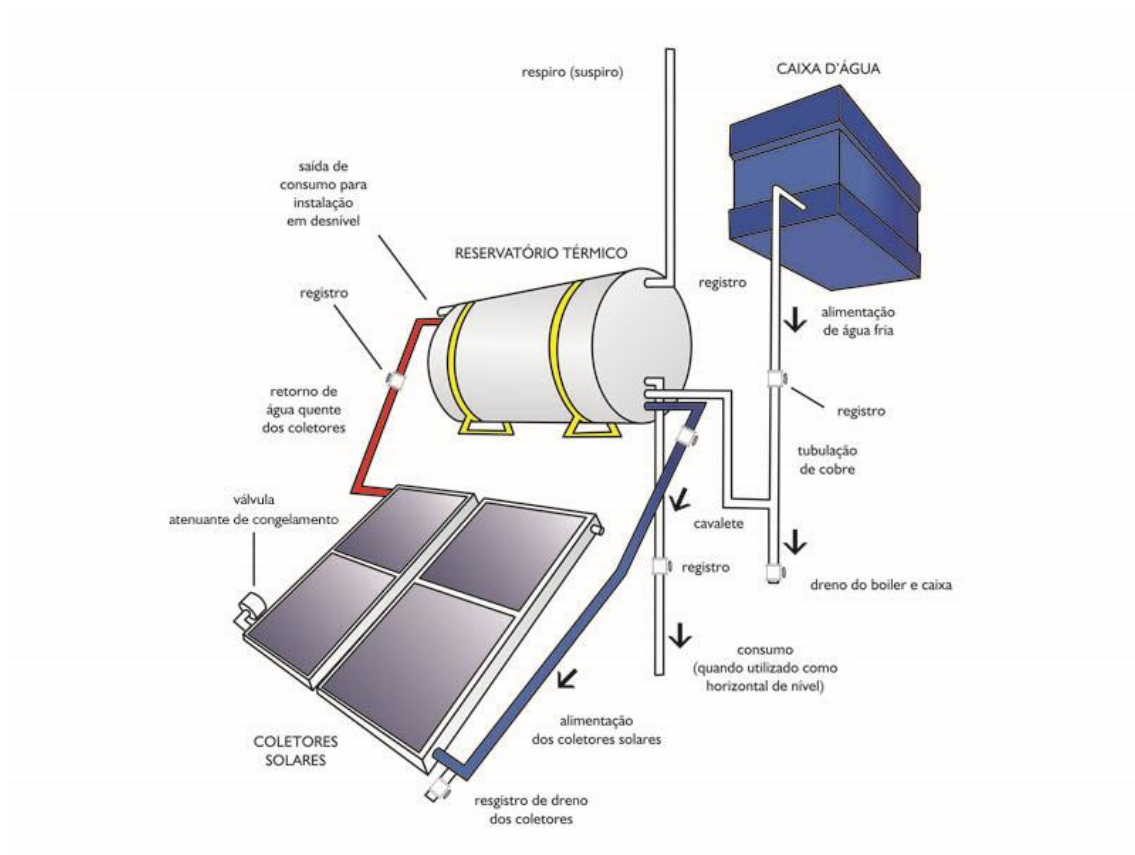


Figura 4: Esquema ilustrativo de um sistema solar residencial por termossifão [4].

### 2.2.1 O coletor e sua eficiência

O coletor solar térmico tem como função primária transferir a energia do Sol para o fluido de transporte térmico, geralmente a água. O seu núcleo é o absorvedor que é, em geral, uma placa com alta absorbância na faixa do visível e alta condutividade térmica, por exemplo uma placa de cobre pintada com tinta negra. A pintura utilizada é um dos fatores que diferenciam coletores por sua qualidade. Os canais para o fluido térmico

podem ser parte integral do absorvedor, ou podem ser unidos mecanicamente de forma a reduzir a resistência térmica de condução.

Embora exista uma certa diversidade de geometrias propostas para coletores solares térmicos, os acessíveis comercialmente para aquecimento de água estão em geral em uma de três categorias: coletores planos abertos, coletores planos fechados e coletores tubulares a vácuo. O fechamento que distingue as duas formas de coletores planos é o vidro que cria o efeito estufa que potencializa o aquecimento da água. Coletores abertos em geral não têm qualquer isolamento térmico, sendo opções de baixo custo apropriadas para o aquecimento a baixas temperaturas, por exemplo para piscinas. Já coletores tubulares a vácuo são a opção com foco em alto isolamento, na forma de uma camada de vácuo que minimiza as perdas térmicas por condução e convecção, sendo confeccionados para trabalhar com altas temperaturas.

O coletor plano fechado é a solução intermediária, que propicia isolamento térmico apropriado para trabalhar em temperaturas suficientes para uso doméstico, enquanto mantém simplicidade construtiva que reduz o custo de confecção. É a solução que será empregada neste estudo, de forma que será dado a ela destaque. Em sua forma usual, é composto por ao menos uma placa de vidro, um espaço de ar de poucos centímetros, um absorvedor metálico com tratamento superficial para aumentar a absorbância e uma camada de alguns centímetros de material isolante térmico. As laterais e o fundo são fechados com uma estrutura metálica. As laterais podem ser protegidas com material isolante, mas isto reduz a área útil do absorvedor. Um tubo de entrada e um tubo de saída, ambos horizontais, percorrem lados opostos do coletor e são interligados por uma rede de tubos, em geral ascendentes, firmemente unidos ao absorvedor. As conexões de entrada e saída se encontram nas laterais, facilitando a conexão com outros coletores.

Coletores podem ser ligados em série ou em paralelo. Quando em paralelo, todos os coletores têm as mesmas temperaturas de entrada e de saída. Já a vazão de água é dividida, de forma que as vazões individuais são baixas, o que reduz o coeficiente de troca de calor por convecção. Se a vazão for aumentada, o tempo de exposição no coletor será reduzido, proporcionando uma diferença de temperatura pequena entre entrada e saída. Já quando estão ligados em série, a temperatura de saída de um coletor será a temperatura de entrada do seguinte, de forma que as temperaturas médias em cada coletor serão diferentes. Com isso, alcançam-se temperaturas mais elevadas, que podem provocar quedas de eficiência nos coletores do final da série. A vazão total não é dividida, o que mantém as velocidades elevadas, podendo potencialmente trazer problemas por excesso

de perda de carga. Em sistemas com vários coletores, normalmente ambas as configurações são combinadas: ramais de até quatro coletores em série são montados em paralelo para, desta forma, aproveitar as vantagens de ambos os arranjos.

Talvez os parâmetros mais importantes de um coletor, junto com a sua área, sejam os relacionados à sua eficiência. A formulação da eficiência parte da definição: quanta energia útil é gerada pelo coletor com a energia disponível. A energia útil é definida como a energia térmica referente ao aquecimento da água de saída acima da temperatura ambiente, enquanto que a energia disponível é a energia solar que atinge a área do coletor. O modelo de coletor solar do TRNSYS utilizado neste trabalho define a eficiência como descrito na Eq. [ 2. 16 ], onde  $F_R$  é um fator geral de remoção de calor do coletor,  $(\tau\alpha)_n$  é o produto da transmissibilidade do vidro e da absorbância do absorvedor, na direção normal, que indica quanto da energia térmica torna-se aumento de temperatura do absorvedor,  $U_L$  é coeficiente de perdas térmicas,  $U_{L/T}$  é o coeficiente de perdas térmicas proporcional à diferença de temperatura e  $I_T$  é a irradiação total no coletor.

$$\eta = F_R(\tau\alpha)_n - F_R U_L \frac{\Delta T}{I_T} - F_R U_{L/T} \frac{\Delta T^2}{I_T} \quad [ 2. 16 ]$$

O manual do TRNSYS salienta a importância de informar qual a definição de  $\Delta T$  utilizada na determinação dos parâmetros, sendo comum em diferentes regiões do mundo definir com a diferença entre a temperatura de entrada no coletor, de saída no coletor, ou média no coletor, comparada com a temperatura ambiente. No Brasil, é obrigatório por parte dos fabricantes informar os valores de  $F_R(\tau\alpha)_n$  e de  $F_R U_L$ , mas não se considera o termo  $F_R U_{L/T}$ , de forma que se despreza o termo quadrático da equação. Ainda,  $\Delta T$  é definido como a diferença entre a temperatura de entrada e a temperatura ambiente.

A ABNT sugere em [2] uma metodologia simplificada para o dimensionamento de sistemas solares de aquecimento de água para banho. Esta metodologia será usada para determinar um sistema padrão a partir do qual serão feitas as análises de sensibilidade. Esta metodologia faz uso da produção média diária de energia específica, PMDEE, que deriva dos parâmetros da eficiência do coletor, quando aplicados a um dia padrão, resultando na Eq. [ 2. 17 ]. A partir deste valor e de informações do reservatório que serão elaboradas na próxima sessão, é estimada a área de coletores necessária, conforme Eq. [ 2. 18 ]. Nesta aproximação, a área de coletores depende de um fator de correção de instalação, 'FC<sub>instal</sub>', definido pela Eq. [ 2. 22 ], que atribui perdas devido à diferença do



ângulo do coletor na horizontal, ' $\beta$ ', e a inclinação ótima, dada como a latitude acrescida de  $10^\circ$ , e perdas devido ao posicionamento afastado da direção norte, dado pelo ângulo ' $\alpha$ ', quando o ângulo  $\beta$  for maior que  $15^\circ$ .

$$PMDEE = 4,901 \times (Fr_{\tau\alpha} - 0,0249 \times Fr_{UL}) \quad [ 2. 17 ]$$

$$A_{coletora} = \frac{(E_{\text{útil}} + E_{\text{perdas}}) \times FC_{\text{instal}} \times 4,901}{PMDEE \times I_G} \quad [ 2. 18 ]$$

$$FC_{\text{instal}} = \left( 1 - (1,2 \times 10^{-4} \times (\beta - \beta_{\text{ótimo}})^2 + 3,5 \times 10^{-5} \times \alpha^2) \right)^{-1} [ 2. 19 ]$$

### 2.2.2 Reservatórios, estratificação e recomendações de volume

A necessidade do reservatório ocorre por dois fatores principais: primeiro porque a potência solar tem pouca densidade energética, ou seja, para alcançar a potência necessária para aquecer a água de banho na mesma velocidade em que a mesma é consumida seria necessário uma área de coletores proibitiva; e segundo porque a energia solar é intrinsicamente inconstante, intercalam-se períodos diurnos e noturnos, e ainda ocorrem interferências climáticas, o que faz com que frequentemente não seja possível alinhar o horário de oferta energética com o horário de consumo. O reservatório permite coletar a energia solar sempre que a mesma se faz disponível e permite relacionar a potência do consumo com a potência média diária ao invés da potência instantânea.

Em sua forma usual, o reservatório para sistema solar de aquecimento de água para banho é um tanque de aço com formato cilíndrico revestido por uma espécie camada de material isolante. São instaladas duas entradas de água e duas saídas de água. Frequentemente o reservatório possui um resistor de apoio para fazer o aquecimento da água quando a disponibilidade solar não é suficiente e a temperatura da água cai abaixo do limite inferior estipulado.

Para otimizar o sistema como um todo, faz-se bom uso da estratificação natural da água dentro do reservatório. Por conta da diferença de densidade, as porções de água mais quentes mantêm-se no topo do reservatório enquanto as mais frias afundam para a parte inferior. Este efeito de convecção natural ocorre em taxas superiores às trocas por condução, de forma que são formadas camadas horizontais de água com temperaturas diferentes, caracterizando a estratificação. Para este efeito ocorrer, é necessário minimizar

a turbulência e a circulação de água no interior do reservatório, pois as trocas de calor por convecção forçada se sobrepõem à convecção natural. O aproveitamento da convecção natural se dá posicionando apropriadamente as duas entradas e as duas saídas. A água fria que entra no sistema para repor a água consumida é alimentada por baixo, na camada de água fria, de onde é coletada para ser aquecida nos coletores. A água aquecida é retornada no topo do reservatório, junto à camada mais quente, de onde é retirada a água para ser aproveitada para o consumo. Esta retirada é feita por meio de uma boia que faz a captação sempre da camada de água mais elevada, independentemente do nível do reservatório.

As vantagens dessa configuração são várias: ao aquecer nos coletores a água mais fria, a temperatura média do coletor se mantém reduzida, aumentando a sua eficiência; ao remover para consumo a água mais quente, pode-se atender a demanda mesmo quando a temperatura média da água no reservatório não é suficientemente quente; ainda, ao manter uma parcela do reservatório com temperaturas mais baixas, reduz-se as perdas térmicas nesta porção.

O reservatório pode ser confeccionado para ser instalado na horizontal ou na vertical. A instalação vertical, comum nos países mais frios, favorece os ganhos com a estratificação da água e minimiza o espaço ocupado quando o mesmo é mantido em ambientes com pé direito alto o suficiente, como em porões. Em países frios, manter o reservatório protegido do ambiente externo, como no porão, reduz as perdas térmicas e ainda pode-se fazer bom uso do calor perdido. No Brasil, o usual é usar reservatórios instalados na horizontal para que possam ser instalados no forro. Ainda, nesta posição o peso é melhor distribuído, favorecendo a instalação sobre o telhado ou lajes finas.

No método simplificado de dimensionamento sugerido pela ABNT em [2], o volume do reservatório recomendado é dado pela Eq. [ 2. 20 ], contanto que se satisfaça a restrição de ser ao menos 75% do volume consumido diariamente. A energia útil armazenada é dada pela Eq. [ 2. 21 ], onde  $\gamma$  é a densidade e  $C_p$  é o calor específico da água. Ainda, para permitir um dimensionamento inicial, recomenda-se que sejam estimadas as perdas do reservatório como 15% da energia útil, conforme Eq. [ 2. 22 ].

$$V_{armaz.} = \frac{V_{consumo} \times (T_{consumo} - T_{ambiente})}{(T_{armaz.} - T_{ambiente})} \quad [ 2. 20 ]$$

$$E_{\text{útil}} = V_{armaz.} \times \gamma \times C_p \times (T_{armaz.} - T_{ambiente}) \quad [ 2. 21 ]$$

$$E_{perdas} = 0,15 \times E_{\acute{u}til} \quad [ 2. 22 ]$$

O TRNSYS quantifica as perdas por meio de um coeficiente com unidade W/(m<sup>2</sup>·K). Ainda, é possível escolher a quantidade e a altura das faixas de estratificação e definir em qual delas estará o resistor de apoio e o sensor de temperatura. Na configuração padrão, o coeficiente de perda é 0,694 W/(m<sup>2</sup>·K) e são simuladas 6 faixas de estratificação.

### 2.3 Consumo de água quente

O início de um projeto de sistema de aquecimento solar de água ocorre com a determinação do consumo diário esperado. Com base neste valor, pode-se estimar uma potência de aquecimento necessária e, então, uma área de coletores e um volume de reservatório. Esta estimativa pode ser feita com graus de detalhamento variando de um valor médio por pessoa, até perfis de uso diários e sazonais para cada função relevante. Entretanto, é importante ter em mente que a dependência do sistema com relação às condições climáticas gera incertezas de graus consideráveis, de forma que um refinamento excessivo da estimativa da demanda pode não resultar em um melhor dimensionamento.

O método simplificado para o dimensionamento de sistemas da ABNT [2] faz uso de valores de consumo diário tabelados, proporcionais ao número de habitantes, conforme Tabela 2. Mesmo baseando-se na tabela, ainda há espaço para personalizar o projeto, dadas as amplas faixas de consumo propostas. Os valores individuais são, então, somados usando a Eq. [ 2. 23 ], onde ‘Q<sub>pu</sub>’ é a vazão da peça utilizada e ‘t<sub>u</sub>’ é o tempo médio de uso. Ressalta-se que nem sempre a tubulação de água quente alcança todos os itens listados, mesmo que a residência faça uso dos mesmos. Equipamentos alimentados exclusivamente com água fria não devem ser contabilizados.

$$V_{consumo} = \sum (Q_{pu} \times t_u \times \text{frequência de uso}) \quad [ 2. 23 ]$$

Tabela 2: Estimativa de consumo doméstico de água quente [2].

Peças	Consumo mín.	Consumo máx.	Ciclo diário [min/pessoa]	Temperatura [°C]
Ducha de banho	6,6 L/min	12,0 L/min	10	39 – 40
Lavatório	3,0 L/min	4,8 L/min	2	39 – 40
Ducha higiênica	3,0 L/min	4,8 L/min	2	39 – 40
Banheira	80 L	440 L	Banho	39 – 40
Pia cozinha	3,0 L/min	4,8 L/min	3	39 – 40
Lava-louças (12 pessoas)	20 L	20 L	Ciclo de lavagem	39 – 50
Máquina de lavar roupa	90 L	200 L	Ciclo de lavagem	39 – 40

Um refinamento interessante quando são feitas simulações é o uso de um padrão diário de consumo, explicitando o horário em que o consumo ocorre. Isto porque, em geral, o consumo de água quente para banho ocorre desassociado do horário de maior incidência solar, e simular isto pode ajudar a dimensionar o reservatório apropriadamente. Ainda, pode ser feito um padrão sazonal para avaliar com maior rigor o comportamento do sistema em períodos quentes e frios. Um padrão semanal pode ser visto como um refinamento desnecessário, a não ser que exista uma variação de consumo muito significativa. Isto porque a variação climática ao longo de poucos dias costuma ser mais relevante do que a variação do consumo.

Deriva do consumo uma métrica para a avaliação do sistema como um todo, quando atribuído a uma demanda: o Fator Solar, ‘FS’, que é definido como a fração da energia térmica demandada que é atendida pelo sistema. Em geral, o FS é calculado para um ano inteiro, de forma a incorporar variações sazonais, as quais são muito importantes na análise do desempenho dos coletores. Sistemas dimensionados para atingirem fatores solares muito elevados terão aumentos de custo que possivelmente não serão interessantes do ponto de vista do retorno do investimento. Isto porque, para atingir FS elevado nos meses de baixa insolação, é necessário ampliar a área de coletor para valores muito acima dos necessários para os meses de maior insolação, gerando desperdício de água quente que, além de tudo, podem causar sobreaquecimento e danos ao sistema. No Brasil, é comum dimensionar sistemas para atingirem valor de FS em torno de 70% [5].

## 2.4 Carga térmica

A carga térmica pode ser vista como o equivalente do que é o consumo de água quente para um sistema de aquecimento solar, mas aplicado ao sistema de

condicionamento de ar. Rigorosamente, é o calor excessivo presente no ar que é eliminado pelo ar condicionado. Desta forma, o calor excessivo que é dissipado por outros meios, ou que não é transmitido para o ar, ou que não alcança o aparelho de ar condicionado não deve ser contabilizado como carga térmica daquele equipamento.

Não será dado tratamento aprofundado a este tema por ser bastante extenso e por ser abordado apenas parcialmente no desenvolvimento desta monografia. Simplificadamente, a carga térmica é formada pelo calor gerado por equipamentos dentro da residência, como lâmpadas e eletrônicos; por pessoas, variando conforme o grau de atividade exercido; pelo próprio sistema de ar condicionado; e pelas trocas de calor entre a edificação e o ambiente externo. Ainda, o calor latente gerado também pode ser contabilizado, como quando é fervida água no fogão ou toma-se um banho quente. Entretanto, deve-se tomar cuidado ao contabilizar estas cargas. A carga do chuveiro, por exemplo, costuma ser aliviada pela janela do banheiro.

A carga mais relevante costuma ser a das trocas de calor com o ambiente e estas são justamente as cargas que se deseja avaliar, pois são influenciadas diretamente pela presença dos coletores solares. Como ocorre com os coletores, a edificação troca calor primariamente por convecção com o ar ambiente, e por radiação por meio de irradiação solar direta e indireta. A irradiação é particularmente relevante quando atinge janelas, ocorrendo um efeito estufa como nos coletores fechados. Este efeito pode ser minimizado consideravelmente com o uso de sombreamento, tanto interno, como uma cortina, quanto externo, como uma veneziana. O sombreamento interno, entretanto, transforma em carga térmica parte da radiação absorvida, sendo efetivo principalmente por conta da sua refletividade e emissividade para o exterior. A energia térmica transmitida para as paredes por radiação ou convecção a aquecem gradualmente, e o calor é transmitido para a face interna por condução, de forma que só quando a superfície interna atinge temperaturas elevadas, torna-se relevante à carga térmica. Este processo gera uma defasagem da ordem de poucas horas entre o pico da irradiação sobre uma parede e o pico da carga térmica gerada.

Assim, são parâmetros cruciais para o dimensionamento da carga térmica as características da parede quanto a absorção e condução, e das janelas quanto a transmitância e fator de sombreamento, além da área e orientação espacial. É desejado das paredes alta resistência a condução térmica, o que é obtido fazendo uso de camadas de material isolante e de blocos construtivos com cavidades internas, como os tijolos cerâmicos ocos. Já das janelas, busca-se alta refletividade. No TRNSYS, a radiação

indireta nas janelas é contabilizada como uma radiação direta com ângulo de incidência de  $60^\circ$  para efeito de determinação da refletividade.

Outra fonte de carga térmica relevante provinda do ambiente se dá na forma de infiltrações de ar. O TRNSYS permite implementar trocas de ar na forma da fração do volume total do ambiente que é renovado por hora. Na prática, a renovação ocorre naturalmente por janelas mantidas abertas, por abertura e fechamento de portas e por frestas. A renovação é desejada para manter parâmetros de qualidade do ar adequados, mas pode gerar carga térmica significativa, conforme as condições climáticas externas.

Neste trabalho também será contabilizada a carga térmica proveniente das perdas convectivas do reservatório.

### 3 Revisão bibliográfica e Estado da Arte

Por mais que seja uma tecnologia de princípios de funcionamento extremamente simples, conhecidos e aplicados a milênios, o coletor solar térmico tem sido alvo de refinamentos com a finalidade de torná-lo mais atrativo, seja financeiramente, tecnicamente, esteticamente ou arquitetonicamente, e implementável em todos os ambientes habitáveis. O uso de coletores na fachada de construções é um desenvolvimento motivado pela dificuldade de suprir a demanda térmica com tecnologia solar em prédios, símbolo da concentração humana, o que restringe o seu acesso a uma parcela significativa da população.

O desenvolvimento mais bem representado pelas pesquisas encontradas é o da eficiência do coletor. Não é de se estranhar, tendo em vista que o uso da fachada parte de uma restrição de área disponível, sendo de interesse conseguir os melhores resultados utilizando a menor área possível. Ainda, a posição dos coletores, restrita à vertical ou a próximo disto, reduz a eficiência ainda mais, quando comparada com os coletores de teto que possuem flexibilidade para serem alinhados perpendiculares à incidência solar. Os ganhos de eficiência são buscados na geometria dos coletores e nas características térmicas e óticas dos seus componentes: a transmissibilidade da luz solar e a refletividade da radiação infravermelho por parte do vidro, e a absorbância do absorvedor.

É tema recorrente a preocupação com o sobreaquecimento do sistema no verão. Talvez seja uma dificuldade técnica derivada da enorme diferença de temperatura e de necessidade de água quente entre verão e inverno para habitantes de regiões onde as estações são tão mais distintas que no Brasil. Sistemas dimensionados para atender às necessidades do inverno estão superdimensionadas para o verão, quando água quente acaba por não ser consumida. O verão brasileiro em algumas regiões costuma coincidir com épocas de chuvas em que o sistema passa horas do dia inoperante, minimizando esta questão.

São, ainda, objetivos de estudos a redução dos custos do coletor, fazendo uso de materiais típicos da construção civil, e a caracterização do coletor como parte da fachada para reduzir a quantidade de materiais despendidos na sua construção. Incluídos aqui estão as tecnologias de armazenamento integrado de calor na forma de materiais com alta capacidade térmica, característica interessante para defasar o pico da incidência solar do aproveitamento térmico nos sistemas de aquecimento do ar.

A visibilidade do coletor de fachada traz a necessidade do desenvolvimento de soluções para a aceitação deste elemento intruso do ponto de vista estético. São buscadas opções de coloração dos vidros e dos absorvedores que não comprometam significativamente a performance, além de formas que substituam o tradicional coletor retangular para permitir a composição de desenhos que tragam personalidade e refinamento estético que agrade os arquitetos e a comunidade.

Um tema que ganha força com a crescente viabilidade econômica do painel fotovoltaico é o uso de painéis híbridos que geram simultaneamente eletricidade e calor aproveitável. Mais do que um aproveitamento do espaço, o painel híbrido tem potencial de fornecer maiores eficiências por conta da sinergia entre as duas tecnologias: o coletor térmico retira excesso de calor, reduzindo a temperatura, e o painel fotovoltaico tem sua eficiência e vida útil aumentadas com esta redução de temperatura.

Por fim, alguns artigos mencionam e quantificam o ganho derivado da redução da carga térmica do ambiente. Este efeito é um dos que se busca simular nesta monografia, para quantificá-lo e verificar sua relevância.

A busca pelos temas de desenvolvimentos recentes na área trouxe uma informação curiosa do ponto de vista de um brasileiro: muito se dedica no resto do mundo ao aquecimento solar do ar ambiente. Preocupação inexistente na maior parte do território nacional pela posição privilegiada do país na faixa intertropical e proximidades, o combate ao frio invernal é questão de sobrevivência para uma fatia enorme da população mundial. Não só o tema é crítico, mas deriva desta necessidade um consumo energético majoritário, fazendo sentido, então, dedicar tantos estudos ao seu aperfeiçoamento. O aquecedor solar para ar ambiente é ainda mais simples e barato que o de água, em partes por poder até ser implementado sem um reservatório térmico em sua configuração mais simples, de forma que seu uso tem potencial para ser o mais difundido.

Soma-se a isto uma outra característica curiosa do nosso país: aquecemos água para banho principalmente com energia elétrica, por efeito Joule. Este sistema custoso e pouco otimizado motiva ainda mais uma substituição por uma fonte térmica acessível, barata e sustentável. São, portanto, de interesse desta pesquisa apenas os aquecedores solares para água, com foco em banho e outros usos de média temperatura. Entretanto, muitos estudos atuais e relevantes abrangem e abordam os dois temas em proporções semelhantes e são assim mencionados aqui. Tantos outros nem ao menos mencionam no resumo ou mesmo na introdução qual fluido é aquecido, estando aparentemente implícito tratar-se de coletores solares para aquecimento de ar, como em [6] e [7]. Em geral



percebe-se do que trata o artigo por alguma observação pontual na seção de desenvolvimento, que acaba por diferenciar as tecnologias.

Embora seja uma tecnologia que remonta à antiguidade, o atual momento de grande foco nas tecnologias sustentáveis, em particular no setor de energia, trouxe renovado interesse acadêmico ao aquecimento solar residencial. Quesada et al. [8] fizeram uma revisão dos avanços mais notáveis no que diz respeito a fachadas solares opacas publicados na primeira década deste novo milênio, conforme compilado na Figura 5. Interessante notar como, até a metade da década, a quantidade de artigos era bastante reduzida, uma média de pouco mais de seis artigos por ano, segundo os critérios adotados pelos autores. Destes, apenas 37% eram a respeito de sistemas ativos, com bombas, ventiladores, válvulas, sistemas de controle, sendo o restante composto de sistemas puramente passivos, que em sua maioria eram sistemas bastante simples de aquecimento de ar ambiente. Isto sugere um período em que o pouco interesse viabilizava principalmente sistemas de baixo impacto financeiro e arquitetônico, com retornos curtos de investimento. Pode-se supor que o aproveitamento solar estava bem baixo na lista de prioridades dos construtores civis, de forma que, se não cabia no telhado, não valia a pena.

Segundo gráfico montado pelos autores, a partir de 2006 a quantidade de publicações salta para uma média anual superior a 16, com mais da metade abordando sistemas ativos. As razões para este salto súbito não são consideradas, mas alguns eventos ocorridos nesta época são sintomas de uma efetiva transição para um foco em renováveis. Em 2004, criou-se o REN21, a Rede de Políticas para Energias Renováveis do século 21, que acompanha os avanços mundiais no setor. Em 2005 os EUA publicaram o Ato de Políticas Energéticas que, em meio a controvérsias inerentes ao tema, criou incentivos para, entre outros, a redução do consumo energético residencial; e no mesmo ano a China aprovou a Lei das Energias Renováveis.

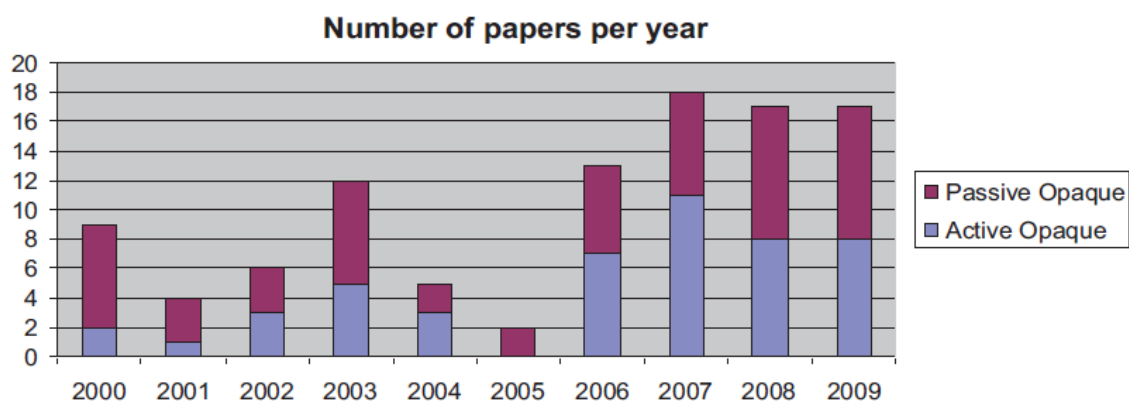


Figura 5: Número de artigos notáveis a respeito de fachadas solares na primeira década do milênio [8].

Das tecnologias estudadas pelos autores, apenas as paredes de reserva térmica são dadas como plenamente desenvolvidas, alcançando seu potencial. Esta técnica envolve o uso de coletores solares térmicos para aquecimento de ar que armazenam o calor em uma parede de alta capacidade térmica, para deslocar os ganhos de temperatura dos horários em que o Sol irradia com alta potência para horários quando existe maior carência de luz solar e, portanto, de aquecimento, como no começo da noite. Na opinião dos autores, todas as demais tecnologias têm ganhos potenciais significativos a serem pesquisados e desenvolvidos nesta segunda década do século 21.

### 3.1 Redução da carga térmica

Em um estudo realizado em Hong Kong, latitude  $22^{\circ}19'N$ , Chow et al. [9] mediram a redução da carga térmica em uma sala equipada com um sistema híbrido fotovoltaico-térmico instalado na fachada. Segundo os autores, quando parte da radiação solar incidente sobre a fachada de um prédio é diretamente convertida em energia elétrica ou térmica útil, a porção da energia solar transmitida através das paredes é reduzida e, portanto, a carga térmica do sistema de resfriamento também é reduzida.

Além de ressaltarem os ganhos obtidos pela sinergia entre as duas tecnologias quando unidas na forma de um sistema híbrido, os autores mediram a redução da carga térmica da sala equipada com o sistema em sua fachada, em relação a uma sala de referência sem o sistema, e encontraram uma redução de 50.8% da energia transmitida pela parede no período de 9 dias, passando de 237.300 kJ para 120.500 kJ.

Os ganhos foram maiores nos dias quentes de verão, em que a temperatura interna da parede se manteve sempre abaixo da temperatura da sala de referência, como pode ser observado na Figura 6. Nos dias quentes de inverno, a relação entre as temperaturas das paredes das salas se alternou, mas a sala com o sistema manteve temperaturas mais constantes, em oposição à sala de referência que apresentava picos de alta temperatura no meio do dia. Por fim, nos dias frios de inverno, o coletor impediu a redução excessiva da temperatura da parede, por conta da camada de material isolante presente em seu interior.

Interessante notar como, na Figura 6, além de reduzir a temperatura da parede no verão, o sistema solar híbrido deslocou o pico de temperatura em aproximadamente duas horas para a direita, quando comparado com a parede de referência. Isto, somado ao deslocamento que já ocorre na parede de referência com relação ao período de pico da intensidade solar, indica que o pico da temperatura pode ser deslocado para o período da

noite. Este efeito pode ser vantajoso ou prejudicial, dependendo de como é o padrão de carga térmica global da sala e qual o seu período de ocupação.

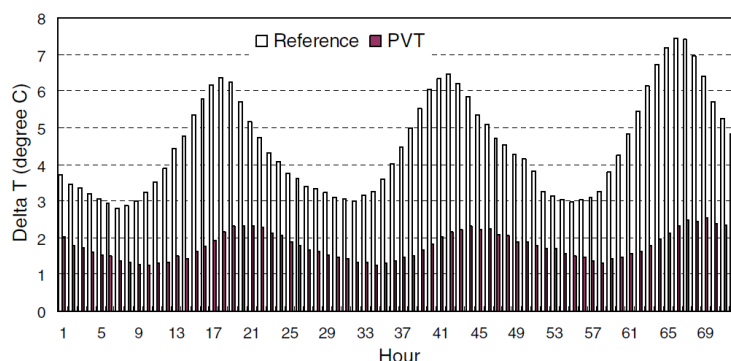


Figura 6: Comparação da diferença de temperatura da face interna de parede, com relação à temperatura do ar, entre uma sala com sistema solar híbrido e uma sala de referência [9].

Estudando o uso de painéis solares fotovoltaicos como componentes integrais da fachada, Yang et al. [10] desenvolveram uma metodologia simplificada para o cálculo da redução da carga térmica dos ambientes internos usando a temperatura ambiente média e coeficientes adequados para os materiais dos invólucros das fachadas. Usando dados de Hong Kong, Shanghai e Beijing, concluíram que a presença dos painéis solares reduziria a carga térmica de 33 a 50%, comparada à alternativa que seria apenas paredes maciças. Este resultado bastante promissor motiva o aprofundamento no tema. Entretanto, coletores solares térmicos podem alcançar temperaturas bastante elevadas, principalmente se o sistema estiver superdimensionado, mas ao mesmo tempo são usados isolantes térmicos que protegem o ambiente interno, diferentemente dos painéis fotovoltaicos, sendo possível que os resultados difiram bastante dos apresentados por estes autores.

De forma similar, Ji et al. [11], por meio de modelamento térmico computacional de sistema híbrido integrado à fachada, obtiveram redução de 59% da carga térmica predial durante o verão, resultando em eficiência térmica global de 70,3% para o caso em que são usados módulos BPV.

A forma como os coletores são montados na fachada influencia a redução de energia térmica transmitida ao ambiente interno. Posicionar o coletor afastado da parede, criando assim um canal vertical de ar entre os dois, faz com que a maior parte do calor perdido pela parte traseira do coletor seja transmitida ao ar, alimentando um fluxo de ar ascendente, por conta de convecção natural, que exaure este calor para a atmosfera. Por outro lado, se o coletor estiver encostado na parede, ou mesmo se fizer parte da mesma, o calor será transmitido por condução até a sua face interna e, portanto, ao ambiente

interno, contribuindo para o aumento da carga térmica. Em contrapartida, o coletor encostado na parede faz da mesma um material isolante térmico, reduzindo a perda térmica pelo seu fundo e assim aumentando sua eficiência. O coletor afastado não se beneficiará deste efeito, mantendo a eficiência que teria em uma instalação padrão sobre o telhado, ou até mesmo ligeiramente menor pelo aumento da convecção natural na posição vertical. A forma de instalar depende do método de fixação adotado pelos fabricantes dos coletores, sendo proprietários dos mesmos, não havendo padronização ou compartilhamento. Em geral, priorizam a descrição [12].

### 3.2 Dimensionamento

O'Hegarty et al. [13] buscaram avaliar quais os casos em que se torna necessário o uso de coletores nas fachadas por falta de espaço sobre o telhado. Comparando os coletores integrados à fachada com o uso de coletores no teto, os autores salientam a flexibilidade mercadológica, potenciais vantagens arquitetônicas, possibilidade de atuação multifuncional, redução da perda de calor através da tubulação pela aproximação do coletor ao usuário final e uma redução do potencial de sobreaquecimento quando os coletores são instalados na vertical.

Os autores ressaltaram a dificuldade de prever com precisão o consumo de água quente para cada um dos quatro tipos de prédios considerados (residencial, hotel, hospital e escritórios). São reunidas recomendações de vários países e fica evidente a falta de informação e de homogeneidade de padrões ao redor do mundo. Mesmo para o caso dos apartamentos residenciais, para os quais se tem mais informações, os valores de litros *per capita* diário variam de 26 (acrescido de 28 para a habitação) no Reino Unido, até 65 no Canadá e América do Sul. Interessante que no artigo não é especificada a temperatura desta água, cuja variação pode significar alterações significativas da área dos coletores necessária e até das opções de tecnologias. O consumo diário *per capita* em litros chega a 110 para um hotel cinco estrelas no Brasil e a 197 para um hospital nos EUA. Em oposição, o único dado obtido para o consumo em apartamento de escritórios mostra um consumo de apenas 4 L.

A lista de variáveis envolvidas neste tipo de cálculo é extensa, mas conclui-se ser importante buscar adaptar o projeto o mais fielmente possível às condições locais ao invés de depender de dados obtidos em outros contextos de localização geográfica. Como exemplo disto, uma peculiaridade encontrada foi o uso de fator solar de apenas 0,25 ou 0,5 para as simulações. No Brasil, é comum usar fator solar de 0,7 ou mais para o projeto

[5]. Isto pode ser explicado pelo relativo baixo custo da energia solar no Brasil, por conta da abundância solar disponível; pelo alto custo operacional da alternativa, que é o aquecimento por chuveiro elétrico; e por termos menor amplitude de temperatura entre as estações do ano, o que ajuda a minimizar o desperdício para fatores solares mais elevados e ainda protege do risco de sobreaquecimento do sistema.

Uma métrica interessante apresentada por O'Hegarty et al. é a relação entre a área do telhado e a área da fachada (apenas da parede relevante para o aproveitamento solar). Esta métrica simples torna-se muito significativa para a comparação de empreendimentos diferentes quanto à necessidade de aproveitamento da fachada. O estudo de caso apresentado possui a relação de 0,1 (300 m<sup>2</sup> de telhado e 3000 m<sup>2</sup> de fachada), mas são simulados prédios menos esguios, com relação de 0,2 ou 0,4. Como é de se esperar, enquanto um prédio com fator telhado/fachada de 0,1 precisará fazer uso da fachada para quase todos os tipos de habitação, um prédio com fator de 0,4 só precisará fazer uso da fachada para finalidades de alto consumo de água quente, no caso o hotel e o hospital, e apenas quando adotado fator solar de 0,5 e densidade populacional no topo da escala.

Em um artigo mais recente, os mesmos autores fizeram uma revisão e análise de fachadas solares térmicas, com considerações a respeito das opções construtivas [12]. A redução da energia térmica anual de um coletor plano na vertical comparada à do mesmo coletor com uma inclinação ótima foi obtida para instalação em Dublin como sendo de 26%, mas ao mesmo tempo é apresentada da literatura uma faixa de fator de aumento da área necessária para sistemas verticais entre 1,5 e 2,0. É apresentada como alternativa a possibilidade de uso de coletores solares tubulares a vácuo montados na horizontal, que podem ser instalados de forma que o absorvedor esteja com a inclinação ótima. A dificuldade fica por conta da integração dos tubos à fachada. São sugeridos para o uso de proteção ao redor de varandas (Figura 7, II) ou como venezianas acima de janelas para reduzir o sol direto incidente (Figura 7, V).

O coletor integrado exerce função de fachada, além da função principal de absorvedor de energia solar. Assim, dependendo da forma como é instalado, pode substituir parte da parede ao invés de simplesmente ser sobreposto à uma parede completa, como pode ser visto nos exemplos da Figura 7. Existe, então, potencial para redução de custo da construção quando comparado à instalação de coletor não integrado. Foram apresentados pelos autores dados da literatura sugerindo um aumento do custo do coletor integrado, quando comparado ao custo da parede simples, entre 150% e 333%. Embora não mencionado pelos autores, existe potencial de redução de custo de sistemas

de fachada de torres altas em comparação à instalação sobre o telhado por conta da proximidade do coletor ao usuário da água aquecida.


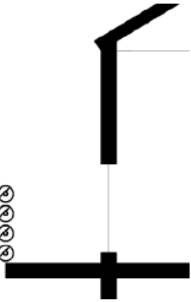


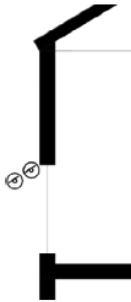
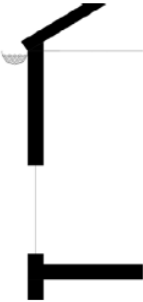

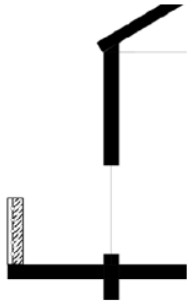
				
Technology	i) FPC	ii) ETC	iii) FPC/ETC	iv) UC
Location	Opaque Facade Area	Balcony	Transparent Facade Area	Opaque Facade Area
Advantages	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Range of colours</li> <li>• Geometric flexibility</li> <li>• Material offsetting</li> <li>• Inherent flat surface</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Adjustable absorber inclination</li> <li>• Material offsetting</li> <li>• Multi-functional</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disguised in facade</li> <li>• Multi-functional</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Range of colours</li> <li>• Cost</li> <li>• Ease of fabrication</li> <li>• Inherent flat surfaces</li> </ul>
Dis-advantages	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Access difficulties</li> <li>• Connection difficulties</li> <li>• Performance reduction</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Connection difficulties</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Access difficulties</li> <li>• Connection difficulties</li> <li>• Performance reduction</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Performance reduction</li> </ul>
				
Technology	v) ETC/FPC	vi) FPC	vii) MSTC	viii) FPC
Location	Louvre	Gutter	Opaque Facade Area	Balcony
Advantages	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Adjustable absorber inclination</li> <li>• Multi-functional</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disguised</li> <li>• Multi-functional</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cost</li> <li>• Disguised</li> <li>• Inherent flat surface</li> <li>• Material offsetting</li> <li>• Storage benefits</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inherent flat surface</li> <li>• Material off setting</li> <li>• Multi-functional</li> </ul>
Dis-advantages	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Access difficulties</li> <li>• Connection difficulties</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Access difficulties</li> <li>• Connection difficulties</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Access difficulties</li> <li>• Connection difficulties</li> <li>• Performance reduction</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Connection difficulties</li> <li>• Performance reduction</li> </ul>

Figura 7: Exemplos de coletores integrados [12].

### 3.3 Estética

Painéis e coletores solares comerciais sempre tiveram a aparência deslocada da arquitetura como um ponto potencialmente negativo. Isto ocorre, em parte, por estarem parcialmente escondidos sobre o telhado, e em parte por terem sido desenvolvidos como uma tecnologia a ser adaptada em uma construção já existente. Assim, o desenvolvimento de coletores comerciais não incorporou o apelo estético de forma relevante. Mas a

perspectiva da popularização das fachadas solares vem motivando o desenvolvimento de técnicas de diversificação da estética, até então rígida, do coletor. Uma enquete respondida por mais de 170 profissionais demonstrou que o coletor padrão retangular, preto ou azul escuro, não é apropriado esteticamente para fachadas, varandas e objetos arquitetônicos [14]. As principais pesquisas encontradas buscavam desenvolver coletores planos com novas formas e novas cores.

Visa et al. [15] sugeriram o desenvolvimento de coletores planos em formato de triângulos equiláteros para permitir a composição de outras formas derivadas, e coletores em formato de trapézios isósceles, equivalentes à união de três coletores triangulares, para compor formas de maior área. Os autores salientam a necessidade de desenvolver painéis que não são muito grandes para aumentar o potencial de cobertura da fachada, principalmente de fachadas pequenas, mas ao mesmo tempo que não podem ser muito pequenos por conta de limitações hidráulicas que causam perdas de carga excessivas. Foram propostas laterais de 0,7 a 1,2 m de comprimento.

A distribuição dos tubos internos do coletor precisa ser reavaliada para ser mantida a funcionalidade nos formatos alternativos. Os autores calcularam um espaçamento ótimo de 10 a 12 cm para tubos de  $\frac{1}{2}$ ". Ainda, as conexões externas são críticas para a possibilidade de compor arranjos em série e paralelo conforme a necessidade. No coletor triangular proposto, as conexões ocorrem no centro da face traseira, conforme Figura 8. Para tal, os coletores não devem ser montados diretamente na fachada, mas sim em uma estrutura própria que permite montar uma rede de tubos sem prejudicar a estética final. Uma característica interessante do coletor proposto é o uso intercalado de tubos “frios” e “quentes”, com o contorno formado pela seção de temperatura intermediária. Isto promove uma distribuição mais homogênea da temperatura, o que poderia beneficiar a eficiência do coletor.



*Figura 8: Arranjo dos tubos internos de coletor triangular proposto para uso em fachadas [15].*

Mais recentemente, Visa e outros coautores [16] reaperentaram o conceito do coletor trapezoidal. Contudo, neste novo trabalho, salientaram a necessidade dos tubos



internos do coletor serem mantidos na horizontal, para ser mantida a funcionalidade, de forma que foram propostas quatro variantes do coletor trapezoidal, cada uma com um arranjo distinto da tubulação, permitindo criar composições elaboradas sempre mantendo a tubulação horizontal.

O protótipo construído, com área útil de  $0,67 \text{ m}^2$ , apresentou eficiência nominal inferior à do coletor comercial usado como referência, 69,42% e 85,11%, respectivamente. Uma razão apresentada, relevante para todos os coletores com esta proposta, é uma maior relação entre a área das superfícies laterais e a área útil, o que aumentaria as perdas térmicas. No entanto, o coletor menor se adapta com mais precisão às limitações da fachada quando comparado aos coletores retangulares, usualmente com áreas entre  $1,5$  e  $2,0 \text{ m}^2$ , de forma que a área útil instalada pode ser maior. Nas simulações de montagem realizadas, os autores constataram ser possível obter potência instalada quase três vezes maior com os coletores trapezoidais, conforme Figura 9.

As conexões são localizadas nas laterais, de forma que algumas composições necessitam manter um espaço entre os coletores para a passagem da tubulação. Entretanto, o coletor pode ser instalado rente à parede, se desejado.



Figura 9: Exemplos de fachadas térmicas, comparando o uso de coletores retangulares tradicionais com os coletores de formato trapezoidal sugeridos [16].

O desenvolvimento de colorações distintas abrange soluções para o vidro, para o qual deseja-se alta transmissibilidade e baixa refletividade, e para o absorvedor, para o qual deseja-se alta absorbância. Além das características óticas, é fundamental apresentar resistência a altas temperaturas e a corrosão.



Orel et al. [17] desenvolveram pigmentação azul, verde e vermelha para os absorvedores, fazendo uso de resina de poliuretano, à qual foram adicionados pigmentos formados de flocos de alumínio e de óxido de ferro. As cores azul e verde obtiveram os melhores resultados, mantendo a seletividade e valores de croma (escala que distingue as cores do cinza) elevados, entre 7 e 27, enquanto a coloração vermelha apresentou resultados inferiores. Dentre as recomendações está evitar o uso de pigmentos de flocos de cobre por conta da baixa resistência a corrosão.

Em um estudo do estado da arte, O'Hegarty et al. concluíram que, para pigmentações azuis e amarelas obtidas com óxidos de titânio, as perdas de eficiência do coletor pigmentado, seja no vidro ou no absorvedor, ficam em torno de 3 a 9%. Estas reduções de eficiência são mais significativas para coletores sem cobertura, que já possuem eficiências menores para altas temperaturas. Como regra geral, é sugerido que, para cores escuras, deve-se pigmentar o absorvedor, enquanto que, para cores claras, é preferível pigmentar o vidro.

A partir destes apontamentos, é possível ressaltar a importância dada à estética em coletores solares. É um fator preponderante na escolha do uso da tecnologia, talvez até em detrimento das especificações técnicas, econômicas e de preservação ambiental.

### 3.4 Modelamento

Lamnatou et al. [18] apresentaram uma revisão da literatura a respeito de modelamentos de sistemas, com ênfase em solar térmico integrado à construção. Concluíram que a maioria das investigações de modelamento de sistemas integrados referem-se a sistemas fotovoltaicos ou híbridos, havendo uma carência de estudos a respeito de coletores térmicos, em particular de sistemas ativos. Concluem, ainda, haver uma carência de estudos de simulações óticas e de análises de ciclo de vida.

Em resposta a esta carência, Leone e Beccali [7] buscaram simular, por meio de metodologia de elementos finitos, a curva de eficiência de um coletor solar térmico para ar quando o mesmo está integrado à fachada. Segundo os autores, nesta situação, tanto a performance do coletor como a do prédio são afetadas. Enquanto a parede da construção influencia as perdas traseiras do coletor, alterando sua eficiência, os fluxos térmicos do envelope do prédio precisam ser reavaliados considerando o coletor como parte do mesmo.

Fazendo uso das condições de contorno requeridas pelas normas para o teste de coletores, foi desenvolvido um modelo que, após sua calibração, permitiu desenhar curvas

de eficiências compatíveis com as fornecidas pelos fabricantes para coletores não integrados. De posse das curvas de eficiência, os autores dizem ser possível implementá-las em modelos precisos de simulação de prédios, como o TRNSYS, para uma avaliação precisa do sistema integrado operando em condições climáticas reais ao longo de um ano típico para as localidades especificadas. Recomendam, inclusive, fazer uso do *Type 539* do TRNSYS, um módulo que simula coletor térmico para água fazendo uso dos coeficientes da curva de eficiência e da capacidade térmica do coletor.

Para os coletores de baixo custo construídos pelos autores para a validação da simulação, as curvas de eficiência simuladas quando integrados à edificação apresentaram um ganho na eficiência, como esperado, por conta do aumento da isolamento térmica no fundo do coletor. Estes ganhos foram mais significativos para baixas velocidades de ar (chegando a um máximo de 6% para vazão de 0,01 m/s no coletor de geometria mais simples) e menos significativas em velocidades mais altas (aumento de apenas 2% para a velocidade de 0,05 m/s no mesmo coletor mais simples, e não sendo observadas quaisquer alterações para esta velocidade no coletor mais elaborado). Esta diferença pode ser explicada por conta das menores temperaturas alcançadas pelo absorvedor quando as trocas de calor são favorecidas, seja porque a vazão de ar é maior ou pelo uso de uma geometria mais elaborada.

### 3.5 Sobreaquecimento e conforto térmico

Um problema mencionado de forma recorrente nas pesquisas a respeito de coletores solares térmicos é o do sobreaquecimento. Típico dos meses de verão, quando a intensidade solar é maior, principalmente em sistemas superdimensionados para esta situação por conta da necessidade de atender a um fator solar nos meses de inverno, este sobreaquecimento pode causar danos permanentes ao sistema, em componentes como vedações, isolamentos, revestimentos e conexões. Para casos extremos em sistemas para aquecimento de água, pode ocorrer a geração de vapor e o súbito aumento de pressão, com potencial para consequências desastrosas.

Quando instalados na fachada, adquire-se uma proteção natural contra sobreaquecimento por conta da necessidade de posicionar os coletores a 90°, gerando um ângulo de incidência solar muito elevado, principalmente no verão quando o Sol está mais alto [12]. Por outro lado, o aumento da isolamento traseira leva a uma redução das perdas térmicas e consequente a um aumento da temperatura do absorvedor.

Coletores térmicos para fachada com capacidade para girar até 20° para cima ou para baixo são uma solução para o sobreaquecimento. Além de possibilitarem um aumento da absorção para o caso em que os coletores estão virados para o alto, equivalente a um aumento de 7% no inverno e 109% no verão, com relação à energia solar direta incidente na vertical para equipamento instalado em latitude 45,65°N, o giro de 20° no sentido oposto reduziria a energia incidente para apenas 12% no verão, efetivamente impedindo o sobreaquecimento [16].

Hengstbergera et al. [6] propõem uma solução passiva para o controle do sobreaquecimento: o uso de materiais com mudança de fase em altas temperaturas. Uma camada deste material seria posicionada entre o coletor e a face interna da parede sobre a qual o coletor está instalado e, exposta a temperaturas excessivas, passaria do estado sólido para o líquido, absorvendo calor e agindo como um reservatório desta energia excessiva. Quando a situação de sobreaquecimento cessasse, por exemplo de noite, o material voltaria a se solidificar, liberando a energia térmica acumulada, regenerando-se para o próximo ciclo.

Os autores apresentam, ainda, mais uma consequência negativa do sobreaquecimento, que é o aumento da temperatura da face interna da parede, que por sua vez traz desconforto térmico para as pessoas expostas. As medições realizadas, com sistemas de aquecimento de ar, indicaram que a temperatura da parede alcançou os 30°C quando sem proteção. Para temperatura do ar de 21°C, a temperatura das paredes não deve exceder 25°C para manter o conforto térmico, conforme gráfico da Figura 10.

Em seus experimentos, o uso de camadas mais espessas de isolante térmico não foi suficiente para evitar o aumento da temperatura das paredes, mesmo quando a espessura do isolante foi dobrada. Os autores ressaltam que técnicas para combater o sobreaquecimento geralmente atuam reduzindo a eficiência dos coletores. Para sistemas de aquecimento solar de água isto não costuma ser um problema, dado que os mesmos fazem uso de reservatórios que devem estar dimensionados para atender à demanda, de forma que um sobreaquecimento é consequência de o reservatório estar acima da temperatura desejada, o que garante com folga o atendimento da demanda.

Das muitas alternativas de materiais para mudança de fase disponíveis, como hidratos de sais ou parafinas, os autores destacam álcoois de açúcar pelo alto calor latente, que permite absorver mais energia.

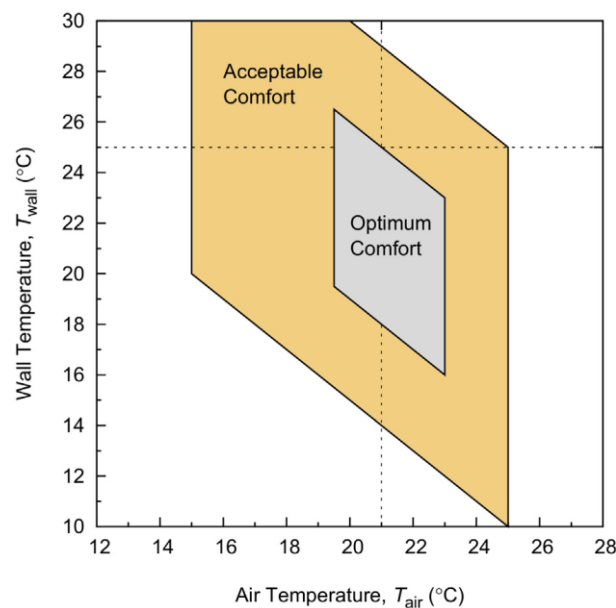


Figura 10: Gráfico de faixas de temperatura do ar e das paredes para conforto térmico [19] [6].

Através de simulações com um modelo unidimensional, os autores encontraram uma relação entre a temperatura de fundição e a distância ótima do coletor, sempre mantendo fixa a espessura total da parede e das camadas de material isolante térmico. A distância ótima é aquela que mais reduz a temperatura da face interna da parede. Em geral, materiais com pontos de fusão baixos devem ser posicionados próximos da face interna da parede. Um material de ponto de fusão de  $25^\circ\text{C}$ , a temperatura máxima aceitável para a parede, posicionado rente à face interna, protegeu a parede de sobreaquecimento, mas apenas no primeiro dia. O material não conseguiu se regenerar completamente até o início do segundo dia, de forma que perdeu sua efetividade.

Um material com ponto de ebulição de  $40^\circ\text{C}$  posicionado a 8 cm do coletor foi suficiente para manter a temperatura abaixo de  $25^\circ\text{C}$  por todo o ciclo de 7 dias simulado. Materiais com temperaturas de ebulição mais altos foram todos bem-sucedidos e obtiveram posicionamentos ótimos cada vez mais próximos do coletor, conforme Figura 11. Entretanto, os autores recomendam o uso de materiais com alto ponto de fusão posicionados próximo ao coletor, pois estes materiais se regeneram mais rapidamente e estão menos suscetíveis a variações de temperatura do interior do prédio. Ainda, por estarem posicionados próximos ao coletor, o calor devolvido é em grande parte direcionado ao mesmo, o que, conseqüentemente, contribui para a energia absorvida pelo sistema de aquecimento solar, aumentando a eficiência global e ainda agindo como um retardante, permitindo aquecer sem exposição ao Sol, até ser concluída a regeneração do material.

Vale destacar que o trabalho em questão foi simulado considerando aquecedor solar para ar e, portanto, suas conclusões devem ser ponderadas para o uso com aquecedores para água. Primeiro, o absorvedor de um coletor para ar alcança temperaturas mais elevadas, na simulação os autores relatam temperaturas acima dos  $200^{\circ}\text{C}$ , que seriam suficientes para ferver a água. Assim, um material usado com o propósito de se fundir deveria ter ponto de fusão acima da temperatura desejada para a água do reservatório, mas abaixo do limite de sobreaquecimento desejado e definitivamente abaixo dos  $100^{\circ}\text{C}$ . Ainda, a perda de calor para o absorvedor durante o processo de regeneração provavelmente seria dificultada se a temperatura da água se mantivesse elevada. Isto seria o caso se a água quente não fosse consumida durante a noite, como por exemplo quando os moradores não se encontram presentes ou decidem usar água mais fria para o banho. O sistema deveria, então, ser associado a uma forma de dissipar o calor excedente para a atmosfera (preferencialmente externa) durante a noite, e este calor a ser dissipado seria somado do calor absorvido durante a troca de fase. A solução mais simples seria manter a circulação de água ativa até atingir a redução de temperatura desejada, mas também pode ser pensado em um mecanismo como o que é usado em paredes Trombe, nas quais o fluxo de ar pode ser alterado para aquecer o interior do prédio ou para evacuar o excesso de calor para a atmosfera.

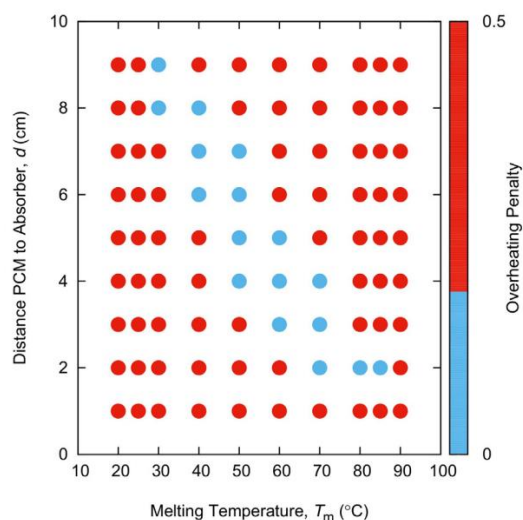


Figura 11: Relação simulada entre ponto de fusão do material usado para proteção contra sobreaquecimento e sua distância ideal do coletor [6].

## 4 Modelo e simulações

Neste capítulo, é desenvolvido o modelo adotado para as simulações, salientando os parâmetros analisados e seus valores na configuração padrão. São apresentados o programa TRNSYS e os dados meteorológicos utilizados e a organização das simulações conforme os parâmetros comparativos analisados.

### 4.1 Sobre o TRNSYS

O TRNSYS é um programa para simulação disponível no mercado há 35 anos, desenvolvido pela universidade de Wisconsin [20]. Ele foca em problemas transientes, especialmente da área de engenharia de energia. Originalmente desenvolvido para a simulação dos ganhos ao longo do ano de sistemas residenciais de aquecimento solar de água, hoje pode ser usado para a validação de prédios de baixo consumo energético, estratégias de controle, comportamento da ocupação, sistemas alternativos de energia (eólico, fotovoltaico, hidrogênio), além de problemas dinâmicos não relacionados à energia, como trânsito ou processos biológicos.

O TRNSYS é composto de duas partes. A primeira é o *engine* que lê e faz o processamento dos dados de entrada, soluciona o sistema iterativamente, determina convergência e plota variáveis do sistema [21]. A segunda parte é uma biblioteca de componentes, chamados de *Types*, os quais simulam as mais diversas partes do sistema. Os *Types* requerem alimentação de dados (*inputs*), realizam alguma forma de processamento com parâmetros configuráveis e geram resultados (*outputs*). Todos são distribuídos ao longo de uma área de trabalho gráfica e conectados com linhas que representam quais *Types* estão alimentando outros *Types* com seus resultados.

Por exemplo, um reservatório (*type 4*) seria alimentado com informações a respeito das temperaturas das águas de entrada e de condições climáticas e forneceria como resultados a temperatura da água na saída e as perdas térmicas ao ambiente. O resultado de temperatura da saída alimenta a entrada de um coletor solar (*type 1*), que também recebe informações sobre as condições climáticas, e calcula a temperatura de saída baseada em parâmetros como a curva de eficiência. A Figura 12 exemplifica os parâmetros considerados pelo *software* através de telas capturadas durante seu uso.

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment						
1		Variable inlet positions	2	-	More...							
2		Tank volume	1.238	m <sup>3</sup>	More...							
3		Fluid specific heat	4.190	kJ/kg.K	More...							
4		Fluid density	1000.0	kg/m <sup>3</sup>	More...							
5		Tank loss coefficient	0.694444	W/m <sup>2</sup> .K	More...							
6		Height of node-1	0.3	m	More...							
7		Height of node-2	0.3	m	More...							
8		Height of node-3	0.3	m	More...							
9		Height of node-4	0.3	m	More...							
<table border="1"> <tr> <td>1</td> <td>How many temperature levels (nodes) should be used in the tank?</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>How many heating elements to be modeled in this tank?</td> <td>2</td> </tr> </table>							1	How many temperature levels (nodes) should be used in the tank?	6	2	How many heating elements to be modeled in this tank?	2
1	How many temperature levels (nodes) should be used in the tank?	6										
2	How many heating elements to be modeled in this tank?	2										

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment			
1		Hot-side temperature	45.0	C	More...				
2		Hot-side flowrate	0	kg/hr	More...				
3		Cold-side temperature	15	C	More...				
4		Cold-side flowrate	0	kg/hr	More...				
5		Environment temperature	20	C	More...				
6		Control signal for element-1	1	-	More...				
7		Control signal for element-2	0.0	-	More...				
<table border="1"> <tr> <td>1</td> <td>How many heating elements to be modeled in this tank?</td> <td>2</td> </tr> </table>							1	How many heating elements to be modeled in this tank?	2
1	How many heating elements to be modeled in this tank?	2							

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment			
1		Temperature to heat source	C	More...	<input type="checkbox"/>				
2		Flowrate to heat source	kg/hr	More...	<input type="checkbox"/>				
3		Temperature to load	C	More...	<input type="checkbox"/>				
4		Flowrate to load	kg/hr	More...	<input type="checkbox"/>				
5		Thermal losses	kJ/hr	More...	<input type="checkbox"/>				
6		Energy rate to load	kJ/hr	More...	<input type="checkbox"/>				
7		Internal energy change	kJ	More...	<input type="checkbox"/>				
8		Auxiliary heating rate	kJ/hr	More...	<input type="checkbox"/>				
9		Element 1 power	kJ/hr	More...	<input type="checkbox"/>				
<table border="1"> <tr> <td>1</td> <td>Besides the top and bottom nodes, how many other nodes are there?</td> <td>4</td> </tr> </table>							1	Besides the top and bottom nodes, how many other nodes are there?	4
1	Besides the top and bottom nodes, how many other nodes are there?	4							

Figura 12: Captura de tela do TRNSYS: Janelas de parâmetros, Inputs e Outputs do Type 4 - Reservatório.

Um módulo que merece destaque é o da construção, o *type 56*. Com ele, é possível fazer com que todos os outros módulos interajam com uma construção com múltiplos ambientes e detalhadas características construtivas. É possível determinar padrões de ocupação, cargas térmicas, consumo de água, entre tantos outros parâmetros, e ter como saída dados como o consumo energético, a temperatura dos cômodos e a troca de ar. O nível de detalhamento do *type 56* obedece aos requerimentos do ANSI/ASHRAE Standard 140-2001, assim como aos requisitos técnicos da Diretiva Europeia para Performance Energética de Construções. O TRNSYS foi usado para a simulação de prédios para diversos projetos LEED [20].

#### 4.2 Dados climáticos no formato ano padrão

O TRNSYS aceita como referência climática arquivos em formato TMY, sigla em inglês para Ano Meteorológico Típico. O arquivo consiste em meses selecionados de diferentes anos, escolhidos ao longo de um período longo, tipicamente de 30 anos, e concatenados para formar um ano completo. Nele estão dados de hora em hora para radiação solar e outros elementos meteorológicos. A escolha dos meses é feita de forma que os mesmos sejam estatisticamente representativos de um mês típico, de modo que estes dados não devem ser usados para dimensionar sistemas e componentes para atenderem a condições extremas.

O NREL, Laboratório Nacional de Energias Renováveis, na sigla em inglês, pertencente ao Departamento de Energia dos EUA, disponibiliza gratuitamente em seu *site* arquivos no formato TMY [22]. Para localidades nos EUA, o NREL está na terceira grande atualização, que trouxe dados de anos mais recentes e pequenas alterações no formato. A primeira versão usa dados de 1952 a 1975 para 26 localizações, extrapolados para gerar arquivos para 234 lugares; a segunda versão, chamada TMY2, usa dados de 1961 a 1990, com mudança de padrão de horário (solar versus local) e mudanças de unidades, estando disponível para 239 localizações; por fim, a terceira versão, TMY3, usa dados de 1990 a 2005 e expandiu as localizações para 1020, todas ainda nos EUA.

Dados meteorológicos gratuitos com este grau de detalhamento não são fáceis de encontrar, mas o governo dos EUA disponibiliza arquivos TMY2 para 20 cidades brasileiras produzidos também pelo NREL, conforme Figura 13, construídos a partir de dados coletados entre 1973 e 2002 [23]. Os dados consistem em arquivos com um cabeçalho e mais 8760 linhas, cada uma correspondendo a uma hora do ano, e 145 dígitos



por linha, conforme Anexo 1. As simulações deste trabalho se baseiam no TMY2 da cidade de São Paulo – Congonhas, construído pelo NREL conforme Tabela 3.

O software TRNSYS16 inclui uma base de dados meteorológicos para diversas localidades do mundo, incluindo o Brasil, em formato TMY2, construídos usando o software meteonorm5, que faz uso de coletas de dados e de algoritmos de interpolação. Esta base de dados não acompanha maiores informações sobre a forma como foi elaborada. O ano registrado em cada entrada é 1996, não ficando claro como foi construído o TMY, ficando inclusive a dúvida sobre ser mesmo um TMY ou só o registro de 1996.

A comparação entre estas duas bases de dados mostrou algumas diferenças no formato, que tiveram que ser corrigidas no arquivo do NREL para que o mesmo fosse aceito pelo TRNSYS. O formato do cabeçalho é ligeiramente diferente, o ano da data está no formato de dois dígitos no arquivo Meteonorm, enquanto que no NREL são quatro dígitos, e algumas grandezas têm escalas com limites diferentes.



Figura 13: Mapa ilustrativo das 20 localidades brasileiras contempladas pelos arquivos TMY do NREL.

Tabela 3: Relação de cada ano utilizado para a montagem do TMY de São Paulo gerado pelo NREL.

Mês	Ano	Mês	Ano
Janeiro	1978	Julho	1989
Fevereiro	1996	Agosto	1974
Março	1975	Setembro	1986
Abril	1991	Outubro	1977
Maio	1997	Novembro	1980
Junho	1987	Dezembro	1981

### 4.3 O prédio a ser simulado e sua representação no TRNSYS

O prédio fictício a ser simulado fica na cidade de São Paulo e é um prédio residencial de médio padrão de 20 andares, com quatro apartamentos por andar, cada um com área de 64 m<sup>2</sup>. As dimensões aproximadas são 24 x 13 x 60 m e os coletores serão instalados na fachada de 24 m. Serão considerados 3,5 habitantes por apartamento, totalizando 14 habitantes por andar, para efeito de consumo de água quente para banho.

A simulação será de um único andar. No TRNSYS, o andar foi representado por um conjunto de quatro ambientes com paredes e janelas que estão fazendo ou a interface entre dois ambientes ou entre um ambiente e o exterior. Esta versão do TRNSYS não faz uso de plantas ou interpretações gráficas das paredes, apenas de áreas e direções. Os quatro ambientes foram idealizados conforme Figura 14, sendo o ambiente AP\_AR a representação de um apartamento com temperatura controlada por ar condicionado de potência ilimitada com *set point* de 24°C; o ambiente AP\_N\_AR representa um apartamento sem ar condicionado para a simulação de conforto térmico; o ambiente AP\_SUL representa os dois apartamentos restantes, dos quais não serão coletados resultados da simulação, de forma que eles existem apenas como uma área de amortecimento climático entre os apartamentos onde serão feitas medições e o ambiente externo; e finalmente o ambiente ACESSO é uma área que representa os corredores de acesso, escadas e elevadores. Na configuração padrão, o reservatório está localizado neste último ambiente, de forma as perdas térmicas não aquecem diretamente nenhum apartamento. O ambiente AP\_AR possui uma taxa de infiltração de ar de 0,15 vezes o volume total por hora, enquanto que o ambiente AP\_N\_AR possui infiltração de 0,6 vezes o volume por hora. Estes valores foram usados para simular um ambiente mais estanque por conta do ar condicionado em AP\_AR, enquanto que AP\_N\_AR pode ter algumas janelas abertas.

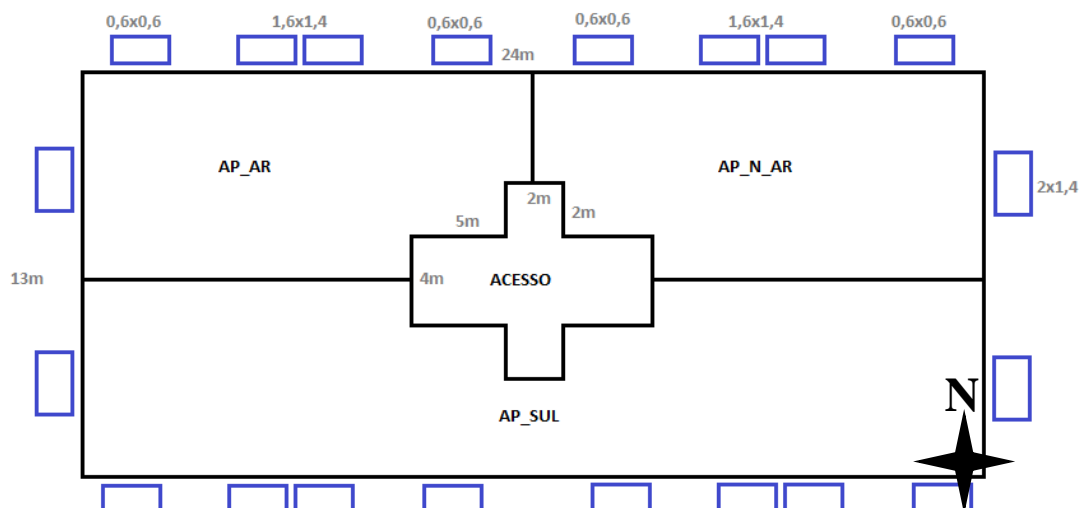


Figura 14: Planta representativa do andar a ser simulado, com dimensões e janelas. Sem escala.

Os andares têm 3 m de altura, dos quais 0,2 m são ocupados pela laje, de forma que os ambientes internos e as paredes internas possuem 2,8 m de altura. O piso e o teto dos ambientes AP\_AR e AP\_N\_AR são simulados como superfícies de contorno, com face externa a temperatura constante de 24°C e área de 64 m<sup>2</sup> cada. Os demais ambientes não têm superfícies representando o piso e o teto. A relação das paredes, como vistas pelo TRNSYS, está apresentada na Tabela 4, enquanto a relação de janelas está apresentada na Tabela 5. Importante notar que o TRNSYS reduz automaticamente a área das paredes por conta das janelas, de forma que as áreas das paredes incluem as áreas das janelas.

Tabela 4: Relação de paredes que compõem os ambientes simulados.

Parede entre os ambientes	Área [m <sup>2</sup> ]	Direção da face
AP_AR Exterior	36,0	Norte
AP_AR Exterior	19,5	Oeste
AP_AR AP_SUL	19,6	
AP_AR ACESSO	28,0	
AP_AR AP_N_AR	9,8	
AP_N_AR Exterior	36,0	Norte
AP_N_AR Exterior	19,5	Leste
AP_N_AR AP_SUL	19,6	
AP_N_AR ACESSO	28,0	
AP_SUL Exterior	72,0	Sul
AP_SUL Exterior	19,5	Oeste
AP_SUL Exterior	19,5	Leste
AP_SUL ACESSO	56,0	

Tabela 5: Relação de janelas que compõem os ambientes simulados.

<b>Ambiente</b>	<b>Área [m<sup>2</sup>]</b>	<b>Direção da face</b>	<b>Fator de sombreamento</b>
AP_AR	4,48	Norte	0,7
AP_AR	0,72	Norte	0
AP_AR	2,80	Oeste	0,7
AP_N_AR	4,48	Norte	0,7
AP_N_AR	0,72	Norte	0
AP_N_AR	2,80	Leste	0,7
AP_SUL	8,96	Sul	0,7
AP_SUL	1,44	Sul	0
AP_SUL	2,80	Oeste	0,7
AP_SUL	2,80	Leste	0,7

As paredes foram modeladas como a união de duas camadas de reboco, com uma camada de bloco cerâmico oco entre elas. As características do reboco e dos blocos cerâmicos foram obtidas de [24]. As lajes são novamente um sanduíche de camadas de reboco com uma camada interna de concreto importado da biblioteca interna do TRNSYS. As janelas todas são do tipo vidro simples, importadas da biblioteca interna, mas as janelas grandes apresentam fator de sombreamento interno elevado, simulando uma veneziana, enquanto que as pequenas, que poderiam ser do banheiro e da cozinha, não possuem obstáculos. As características dos materiais estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6: Propriedades dos materiais que compõem as paredes, as lajes e as janelas.

Reboco [24]			Bloco cerâmico [24]		
Espessura	0,02	m	Espessura	0,14	m
Condutividade	4,14	$\text{kJ}/(\text{h} \cdot \text{m} \cdot \text{K})$	Condutividade	3,78	$\text{kJ}/(\text{h} \cdot \text{m} \cdot \text{K})$
Capacidade	1	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	Capacidade	0,92	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
Densidade	2000	$\text{kg}/\text{m}^3$	Densidade	783	$\text{kg}/\text{m}^3$
Concreto			Vidro		
Espessura	0,16	m	Espessura	0,004	m
Condutividade	4,068	$\text{kJ}/(\text{h} \cdot \text{m} \cdot \text{K})$	U	5,68	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
Capacidade	1,00	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	$\tau_{\text{sol}}$	0,83	
Densidade	1400	$\text{kg}/\text{m}^3$	$P_{\text{sol}}$	0,075	
			Fração da armação	0,1	

#### 4.4 Simulações

Duas séries de simulações foram realizadas para determinar como diferentes parâmetros influenciam as grandezas avaliadas. A primeira série tem como resultado o fator solar (FS) e tem como principal motivação entender como a área dos coletores e suas eficiências, grandezas estas que poderiam ser associadas a um custo, afetam a disponibilidade de água quente, o que pode ser visto como uma economia. Enquanto uma avaliação econômica foge do escopo desta monografia, os resultados podem ser usados imediatamente para encontrar um ponto ótimo de retorno do investimento, bastando para tal ter valores comerciais para compra e instalação de diferentes modelos.

A segunda série de simulações busca avaliar o impacto do sistema na carga térmica. Para tal serão sempre coletados resultados do par de apartamentos vizinhos, AP\_AR e AP\_N\_AR. No apartamento com ar condicionado, a grandeza a ser avaliada é a carga térmica sensível, ou seja, a energia térmica referente à temperatura excedente no ar do apartamento que é removida para respeitar o limite máximo imposto. No apartamento sem ar condicionado, por falta de uma grandeza que possa ser facilmente convertida em um ganho financeiro, será usada uma avaliação de conforto térmico. O resultado da simulação será uma nota PMV (Predicted Mean Vote), conforme norma EN ISO 7730, que reflete a insatisfação média com a temperatura.

Já que o interesse é medir o quanto a instalação do sistema potencialmente ajuda a refrescar o ambiente, serão considerados apenas os valores positivos do PMV gerado, que representam o quanto o ambiente está excessivamente quente em uma escala de zero a três, sendo zero um ambiente confortável e três um ambiente extremamente quente. O PMV depende de uma série de variáveis calculadas pelo TRNSYS e de alguns parâmetros que foram atribuídos como constantes: um fator de vestimenta (0,70 clo), uma taxa metabólica (1,2 met), um trabalho externo (0 met) e a velocidade do vento (0,1 m/s). A taxa metabólica de 1,2 met é descrita como atividade sedentária (escritório, residência, escola, laboratório) e o fator de vestimenta 0,7 clo é representativo de cueca, calça, camisa, meia e sapatos [25]. Este valor de fator de vestimenta foi adotado porque é o valor para o qual o PMV encontra-se bem próximo de zero em um ambiente a 24°C, para os demais parâmetros como especificados, de forma que se cria uma certa compatibilidade com a avaliação do apartamento com ar condicionado cujo *set point* também é 24°C.

Os resultados de cada simulação serão comparados com os resultados de uma configuração padrão. Esta configuração padrão foi escolhida como sendo a que apresenta os coletores na face mais comprida do prédio quando a mesma está voltada para o norte. Os coletores estão montados sobrepostos à parede, com um espaçamento que garante um desacoplamento térmico com a parede. O reservatório se encontra na zona ACESSO. O dimensionamento do reservatório e do número de coletores para a configuração padrão foi feito com base no método simplificado apresentado na ABNT NBR 15569:2008, conforme descrito no capítulo 2.2 e os parâmetros usados estão na Tabela 7, baseados no exemplo para sistema residencial na cidade de São Paulo apresentado em [5].

*Tabela 7 - Parâmetros do sistema coletor/reservatório para a configuração padrão.*

Número de habitantes por andar	14
Frequência de banhos	1,5 (dia·habitante) <sup>-1</sup>
Tempo por banho	10 minutos
Vazão do chuveiro	6,6 L/min
Temperatura ambiente	20°C
Temperatura do banho	45°C
Temperatura de armaz.	50°C
Perdas do reservatório	0,694 W/(m <sup>2</sup> ·K)
Fr <sub>τα</sub>	0,7

$Fr_{UL}$	5,6 W/(m <sup>2</sup> ·K)
Orientação	Norte
Irrad. global média anual	3,85 kWh/(m <sup>2</sup> ·dia)
$V_{consumo}$ – Eq. [ 2. 23 ]	1,485 m <sup>3</sup> /dia
$V_{armaz.}$ – Eq. [ 2. 20 ]	1,238 m <sup>3</sup>
$E_{útil}$ – Eq. [ 2. 21 ]	43,19 kWh/dia
$E_{perdas}$ – Eq. [ 2. 22 ]	6,48 kWh/dia
$FC_{instal}$ – Eq. [ 2. 19 ]	1,639
PMDEE – Eq. [ 2. 17 ]	2,75 kWh/(m <sup>2</sup> ·dia)
$A_{coletora}$ – Eq. [ 2. 18 ]	37,7 m <sup>2</sup>
Fração da fachada ocupada	52,4%

Foi estimado um padrão de consumo de água quente para banho com 40% da água consumida pela manhã, entre as 6 e as 8 horas; 20% da água consumida no meio do dia, entre as 11 e as 13 horas; e 40% da água consumida de noite, entre as 18 e as 22 horas. Esta distribuição pode ser vista na Figura 15. Os valores e dimensões foram tomados de forma que a integral do consumo diário seja igual a 1, adimensional, para facilitar a implementação da vazão diária.

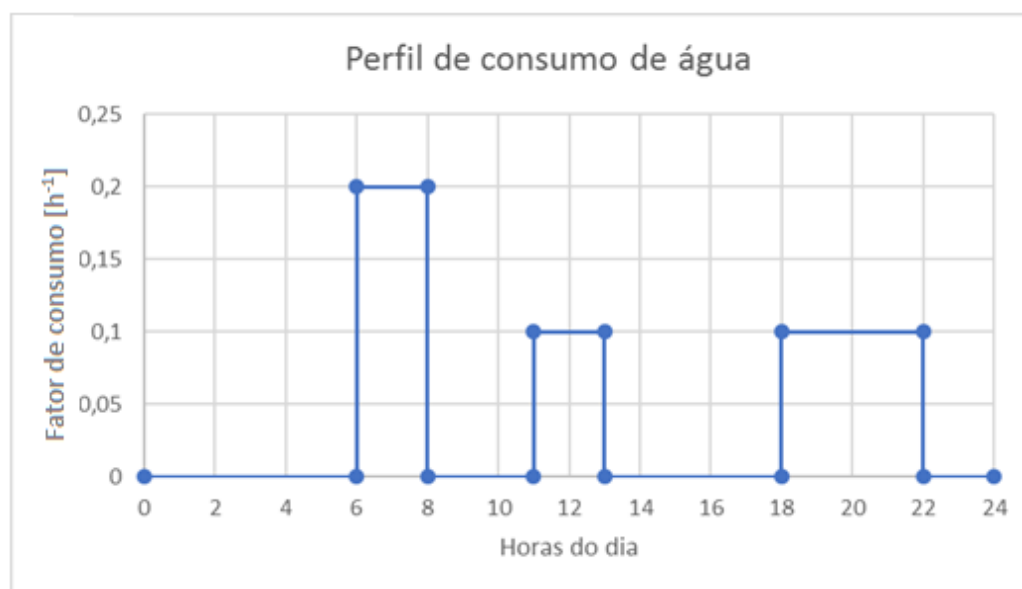


Figura 15: padrão diário de consumo de água quente para banho.

A Figura 16 é uma captura da tela do TRNSYS para ilustrar sua área de trabalho principal e mostrar como os principais *Types* utilizados neste trabalho se interligam em uma rede de *inputs* e *outputs*.

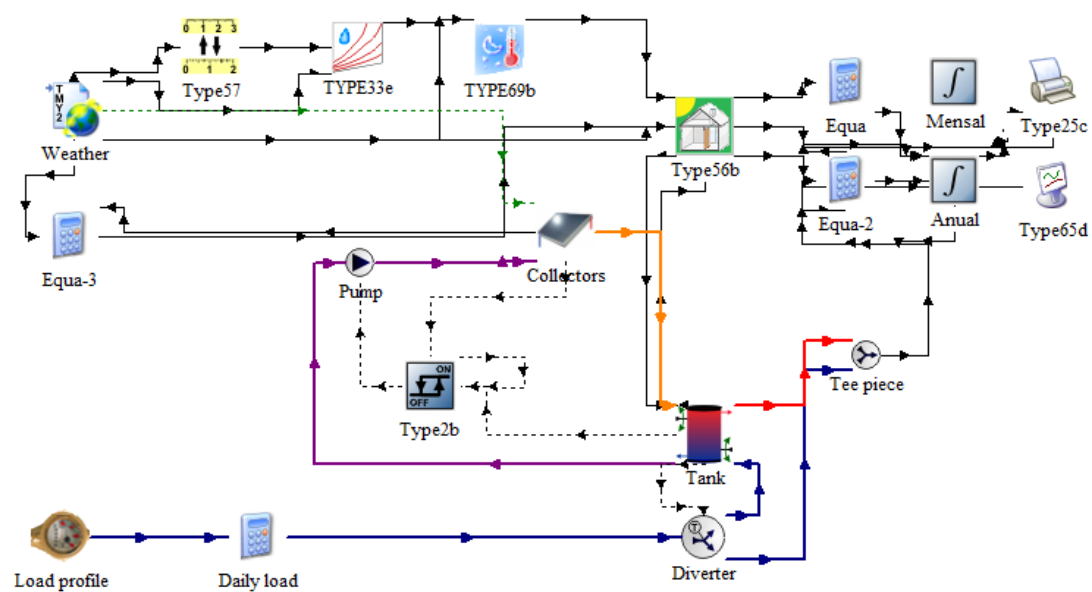


Figura 16: Captura de tela do TRNSYS ilustrando os Types utilizados e como eles se interligam.



## 5 Resultados e discussão

Neste capítulo, serão apresentados os resultados das simulações, que são o objetivo deste estudo. Primeiro serão expostas as análises de sensibilidade se referindo à eficiência do sistema de aquecimento solar, como por exemplo características do coletor e do reservatório, sempre usando como métrica o fator solar, FS, que indica quanto do consumo de água quente a 45°C foi suprido pelo sistema. Fica subentendido que, quando a temperatura no reservatório não é suficiente, o usuário usará um chuveiro com aquecedor elétrico para complementar o aquecimento. Para se ter uma noção do impacto financeiro da variação do FS, usando uma tarifa de R\$0,57/kWh, uma variação de 1% no FS equivale a um custo anual de aproximadamente R\$90,00 para um único andar de quatro apartamentos, conforme o adotado nas premissas deste estudo.

Em seguida, serão apresentados os resultados referentes ao aquecimento do ar nos apartamentos AP\_AR e AP\_N\_AR, sendo que no primeiro o resultado será apresentado na forma da energia térmica sensível que é absorvida pelo sistema de ar condicionado para manter a temperatura a 24°C, e no segundo o resultado é derivado do PMV, uma nota dada ao conforto térmico, usando apenas os valores positivos que indicam temperaturas desconfortavelmente altas.

### 5.1 Simulações voltadas ao fator solar

Inicialmente, foram feitas simulações nas configurações padrões, conforme descrito na Tabela 7, para cada um dos dois arquivos de dados meteorológicos em formato TMY2 disponíveis: o arquivo do NREL e o arquivo Meteonorm. Os resultados, conforme mostrado na Tabela 8, mostram que os dados do NREL são significativamente mais favoráveis para o uso do sistema de aquecimento solar térmico para água de banho. Visando favorecer resultados mais conservadores, o arquivo Meteonorm foi escolhido como o padrão, para ser usado nas demais simulações. Ainda, o arquivo é fornecido junto com o TRNSYS, presumidamente em um formato apropriado. O arquivo do NREL precisou ser reconfigurado para que fosse feito compatível, e não fica claro se ainda faltaram ajustar outros parâmetros para a interpretação apropriada dos dados.

*Tabela 8: Comparação dos valores de fator solar anual obtidos com as diferentes bases de dados meteorológicos.*

NREL	76,06%
Meteonorm	70,91%

O gráfico apresentado na Figura 17 detalha a variação do fator solar simulado usando as duas fontes de dados meteorológicos, apresentando os valores mensais. A comparação deixa claro que os dados do NREL favorecem o desempenho do sistema de aquecimento solar em todos os meses, embora esta diferença seja menos significativa nos meses de verão. A análise mês a mês também permite observar como o sistema é consideravelmente mais eficaz no meio do ano do que no início/fim. Isto pode ser explicado por haver um período de seca no meio do ano que favorece o aproveitamento solar pela diminuição da quantidade de nuvens, e/ou por conta da altura do Sol: quanto mais alto o Sol, como nos meses de verão, maior será o ângulo de incidência com os coletores posicionados na vertical, reduzindo o aproveitamento.

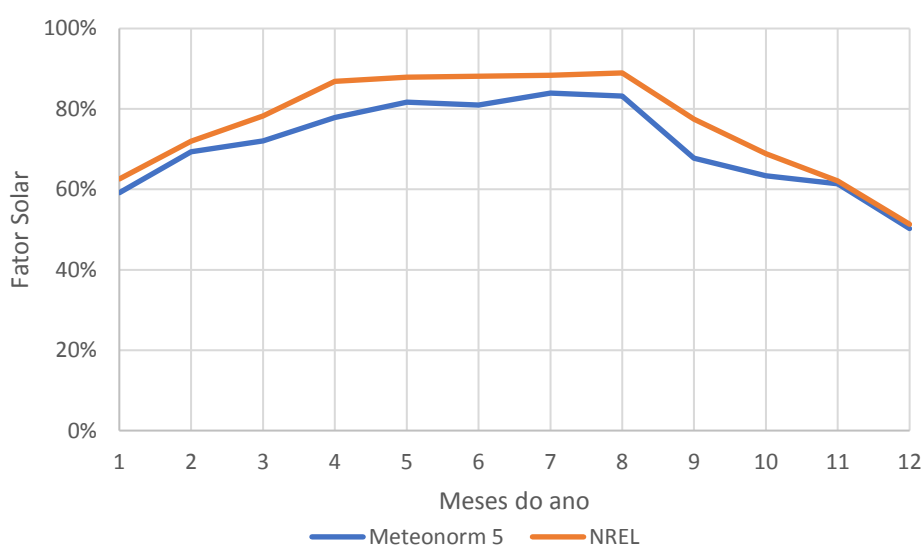


Figura 17: Variação mensal do Fator Solar simulado conforme o arquivo meteorológico utilizado.

Em seguida, foram simulados diferentes posicionamentos para os coletores solares. Os coletores foram direcionados para as direções entre leste, norte e oeste, em intervalos de 15° e comparados com o resultado padrão, que é o FS de 70,91% para a direção norte. Os resultados apresentados na Figura 18 curiosamente mostram que a face norte é a que produz os piores resultados, excetuando ângulos acima de 75° em cada direção. A direção noroeste, em particular, trouxe o melhor resultado, FS = 74,28%, indicando que o Sol da tarde é mais apropriado para coletores de fachada em São Paulo, segundo a base de dados Meteonorm, e/ou que o perfil de consumo valoriza o aquecimento vespertino, possivelmente porque tem 80% do consumo ocorre entre as 18h e as 8h, período de baixa ou nenhuma incidência solar que depende do calor armazenado. A primeira hipótese se sustenta por duas razões: primeiro porque o posicionamento vertical do coletor resulta em um ângulo de incidência muito elevado nos períodos de Sol

a pino, quando o posicionamento voltado ao norte deveria se destacar. O Sol da manhã e da tarde está mais baixo, reduzindo o ângulo de incidência, o que parece compensar a menor intensidade solar nesses horários. Segundo porque existe a tendência de a temperatura ambiente estar mais elevada no período da tarde, o que favorece a eficiência do coletor. A segunda hipótese sugeriria uma incapacidade do reservatório, seja por possuir volume menor do que o necessário, ou por propiciar perdas térmicas excessivas.

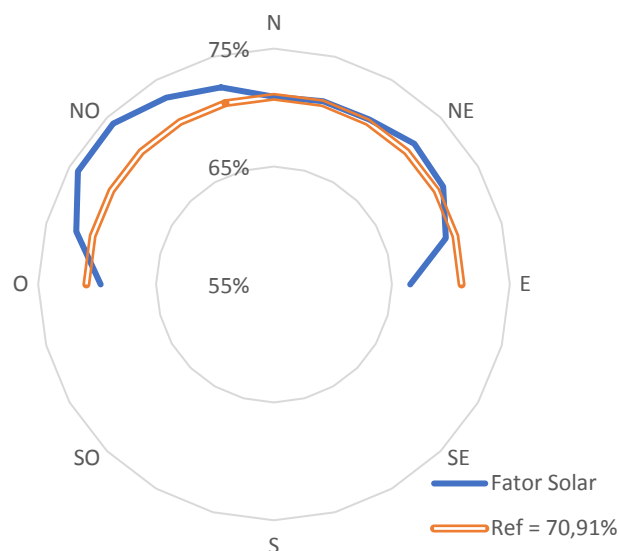


Figura 18: gráfico representando o fator solar para diferentes direções dos coletores

Segue-se, então, com a análise de sensibilidade do reservatório, em que são comparados o volume e as perdas térmicas. A referência do volume foi calculada usando a Eq. [ 2. 20 ], enquanto que as perdas foram adotadas como o valor padrão fornecido pelo TRNSYS. Apesar de simular variações no volume, a altura do reservatório foi mantida constante, 1,8 m, de forma que somente o diâmetro foi alterado. Ambos os parâmetros foram simulados com passos de 10%, entre 60% e 140% do valor de referência, e os resultados estão apresentados na Tabela 9 e na Tabela 10.

Tabela 9: Análise de sensibilidade: Volume do reservatório.

Volume do reservatório [m³]	FS
0,7428	67,20%
0,8666	68,54%
0,9904	69,54%
1,1142	70,30%
<b>1,238</b>	<b>70,91%</b>
1,3618	71,42%
1,4856	71,81%
1,6094	72,15%
1,7332	72,42%

Tabela 10: *Análise de sensibilidade: Perdas térmicas do reservatório.*

Perdas térmicas reservatório [W/(m <sup>2</sup> ·K)]	FS
0,4164	71,08%
0,4858	71,04%
0,5552	71,00%
0,6246	70,96%
<b>0,694</b>	<b>70,91%</b>
0,7634	70,87%
0,8328	70,83%
0,9022	70,79%
0,9716	70,75%

O volume do reservatório teve um efeito mais significativo do que a redução das perdas térmicas, porém ambos os resultados foram pouco relevantes. O reservatório é um dos principais custos do sistema e estas variações de tamanho e isolamento térmico acarretam custos significativos que possivelmente não são interessantes por conta do baixo retorno proporcionado. Sugere-se então, baseado nestes resultados, subdimensionar o reservatório caso seja necessário baratear o sistema para torná-lo viável. Ainda, da observação anterior acerca do posicionamento das placas ser favorecido pela direção NO para o aproveitamento de fachada, com  $\beta = 90^\circ$ , conclui-se que os indícios apontam para um favorecimento do aproveitamento solar da tarde, de acordo com os dados Meteonorm, que acarreta em menor ângulo de incidência.

Por fim, foi feita a análise de sensibilidade referente aos principais parâmetros do coletor solar: a área total e os valores de  $F_{R\tau\alpha}$  e  $F_{RUL}$ , que representam a eficiência. Como anteriormente, a área do coletor foi variada com passos de 10%, de 60% até 140% do valor de referência, que é 37,7 m<sup>2</sup>, e os resultados estão apresentados na Tabela 11. Já os parâmetros de eficiência foram variados simultaneamente, com  $F_{R\tau\alpha}$  variando com passos de 3% (equivalentes a 10% do complemento do valor de referência, que é 70%) e o  $F_{RUL}$  variando com passos de 10%, de 140% até 60% do valor de referência, de 5,6 W/(m<sup>2</sup>·K), e os resultados estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 11: Análise de sensibilidade: área total do coletor solar.

Área total coletor [m <sup>2</sup> ]	FS
22,62	62,70%
26,39	65,33%
30,16	67,51%
33,93	69,36%
<b>37,7</b>	<b>70,91%</b>
41,47	72,24%
45,24	73,40%
49,01	74,42%
52,78	75,30%

Tabela 12: Análise de sensibilidade:  $FR_{\tau\alpha}$  e  $FR_{UL}$ 

$FR_{\tau\alpha}$	$FR_{UL}$ [W/(m <sup>2</sup> ·K)]	FS
0,58	7,84	64,39%
0,61	7,28	66,01%
0,64	6,72	67,63%
0,67	6,16	69,29%
<b>0,7</b>	<b>5,6</b>	<b>70,91%</b>
0,73	5,04	72,60%
0,76	4,48	74,26%
0,79	3,92	75,99%
0,82	3,36	77,64%

Os valores obtidos com as variações dos parâmetros dos coletores solares foram muito mais relevantes do que os obtidos com as variações dos parâmetros do reservatório, sugerindo a importância de investir em coletores antes de investir em reservatório, caso os custos sejam similares. Isto é condizente com a principal restrição técnica do sistema de fachada, que é a necessidade de posicionar os coletores verticalmente, o que reduz significativamente a sua eficácia. Nota-se, porém, que os ganhos obtidos com o aumento da área de coletores são progressivamente menores a medida que a área aumenta, sugerindo a existência de um ponto ótimo do ponto de vista financeiro. Os resultados referentes aos coletores e ao reservatório foram concatenados no gráfico da Figura 19, permitindo visualizar o efeito de cada parâmetro com base no fator de variação utilizado.

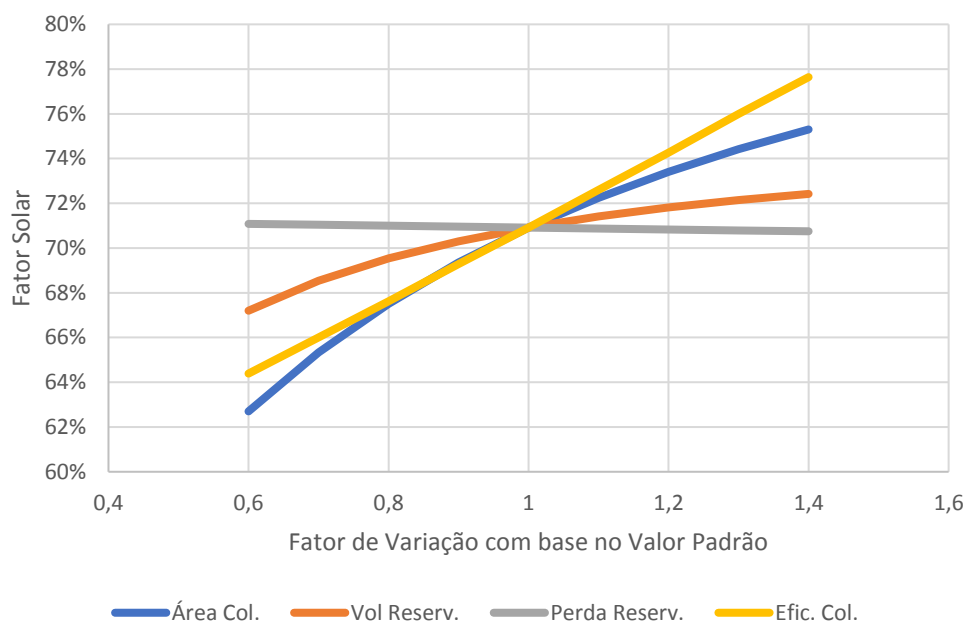


Figura 19: Gráfico comparativo dos efeitos simulados da área do coletor, do volume do reservatório, das perdas térmicas do reservatório e da eficiência dos coletores.

Os autores de [16] sugerem ser possível montar uma estrutura que gira os coletores em volta do eixo horizontal em até 20°, tanto para a frente como para trás. A intenção é reduzir o efeito do sobreaquecimento no verão e ter um ganho de eficiência nas outras estações. Para quantificar estes ganhos de eficiência, foi feita uma análise de sensibilidade com a inclinação do coletor ao redor de um eixo horizontal, cujos resultados estão apresentados na Figura 20. Fica claro que este é o fator mais significativo para o aumento do fator solar, uma inclinação de 15° da vertical traria um retorno de investimento estimado em R\$1.100,00 por ano por andar.

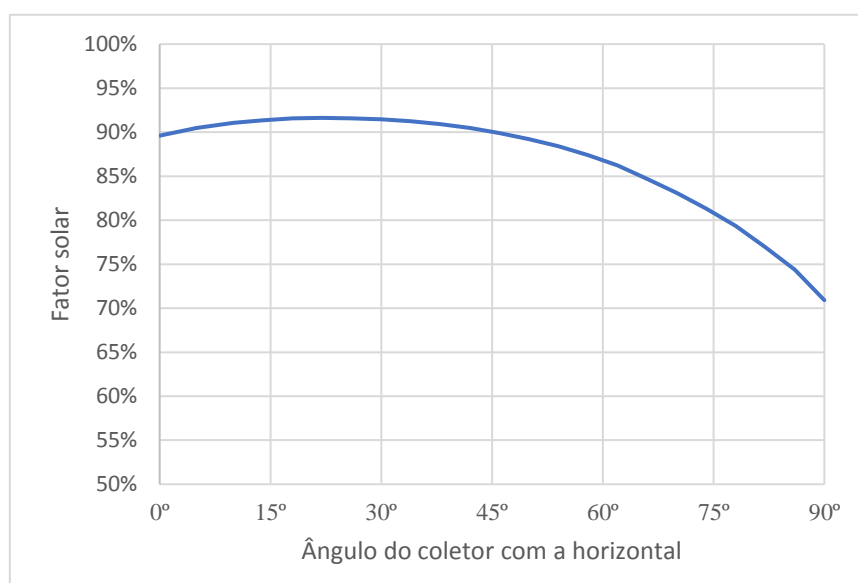


Figura 20: Análise de sensibilidade: ângulo do coletor com a horizontal.

É importante ressaltar que os resultados das análises de sensibilidade desenvolvidas neste trabalho não são necessariamente cumulativos. Por exemplo, os ganhos com o uso de coletores orientados para a direção NO podem ser anulados quando é usada uma inclinação menos vertical do coletor, já que esta situação é menos prejudicada por um Sol alto, como o que ocorre no meio dia, e um coletor orientado para o norte aproveita melhor o Sol do meio dia. Rigorosamente, seria necessário realizar análises de sensibilidade multiparamétricas, mas as análises feitas neste trabalho possibilitam a escolha dos parâmetros mais relevantes.

## 5.2 Simulações voltadas à carga térmica e conforto

Na configuração padrão, os coletores solares estão desacoplados termicamente da parede por meio de um afastamento que permite ao ar externo absorver o calor perdido pela face traseira do coletor. O TRNSYS não simula, nesta versão, a temperatura ou o calor perdido pela face traseira do coletor, de forma que seria necessário desenvolver modelos para a estimativa destes valores para aproximações melhores do calor transmitido à parede, por exemplo por radiação. Assim, na configuração padrão os coletores são implementados como paredes na face norte com valor da absorbância solar igual a zero, substituindo a parede comum.

Os valores são apresentados na forma de carga térmica sensível do ar condicionado do apartamento AP\_AR, em unidade de GJ, e em um valor derivado do PMV para o apartamento AP\_N\_AR, aqui referido como  $\sum PMV+$ , obtido integrando apenas os valores positivos em unidade de hora. Para um aparelho de ar condicionado com  $COP = 2$ , pode-se estimar um custo de aproximadamente R\$80,00 por GJ, adotando a mesma tarifa de R\$0,57/kWh usada anteriormente.

Inicialmente, é apresentada uma análise de sensibilidade para a área de coletor solar, cujos resultados estão na Tabela 13 e na Figura 21. Percebe-se um impacto significativo da área de coletor com relação às duas grandezas avaliadas. A queda de 46,3% da carga térmica entre o cenário sem coletores solares e o cenário padrão é condizente com os valores obtidos na pesquisa bibliográfica. A redução de 56,7% no  $\sum PMV+$  indica que, mesmo quando não é possível monetizar o retorno, há um aumento significativo no conforto para os residentes.

Tabela 13: Análise de sensibilidade: área total dos coletores para carga e conforto térmico.

Área total coletor [m <sup>2</sup> ]	Q <sub>SENS</sub> [GJ]	ΣPMV+
0	5,75	488,27
22,62	4,02	302,22
26,39	3,77	277,10
30,16	3,53	253,65
33,93	3,30	231,64
<b>37,7</b>	<b>3,09</b>	<b>211,29</b>
41,47	2,89	192,35
45,24	2,71	174,85
49,01	2,53	158,51
52,78	2,37	143,26

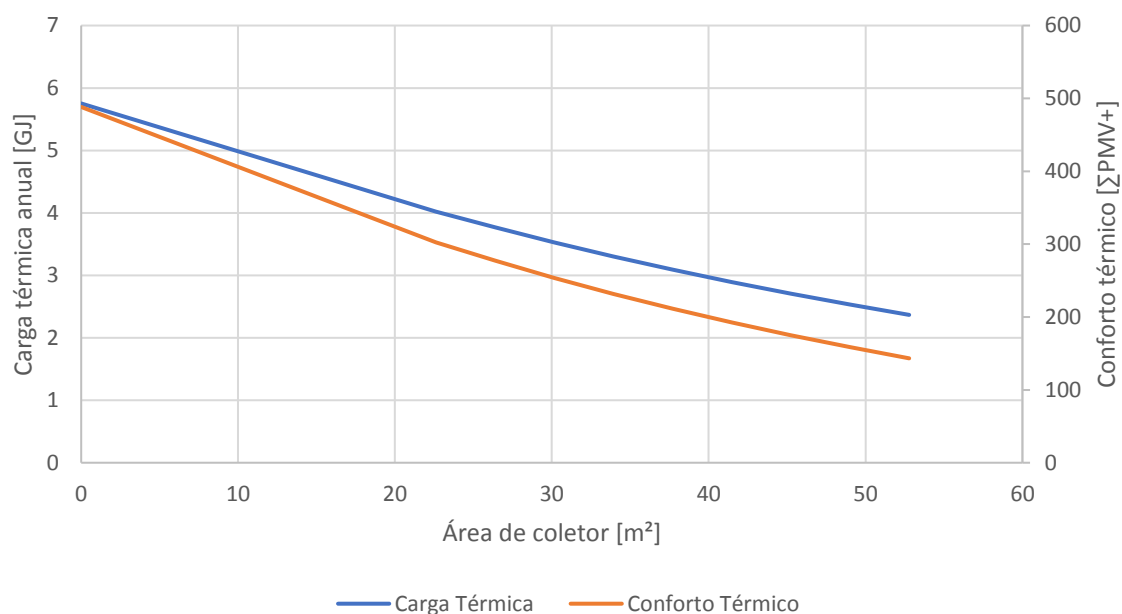


Figura 21: Gráfico representando o efeito simulado da variação da área de coletores na carga térmica de AP\_AR e no conforto térmico de AP\_N\_AR.

Enquanto a presença dos coletores reduz a carga térmica dos ambientes, a presença do reservatório tem o efeito contrário. Os modelos comerciais de reservatórios de água quente para sistemas solares possuem isolamento térmico que ainda permite fluxo de calor considerável da água armazenada para o ambiente. Este fluxo é prejudicial tanto por reduzir a temperatura da água, como por aquecer o ar ao redor do reservatório. No formato proposto, cada andar tem seu reservatório, que na configuração padrão se encontra no ambiente ACESSO.

Da forma como foi modelado, o ACESSO troca calor apenas com os outros três ambientes, de forma que o calor perdido pelo reservatório eventualmente é transferido aos apartamentos. Caso o reservatório esteja localizado em um apartamento, parte do



calor deve ser dissipado para o ambiente externo, de forma que os apartamentos vizinhos sofrem menor influência. Foram realizadas simulações para avaliar o quanto o posicionamento do reservatório em um dos apartamentos afeta a carga térmica ou o conforto no mesmo. Os resultados estão apresentados na Tabela 14 e confirmam o comportamento previsto. Entretanto, a magnitude deste efeito é pequena quando comparada à redução da carga térmica proporcionada pelo sombreamento causado pelos coletores.

*Tabela 14: Efeito da localização do reservatório de água quente.*

Localização do reservatório	$Q_{\text{SENS}}$ [GJ] em AP_AR	$\sum \text{PMV+}$ em AP_N_AR
AP_AR	3,29	210,93
AP_N_AR	3,08	219,10
ACESSO	3,09	211,30

Conforme visto anteriormente, os dados meteorológicos usados sugerem que a face norte recebe menor insolação em São Paulo do que as faces noroeste e nordeste. Com base nesta informação, foram realizadas simulações variando a posição do prédio, de forma que a face onde estão os coletores variam de NO até NE, com passo de 15°. Os resultados estão na Tabela 15 e reforçam a informação obtida anteriormente, já que dentre as direções simuladas para a lateral maior, a direção norte é a que menos afeta o ambiente interno. Ainda, os ganhos térmicos obtidos com o uso de coletores solares são ligeiramente maiores, proporcionalmente, quando o posicionamento é voltado para as direções de maior insolação.

*Tabela 15: Análise de sensibilidade: posição do prédio.*

	Com coletores		Sem coletores		$\Delta Q_{\text{SENS}}$	$\Delta \sum \text{PMV+}$
	$Q_{\text{SENS}}$ [GJ] em AP_AR	$\sum \text{PMV+}$ em AP_N_AR	$Q_{\text{SENS}}$ [GJ] em AP_AR	$\sum \text{PMV+}$ em AP_N_AR		
+45 - NO	3,44	302,39	6,28	679,29	54,8%	44,5%
+30	3,34	273,09	6,10	614,72	54,7%	44,4%
+15	3,16	234,54	5,83	538,10	54,1%	43,6%
<b>0 - N</b>	<b>3,09</b>	<b>211,29</b>	<b>5,75</b>	<b>488,27</b>	<b>53,6%</b>	<b>43,8%</b>
-15	3,19	213,59	5,95	487,88	53,7%	44,2%
-30	3,36	230,89	6,27	522,28	53,6%	43,9%
-45 - NE	3,47	242,49	6,47	552,86	54,8%	44,5%

Por fim, buscou-se simular coletores solares diretamente acoplados à parede, substituindo parte da alvenaria, constituindo um sistema integrado. Explorando as opções

desta versão do TRNSYS, não foi encontrado um módulo que prontamente representasse esta configuração, então foi necessário fazer aproximações. Os módulos de coletores solares possuem entre as opções de resultados apenas vazão e temperatura do fluido e ganho líquido de energia, não havendo qualquer informação que corresponda a cada tipo de perda térmica. Comparando os dados de insolação sobre a área do coletor com o ganho de energia, é possível determinar o fluxo de perdas total. Foi, então, estipulado que a parcela correspondente ao complemento do termo  $F_{R\tau\alpha}$  corresponde à energia perdida de volta à atmosfera, principalmente na forma de radiação refletida. Para o restante da ineficiência, considerou-se que 20% são perdas através do vidro e das laterais, ficando os 80% restantes como perdas que atravessam o isolamento térmico traseiro e atingem a parede do prédio.

Ao mesmo tempo, a parede age como mais uma camada de isolante térmico, efetivamente aumentando a eficiência do coletor na forma de uma redução do termo  $F_{RUL}$ . Considerando uma camada de isolante térmico com espessura 35 mm e condutividade térmica 0,04 W/(m·K), e uma parede de tijolo cerâmico maciço de 75 mm de largura com condutividade térmica 0,6 W/(m·K), a condutividade térmica resultante é calculada conforme Eq. [ 5. 1 ].

$$\frac{L_t + L_{is}}{k_{RES}} = \frac{L_{is}}{k_{is}} + \frac{L_t}{k_t} \Rightarrow \frac{0,11}{k_{RES}} = \frac{0,035}{0,04} + \frac{0,075}{0,6} \Rightarrow k_{RES} = 0,11 \text{ W/m} \cdot \text{K} \quad [ 5. 1 ]$$

Comparando o valor obtido de  $k_{RES}$  e sua espessura com os da camada de isolante térmico, conclui-se que há uma redução na condução de calor de 12,5%. Novamente associando 80% do valor de  $F_{RUL}$  à condução pela face traseira, estimamos um novo  $F_{RUL}$  igual a 90% do padrão, ou seja, igual a 5,04 W/(m<sup>2</sup>·K). Como referência, na validação do modelo para a determinação de curva de eficiência de um coletor integrado com base nas informações comerciais do coletor, os autores de [7] encontraram uma redução do  $F_{RUL}$  de 3,5%. Entretanto, o protótipo deles visa aquecimento de ar e é descrito como um coletor de baixo custo, com 40 mm de isolante térmico, de onde pode-se estimar que a relação entre as perdas pela face traseira e as demais perdas térmicas é bastante menor do que a estimada aqui, sendo coerente que eles encontrem uma variação menor quando feita a integração do coletor à parede.

Assim, foi implementada uma equação no TRNSYS que calcula a eficiência instantânea, calcula seu complemento 1- $\eta$ , subtrai 30% equivalente ao  $F_{R\tau\alpha}$  e, do restante,

80% é adotado como um fluxo de calor em direção ao interior do ambiente. No modelo do prédio, isto é feito com uma parede do tipo *Boundary*, que permite estipular uma temperatura ou um fluxo térmico. A Figura 22 apresenta uma representação gráfica das perdas consideradas, sobrepostas ao tradicional gráfico de eficiência do coletor solar térmico.

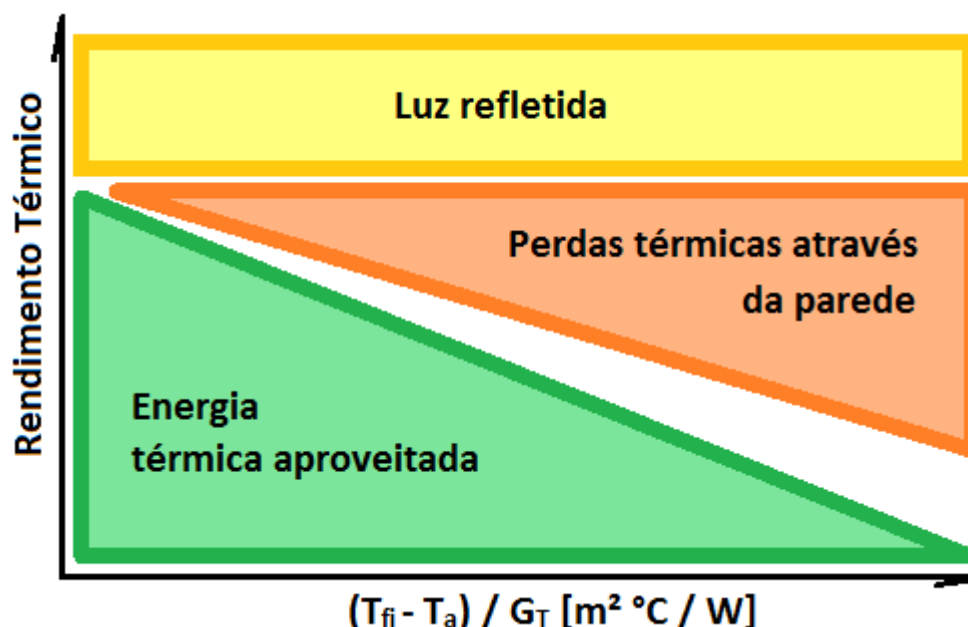


Figura 22: Representação sobreposta ao tradicional gráfico de eficiência do coletor solar das perdas térmicas através da parede para o interior do apartamento quando é feito o uso de coletores integrados.

Os resultados, com o restante dos parâmetros conforme configuração padrão, estão apresentados na Tabela 16, e fica claro que houve uma severa perda de qualidade térmica nos ambientes expostos. As perdas térmicas dos coletores foram tão significativas que, mesmo com o aumento da eficiência do coletor, o aquecimento dos ambientes foi suficiente para quase dobrar a carga térmica absorvida pelo ar condicionado, a um custo estimado de R\$ 400 anuais de energia elétrica em comparação com o cenário sem coletores. Possivelmente, os resultados são exagerados por conta do modelo grosseiro adotado para implementar este cenário no TRNSYS.

Tabela 16: Comparação entre carga e conforto térmicos com coletores desacoplados e integrados.

	$Q_{\text{SENS}}$ [GJ] em AP_AR	$\sum \text{PMV+}$ em AP_N_AR
Sem coletores	5,75	488,27
Desacoplado	3,09	211,29
Integrado	10,80	1165,93

Este efeito poderia ser contornado fazendo uso de uma camada de isolante térmico bastante espessa, o que traria o efeito colateral positivo de aumentar a eficiência térmica do coletor. Outra forma de minimizar este efeito é subdimensionar a área de coletores, de forma que a temperatura da água não é excessivamente elevada e a eficiência do coletor se mantém alta. Este efeito é significativo, como pode ser visto na Tabela 17.

*Tabela 17: Efeito da redução de área total de coletores integrados na carga e conforto térmicos do ambiente.*

	Área total coletores [m <sup>2</sup> ]	Q <sub>SENS</sub> [GJ] em AP_AR	ΣPMV+ em AP_N_AR
100%	37,70	10,80	1.165,93
80%	30,16	8,71	866,36
60%	22,62	6,38	555,08

Este tipo de efeito colateral do uso de coletores solares integrados precisa ser minimizado, principalmente porque afeta exclusivamente os apartamentos da face norte para aquecer água para todos os apartamentos do andar. A redução de área para 60% da configuração padrão reduziu a carga térmica do apartamento em aproximadamente 40% e ocasionou uma redução de fator solar para 68,04%. Este valor é mais elevado do que os simulados anteriormente devido à redução do termo  $F_{RU_L}$  em 10%, que proporciona um aumento da eficiência do coletor. Assim, embora tenha sido encontrada uma deterioração do conforto térmico, o coletor solar integrado se mostrou mais eficaz para o aquecimento da água para banho.

## 6 Considerações finais

Esta monografia buscou avaliar os impactos do uso de coletores solares de fachada para o aquecimento de água para banho em prédios de apartamentos. A instalação em fachadas é uma alternativa que se torna cada vez mais necessária para trazer o uso da energia solar para áreas de grande concentração populacional. Embora inicialmente evitada por conta da severa perda de eficiência decorrente da instalação vertical dos coletores, além de uma série de demais complicações técnicas e estéticas, esta tecnologia disponibiliza aos construtores de apartamentos uma enorme área potencial a ser aproveitada.

Introduziu-se o tema discorrendo a respeito das motivações para o incentivo de energias de fontes sustentáveis, com foco no aspecto do renovável, do limpo e do distribuído. Concluiu-se que a energia solar para aquecimento de água para banho é extremamente interessante, principalmente no Brasil, onde a alternativa normalmente é o aquecimento elétrico.

Em seguida, foi apresentada uma breve revisão teórica a respeito dos principais tópicos a serem abordados no desenvolvimento do tema. Foram expostas as equações mais importantes utilizadas pelo programa TRNSYS, usado para as simulações.

Durante a revisão bibliográfica, observou-se haver estudos a respeito de uma grande variedade de temas relevantes ao assunto central do uso de aproveitamento solar de fachadas. Pesquisas bastante recentes apontam para desenvolvimentos de materiais, de técnicas de instalação, de técnicas de simulação, de aperfeiçoamentos estéticos e de dimensionamento para que sejam vencidas as barreiras a esta tecnologia. Um dos pontos centrais desta monografia foi a avaliação do efeito da presença dos coletores na temperatura interna dos apartamentos, e foram encontrados na revisão bibliográfica resultados indicando reduções da carga térmica bastante significativas.

Foi apresentado o programa TRNSYS e o formato de dados meteorológicos TMY2, que apresenta valores horários de grandezas relevantes ao dimensionamento de sistemas solares e outros, de forma que sejam estatisticamente representativos de um ano mediano. O prédio que desejou-se simular foi descrito como sendo um prédio com quatro apartamentos de 64 m<sup>2</sup> por andar na cidade de São Paulo, e foram descritas as grandezas a serem avaliadas através de análise de sensibilidade e as métricas adotadas para as comparações: o fator solar, a carga térmica sensível e o  $\sum PMV+$ .

No capítulo de resultados e discussões, todas as simulações realizadas foram apresentadas, organizadas de forma a avaliar o desempenho do sistema e o efeito na carga e no conforto térmicos dos apartamentos. Dentre as simulações que objetivavam mensurar o desempenho do sistema, os resultados notáveis foram a forte influência dos arquivos meteorológicos nos resultados medidos; a dependência do ângulo do coletor ao redor do eixo horizontal, que faz com que, quando posicionado na vertical, o fator solar seja bastante prejudicado; a reduzida importância dos parâmetros do reservatório para o desempenho do sistema; e a conclusão de que a face noroeste é a mais adequada para a instalação de coletores verticais na cidade de São Paulo. Foi feita a hipótese de que a face noroeste se destaca por fazer um bom aproveitamento do Sol da tarde, que se encontra em uma posição mais baixa e, portanto, formando um ângulo de incidência menor com os coletores verticais. Esta hipótese é reforçada pelos resultados que indicaram que o fator solar obtido é maior no meio do ano, quando o Sol também está mais baixo. Ainda, o Sol da tarde é mais bem aproveitado do que o Sol da manhã pois existe uma tendência de um aumento da temperatura ambiente no decorrer do dia, o que favorece a eficiência dos coletores, por reduzir as perdas térmicas.

As simulações indicaram que um aumento de 40% da área de coletores solares acarreta em um aumento do fator solar que traz uma economia anual de aproximadamente R\$ 400,00 por andar. Por outro lado, uma redução de 40% da área traria um aumento anual do custo com aquecimento de água de R\$ 740,00 por andar.

Já com relação às simulações voltadas à avaliação da redução da carga térmica dos apartamentos, concluiu-se que coletores de fachada desacoplados termicamente por meio de um espaço entre a sua face traseira e a parede reduzem significativamente a carga térmica, redução de 46% na configuração padrão, enquanto que quando integrados à parede a carga térmica é quase duplicada. Por outro lado, o coletor acoplado possui uma eficiência mais elevada por conta da redução estimada em 10% do termo  $F_{RUL}$ , de forma que pode ser instalada uma quantidade menor de coletores para a obtenção do mesmo FS. Esta redução de área, por sua vez, aumenta a eficiência do coletor por reduzir a diferença de temperatura entre a água e o ambiente, anulando em partes o aumento da carga térmica.

A forte influência do posicionamento dos coletores na carga térmica deve ser levada em consideração quando forem implantados sistemas solares em fachadas, já que os custos de eletricidade envolvidos no condicionamento do ar podem se equiparar aos custos com aquecimento de água. Uma solução bem implementada traz economias de

milhares de reais por ano, mas uma solução mal resolvida traz complicações e custos que inviabilizam o sistema.

## Anexo 1

Header Element Format  
(For First Record of Each File)

Field Position	Element	Description	Type	Length	Decimal
002 - 007	Station ID	Station identification number	C	6	0
009 - 030	City	City where the station is located	C	22	0
032 - 033	State or country	State or country where the station is located (abbreviated to two letters)	C	2	0
035 - 041	Time Zone	Time zone is the number of hours by which the local standard time is ahead of or behind Universal Time. Sign: + if ahead of or equal to UT, - if behind	C	1	0
035		Hours	I	2	0
037 - 038		Minutes	I	2	0
040 - 041					
043 - 049	Latitude	Latitude of the station. N = North of equator, S = South of equator	C	1	0
043		Degrees	I	2	0
045 - 046		Minutes	I	2	0
048 - 049					
051 - 058	Longitude	Longitude of the station. W = West, E = East	C	1	0
051		Degrees	I	3	0
053 - 055		Minutes	I	2	0
057 - 058					
061 - 064	Elevation	Elevation of station in meters above sea level	I	4	0
FORTRAN Sample Format: ( 1X,A6,1X,A22,1X,A2,1X,A1,1X,I2,1X,I2,1X,A1,1X,I2,1X,I2,1X,A1,1X,I3,1X,I2,2X,I4 ) C Sample Format: ( %s %s %s %s %d %d %s %d %d %s %d %d %d )					

Data Element Format  
(For All Except the First Record)

Field Position	Element	Values	Description	Type	Length	Decimal
002 - 011	Local Standard Time					
002 - 005	Year	1973 - 2001	Year	I	4	0
006 - 007	Month	1 - 12	Month	I	2	0
008 - 009	Day	1 - 31	Day of month	I	2	0
010 - 011	Hour	1 - 24	Hour of day in local standard time	I	2	0
012 - 015	Extraterrestrial Horizontal Radiation	0 - 1415	Amount of solar radiation in Wh/m <sup>2</sup> received on a horizontal surface at the top of the atmosphere during the 60 minutes preceding the hour indicated.	I	4	0
016 - 019	Extraterrestrial Direct Normal Radiation	0 - 1415	Amount of solar radiation in Wh/m <sup>2</sup> received on a surface normal to the sun at the top of the atmosphere during the 60 minutes preceding the hour indicated.	I	4	0
020 - 025	Global Horizontal Radiation					
020 - 023	Data Value	0 - 1200	Total amount of direct and diffuse solar radiation in Wh/m <sup>2</sup> received on a horizontal surface during the 60 minutes preceding the hour indicated	I	4	0
024	Flag for Data Source	A - H, ?		C	1	0
025	Flag for Data Uncertainty	0 - 9		I	1	0



Data Element Format (Continued)

Field Position	Element	Values	Description	Type	Length	Decimal
<b>026 - 031</b> 026 - 029 030 031	Direct Normal Radiation Data Value Flag for Data Source Flag for Data Uncertainty	0 - 1100 A - H, ? 0 - 9	Amount of solar radiation in Wh/m <sup>2</sup> received within a 5.7° field of view centered on the sun, during the 60 minutes preceding the hour indicated. 9999 = missing data.	I C I	4 1 1	0 0 0
<b>032 - 037</b> 032 - 035 036 037	Diffuse Horizontal Radiation Data Value Flag for Data Source Flag for Data Uncertainty	0 - 700 A - H, ? 0 - 9	Amount of solar radiation in Wh/m <sup>2</sup> received from the sky (excluding the solar disk) on a horizontal surface during the 60 minutes preceding the hour indicated. 9999 = missing data.	I C I	4 1 1	0 0 0
<b>038 - 043</b> 038 - 041 042 043	Global Horiz. Illuminance Data Value Flag for Data Source Flag for Data Uncertainty	0 - 1300 I, ? 0 - 9	Average total amount of direct and diffuse illuminance in hundreds of lux received on a horizontal surface during the 60 minutes preceding the hour indicated. 0 to 1300 = 0 to 130,000 lux. 9999 = missing data.	I C I	4 1 1	0 0 0
<b>044 - 049</b> 044 - 047 048 049	Direct Normal Illuminance Data Value Flag for Data Source Flag for Data Uncertainty	0 - 1100 I, ? 0 - 9	Average amount of direct normal illuminance in hundreds of lux received within a 5.7° field of view centered on the sun during the 60 minutes preceding the hour indicated. 0 to 1100 = 0 to 110,000 lux. 9999 = missing data.	I C I	4 1 1	0 0 0
<b>050 - 055</b> 050 - 053 054 055	Diffuse Horiz. Illuminance Data Value Flag for Data Source Flag for Data Uncertainty	0 - 800 I, ? 0 - 9	Average amount of illuminance in hundreds of lux received from the sky (excluding the solar disk) on a horizontal surface during the 60 minutes preceding the hour indicated. 0 to 800 = 0 to 80,000 lux. 9999 = missing data.	I C I	4 1 1	0 0 0
<b>056 - 061</b> 056 - 059 060 061	Zenith Luminance Data Value Flag for Data Source Flag for Data Uncertainty	0 - 7000 I, ? 0 - 9	Average amount of luminance at the sky's zenith in tens of Cd/m <sup>2</sup> during the 60 minutes preceding the hour indicated. 0 to 7000 = 0 to 70,000 Cd/m <sup>2</sup> 9999 = missing data.	I C I	4 1 1	0 0 0
<b>062 - 065</b> 062 - 063 064 065	Total Sky Cover Data Value Flag for Data Source Flag for Data Uncertainty	0 - 10 A - F, ? 0 - 9	Amount of sky dome in tenths covered by clouds or obscuring phenomena at the hour indicated. 99 = missing data.	I C I	2 1 1	0 0 0
<b>066 - 069</b> 066 - 067 068 069	Opaque Sky Cover Data Value Flag for Data Source Flag for Data Uncertainty	0 - 10 A - F, ? 0 - 9	Amount of sky dome in tenths covered by clouds or obscuring phenomena that prevent observing the sky or higher cloud layers at the hour indicated. 99 = missing data.	I C I	2 1 1	0 0 0
<b>070 - 075</b> 070 - 073 074 075	Dry Bulb Temperature Data Value Flag for Data Source Flag for Data Uncertainty	-700 to 600 A - F, ? 0 - 9	Dry bulb temperature in tenths of °C at the hour indicated. -700 to 600 = -70.0 to 60.0°C 9999 = missing data.	I C I	4 1 1	0 0 0

Data Element Format (Continued)

Field Position	Element	Values	Description	Type	Length	Decimal
<b>076 - 081</b>	Dew Point Temperature					
076 - 079	Data Value	-700 to 600	Dew point temperature in tenths of °C at the hour indicated.	I	4	0
080	Flag for Data Source	A - F, ?	-700 to 600 = -70.0 to 60.0°C	C	1	0
081	Flag for Data Uncertainty	0 - 9	9999 = missing data.	I	1	0
<b>082 - 086</b>	Relative Humidity					
082 - 084	Data Value	0 - 100	Relative humidity in percent at the hour indicated.	I	3	0
085	Flag for Data Source	A - F, ?	999 = missing data.	C	1	0
086	Flag for Data Uncertainty	0 - 9		I	1	0
<b>087 - 092</b>	Atmospheric Pressure					
087 - 090	Data Value	800 - 1100	Atmospheric pressure at station in millibars at the hour indicated	I	4	0
091	Flag for Data Source	A - F, ?		C	1	0
092	Flag for Data Uncertainty	0 - 9		I	1	0
<b>093 - 097</b>	Wind Direction					
093 - 095	Data Value	0 - 360	Wind direction in degrees at the hour indicated. ( N = 0 or 360, E = 90, S = 180, W = 270 ). For calm winds, wind direction equals zero.	I	3	0
096	Flag for Data Source	A - F, ?	999 = missing data.	C	1	0
097	Flag for Data Uncertainty	0 - 9		I	1	0
<b>098 - 102</b>	Wind Speed					
098 - 100	Data Value	0 - 990	Wind speed in tenths of meters per second at the hour indicated.	I	3	0
101	Flag for Data Source	A - F, ?	0 to 990 = 0 to 99.0 m/s.	C	1	0
102	Flag for Data Uncertainty	0 - 9	999 = missing data.	I	1	0
<b>103 - 108</b>	Visibility					
103 - 106	Data Value	0 - 1609	Horizontal visibility in tenths of kilometers at the hour indicated.	I	4	0
107	Flag for Data Source	A - F, ?	7777 = unlimited visibility	C	1	0
108	Flag for Data Uncertainty	0 - 9	0 to 1609 = 0.0 to 160.9 km 9999 = missing data	I	1	0
<b>109 - 115</b>	Ceiling Height					
109 - 113	Data Value	0 - 30450	Ceiling height in meters at the hour indicated.	I	5	0
114	Flag for Data Source	A - F, ?	77777 = unlimited ceiling height	C	1	0
115	Flag for Data Uncertainty	0 - 9	88888 = cirroform 99999 = missing data	I	1	0
116 - 125	Present Weather	See Appendix	Present weather conditions denoted by a 10-digit number. See Appendix for key to present weather elements.	I	10	0
<b>126 - 130</b>	Precipitable Water					
126 - 128	Data Value	0 - 100	Precipitable water in millimeters at the hour indicated.	I	3	0
129	Flag for Data Source	A - F, ?	999 = missing data.	C	1	0
130	Flag for Data Uncertainty	0 - 9		I	1	0
<b>131 - 136</b>	Aerosol Optical Depth					
131 - 134	Data Value	0 - 2400	Broadband aerosol optical depth (broad-band turbidity ) in thousandths on the day indicated.	I	4	0
135	Flag for Data Source	A - F, ?		C	1	0
136	Flag for Data Uncertainty	0 - 9	0 to 2400 = 0.0 to 2.400	I	1	0

## Referências

- [1] International Energy Agency, “Key world energy statistics,” Paris, 2017.
- [2] ABNT, “NBR 15569: Sistema de aquecimento solar de água em circuito direto - Projeto e instalação,” Rio de Janeiro, 2008.
- [3] TRNSYS, “TRNSYS 16 Documentation,” University of Wisconsin, Madison, 2005.
- [4] Soletrol, “O que é e como funciona o aquecedor solar de água Soletrol,” [Online]. Available: <http://www.soletrol.com.br/extras/como-funciona-o-aquecedor-solar-soletrol/>. [Acesso em 15 outubro 2017].
- [5] D. S. Sowmy, “Energia solar: tecnologia e aplicações,” em Simões-Moreira, J. R. (org.), *Energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética*, Rio de Janeiro, GEN LTC, 2017, pp. 222-234.
- [6] F. Hengstbergera, C. Zaunera, K. Reschb, S. Holperc e M. Grobbauerca, “High temperature phase change materials for the overheating protection of facade integrated solar thermal collectors,” *Energy and Buildings*, vol. 124, pp. 1-6, 2016.
- [7] G. Leone e M. Beccali, “Use of finite element models for estimating thermal performance of facade-integrated solar thermal collectors,” *Applied Energy*, vol. 171, pp. 392-404, 2016.
- [8] G. Quesada, D. Rousse, Y. Dutil, M. Badache e S. Hallé, “A comprehensive review of solar facades: Opaque solar facades,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 2820-2832, 2012.
- [9] T. T. Chow, W. He e J. Ji, “An experimental study of facade-integrated photovoltaic/water-heating system,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 27, pp. 37-45, 2007.
- [10] H. Yang, J. Burnett e J. Ji, “Simple approach to cooling load component calculation through PV walls,” *Energy and Buildings*, vol. 31, pp. 285-290, 2000.
- [11] J. Ji, T.-T. Chow e W. He, “Dynamic performance of hybrid photovoltaic/thermal collector wall in Hong Kong,” *Building and Environment*, vol. 38, pp. 1327-1334, 2003.
- [12] R. O’Hegarty, O. Kinnane e S. J. McCormack, “Review and analysis of solar thermal facades,” *Solar Energy*, vol. 135, 2016.
- [13] R. O’Hegarty, O. Kinnane e S. McCormack, “A Case for facade located solar thermal collectors,” *Energy Procedia*, pp. 103-110, 2015.
- [14] M. C. M. Probst e C. Roecker, “Towards an improved architectural quality of building integrated solar thermal systems (BIST),” *Solar Energy*, vol. 81, pp. 1104-1116, 2007.
- [15] I. Visa, M. Comsit e A. Duta, “Urban acceptance of facade integrated novel solar thermal collectors,” *Energy Procedia*, vol. 48, pp. 1429-1435, 2014.
- [16] I. Visa, M. Moldovan, M. Comsit, M. Neagoe e A. Duta, “Facades integrated solar-thermal collectors: challenges and solutions,” *Energy Procedia*, vol. 112, pp. 176-185, 2017.

- [17] B. Orel, H. Spreizer, A. Šurca Vuk, M. Fir, D. Merlini, M. Vodlan e M. Köhl, “Selective paint coatings for coloured solar absorbers: Polyurethane thickness insensitive spectrally selective (TISS) paints (Part II),” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 91, pp. 108-119, 2007.
- [18] C. Lamnatou, J. D. Mondol, D. Chemisana e C. Maurer, “Modelling and simulation of Building-Integrated solar thermal systems: Behaviour of the system,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 45, pp. 36-51, 2015.
- [19] W. M. Willems, K. Schild e S. Dinter, *Vieweg Handbuch Bauphysik Teil 1*, Wiesbaden: Vieweg, 2006.
- [20] “TRNSYS - Official Website,” The University of Wisconsin, [Online]. Available: <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/index.html>. [Acesso em 01 outubro 2017].
- [21] “Welcome | TRNSYS : Transient System Simulation Tool,” [Online]. Available: <http://www.trnsys.com/>. [Acesso em 01 outubro 2017].
- [22] “NREL: Renewable Resource Data Center - Solar Resource Data,” [Online]. Available: [https://www.nrel.gov/rredc/solar\\_data.html](https://www.nrel.gov/rredc/solar_data.html). [Acesso em 4 outubro 2017].
- [23] “Meteorology: typical meteorological year data for selected stations in Brazil from NREL - Data.gov,” [Online]. Available: <https://catalog.data.gov/dataset/meteorology-typical-meteorological-year-data-for-selected-stations-in-brazil-from-nrel>. [Acesso em 04 outubro 2017].
- [24] J. C. P. dos Santos, K. K. Kothe, G. Mohamad, M. A. O. Vagheti e E. Rizzatti, “Comportamento térmico de fechamentos em alvenaria estrutural para a Zona Bioclimática 2 brasileira,” *Revista Matéria*, vol. 20, pp. 1030-1047, 2015.
- [25] R. Lamberts, “Conforto e stress térmico,” Santa Catarina, 2011.
- [26] C. R. d. F. Pacheco, “Fundamentos da utilização de energia solar,” em Simões-Moreira, J. R. (org.), *Energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética*, Rio de Janeiro, GEN LTC, 2017, pp. 187-221.