

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

MATHEUS FELIPE DE SOUZA CAMPOS

**Estudo da aplicação de sistemas de ar-condicionado solares no Prédio do DEN da Faculdade
de Engenharia de Guaratinguetá-UNESP**

Guaratinguetá-SP

2019

Matheus Felipe de Souza Campos

Estudo da aplicação de sistemas de ar-condicionado solares no Prédio do DEN da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá-UNESP

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica .

Orientador: Prof^o Dr. José Alexandre Matelli

Guaratinguetá-SP

2019

C198e Campos, Matheus Felipe de Souza
Estudo da aplicação de sistemas de ar-condicionado solares no Prédio do DEN da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá-UNESP / Matheus Felipe de Souza Campos – Guaratinguetá, 2019.
61 f : il.
Bibliografia: f. 64-65

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2019.
Orientador: Prof. Dr. José Alexandre Matelli

1. Ar condicionado solar. 2. Coletores solares. 3. Energia – Fontes alternativas. I. Título.

CDU 628.84

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

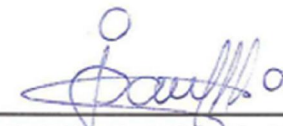
MATHEUS FELIPE DE SOUZA CAMPOS

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE DO
REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE "GRADUANDO EM
ENGENHARIA MECÂNICA "

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

Profº Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Profº Dr. José Alexandre Matelli
Orientador/UNESP-FEG



Profº Dr. José Antonio Perrella Balestieri
UNESP-FEG



Profº Dr. José Feliciano Adami
UNESP-FEG

Dezembro , 2019

“Às mulheres que me apoiaram e incentivaram para que eu chegasse até aqui: minha mãe, minha avó e minhas tias, que nunca mediram esforços para que eu pudesse alcançar meus objetivos. Aos meus irmãos, para os quais desejo um brilhante futuro e aos meus amigos que sempre me deram forças para não desistir!”

*“Se você não se sente a altura, suba até ela.”
(Masashi Kishimoto)*

RESUMO

A utilização de fontes alternativas de energia vem crescendo mundialmente. Dentre estas fontes, a energia solar tem sido alvo de cada vez mais estudos. Utilizar a energia solar para o acionamento de sistemas de ar-condicionado apresenta a vantagem da demanda destes sistemas crescer durante os períodos de maior irradiação. Utilizando-se um sistema de ar-condicionado de absorção acionado por água quente oriunda de coletores solares e um sistema de compressão de vapor, acionado eletricamente com energia produzida por painéis fotovoltaicos, é feito um estudo no qual se verifica a capacidade de atendimento a um edifício de estudo, no caso o prédio dos departamentos de Energia e de Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá-UNESP. Para estes sistemas são avaliados os consumos de energia de cada um e comparados com o atual que se utiliza de aparelhos tipo *split* e tipo janela. A definição da carga térmica de resfriamento para obtenção de conforto térmico é calculada através do software EnergyPlus versão 9.1.0, através do plugin OpenStudio versão 2.8.1, para o software de arquitetura SketchUp versão 2017. Através do valor da carga térmica necessária, calcula-se o consumo de energia elétrica para cada sistema, através das formulações sugeridas pelo Projeto Solair, adaptando-se o método para aplicações nacionais. Para o sistema solar-térmico é calculado um *payback* de aproximadamente 15 anos, enquanto para o sistema solar-elétrico é encontrado um *payback* de aproximadamente 5 anos, após algumas otimizações. O sistema solar-elétrico apresenta viabilidade técnica com um bom retorno.

PALAVRAS-CHAVE: Ar-condicionado solar. Paineis Fotovoltaicos. Coletor Solar. Fontes alternativas de energia.

ABSTRACT

The use of alternative sources of energy has been growing worldwide. Among these sources, solar energy has been studied quite often. Using solar energy to drive air conditioning systems has the advantage that the demand for these systems increases during periods of higher radiation. Using a hot water-driven absorption air-conditioning system from solar collectors and an electrically-powered vapor compression system powered by photovoltaic panels, a study is carried out in which the ability to service a building is verified, in this case the building of the Department of energy and the Department of Electrical Engineering of the Faculty of Engineering of Guaratinguetá-UNESP. For these air conditioning systems the energy consumptions of each one are evaluated and compared with the current one that uses of devices split and window type. The definition of the cooling thermal load for thermal comfort is calculated using EnergyPlus version 9.1.0 software, OpenStudio version 2.8.1 plugin through SketchUp version 2017, an architecture software. The electric energy consumption for each system is obtained through the formulations suggested by the Solair Project, adapting the method to national applications. For the solar-thermal system a payback of approximately 15 years is calculated, while for the solar-electric system a payback of approximately 5 years is found after some optimizations. The solar-electric system has technical feasibility with a good return.

KEYWORDS: Solar air-conditioner. Photovoltaic Panel. Solar Collector. Alternative Energy Sources.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Composição da matriz elétrica mundial	17
Figura 2 – Composição da matriz elétrica Brasileira.....	18
Figura 3 – Utilização de energias renováveis no brasil e no mundo.	18
Figura 4 – Concentração de Metano (CH ₄) segundo a profundidade do reservatório	19
Figura 5 – Crescimento da capacidade eólica mundial	20
Figura 6 – Divisão do consumo de energia elétrica por setores no Brasil	22
Figura 7 – Divisão e evolução do consumo de energia por eletrodomésticos no Brasil 2005 a 2017.....	23
Figura 8 –Diagrama T-S do ciclo de refrigeração por compressão de vapor.....	25
Figura 9 –Ciclo de refrigeração por absorção (modificado)	26
Figura 10 – Ciclo de refrigeração por adsorção	28
Figura 11 – Ciclo de compressão de vapor acionado por energia elétrica proveniente de painéis fotovoltaicos	29
Figura 12 – Ciclo de absorção acionado por coletor solar (modificado).....	31
Figura 13 – Representação de um ar-condicionado tipo Janela	32
Figura 14 – Diagrama esquemático de um ar-condicionado tipo split	32
Figura 15 – Coletores solares utilizando lentes Fresnel - Sevilha - Espanha.....	35
Figura 16 – Disposição dos coletores solares no prédio da Ott Ingenieure, em Langenau, na Alemanha	35
Figura 17 – Coletores solares do edificio Saint Dennis de la Réunion-França.....	36
Figura 18 – Comparação entre os sistemas de ar-condicionado solares	36
Figura 19 – Modelo do prédio do Departamento de Energia e Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá-UNESP	39
Figura 20 – Disposição modeladas das salas prédio do departamento de energia e elétrica da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá-UNESP.....	39
Figura 21 – Fluxograma da decisão pelo uso das tecnologias abordadas neste trabalho.....	40
Figura 22 – Esquemático do Sistema de Ar-Condicionado solar-Térmico.....	41
Figura 23 – Esquemático dos Componentes do Sistema de Ar-Condicionado Solar-Térmico	42
Figura 24 – Esquemático do sistema de ar-condicionado solar-elétrico.....	43
Figura 25 – Esquemático dos componentes do sistema de ar-condicionado solar-elétrico	44
Figura 26 – Janela de definição das zonas térmicas	45
Figura 27 – Carregamento do arquivo climático	46

Figura 28 – Carregamento do arquivo .ddy.....	47
Figura 29 – Objetos referentes a um escritório fechado	47
Figura 30 – Distribuição de pessoas nas salas segundo horário	48
Figura 31 – Definição do material das paredes do prédio.....	48
Figura 32 – Definição do material da janela do prédio.....	49
Figura 33 – Carga Térmica mensal média	55
Figura 34 – Irradiância mensal média.....	56
Figura 35 – Fração solar média	57
Figura 36 – Consumo mensal do sistema solar-térmico	58
Figura 37 – Geração de energia elétrica dos painéis fotovoltaicos	59
Figura 38 – Geração de energia elétrica dos painéis fotovoltaicos	60
Figura 39 – Excedente de energia elétrica dos painéis fotovoltaicos	61
Figura 40 – Disposição das placas fotovoltaicas - quantidade reduzida.....	62
Figura 41 – Geração de energia elétrica com redução dos painéis fotovoltaicos.....	63
Figura 42 – Excedente de energia elétrica dos painéis fotovoltaicos	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros do sistema de ar-condicionado solar térmico.....	53
Tabela 2 – Parâmetros do sistema de ar-condicionado solar-elétrico.....	53
Tabela 3 – Equipamentos e custos para os sistemas.....	54
Tabela 4 – Parâmetros do sistema de ar-condicionado atual	55
Tabela 5 – Equipamentos e custos para o sistema solar-elétrico otimizado.....	62
Tabela 6 – Comparativo dos sistemas estudados.....	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UNESP	Universidade Estadual Paulista
UNESP	Universidade Estadual Paulista
DEN	Departamento de Energia da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá-UNESP
FEG	Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá-UNESP
EPE	Empresa de Pesquisa Energética Brasileira
adm	Adimensional

LISTA DE SÍMBOLOS

\dot{Q}_l	Taxa de transferência de calor do evaporador no ciclo de compressão (W)
\dot{W}_{cp}	Potência do compressor no ciclo de compressão (W)
\dot{Q}_{in}	Taxa de transferência de calor absorvida pelo evaporador no ciclo de absorção (W)
\dot{Q}_{out}	Taxa de transferência de calor eliminada pelo condensador no ciclo de absorção (W)
\dot{Q}_g	Taxa de transferência de calor absorvida pelo gerador no ciclo de absorção (W)
\dot{W}_p	Potência da bomba no ciclo de absorção (W)
\dot{W}_c	Potência total consumida pelo ciclo de absorção (W)
COP	Coefficiente de performance (adm.)
COP'	Coefficiente de performance modificado (adm.)
η_{ger}	Rendimento do gerador (adm.)
η_{pv}	Rendimento das placas fotovoltaicas (adm.)
\dot{W}_{ger}	Potência elétrica gerada pela placa fotovoltaica (W)
I_s	Irradiação solar (W/m ²)
\dot{Q}_s	Potência solar irradiada na área das placas fotovoltaicas (W)
η_{ct}	Rendimento dos coletores solares (adm.)
\dot{Q}_{ger}	Taxa de transferência de calor gerada pelos coletores solares (W)
E_{tc}	Consumo de energia elétrica total do sistema térmico (kWh)
Q_{cold}	Carga térmica de refrigeração (kWh)
COP _s	Coefficiente de performance do chiller de absorção (adm.)
s	Fração solar (adm.)
η_e	Eficiência do aquecedor auxiliar (adm.)
f_1	Consumo específico de eletricidade da instalação solar (razão entre a energia consumida pelo sistema de circulação da água quente e o calor produzido pelo sistema) (%)
f_2	Consumo específico de eletricidade do chiller (razão entre a energia

	elétrica consumida pelo chiller e a carga térmica retirada do edifício ao qual se deseja resfriar)(%)
f_3	Consumo específico de eletricidade da torre de resfriamento (razão entre o consumo de energia elétrica dos sistemas da torre de resfriamento e a energia térmica por ela retirada)(%)
Q_s	Energia da água aquecida nos coletores que aciona o chiller de absorção (kWh)
Q_{aux}	Energia térmica do aquecedor auxiliar para atender o sistema quando a energia solar não é o suficiente (kWh)
G_s	Irradiância solar (W/m^2)
P_{fv}	Energia produzida pelos painéis fotovoltaicos (kWh)
η_{pv}	Rendimento dos painéis fotovoltaicos (adm.)
R\$	Unidade monetária Brasileira (Real)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	CENÁRIO ENERGÉTICO BRASILEIRO	17
1.2	ENERGIA SOLAR E SUAS APLICAÇÕES	21
1.3	PAPEL DO AR-CONDICIONADO NO CONSUMO	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1	CICLOS DE REFRIGERAÇÃO	24
2.1.1	Ciclo de compressão de vapor	24
2.1.2	Ciclo de absorção	25
2.1.3	Ciclo de adsorção	27
2.2	TECNOLOGIAS	28
2.2.1	Ciclo de Compressão com Acionamento Fotovoltaico	28
2.2.2	Ciclo de Absorção com Coletor Solar	28
2.2.3	Ar-condicionado de Janela	31
2.2.4	Ar-condicionado Tipo Split	32
2.3	TOMADA DE DECISÃO DOS SISTEMAS UTILIZADOS	33
2.3.1	Sistemas de ar-condicionado Solar-Elétrico	33
2.3.2	Sistemas de ar-condicionado Solar-Térmico	34
3	MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1	MODELAGEM DO PRÉDIO DO DEPARTAMENTO DE ENERGIA DA FEG-UNESP EM GUARATINGUETÁ	37
3.2	DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS DE AR-CONDICIONADO SOLAR E SUA INTERAÇÃO COM O MODELO PROPOSTO	39
3.2.1	Sistema Solar-Térmico	40
3.2.2	Sistema Solar-Elétrico	42
3.3	DEFINIÇÃO DA CARGA TÉRMICA DE RESFRIAMENTO DO EDIFÍCIO	43
3.3.1	Definição das zonas térmicas	43
3.3.2	Definição dos parâmetros climáticos	45
3.3.3	Definição dos materiais	48
3.4	DETERMINAÇÃO DO CONSUMO DOS SISTEMAS DE AR-CONDICIONADO SOLARES	49
3.4.1	Consumo de energia do sistema solar-térmico	50
3.4.2	Consumo de energia do sistema solar-elétrico	52
3.4.3	Considerações sobre a metodologia	54

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
4.1	CONSUMO DO SISTEMA DE AR-CONDICIONADO SOLAR-TÉRMICO	57
4.2	CONSUMO DO SISTEMA DE AR-CONDICIONADO SOLAR-ELÉTRICO	59
4.2.1	Simulações do sistema de ar-condicionado solar-elétrico on-grid com redução no número de placas fotovoltaicas	62
5	CONCLUSÕES	65
	REFERÊNCIAS	67

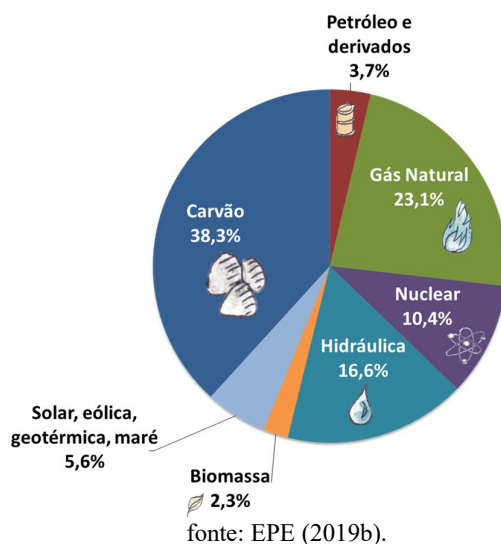
1 INTRODUÇÃO

1.1 CENÁRIO ENERGÉTICO BRASILEIRO

Atualmente, com os avanços tecnológicos e as mudanças comportamentais da sociedade, existe um aumento significativo no consumo de energia elétrica. O surgimento de novas indústrias, novos produtos e o aumento do ideal de consumo, estimulam cada vez mais melhorias na produtividade e exigem que empresas passem a se adequar a estas novas necessidades. Tal aumento faz com que a sociedade tenha de repensar suas formas de consumo de energia, buscando fontes alternativas, equipamentos mais eficientes e novas soluções para os problemas do dia-a-dia.

A geração de energia elétrica no mundo é, hoje em dia, majoritariamente baseada em combustíveis fósseis, cuja queima representa um aumento na concentração dos gases de efeito estufa na atmosfera, contribuindo para o aquecimento global. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética brasileira, até o ano de 2016 a matriz elétrica global era composta por aproximadamente de 65% de combustíveis fósseis. A Figura 1 ilustra a composição desta matriz:

Figura 1 – Composição da matriz elétrica mundial

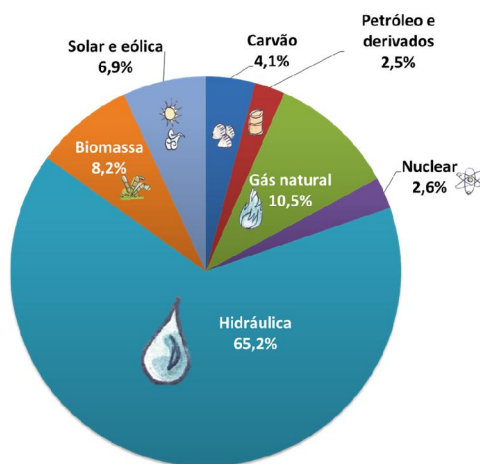


O Brasil, por sua vez, apresenta sua matriz elétrica majoritariamente hidrelétrica, fonte de energia considerada renovável, devido ao alto potencial que o país apresenta. A Figura 2 apresenta a composição da matriz elétrica brasileira.

Esse papel importante faz com que o Brasil apresente um bom posicionamento no *ranking* de uso de energias renováveis quando comparado ao resto do mundo, porém ainda há necessidade de maiores investimentos em outros tipos de energia, tais quais a eólica e a solar, sendo que esta última é a fonte central a partir da qual este trabalho se desenvolve. A

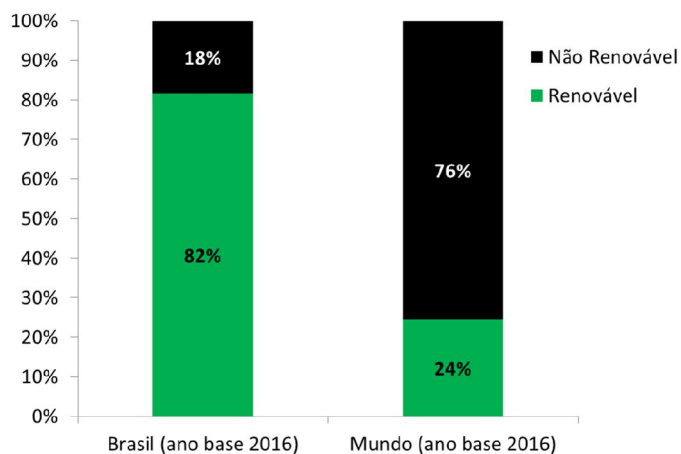
Figura 3 permite observar o cenário comparativo entre Brasil e o mundo no âmbito da utilização de energias de matriz renovável, no qual o Brasil se encontra avançado devido à utilização de uma matriz energética majoritariamente hidrelétrica.

Figura 2 – Composição da matriz elétrica brasileira.



fonte: EPE (2019b).

Figura 3 – Utilização de energias renováveis no Brasil e no mundo.



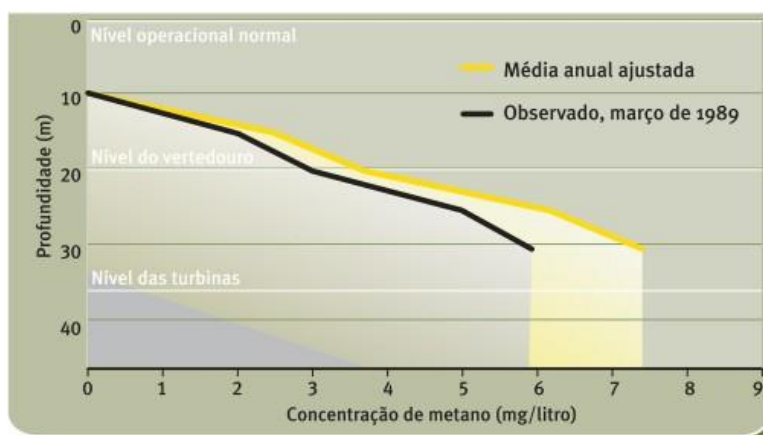
fonte: EPE (2019b).

Entretanto, mesmo que bem vista, a geração hidrelétrica apresenta algumas desvantagens como a necessidade de alagamento de grandes áreas, causando a perda de fauna e flora. Este material então submerso começa a entrar em decomposição liberando gases que se diluem na água. O processo de geração de energia através desta tecnologia libera estes gases, que também são gases do efeito estufa, como o metano e o dióxido de carbono, os quais estavam dissolvidos na água. Fearnside (2004) demonstra alguns dados de gases de efeito estufa emitidos por hidrelétricas na Amazônia brasileira (FEARNSIDE, 2004).

No artigo em questão é dado o exemplo da usina de Tucuruí, e a Figura 4 mostra a concentração de metano segundo a profundidade do reservatório.

Ao passar pelo vertedouro da usina, devido a diferença de pressão, os gases então dissolvidos na água são liberados. Segundo Farnside (2004), anualmente cerca de 353,6 trilhões de litros de água passam pelas turbinas de Tucuruí. Através deste dado e da Figura 4, fica evidente que a liberação destes gases é expressiva.

Figura 4 – Concentração de Metano (CH₄) segundo a profundidade do reservatório .



fonte: Fearnside (2004).

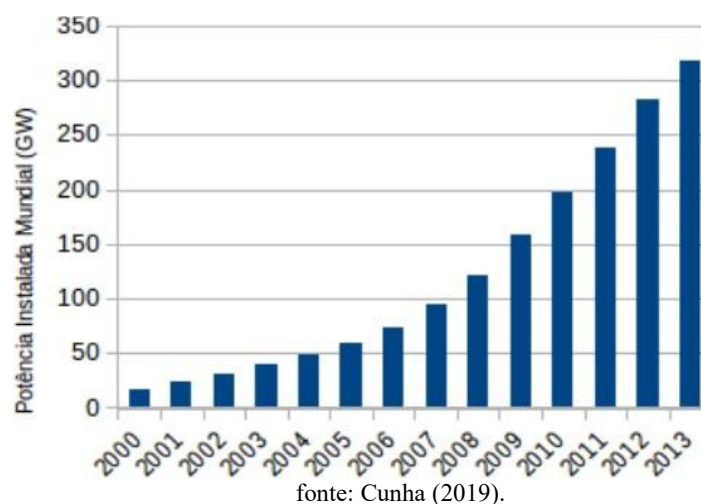
Como foi citado anteriormente, também há o impacto causado pela crescente demanda de energia elétrica no país. Tolmasquim (2012) fez uma estimativa de que em 2020 o consumo brasileiro atingiria cerca de 730.000 GWh, que representaria um aumento de 61% no consumo comparado ao ano de 2010. Entretanto, segundo dados de 2018 (EPE, 2019a), o consumo total do ano foi de 473.746 GWh. De qualquer forma, ao se comparar o consumo de 2018 ao de 2010 (415.277 GWh (ENERGIA, 2011)), o Brasil apresentou um aumento de aproximadamente 14% no seu consumo de energia elétrica, contrariando a visão otimista do autor. As projeções de Tolmasquim (2012) não se concretizaram devido às crises econômicas pelas quais o país passou no período, porém, mesmo assim, o consumo continuou aumentando.

A presença de uma conscientização popular de que as fontes de energia atuais apresentam problemas diretos no meio ambiente fomenta a pesquisa e o desenvolvimento de novas fontes de energia ou da melhoria de processos de produção de eletricidade já conhecidos. Fontes como a biomassa, a eólica e a solar tem sido alvo de cada vez mais estudos e melhorias. Segundo Cunha et. al. (2019), pode-se verificar que o aumento da utilização da energia eólica, principalmente em países como a China, EUA e os países da União Europeia, sendo destaque a Alemanha e a Espanha, tem sido cada vez mais expressivo. A Figura 5 demonstra a evolução da capacidade eólica mundial no século XXI.

A energia solar também vem ganhando cada vez mais mercado, uma vez que tem sido

verificada uma diminuição no custo de produção de placas fotovoltaicas e de coletores solares, além do desenvolvimento da tecnologia de fabricação destes, permitindo maiores rendimentos. O grupo de países mais desenvolvidos nas tecnologias de geração de energia elétrica fotovoltaica é muito parecido com o grupo de países citados anteriormente como líderes da produção eólica. Tais países são: Alemanha, Itália, Japão, Espanha e EUA. O conjunto destes países representava, em 2011, 88% da potência total instalada no mundo, dos quais a Alemanha é responsável por 50%. A estratégia responsável por tais números é a descentralização da geração através desta tecnologia. Foram instituídos programas de incentivo a pessoas físicas, para que estas utilizassem as placas fotovoltaicas integrando-as na rede de distribuição, de forma que todo o excedente gerado pelo responsável fosse então, automaticamente, absorvido pela rede e processado de forma que a companhia de energia pudesse redistribuí-lo. A maior vantagem ao gerador independente é que esta redistribuição era paga pela companhia, ou seja, além da redução do consumo devido a produção doméstica, o excedente ainda era comprado pela companhia distribuidora de energia (ROSA, 2016).

Figura 5 – Crescimento da capacidade eólica mundial



Diferentemente do sistema citado anteriormente, no Brasil não há o sistema de pagamento ao pequeno produtor pelo excedente gerado. No país, o excedente é convertido em créditos que são abatidos nos custos do uso da energia elétrica convencional distribuída pela concessionária, estes têm a validade de 60 meses (ANEEL, 2012).

A maior deficiência apresentada pelo Brasil no setor fotovoltaico é a falta de tecnologia nacional no segmento, uma vez que o país apresenta grandes níveis de irradiação solar, os quais se encontram na média de 1200 a 2400 kWh/m²/ano, valores que superam a irradiação da líder em produção, Alemanha (média de 900 a 1250 kWh/m²/ano). O Brasil também é o quarto maior fornecedor de silício grau metalúrgico do mundo, matéria prima principal

da produção de células fotovoltaicas. O desenvolvimento de tecnologias para melhorias no atual processo de fabricação de placas fotovoltaicas seria de um impacto extremamente positivo para o país, atuando tanto com o produto acabado quanto na importação da matéria prima (MACHADO, 2014).

Visto o grande potencial que a energia solar fotovoltaica apresenta, surgem então oportunidades para o desenvolvimento de novas aplicações. A hipótese de utilização de energia fotovoltaica para o acionamento do sistema de ar-condicionado de um prédio, por exemplo, é uma das hipóteses que é abordada neste trabalho, uma vez que este sistema apresenta percentual significativo no consumo de energia elétrica. Contudo, antes da abordagem deste tema, primeiramente são comentadas outras possibilidades de utilização da energia solar, algumas das quais são igualmente aproveitadas para compor a proposta do presente trabalho.

1.2 ENERGIA SOLAR E SUAS APLICAÇÕES

A energia solar como forma primária se manifesta, entre outras formas, como o calor transferido até a terra através dos raios ultra-violeta, sendo que as primeiras aplicações da energia solar tinham como objetivo utilizar esta energia propriamente na forma de calor. Assim podem-se citar sistemas de aquecimento de água, onde a energia solar aquece, direta ou indiretamente, a água para um dado uso específico. Este exemplo pode ser visto no circuito doméstico de água, por exemplo, para aquecer o chuveiro (responsável por um dos maiores consumos no ambiente caseiro). Em países de clima frio, este sistema também pode ser utilizado para o aquecimento de ambientes (KALOGIROU, 2004).

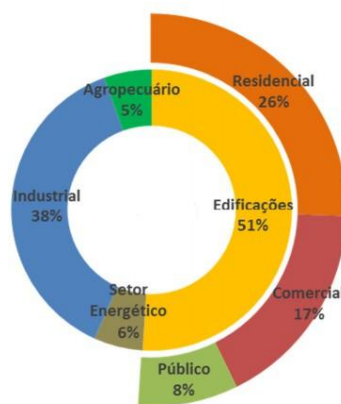
Ainda se tratando da manipulação dos fluxos de calor através da energia solar, esta também pode desempenhar o papel inverso do tido como senso comum. Através do calor emitido via energia solar é possível executar o acionamento de um sistema de refrigeração. Desde que a área disponível para construções dos coletores solares seja suficiente, é possível construir sistemas de aquecimento e de resfriamento de ambientes. O sistema de resfriamento funciona através de reações químicas endotérmicas e exotérmicas, as quais são iniciadas através do fornecimento de energia térmica, neste caso proveniente da energia solar. Existem dois tipos de sistemas de ar-condicionado que funcionam sobre este princípio, os ciclos de absorção e o ciclo de adsorção (dissecante) (KALOGIROU, 2004). Esta hipótese de acionamento também é objeto de estudo neste trabalho, criando assim a possibilidade de comparação com o sistema acionado com painéis fotovoltaicos.

1.3 PAPEL DO AR-CONDICIONADO NO CONSUMO

O caminho para o controle no consumo de energia elétrica consiste no desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e na diversificação da matriz energética, como citado e

demonstrado anteriormente. A questão da diversificação, tem como objetivos a redução da emissão de gases poluentes e o aumento da confiabilidade do sistema, uma vez que uma matriz diversificada se abastece de uma ou mais fontes quando outras estão em escassez. É, portanto, interessante se definir como se distribui o consumo nas diversas utilizações da energia elétrica distribuída pela concessionária. A Figura 6 ilustra a distribuição do consumo por setores no Brasil.

Figura 6 – Divisão do consumo de energia elétrica por setores no Brasil



fonte: EPE (2018).

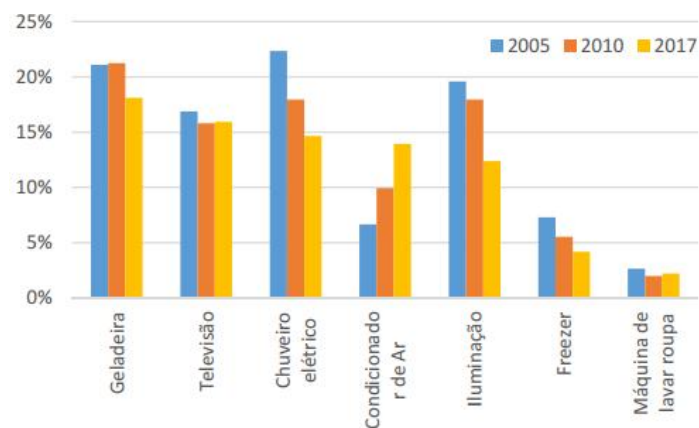
Uma vez que as diversas indústrias apresentam diversos tipos diferentes de processos, cada qual com suas necessidades e demandas de energia, seria difícil elencar os processos que podem ser melhorados, quando considerado um cenário nacional. Entretanto, pode-se considerar uma distribuição normal da configuração da casa do brasileiro e definir neste alguns parâmetros de consumo. Mesmo assim cabe salientar, as indústrias representam aproximadamente 38% do consumo total brasileiro, logo é necessário se pensar em políticas de melhoria no consumo energético também para este setor. Ainda assim, o setor residencial representa 26% do consumo brasileiro, o que o torna um bom local de análise para redução de consumo e desenvolvimento de novas soluções.

O EPE também disponibiliza a distribuição por tipo de equipamento no consumo doméstico, como explicitado na Figura 7.

Através da Figura 7 pode-se verificar que o consumo devido à presença de ar-condicionado vem crescendo nos últimos anos, ao passo que a tendência dos outros eletrodomésticos é diminuir. Isso ocorre principalmente pois enquanto os outros eletrodomésticos já estão consolidados no mercado e vêm recebendo melhorias tecnológicas que propiciam a diminuição do consumo elétrico, no caso do ar-condicionado a evolução tecnológica permitiu que mais pessoas adquirissem este equipamento. O aumento na quantidade de condicionadores de ar representa no consumo total um valor acima do representado pela redução do consumo que ocorreu devido à presença de equipamentos mais

eficientes.

Figura 7 – Divisão e evolução do consumo de energia por eletrodomésticos no Brasil 2005 a 2017



fonte: EPE (2018).

Com a popularização dos condicionadores de ar tem-se agora um novo agente no consumo total doméstico e empresarial, representando algo em torno de 14% no consumo de energia elétrica. Ao estender este problema para ambientes de escritórios, este percentual cresce ainda mais, pois esta localidade não possui outros equipamentos de alto consumo tal como os residenciais (destacando o chuveiro elétrico). A implementação de sistemas que reduzissem o consumo do ar-condicionado sem reduzir o conforto térmico em um ambiente de escritório é o objetivo central deste trabalho.

O presente trabalho se encaixa dentro da proposta levantada pelo Grupo de Estudos do Departamento de Energia da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá- UNESP, o qual visa fomentar trabalhos acadêmicos voltados para Edificações, Práticas e Vivências Ambientalmente Sustentáveis.

Sendo este objetivo o ponto de partida para a definição do tema deste trabalho.

Como objetivos específicos também pode-se listar:

- Estudo da viabilidade da ativação de um sistema de ar-condicionado por absorção utilizando o calor da água contida em coletores de energia solar;
- Estudo da viabilidade da ativação de um sistema de ar-condicionado por ciclo de compressão de vapor ativado por placas solares fotovoltaicas;
- Comparar os resultados obtidos com o atual consumo do sistema de ar-condicionado do Bloco de Energia (Bloco IV) da FEG-UNESP, o qual utiliza sistemas *Split* e de janela em módulos individuais.

No capítulo seguinte é feita uma revisão bibliográfica para o estudo do tema e para se realizar uma melhor análise dos resultados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O principal motivo para o desenvolvimento de sistemas de ar-condicionado acionados por energia solar é a paridade entre os maiores picos de incidência solar com a demanda de refrigeração. Essa relação é lógica, como apontada por Kim e Ferreira (2008), pois com um maior aumento da irradiação tem-se maiores temperaturas e para que o conforto térmico seja reestabelecido, conseqüentemente, gasta-se mais energia. Como a fonte causadora do aumento da temperatura, no caso a irradiação solar, possui potencial de geração de outras formas de energia, conseguir utilizá-la para alimentação de sistemas responsáveis pelo conforto térmico é um cenário ideal (KIM, 2008). Entretanto, devido ao rendimento baixo dos sistemas, muitas vezes apenas esta fonte de energia não é o suficiente. Mas a simples redução no consumo total já torna o desenvolvimento de soluções utilizando estes sistemas algo interessante para o mercado.

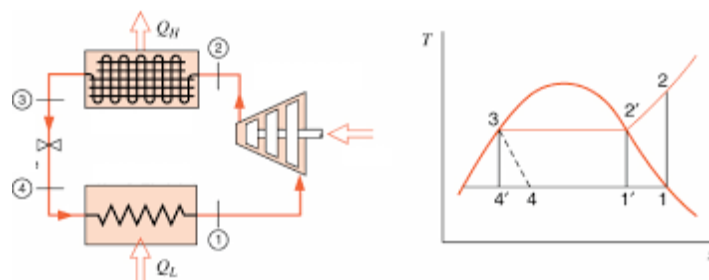
2.1 CICLOS DE REFRIGERAÇÃO

Como citado anteriormente, os tipos mais comuns de sistema de refrigeração são o ciclo de compressão de vapor, o ciclo de absorção, o de adsorção, os quais são abordados nesta seção.

2.1.1 Ciclo de compressão de vapor

Um ciclo de compressão de vapor pode ser baseado, em sua forma ideal, em quatro processos. Uma compressão isotrópica (1-2), onde o fluido de trabalho ganha energia térmica em decorrência deste processo. Uma troca de calor em uma dada pressão constante (2-3), rejeitando calor oriundo da compressão para um ambiente diferente do que se deseja ser resfriado. Uma expansão adiabática que pode ser realizada por uma válvula de expansão (3-4) que faz com que o fluido tenha uma redução drástica na temperatura durante o processo geralmente associado a uma troca de fase, indo do líquido para o gasoso. Esta redução na temperatura é responsável por retirar o calor do ambiente a ser resfriado e assim o fluido passa então por um aquecimento em uma dada pressão constante (4-1), fechando o ciclo (BORGNAKKE; SONNTAG, 2013). A Figura 8 mostra o diagrama temperatura-entropia bem como o ciclo com os equipamentos na condição isentrópica.

Figura 8 – Diagrama T-S do ciclo de refrigeração por compressão de vapor



fonte: Borgnakke; Sonntag (2013)

Como objetivo deste ciclo é a refrigeração, sua eficiência é mensurada através da taxa de calor que este consegue absorver do ambiente que se deseja resfriar. A partir daqui a eficiência dos ciclos de refrigeração será tratada como coeficiente de desempenho (COP), nomenclatura característica adotada para sistemas de refrigeração. Sendo assim tem-se que o COP do ciclo pode ser calculado através da equação (1).

$$COP = \frac{\dot{Q}_l}{|\dot{W}_{cp}|} \quad (1)$$

Na equação \dot{Q}_l (W) é a potência térmica do evaporador e \dot{W}_{cp} (W) é a potência de trabalho do compressor.

2.1.2 Ciclo de absorção

Neste ciclo as transformações físicas do fluido de trabalho são as mesmas do que a do ciclo de refrigeração a compressão de vapor, entretanto o agente responsável pela compressão não é mais um componente mecânico e sim reações químicas resultantes da dissociação de uma mistura binária, sendo comuns as misturas: amônia-água e brometo de lítio-água. Soluções para a utilização de amônia são necessárias, uma vez que se trata de um composto tóxico (BORGNAKKE; SONNTAG, 2013).

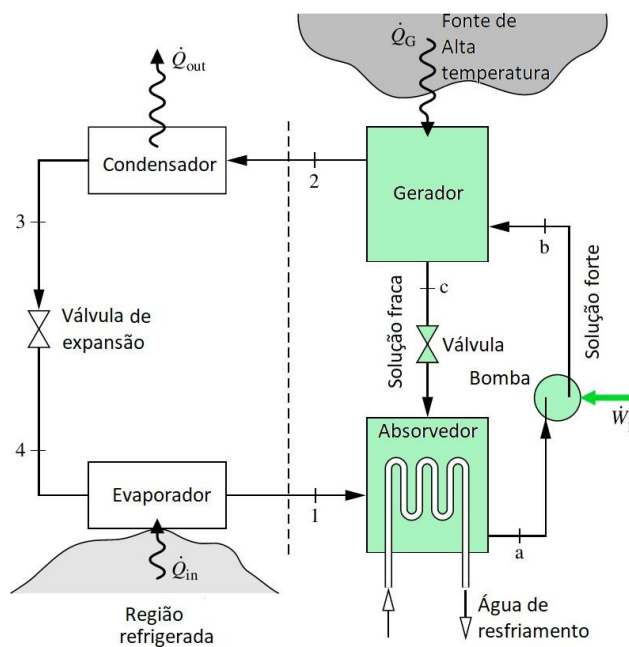
O ciclo de absorção tem o funcionamento básico atrelado ao fato da necessidade do fornecimento de calor no gerador (um dos componentes do ciclo visto mais na Figura 9). Essa parcela de energia aplicada ao ciclo tem a consequência de uma menor utilização de trabalho necessária. Sendo assim é necessário se escolher com cautela a fonte de energia quente, que se alinhe muito bem com fontes renováveis, principalmente a energia solar ou a geotérmica. Este trabalho antes aplicado pelo compressor, agora é aplicado através de uma bomba, já que o fluido nesta etapa do ciclo encontra-se no estado líquido (BORGNAKKE; SONNTAG, 2013).

Para efeitos didáticos é utilizada a solução de água-amônia para explicação do funcionamento do ciclo, porém este funcionamento é o mesmo para outras soluções, tal como a de água e brometo de lítio.

No ponto 1 da Figura 9 o estado do fluido é de vapor a baixa pressão, este é então resfriado no absorvedor (o trocador de calor representado pode ou não existir, entretanto deve-se garantir que energia seja dissipada nessa etapa) se tornando líquido e aumentando a concentração de amônia no absorvedor. A solução com forte concentração de amônia é então levada para o gerador através de uma bomba (entrada de trabalho no ciclo), onde é aquecido por uma fonte de calor externa (será apresentada uma solução para esta fonte de energia em seções futuras). Com o aquecimento há produção de vapor de amônia a alta pressão, e a solução com baixa concentração é purgada de volta para o absorvedor, ponto c. No condensador o vapor de amônia perde calor para o ambiente até se liquefazer novamente (análogo ao ciclo de compressão de vapor), este então passa por uma válvula de expansão que causa uma queda na temperatura, pois se trata de uma expansão adiabática, e nestas condições retira calor da região a ser refrigerada (BORGNAKKE; SONNTAG, 2013).

O conjunto de elementos do lado direito a linha tracejada indicada na Figura 9 tem a mesma função do compressor em um ciclo de compressão de vapor. Pode-se definir o coeficiente de performance do ciclo através da equação 2.

Figura 9 – Ciclo de refrigeração por absorção (modificado)



fonte: Santos (2019)

$$COP = \frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{W}_p + \eta_{ger} \cdot \dot{Q}_g} \quad (2)$$

Para ciclos de absorção é comum utilizar uma equação modificada do coeficiente de performance, o qual relaciona o calor do gerador e o calor de refrigeração:

$$COP' = \frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{Q}_g} = COP \cdot \left(\eta_{ger} + \frac{W_n}{\dot{Q}_g} \right) \quad (3)$$

Como o trabalho da bomba geralmente é bem menor do que o calor do gerador, então é comum desconsiderar tal variável (BORGNAKKE; SONNTAG, 2013).

2.1.3 Ciclo de adsorção

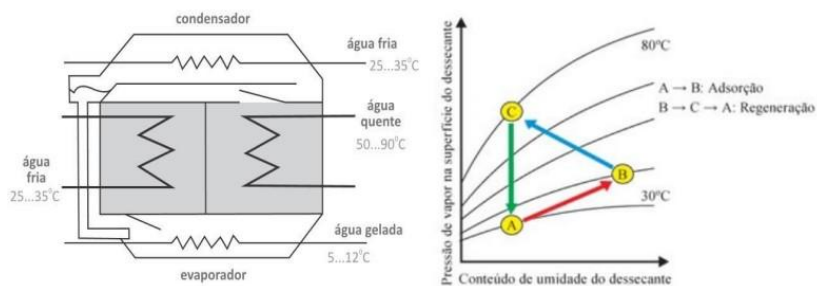
O ciclo de adsorção é capaz de retirar calor do ambiente através do efeito evaporativo, utilizando materiais com alta capacidade adsorvente. Tal capacidade consiste na propriedade de um material de reter fisicamente através de sua superfície o vapor de água presente em um dado ambiente. Ao diminuir a umidade do ar retendo o vapor de água nele presente, há uma queda na temperatura do ar, processo parecido com a transpiração, na qual o corpo se resfria devido a evaporação da água em contato com a superfície da pele (BARRETO, 2018). Entretanto, o material adsorvente possui um limite de saturação, e ao chegar em tal ponto perde a capacidade de adsorção. Os materiais utilizados na construção de ar-condicionados que trabalham segundo este princípio tem também a propriedade de devolver a água adsorvida uma vez que são expostos novamente ao calor. Assim se tem dois componentes principais: um evaporador/condensador e um adsorvente/dessorvedor (BARRETO, 2018).

Nesta configuração não é possível obter um fluxo contínuo de retirada de calor. Primeiro tem-se o par evaporador e adsorvente funcionando: nesta etapa, há retirada de calor do ambiente feita através do evaporador. Este alimenta o processo de adsorção com vapor. Uma vez que o adsorvente satura, então ocorre uma inversão: o adsorvente passa a ser o dessorvedor liberando vapor de água, e o evaporador passa a atuar como um condensador, agora fornecendo calor ao ambiente. Para contornar tal problema a solução é utilizar sistemas em pares de forma alternada. Assim, enquanto um adsorvente se satura o outro estará no fim do processo de dessorção (BARRETO, 2018).

A Figura 10, a seguir, representa um conjunto evaporador/condensador-adsorvente/dessorvedor e as etapas durante o processo em um gráfico da umidade dentro o dissecante versus a pressão de vapor em sua superfície.

Pode-se utilizar as equações 2 e 3 para definir o coeficiente de performance deste ciclo, assim como o ciclo de absorção, substituindo o trabalho da bomba responsável pelo fluxo da solução de amônia do adsorvente para o gerador, pelas bombas responsáveis pelo fluxo de fluido frio e de fluido quente durante as etapas de adsorção e evaporação.

Figura 10 – Ciclo de refrigeração por adsorção



fonte: Barreto (2018).

2.2 TECNOLOGIAS

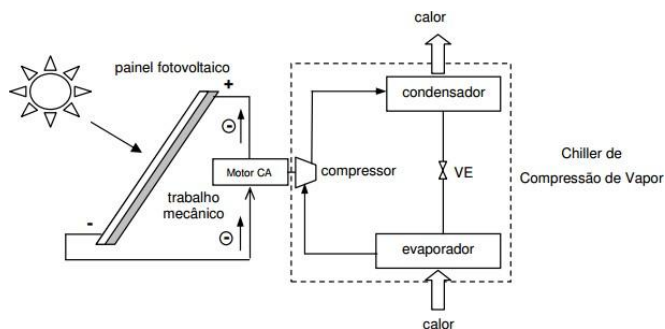
Nesta seção são apresentadas soluções envolvendo os ciclos da seção anterior, com exceção do ciclo de adsorção, integradas com a proposta do atual trabalho que é o envolvimento com tecnologias que utilizam a energia solar. Tais soluções são utilizadas nas simulações contidas neste trabalho, para efeito de comparação com as atuais instalações das edificações em estudo, no caso o prédio do departamento de energia da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá-UNESP.

2.2.1 Ciclo de Compressão com Acionamento Fotovoltaico

Como visto anteriormente, para ativar um ciclo de refrigeração é necessário conceder diretamente energia de alguma forma à dada parte do ciclo, se tratando de energia mecânica ou térmica. Ao tomar o ciclo de compressão de vapor, tal entrada de energia é feita na forma de trabalho sobre o fluido através do compressor. Sendo assim é necessário que algum tipo de fonte seja empregada. Nos sistemas de ar-condicionado vendidos comercialmente, o sistema de alimentação é geralmente elétrico: um motor elétrico é alimentado através da rede elétrica e por sua vez aciona um compressor mecanicamente, promovendo a etapa de compressão do ciclo (KIM, 2008).

Ao se incorporar a utilização da energia solar, o primeiro caso analisado é o de se gerar energia elétrica através de painéis fotovoltaicos, e com esta energia alimentar o citado motor elétrico do circuito.

Figura 11 – Ciclo de compressão de vapor acionado por energia elétrica proveniente de painéis foto- voltaicos



fonte: Kim (2008).

As placas fotovoltaicas são basicamente placas semi-condutoras feitas geralmente de silício que quando submetidas a irradiação solar geram energia elétrica. Sendo assim há de se relacionar a quantidade de energia irradiada sobre a placa e a energia elétrica gerada por essa. Este equipamento também possui eficiência definida. A irradiação solar I_s é definida por quantos watts de energia térmica estão incidindo em determinada área A , logo a quantidade de energia térmica sobre uma placa fotovoltaica é dada pela irradiação solar multiplicada pela área útil de geração da placa solar (KIM, 2008). Sendo assim pode-se definir a eficiência de uma placa solar através da equação 4.

$$\eta_{pv} = \frac{\dot{W}_{ger}}{I_s \cdot A_{pv}} \quad (4)$$

Sendo na equação (4): η_{pv} (adm.) o rendimento da placa fotovoltaica, \dot{W}_{ger} (W) a potência elétrica gerada pela placa, I_s a irradiação solar na região onde a placa esta instalada (W/m^2) e A_{pv} (m^2) a área útil da placa.

Agora é possível definir um coeficiente global de performance para este ciclo relacionando a carga térmica de resfriamento (\dot{Q}_l , em watts) com a energia solar irradiada sobre a área da placa (\dot{Q}_s , em watts) utilizando o mesmo raciocínio da equação (1).

$$COP = \frac{\dot{Q}_l}{\dot{Q}_s} \quad (5)$$

2.2.2 Ciclo de Absorção com Coletor Solar

O ciclo de absorção necessita de energia térmica e energia mecânica para seu funcionamento, simultaneamente. A primeira é aplicada ao gerador e é responsável pelo

processo de produção de vapor da solução utilizada. A energia mecânica é necessária para que o fluxo da parte líquida da solução possa ocorrer entre o gerador e o absorvedor, uma vez que no segundo não há a formação de vapor. Como citado anteriormente, a energia necessária para acionar a bomba é geralmente muito menor que a energia térmica aplicada no gerador, mas mesmo assim é interessante se atentar ao tipo de energia utilizada para o acionamento da bomba (KIM, 2008). Como no ciclo anterior, esta poderia ser acoplada a um motor elétrico, tal qual o compressor, e então estar sendo acionada por energia elétrica, a qual poderia ser gerada também através de painéis fotovoltaicos. Entretanto esta hipótese não é estudada no presente trabalho. Neste trabalho se mantém a hipótese de acionamento por energia elétrica vinda da rede de distribuição.

A utilização de energia solar neste ciclo pode ser aplicada através de coletores solares responsáveis por aquecer água, e esta é o fluido responsável por trocar calor com o gerador (\dot{Q}_g). Assim como no ciclo de compressão a vapor, neste ciclo é definido o coeficiente de performance do coletor solar. Através da energia de irradiação solar sobre o coletor e a taxa de calor produzida pode-se definir o rendimento deste coletor:

$$\eta_{cs} = \frac{\dot{Q}_{ger}}{I_s \cdot A_{cs}} \quad (6)$$

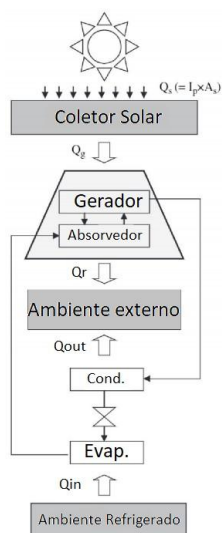
Na equação (6) a potência elétrica anteriormente gerada pelas placas fotovoltaicas é agora substituída pela taxa de transferência de calor que o coletor solar consegue produzir.

Comparando a energia térmica necessária para que as reações ocorram (\dot{Q}_g) com a carga térmica retirada do ambiente ao qual se deseja resfriar (\dot{Q}_{in}) é definido o coeficiente de performance do ciclo, seguindo também o mesmo raciocínio utilizado para o ciclo de compressão de vapor da seção anterior:

$$COP = \frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{Q}_g} \quad (7)$$

A Figura 12 ilustra um diagrama esquemático da construção do ciclo de absorção acionado por coletor solar.

Figura 12 – Ciclo de absorção acionado por coletor solar (modificado)



fonte: Kim (2008).

2.2.3 Ar-condicionado de Janela

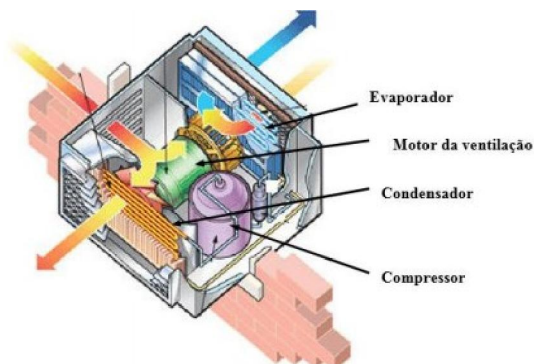
Primeiramente cabe salientar que, apesar de amplamente utilizado, o termo ar-condicionado é válido apenas para sistemas capazes de controlar a temperatura e a umidade do ambiente no qual encontra-se instalado. Os aparelhos mais comuns, encontrados em residências, escritórios e outros ambientes geralmente não possuem este sistema de controle de umidade, logo não podem ser considerados como sistemas de ar-condicionado. Entretanto, como forma de simplificar os termos utilizados neste trabalho, é utilizado o termo ar-condicionado mesmo para os equipamentos que controlam apenas a temperatura do ambiente desejado.

Os sistemas de ar-condicionado residenciais mais comuns utilizam os ciclos de compressão de vapor. Entretanto o que muda dentre os diferentes tipos de modelo é a forma construtiva e a disposição dos componentes de cada um. Os aparelhos de ar-condicionado tipo Janela recebem essa nomenclatura devido a sua construção em um único bloco solicitar que o aparelho seja instalado de modo que parte do equipamento fique no ambiente a ser refrigerado e a outra parte fique voltada para um ambiente externo, de forma que a rejeição de calor presente em um ciclo de compressão de vapor ocorra. Ele pode ser instalado em buracos na parede, tal qual uma janela. Este é o modelo residencial mais antigo. Uma de suas maiores desvantagens é o alto ruído, pois o compressor encontra-se muito próximo do local de utilização do equipamento. Este problema é contornado em modelos de ar-condicionado tipo *split* (SANTOS, 2017b).

A Figura 13 ilustra a forma como este tipo de ar-condicionado é posicionado em uma

edificação bem como alguns componentes que o constituem:

Figura 13 – Representação de um ar-condicionado tipo Janela



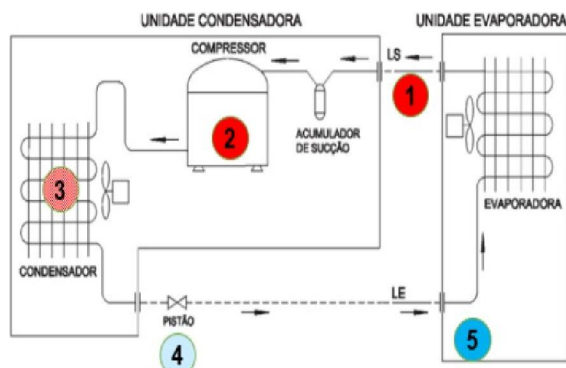
fonte: Santos (2017a).

2.2.4 Ar-condicionado Tipo Split

Os sistemas de ar-condicionado tipo *split* recebem essa nomenclatura, do inglês "separado", pois o condensador e o evaporador são separados em dois equipamentos diferentes durante a construção. Isso ocorre pois como o condensador precisa expulsar calor para algum ambiente, é interessante construir este equipamento do lado de fora a edificação, promovendo uma melhor troca de calor e isolando fisicamente um elemento quente do ambiente que se deseja resfriar. O Evaporador é então mantido dentro do ambiente a ser refrigerado juntamente à uma unidade eletrônica de controle, por onde o usuário, na maioria dos modelos, pode adequar a temperatura desejada, bem como outras variáveis de conforto térmico dependendo da complexidade do aparelho que ele possui (SANTOS, 2017a).

A Figura 14 indica os principais equipamentos de um ar-condicionado tipo *split*.

Figura 14 – Diagrama esquemático de um ar-condicionado tipo split



fonte: Santos (2017a)

2.3 TOMADA DE DECISÃO DOS SISTEMAS UTILIZADOS

Sistemas de ar-condicionado acionados via energia solar são possíveis, como foi descrito na seção anterior, entretanto outros fatores influenciam em sua implementação quando se analisa cenários cotidianos. A construção, implementação e os resultados obtidos dependem muitas vezes de fatores como: custos, local geográfico, qualidade dos materiais utilizados, entre outros fatores de ordem econômica e tecnológica. Nesta seção são abordados alguns destes fatores e como estes influenciam nas tomadas de decisão dos tipos de sistemas a serem utilizados, suas vantagens e desvantagens (ARA, 2010).

2.3.1 Sistemas de ar-condicionado Solar-Elétrico

Dentre as tecnologias e os ciclos apresentados, ao se tratar de sistemas de ar-condicionado solares, os mais presentes nas instalações existentes são os sistemas de ar-condicionado com acionamento térmico. Nestes há predominância na utilização do ciclo de absorção. Entretanto, os ciclos com painéis fotovoltaicos apresentam grande potencial, uma vez que há diminuição nos custos associados à fabricação dos painéis e uma crescente tendência de integração destes à arquitetura, com estudos buscando seu posicionamento nas fachadas de prédios e não somente em grandes áreas reservadas apenas para os painéis. O aproveitamento das fachadas das construções representa uma vantagem por aumentar a área de captação solar e, conseqüentemente, a energia produzida sem a necessidade de novas localidades com a mesma função. Mesmo assim, associar áreas específicas destinadas e a adaptação das construções para uma maior quantidade de painéis pode melhorar os resultados em termos de quantidade de energia gerada (ARA, 2010).

Segundo Jackson *et al.* (2000), o caminho para que a energia elétrica gerada através de placas fotovoltaicas tenha um maior peso na composição da matriz energética, é necessário que ao invés de se possuir grandes parques solares, as placas estejam inseridas como parte integrante da arquitetura como um todo (JACKSON, 2000). Esta colocação implica que tal tecnologia seja algo acessível e comum, cenário ainda não atingido, principalmente no Brasil. Possuir essa tecnologia atrelada à construção, desta forma, teria como consequência um aumento no equilíbrio de consumo em épocas de maior incidência solar, mesmos períodos onde o uso de ar-condicionado também se intensifica. Neste cenário descrito, a utilização ideal seria dos ciclos de compressão de vapor tradicionais sendo alimentados pela rede de distribuição, e de preferência com o excedente gerado tendo a possibilidade de ser redistribuído, assim como os exemplos citados no capítulo de introdução.

Outro fator interessante no mercado de geração de energia fotovoltaica é que o aumento no uso desta tecnologia incentiva o mercado a progredir em métodos mais eficientes de produção e conseqüentemente na redução dos preços destas tecnologias.

2.3.2 Sistemas de ar-condicionado Solar-Térmico

Mesmo possuindo um grande custo inicial associado, os sistemas de ar-condicionado solar por absorção são os sistemas desta categoria mais presentes no mundo, geralmente alvos de estudo. Balghouthi (2008) estudou a possibilidade de um sistema de ar-condicionado solar de absorção em Tunis, na Tunísia, chegando á conclusão de que o sistema é viável para o clima mediterrâneo.

Todos os exemplos citados a seguir são constituintes do projeto Solair, o qual foi criado para fomentar e reunir pesquisas no ramo dos ar-condicionados solares. Com a ideia de promover uma diminuição do consumo de energia, emissão de gases do efeito estufa e reunir *know-how* sobre estas tecnologias promissoras de forma a se montar um conjunto de ferramentas robusto, de maneira a auxiliar novas pesquisas e incentivar o mercado a se atentar a estas tecnologias (SOLAIR-PROJECT, 2008).

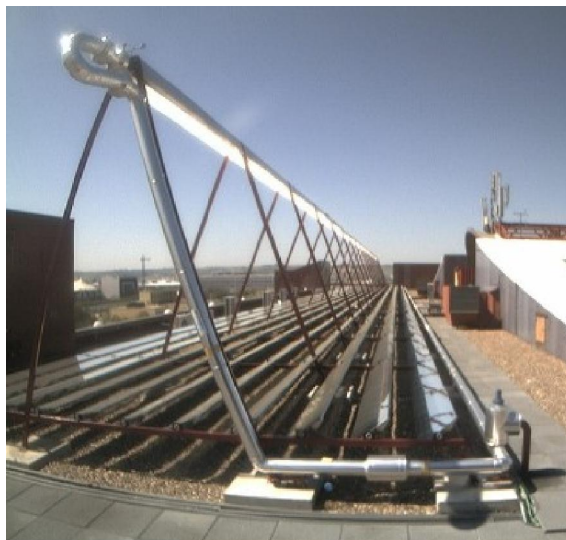
Como os sistemas de ar-condicionado solar utilizando o ciclo de absorção são geralmente associados à pesquisa e inovação, seguem exemplos destes sistemas implementados em diferentes localidades.

Na universidade de Sevilha, na Espanha, foi construído um sistema de ar-condicionado solar com ciclo de absorção utilizando como fluido uma solução de LiBr+água e uma área de 352 m^2 de coletores solares utilizando lentes Fresnel e um sistema de backup que utilizava um queimador de gás natural.

O *chiller* utilizado possuía uma capacidade nominal de refrigeração de 174 kW. Nestas condições, o sistema conseguiu, como melhor resultado, suprir 75% do calor necessário para o acionamento do equipamento (BERMEJO, 2010). A Figura 15 contem a disposição dos coletores solares juntamente com as lentes utilizadas.

Ara (2010) também cita outros dois exemplos de prédios de escritório em seu trabalho, este são mostrados nas Figura 16 e Figura 17 a seguir. A Figura 16 ilustra o prédio da Ott Ingenieure, em Langenau, na Alemanha. Esta instalação conta com 30 m^2 de coletores solares capazes de produzir 35 kW nominais de refrigeração, através da utilização de água quente no ciclo de absorção a 85°C.

Figura 15 – Coletores solares utilizando lentes Fresnel - Sevilha - Espanha



fonte: Bermejo (2010)

Figura 16 – Disposição dos coletores solares no prédio da Ott Ingenieure, em Langenau, na Alemanha



fonte: Solair-project (2008).

A Figura 17 mostra o sistema do edifício de escritórios Saint Dennis de la Réunion, na França, contando com um sistema de capacidade nominal de 35 kW para refrigeração e utilizando água a 80 °C para acionamento dos *chillers* de absorção, através de uma área de coletores solares de 92 m².

Foram apresentadas algumas características tecnológicas e a inserção destas no mercado, de modo a permitir tomar a decisão de qual tipo de tecnologia se utilizar na proposta deste trabalho. A Figura 18 coloca as tecnologias citadas até aqui em uma disposição que facilite a comparação entre elas.

Figura 17 – Coletores solares do edifício Saint Dennis de la Réunion-França



fonte: Solair-project (2008).

Figura 18 – Comparação entre os sistemas de ar-condicionado solares

Classe do sistema	Sistema solar	Tecnologia de refrigeração	Comentários sobre a tecnologia
Elétrico	Fotovoltaico	Compressão de vapor	Os custos altos e a baixa eficiência dos painéis fotovoltaicos podem ser uma limitação, porém integração dos painéis fotovoltaicos à edificação e expansão do mercado fotovoltaico pode favorecer essa alternativa.
Térmico	Coletores solares	Absorção	Apesar dos custos ainda elevados, apresentam desempenho energético e maturidade tecnológica significativos, constituindo-se na tecnologia mais utilizada
	Coletores solares	Adsorção	Com altos custos, baixa eficiência e com necessidade de equipamentos grandes, são interessantes apenas em casos específicos.

fonte: Adaptado de ARA (2010).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os passos necessários para a realização das simulações envolvendo o edifício do Departamento de Energia da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá-UNESP, utilizando a teoria vista nos capítulos anteriores e a utilização de softwares computacionais. Tais softwares possuem seções específicas detalhando como foram utilizados e suas devidas funções.

A metodologia aplicada consiste no levantamento da carga térmica do edifício em estudo através do software EnergyPlus, desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, e então, com este valor em mãos, realizar os cálculos seguindo a metodologia sugerida no projeto Solair, se pautando em Ara (2010). Na primeira etapa, o edifício é modelado segundo suas dimensões físicas e localização geográfica de maneira a se mensurar a quantidade de irradiação solar a qual ele encontra-se exposto durante um ano e a carga térmica necessária para se manter o conforto térmico. Uma vez coletados tais valores, são modelados ciclos de refrigeração como os definidos na Figura 18, sendo o ciclo de compressão de vapor acionado via painéis fotovoltaicos e o ciclo de absorção com ativação via coletores solares. Os equipamentos são definidos nas seções referentes à modelagem dos ciclos. Como parte importante do trabalho, é então verificado o atual sistema de refrigeração utilizado no departamento bem como seu consumo. Por fim, é realizado um comparativo entre os ciclos, podendo assim definir se a substituição por algum dos sistemas estudados é viável e interessante economicamente.

3.1 MODELAGEM DO PRÉDIO DO DEPARTAMENTO DE ENERGIA DA FEG-UNESP EM GUARATINGUETÁ

O prédio do Departamento de Energia da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá conta com 3 andares divididos entre laboratórios, escritórios e outras salas. No andar térreo há um agência bancária, este pavimento não é utilizado nas análises. O térreo também possui uma área de construção menor do que os outros pavimentos, devido ao relevo do terreno onde a edificação foi construída.

Considerando o segundo andar, neste encontram-se alguns laboratórios e salas utilizadas por projetos de extensão da própria faculdade. A distribuição destas salas é diferente da disposição das salas do terceiro andar, porém ambos os andares seguem a mesma distribuição de salas no modelo, facilitando sua construção. Sendo assim, o terceiro andar é dividido entre 32 salas, sendo estas dispostas 16 do lado esquerdo de um corredor e as restantes do lado direito. Ao fim do corredor principal presente no edifício encontra-se também o Laboratório de Alta Tensão, Qualidade de Energia e Eficiência Energética, sendo também considerado como uma zona térmica na simulação. Todos os outros escritórios são considerados de

mesmo tamanho, hipótese também utilizada como forma de simplificar o modelo aplicado tanto para a construção quanto para que a simulação do espaço das zonas térmicas a serem definidas.

A seguir são expostas as características construtivas do prédio em questão:

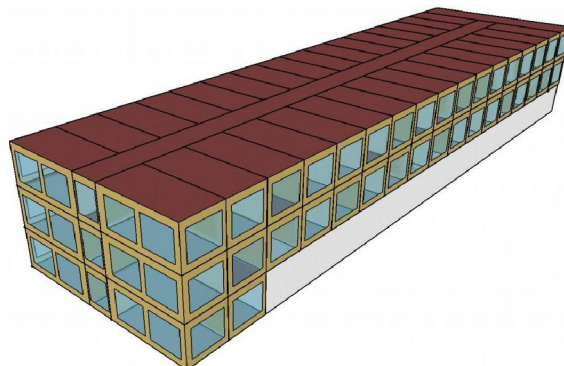
- Número de andares considerados na simulação: 2
- Área construída: 16,5 m x 60 m
- Altura do pé direito: 3,3 m
- Espessura da laje entre andares: 40 cm
- Altura da janela em relação ao piso: 50 cm
- Dimensões das janelas: 2,75 m x 2,25 m
- Número de salas por andar: 32
- Área construída da sala: 3,5 m x 7 m
- Altura do escritório: 3,3 m
- Área do corredor: 2,3 m x 56,5 m
- Área do Laboratório de Alta Tensão e Eficiência Energética: 16,5 m x 3,5 m

A Figura 19 representa o modelo completo do prédio, do qual o terceiro andar é o objeto principal de estudo. Através deste andar são dimensionadas as cargas térmicas que servem de entrada para as verificações dos sistemas de ar-condicionado levantados como hipótese.

A Figura 20 permite identificar a disposição das salas definidas para o modelo de simulação através de um corte da laje superior. Tal disposição não é exatamente a mesma do prédio em estudo, entretanto ao se fazer esta divisão igualitária das áreas e da simetria em relação ao corredor o modelo se torna mais simples de ser construído, mas ao mesmo tempo sem perder características importantes do prédio real.

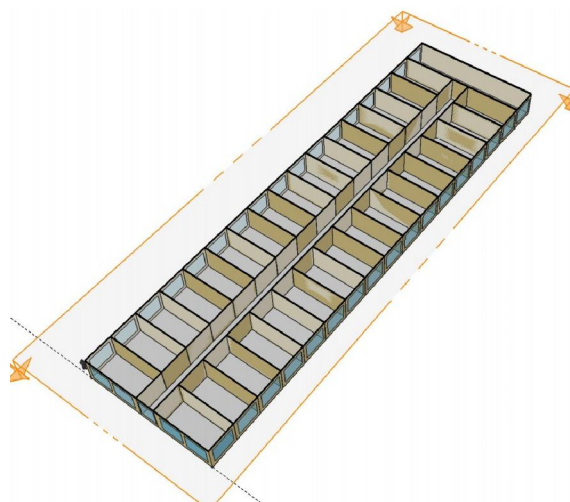
Uma vez que o segundo andar foi modelado como uma cópia do terceiro e o andar térreo não será considerado na simulação, é possível se definir a carga térmica do edifício simulando apenas o terceiro andar e duplicando seu resultado. Esta hipótese reduz o tempo de simulação pela metade, uma vez que o programa utilizado precisa executar apenas metade das variáveis.

Figura 19 – Modelo do prédio do Departamento de Energia e Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá-UNESP



fonte: Produção do próprio autor.

Figura 20 – Disposição modeladas das salas prédio do departamento de energia e elétrica da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá-UNESP



fonte: Produção do próprio autor.

A seguir são descritos os sistemas de ar-condicionados a serem estudados, desta vez com foco nos subsistemas a serem considerados, como por exemplo os sistemas de backup utilizados em cada uma das hipóteses a serem estudadas.

3.2 DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS DE AR-CONDICIONADO SOLAR E SUA INTERAÇÃO COM O MODELO PROPOSTO:

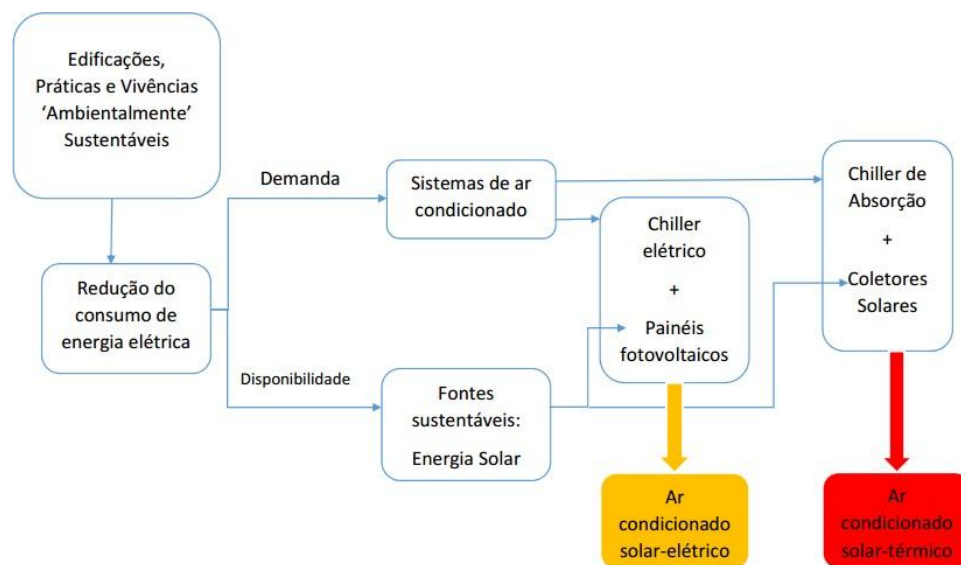
O sistema de ar-condicionado solar mais comum é o que utiliza coletores para o acionamento de um *chiller* de absorção. O projeto Solair utiliza este sistema como base, para o qual são desenvolvidas as equações de consumo. Entretanto, com o avanço tecnológico

ocorrido desde que o projeto foi finalizado (2009), as placas fotovoltaicas passaram a se tornar uma alternativa igualmente interessante no quesito de utilização de energias renováveis para sistemas de ar-condicionado. Sendo assim, ambos os sistemas são comparados neste trabalho a fim de se mensurar suas diferenças de eficiência.

A utilização da energia solar como forma de acionamento de sistemas de ar-condicionado possui a característica interessante de que uma maior incidência solar provoca um aumento na temperatura e na sensação térmica, o que por sua vez aumenta a demanda por refrigeração que aumenta o consumo de energia. Ao se produzir energia, seja térmica ou elétrica, através da energia solar, o agente causador do aumento do consumo colabora também na produção de energia, fazendo com que o consumo líquido diminua. A Figura 21 ilustra o processo de tomada de decisão para os sistemas colocados como hipóteses.

Para facilitar a exposição das hipóteses e características dos modelos de ar-condicionado que são implementados, cada sistema é exposto em uma diferente sub-seção, as quais encontram-se a seguir.

Figura 21 – Fluxograma da decisão pelo uso das tecnologias abordadas neste trabalho.



fonte: Produção do próprio autor.

3.2.1 Sistema Solar-Térmico

Como proposta, os modelos estudados tanto do ar-condicionado térmico quanto o elétrico possuem a mesma área de incidência solar. Desta forma, será considerada a instalação dos coletores solares sobre a laje do prédio, ocupando toda sua área. Os coletores captam a luz solar, aquecem a água neles contida e este calor é utilizado como fonte de energia para que o *chiller* de absorção então funcione. Entretanto o *chiller* de absorção possui outras fontes de energia atreladas ao processo, e estas também deve ser previstas nos balanços energéticos

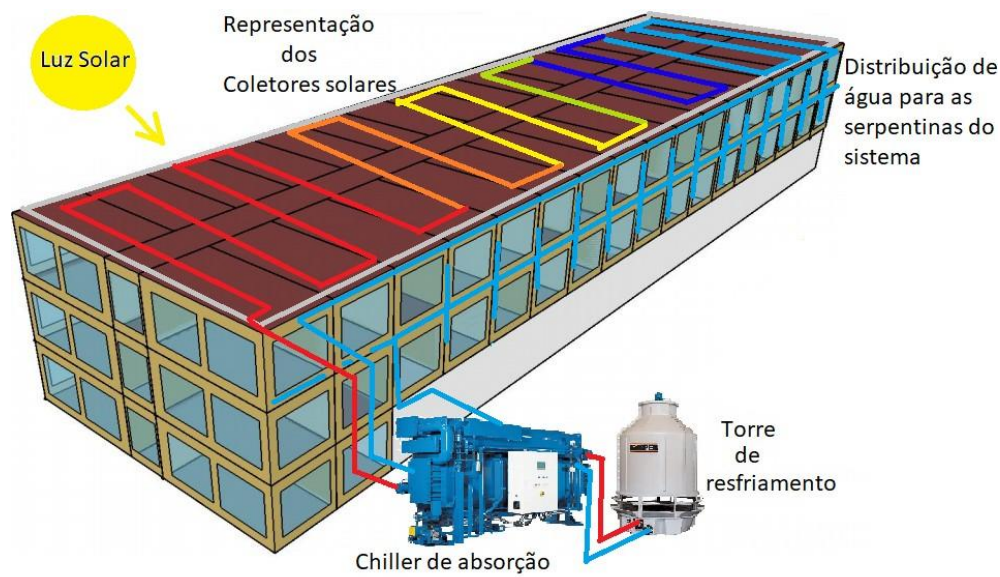
ao se mensurar o consumo do ciclo e sua eficiência.

Retornando à Figura 9, pode-se verificar a necessidade de água de resfriamento responsável por fazer o fluido refrigerante ser novamente condensado. Uma forma de possuir água fria para realizar esta função é através da instalação de uma torre de resfriamento. Sendo assim é necessário contabilizar o trabalho das bombas da torre de resfriamento durante o cálculo da eficiência.

A Figura 22, representa o sistema solar-térmico e seus componentes mais importantes na instalação dos sistema:

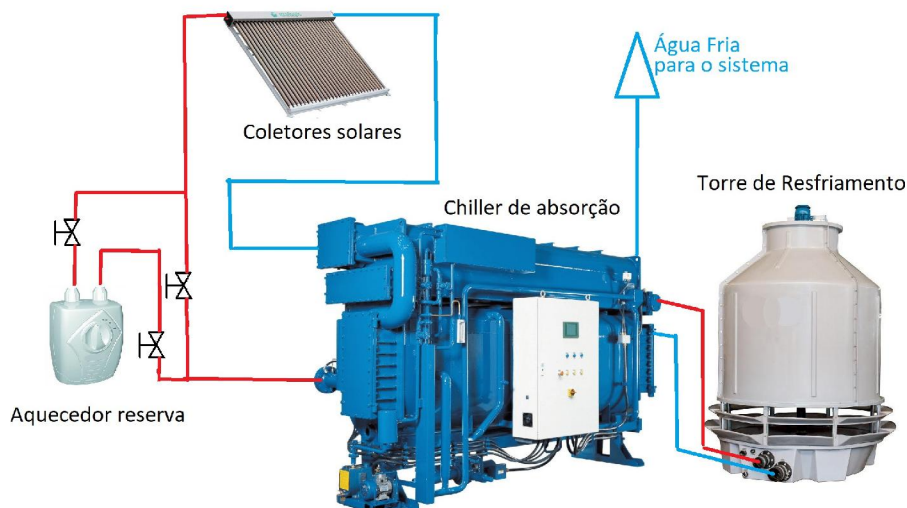
Uma vez que a energia solar é indispensável para o funcionamento do sistema, há necessidade de uma reserva para o caso da incidência solar não ser o suficiente para a ativação do ciclo. O projeto Solair prevê em sua formulação (que é apresentada em seções futuras) a utilização de um sistema de queima de combustíveis fósseis como reserva, o qual é ativado quando a energia solar não é o suficiente. Entretanto, neste trabalho, será considerado um aquecedor elétrico como reserva. Tal troca tem duas motivações principais: primeiramente, no Brasil, por se tratar de um clima tropical, não é comum a utilização de sistemas de gás natural, já que o combustível geralmente é utilizado em aplicações de aquecimento. Sendo assim, usar um sistema de reserva implicaria, numa aplicação real, muito custo com infraestrutura. Em segundo lugar: como a matriz energética brasileira é majoritariamente pautada em energia hidrelétrica, o impacto ao se utilizar tal fonte para a ativação do sistema reserva possui um impacto ecológico menos agressivo do que utilizar combustíveis fósseis. A Figura 23, ilustra um esquema simplificado de como os equipamentos estão ligados entre si.

Figura 22 – Esquemático do Sistema de Ar-Condicionado solar-Térmico



fonte: Produção do próprio autor.

Figura 23 – Esquemático dos Componentes do Sistema de Ar-Condicionado Solar-Térmico



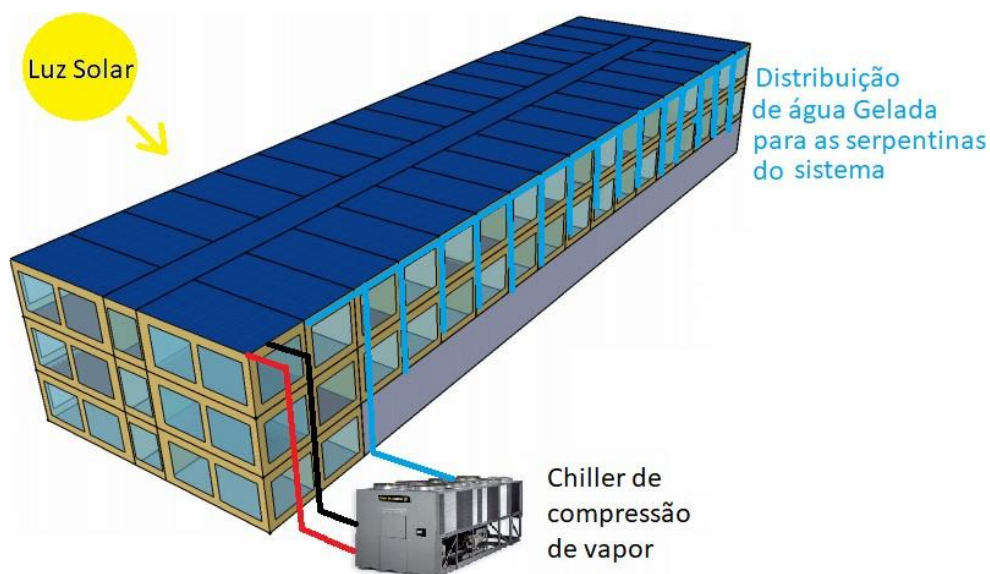
fonte: Produção do próprio autor.

3.2.2 Sistema Solar-Elétrico

Assim como o sistema térmico, os painéis fotovoltaicos do sistema elétrico são instalados por toda a laje do edifício. Como os painéis fotovoltaicos produzem energia elétrica estes podem ser instalados de forma que o excedente seja devolvido a linha de transmissão responsável pela distribuição da energia elétrica na localidade (sistema *on-grid*). A energia elétrica produzida pelos painéis é então utilizada para alimentar um sistema de ar-condicionado de compressão de vapor acionado eletricamente, podendo este até mesmo já ser o equipamento anteriormente presente no local, uma vez que analisando a partir do aparelho, a fonte de energia ainda é a mesma. A Figura 24, representa um esquema simplificado da instalação dos equipamentos no prédio em questão neste trabalho.

Assim como o sistema térmico, o sistema elétrico também precisa de um sistema reserva para o caso da energia solar gerada não ser o suficiente para o acionamento do sistema, porém neste caso a facilidade de se definir um sistema reserva é ainda mais simples. Uma vez que nesta hipótese é utilizado um sistema de ar-condicionado de compressão de vapor acionado eletricamente, o sistema reserva é própria energia elétrica distribuída pela concessionária de energia. A Figura 25 ilustra o funcionamento do circuito do sistema elétrico e seus principais componentes.

Figura 24 – Esquemático do sistema de ar-condicionado solar-elétrico



fonte: Produção do próprio autor.

Ara (2010) levanta a possibilidade da integração dos painéis fotovoltaicos não só a áreas destinadas a estes, como a cobertura do prédio no modelo em estudo, mas também as fachadas das edificações. Esta disposição tem a vantagem de otimizar a área de captação solar e aumentar, assim, a geração de energia. Entretanto os gastos associados para se adaptar os painéis a fachadas de prédios já construídos torna mais difícil sua implementação. Contudo, se na construção de novos prédios, os painéis nas fachadas forem previstos desde a etapa de projeto, surge um objeto de análise interessante para futuros trabalhos. Neste trabalho, é analisada apenas a disposição dos painéis fotovoltaicos na laje do prédio, também como forma de melhorar a comparação com o sistema térmico.

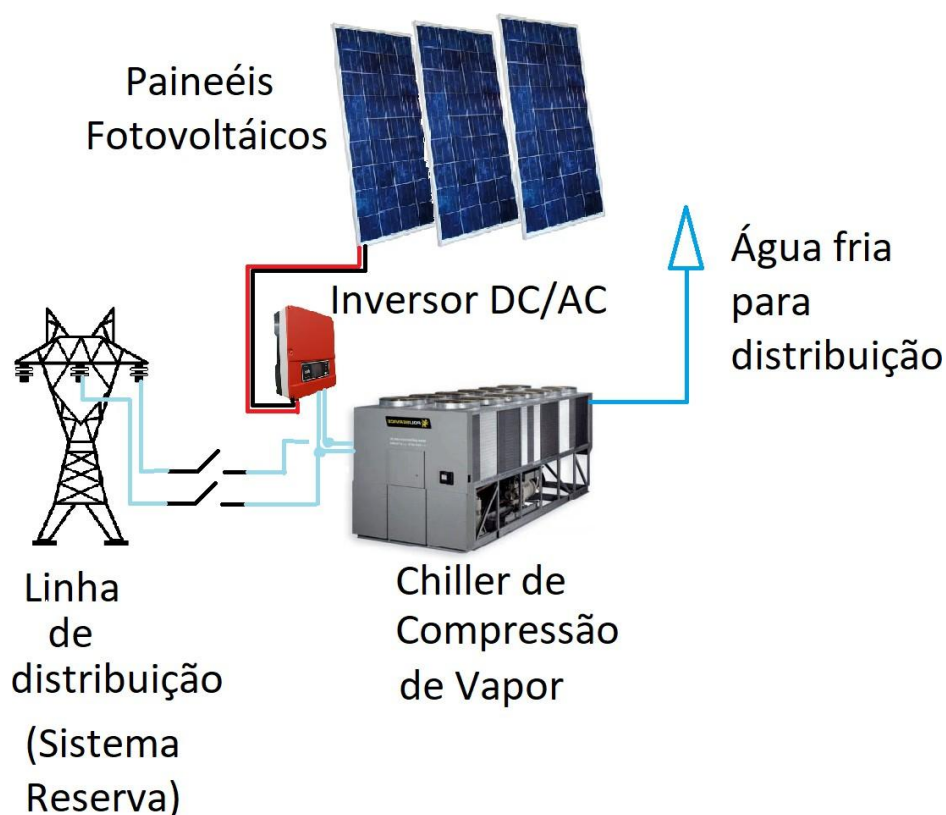
3.3 DEFINIÇÃO DA CARGA TÉRMICA DE RESFRIAMENTO DO EDIFÍCIO

3.3.1 Definição das zonas térmicas

O parâmetro fundamental para que os sistemas de ar-condicionado possuam seus desempenhos mensurados é a carga térmica de refrigeração que eles precisam produzir para o edifício. Para tal é então utilizado o software EnergyPlus, o qual permite a criação de um modelo através de arquivos de entrada específicos e através da descrição da área de interesse segundo o uso, equipamentos presentes e ocupação. O EnergyPlus calcula, segundo parâmetros de conforto térmico, diversos parâmetros, tais como: carga térmica de resfriamento, carga térmica de aquecimento, consumo de energia elétrica dos objetos acrescentados à simulação, taxa de renovação de ar necessária em um ambiente climatizado, entre outros relatórios, em sua maioria customizáveis. Entretanto, por se tratar de um motor

de cálculo, o software não apresenta uma interface amigável ao usuário, exigindo um domínio sobre o manuseio do arquivos. Porém, como forma de facilitar seu uso, o motor de calculo EnergyPlus foi incorporado a um conjunto de outros softwares ao OpenStudio, o qual é utilizado como um *plugin* do software SketchUp. Este último trata-se de um programa muito utilizado por arquitetos e engenheiros civis, pois permite a execução de modelos tridimensionais de construções e possui uma interface que permite uma abordagem muito mais direta por parte do usuário.

Figura 25 – Esquemático dos componentes do sistema de ar-condicionado solar-elétrico



fonte: Produção do próprio autor.

Para se definir a carga térmica de resfriamento do prédio então foram utilizados basicamente dois programas: SketchUp-pro 2017, e o *plugin* OpenStudio na versão 2.8.1. O OpenStudio permite que o usuário construa um modelo tridimensional no prédio a ser analisado, via SketchUp, já convertendo os dados de forma que o motor de cálculo do EnergyPlus entenda as áreas que serão determinadas como zonas térmicas e suas características.

Ao se definir um bloco como uma zona térmica é necessário informar ao programa parâmetros como a aplicação da zona térmica. O programa já possui uma biblioteca pré-

estabelecida de diversas funções e modelos como escritórios, salas de espera, salas de máquinas, dentre outros. cada um com um conjunto diferente de atributos. Para a aplicação neste trabalho, como o uso entre as salas é comum, todas serão definidas como escritórios fechados. Juntamente a esta informação também é necessário informar o clima no qual a edificação se encontra. Nesta etapa existe um problema, pois o programa é de origem estadunidense, logo os climas disponíveis são todos de lá. Como forma de contornar o problema, é então escolhido o clima de maior proximidade com a região na qual o modelo a ser simulado se encontra. A Figura 26, exemplifica a janela de atribuição das características da zona térmica.

Figura 26 – Janela de definição das zonas térmicas

Attribute	Value
Space Type	189.1-2009 - Office - ClosedOffice - CZ1-3
Building Story	<no change>
Construction Set	189.1-2009 - CZ1 - Office
Thermal Zone	<new thermal zone>
Set Parent Thermal Zone's - Ideal Air Loads Status	<no change>
Set Parent Thermal Zone's - Thermostat	189.1-2009 - Office - ClosedOffice - CZ1-3 Thermostat

fonte: Produção do próprio autor.

Como o clima dos EUA é dividido em faixas de 1 a 8, sendo a 8 a mais longe da linha do Equador e a 1 a mais próxima, para viabilizar a simulação foi escolhida a zona climática de 2, por se tratar da zona climática mais próxima a do estado de São Paulo. Em uma etapa seguinte, é explicado o arquivo climático, o qual apresenta informações mais consistentes com o clima, uma vez que é possível carregar o arquivo com as informações corretas da cidade escolhida, permitindo assim uma maior precisão da simulação.

Assim, cada uma das 32 salas e o Laboratório de Alta Tensão e Eficiência Energética são definidos cada um como uma zona climática padrão, com as características apresentadas na Figura 26. O corredor não é definido como uma zona térmica, uma vez que este não apresenta sistema de refrigeração. Com as zonas térmicas definidas, então migra-se o modelo para o setor de simulações do OpenStuddio, no qual algumas outras características são melhor definidas.

3.3.2 Definição dos parâmetros climáticos

Uma vez que o SketchUp permite a construção geométrica o edifício que se deseja definir as cargas térmicas de resfriamento, as características externas e construtivas são definidas através da interface do OpenStudio. O OpenStudio carrega o prédio modelado e cria as coordenadas necessárias para que o motor de cálculo do EnergyPlus possa processar tais informações. Porém, outras informações são necessárias de serem acrescentadas. A primeira

e mais importante é a adição do arquivo climático. Este arquivo reúne informações climáticas tais como temperatura média de um determinado ano tomada em vários períodos de tempo, umidade relativa do ar, irradiação solar, entre outros parâmetros. Este arquivo também é responsável por localizar o edifício geograficamente, com informações de altitude, latitude e longitude.

Sendo assim, é então escolhido o arquivo climático da cidade onde o edifício a ser simulado se encontra, no caso deste presente trabalho, na cidade de Guaratinguetá-SP, Brasil. Há um projeto da Universidade Federal de Santa Catarina, o Laboratório de Eficiência Energética e Edificações, cujo professor responsável pela supervisão é Roberto Lamberts. Este projeto disponibiliza arquivos climáticos de diversas cidades Brasileiras, dentre elas Guaratinguetá. Sendo assim, agora o arquivo climático da cidade está definido. A Figura 27 indica as informações carregadas a partir do arquivo climático da cidade de Guaratinguetá.

Figura 27 – Carregamento do arquivo climático

www.energyplus.net/weather'."/>

fonte: Produção do próprio autor.

Outro arquivo de entrada importante é o arquivo de extensão .ddy, neste são definidos um dia característico de verão e um dia característico de inverno. Tal definição funciona como uma forma de calibração para o programa, de modo que estes dias são definidos como casos extremos. A Figura 28 indica os campos retirados através do arquivo .ddy, neste também são definidos os dias 21 de fevereiro como o dia típico de verão e o dia 21 de agosto como o dia típico de inverno.

Com os arquivos de entrada carregados no OpenStudio, a próxima etapa consiste na definição das agendas de utilização dos espaços definidos como zonas térmicas. Como indicado na Figura 26, todas as salas do bloco são definidas como escritórios fechados, isso faz com que o software carregue agendas de escritório fechado. Na aba rotinas (*Schedules*), pode-se ver as características pré-estabelecidas para escritórios fechados. Estas são atribuídas via objetos contendo informações como quantidade de equipamentos, pessoas, iluminação, entre outras, presentes neste escritório definido. Também há o objeto *people activity* que define a quantidade de pessoas dentro do escritório segundo horário. Para efeito de simplificação, apenas este objeto será modificado nas simulações presentes neste trabalho.

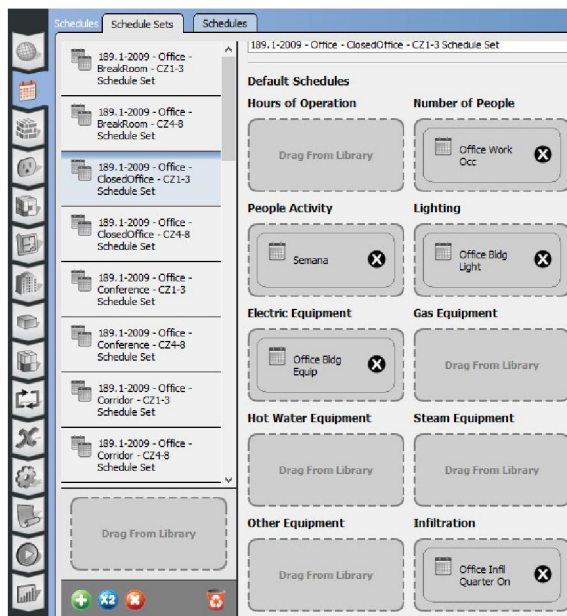
Figura 28 – Carregamento do arquivo .ddy

Design Days					
Design Days					
Date	Temperature	Humidity	Pressure Wind Precipitation	Solar	Custom
Design Day Name	All	Day Of Month	Month	Day Type	Daylight Saving Time Indicator
	<input type="checkbox"/>	Apply to Selected	Apply to Selected	Apply to Selected	Apply to Selected
eta AP Ann Clg -4% Conds DP=>MDB	<input type="checkbox"/>	21	2	SummerDesignDay	<input type="checkbox"/>
brgueta AP Ann Htg 99.6% Conds DB	<input type="checkbox"/>	21	8	WinterDesignDay	<input type="checkbox"/>

fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 29, mostra como o OpenStudio faz essa separação pelo tipo de zona térmica escolhida.

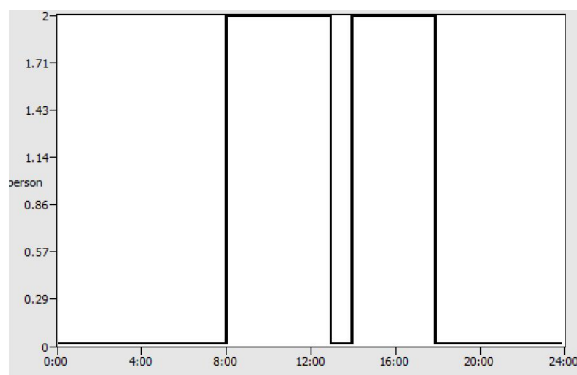
Figura 29 – Objetos referentes a um escritório fechado



fonte: Produção do próprio autor.

Para, então, alterar o perfil de frequência do escritórios, foi criada uma nova agenda com a atividade das pessoas, alterando a seção *people activity*. A alteração executada configura o período de utilização das salas para o horário comercial, das 8h as 18h de segunda a sexta-feira. Como aproximação, assume-se que o número médio de 2 pessoas por sala neste período. Assim o perfil de frequência pode ser visto na Figura 30. É considerado que aos fins de semana não há ninguém nas salas.

Figura 30 – Distribuição de pessoas nas salas segundo horário

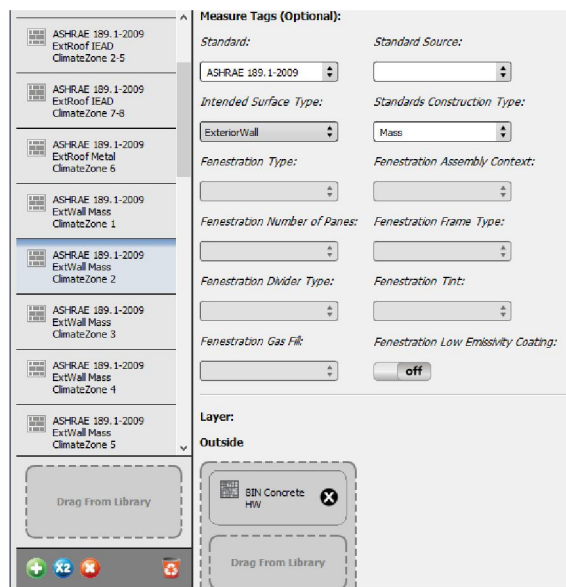


fonte: Produção do próprio autor.

3.3.3 Definição dos materiais

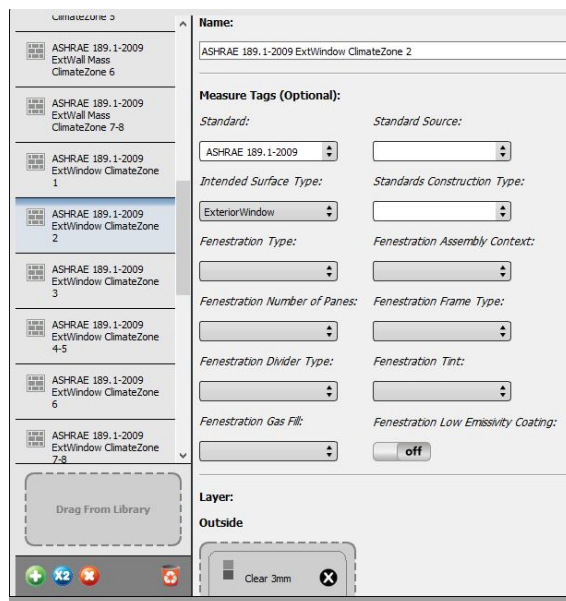
A próxima etapa é definir melhor os tipos de materiais construtivos do prédio em questão. Também como forma de simplificação, paredes e telhado foram considerados todos de concreto e as janelas de vidro *clear* de espessura 3 mm. Esta modificação é feita segundo as Figura 31 e Figura 32.

Figura 31 – Definição do material das paredes do prédio



fonte: Produção do próprio autor.

Figura 32 – Definição do material da janela do prédio



fonte: Produção do próprio autor.

Como nesta etapa do trabalho o objetivo é se definir a carga térmica necessária de refrigeração, então na aba onde seriam definidos os sistemas de ar-condicionado, são utilizadas cargas ideais. Utilizar tal marcação significa que o EnergyPlus utiliza um sistema de refrigeração ideal que consegue suprir completamente a demanda. Com este sistema ideal é possível, então, medir a carga térmica de refrigeração total demandada pelo edifício para a etapa de verificação dos sistemas térmico e elétrico. Com relação aos parâmetros necessários para a simulação, o que foi descrito anteriormente é suficiente. Como o OpenStudio é uma ferramenta de análise muito robusta é possível gerar diversos relatórios, entretanto o quanto maior for o número de informações solicitadas, maior será o tempo de simulação. Sendo assim há uma aba onde o usuário pode escolher os relatórios que deseja receber da simulação, segundo as informações que ele precisará em sua aplicação.

As simulações do edifício são realizadas através dos parâmetros definidos anteriormente. É possível então definir a carga térmica de refrigeração necessária para a análise dos sistemas de ar-condicionado levantados como hipótese neste trabalho.

3.4 DETERMINAÇÃO DO CONSUMO DOS SISTEMAS DE AR-CONDICIONADO SOLARES

Possuindo a distribuição da carga térmica de refrigeração do prédio estudado, agora é necessário se definir o comportamento dos sistemas de ar-condicionado solar propostos.

Através das hipóteses adotadas, é verificada a resposta dos sistemas, seu consumo e suas respectivas eficiências. Para modelar matematicamente o funcionamento dos ciclos são utilizadas as diretrizes sugeridas pelo projeto Solair e as modificações necessárias para adequar estas hipóteses à situação brasileira e dos objetivos deste trabalho.

O projeto Solair (SOLAIR-PROJECT, 2008) teve por objetivo difundir conhecimento acerca da utilização de sistemas de ar-condicionado solares (mais especificamente os térmicos) como forma de se reduzir o consumo de energia elétrica durante o verão em países europeus. Partindo do fato de que durante tal época do ano, enquanto a demanda por energia para refrigeração aumenta, a incidência solar também aumenta. Pautando-se numa análise de quanto de energia primária seria economizada através da implementação destes sistemas, o projeto então visava estruturar um método consistente de forma a impulsionar sua aplicação.

Cabe aqui salientar que o projeto Solair utilizava uma análise de consumo baseada na energia primária gasta, ou seja, a fonte de energia responsável pela geração de eletricidade. Em países europeus a energia elétrica ainda possui como fonte principal a queima de combustíveis fósseis. Desta forma, ao se demonstrar a economia através deste tipo de fonte, criava-se uma relação direta com a preservação ambiental. Quando a metodologia é estendida para o Brasil, isso não tem o mesmo apelo, uma vez que a fonte principal de geração de energia elétrica brasileira é a hidrelétrica. Sendo assim, neste trabalho, a análise do consumo dos sistemas estudados é feita através do consumo local de energia elétrica, e a abordagem utilizada é da medida da capacidade destes sistemas em serem uma solução econômica para a questão energética, porém sem deixar a contribuição ecológica de lado.

A seguir são demonstradas as equações adaptadas do projeto Solair, baseando-se no trabalho de Ara (2010) para a manipulação das equações e assim mensurar a energia gasta localmente. Essa manipulação também ocorre para análise do sistema solar elétrico, uma vez que o Projeto Solair não contempla tal ciclo.

3.4.1 Consumo de energia do sistema solar-térmico

O sistema de ar-condicionado solar-térmico utiliza de um ciclo de absorção acionado mediante o calor contido na água aquecida através de coletores solares. Para que a modelagem possua o maior equivalência com a realidade possível, e necessário acrescentar as eficiências dos processos envolvidos durante o funcionamento do ciclo. São colocados como os processos cujas perdas são mais significativas:

- Aquecimento da água nos coletores;
- Bombeamento da água para os coletores;
- Operação total do ar-condicionado;

- Bombeamento da água de resfriamento (torre de resfriamento);
- Processo de aquecimento auxiliar;

Cada um dos processos anteriormente citados possui perdas que devem ser consideradas ou também consomem energia elétrica local, sendo assim também devem estar presentes na definição do consumo total. A equação 8 relaciona os componentes de consumo de energia elétrica considerados:

$$E_{t\acute{e}rmico} = E_{e,auxiliar} + E_{e,instala\c{c}ao\ solar} + E_{e,chiller\ solar} + E_{e,torre\ de\ resfriamento} \quad (8)$$

Discretizando cada termo da equação 8 e rearranjando seus termos, obtém-se a equação 9:

$$E_{tc} = \frac{Q_{cold}}{COP_s} \cdot K \quad (9)$$

Sendo:

E_{tc} : Consumo de energia elétrica total do sistema [kWh];

Q_{cold} : Carga térmica de refrigeração [kWh];

COP_s : Coeficiente de performance do *chiller* de absorção [adm];

s : fração solar [adm];

η_e : eficiência do aquecedor auxiliar [adm];

f_1 : demanda específica de energia elétrica da instalação solar (razão entre a energia consumida pelo sistema de circulação da água quente e o calor produzido pelo sistema) (%);

f_2 : demanda específica de energia elétrica do *chiller* (razão entre a energia elétrica consumida pelo *chiller* e a carga térmica retirada do edifício ao qual se deseja resfriar)(%);

f_3 : demanda específica de energia elétrica da torre de resfriamento (razão entre o consumo de energia elétrica dos sistemas da torre de resfriamento e a energia térmica por ela retirada)(%);

O termo fração solar utilizado nas equações anteriores se refere à capacidade do sistema de atender a aplicação segundo a incidência de energia solar sobre o mesmo. Esta pode ser calculada relacionando-se a energia gerada pelo sistema e a energia utilizada pelo aquecedor auxiliar, uma vez que este é acionado sempre que a energia solar não é o suficiente. Assim, a fração solar pode ser calculada através da equação 10.

$$s = \frac{Q_s}{Q_{aux} + Q_s} \quad (10)$$

Na qual:

Q_s : Energia da água aquecida nos coletores que aciona o *chiller* de absorção [kWh];

Q_{aux} : Energia térmica do aquecedor auxiliar para atender o sistema quando a energia solar não é o suficiente [kWh];

Como o coeficiente de performance do sistema de ar-condicionado solar relaciona a carga térmica gerada com a energia utilizada para gerá-la é possível escrever a fração solar segundo estes termos. Outro fator que facilita a utilização deste parâmetro é a utilização da energia térmica gerada pelos coletores através dos parâmetros geométricos, irradiância solar e da eficiência de transformação do sistema. Assim, a fração solar pode ser descrita como na equação 11.

$$S = \frac{COP_s \cdot \eta_{coletor} \cdot G_{solar} \cdot A_{coletor}}{Q_{cold}} \quad (11)$$

A definição da irradiância solar é feita através da simulação da geração de energia elétrica através dos painéis fotovoltaicos utilizados no sistema solar-elétrico, que é apresentado na próxima seção. Uma vez que o rendimento de conversão dos painéis é estimado e o software retorna a energia elétrica gerada pelos painéis é possível calcular a energia solar irradiada sobre a área da laje superior do prédio no tempo desejado. Como as dimensões do prédio também são conhecidas, é possível então se calcular a irradiância solar média por mês através dos resultados obtidos na simulação.

Através das equações apresentadas até aqui e das cargas térmicas necessárias para refrigeração do edifício é então possível se calcular o consumo total de energia elétrica no local de utilização, considerando um sistema solar-térmico. Porém, ainda faltam os parâmetros e variáveis referentes aos equipamentos presentes nos ciclos utilizados. Segundo a literatura, são aproximações consistentes das demandas específicas, do coeficiente de performance e das eficiências do sistema os valores apresentados na Tabela 1.

A área de coletores utilizada é a área total da cobertura da edificação em estudo, consistindo numa área de 990 m^2 . Assim o sistema de ar-condicionado solar térmico pode ser avaliado.

3.4.2 Consumo de energia do sistema solar-elétrico

Também é necessário fazer a mesma análise para o sistema solar-elétrico. Baseado no ciclo de compressão de vapor, a fonte de energia principal responsável pelo funcionamento do ciclo é a energia elétrica, assim como a energia utilizada como sistema auxiliar. Para o cálculo do consumo de energia do sistema são necessários apenas o coeficiente de performance (COPs), a carga térmica de refrigeração e a energia elétrica produzida pelos painéis fotovoltaicos. Logo, por se tratar da mesma forma de energia, elas podem se relacionar matematicamente através da equação 12.

Tabela 1 – Parâmetros do sistema de ar-condicionado solar térmico

Parâmetros	Nomenclatura	Valor	Fonte
η_{ct}	Rendimento dos coletores solares	50%	(KIM, 2008)
$\eta_{auxiliar}$	Rendimento do aquecedor auxiliar	80%	valor típico de mercado
f_1	Razão entre o consumo de energia elétrica da instalação e a energia térmica produzida pelos coletores	0,02	(SOLAIR-PROJECT, 2008)
f_2	Razão entre o consumo de energia elétrica do <i>chiller</i> solar e a energia térmica retirada do ambiente	0,01	(KIM, 2008)
f_3	Razão entre o consumo de energia elétrica da torre de resfriamento e a energia térmica retirada	0,03	(SOLAIR-PROJECT, 2008)
COP_s	Coefficiente de performance do <i>chiller</i> de absorção	0,7	(KIM, 2008)

fonte: Adaptado de ARA (2010).

$$E_{tc} = \frac{Q_{cold}}{COP_s} - P_{fv} \quad (12)$$

Sendo:

E_{tc} : Consumo de energia elétrica total do sistema [kWh];

Q_{cold} : Carga térmica de refrigeração [kWh];

COP_s : Coeficiente de performance do *chiller* de compressão de vapor [adm];

P_{fv} : Energia produzida pelos painéis fotovoltaicos [kWh];

Da mesma forma como os parâmetros foram definidos segundo a literatura para o sistema solar- térmico, também é necessário se definir alguns parâmetros para o sistema solar-elétrico:

Tabela 2 – Parâmetros do sistema de ar-condicionado solar-elétrico

Parâmetros	Nomenclatura	Valor	Fonte
η_{pv}	Rendimento dos painéis fotovoltaicos	20%	(KIM, 2008)
COP_s	Coefficiente do <i>chiller</i> de compressão	3	(KIM, 2008)

fonte: Adaptado de ARA (2010).

Aqui cabe se atentar ao fato de que caso a energia gerada pelos painéis exceda a demanda, o resultado do consumo seria um número negativo, representando então não mais o consumo mas sim um excedente passível de ser vendido. Sendo assim, é um valor importante para a análise de consumo, uma vez que existem alternativas de se utilizar esse excedente, tanto para venda direta para a concessionária de energia elétrica ou através de um sistema de atribuição de créditos, dependendo da legislação vigente do país no qual o sistema está

sendo aplicado. Logo, ao se considerar o efeito do sistema nos custos associados, este valor deve ser tratado corretamente.

3.4.3 Considerações sobre a metodologia

As simulações para se obter as cargas térmicas de refrigeração foram executadas de forma que resultavam na carga térmica necessária durante cada mês do ano. Entretanto, ao analisar desta forma, o modelo considera que a energia solar aplicada ao sistema é dividida de forma média durante o mês, assim a verificação é da possibilidade do acumulado mensal de energia solar ser suficiente para atender o sistema. Mesmo que seja de conhecimento que este comportamento possui algumas variações bruscas, como por exemplo dias em que a irradiação solar não é o suficiente e outros nos quais ela excede em algumas vezes a energia necessária, a análise busca levantar o potencial da energia solar para o acionamento de sistemas de ar-condicionado, servindo de introdução para análises mais detalhadas, como por exemplo uma análise do comportamento do sistema dia-a-dia.

Tal análise possui um efeito direto nos valores da fração solar. Ao se analisar de forma mensal, os dias e horários que fração solar é baixa e os sistemas auxiliares são acionados são suprimidos por dias e horários onde a geração de energia é muito alta, fazendo o sistema apresentar um desempenho melhor nas simulações do que ele possuiria na realidade. Mesmo assim, o método é eficaz ao se analisar a viabilidade da implementação e a decisão de se utilizar ou não os sistemas apresentados neste trabalho. Uma vez que os parâmetros são definidos segundo a literatura, os equipamentos utilizados para compor o custo total de implementação de cada um dos sistemas e assim possibilitar o cálculo de um *payback* como forma de mensurar a viabilidade do projeto, são definidos segundo os valores mais próximos encontrados na literatura. Tais equipamentos são listados na Tabela 3.

Tabela 3 – Equipamentos e custos para os sistemas

Equipamento	Modelo	Quantidade	Preço estimado total
<i>Chiller</i> de absorção	LG WCMW 004	1	R\$ 42 000,00
Torre de resfriamento	TRH-45 (Helmo)	1	R\$ 5 000,00
Coletor solar	CSP-4U	264	R\$ 369 600,00
Aquecedor auxiliar	Boiler 1000 Litros	1	R\$ 6 000,00
<i>chiller</i> de compressão de vapor	LC-30WS	1	R\$ 31 200,00
Inversor de frequência	FRONIUS SYMO 15.0-3 M	12	R\$ 252 000,00
Painel fotovoltaico	CS6U-340	500	R\$ 300 000,00

fonte: Produzido pelo autor

Os custos dos equipamentos são estimados segundo valores médios do mercado para cada categoria. Atualmente todos os sistemas de ar condicionado presentes do prédio em estudo são sistemas individuais split ou janela. Como forma de levantar o consumo e então poder

comparar os sistemas estudados com os sistemas atuais é levado em consideração que o consumo destes aparelhos seja sua capacidade de refrigeração dividida pelo COP comum de sistemas do tipo janela (visto que estes são a maioria) dos sistemas instalados, através da equação 6, porém sem considerar o termo da geração fotovoltaica. Nesta última etapa os dados obtidos são oriundos de uma pesquisa interna do campus, na qual a Equipe do Projeto Feg Sustentável (FEG-SUSTENTÁVEL, 2019), fez o levantamento dos sistemas de ar condicionado de todos os prédios para então estudar o consumo de energia e propor a substituição por sistemas mais modernos. Nesta proposta os sistemas de ar-condicionado solar não são considerados. Então assim os dados referentes ao Departamento de Energia foram disponibilizados. Nestes dados constam as capacidades nominais de refrigeração de todos os ar condicionados presentes nas salas do bloco.

A Tabela 4 indica o valor do coeficiente de performance adotado:

Tabela 4 – Parâmetros do sistema de ar-condicionado atual

Parâmetros	Nomenclatura	Valor	Fonte
COP _c	Coeficiente de performance do sistema atual	3	Valor comum de mercado

fonte: Adaptado de ARA (2010).

Na próxima seção é feita a análise dos resultados obtidos segundo as equações e métodos propostos anteriormente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

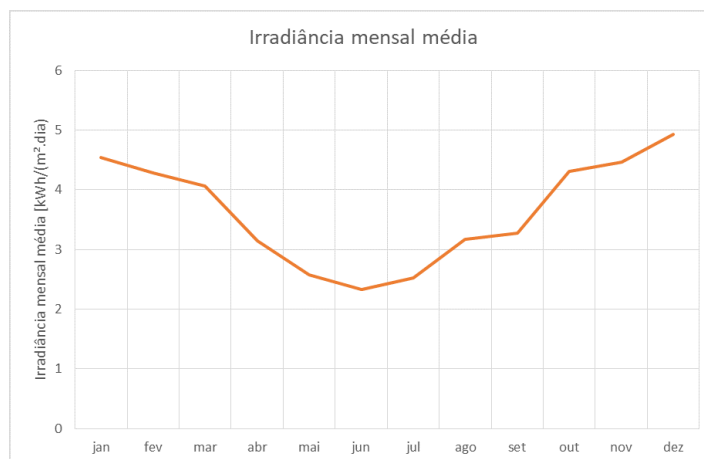
Os resultados de carga térmica e a irradiância solar são apresentados nas Figura 33 e Figura 34.

Figura 33 – Carga Térmica mensal média



fonte: Produção do próprio autor.

Figura 34 – Irradiância mensal média



fonte: Produção do próprio autor.

Fica evidente ao se analisar as Figuras 34 e 35, que a estação do ano influencia diretamente na necessidade por refrigeração. Como o Brasil é um país tropical, mesmo no inverno, ainda sim existem dias onde há necessidade de um sistema de ar-condicionado para refrigeração, de forma a se atingir os requisitos necessários para se obter conforto térmico. Também pode-se notar que neste mesmo período há uma queda no valor da irradiância solar, uma vez que é o período do ano onde o hemisfério está mais distante do sol devido a inclinação da terra. Sendo assim, os resultados obtidos estão dentro do esperado. É interessante verificar este comportamento, também como maneira de validar os softwares utilizados e os arquivos climáticos referentes a cidade de Guaratinguetá, os quais foram obtidos da base de dados fornecida pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC.

Atualmente os sistemas de ar-condicionado instalados são sistemas individuais do tipo split ou janela e as capacidades nominais de cada sistema foram levantadas através de uma pesquisa realizada em todo o campus pela Equipe do Projeto FEG-Sustentável (FEG-SUSTENTÁVEL, 2019). Neste levantamento foi obtida uma carga nominal total de 559000 BTU/h, ou de 163,82 kW. Entretanto estes valores não correspondem diretamente ao valor do consumo de energia elétrica do sistema, para tal é necessário se aplicar o coeficiente de performance dos equipamentos. Como a maioria dos sistemas são ar-condicionados do tipo janela e também são aparelhos antigos, o consumo no decorrer dos anos aumenta devido a uma depreciação comum dos equipamentos. Porém, são levados em consideração apenas os valores comuns de mercado para o COP de cada sistema. Como hipótese adotada, também foi utilizado um valor único de COP, de forma a facilitar os cálculos. Ao se estimar o consumo do sistema atual então são utilizadas a equação 6 e o valor de COP apresentado na Tabela 4.

- Consumo atual estimado médio: 13106,14 kWh/mês

4.1 CONSUMO DO SISTEMA DE AR-CONDICIONADO SOLAR-TÉRMICO

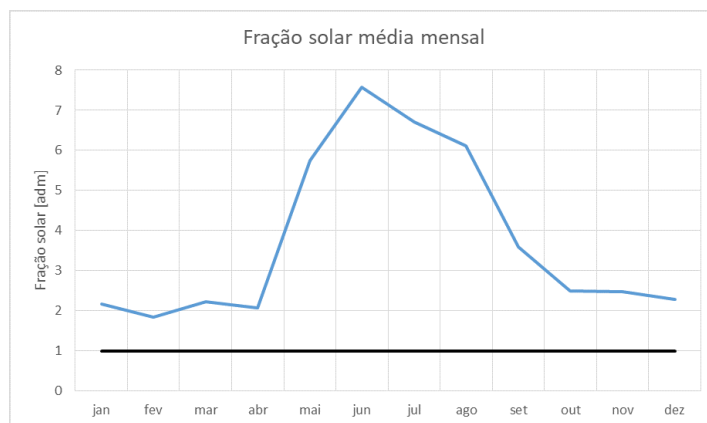
Antes de se definir o consumo mensal do sistema de ar-condicionado é necessário calcular a fração solar do funcionamento desse sistema. Este parâmetro é responsável por incluir o efeito do sistema auxiliar de aquecimento no consumo de energia elétrica. Porém, na metodologia adotada, foram analisados os valores de irradiância e carga térmica necessária de forma mensal. Ao fazer essa análise a fração solar se torna sempre 100%, ou seja, o sistema sempre atende a demanda, logo, sob essa perspectiva, o sistema auxiliar nunca é utilizado. Tomando este fato como um ponto de atenção, a hipótese mais aceitável não é do total atendimento do sistema, mas sim de que os dias cuja energia solar não é suficiente são suprimidos por dias em que a energia solar excede o necessário. Porém, tal excedente não pode ser usado, uma vez que não é previsto um sistema de armazenamento de energia, como baterias por exemplo. Como o objetivo do trabalho é uma análise inicial da implementação dos sistemas de ar-condicionado solares, esta abordagem mensal ainda é interessante. Porém, em estudos mais elaborados, o ideal seria fazer uma análise diária, como forma de se definir melhor o consumo nas simulações.

A Figura 35 indica os valores da fração solar para cada mês, sendo a linha horizontal 1 o atendimento completo do sistema através da utilização da energia solar.

Como nos meses de maio a agosto o sistema de ar-condicionado é menos requisitado, a fração solar apresenta uma grande subida, ou seja, há maior geração de energia do que o necessário. Para então se calcular o consumo o valor da fração solar é definido como 1, assim indicando matematicamente que o sistema atende a demanda em todos os casos.

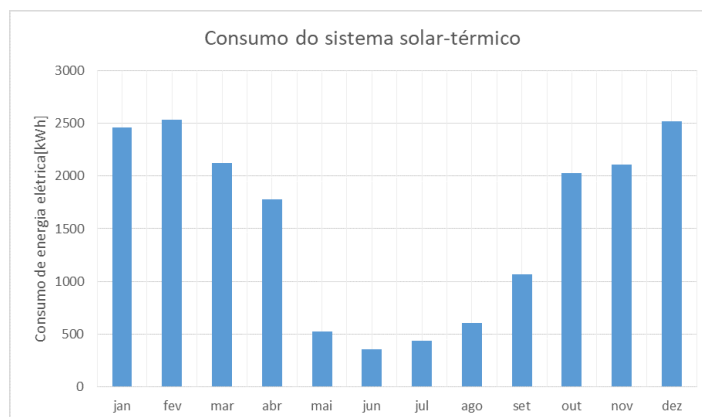
Através das equações apresentadas na metodologia e dos valores obtidos de carga térmica, o sistema de ar-condicionado solar-térmico apresenta o perfil de consumo mensal médio, apresentado na Figura 36.

Figura 35 – Fração solar média



fonte: Produção do próprio autor.

Figura 36 – Consumo mensal do sistema solar-térmico



fonte: Produção do próprio autor.

Através dos valores de consumo presentes na Figura 36, do consumo estimado das instalações atuais, do valor atual do kWh e do valor estimado do investimento nos equipamentos é então possível se definir o payback do sistema. Tal cálculo considera que o perfil de consumo se repete ao longo dos anos. Uma vez que a irradiância solar não varia tanto com o tempo, tal hipótese pode ser considerada. Considerando se os equipamentos apresentados na tabela 3, mais um acréscimo de 30% para infraestrutura, tem-se que o investimento inicial para o sistema solar-térmico seria de R\$ 549 380,00. Para compor os cálculos é preciso se definir também o preço do kWh, segundo a Enel o preço do kWh residencial em julho de 2019, é de aproximadamente R\$ 0,26. Considerando essa taxa como constante, o gasto com energia elétrica anual considerando o modelo seria de R\$ 4 820,06. Aplicando este mesmo valor do kWh ao consumo estimado do sistema atual, tem-se o resultado de um gasto médio anual de R\$ 40 891,16.

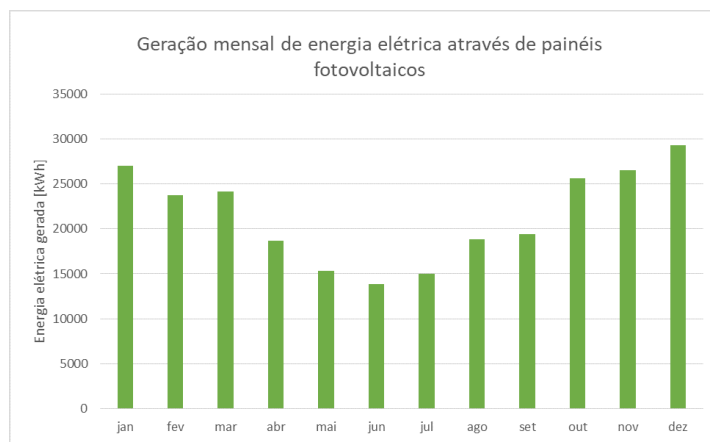
Considerando estes custos haveria uma economia de R\$ 36 071,10 anualmente. Calculando-se então o *payback* simples para o sistema, sendo este a relação entre o custo do investimento e a economia em um dado período de tempo, no caso estudado, o período escolhido é de um ano, o payback do sistema seria de 15 anos e 3 meses aproximadamente.

O período de tempo necessário para que o sistema se pague é relativamente grande. É comum, no meio industrial, dizer que um projeto é viável com períodos de no máximo 5 anos. Mesmo assim, como a ideia do trabalho é o fomento e estudo da implementação destas tecnologias, a utilização de equipamentos mais eficientes colabora para melhoria destes resultados, e como os sistemas tendem a atingir cada vez maiores rendimentos ao passo que a tecnologia evolui constantemente, a implementação deste sistema pode ser tornar mais viável com o decorrer do anos.

4.2 CONSUMO DO SISTEMA DE AR-CONDICIONADO SOLAR-ELÉTRICO

Por gerar diretamente energia elétrica, o sistema solar-elétrico apresenta a vantagem da possibilidade de ser construído no sistema *on-grid* no qual o excedente gerado pelas placas fotovoltaicas podem ser convertidos em créditos de consumo de energia elétrica. Sendo assim, a primeira etapa é a definição da capacidade de geração do sistema fotovoltaico. A geração de energia é retirada diretamente da simulação através do EnergyPlus. A Figura 37 mostra a energia elétrica gerada mensalmente.

Figura 37 – Geração de energia elétrica dos painéis fotovoltaicos



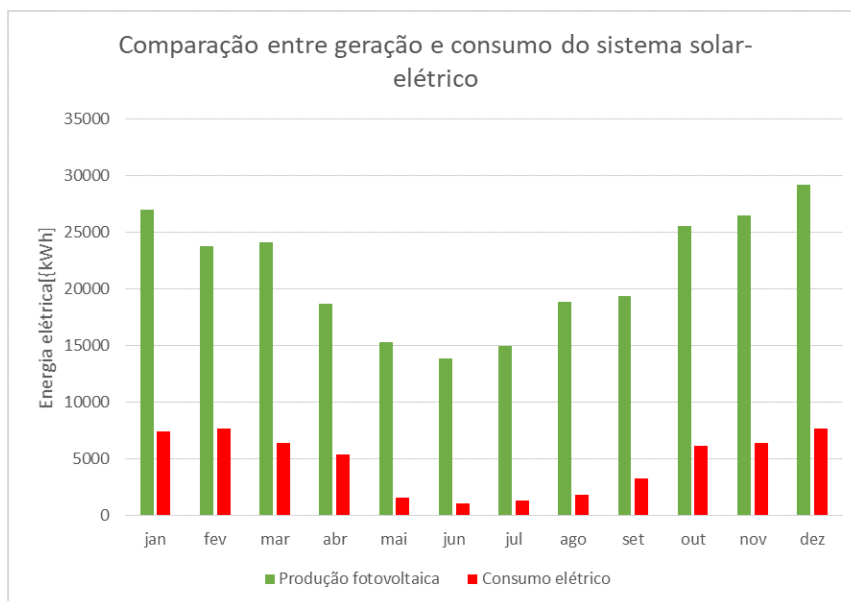
fonte: Produção do próprio autor.

Ao se calcular o consumo do sistema através da equação 6, os resultados obtidos sempre indicam que há excedente na geração em relação ao consumo do sistema em si. Isso acontece principalmente devido à grande área utilizada para a instalação dos painéis fotovoltaicos, o que é positivo para a geração porém eleva consideravelmente o investimento inicial.

A Figura 38 compara a produção fotovoltaica mensal e o consumo estimado, como forma de ilustrar melhor o cenário.

Através da Figura 38 fica evidente que a capacidade de geração dos painéis excede diversas vezes o consumo do sistema necessário para a obtenção do conforto térmico. Então como forma de análise para se definir *payback* são utilizadas duas hipóteses: uma situação *off-grid*, na qual o excedente não é aproveitado pela empresa de distribuição de energia, e um sistema *on-grid* no qual há retorno de créditos de consumo pela concessionária de energia.

Figura 38 – Geração de energia elétrica dos painéis fotovoltaicos



fonte: Produção do próprio autor.

- *Off-grid*

No primeiro caso, utilizando também os componentes da Tabela 3 para o sistema solar-elétrico, calcula-se que o custo de investimento (equipamentos e acréscimo de 30% para infraestrutura) é de aproximadamente R\$ 758 160,00. Como o sistema é totalmente atendido pelos painéis a economia anual é exatamente igual ao consumo anual do sistema anterior, um vez que o consumo do sistema solar-elétrico é zero nessa situação. Aqui também cabe lembrar da análise análoga a da fração solar para o sistema sola-térmico. Como não são previstos sistemas de baterias, existem dias onde a irradiância solar não é suficiente, porém devido a análise mensal de geração e consumo, esses dias acabam por serem suprimidos e assim o consumo do sistema auxiliar não é computado.

Feitas todas essas ressalvas, o *payback* é calculado através do custo de investimento e da economia que é numericamente igual ao consumo estimado do atual sistema de ar-condicionado instalado. Nestas hipóteses obtém-se um *payback* de 18 anos e 7 meses.

- *On-grid*

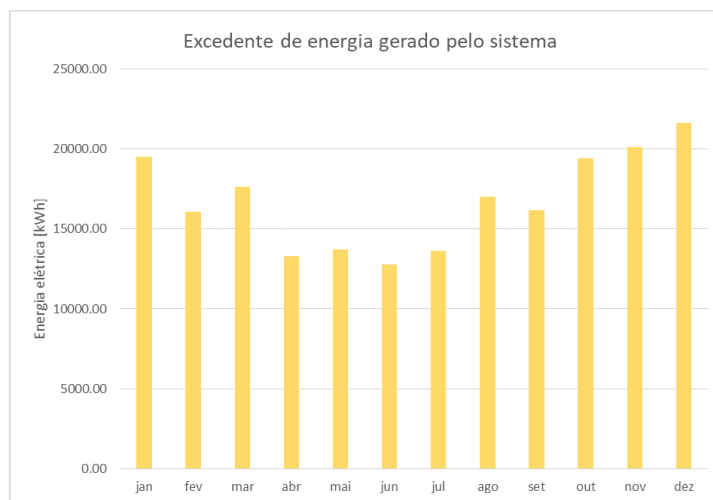
Com sistema *on-grid* o excedente de energia gerado é devolvido a rede. Essa devolução gera então um sistema de créditos de energia. A noite, quando o sistema então não consegue mais gerar eletricidade, a rede fornece energia elétrica descontando aqueles créditos que foram obtidos durante o dia. O balanço líquido entre o que é gerado e o que é consumido é o objeto utilizado no cálculo do *payback* como forma de melhorar o resultado obtido no

sistema *off-grid*. Esta prática é regulamentada segundo a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012.

Considerando então a diferença entre o consumo do sistema de ar-condicionado solar-elétrico e a geração de energia dos painéis fotovoltaicos, obtém-se o excedente de energia mês a mês. A Figura 39 demonstra quanto de energia excedente pode ser convertida em créditos.

Através destes valores e considerando ainda o valor do kWh como R\$ 0,26, a economia obtida seria de R\$ 52 233,49 por ano. Este valor é ainda maior que o consumo estimado do sistema atual, porém como esse excedente é devolvido para a distribuidora de energia, esta economia se estende para o consumo de outros sistemas que compõe os gastos com energia de todo o campus no qual o prédio em estudo e o sistema solar-elétrico estão instalados.

Figura 39 – Excedente de energia elétrica dos painéis fotovoltaicos



fonte: Produção do próprio autor.

Deste modo, o *payback* calculado passa a ser de aproximadamente 14 anos e meio.

Em todas as hipóteses levantadas até agora toda área da cobertura do prédio em estudo é ocupada por painéis fotovoltaicos ou por coletores solares. Foi visto, segundo o cálculo de viabilidade, que o sistema de ar-condicionado solar-elétrico *on-grid* se saiu melhor, mesmo que ainda não seja o ideal para caracterizar um sistema economicamente competitivo. Munidos destes resultados é então levantada uma última hipótese: o maior custo do sistema solar-elétrico se encontra nas placas fotovoltaicas, logo reduzindo-se a quantidade de placas ainda seria possível atender o sistema de ar condicionado, um vez que a área atual gera grande excedente energético. Então, são executadas novas simulações porém com uma quantidade reduzida de placas fotovoltaicas, suficientes para atender o mês de maior demanda (fevereiro).

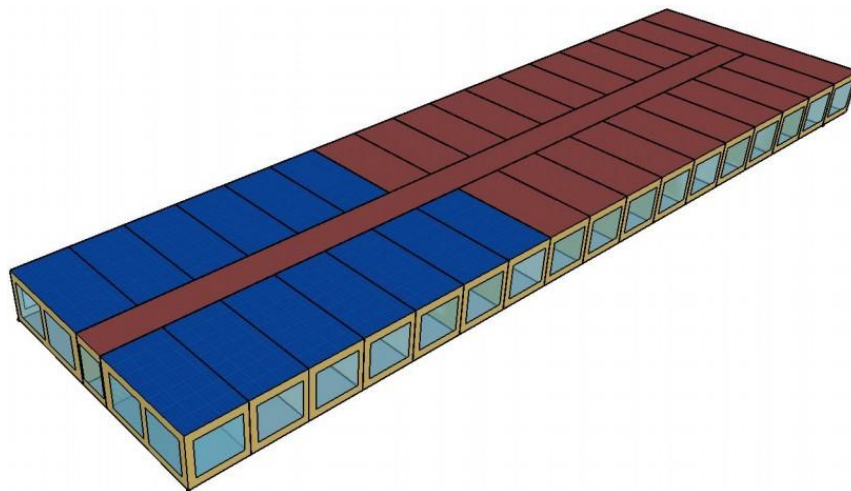
4.2.1 Simulações do sistema de ar-condicionado solar-elétrico *on-grid* com redução no número de placas fotovoltaicas

Como pode ser verificado na Figura 38 o consumo no mês de fevereiro é em torno de 720 kWh. Fazendo então o dimensionamento necessário para se atender essa demanda é determinada a necessidade de 321,52 m^2 de placas fotovoltaicas. Aplicou-se então esta área de placas sobre o modelo do prédio e novamente foram feitas simulações mensais de forma a se obter a produção de energia elétrica nestes meses. A Figura 40 representa o andar superior do prédio em estudo e como as placas fotovoltaicas estão dispostas nesse novo modelo.

Nestas novas condições são necessários 163 painéis solares do mesmo modelo especificado na seção 3.4.3. Assim os custos associados para este novo sistema são expressos na Tabela 5.

A Figura 41 compara a produção de energia elétrica através das placas com o consumo do sistema de ar-condicionado.

Figura 40 – Disposição das placas fotovoltaicas - quantidade reduzida



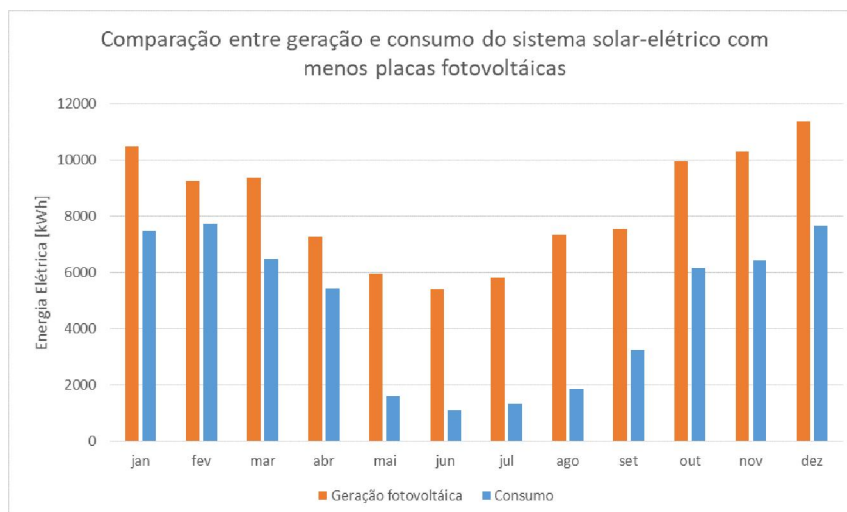
fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 5 – Equipamentos e custos para o sistema solar-elétrico otimizado

Equipamento	Modelo	Quantidade	Preço estimado total
Chiller de compressão de vapor	LC-30WS	1	R\$ 31 200,00
Inversor de frequência	FRONIUS SYMO 15.0-3 M	4	R\$ 84 000,00
Painel fotovoltaico	CS6U-340	163	R\$ 98 000,00

Fonte: Produção do próprio autor.

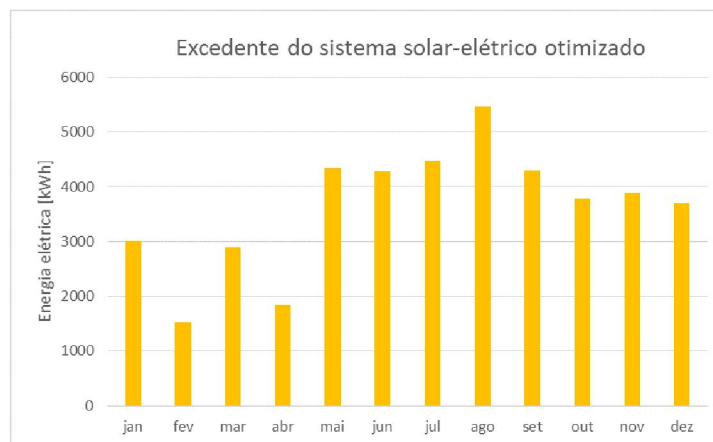
Figura 41 – Geração de energia elétrica com redução dos painéis fotovoltaicos



fonte: Produção do próprio autor.

Conhecendo-se o valor da energia produzida, do consumo e do investimento inicial, pode-se então calcular o *payback* do novo sistema. O custo total do investimento considerando a redução no número de painéis fotovoltaicos e conseqüentemente também no número de inversores e também um adicional de 30% para cobrir os custos de infraestrutura, resulta no montante de R\$ 277 160,00. Como o novo sistema é dimensionado para o mês de maior consumo, ainda há excedente, o qual é mostrado na Figura 42.

Figura 42 – Excedente de energia elétrica dos painéis fotovoltaicos



fonte: Produção do próprio autor.

Segundo a mesma hipótese de preço para o kWh utilizada nas seções anteriores, encontra-se o valor em créditos a serem vendidos para a concessionária de R\$ 11 313,10 por ano. Considerando então que a redução do consumo dos sistemas de ar condicionado possui o mesmo valor numérico do consumo atual, uma vez que as placas fotovoltaicas

atendem completamente o sistema, é possível então se obter um *payback* de 5 anos e 4 meses.

O resultado obtido através da melhoria no dimensionamento do sistema de ar-condicionado solar- elétrico é o de melhor resultado, apresentando um *payback* economicamente viável. Logo, fica claro que o dimensionamento correto surte melhores efeitos do que a venda do excedente de geração de energia elétrica, o qual foi verificado no sistema *on-grid*. Este sistema supera também o solar-térmico, principalmente pelo fato do seu consumo de energia elétrica para que os sistemas de bombeamento para circulação e arrefecimento funcionem, não permitindo que este sistema chegue a reduzir a zero o consumo de energia elétrica, efeito presente em todos os cenários estudados do solar-elétrico.

Mesmo com estes resultados satisfatórios, cabe salientar uma última vez a necessidade de estudos com simulações com passos menores, de maneira a aprimorar o dimensionamento da carga térmica, da produção fotovoltaica e do consumo de energia elétrica de cada sistema, de modo que os sistemas de *backup* sejam melhor considerados e tenham seus efeitos melhor analisados no consumo.

A Tabela 6 faz um comparativo e entre os modelos apresentados como forma de melhor apresentar e comparar os resultados.

Tabela 6 – Comparativo dos sistemas estudados

Modelo	Investimento Inicial	<i>Payback</i>
Sistema Solar-Térmico	R\$ 549 380,00	15 anos e 3 meses
Sistema Solar-Elétrico (<i>off-grid</i>)	R\$ 758 160,00	18 anos e 7 meses
Sistema Solar-Elétrico (<i>on-grid</i>)	R\$ 758 160,00	14 anos e 6 meses
Sistema Solar-Elétrico (<i>on-grid</i> melhorado)	R\$ 277 160,00	5 anos e 4 meses

fonte: Produzido pelo autor

5 CONCLUSÕES

A utilização da energia solar para o acionamento de sistemas de ar-condicionado possui uma paridade interessante visto que a demanda por ar-condicionado é maior durante os períodos de maior irradiação solar. Sendo assim, coube então verificar qual a melhor forma de se utilizar desta energia. Na hipótese simulada onde foram utilizados coletores solares para ativar um *chiller* de absorção, o sistema proposto conseguiu atender a demanda permitindo economizar boa parte da energia elétrica gasta com ar-condicionado. O consumo de energia elétrica deste sistema é apenas a energia utilizada pelas bombas de circulação que fazem com que a água seja aquecida nos coletores e a energia demandada pela torre de resfriamento, necessária para que o ciclo de absorção funcionar corretamente. Para este sistema, considerando o *payback* calculado foi de 15 anos e 3 meses.

Na hipótese em que foi simulado um sistema contendo um *chiller* de compressão de vapor acionado eletricamente através de painéis fotovoltaicos, em uma primeira análise, foram obtidos resultados que excederam em mais de duas vezes a demanda do sistema. Isso ocorreu pois, devido a fins comparativos, a mesma área de coletores solares foi utilizada para a instalação de painéis fotovoltaicos. Considerando duas hipóteses, um sistema *off-grid* e um *on-grid*, no primeiro foi obtido um *payback* de 18 anos e 7 meses. Esse resultado se dá principalmente devido ao alto custo de investimento inerente a instalação dos painéis fotovoltaicos e o fato do sistema *off-grid* não permitir resgatar o excedente produzido como créditos que geram desconto no custo associado ao consumo de energia elétrica. Ao considerar esta mudança, no sistema *on-grid*, o *payback* calculado vai para 14 anos e 6 meses. De qualquer forma o tempo estimado para que o sistema se pague é muito longo, geralmente são tidos como bons valores de retorno, investimentos que se pagam no período de no máximo 5 anos.

O sistema elétrico possui uma característica interessante de ser analisada em futuros trabalhos. Primeiramente, como hipótese neste trabalho, é assumido que as salas dos blocos sejam utilizadas apenas durante horário comercial (das 8h as 18h, de segunda a sexta-feira). Assim sendo, não há utilização dos sistemas de ar-condicionado durante a noite, o que nem sempre é verdade. Sendo assim quando há excedente de produção de energia seria interessante que houvessem sistemas de bateria capazes de suprir ou mesmo apenas ajudar o sistema a se manter ativo nos momentos em que a incidência solar não é o suficiente ou no caso de necessidade de se utilizar os sistemas de ar-condicionado a noite. Tal sistema também poderia servir como um primeiro sistema reserva, antes de então se utilizar a energia elétrica da rede de distribuição, reduzindo ainda mais o consumo total.

Uma vez que a quantidade de painéis fotovoltaicos influencia significativamente no valor do investimento inicial, foi então levantado outro cenário, no qual a área dos painéis fotovoltaicos é dimensionada segundo o mês de maior demanda de carga térmica de

resfriamento. Com este sistema otimizado a demanda ainda é cumprida para o ano todo, porém o excedente de energia elétrica produzido diminui. Neste cenário foi analisado apenas o sistema *on-grid* que se beneficia do excedente reduzindo o *payback* através do retorno em créditos fornecidos pela concessionária de energia elétrica. Aqui neste cenário, entretanto, a diminuição de mais de 60% do custo inicial compensou a diminuição do excedente que poderia ser vendido a concessionária. Neste cenário o *payback* calculado foi de 5 anos e 4 meses, um resultado que pode servir para viabilizar o projeto.

Finalmente, cabe ressaltar que a análise feita considera os valores de carga térmica e consequentemente de consumo de energia elétrica mensalmente. Isso não exclui a possibilidade do sistema não atender a demanda em um dia específico cujas condições não são favoráveis, por isso é importante se prever sistemas de *backup*, no caso os sugeridos foram um aquecedor auxiliar no sistema solar-térmico e a utilização da própria rede de distribuição de energia elétrica para o sistema solar-elétrico. Fica como sugestão para futuros estudos simulações que busquem separar estes dias e assim incluir seu efeito no consumo total, o que afetará o consumo de energia elétrica de cada sistema.

REFERÊNCIAS

- ANEEL. **Resolução Normativa Nº 482**. 2012. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 12 de agosto. 2019.
- ARA, P. J. S. **Desempenho de sistemas de condicionamento de ar com utilização de energia solar em edifícios de escritórios**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) — Universidade de São Paulo - Escola politécnica, São Paulo, São Paulo - Brasil, 2010.
- BARRETO, R. de O. Ar-condicionado solar - ciclo de adsorção. **Congresso Brasileiro de Energia Solar**, 7., 2018, Gramado. Anais [...]. Cidade: Gramado, 2018.
- BERMEJO, P. Solar absorption cooling plant in seville. **Solar Energy**, Seville, v. 84, p. 1503 – 1512, 2010.
- BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R. **Fundamentos da termodinâmica**. 7 ed., São Paulo-SP - Brasil: Blucher, 2013.
- CORAZZA, E. et al. Comportamento de diferentes sistemas de manejo como fonte ou depósito de carbono em relação à vegetação de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 2, p. 425–432, 1999.
- CUNHA, E. A. A. Aspectos históricos da energia eólica no Brasil e no mundo. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, Cascavel, v. 8, n. 4, p. 689 – 697, 2019.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA-EPE. **Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética**. 2018. Disponível em: <<http://epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/uso-de-ar-condicionado-no-setor-residencial/-brasileiro-perspectivas-e-contribuicoes-para-o-avanco-em-eficiencia-energetica>>. Acesso em: 27 ago. 2019.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA-EPE. **Resenha Mensal: em janeiro de 2019 o consumo nacional de eletri- cidade cresceu 3,8% ao mesmo mês em 2018**. 2019. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/resenha-mensal-em-janeiro-de-2019-o-consumo-nacional/-de-eletricidade-cresceu-3-8-ao-mesmo-mes-em-2018->>. Acesso em: 27 ago. 2019.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA-EPE. **Matriz Energética e Elétrica**. 2019. Disponível em: <<http://epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 27 jun. 2019.
- FEARNSIDE, P. M. Gases de efeito estufa em hidrelétricas da Amazônia. **Ciência Hoje**, Manaus, v. 36, n. 41, p. 41 – 44, 2004.
- FEG-SUSTENTÁVEL. **FEG- Sustentável**. 2019. Disponível em: <<https://feg-sustentavel.webnode.com/>>. Acesso em: 27 nov. 2019.
- JACKSON, M. O. T. The viability of solar photovoltaics. **Energy Policy**, Guildford, v. 28, n.

-, p. 983 – 988, 2000.

KALOGIROU, S. A. Solar thermal collectors and applications. **Progress in Energy and Combustion Science**, Nicosia, v. 30, n. -, p. 231 – 295, 2004.

KIM, C. I. F. D. Solar refrigeration options – a state-of-the-art review. **International journal of refrigeration**, Vienna, v. 31, n. 3, p. 3 – 15, 2008.

MACHADO, C. T. Energia solar fotovoltaica: uma breve revisão. **Rev. Virtual de Química**, Revista Virtual, v. 7, n. 1, p. 126 – 143, 2014.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Anuário estatístico de energia elétrica 2011**. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - Brasil: -, 2011.

ROSA, A. R. O. da. Panorama da energia solar fotovoltaica no brasil. **Revista Brasileira de Energia Solar**, Curitiba, v. 7, n. 2, p. 140 – 147, 2016.

SANTOS, A. P. dos. **Estudo e avaliação de performane em sistemas de ar-condicionado: um comparativo entre sistemas split system e sistema vrv (vazão de refrigerante variáveis)**. xxx f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) — Universidade Federal do Pará, Belém, Pará - Brasil, 2017.

SANTOS, E. J. dos. **Caracterização de ruído de sistema de ar-condicionado unitário tipo mini-split em residências unifamiliares**. xxx f. Dissertação (Mestrado em Habitação: Planejamento e Tecnologia) — Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, São Paulo, SP - Brasil, 2017.

SANTOS, P. H. D. dos. **Análise de sistemas térmicos**. 2019. Disponível em: <<http://docplayer.com.br/36402723-Analise-de-sistemas-termicos.html>>. Acesso em: 27 ago. 2019.

SOLAIR-PROJECT. **Solar air-concitioning**. União Europeia: -, 2008.