



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ROBERTO NOBUYOSHI YAMADA JUNIOR

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO ALIMENTADO POR
FONTE SOLAR FOTOVOLTAICA PARA EDIFÍCIOS COMERCIAIS EM CLIMAS
TROPICAIS**

Recife
2023

ROBERTO NOBUYOSHI YAMADA JUNIOR

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO ALIMENTADO POR
FONTE SOLAR FOTOVOLTAICA PARA EDIFÍCIOS COMERCIAIS EM CLIMAS
TROPICAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Energia

Orientador: Prof. Dr. Alvaro Antonio Ochoa Villa

Coorientador: Prof. Dr. Gustavo de Novaes Pires Leite

Recife

2023

Catálogo na fonte
Bibliotecária Rosineide Mesquita Gonçalves da Luz, CRB-4 / 1361

Y19m	Yamada Junior, Roberto Nobuyoshi. Modelagem e simulação de sistema de climatização alimentado por fonte solar fotovoltaica para edifícios comerciais em climas tropicais / Roberto Nobuyoshi Yamada Junior. – 2023. 140p.: il., figs., tabs. e siglas. Orientador: Prof. Dr. Alvaro Antonio Ochoa Villa. Coorientador: Prof. Dr. Gustavo de Novaes Pires Leite. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Recife, 2023. Inclui referências. 1. Engenharia Mecânica. 2. Ar condicionado fotovoltaico. 3. Simulação transiente. 4. Economia de energia. 5. Edificação tipo escritório. I. Villa, Alvaro Antonio Ochoa (Orientador). II. Leite, Gustavo de Novaes Pires (Coorientador). III. Título. UFPE 621 CDD (22. ed.) BCTG/2023-166
------	--

ROBERTO NOBUYOSHI YAMADA JUNIOR

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO ALIMENTADO POR
FONTE SOLAR FOTOVOLTAICA PARA EDIFÍCIOS COMERCIAIS EM CLIMAS
TROPICAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Energia

Aprovado em: 27/06/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alvaro Antonio Ochoa Villa (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Prof. Dr. Gustavo de Novaes Pires Leite (Coorientador)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Prof. Dr. José Carlos Charamba Dutra. (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Prof. Dr. Allysson Macário de Araújo Caldas (Examinador Externo)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba - IFPB

Dedico este trabalho ao Senhor e à minha família

AGRADECIMENTOS

Ao nosso Senhor Jesus, à Ele toda honra, glória e louvor.

À toda a minha família que me apoiaram durante este percurso.

Ao meu orientador: Prof. Dr. Alvaro Antonio Ochoa Villa e coorientador: Prof. Dr. Gustavo de Novaes Pires Leite pela dedicação, assistência e boa vontade no compartilhamento de novos conhecimentos.

Ao meu setor de engenharia do INSS pelo compartilhamento das informações necessárias para implementação do projeto.

À todos que contribuíram para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo a modelagem e simulação de sistemas de climatização de ar alimentados por energia solar fotovoltaica para edifícios comerciais em climas tropicais. O desenvolvimento do trabalho consiste na construção da modelagem do edifício para o cenário de referência, o qual a climatização é suprida por equipamentos do tipo split com eficiência reduzida devido ao longo tempo de uso. A partir da modelagem da edificação e comparação dos resultados da simulação do consumo energético com o levantamento das contas de energia realizado durante um ano, é proposto 4 cenários onde é simulado os benefícios energéticos e econômicos da geração fotovoltaica integrada ao sistema de climatização. Os cenários foram construídos mediante a variação do sistema de refrigeração nos quatro cenários, sendo o primeiro a manutenção do sistema split instalado, o cenário 2 é proposto a substituição dos sistema por splits novos de eficiência maior, no cenário3 a substituição do sistema split por sistema central do tipo Variable Refrigerant Flow e no cenário 4 a implementação do sistema de refrigeração do tipo chiller de água gelada equipado com tanque termoacumulador. Para todos os cenários, foi proposto a instalação de um sistema de geração de energia fotovoltaica. A performance energética foi analisada mediante a proposta de índices de autossuficiência energética (Solar Fraction) e do autoconsumo da energia fotovoltaica gerada (Solar Consumption Ratio) pelos climatizadores de ar. A análise econômica foi realizada mediante a definição do fluxo de caixa para o cálculo dos parâmetros de Valor Presente Líquido, Taxa Interna de Retorno e período de payback. O melhor desempenho energético foi observado no cenário 4, apresentando índices de SF e SCR anuais de 0,79 enquanto que os cenários 2 e 3 se demonstraram mais atrativos economicamente, com VPL de 22,19% e 20,61% respectivamente e payback estimado entre 6 e 7 anos.

Palavras-chave: Ar condicionado fotovoltaico; simulação transiente; economia de energia; edificação tipo escritório.

ABSTRACT

This paperwork aims to model and simulate air conditioning systems powered by photovoltaic solar energy for commercial buildings in tropical climates. The development of the work consists in a model of the building for the reference scenario, which the air conditioning is supplied by a splitsystem with reduced efficiency due to ageing. From the modeling of the building and evaluation of the results of energy consumption with the survey carried out previously during a year, 4 scenarios are proposed to simulate the energy and economic benefits of air conditioning system integrated to the photovoltaic generation. The scenarios were built by varying the cooling system in the four scenarios the first being the maintenance of the installed split system, scenario 2 is proposed to replace the system with new splits of greater COP, in scenario 3 the replacement of the split system by Variable Refrigerant Flow and in scenario 4 the implementation of the cooling system of the chiller with a cold thermal energy store. For all scenarios, the installation of a photovoltaic energy generation system was proposed. Energy performance was analyzed by proposing energy self-sufficiency rates (Solar Fraction) and self-consumption of photovoltaic energy generated (Solar Consumption Ratio) by air conditioners. The economic analysis was carried out by defining the cash flow to calculate the parameters of Net Present Value, Internal Rate of Return and payback period. The best energy performance was observed in scenario 4, with annual SF and SCR indicator of 0.79, while scenarios 2 and 3 proved to be more economically attractive, with NPV of 22.19% and 20.61% respectively and estimated payback between 6 and 7 years.

Keywords: Solar photovoltaic air-conditioner; dynamic simulation; energy savings; office buildings.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Matriz elétrica mundial 2020	9
Figura 2:	Matriz elétrica brasileira 2021	20
Figura 3:	Fontes de energia elétrica do estado de Pernambuco	22
Figura 4:	Principais tecnologias para resfriamento solar	25
Figura 5:	Funcionamento do aparato experimental	27
Figura 6:	Componentes utilizados para aparato experimental	29
Figura 7:	Disponibilidade de energia fotovoltaica e demanda para climatização em diferentes ocupações no modo refrigeração e aquecimento para a cidade de Shanghai	33
Figura 8:	Fração solar instantânea ao longo do dia (a) e fração solar mensal média ao longo do ano (b)	36
Figura 9:	Custos de implantação de sistemas de climatização por metro quadrado	47
Figura 10:	Curva de distribuição ao longo da demanda ao longo do dia	55
Figura 11:	Sistema VCR simples	60
Figura 12:	Condensadora VRF Daikin e COP em plena carga e cargas parciais	63
Figura 13:	Chiller Daikin resfriado a água	65
Figura 14:	Perfil da temperatura durante armazenamento de energia sensível e latente	67
Figura 15:	Processo de fabricação de células fotovoltaicas de silício	69
Figura 16:	Painéis fotovoltaicos residenciais mais eficientes no mercado americano no ano de 2022	70
Figura 17:	Fluxograma da utilização dos softwares	71
Figura 18:	Maquete eletrônica elaborada no sketchup com plugin Trnsys3d	72
Figura 19:	Interface gráfica Simulation Studio	73
Figura 20:	Fluxograma da implementação da metodologia	75
Figura 21:	Modelagem 3D – SketchUp edifício em estudo	77
Figura 22:	Projeto básico inicial no 3D Building Project (multizone)	78
Figura 23:	Janela no TRNBuild para definição do elemento construtivo parede externa	81
Figura 24:	Ocupação escalonada dos servidores ao longo dos dias úteis	83
Figura 25:	Desenvolvimento do sistema de climatização tipo split	88
Figura 26:	Janela do aplicativo PV_ref_params	90

Figura 27: Modelagem do sistema de climatização do tipo VRF	91
Figura 28: Desenho esquemático da simulação	94
Figura 29: Demanda energética mensal anualizada e temperatura média mensal	103
Figura 30: Consumo do sistema HVAC e geração fotovoltaica anual e indicadores de performance SF e SCR	130
Figura 31: Consumo energético dos sistemas de climatização da rede pública	132
Figura 32: Fluxo de caixa dos cenários propostos ao longo de 15 anos	133

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Soluções tecnológicas avaliadas com melhores desempenhos.....	26
Tabela 2	Parâmetros energéticos e econômicos.....	44
Tabela 3	Componentes tarifários da tarifa do Grupo A4 - Horossazonal Verde.....	57
Tabela 4	Tributos e alíquotas aplicadas para o estado de Pernambuco no mês de Janeiro de 2023.....	59
Tabela 5	Propriedades dos elementos construtivos que compõem a parede externa.....	80
Tabela 6	Propriedades térmicas dos principais elementos construtivos.....	82
Tabela 7	Ocupação máxima de pessoas por andar.....	82
Tabela 8	Valores referenciais para ganhos térmicos por pessoa, segundo ISO 7730.....	84
Tabela 9	Configuração do sistema split system.....	87
Tabela 10	Dimensionamento fotovoltaico.....	89
Tabela 11	Especificações técnicas do painel EMSL-590M HC Intelbras.....	89
Tabela 12	Coeficientes utilizados derivados.....	93
Tabela 13	Parâmetros de funcionamento do sistema chiller com termoacumulador...	95
Tabela 14	Consumo elétrico segmentado nos horários de pico e fora de pico e COP mensal em kWh.....	103
Tabela 15	Consumo ativo nos horários de ponta, fora de ponta e total anual em kWh.....	104
Tabela 16	Geração fotovoltaica mensal estimada em kWh.....	105
Tabela 17	Energia consumida pelos splits diretamente das placas fotovoltaicas em kWh.....	106
Tabela 18	Valores dos parâmetros de SF para cenário 1.....	107
Tabela 19	Valores dos parâmetros de SCR para o cenário 1.....	108
Tabela 20	Energia fotovoltaica injetada na rede no cenário 1 em kWh.....	109
Tabela 21	Perfil do consumo energético anual da edificação da rede pública para cenário 1 em kWh.....	110
Tabela 22	Geração fotovoltaica mensal estimada em kWh.....	110
Tabela 23	Energia consumida, COP e consumo instantâneo da climatização da energia fotovoltaica para cenário 2 em kWh.....	111
Tabela 24	Valores dos parâmetros de SF para cenário 2 em kWh.....	112
Tabela 25	Valores dos parâmetros de SCR mensal para cenário 2.....	113

Tabela 26	Energia fotovoltaica injetada na rede para cenário 2 em kWh.....	114
Tabela 27	Perfil do consumo energético anual da edificação da rede pública para Cenário 2 em kWh.....	115
Tabela 28	Geração fotovoltaica mensal estimada em kWh.....	115
Tabela 29	Energia consumida, COP e consumo instantâneo da climatização da energia fotovoltaica para cenário 3 em kWh.....	116
Tabela 30	Valores dos parâmetros de SF para cenário 3.....	117
Tabela 31	Valores do parâmetro SCR para cenário 3.....	118
Tabela 32	Energia fotovoltaica injetada na rede para cenário 3 em kWh.....	119
Tabela 33	Perfil do consumo energético anual da edificação da rede pública no cenário 3 em kWh.....	120
Tabela 34	Geração fotovoltaica mensal estimada em kWh.....	120
Tabela 35	Energia consumida, COP e consumo instantâneo da climatização da energia fotovoltaica para cenário 4 em kWh.....	121
Tabela 36	Valores dos parâmetros de SF para cenário 4.....	122
Tabela 37	Valores dos parâmetros de SCR mensal total para cenário 4.....	123
Tabela 38	Energia fotovoltaica injetada na rede para cenário 4 em kWh.....	124
Tabela 39	Perfil do consumo energético anual da edificação da rede pública para cenário 4 em kWh.....	124
Tabela 40	Valores e preço das componentes tarifárias vigente da Neoenergia Pernambuco por MWh.....	125
Tabela 41	Custo de aquisição dos sistemas de climatização e energia fotovoltaica	126
Tabela 42	Custos de operação e manutenção dos sistemas de climatização e geração fotovoltaica.....	127
Tabela 43	Resultados econômicos para cenário 1.....	127
Tabela 44	Resultado análise econômica do cenário 2.....	128
Tabela 45	Resultado análise econômica do cenário 3.....	128
Tabela 46	Resultado análise econômica do cenário 4.....	129
Tabela 47	Consumo dos cenários propostos em comparação ao cenário de referência em kWh.....	130
Tabela 48	Valores dos indicadores econômicos para o período de 20 anos.....	133

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	Três dimensões
a(i)	Coeficiente para o cálculo de CAPFT
AC	Ar condicionado
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
b(i)	Coeficiente para o cálculo de EIRFT
BEN	Balanço energético nacional
c(i)	Coeficiente para o cálculo de EIRPLR
CAD	Computer Aid Design
CAG	Central de água gelada
CAPFT	Cooling capacity correction factor
CE	Custo de energia
CEEE	Companhia estadual de distribuição de energia elétrica
CEI	Comprehensive evaluation indicator
CELPE	Companhia de eletricidade de Pernambuco
CI	Custo inicial
CO	Custo de operação
COFINS	Contribuição para o financiamento da seguridade social
COP	Coeficiente de Performance
CP	Central plant
cp	Calor específico
E	Energia
EES	Engineering equation solver
EIRFPLR	energy input ratio function of low part-load
EIRFT	Energy Input Ratio Modifier Function of Temperature
EUA	Estados Unidos da America
FC	Fluxo de caixa
FV	Fotovoltaica
HVAC	Heating, Ventilating and Air Conditioning
ICMS	Imposto sobre circulação de mercadorias e serviços
IEA	International Energy Agency
IN	Instrução Normativa
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
INSS	Instituto Nacional do Seguro Social

LiBr_DE	Chiller de absorção de brometo de lítio duplo efeito
m	massa
M	Taxa de degradação da eficiência
opb	Operational probability
PBP	Paypack period
PCM	Phase change material
PERS	Programa de Energia Renovável Social
P	Power
PIS	Programa de integração social
PPA	Power purchase agreement
PTC	Parabolic thermal collector
PV_aSi	Painel fotovoltaico de silício amorfo
PV_mSi	Painel fotovoltaico de silício monocristalino
PVAC	Photovoltaic air conditioner
PV	Energia fotovoltaica
Q	Calor
REH	Resolução homologatória
Rf	Run time fraction
ROI	Return on investment
rpl	Ratio of maximum PV power generation to load power
RTF	Run time fraction
RZEP	Real zero enerfy probability
SC	Self consumption
SCEE	Sistema de Compensação de Energia Elétrica
SCR	Self consumption ratio
SF	Solar fraction
SS	Self-sufficiency
SSC	Solar self consumption
SZEP	Storage zero energy probability
tbl	Time to fully charge the battery at maximum PV power generation, h
tbp	Time to fully charge the battery at maximum PV power generation, h
Tcon	Temperatura de condensação
TCU	Tribunal de Contas da União
TE	Tarifa de energia
TES	Thermal energy storage

TIR	Taxa interna de retorno
TMA	Taxa minima de atratividade
TR	Tonelada de refrigeração
TUSD	Tarifa do uso do sistema de distribuição
T	Temperatura
VC_a	Chiller compressão a vapor refrigerado a ar
VC_w	Chiller compressão a vapor refrigerado a agua
VPL	Valor presente liquido
VRF	Variable Refrigerant Flow
VRV	Vazão de Refrigerante Variável
WD	Water distribution
ZEP	Zero energy probability

LETRAS GREGAS

ΔH	Diferença de entalpia
ΔT	Diferença de Temperatura

SUBSCRITO

hp,cool	Heat pump's full-load cooling capacity
cool,ref	full-load cooling capacity reference
AC.FORA.PONTA	Consumo de energia do ar condicionado no horário fora de ponta
AC.PONTA	Consumo de energia do ar condicionado no horário de ponta
AC.TOTAL	Consumo de energia total do ar condicionado
pv,ac.FORA.PONTA	Consumo de energia fotovoltaica instanânea pelo ar condicionado no horário fora de ponta
pv,ac.PONTA	Consumo de energia fotovoltaica instanânea pelo ar condicionado no horário de ponta
pv,ac.TOTAL	Consumo total de energia fotovoltaica instanânea pelo ar condicionado
pv.ac	Consumo de energia fotovoltaica instanânea pelo ar condicionado
Fora.Ponta.Injetada	Energia injetada no horário fora de ponta

PVPonta.Injetada	Energia injetada no horário de ponta	
coil,total,cool	total cooling capacity of heat pump	
coil(i),cool	rated total (sensible + latent) cooling capacity in zone i,	
cool,total,ref	total reference cooling capacity of heat pump	
I	latente	
dias.úteis	Dias úteis p	
Fora.Ponta	No horário fora de ponta	
mensal	Todos os dias do mês	
mensal_util	Em dias úteis	
Ponta	No horário de ponta	
Total	Todos os dias	
wb,avg	média de bulbo úmidoAAA	Texto texto texto

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	MOTIVAÇÃO	21
1.2	OBJETIVO GERAL	23
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
1.4	METODOLOGIA EMPREGADA	23
1.5	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	24
2	Estado da Arte	25
2.1	CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA	47
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	49
3.1	Legislação	49
3.1.1	Aquisição de bens e serviços na Administração Pública	49
3.1.2	Geração Fotovoltaica	51
3.2	Conta de energia elétrica	53
3.2.1	Horário ponta e fora de ponta	54
3.2.2	Período úmido e seco	55
3.2.3	Horossazonal azul e verde	56
3.2.4	Valores e preços da tarifa de energia elétrica	56
3.3	Ciclo Frigorífico por Compressão de Vapor	59
3.3.1	Split System	61
3.3.2	Variable Refrigerant Flow – VRF	62
3.3.3	Chiller – Resfriadores de água	63
3.4	Termoacumulação	65
3.5	Placas Fotovoltaicas	68
3.6	Plataformas computacionais	70
3.6.1	SketchUp	71
3.6.2	TRNSYS	72
4	METODOLOGIA	74
4.1	Levantamento da demanda energética	75
4.2	Modelagem do edifício	76
4.2.1	Construção do modelo 3D	76
4.2.2	Simplificações do modelo	78
4.2.2.1	Zonas climatizadas	79

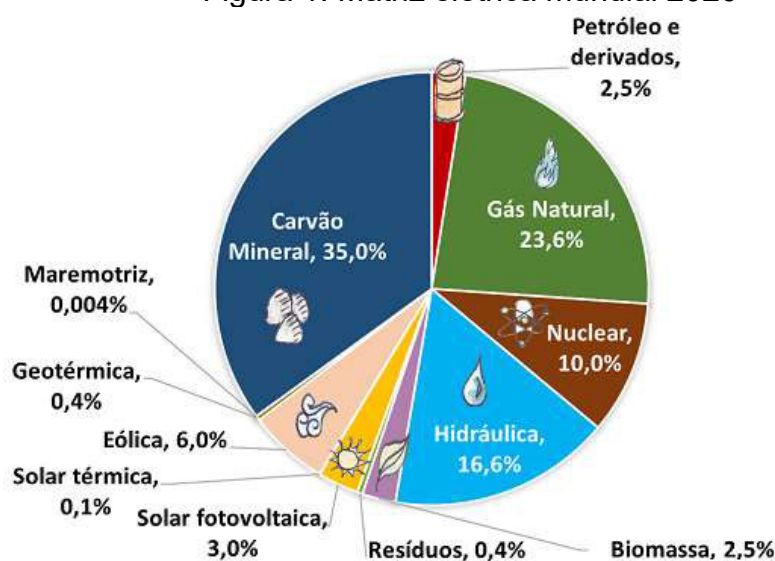
4.2.2.2	Dias, horário de funcionamento e ocupação	79
4.2.3	Propriedades Térmicas	79
4.2.4	Perfil de ocupação	82
4.2.5	Ganhos Térmicos	84
4.2.6	Arquivo Climático	85
4.3	Sistema de Climatização	85
4.3.1	Cenário de referência	85
4.3.2	Sistema Fotovoltaico	89
4.3.3	Variable Refrigerant Flow – VRF	90
4.3.4	Chiller com termoacumulação	93
4.3.4.1	Chiller	94
4.3.4.2	Tanque termoacumulador de frio	94
4.3.4.3	Distribuição de ar refrigerado – Fan Coils	95
4.3.4.4	Controles	95
4.4	Análise de performance energética	96
4.4.1	Fração Solar – SF	96
4.4.2	Fração de consumo solar – SCR	97
4.5	Análise econômica	97
4.5.1	Fluxo de caixa	97
4.5.2	Valor Presente Líquido	99
4.5.3	Taxa Interna de Retorno	99
4.5.4	Período de Payback	100
5	ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	101
5.1	Análise Energética	101
5.1.1	Cenário de Referência	102
5.1.1.1	Contas de energia	102
5.1.1.2	Consumo estimado do sistema de climatização instalado tipo Split	103
5.1.2	Cenário 1 – Splits antigos	105
5.1.2.1	Consumo do sistema de climatização – Splits	106
	Cenário 2 – Renovação dos equipamentos splits com painéis	
5.1.3	fotovoltaicos	110
5.1.4	Cenário 3 – Sistema de climatização com VRF e painéis fotovoltaicos ..	115
	Cenário 4 – Sistema de climatização Chiller com termoacumulação e	
5.1.5	painéis fotovoltaicos	120
5.2	Análise econômica	124

5.2.1	Composição de tarifas e preços	125
5.2.2	Custos de aquisição de equipamentos	125
5.2.3	Custos de operação e manutenção de equipamentos	126
5.2.4	Cenário 1 – Instalação de painéis fotovoltaicos	126
5.2.5	Cenário 2 – Renovação dos splits	127
5.2.6	Cenário 3 – VRF	127
5.2.7	Cenário 4 – Chiller com termoacumulador	128
5.3	Análise comparativa e crítica dos cenários	128
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	133
6.1	CONCLUSÕES	133
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	134
	REFERÊNCIAS	136

1 INTRODUÇÃO

Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA 2022) o consumo de energia elétrica mundial nos últimos 30 anos saltou de 11.875.526 GWh do ano de 1990 para 26.798.467 GWh no ano de 2020, o que corresponde a um aumento expressivo de 225%. Tal aumento foi sustentado principalmente pela expansão de fontes de energia não renováveis como carvão e gás natural. A Figura 1 apresenta a participação de cada fonte de recursos para a geração de energia elétrica mundial.

Figura 1: Matriz elétrica mundial 2020

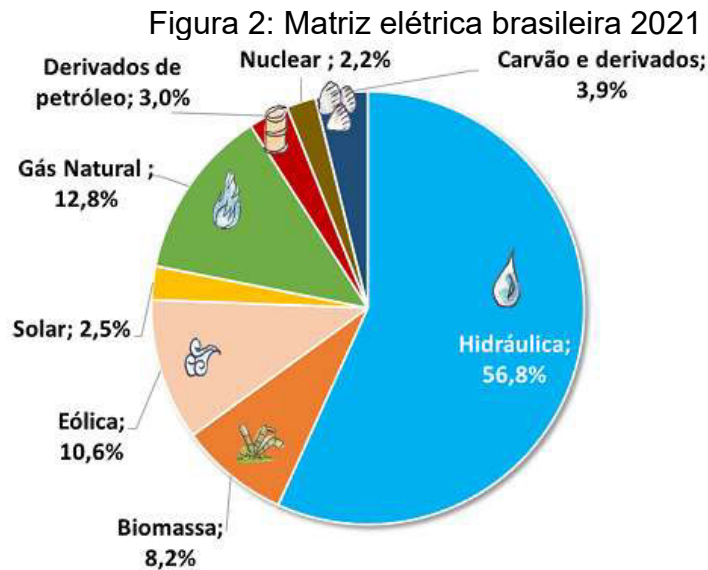


Fonte: IEA (2022)

Embora a matriz energética elétrica brasileira seja historicamente conhecida por ser baseada em fontes renováveis, com cerca de 78,1% da energia elétrica utilizada no Brasil proveniente de fontes renováveis como hidráulica, eólica, biomassa e solar, tal cenário não é constatado de modo uniforme em todas as regiões do Brasil (BEN 2022). A Figura 2 apresenta a parcela correspondente das fontes de recursos para geração de energia elétrica no Brasil no ano de 2021.

Ainda de acordo com Balanço Energético Nacional de 2022, os setores residencial, comercial e público somados representaram cerca de 49,6% de toda a energia elétrica consumida no país. De modo diverso dos setores agropecuário e industrial, onde o consumo de energia é intensamente marcado pelo uso de grandes equipamentos, tais setores podem ser representados principalmente pelo uso da energia elétrica em

edificações, tais como residências, shopping centers, lojas, escritórios, repartições públicas, escolas, entre outros.



Fonte: BEN (2022)

Neste sentido, a climatização de ambientes é responsável por uma grande parcela do consumo de energia elétrica do país, uma vez que em uma edificação com sistema de climatização operante, o ar condicionado representa em média de 40% a 80% da demanda energética (Engenharia e Arquitetura 2022). Com isso, diversos estudos de eficiência energética são desenvolvidos no sentido de tornar o uso das edificações mais eficientes e sustentáveis, seja implementando equipamentos de maior eficiência ou na geração de energia no local.

O estudo da eficiência energética de edifícios obtém forte correlação com as cargas internas e deve proporcionar boas condições de vida ou trabalho aos ocupantes. Tais cargas dependem de diversos fatores climáticos como temperatura externa, velocidade e direção do vento, umidade relativa, localização geográfica do terreno de construção, temperatura média radiante, parâmetros meteorológicos e geográficos particulares de cada região ou cidade. Além disso, características arquitetônicas, construções vizinhas e materiais de construção são fatores que influenciam no conforto térmico e consequente consumo de energia. Assim, cada construção tem seu perfil de demanda muito singular, praticamente único, que deve ser analisado cuidadosamente quando se deseja atingir conforto térmico para seus ocupantes (SILVA 2019).

Contudo, devido a forte correlação entre a necessidade de refrigeração e a radiação solar, diversos estudos integrando equipamentos de climatização com a geração de energia solar fotovoltaica e térmica estão sendo desenvolvidos atualmente, como forma de minimizar os impactos da climatização no aumento do consumo de energia mundial.

Todavia, embora a energia fotovoltaica tenha grande apelo sob a perspectiva de geração sustentável e econômica, a inserção massiva de sistemas fotovoltaicos distribuídos apresentam um grande desafio ao sistema elétrico de baixa tensão, uma vez que o pico de geração fotovoltaica ocorre entre as 10 e 14 horas e é ausente no período noturno. Com isso, o gerenciamento das fontes de energia usuais (Hidroelétricas e Termoelétricas) se torna um grande desafio na integração com a geração de energia renovável de característica intermitente (fotovoltaica e eólica), uma vez que as fontes usuais não são fontes flexíveis de rápida resposta e possuem grande custo de entrada e saída de operação (OLIVEIRA 2020).

Em regiões onde as fontes de energia renováveis possuem grande participação na geração de energia elétrica é comum o fenômeno *curtailment*, cenário onde a disponibilidade de energia elétrica é superior ao consumo, impedindo que a rede absorva toda a produção de energia e por consequência suspendem temporariamente o consumo de energia das fontes renováveis até a estabilização da rede. (O'Shaughnessy et al. 2020).

No Brasil, embora as fontes de energia renováveis eólica e fotovoltaicas representem apenas 13,1% de toda a energia elétrica consumida no ano, tal fenômeno já foi observado na usina eólica Alto Sertão II no ano de 2021 (AES Brasil 2022).

Diante de tal cenário futuro, em regiões com alto grau de penetração de fontes de energia renováveis na matriz energética, o autoconsumo de energia elétrica gerada localmente pelas fontes renováveis, principalmente pela microgeração distribuída de energia fotovoltaica (FV) é amplamente incentivada. Tal tendência também é observada no Brasil através da Lei 14.300 (Lei 14.300/2021) uma vez que prevê a incidência de tributo na energia fotovoltaica não utilizada injetada na rede.

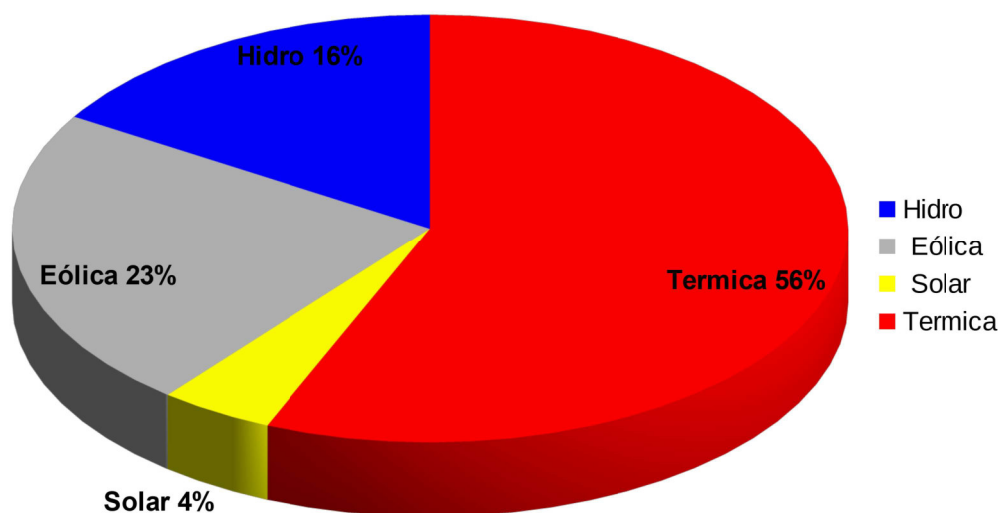
1.1 MOTIVAÇÃO

Em uma análise regional dos estados do Nordeste, as principais fontes de energia elétrica do ano de 2021 foram eólica com participação de 44,6%, termoeletrica com participação de 30,2%, hidráulica com 20,3% e solar com 4,9% (BEN 2022).

Contudo, para o estado de Pernambuco podemos observar na Figura 3 que embora a energia eólica tenha grande participação na geração de energia elétrica com representatividade de 23%, as termelétricas se destacam como principais geradoras de energia elétrica no estado gerando 53% da energia elétrica do estado. Dessas, 85,9% das fontes dos recursos queimados são provenientes de fontes não renováveis como Gás Natural, Óleo Combustível, Óleo Diesel, entre outros.

Aliado a isso, o estado de Pernambuco apresenta altos índices de radiação térmica e temperatura externa, o que demanda grandes cargas de climatização para o conforto térmico das edificações.

Figura 3: Fontes de energia elétrica do estado de Pernambuco



Fonte: O autor (2023)

Desta maneira, o desenvolvimento de climatizadores de ar fotovoltaicos para a região tem grande potencial de impacto positivo sobre a matriz elétrica do estado, contribuindo para a descarbonização das edificações e por consequência da matriz elétrica do estado de Pernambuco, com a redução do consumo de fontes não renováveis de energia.

Neste sentido, diversas pesquisas vem sendo desenvolvidas no grupo de estudo em energia do programa de pós graduação de engenharia mecânica da Universidade

Federal de Pernambuco com foco no aumento da eficiência das instalações com climatização. Villa (2010) desenvolveu uma análise exergoeconômica de um chiller de absorção integrado a um sistema de microgeração a gás. Lima (2018) analisou numericamente absorvedores de um chiller de absorção do tipo placa. Silva (2019) modelou um sistema de trigeração para atender as demandas de refrigeração, eletricidade e água quente para a edifícios de um campus universitário em climas tropicais. Alcântara (2019) realizou uma análise econômica e financeira de um sistema de trigeração de energia para atender as demandas de eletricidade, vapor d'água e água gelada para uma indústria de sorvetes. Leite et al. (2019) desenvolveram um modelo matemático para análise econômica de sistemas de refrigeração integrados com geração fotovoltaica. Este trabalho vem a contribuir com os estudos realizados no grupo de pesquisa com a análise energética e econômica de um sistema de refrigeração fotovoltaico para um edifício do tipo escritório eal em clima tropical.

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral da dissertação é o desenvolvimento de um sistema de climatização fotovoltaico conectado à rede que seja eficiente no uso da energia gerada e economicamente viável, de modo a mitigar tanto os impactos da climatização quanto da geração fotovoltaica na rede pública.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Levantamento do estado da arte dos sistemas de climatização fotovoltaicos;
- b) Estudo e compreensão dos equipamentos de climatização e geração fotovoltaica;
- c) Estudo e compreensão de indicadores de performance energética e indicadores econômicos;
- d) Levantamento e determinação de cargas térmicas e elétricas de edificações;
- e) Análise e simulação de cenários diversos de climatização fotovoltaico em edifícios;

1.4 METODOLOGIA EMPREGADA

O estudo foi elaborado a partir da modelagem do edifício sede da Superintendência Regional Nordeste do INSS. Para isso, foi coletado informações de

consumo de energia elétrica durante um ano da edificação. Com isso, através do software SketchUp o edifício foi modelado e inserido na plataforma TRNSYS para a simulação energética. Foram elaborados 5 cenários, sendo o de Referência que corresponde a situação atual da edificação, com a climatização sendo realizada por unidades split antigas. Para o cenário 01 foi projetado a geração fotovoltaica possível de ser instalada na área de telhado como forma de reduzir o consumo e valor da energia mensal (proposta normalmente adotada na maioria dos casos). Já o cenário 02 é proposto além da geração fotovoltaica, a substituição de todos os equipamentos split system instalados por equipamentos novos mais modernos, com eficiência maior. O cenário 03 é proposto a substituição do sistema de climatização do tipo Split System pelo sistema moderno de Fluxo de Refrigerante Variável (VRF) juntamente com a geração fotovoltaica. Por fim, para o cenário 04 é proposto a climatização ser realizada por chiller de compressor de vapor com termoacumulador de água gelada acoplado com o intuito de absorver a energia fotovoltaica aos finais de semana. Para a análise energética foram propostos 2 indicadores: Fração Solar (SF) e Fração de Consumo Solar (SCR), enquanto que a análise econômica foi realizado através dos indicadores de Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e Período de payback.

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O trabalho foi estruturado em 6 capítulos.

O primeiro capítulo apresenta uma breve introdução sobre o cenário energético mundial e local, a motivação, os objetivos geral e específicos e a metodologia adotada.

No capítulo 2 é realizado o estudo do estado da arte dos sistemas de climatização solar fotovoltaico dos últimos 5 anos.

No capítulo 3 é apresentada a fundamentação teórica dos principais equipamentos utilizados para o projeto de um climatizador fotovoltaico.

No capítulo 4 é descrito a metodologia utilizada para a modelagem da edificação bem como de todos os componentes de cada cenário proposto na simulação.

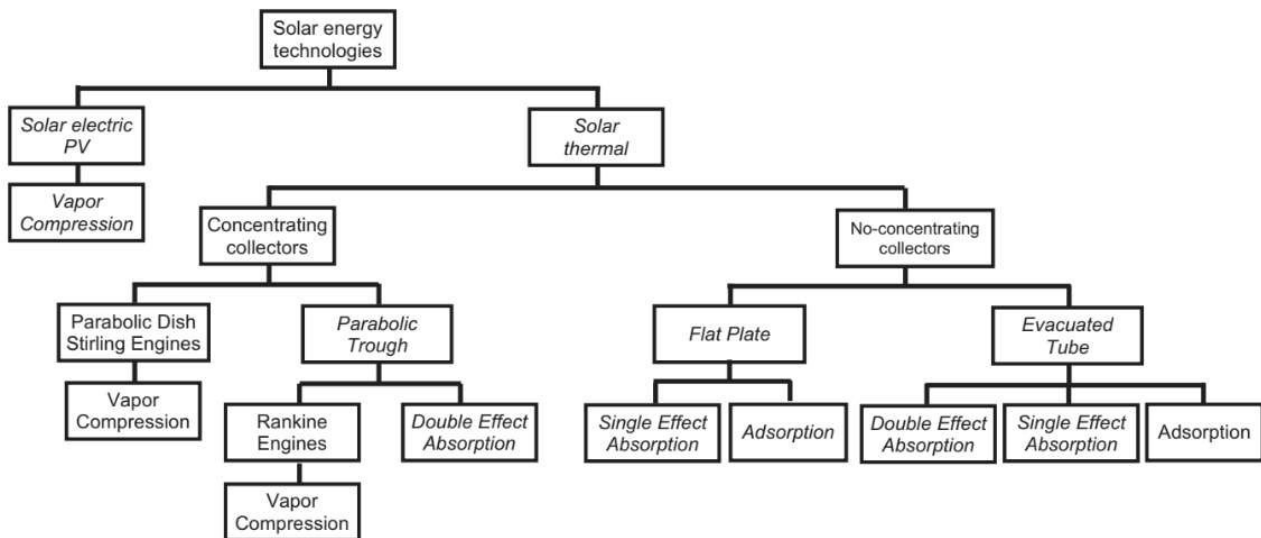
O capítulo 5 os principais resultados e análises de performance energética e econômica obtidos das simulações no software TRNSYS. Ainda apresenta o comparativo entre os cenários propostos.

O capítulo 6 apresenta as conclusões elaboradas e sugestões para trabalhos futuros relacionados ao desenvolvimento de climatizadores fotovoltaicos.

2 ESTADO DA ARTE

Lazzarin e Noro (2018) conduziram uma revisão técnica e econômica das tecnologias utilizadas como alternativas para o resfriamento solar. A revisão abordou o desenvolvimento das tecnologias empregadas desde o ano de 1973, sendo divididos em: passado (1973 a 2000) onde basicamente era provida pela refrigeração solar térmica de primeira geração, presente (2000 a 2018) com o desenvolvimento da eficiência dos coletores e chillers e tecnologias futuras (a partir de 2018) com as perspectivas futuras utilizando painéis fotovoltaicos acoplados a equipamentos por ciclo de compressão de vapor. As Figura 4 apresenta as principais tecnologias utilizadas para o resfriamento de ambientes através da energia solar.

Figura 4: Principais tecnologias para resfriamento solar



Fonte: Lazzarin e Noro (2018)

Ao todo, foram avaliados técnico e economicamente 12 diferentes soluções de combinação de coletores solares (térmicos e fotovoltaicos) e equipamentos de resfriamento sendo eles por absorção, adsorção e chiller por compressão de vapor para as cidades de Bruxelas (Bélgica) e Trapani (Itália). A Tabela 1 apresenta a nomenclatura das soluções que apresentaram os melhores desempenhos.

Tabela 1: Soluções tecnológicas avaliadas com melhores desempenhos

Sigla	Descrição
VC_w com PV_mSi	Chiller por compressão de vapor resfriado a água e alimentado com placa fotovoltaica de silício monocristalino
VC_a com PV_mSi	Chiller por compressão de vapor resfriado a ar e alimentado com placa fotovoltaica de silício monocristalino
VC_w com PV_aSi	Chiller por compressão de vapor resfriado a água e alimentado com placa fotovoltaica de silício amorfo
VC_a com PV_aSi	Chiller por compressão de vapor resfriado a ar e alimentado com placa fotovoltaica de silício amorfo
LiBr_DE com PTC	Chiller por absorção de brometo de lítio, duplo efeito, com coletores solares térmicos parabólicos

Fonte: Lazarin e Noro (2018)

Parâmetros técnicos como eficiência geral do sistema e área específica dos coletores solares foram avaliados, enquanto que para a análise econômica a comparação se deu por investimento específico para produção de 1 MJ de refrigeração.

Quanto ao parâmetro de eficiência global do sistema, para a cidade de Bruxelas as soluções que apresentaram as maiores eficiências foram VC_w e VC_a alimentados por PV-mSi, enquanto que para a cidade de Trapani as melhores eficiências foram observadas LiBr_DE alimentados por PTC e VC_w alimentados por PV_mSi.

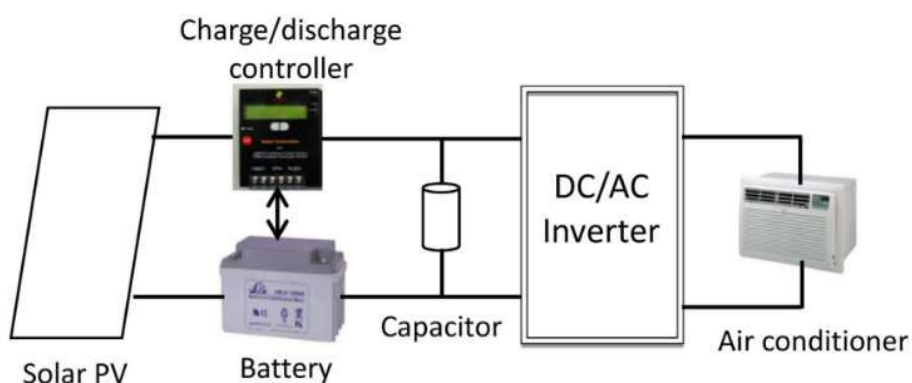
Com relação ao indicador de área específica para a instalação dos coletores solares, para a cidade de Bruxelas as menores áreas específicas foram observadas nas soluções VC_w e VC_a alimentados por PV-mSi, enquanto que para a cidade de Trapani as melhores eficiências foram observadas LiBr_de alimentados por PTC e VC_w alimentados por PV_mSi.

Quanto à análise econômica, os sistemas VC_w e VC_a alimentados por PV-aSi apresentaram o menor custo específico de investimento inicial para a produção de 1MJ de refrigeração em ambas as cidades.

Huang et al (2016) realizaram um estudo experimental com o objetivo de avaliar a operação de condicionadores de ar acionados diretamente por um sistema fotovoltaico off grid equipado com um pequeno banco de baterias. O estudo de campo foi realizado em Taipei, Taiwan, de clima subtropical. Para isto, foi proposto seis configurações de condicionamento de ar solar distinto, variando parâmetros como equipamento de

refrigeração utilizado, capacidade de refrigeração, potência fotovoltaica instalada, capacidade de armazenamento de energia, tecnologia do banco de baterias e utilização descarregamento máximo do banco de baterias. A partir dessas configurações, parâmetros de performance como a fração total do tempo de funcionamento do equipamento de ar condicionado pela irradiação solar específica (OPB), a fração do tempo do equipamento de ar condicionado ligado pelo tempo total de uso (R_f), a fração da potência fotovoltaica pela potência de refrigeração (r_{pl}), tempo de carregamento das baterias (t_{bp}) e tempo de autonomia das baterias (t_{bl}) foram propostos. A Figura 5 apresenta o diagrama esquemático do sistema de condicionamento de ar solar. O pequeno banco de baterias foi inserido com o propósito de amortecer os picos e quedas da geração fotovoltaica, estabilizando a operação dos compressores, sem o objetivo de armazenar expressivas quantidades de energia. O sistema foi testado para o suprimento da demanda de climatização de uma construção de baixo consumo de energia, utilizada para reuniões com até 12 pessoas e possui dimensões de 7,4 metros de comprimento, 3,8 metros de largura e 3 metros de altura. A construção é baseada em boas práticas de eficiência energética, e possui uma carga térmica estimada de 2.200 W no verão.

Figura 5: Funcionamento do aparato experimental



Fonte: Huang et al. (2016)

Dos resultados obtidos, o parâmetro de performance r_{pL} , que correlaciona a potência fotovoltaica instalada pela potência do equipamento de refrigeração demonstrou ser um importante parâmetro para projetos de condicionadores de ar solares. Em testes de campo, fora encontrado que só poderia obter um OPB superior a 0,98 para irradiação

acima de 600 W/m^2 e projetos com r_{pL} maior que 1,71. Contudo, é possível obter um OPB maior que 0,8 para irradiação acima de 200 W/m^2 (dias nublados) em projetos com $r_{pL} > 3,0$. Já para análise diária, é possível obter um R_f de aproximadamente 1,0 em dias parcialmente nublados com radiação solar total maior que $13 \text{ MJ/m}^2.\text{dia}$ com um $r_{pL} > 3,0$. Aparentemente, para obter um alto índice OPB e R_f independente da radiação solar, é desejável um $r_{pL} > 3,0$. No entanto, como os índices OPB e R_f são grandemente afetados pelo padrão da distribuição da radiação solar diária e este está intimamente ligada ao clima local, provavelmente as conclusões deste artigo se adequam apenas para o clima subtropical.

Como os índices OPB e R_f representam o risco de não funcionamento do condicionador de ar solar em sistemas fotovoltaicos off grid. Para mitigar os riscos de perda de climatização, são necessários investimentos maiores para elevação da potência fotovoltaica instalada e do armazenamento de energia, sendo este um ponto a ser otimizado em trabalhos futuros.

Xu et al. (2017) conduziram um trabalho experimental e numérico onde foi proposto um sistema de refrigeração autônomo (off-grid) para uma residência, por meio da instalação de um sistema de condicionamento de ar fotovoltaico (PVAC) com armazenamento de energia por banco de baterias e termoacumulação por gelo. Toda a energia utilizada pelo sistema de produção de frio e distribuição de água gelada é proveniente dos geradores fotovoltaicos. A Figura 6 apresenta os componentes utilizados para o aparato experimental, que é composto por 10 módulos fotovoltaicos de silício policristalino de 245 W, controlador e inversor de frequência, banco de baterias composta por 8 baterias para prover 48V e 130Ah, refrigerador de potência elétrica 0,87 kW, tanque termoacumulador de gelo com volume total de $0,20 \text{ m}^3$ e fan coil com capacidade de 2,7 kW térmicos.

Figura 6: Componentes utilizados para aparato experimental



Fonte: Xu et al. (2017)

Devido ao padrão da demanda de climatização residencial ser incompatível entre a disponibilidade de produção da energia fotovoltaica durante o dia e a demanda de refrigeração durante o período noturno, é proposto a utilização de um termoacumulador por gelo estático. A proposta consiste na acumulação de frio por meio da produção e armazenamento de gelo durante o dia para a ser utilizado durante o período da noite.

Durante os testes experimentais, foram selecionado três dias seguidos de resultados obtidos no mês de maio, representando três diferentes climas do ano, sendo o primeiro dia ensolarado com irradiância total acumulada diária de $21,85 \text{ MJ/m}^2$, segundo dia nublado com irradiância total acumulada diária de $14,76 \text{ MJ/m}^2$ e terceiro dia chuva leve com irradiância total acumulada diária de $9,22 \text{ MJ/m}^2$.

Durante os dias de experimento, o equipamento de refrigeração funcionou das 8:00 às 17:20 na produção de gelo enquanto que a climatização funcionou das 19:30 às 23:30.

No início do experimento, as baterias estavam totalmente carregadas, com capacidade de 130 Ah, sendo que ao final do terceiro dia de experimento a carga da bateria tinha reduzido à 47,87 Ah, tendo como principal causa o período chuvoso do terceiro dia, o que resultou em uma baixa produção de energia fotovoltaica e o consumo de 52,08 Ah para a produção de gelo. Resultados mostraram que o sistema pode operar estável e contínuo durante três dias com condições climáticas diferentes, obtendo a

mesma performance em diferentes níveis de radiação solar com um sistema de banco de baterias auxiliar, não sofrendo alterações da eficiência dos módulos fotovoltaicos e da produção de gelo. Ainda, foi observado a grande influência da temperatura no evaporador, sendo esta responsável pelo baixo desempenho do COP. Foi observada também a relação inversa da temperatura ambiente no COP, quanto menor a temperatura, melhor o COP. Os resultados experimentais resultaram em uma eficiência média do sistema total de 7,65%.

Goldsworthy (2017) investigou a capacidade de um sistema de refrigeração por compressão de vapor fotovoltaico off grid com armazenamento de energia por banco de baterias, de prover condições de temperatura internas confortáveis menores que 25°C em diferentes climas na Austrália com o mínimo de painéis fotovoltaicos e armazenamento de energia para um ambiente residencial.

Para isso, conduziram a simulação no software TRNSYS de um ambiente do tipo residencial, refrigerada por um sistema do tipo split inverter de alta eficiência acoplado a uma fonte de energia fotovoltaica não conectado à rede com armazenamento de energia por baterias, variando parâmetros de construção da edificação e condições climáticas. Ao todo, foram simulados 13 parâmetros de construção, como capacitância térmica, taxa de infiltração, carga térmica interna, orientação de fachada, aspectos construtivos e isolamento de paredes, área e tipo de janela, entre outros. As simulações foram realizadas nas cidades de Brisbane, Melbourne, Darwin e Adelaide, representando os climas subtropical, temperado, tropical e quente seco, respectivamente.

Resultados demonstram que em certas combinações entre o tipo de construção e o clima o conforto térmico pode ser suprido por um pequeno conjunto de painéis fotovoltaicos associados a um sistema de banco de baterias, eliminando a grande demanda causada nos horários de pico pelos condicionadores de ar sem denegrir o conforto térmico e sua autonomia.

Alguns direcionamentos para a otimização dos PVAC:

- Quanto ao clima:

Radiação horizontal elevada tem uma correlação positiva

Temperatura alta tem correlação negativa

Logo, as melhores localizações para o conforto térmico consistem em uma alta irradiação com temperatura amena o suficiente para requerer refrigeração.

- Quanto aos parâmetros de construção

Mínima área de janela, baixa massa externa de construção nos trópicos e subtropicais e alta massa térmica em Victoria e sudeste da Austrália, alta infiltração, baixa carga interna, superfícies externas com baixa absorção solar para reduzir os ganhos de calor radiativo, capacidade térmica interna alta para amenizar as flutuações de temperatura interna.

Edifícios com paredes externas com alta capacidade térmica é ruim para regiões do nordeste da Austrália uma vez que captura e retém calor do ambiente, porém apresenta-se benéfica para as regiões sul da Austrália.

O isolamento térmico do telhado é ligeiramente prejudicial ao conforto térmico em todas as regiões climáticas (exceto no noroeste da Austrália onde apresenta grande radiação solar) devido à limitação da troca de calor radiante para o céu no período noturno, aprisionando o calor e aumentando o desconforto noturno, período que o PVAC não está disponível.

Com isso, fica evidente que diferentes parâmetros de construção influenciam na demanda e conforto térmico da edificação. A exemplo do tipo de construção de parede externa, esta pode ser substancialmente benéfica ou prejudicial para a redução da demanda térmica.

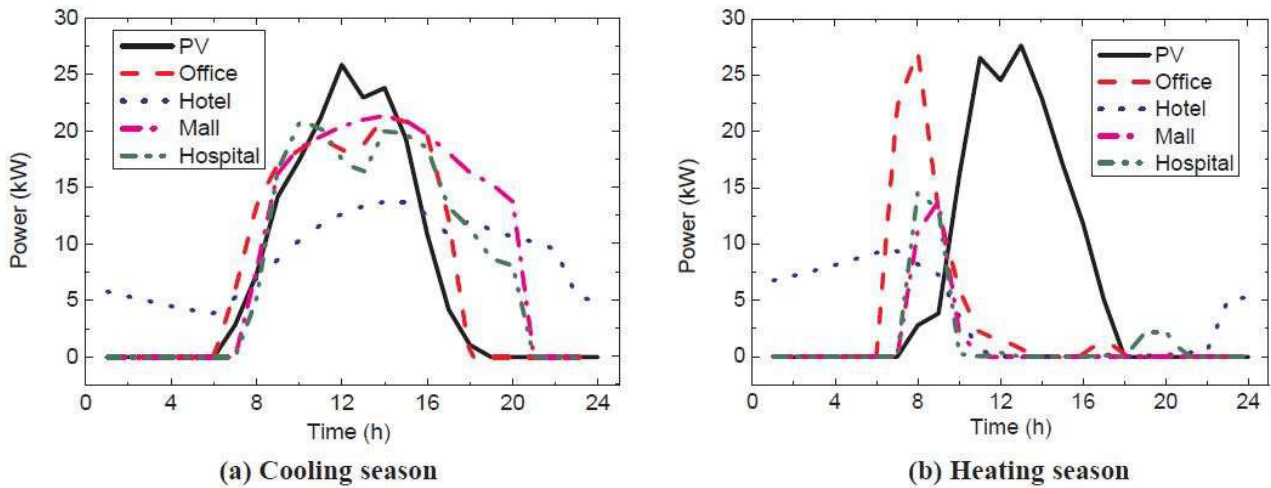
A capacidade de um condicionador de ar fotovoltaico não conectado à rede de prover a climatização com um pequeno arranjo fotovoltaico e mínimo armazenamento por baterias é muito dependente do clima e tipo de construção. Mesmo em um clima tropical quente como na cidade de Darwin, um sistema com armazenamento de energia de 1 kWh (equivalente à operação de um condicionador de ar por 100 minutos) e 3 módulos fotovoltaicos de potência 300 W cada pode promover temperaturas de conforto térmico abaixo de 25 °C durante o ano em edifícios específicos que possuam características térmicas ideais.

Zhao et al (2018) estudou a compatibilidade entre a demanda de energia para a climatização de ambientes com a disponibilidade da energia fotovoltaica. Foram analisados quatro diferentes tipos de edificações com ocupações do tipo shopping, escritório, hospital e hotel. O estudo de diferentes tipos de ocupações das edificações tem como finalidade avaliar o perfil do consumo de energia para climatização com a radiação solar durante o dia. Para a avaliação da performance dos climatizadores de ar fotovoltaicos, foram definidos indicadores de performance como fração solar (SF) que

corresponde ao percentual de energia solar no consumo total do equipamento de ar condicionado, a fração de consumo (SCR) que corresponde ao total de energia solar utilizada pelo equipamento de climatização do total gerado, retorno sobre investimento (ROI) que corresponde ao percentual de retorno financeiro sobre o montante investido e um novo indicador proposto, o indicador de avaliação amplo (CEI) que indica a performance do projeto de condicionamento solar em função de SF e SCR. Com o objetivo de avaliar a autossuficiência dos PVAC em diferentes modos de utilização, foi proposto um sistema fotovoltaico on grid de 30kWp de potência, para atender à demanda de eletricidade do aparelho de climatização de ar instantaneamente, sem a previsão de sistemas de acumulação de energia térmica ou elétrica. Quando não há a disponibilidade de geração de energia fotovoltaica suficiente para o funcionamento do sistema de climatização, a energia é fornecida pela rede pública, assim como eventual excesso de energia fotovoltaica não consumida pelo sistema de climatização é injetada na rede pública.

Contudo, como a demanda de energia para a climatização é dinâmica durante o ano devido à forte relação com o clima, foi investigado a proposta em quatro cidades típicas da China, Guangzhou, Sichuan, Shangai e Beijing, representando os climas de verão quente e inverno ameno, verão quente e inverno frio, e clima frio. Com isso, foram simulados um total de 16 cenários distintos. A Figura 7 apresenta o perfil de consumo dos quatro diferentes tipos de ocupações avaliadas com a disponibilidade de energia fotovoltaica na estação de refrigeração (a) e aquecimento (b) para a cidade de Shangai.

Figura 7: Disponibilidade de energia fotovoltaica e demanda para climatização em diferentes ocupações no modo refrigeração e aquecimento para a cidade de Shanghai



Fonte: Zhao et al. (2018)

Da análise das estações do ano, para o modo de aquecimento, observou-se uma incompatibilidade entre a demanda de climatização e a disponibilidade de energia fotovoltaica, o que acarretou em baixos índices de SF e SCR. Isso se dá pela grande necessidade de aquecimento dos ambientes climatizados no início do dia, período que a disponibilidade de energia fotovoltaica é baixa. Contudo, ao longo do dia, com o aumento da irradiação solar e temperaturas, a necessidade de aquecimento diminui ao passo que a disponibilidade de energia fotovoltaica aumenta, gerando grande distorção entre a demanda e disponibilidade energética. Já para o modo de resfriamento, a compatibilidade entre a demanda de climatização e disponibilidade energética fotovoltaica é maior, o que leva a maiores índices de SF e SCR.

Dentre as análises dos indicadores anuais, locais onde o clima é representado por verão quente apresentou os melhores índices de SF e SCR, para as ocupações do tipo escritório, shopping e hospital, locais que operam normalmente durante o dia. Os melhores índices anuais de SF foram obtidos nas análises para os edifícios do tipo hospital e escritório situados na cidade de Guangzhou, da ordem de 0,75. Tais índices elevados são observados principalmente pela ausência da necessidade de aquecimento durante o inverno, uma vez que a cidade apresenta inverno ameno.

Já para o índice de SCR, os melhores padrões de ocupação foram os do tipo shopping e hospital, com índices da ordem de 0,6, enquanto os do tipo escritório em torno de 0,4 para a cidade de Guangzhou. Embora os escritórios possuam grande

compatibilidade entre a demanda de refrigeração e disponibilidade de energia fotovoltaica, a baixa performance no índice SCR de aproveitamento de energia solar fotovoltaica pode ser justificada pela não utilização da energia fotovoltaica gerada durante os finais de semana, uma vez que estão fechados.

Os PVAC podem contribuir significativamente para a autossuficiência energética das edificações e redução do consumo de energia primária. Condições climáticas e o padrão de ocupação de prédio são dois fatores críticos para a performance energética dos PVAC, demonstrando-se mais viáveis em operações de modo de refrigeração no verão para edifícios do tipo escritório, shopping e hospitais que operam prioritariamente durante o dia.

CHEN et al. (2020) conduziu um estudo experimental para a climatização de um escritório, em uma sala de 20 m² na província de Henan, China. O objetivo do estudo é a avaliação da performance do projeto proposto e a análise da viabilidade dos PVAC para escritórios. O aparato experimental conta com a instalação de placas fotovoltaicas interligadas à rede com potência de 3,2 kWp, sistema de controle, estação meteorológica local, equipamento de ar condicionado do tipo inverter de 2,6 kW e não conta com sistema de acumulação de energia térmica ou elétrica. Toda energia fotovoltaica gerada em excesso é injetada na rede, enquanto que a rede pública fornece eventuais quedas ou geração insuficiente das placas fotovoltaicas para o sistema de climatização.

Para a avaliação da performance técnica e econômica do projeto estudado, foram definidos índices de performance como Coeficiente de autossuficiência (SSC, similar à Fração Solar SF) e econômicos como período de payback (PBP).

Para o modo de operação de refrigeração, foi selecionado o dia 02 de agosto representando um dia típico de verão. Durante o dia de experimento, os painéis fotovoltaicos geraram um total de 18,5 kWh, o consumo do sistema de climatização foi de 16,9 kWh e o excedente de 1,6 kWh foi injetado na rede.

Para o modo de operação aquecimento, foi selecionado o dia 06 de fevereiro representando um dia típico de inverno. Durante o dia de experimento, a geração fotovoltaica foi de 12,5 kWh, o consumo do AC foi de 9,6 kWh e o excedente de 9,6 kWh foi injetado na rede.

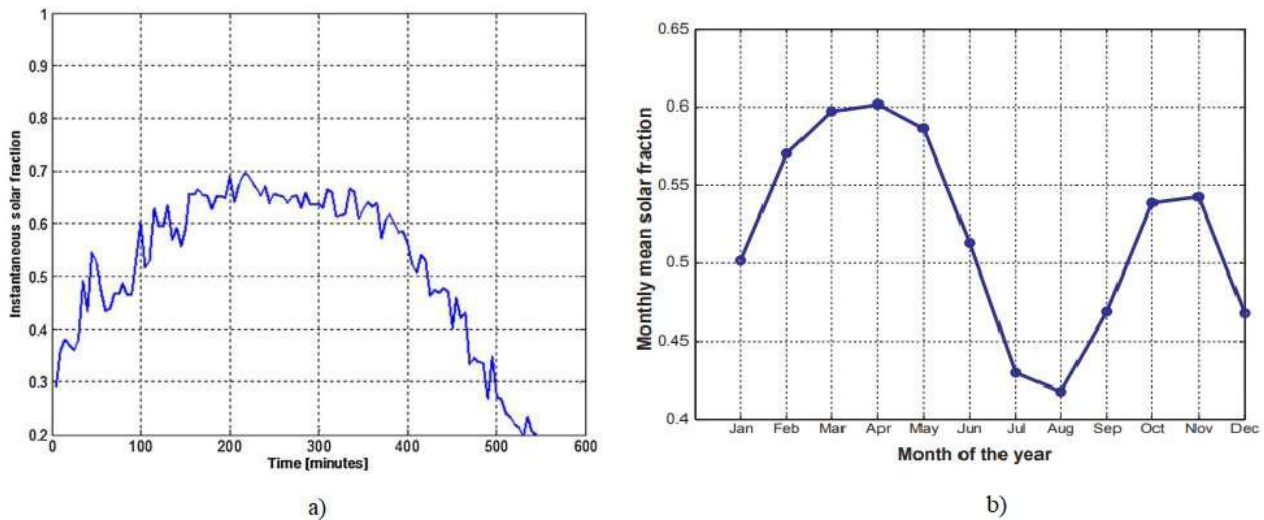
Da análise anual, durante o período de refrigeração, o sistema fotovoltaico consegue prover toda a energia necessária para a operação, tendo um SSC médio para o período de 1,14, enquanto que para a estação de aquecimento o SSC médio foi de 0,73. Contudo, no âmbito geral, a média anual do SSC do sistema PVAC foi de 1,88, o que

resulta em 46,7% da energia gerada pelos painéis fotovoltaica fora injetada à rede. Da análise econômica, o PBP encontrado foi de 7,5 anos, indicando bom retorno. Com isso, conclui-se que através de um bom projeto do sistema PVAC os edifícios do tipo escritórios possuem boas características para a implementação dos sistemas PVAC, se mostrando assim como uma alternativa viável para a solução do problema de consumo de energia desse tipo de edificação.

Opoku et al. (2018) conduziram um estudo experimental e avaliaram a viabilidade técnica e econômica de um sistema de condicionamento de ar fotovoltaico para a refrigeração de salas de escritório em edifícios comerciais e públicos em Gana. O objetivo específico do estudo foi determinar a fração de energia solar que poderia suprir a demanda do equipamento de ar condicionado do tipo inverter para a refrigeração de uma sala padrão de escritório localizada em um clima quente e úmido. Para isto, foi montado um aparato experimental para a refrigeração da sala de aproximadamente 30 m². Foi utilizado um sistema fotovoltaico on grid de potência instalada de 1040 Wp, um inversor de frequência híbrido, um equipamento do tipo split system inverter de capacidade de refrigeração de 2,5 kW e um banco de baterias de 200 Ah, 24V. O sistema de armazenamento de energia por baterias neste estudo tem apenas o objetivo de fornecer energia por pequenos períodos de tempo, de modo a suavizar as flutuações da demanda do equipamento de climatização e da geração de energia fotovoltaica. Com isso, de modo a assegurar uma maior vida útil para o banco de baterias, foi determinado um descarregamento máximo de até 60% da capacidade de carga. A performance do sistema de climatização fotovoltaico proposto foi avaliada pelos índices de fração solar instantânea diária e fração solar média mensal distribuída ao longo do ano.

Os resultados demonstram que para um determinado dia em particular foi obtida uma média de 50% para a fração solar do sistema híbrido fotovoltaico conectado à rede, o que significa que 50% da energia utilizada pelo sistema de climatização foi provido pelas placas fotovoltaicas/bateria., sendo os outros 50% fornecidos pela rede pública. Já para a fração solar média mensal, foi obtido um valor máximo de 60% para o mês de abril (verão) e a mínima de 42% para o mês de agosto. A Figura 8 apresenta o índice de fração solar instantânea distribuída ao longo do dia (a) de funcionamento do sistema de climatização e (b) representa a fração solar mensal ao longo do ano. Observa-se que a fração solar (instantânea e mensal) tem forte relação com o padrão de irradiação solar da localidade. Anualmente, a fração solar ficou em $51\% \pm 9\%$.

Figura 8: Fração solar instantânea ao longo do dia (a) e fração solar mensal média ao longo do ano (b)



Fonte: Opoku et al. (2018)

Após a obtenção dos dados experimentais, foi realizada uma comparação econômica entre o sistema híbrido estudado, a utilização de somente energia convencional da rede elétrica, a contratação de energia proveniente de fontes renováveis (PPA LCOE), e de um sistema 100% movido a energia solar fotovoltaica. Para que o sistema operasse 100% movido a energia renovável sem necessidade de alimentação da rede, foi proposto um sistema fotovoltaico com potência instalada de 2840 Wp e um banco de baterias de 200 Ah.

Para a proposta de suprimento de 100% da demanda de climatização sendo provida pelo sistema de geração fotovoltaica, a simulação numérica resultou em uma geração de aproximadamente 9,50 kWh por dia para o mês de agosto, mês de menor geração de energia fotovoltaica devido ao inverno e de 12,61 kWh por dia para o mês de abril, mês de maior geração de energia fotovoltaica.

Da análise econômica para o período de 10 anos, embora o sistema 100% movido a energia solar fotovoltaica tivesse um maior investimento inicial devido a instalações mais robustas do sistema fotovoltaico e do banco de baterias, ao final do período de 10 anos poderia obter-se uma economia de 3300 dólares em comparação com o sistema convencional de fornecimento de energia. Ambos os sistemas híbridos 50-50 e 100% solar fotovoltaico demonstraram ser vantajosos economicamente, tendo o prazo de aproximadamente 5 a 6 anos para o retorno financeiro. Contudo, em comparação com a

contratação de energia da rede proveniente de fontes renováveis, o sistema híbrido 50-50 não apresentou vantagens econômicas, sendo economicamente menos vantajoso em todo o período analisado. Já para o sistema 100% fotovoltaico, foi observado um prazo entre 5 a 6 anos para apresentar resultados econômicos mais vantajoso quanto ao custo de energia.

Haffaf et al (2021) conduziram um estudo para analisar a viabilidade técnica e econômica de condicionador de ar abastecido por painéis fotovoltaicos otimizado, na província de M'sila, Argélia. Os dados da otimização e simulação foram gerados pelo software HOMER. Os autores propuseram um sistema de condicionamento de ar fotovoltaico, conectados à rede de distribuição de energia, sem armazenamento de energia. Com isso, toda energia fotovoltaica produzida em excesso é vendida à rede, assim como a rede fornece eventuais necessidades de energia quando os painéis fotovoltaicos não gerarem energia suficiente para suprir a demanda de refrigeração. Para uma demanda elétrica de 4,37 kWh/dia do sistema de climatização com potência de 1,96 kW e média solar de irradiância de 4,79 kW/m²/dia, a potência otimizada dos painéis fotovoltaicos foi de 1,5 kWp. Para tal configuração, o sistema fotovoltaico produz cerca de 2.315 kWh anualmente, enquanto que a demanda anual de climatização é de 1596 kWh. Contudo, embora o sistema fotovoltaico produza 145% da demanda de climatização no ano, o sistema consome 559 kWh/ano pela rede. Isso ocorre principalmente devido à intermitência do sistema fotovoltaico na geração de energia. O excesso de energia produzida, estimada em 1094 kWh é injetada na rede. O sistema de climatização opera somente na função refrigeração. Portanto, de acordo com o clima local, é somente operado entre os meses de Abril a Setembro, período que corresponde a estação de verão. Nos meses restantes, a necessidade de carga térmica corresponde ao aquecimento, e é suprida por gás natural.

De acordo com o potencial de irradiação solar na Argélia e com os resultados obtidos, a solução da opção de geração de energia solar se demonstra simples, viável e confiável no âmbito das fontes de energia renováveis. Com isso, os sistemas de condicionamento de ar movidos por energia solar fotovoltaicos contribuem para a redução do consumo de energia proveniente de fontes não renováveis, promovendo e integrando as fontes de energia renováveis para descarbonizar e mitigar as emissões de CO₂ das edificações.

Embora o armazenamento de energia térmica em sistemas de refrigeração esteja bastante consolidado em estratégias de gerenciamento com deslocamento de carga em

grandes consumidores quanto a sua eficiência e custo-benefício, poucos estudos demonstram a performance e viabilidade dos termoacumuladores integrados a sistemas de condicionamento de ar fotovoltaicos independentes. Com o intuito de investigar a melhor solução quanto aos sistemas de termoacumulação de frio para os condicionadores de ar fotovoltaicas off grid, Hu et al. (2022) propôs um sistema de climatização remoto composto por um chiller de compressão mecânica, banco de bateria, termoacumuladores de diferentes categorias e gerador a Diesel, incluindo estratégias de gerenciamento de processos de termoacumulação. Os tipos de armazenamentos térmicos estudados foram: água gelada, gelo, materiais com mudança de fase e armazenamento por inércia térmica aplicados em edifícios do tipo residencial, hotel e escritórios. Como caso de referência, foram comparados a um sistema com acumulação de energia fotovoltaica exclusivamente realizado por baterias.

A estratégia utilizada para a operação dos do sistema fotovoltaico off grid é composto por 5 princípios fundamentais, sendo satisfeitos prioritariamente na seguinte ordem:

- (1) Toda a energia do edifício deve ser satisfeita;
- (2) A energia fotovoltaica gerada deve suprir a demanda de climatização prioritariamente;
- (3) A energia fotovoltaica gerada deve ser utilizada diretamente o máximo possível, a fim de reduzir as perdas no armazenamento;
- (4) O banco de baterias tem prioridade para o carregamento, enquanto que o termoacumulador tem prioridade para o descarregamento;
- (5) O gerador a Diesel é a último recurso como fonte de energia para satisfazer a demanda;

Dos resultados de performance, em todos os cenários com termoacumuladores instalados, foi observada a redução do tamanho do banco de baterias, indicando que os termoacumuladores podem substituir as baterias em sistemas de climatização fotovoltaicos isolados. Para uma fração solar de 90%, os termoacumuladores de gelo atingiram uma redução do banco de baterias de 46,29%, 52,41% e 90,27% para as edificações do tipo escritório, hotel e residencial, respectivamente.

Para os três tipos de ocupação de edifícios analisados, o armazenamento térmico por água gelada apresentou o menor consumo de energia adicional, sendo seguido por materiais com mudança de fase e gelo. Assim como esperado, a adoção de sistemas de

termoacumulação elevam o consumo de energia elétrica total do sistema de climatização, tendo seu maior efeito no armazenamento térmico por gelo, no qual além da perda de energia térmica do termoacumulador para o ambiente, ocorre o detrimento do Coeficiente de Performance do refrigerador devido às baixas temperaturas do refrigerante no evaporador.

No entanto, embora os termoacumuladores aumentem o consumo de energia, em todas as configurações por tipo de edificação e meio de armazenamento, os termoacumuladores demonstraram potencial vantajosidade econômica em relação ao sistema exclusivo por baterias. A termoacumulação por água gelada apresentou a maior redução dos custos de implantação para todas as configurações em relação ao banco de baterias, com economia da ordem de 19,26% com SF=70% para escritórios, 22,48% com SF=60% para hotéis e 49,76% com SF=80% para residências. Tal redução é impactada principalmente pelo menor custo de aquisição do meio de armazenamento, simplicidade do sistema e maturidade da tecnologia empregada.

Com o intuito de aproveitar ao máximo a energia fotovoltaica produzida diretamente em uma instalação industrial na Itália e reduzir a quantidade de energia vendida à rede, Arteconi et al. (2017) realizou um trabalho numérico, analisando a viabilidade econômica do armazenamento da energia fotovoltaica excedente por meio da termoacumulação por água gelada para ser utilizada no sistema de climatização numa planta industrial na Itália. Tal motivação ocorre principalmente pela diferença da estrutura tarifária vigente na Itália, onde a tarifa de energia elétrica é de 0,149 €/kWh para o horário fora de pico (20:00 às 8:00), 0,164 €/kWh para o horário de pico (8:00 às 20:00) enquanto que a energia fotovoltaica vendida para a rede pública é de 0,045€/kWh. Pelo fato de já existir a planta fotovoltaica instalada e em operação, os dados de consumo e geração de energia foram obtidos experimentalmente.

O modelo utilizado na simulação foi construído na plataforma TRNSYS, tendo como principais componentes: bomba de calor refrigerada a água, unidades de tratamento de ar, trocadores de calor, tanque acumulador e painéis fotovoltaicos. O intervalo de simulação definido foi de 15 minutos. O modelo pode funcionar em três diferentes configurações:

- (1) Modo de carregamento: As bombas de calor carregam o termoacumulador;
- (2) Modo de descarregamento do tanque: Energia térmica é provida pelo tanque ao edifício;

- (3) Modo de descarregamento das bombas de calor: Bombas de calor provém energia ao edifício pois a temperatura interna da água no tanque é muito alta para promover conforto térmico;

De modo a encontrar a melhor configuração para o uso do termoacumulador, foram simuladas diferentes temperaturas de set-point para a água no tanque (5°C, 7°C, 10°C, 12°C e 15°C), tendo como caso de referência o sistema sem armazenamento de energia.

Da análise anual do consumo energético da fábrica e da geração de energia fotovoltaica, cerca de 24% do total gerado poderia ser recuperado durante os finais de semana, o que representa 85% do excesso de energia fotovoltaica gerada em excesso. Contudo, devido ao excesso de energia fotovoltaica ser majoritariamente gerada no período de verão e primavera, o estudo concentrou-se apenas no estudo da refrigeração dos ambientes. Assim como esperado, as simulações com a inserção de tanque de termoacumulação aumentam o consumo de energia pelo sistema de climatização, devido ao consumo das bombas de circulação de água no carregamento do sistema termoacumulador e das perdas térmicas de transferência de calor e do tanque acumulador. Ainda, observou-se a influência da temperatura de set point do tanque, sendo que temperaturas menores tendem a aumentar o consumo de energia pelo chiller, principalmente pela diminuição da eficiência do refrigerador e das perdas térmicas de armazenamento, enquanto que o set point para temperaturas maiores aumentam o consumo do sistema de circulação de água gelada. Para o caso de referência considerando uma semana típica de verão, o set point do termocumulador para 7°C se mostrou o com melhor potencial para aproveitar a disponibilidade de energia fotovoltaica, sendo os painéis fotovoltaicos responsáveis por suprir 91% do processo de carregamento do termoacumulador, pois a disponibilidade de energia durante o final de semana é suficiente para completar o carregamento e a potência das bombas de calor é normalmente menor que a potência dos módulos fotovoltaicos. Contudo, a análise não se mostrou economicamente viável o armazenamento somente durante os finais de semana, pois são grandes os custos iniciais de aquisição e instalação do tanque termocumulador necessário para armazenar todo o volume de água necessário para suprir a climatização durante toda a semana.

Em decorrência da maioria dos cálculos e métodos de dimensionamento de condicionadores fotovoltaicos serem baseados em grandes intervalos de tempo, sem considerar as flutuações que ocorrem na geração de energia fotovoltaica, Li et al (2020) propôs um estudo de um método para avaliar o potencial de consumo zero instantâneo

para os condicionadores fotovoltaicas. Para isso, inicialmente foi estudado um método para determinar o tamanho ótimo da instalação fotovoltaica, de modo a atender a demanda de eletricidade. Então, foi simulado e analisado a geração e consumo de energia baseado em diferentes intervalos de tempo de 1 hora e 1 minuto para diferentes regiões climáticas. Foram selecionadas quatro cidades da China: Beijing, Shangai, Shenyang e Guangzhou, representando quatro diferentes climas, sendo eles frio, verão quente e inverno frio, frio extremo e verão quente e inverno ameno, respectivamente. O dimensionamento do sistema de condicionamento de ar é realizado de modo a atender a maior demanda, seja de aquecimento ou refrigeração. O sistema de condicionamento de ar fotovoltaico proposto é composto por painéis fotovoltaicos conectados à rede pública, banco de baterias e equipamento de climatização. Alguns indicadores de performance foram propostos como a autossuficiência horária (Hourly SS) que corresponde a probabilidade da energia elétrica gerada pela planta solar de atender à demanda de climatização no intervalo de uma hora, autoconsumo horário (Hourly SC) que corresponde a efetiva utilização da energia elétrica fotovoltaica gerada no intervalo de uma hora, probabilidade instantânea de energia zero (RZEP) que corresponde à razão entre o consumo zero de energia instantâneo pelo tempo total de funcionamento dos equipamentos de ar condicionado, probabilidade de armazenamento de energia zero (SZEP) que corresponde à razão quando a geração de energia elétrica é maior que a demanda dos equipamentos de ar condicionado.

Durante a simulação, é possível observar os efeitos do intervalo de tempo adotado no resultado dos indicadores. Para as quatro localidades simuladas, o RZEP apresentou valores significativamente maiores para o intervalo de tempo de uma hora, cerca de 40% maior que os indicadores com intervalo de tempo de 1 minuto nas cidades de Shangai e Shenyang, demonstrando assim que as frequentes mudanças da radiação solar durante o dia possuem grandes implicações na convergência da geração e demanda energética. Ainda, o intervalo de tempo menor demonstrou uma maior precisão dos cálculos dos indicadores, demonstrando ser mais viável para a avaliação da convergência real entre a geração fotovoltaica e a demanda de eletricidade.

Da simulação quanto à performance, a capacidade fotovoltaica instalada é determinada pela otimização da maior fração entre o número de horas que o sistema de geração consegue suprir a demanda dos condicionadores de ar pelo total de horas de funcionamento dos equipamentos. Da otimização dos painéis fotovoltaicos, a razão entre a geração fotovoltaica e o consumo dos equipamentos de ar condicionados foram obtidos

os valores de 2,18, 1,73, 0,87 e 1,12 para as cidades de Guangzhou, Shanghai, Beijing e Shenyang, respectivamente. Da simulação, Guangzhou possui os melhores parâmetros de eficiência de uso da geração fotovoltaico, o que pode ser explicado devido a demanda somente de refrigeração, o que proporciona maior combinação entre a geração de energia fotovoltaica e a demanda de refrigeração. Para cidades com grande demanda de aquecimento no inverno, os parâmetros de eficiência dos PVAC são baixos, uma vez que ocorre grande incompatibilidade entre geração e demanda de energia. Como exemplo, para as cidades de Shenyang e Beijing, o indicador RZEP anual atingiu valores de 26,40% e 18,63% enquanto que Shanghai e Guangzhou obtiveram indicadores RZEP da ordem de 37,17% e 35,16%.

Considerando a análise dos sistemas para o ano todo, nas estações de verão e inverno, alguns direcionamentos são apresentados para a otimização para os sistemas PVAC:

- (1) Para Guangzhou, o aumento da capacidade instalada de placas fotovoltaicas assistida por pequeno banco de baterias, melhora a probabilidade de zero energia;
- (2) Para Shanghai, a geração fotovoltaica não é eficiente utilizando no verão e inverno, devido a baixa compatibilidade de geração e consumo de energia. O aumento do banco de baterias tende a melhorar o SZEP.
- (3) Para Beijing, a geração fotovoltaica é eficiente, e a diferença entre RZEP e SZEP é relativamente pequena. Logo, é sugerido o incremento do banco de baterias e da capacidade de geração fotovoltaica.
- (4) Para Shenyang, ocorre uma grande diferença entre a produção fotovoltaica e o consumo de eletricidade no verão e inverno. Baterias com variação de carga térmica se mostra essencial nas diferentes estações.

Com o intuito de aumentar a probabilidade zerar o consumo de energia dos sistemas de climatização tendo como fonte de energia os painéis fotovoltaicos, Li et al (2021) propuseram uma nova metodologia para controle do sistema de climatização de edifícios considerando uma faixa de temperatura interna para conforto dos usuários. Com isso, as flutuações da geração de energia fotovoltaica que impactam diretamente na probabilidade do consumo zero de energia (ZEP) dos climatizadores solares seriam absorvidas com as flutuações de temperatura dentro da faixa pré-determinada. Para isso, foi realizado simulações numéricas de um condicionador fotovoltaico conectado à rede pública com a estratégia de faixa de temperatura para conforto térmico para três cidades com características climáticas diferentes, sendo Guangzhou, Shanghai e Beijing. A

capacidade de geração fotovoltaica foi definida como 1,3 vezes o consumo de energia pela climatização da estação dominante (verão ou inverno). A faixa de temperatura de conforto foi definida como:

- Modo refrigeração: 23,9 °C a 28,3 °C
- Modo aquecimento: 16,7 °C a 21,8 °C.

A temperatura interna é definida principalmente pela quantidade de energia produzida instantaneamente pelo sistema fotovoltaico, sendo a rede pública de fornecimento de energia responsável por suplementar somente quando a energia do sistema fotovoltaico não gerar energia suficiente para atender às condições mínimas de conforto térmico.

Para a estação de verão com carga de refrigeração, três condições de temperatura foram avaliadas: fixa em 25°C, $\leq 25^\circ\text{C}$ e $\leq 28,3^\circ\text{C}$. Os resultados da simulação apontam que para temperatura fixa em 25°C, o RZEP é de 1,89%, 2,45% e 2,11% para as cidades de Shanghai, Guangzhou e Beijing, respectivamente. Ainda, o RZEP aumenta para 25,71%, 21,76% e 49,61% para temperaturas internas flexíveis $\leq 25^\circ\text{C}$, atingindo resultados de 53,13%, 49,48% e 87,11%, para temperatura interna flexível $\leq 28,3^\circ\text{C}$, para as cidades de Shanghai, Guangzhou e Beijing, respectivamente. A cidade de Beijing apresentou o maior RZEP no verão pois a produção de energia fotovoltaica é otimizada para a estação de inverno, onde ocorre o maior consumo de energia para a climatização, enquanto que nas demais cidades o índice apresenta resultados menores pois a produção de energia fotovoltaica é igual ao consumo de energia dos condicionadores de ar.

De acordo com os resultados de otimização da capacidade de geração de energia fotovoltaica, o aumento linear da capacidade de geração não traz benefícios econômicos ao sistema bem como não é possível atingir o parâmetro RZEP de 100%, sendo a razão otimizada entre a geração e consumo de 1,3. Para as cidades de Shanghai e Guangzhou, o ZEP diário no verão pode atingir 90% para a razão instalada de 1,3, o que significa que a geração de energia fotovoltaica é grande o suficiente para 90% dos dias de verão, o que com um pequeno banco de baterias os PVAC poderiam atingir 90% de RZEP.

Da análise econômica, para a cidade de Guangzhou e uma capacidade de instalação de geração fotovoltaica de 14 kW, o período de payback foi de 3,48 anos considerando a metodologia de faixa de temperatura para conforto térmico, resultando em

um período de payback de 2 anos mais rápido do que a estratégia de temperatura fixa para conforto térmico, o que indica que a proposta do método aplicando a faixa de temperatura para conforto térmico viável economicamente e energeticamente.

Com isso, conclui-se que os sistemas PVAC desempenham um papel importante na missão de atingir a conceito de energia zero das edificações. Contudo, incompatibilidade entre a geração fotovoltaica com o consumo instantâneo demonstra ser uma barreira importante para a implementação da tecnologia. Neste sentido, a adoção da faixa de temperatura para conforto térmico pode contribuir para alcançar grandes níveis de RZEP, sem a necessidade de custos adicionais como aumento da capacidade instalada ou sistemas de armazenamento de energia.

Leite et al (2019) desenvolveram um modelo matemático para analisar os benefícios econômicos de um sistema de climatização integrado com a rede de energia. Para isso, foram analisados os aspectos técnicos de dois sistemas de climatização, o VRF (Variable Refrigerant Flow) representando um sistema de expansão direta e um Chiller refrigerado à água, representando um sistema de expansão indireta. Os sistemas de climatização foram analisados em duas cidades São Paulo e Recife, com níveis de radiação e temperatura distintos. Em ambos os casos, capacidade instalada dos equipamentos foi de 100 Toneladas de Refrigeração.

Tal estudo salienta a importância da análise dos aspectos técnicos e econômicos da localidade como custos com operação e manutenção dos sistemas de climatização e geração de energia fotovoltaica, custos de implantação dos sistemas, valor e reajuste das tarifas de energia, degradação do painel solar, entre outros.

De modo a calcular os indicadores de viabilidade econômica do projeto, foram analisados o Valor Presente Líquido (VPL) com uma taxa mínima de atratividade de 8%, Taxa Interna de Retorno (TIR) e Período de Payback.

Para isto, previamente foi calculado o fluxo de caixa, que é definido como a economia gerada através da produção de energia elétrica fotovoltaica, balanceada com os custos de instalação e manutenção. A tabela abaixo traz alguns parâmetros técnicos e econômicos utilizados na simulação.

Tabela 2: Parâmetros energéticos e econômicos

Variável	Tipo de Variável	Valor
Degradação anual do painel solar	Fixa	0,7%

Tarifa de energia	Variável	USD 1,4/kWh a USD 1,9/kWh
Reajuste da tarifa	Variável	6,8 a 9,2%
Implantação do sistema HVAC	Variável	VRF: USD 102.656 a USD 138.887 Chiller: USD 164.250 a USD 222.221
Operação e Manutenção HVAC	Variável	USD 12.318 a USD 16.665
Operação e Manutenção fotovoltaico	Variável	USD 1.489 a USD 2.014

Fonte: Leite et al (2019)

Ainda, foi realizada uma análise sensível dos parâmetros utilizados pelo método de Sobol para os índices econômicos, gerando um total de 1.925.000 simulações. Para o índice VPL, as principais variáveis que impactam nos resultados são o preço da tarifa de energia, o reajuste tarifário e eficiência do painel solar. Já para os indicadores TIR e Payback, os principais parâmetros que afetam são o preço da tarifa de energia, o valor da instalação fotovoltaica e a eficiência do painel solar.

As principais conclusões foram:

- A implantação de sistemas HVAC associados a energia solar fotovoltaica pode garantir uma elevada TIR, com valores médios em torno de 29% para a cidade do Recife e 23% para a cidade de São Paulo.
- O período de payback para todas as 1.925.000 simulações realizadas ficou entre 4 a 5,9 anos.
- Independentemente do tipo de sistema HVAC escolhido, altos valores de VPL e TIR e baixo valores de Payback foram encontrados.

Com isso, ficou evidenciado um grande potencial para viabilidade técnico-econômica na integração entre o sistema de ar condicionado e o sistema solar fotovoltaico, especialmente em regiões dos trópicos, onde a climatização é crucial para promover o conforto térmico dos ocupantes da edificação.

Embora os estudos recentes de edificações com alta performance energética possuam boa confiabilidade técnica por meio da simulação numérica, com o uso de informações inadequadas sobre os custos de implantação de sistemas de climatização para uma prévia estimativa dos valores de implantação dos sistemas HVAC, muitos projetos demonstravam incoerência nos custos, inviabilizando a sua implementação. Neste sentido, CHO et al (2020) conduziram um estudo numérico para determinar um

método de análise do custo de implantação de uma larga variedade de sistemas HVAC em edificações do tipo escritório.

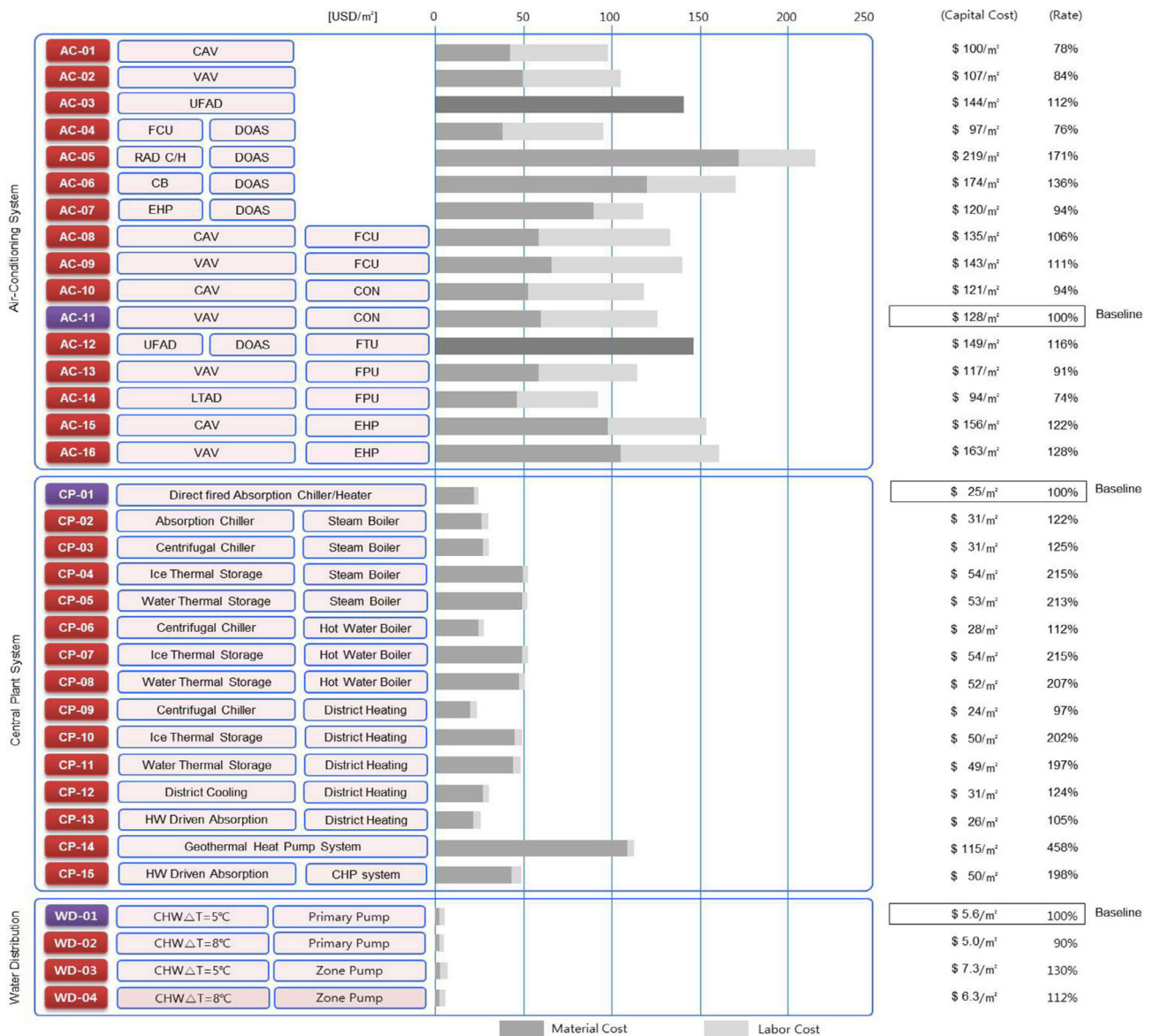
O investimento total em sistemas HVAC incluem custos diretos e indiretos na sua implantação. Custos diretos estão relacionados aos custos de aquisição de equipamentos de climatização e materiais para a sua perfeita execução. Já os custos indiretos estão relacionados aos custos que dão suporte à completa execução do projeto.

Sistemas de climatização podem ser divididos em três grupos de componentes, sendo Planta Central (CP) que são os sistemas para a produção de frio ou calor, como os chillers e caldeiras; Distribuição de Água (WD) que consiste no sistema de transporte do fluido refrigerado/aquecido da Planta Central até o ambiente a ser climatizado; e sistema de Ar Condicionado (AC) que consiste no sistema responsável por prover um bom ar interior por meio da distribuição do ar climatizado.

O estudo estruturou um levantamento possibilitando que seja possível obter um total de 960 combinações de sistemas HVAC (16 ACs x 15 CPs x 4 Wds). Já os custos de implantação foram trabalhados sobre o custo unitário por metro quadrado, unidade comumente utilizada na construção civil. A Figura 9 apresenta os subsistemas elencados e os custos unitários por metro quadrado, em dólar.

Tal estudo permite realizar o cálculo prévio dos custos de implantação de um sistema de climatização de uma grande combinação de soluções comumente aplicadas aos edifícios do tipo escritório.

Figura 9: Custos de implantação de sistemas de climatização por metro quadrado



Fonte: CHO et al (2020)

2.1 CONTRIBUÇÃO CIENTÍFICA

Tendo em vista a análise energética e econômica generalista quanto a simulação dos condicionadores de ar fotovoltaicos em diversos climas e padrões de ocupações gerais, o presente trabalho tem como objetivo o estudo e simulação de um edifício real, com mais de 1.600 m² de área climatizada distribuídos em 9 zonas térmicas, localizado na cidade tropical litorânea do Recife, cujo edifício necessita de refrigeração em todo o ano. Foram analisados 4 cenários utilizando diferentes tecnologias de refrigeração por

compressão de vapor – split, VRF e Chiller com termoacumulador integrados com o sistema de geração fotovoltaica. De modo a analisar a performance energética da integração da geração fotovoltaica e o consumo da refrigeração, foram utilizados os índices fração solar (SF) e fração de consumo da geração fotovoltaica (SCR), calculados em um intervalo de tempo reduzido de apenas 2 minutos para todo o ano. O presente trabalho ainda traz a análise econômica dos cenários por meio do cálculo do fluxo de caixa, valor presente líquido, taxa interna de retorno e período de payback aplicados ao Brasil, considerando os impactos do início da vigência da Lei 14.300/2022 em 6 de janeiro de 2023.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo foi apresentada uma revisão básica da evolução da legislação brasileira com relação à geração de energia elétrica pelas unidades consumidoras, dos pontos que afetam os projetos de implantação da geração distribuída e das possíveis

Com relação aos equipamentos utilizados, será abordado o conceito de ciclo básico de compressão de vapor e seus principais equipamentos comerciais com potencial para ser instalados, bem como conceitos da temoacumulação de frio e de placas fotovoltaicas geradoras de energia. Tais conceitos servirão para a metodologia desenvolvida da solução ao problema apresentado nesta dissertação. Ainda, a apresentação dos softwares SketchUp e TRNSYS, que foram utilizados na implementação da metodologia.

3.1 LEGISLAÇÃO

3.1.1 Aquisição de bens e serviços na Administração Pública

Por se tratar de um edifício da Administração Pública, algumas regras para a aquisição de bens e serviços devem ser seguidas para que não incorra em erro administrativo. A de maior importância é que a Administração Pública, de modo a observar os princípios da impessoalidade, da igualdade, da isonomia, da publicidade e da transparência, deve realizar todas as suas aquisições de bens e serviços por meio de um processo licitatório adequado ao objeto da contratação.

Embora a definição do processo licitatório exija um estudo aprofundado sobre o objeto da contratação, serviços de manutenção e aquisição de sistemas de climatização e aquisição e instalação de sistemas fotovoltaicos são comumente contratados mediante a modalidade pregão eletrônico. Tal prática está de acordo com o Manual do Pregão Eletrônico do TCU de 2003, que traz alguns exemplos de bens e serviços comuns que podem ser contratados mediante o pregão eletrônico como: aquisição de material de escritório, softwares, aquisição e instalação de sistema de climatização, serviços de manutenção predial entre outros.

De modo a compreender melhor o processo licitatório por meio de pregão eletrônico, analisaremos com maiores detalhes a legislação correlata.

O DECRETO Nº 10.024, DE 20 DE SETEMBRO DE 2019 regulamenta a licitação, na modalidade de pregão, na forma eletrônica, para a aquisição de bens e a contratação de serviços comuns, incluídos os serviços comuns de engenharia. Bens e serviços comuns são definidos como bens cujos padrões de desempenho e qualidade possam ser objetivamente definidos pelo edital, por meio de especificações reconhecidas e usuais do mercado.

Contudo, para a definição do valor estimado da contratação, a INSTRUÇÃO NORMATIVA Nº 73, DE 5 DE AGOSTO DE 2020 dispõe sobre o procedimento administrativo para a realização de pesquisa de preços para a aquisição de bens e contratação de serviços em geral, no âmbito da administração pública federal direta, autárquica e fundacional. Em seu artigo 5º, a IN traz a seguinte orientação:

Art. 5º A pesquisa de preços para fins de determinação do preço estimado em processo licitatório para a aquisição e contratação de serviços em geral será realizada mediante a utilização dos seguintes parâmetros, empregados de forma combinada ou não:

I - Painel de Preços, disponível no endereço eletrônico gov.br/paineldeprecos, desde que as cotações refiram-se a aquisições ou contratações firmadas no período de até 1 (um) ano anterior à data de divulgação do instrumento convocatório;

II - aquisições e contratações similares de outros entes públicos, firmadas no período de até 1 (um) ano anterior à data de divulgação do instrumento convocatório;

III - dados de pesquisa publicada em mídia especializada, de sítios eletrônicos especializados ou de domínio amplo, desde que atualizados no momento da pesquisa e compreendidos no intervalo de até 6 (seis) meses de antecedência da data de divulgação do instrumento convocatório, contendo a data e hora de acesso; ou

IV - pesquisa direta com fornecedores, mediante solicitação formal de cotação, desde que os orçamentos considerados estejam compreendidos no intervalo de até 6 (seis) meses de antecedência da data de divulgação do instrumento convocatório.

§1º Deverão ser priorizados os parâmetros estabelecidos nos incisos I e II.

Ainda, a mesma Instrução Normativa recomenda que para obtenção do preço estimado seja utilizado a média, a mediana ou o menor dos valores obtidos na pesquisa de preços, desde que o cálculo incida sobre um conjunto de três ou mais preços, oriundos de um ou mais dos parâmetros de que trata o art. 5º, desconsiderados os valores inexequíveis, inconsistentes e os excessivamente elevados. De modo a trazer maior clareza na definição da metodologia a ser empregada, a Portaria TCU 444/2018, em seu art. 8º define que:

A estimativa de preços para contratação de serviços sem dedicação exclusiva de mão de obra deverá ser elaborada com base na média aritmética simples de, no mínimo, três referências de preços, obtidas por meio de pesquisa de preços realizada, preferencialmente, em contratos firmados por órgãos ou entidades da Administração Pública, observando-se as disposições contidas no art. 11 desta Portaria

Com isso, os valores referenciais para a aquisição de serviços de aquisição e manutenção de sistemas de climatização e aquisição e instalação de sistemas fotovoltaicos podem ser bem definidos com grande precisão seguindo os parâmetros definidos pela legislação.

3.1.2 Geração Fotovoltaica

A geração distribuída iniciou em 17 de abril de 2012 quando entrou em vigor a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012. Desde então, o consumidor brasileiro pode gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada e inclusive, fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade, ações que aliam economia financeira, consciência socioambiental e autossustentabilidade. (Aneel 2022)

Com o objetivo de reduzir os custos e tempo para a conexão da microgeração e minigeração, compatibilizar o Sistema de Compensação de Energia Elétrica com as Condições Gerais de Fornecimento, aumentar o público-alvo e melhorar as informações na fatura, a ANEEL publicou a Resolução Normativa nº 687/2015 revisando a Resolução Normativa nº 482/2012.

A partir de então, o consumidor tem a opção de gerar a sua própria energia elétrica a partir de fontes alternativas (solar, hidráulica, biomassa ou cogeração qualificada), inclusive disponibilizando o excedente para a rede de distribuição, o qual poderá ser compensado pelo consumo de energia elétrica ativa. Quando a quantidade de energia elétrica gerada for maior do que o consumo total da unidade, haverá um acúmulo de créditos de energia, os quais poderão ser compensados nas faturas dos meses seguintes ou utilizados para abater o consumo de outras unidades consumidoras na área de concessão da mesma distribuidora, desde que previamente cadastradas e de acordo com a caracterização da compensação dos créditos. Os créditos de energia acumulados possuem validade de 60 meses. (CEEE 2022)

Quando tratar-se de unidades consumidoras que dispõem de tarifa horária, como o caso do Grupo A, a energia injetada deve ser utilizada, prioritariamente, para abater o consumo mensal no mesmo período (ponta ou fora ponta). Caso haja sobra, esse saldo será utilizado para reduzir o consumo no outro posto tarifário, após a aplicação de um fator de ajuste.

O fator de ajuste é o resultado da divisão do valor de uma componente da tarifa (a componente TE – Tarifa de Energia) de ponta pela fora de ponta (nos casos do excedente ser originado no posto tarifário ponta), ou da tarifa fora de ponta pela tarifa de ponta, quando o excedente surgir no posto fora de ponta.

A Geração Distribuída pode ser classificada em Micro e da Minigeração Distribuídas de Energia Elétrica.

Microgeração distribuída é classificada como uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75kW, que utilize cogeração qualificada ou fontes de energia renováveis, conectada na rede de distribuição de energia elétrica por meio de instalações de unidades consumidoras. Já a minigeração distribuída, constitui de central geradora de energia elétrica renovável ou de cogeração qualificada que não se classifica como microgeração distribuída e que possua potência instalada entre 75kW e 5MW para fontes despacháveis e menor ou igual a 3 MW para fontes não despacháveis, conectada na rede de distribuição de energia elétrica por meio de instalações de unidades consumidoras.

Contudo, conforme a Resolução Normativa Aneel Nº1.000, de 7 de Dezembro de 2021, a potência instalada da microgeração e da minigeração distribuída fica limitada à potência disponibilizada para a unidade consumidora onde a geração será conectada.

As fontes despacháveis são as hidrelétricas, incluídas aquelas a fio d'água que possuam viabilidade de controle variável de sua geração de energia, cogeração qualificada, biomassa, biogás e fontes de geração fotovoltaica, limitadas, nesse caso, a 3 MW (três megawatts) de potência instalada, com baterias cujos montantes de energia despachada aos consumidores finais apresentam capacidade de modulação de geração por meio do armazenamento de energia em baterias, em quantidade de, pelo menos, 20% (vinte por cento) da capacidade de geração mensal da central geradora que podem ser despachados por meio de um controlador local ou remoto;

Em 06 de Janeiro de 2022 foi promulgada a Lei Nº 14.300, que Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS). Embora já houvesse a possibilidade do consumidor em gerar a própria energia por meio de fontes renováveis, o Marco Legal traz maior robustez jurídico e estabilidade regulatória. Além de outras mudanças, a lei modifica o sistema de compensação de energia elétrica atual. Atualmente, ocorre a compensação de 100% das componentes tarifárias, contudo, algumas componentes deixarão de ser compensadas na conta final. Tal mudança ocorrerá de forma gradual e escalonada de acordo com a regra de transição.

3.2 CONTA DE ENERGIA ELÉTRICA

As modalidades tarifárias são um conjunto de tarifas aplicáveis ao consumo de energia elétrica (kWh) e da demanda de potência contratada (kW). No Brasil, elas são regulamentadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, e são definidas de acordo com o grupo tarifário, segundo os Procedimentos de Regulação Tarifária – PRORET, regulamentado pela RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL Nº 1.003, DE 1º DE FEVEREIRO DE 2022.

Os grupos tarifários são divididos em:

- **Grupo A:** Unidades consumidoras da Alta Tensão (Subgrupos A1, A2 e A3), Média Tensão (Subgrupos A3a e A4), e de sistemas subterrâneos (Subgrupo AS), e
- **Grupo B:** Unidades consumidoras de Baixa Tensão, das Classes Residencial (Subgrupo B1), Rural (B2), Demais Classes (B3) e Iluminação Pública (B4).

As diferentes modalidades tarifárias aplicadas ao Grupo A têm como objetivo um aproveitamento de distribuição melhor e mais racional da energia elétrica, uma vez que regula a estrutura tarifária para “grandes consumidores” em Tarifa Horossazonal Azul e Horossazonal Verde. Tais modalidades de tarifa aplicam preços diferenciados tanto para a demanda de potência quanto para o consumo de energia elétrica, conforme o horário de utilização durante o dia (horário de ponta e fora de ponta) e dos períodos do ano (seco e úmido). As tarifas praticadas durante o horário de ponta, ou no período seco possuem valores superiores aos praticados durante o horário fora de ponta ou úmido. (CELPE 2023).

Já o Grupo B possui duas modalidades tarifárias, que podem ser divididas em tipo Convencional Monômnia, que consiste em tarifa única para o consumo de energia, independente da hora de utilização e Horária Branca, que diferencia o consumo de energia elétrica em horário conforme a utilização durante o dia (postos tarifários), não estando disponível aos grupos B4 e para a subclasse Baixa Renda do grupo B1.

3.2.1 Horário ponta e fora de ponta

A estrutura de aplicação de valores diferenciados durante o dia se deve ao esforço para modular e redistribuir a demanda de carga em horários de alta demanda, conhecidos como horário de ponta, para o horário em que o sistema de distribuição de energia elétrica é menos demandado (horário fora de ponta), reduzindo assim a sobrecarga no sistema durante o período de ponta.

A Figura 10 apresenta a curva de carga horária, em MWh/h, requerida pelo subsistema Nordeste, para o dia 29/06/2022.

O horário de ponta no estado de Pernambuco definido pela concessionária CELPE Neoenergia é composto por 03 (três) horas consecutivas, compreendendo o horário de 17:30 às 20:30, excetuando os dias de sábado, domingo e feriados definidos por lei federal. O horário fora de ponta é composto por todas as horas que não estão compreendidas dentro do horário de ponta.

Figura 10: Curva de distribuição ao longo da demanda ao longo do dia



Fonte: ONS (2022)

3.2.2 Período úmido e seco

No Brasil, a matriz energética elétrica possui grande dependência da geração proveniente dos estoques hídricos dos reservatórios. Embora esta dependência esteja diminuindo, as hidrelétricas foram responsáveis por 46% da produção de energia elétrica no país no ano de 2019 (IEA/Sankey). Com isso, a cobrança de valores maiores nos períodos de seca no país visa incentivar a racionalização e/ou orientação de cargas para o período do ano onde a disponibilidade de água nos reservatórios sejam maiores e consequentemente, uma maior disponibilidade de geração pelas hidrelétricas. Tais artifícios tendem a melhor gestão dos recursos elétricos e fontes de energia, trazendo maior confiabilidade e economia no fornecimento de energia.

O período seco compreende 07 (sete) meses consecutivos, compreendendo o período de maio a novembro, sendo o período úmido composto por 05 (cinco) meses consecutivos, compreendendo o período de dezembro a abril.

3.2.3 Horossazonal azul e verde

Da análise da demanda horossazonal azul ou verde, é preciso destacar os conceitos de demanda de potência contratada e consumo de energia. A demanda contratada de potência é dada em kW ou MW, no qual representa a potência que a unidade consumidora estima que será consumida. A demanda contratada representa um valor fixo na conta de energia elétrica, podendo ter valores diferenciados para os períodos diários de ponta e fora de ponta. O estudo para a demanda contratada deve ser robusta, uma vez que caso a demanda ativa demandada apurada durante o período de medição seja maior que a demanda ativa contratada, o valor da potência demanda pela potência contratada é cobrada pelo dobro do valor de referência. Já o consumo elétrico é dado em kWh, e representa a quantidade de energia consumida durante o período de medição.

A tarifa horossazonal verde é composta por valores diferenciados quanto ao consumo de energia (ponta seca, ponta úmida, fora de ponta seca e fora de ponta úmida) mas com a aplicação de preço único quanto à demanda de potência contratada.

Já a tarifa horossazonal azul é composta por valores diferenciados tanto ao consumo de energia (ponta seca, ponta úmida, fora de ponta seca e fora de ponta úmida) quanto à demanda de potência durante o dia (ponta e fora de ponta).

A tarifa horossazonal visa dar maior previsibilidade ao sistema de distribuição à potência requisitada pelos consumidores nos horários de ponta e fora de ponta. Ainda, visa dar incentivo financeiro aos grandes consumidores que conseguem modular e reduzir a potência demandada durante o horário de ponta.

3.2.4 Valores e preços da tarifa de energia elétrica

Os valores e componentes tarifários são definidos anualmente pela ANEEL por meio das Resoluções Homologatórias, publicadas anualmente para cada distribuidora de energia elétrica. A tarifa vigente atualmente foi definida por meio da REH nº3.055, de 12 de julho de 2022, com fim de vigência em 28/04/2023 (ANEEL 2023)

Tal tarifa é composta por diversos componentes tarifários divididos principalmente em 3 grupos: Potência Contratada, Tarifa de Energia – TE e a Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição – TUSD.

A potência contratada é o valor devido aos grupos A e tem como objetivo definir a potência máxima, em kW, que a unidade consumidora pode utilizar da rede pública. Em

caso de ultrapassagem, a diferença entre a medição e o valor contratado é cobrado o dobro da tarifa.

A Tarifa de Energia – TE corresponde ao valor da energia elétrica consumida durante o período de medição.

A Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição – TUSD corresponde ao valor repassado ao sistema de distribuição pelo uso do sistema. Também abrangem aos custos de instalações, equipamentos e componentes da rede de distribuição utilizados para o transporte da energia com qualidade. Componente importante que compõe os custos da TUSD refere-se ao Fio B, uma vez que a Lei 14.300 definiu que toda a distribuidora deverá ser remunerada deste componente tarifário por toda a energia a ser compensada do sistema de geração, ou seja, toda a energia gerada não consumida instantaneamente, quando do abatimento no faturamento mensal, a unidade geradora deverá remunerar a concessionária por meio da componente tarifária Fio B da TUSD. Contudo, tal remuneração será válida apenas para projetos homologados a partir de 07 de Janeiro de 2023 (excluídos os já existentes) e será escalonado até o ano de 2029, conforme o art. 27 da Lei 14.300.

- I - 15% (quinze por cento) a partir de 2023;
- II - 30% (trinta por cento) a partir de 2024;
- III - 45% (quarenta e cinco por cento) a partir de 2025;
- IV - 60% (sessenta por cento) a partir de 2026;
- V - 75% (setenta e cinco por cento) a partir de 2027;
- VI - 90% (noventa por cento) a partir de 2028;

A Tabela 3 apresenta todas as componentes tarifárias que compõe a tarifa referente ao Grupo A4 Horossazonal Verde, extraídas do Portal de Relatórios da Aneel para a distribuidora Neoenergia Pernambuco.

Tabela 3: Componentes tarifários da tarifa do Grupo A4 - Horossazonal Verde

Componente Tarifária	Posto	Unidade
TUSD_SUBSIDIO	Não se aplica	kW
TUSD_CUSD	Não se aplica	kW
TUSD_CCT	Não se aplica	kW
TUSD_FR	Não se aplica	kW

TUSD_RB	Não se aplica	kW
TUSD_FioB	Não se aplica	kW
TUSD_SUBSIDIO	Fora ponta	MWh
TUSD_ONS	Fora ponta	MWh
TUSD_TFSEE	Fora ponta	MWh
TUSD_PeD	Fora ponta	MWh
TUSD_Per_RB_D	Fora ponta	MWh
TUSD_CDE_COVID	Fora ponta	MWh
TUSD_PT	Fora ponta	MWh
TUSD_PROINFA	Fora ponta	MWh
TUSD_PNT	Fora ponta	MWh
TUSD_CDE	Fora ponta	MWh
TUSD_SUBSIDIO	Ponta	MWh
TUSD_ONS	Ponta	MWh
TUSD_TFSEE	Ponta	MWh
TUSD_Per_RB_D	Ponta	MWh
TUSD_CUSD	Ponta	MWh
TUSD_CDE_COVID	Ponta	MWh
TUSD_PeD	Ponta	MWh
TUSD_PT	Ponta	MWh
TUSD_PROINFA	Ponta	MWh
TUSD_CCT	Ponta	MWh
TUSD_PNT	Ponta	MWh
TUSD_CDE	Ponta	MWh
TUSD_FR	Ponta	MWh
TUSD_RB	Ponta	MWh
TUSD_FioB	Ponta	MWh

Fonte: Aneel (2023)

Já os preços de energia elétrica são obtidos após a incidência dos tributos federal e estadual. Os respectivos tributos federais são PIS e COFINS, tributos voltados ao financiamento de programas sociais e ao trabalhador e são apurados mensalmente pelas concessionárias. Devido a flutuação dos percentuais ao longo dos meses, serão utilizados os percentuais aplicados à fatura do mês de Janeiro de 2023. O tributo estadual incidente na tarifa de energia é o Imposto sobre a Circulação de Mercadoria e Serviços (ICMS), definido por Lei estadual. Contudo, no ano de 2022, o Supremo Tribunal Federal limitou a alíquota do ICMS incidente para energia elétrica para a alíquota das operações em geral,

que vem sendo aplicado atualmente. A Tabela 4 apresenta os tributos e as alíquotas aplicadas para o mês de janeiro de 2023.

Tabela 4: Tributos e alíquotas aplicadas para o estado de Pernambuco no mês de Janeiro de 2023

Tributo	Alíquota (%)
PIS	0,72
COFINS	3,33
ICMS	18

Fonte: O autor (2023)

Com isso, o preço da tarifa de energia elétrica é calculada por meio da seguinte equação:

$$Preço = Tarifa \cdot \left(\frac{1}{1 - (PIS + COFINS + ICMS)} \right) \quad (1)$$

3.3 CICLO FRIGORÍFICO POR COMPRESSÃO DE VAPOR

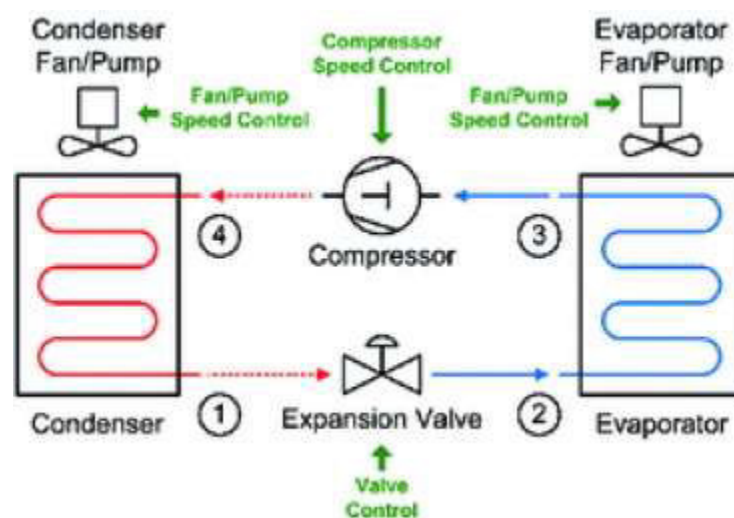
Os sistemas de refrigeração que utilizam o ciclo de refrigeração por compressão de vapor são amplamente utilizados para prover a climatização e refrigeração para uso doméstico, edifícios comerciais, supermercados, data centers, etc. (She et al. 2018) Tal cenário também é refletido na Administração Pública, onde são utilizados majoritariamente os sistemas do tipo *Split System* e Janela para suprir a climatização dos ambientes corporativos. No entanto, podemos encontrar também o uso de self contained, *Chillers* e VRF (Variable Refrigerant Flow), sendo este último bastante utilizado nos últimos anos devido a sua elevada eficiência energética, apesar do seu custo inicial de implantação mais alto.

O sistema de refrigeração por compressor de vapor é composto por 4 componentes principais: compressor, condensador, válvula de expansão e evaporador. O ciclo ideal é dado pela seguinte ordem: vapor saturado a baixa pressão proveniente do evaporador entra no compressor e sofre uma compressão adiabática reversível. O vapor então tem sua temperatura e pressão elevadas e encaminhado ao condensador onde então o calor é rejeitado a pressão constante, e o fluido de trabalho deixa o condensador como líquido

saturado. O próximo processo é um estrangulamento adiabático, onde o fluido tem sua pressão reduzida e então é conduzido ao evaporador onde absorverá calor do ambiente a ser climatizado e é vaporizado a pressão constante, completando o ciclo. (Gordon et. al 1995).

A Figura 11 apresenta esquematicamente um sistema de compressão de vapor simplificado com os 4 componentes básicos.

Figura 11: Sistema VCR simples



Fonte: Sivaraman et al. (2021)

A eficiência dos equipamentos com compressão de vapor é dada em função do coeficiente de performance do equipamento (COP), conforme a equação 2, que consiste na divisão entre quantidade de calor retirada/inserida pela quantidade de energia consumida pelos dispositivos elétricos (compressores, ventiladores, etc.).

$$COP = \frac{\dot{Q}_{\text{evaporador}}}{\dot{W}_{\text{compressor}}} \quad (2)$$

Conforme Bilgili (2011), durante a operação dos dispositivos de refrigeração por compressão de vapor, o coeficiente de performance é afetado pelos parâmetros funcionamento de temperatura de condensação e evaporação. O COP possui relação direta com a diminuição da temperatura de evaporação, pois quanto menor a temperatura de evaporação, menor será o COP. Dado importante, uma vez que a temperatura de

evaporação pode ser muitas vezes controlada pelo operador. Já a temperatura de condensação possui relação inversa com o COP, pois quanto maior a temperatura de condensação, menor o COP. No entanto, a temperatura de condensação está atrelada ao clima local, o que torna difícil a sua manipulação.

3.3.1 Split System

Os sistemas split system, juntamente com os equipamentos do tipo janela são os tipos de condicionadores de ar por compressão de vapor mais simples e, assim como na Europa e Ásia, os equipamentos do tipo *split system* não dutados são facilmente encontrados na climatização nos edifícios residenciais e comerciais no Brasil. Neste sistema, a unidade externa (compressor, ventilador e serpentina) é responsável por prover o refrigerante frio ou aquecido para a unidade interna. As unidades internas, que podem ser do tipo parede, piso-teto ou cassete, contém um ventilador de ar que recircula o ar do ambiente para o trocador de calor interno, e o ar aquecido ou resfriado é redistribuído para o ambiente. Os sistemas *split system* diferem das bombas de calor convencionais pois são tipicamente menores, normalmente não são conectados com sistemas de dutos para atender a toda uma edificação, por exemplo, e podem ter mais de uma unidade interna sendo atendido por uma única unidade externa, sistemas multi-split. (Ashley 2020).

Atualmente, os condicionadores de ar do tipo split system mais eficientes contam com o sistema inverter, que consiste na tecnologia que utiliza compressores e ventiladores com velocidades variáveis, o que permite a redução das perdas do ciclo de refrigeração e aumentando o controle de carga parcial. (Winkler, 2011). Quando aplicada em sistemas multi-split, a tecnologia é denominada sistemas VRF – *Variable Refrigerant Flow*.

Embora sejam mais eficientes, por ser uma tecnologia relativamente nova e com custo de aquisição maior, não é comum encontrar tais tecnologias instaladas, sendo os sistemas convencionas de rotação fixa amplamente encontrados na Administração Pública.

Da análise do COP dos condicionadores de ar novos de rotação fixa, no ano de 2022, 185 climatizadores de ar do tipo split system, com capacidades entre 30.000 e 60.000 BTU/h, somente frio, com gás refrigerante R410, foram registrados no Instituto

Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – Inmetro. Destes, a média aritmética do Coeficiente de Performance (COP) foi de 3,133.

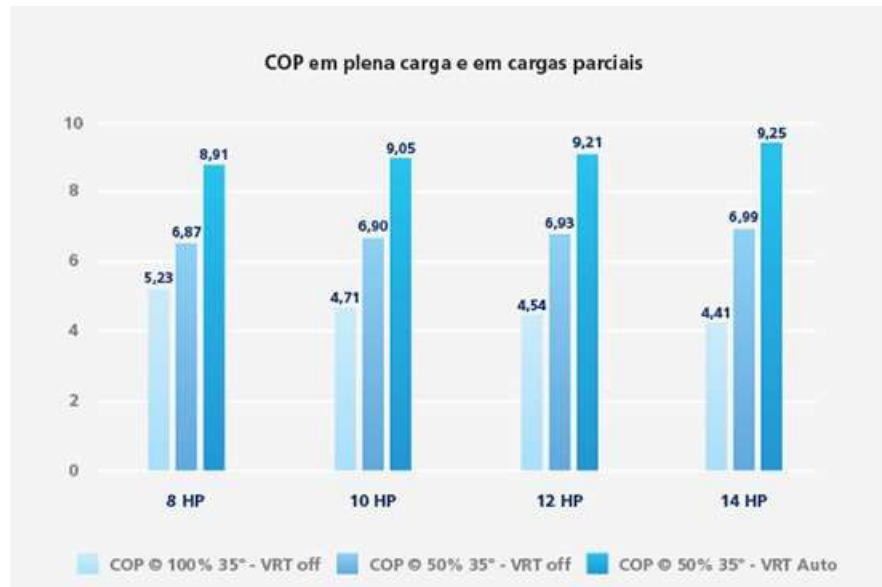
O COP é determinado através de ensaio a plena carga, com as seguintes características: Temperatura externa: temperatura de bulbo seco de 35°C, temperatura de bulbo úmido de 23,9°C e temperaturas internas: temperatura de bulbo seco de 26,7°C e temperatura de bulbo úmido de 19,4°C, conforme tabela II, no Anexo III da Portaria n.º 007, de 04 de janeiro de 2011. (INMETRO 2022)

3.3.2 Variable Refrigerant Flow – VRF

O sistema de fluxo de refrigerante variável (ou *Variable Refrigerant Flow – VRF*) é a classificação de sistemas multi-split que permitem o controle do fluxo de refrigerante para diferentes zonas térmicas de acordo com as suas necessidades. Os sistemas VRF possuem muita semelhança com as bombas de calor, podendo ser resfriados a ar ou a água, contudo, se diferem principalmente quanto à operação com diversas unidades internas e a não necessidade de instalação de dutos para a distribuição de ar.

Embora o sistema VRF seja baseado no sistema de compressor de vapor com expansão direta, o sistema possui algumas particularidades. O principal avanço tecnológico destes sistemas são a utilização de válvulas de expansão eletrônica e conjunto de compressores com rotação variável em face das válvulas de expansão comum e compressores de rotação fixa. Com isso, todo o sistema pode ser controlado e operado em conjunto com inversores de frequência que controlam o compressor, modulando o seu funcionamento de modo a compatibilizar com as demandas das diferentes zonas térmicas, e consequentemente aumentando a eficiência energética do equipamento. Desta forma, o equipamento pode permanecer ligado durante todo o tempo da climatização do local, de modo oposto aos equipamentos que operam em carga total, os quais operam no modo liga desliga em curtos períodos de tempo. (Hernandez III, 2020). A Figura 12 apresenta uma unidade condensadora VRV da Daikin a), e a comparação do COP do equipamento operando em carga total e cargas parciais.

Figura 12: Condensadora VRF Daikin e COP em plena carga e cargas parciais



Fonte: Daikin (2022)

Com a possibilidade de funcionamento em cargas parciais, o sistema permite a variação da temperatura de evaporação ou condensação do refrigerante, conforme o uso, de modo a diminuir a diferença de temperatura de evaporação e condensação, aumentando assim a eficiência dos equipamentos.

Dessa maneira, os sistemas VRF possuem elevada eficiência em cargas parciais, podendo ser encontrados equipamentos com COP's em cargas parciais da ordem de 9,25. (Daikin 2022).

3.3.3 Chiller – Resfriadores de água

Os Chillers são equipamentos conhecidos também como resfriadores de água. Diferentemente dos outros equipamentos já citados, possuem diversas tecnologias para o resfriamento da água, sendo as mais conhecidas por compressão de vapor refrigerante e por absorção, tendo como principal diferença o tipo de energia que utilizam para o seu acionamento e, portanto, na produção de frio. O chiller por compressão a vapor, assim como os demais equipamentos apresentados, tem como principal fonte de energia a elétrica, que utiliza para o acionamento dos compressores. Já os chiller de absorção utilizam como principal fonte de energia, a energia térmica. Dado a necessidade de disponibilidade de energia térmica contínua e maior tecnologia de manutenção, operação

e controle do equipamento, estes equipamentos são mais utilizados em plantas com maior desenvolvimento tecnológico, como a cogeração de energia, aproveitando principalmente o calor residual de processos para maximizar a eficiência da instalação como um todo.

Por possuírem capacidades nominais de maior potência, facilmente encontrados capacidades nominais de 300 TR por equipamento e conseqüentemente maior necessidade de dissipação de energia térmica ao ambiente externo, pode ser encontrado chillers com condensação a ar ou a água, sendo este último apresentando eficiência do ciclo maior. Contudo, ocorre a necessidade de instalação de torres de resfriamento de água ou de poços geotérmicos, devendo se levar em conta a disponibilidade de espaço, o fornecimento de água para resfriamento bem como do custo adicional de implantação e manutenção do dispositivo.

Possuem a característica de expansão indireta, ou seja, a expansão do fluido refrigerante ocorre em um meio intermediário entre o ar ambiente e o evaporador do equipamento. Tal fluido intermediário normalmente utilizado é a água, ou uma mistura entre água e aditivos, a depender da temperatura de operação.

Com isso, assim como as bombas de calor, são amplamente empregados em conjunto com a tecnologia de termoacumulação de frio. No Brasil, tais instalações de chillers por compressão a vapor e sistemas de termoacumulação podem ser facilmente encontrados em instalações comerciais do tipo shopping centers. Um exemplo é o Shopping Pátio Pina, que conta com um sistema de climatização instalado que totaliza 720 TR de capacidade e é formado por uma central de água gelada (CAG), composta por três unidades resfriadoras (water chiller) com condensação a ar, sistemas primário e secundário de bombeamento e termoacumulação de água gelada. O tanque de termoacumulação de água gelada foi implantado com o objetivo de redução de demanda e do custo de energia elétrica.

Vários autores utilizaram o chiller ou bomba de calor na abordagem para acumulação de energia térmica. (Arteconi, 2016, Hu 2022, Xialoin 2015 chiller + pcm)

Figura 13: Chiller Daikin
resfriado a água



Fonte: Daikin (2022)

3.4 TERMOACUMULAÇÃO

O armazenamento de energia térmica (TES) é uma tecnologia que ao aquecer ou resfriar um material (ou meio de armazenamento), acumula energia temporariamente para que possa ser usada posteriormente. (Sarbu e Sebarchievici 2018, Sarbu e Dorca 2019). O armazenamento de energia térmica pode ser obtido de três maneiras distintas: armazenamento de calor sensível, latente ou termoquímico, sendo as principais diferenças entre esses métodos o meio de armazenamento e a temperatura de operação (Dincer e Rosen 2011).

Em sistemas TES por calor sensível a energia é estocada através da variação de temperatura do meio de armazenamento, podendo este ser sólido ou líquido. A quantidade de energia armazenada é dependente da quantidade de meio de armazenamento (m), do calor específico do material (C_p) e do gradiente de temperatura (ΔT), e é determinada pela equação 3. A água é o meio de armazenamento mais comum, devido a sua disponibilidade e custo. (Liu, et al. 2016, Sarbu e Dorca 2018) Durante este processo não há mudança de fase do meio de armazenamento, tendo então suas aplicações limitadas às temperaturas de evaporação e solidificação.

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (3)$$

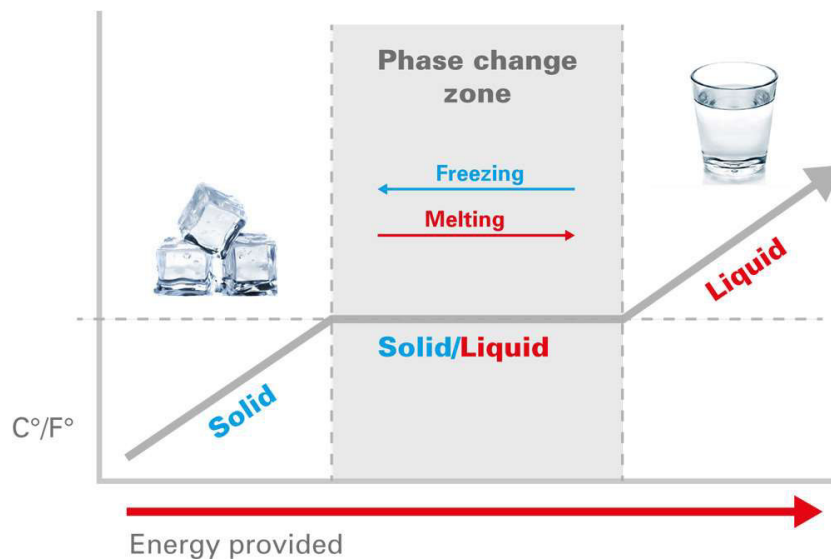
Já os sistemas de armazenamento por calor latente operam nas temperaturas de mudança de fases do material utilizado como meio de armazenamento de energia, onde a energia térmica é armazenada ou recuperada durante o processo de transição de fase do meio utilizada, seja fundindo o material sólido para líquido ou solidificando do líquido para o sólido. (TAO et al. 2018) Embora seja teoricamente possível a aplicação na região líquido-vapor, devido as dificuldades técnicas de operação e construção, não é comum a sua aplicação, mesmo com uma densidade de energia mais elevada. A quantidade de energia térmica armazenada por calor latente por ser definida pela equação 4.

$$Q_L = m \cdot \Delta h \quad (4)$$

É importante observar a maior quantidade de energia térmica que pode ser armazenada utilizando a mudança de fase do material. Embora não ocorra mudança de temperatura do material, uma grande densidade de energia pode ser armazenada durante o processo de transformação de fase. Tal característica é uma das principais vantagens que diferem o calor sensível do calor latente.

Um dos principais materiais utilizados no armazenamento por calor latente é a água, com aplicação usual para refrigeração e climatização de ambientes na produção de gelo. Durante o processo de carregamento do sistema, a água no estado líquido tem sua temperatura reduzida mediante a retirada de calor até a temperatura de fusão. Embora o sistema continue a retirar calor da água, a temperatura permanece constante até a completa transformação da fase líquida para sólido. Durante esse processo o armazenamento de energia é feito por calor latente, Figura 14. (ClimSel 2021). O processo de descarregamento de energia se dá na forma inversa. O processo descrito acima é válido para todos os materiais que são utilizados nessa tecnologia.

Figura 14: Perfil da temperatura durante armazenamento de energia sensível e latente



Fonte: ClimSel (2021)

Durante o processo de carregamento e descarregamento do sistema, pode-se observar que durante a temperatura de mudança de fase, o material permanece à temperatura constante, até a sua completa mudança de fase. Tal propriedade do material é de suma importância, uma vez que define qual a faixa de temperatura este material pode ser utilizado. No caso de um termoacumulador utilizando água como material de trabalho, essa faixa de temperatura de operação deve contemplar o ponto de fusão da água, em torno de 0°C à pressão atmosférica.

A seleção adequada da tecnologia de TES depende de diferentes parâmetros como a temperatura da fonte de energia, características da demanda térmica, disponibilidade de fonte de energia, espaço para instalação, disponibilidade do meio de armazenamento e custos de implantação. Tais diferenças entre as tecnologias de TES e a falta de padronização fazem do procedimento de seleção da tecnologia mais adequada uma tarefa difícil. (Romani et al. 2019)

Em aplicações para climatização, tais sistemas são normalmente categorizados como armazenamento por água gelada, PCM e armazenamento em edificações. Contudo, o armazenamento por água gelada possui vantagens como: menor custo, controles mais simples, flexível a mudanças e ser compatível com sistemas convencionais de climatização (Hu et al. 2022), como por exemplo chillers e bombas de calor.

3.5 PLACAS FOTOVOLTAICAS

A energia solar pode ser aproveitada diretamente através da conversão da radiação solar em sistemas térmicos, fotovoltaicos para geração de eletricidade e/ou híbridos. Dentre os sistemas de conversão de energia solar em energia elétrica, o mais utilizado são os sistemas fotovoltaicos sem concentrador de energia, os painéis fotovoltaicos. Tais sistemas são facilmente encontrados nos telhados de residências, indústrias, em coberturas de estacionamento e usinas solares.

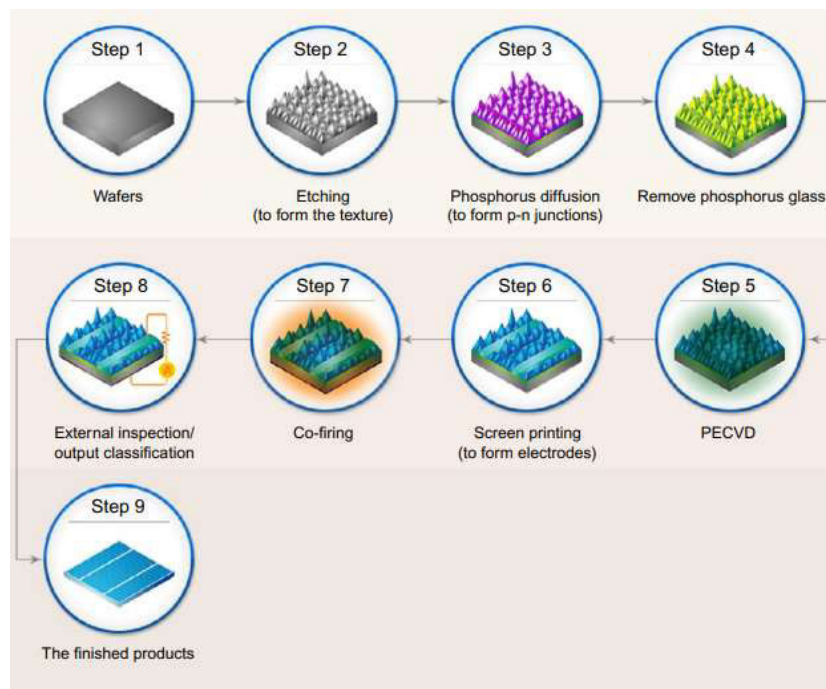
Os painéis fotovoltaicos são compostos por um conjunto de células fotovoltaicas, dispostos sobre uma estrutura rígida e conectadas eletricamente. O efeito fotovoltaico é o fenômeno físico que permite a conversão direta da luz em eletricidade. Ocorre quando a radiação eletromagnética do sol incide sobre uma célula composta de materiais semicondutores com propriedades específicas. (VILLALVA 2015)

A tecnologia fotovoltaica (FV) pode ser dividida entre três grandes categorias: primeira geração, segunda geração e terceira geração. As células solares de primeira geração são baseadas principalmente na tecnologia de silício cristalino, o que representa atualmente mais de 85% da indústria com tecnologia dos módulos policristalinos, monocristalinos e multicristalinos. A segunda geração de células solares são baseadas principalmente na redução dos materiais e de consumo e exploração de novos materiais. A terceira geração é baseada nas células solares sensibilizadas por corante (DSSC), materiais orgânicos e nanoestruturais. (Sundaram, Mallick, Benson 2016 BOOK Solar PV Tec Prod)

As células fotovoltaicas monocristalinas são produzidas a partir do silício de alta pureza utilizando o processo de Czochralski. Devido às condições de construção serem mais lentas e com condições muito controladas, faz com que esta tecnologia de produção seja cara que os outros tipos de células fotovoltaicas, contudo com uma eficiência maior. (Charpter 9, 2016 e Sundaram book 2016).

As células de silício monocristalino é produzido em diferentes arquiteturas para aumentar sua estabilidade e eficiência. A sequência para a produção de células solares de silício é mostrada na Figura 15.

Figura 15: Processo de fabricação de células fotovoltaicas de silício



Fonte: Sundaram et al. (2016)

Este é o método mais comum para manufaturar painéis fotovoltaicos de silício. A fabricação dos cristais de silício é iniciada com *wafers* puro de silício, normalmente com 300 μm de espessura. A limpeza ou remoção de impurezas é vital para que o crescimento da célula evite problemas de recombinação. Os *wafers* são cobertos por uma camada antirreflexiva.

Quanto a eficiência, com o crescente desenvolvimento tecnológico, os painéis fotovoltaicos vêm se tornando gradativamente mais eficientes. Nos últimos 5 anos, a média de eficiência saiu dos painéis saltou de 15% para 20%. Atualmente, os painéis fotovoltaicos residenciais com a maior eficiência no mercado possuem cerca de 22,8% de eficiência na conversão fotovoltaica. A Figura 16 traz os 10 painéis fotovoltaicos mais eficiências disponíveis no mercado americano no ano de 2022.

É válido ressaltar que a performance do painel fotovoltaico é realizada mediante condições de teste padrão (STC). Tal condição padrão é: irradiância de 1000 W/m^2 , AM de 1,5 e temperatura do módulo de 25°C . Contudo, nas instalações usuais, a temperatura da célula fotovoltaica facilmente encontrada em temperaturas superiores à padrão. Durante os dias ensolarados, a temperatura atinge cerca de 20 a 30°C acima da temperatura

ambiente, o que acarreta numa redução média de 8 a 15% da potência da célula. (Clean Energy Reviews 2022).

Figura 16: Painéis fotovoltaicos residenciais mais eficientes no mercado americano no ano de 2022.

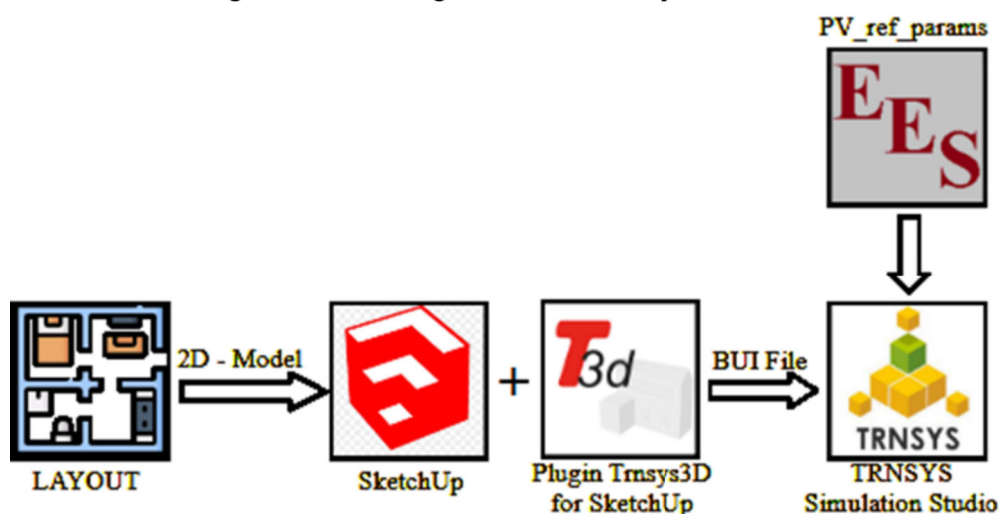
 Most Efficient Solar Panels 2022 * V3.2 - Mar 2022				
Manufacturer	Model	Max power (W)	Cell Type	Efficiency
SUNPOWER	Maxeon 6	440W	N-type IBC	22.8 %
 CanadianSolar	CS6R-MS	440W	N-type HJT Half-cut	22.5 %
 LG	Neon R	405W	N-type IBC	22.3 %
 Panasonic	EverVolt H	410W	N-type HJT Half-cut	22.2 %
 JINKO Solar	Tiger NEO	480W	N-Type TOPcon Half-cut	22.2 %
 SPIC	Andromeda 2.0	435W	N-type IBC Half-cut	22.1 %
 REC Solar	Alpha Pure	405W	N-type HJT Half-cut	21.9 %
 Trinasolar	Vertex S +	425W	N-Type Mono Half-cut	21.9 %
 MEYER BURGER	White	400W	N-type HJT Half-cut	21.7 %
 JA SOLAR	Deep Blue 3.0 light	420W	P-Type Mono Half-cut	21.5 %

Fonte: Clean Energy Reviews (2022)

3.6 PLATAFORMAS COMPUTACIONAIS

Para a implementação da simulação, foram utilizados os softwares SketchUp com o plugin Trnsys3D, o programa computacional PV_ref_params desenvolvido no software Engineering Equation Solver e o TRNSYS. O fluxograma da utilização dos softwares estão descritos na Figura 17.

Figura 17: Fluxograma da utilização dos softwares



Fonte: O autor (2023)

3.6.1 SketchUp

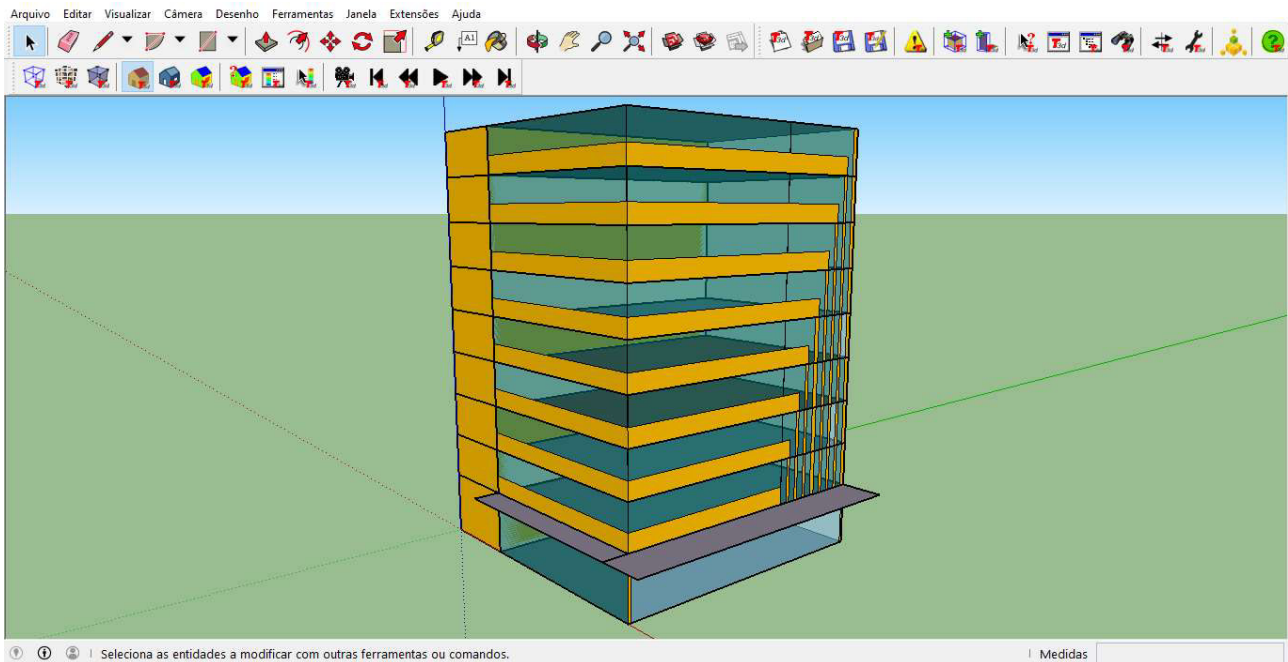
O SketchUp é um software de desenho assistido por computador (DAC ou CAD *Computer Aided Design*) licenciado pela empresa TRIMBLE. Assim como os demais softwares de desenho por computador, é amplamente empregado na criação de maquetes virtuais, permitindo a criação de ambientes e objetos em 3D e facilitando a apresentação de projetos.

Contudo, na área de pesquisa e engenharia, o SketchUp possui grande vantagem, uma vez que além da facilidade de construção de modelos 3D do objeto a ser estudado, possui integração com outros softwares utilizados na simulação energética, como OpenStudio, EnergyPlus, TRNSYS, entre outros.

Por meio da utilização do *plugin Trnsys3d* instalado junto à interface do SketchUp, é possível a construção da maquete em 3D do edifício e a inserção automática do modelo geométrico no ambiente de simulação do TRNSYS. Tal plataforma oferece grande vantagem ao usuário, uma vez que é possível construir modelos integrados com os projetos arquitetônicos, e com isso, maior nível de detalhamento da edificação na simulação térmica. Automaticamente é inserido as dimensões das janelas e portas interiores e exteriores, sombreamento da edificação, divisão por zonas térmicas independentes, direcionamento da fachada, etc.

A Figura 18 apresenta a maquete eletrônica modelada do edifício da superintendência regional nordeste do INSS no Sketchup.

Figura 18: Maquete eletrônica elaborada no sketchup com plugin Trnsys3d

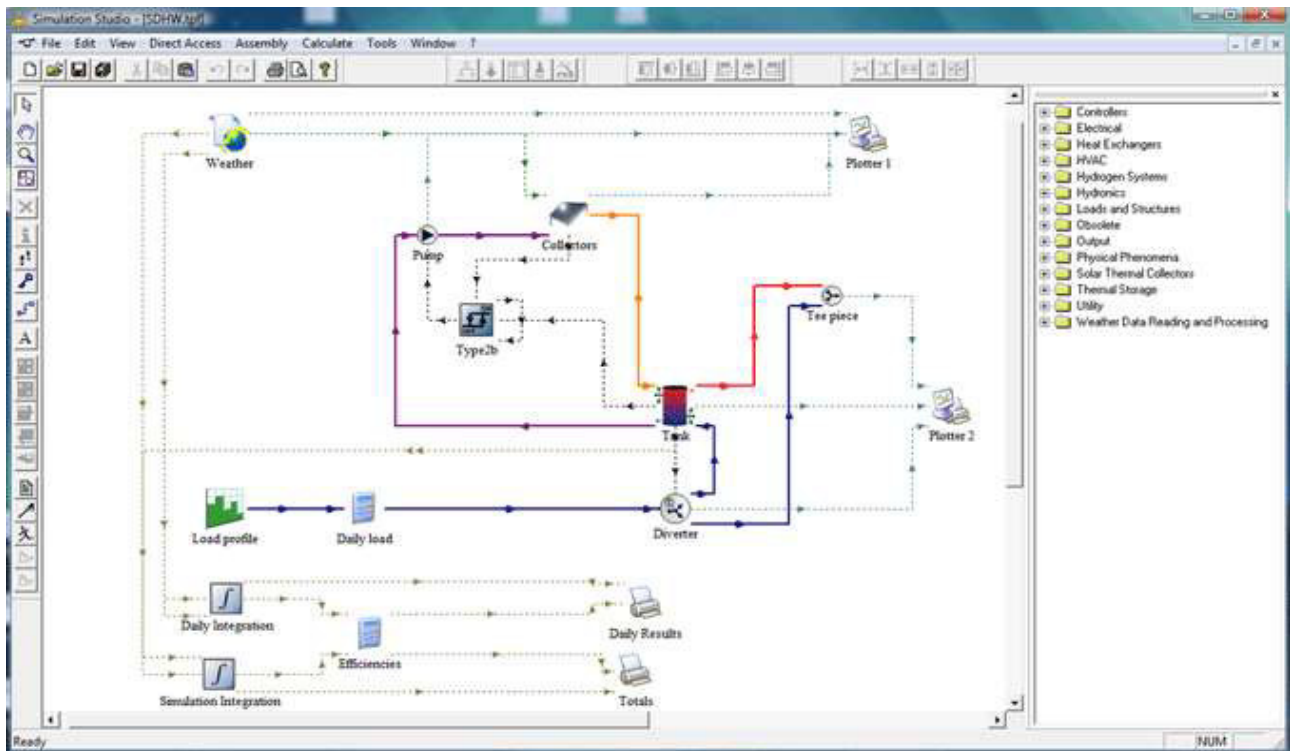


Fonte: O autor (2023)

3.6.2 TRNSYS

TRNSYS (a **Tra**Nsient **SY**stems **Simulations** Program) é um pacote de software comercial desenvolvido pela Universidade de Wiscosin, nos Estados Unidos, voltado para a simulação de sistemas transitórios com estrutura modular para o desenvolvimento e solução das simulações. O software possui um pacote de interface gráfica intuitiva para o usuário criar simulações (Simulation Studio), interface detalhada para edificações com múltiplas zonas térmicas (TRNBBuild/Type56), plugin para o software SketchUp para a criação de modelos geométricos 3D com múltiplas zonas térmicas (Trnsys3d) e ferramentas para editar manualmente os dados de entrada e criar módulos/aplicativos independentes baseados na rotina do TRNSYS (TRNEdit/TRNSED). A Figura 19 apresenta a interface gráfica do Simulation Studio.

Figura 19: Interface gráfica Simulation Studio



Fonte: TRNSYS (2022)

A estrutura modular permite ao TRNSYS grande flexibilidade e facilidade de incluir às simulações, eventuais componentes indisponíveis na biblioteca do programa por meio da modelos matemáticos dos sistemas.

O programa possui uma biblioteca integrada com uma grande variedade de componentes que são comumente empregados em sistemas energéticos térmicos e elétricos, bem como rotinas de base de dados climáticos, rotinas dependentes de horários, dias, e impressão dos resultados das simulações.

Ao longo do tempo, o software TRNSYS se tornou referência para pesquisadores e engenheiros ao redor do mundo.

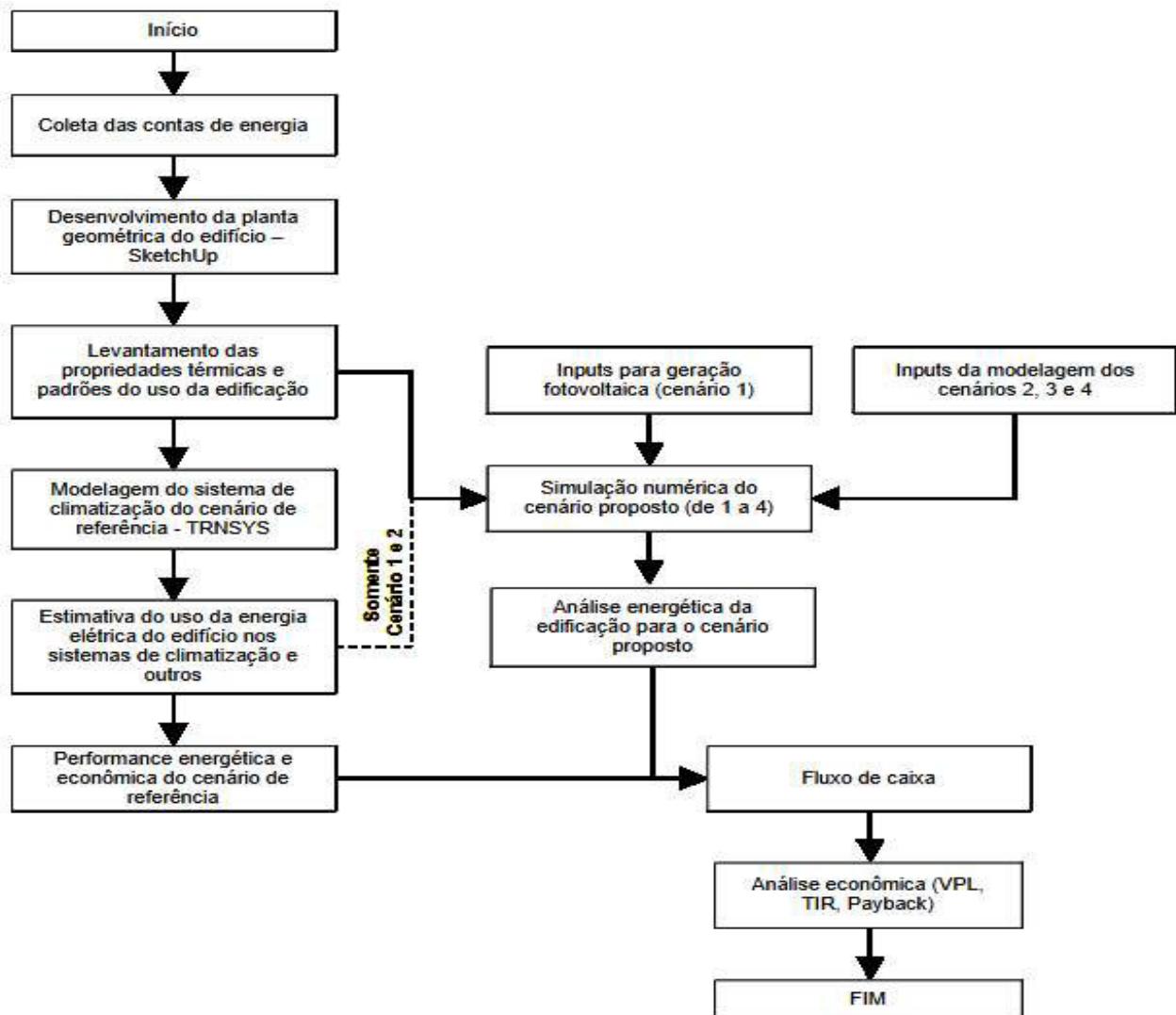
Sua aplicação principal inclui: sistemas solares (solar térmico e sistemas fotovoltaicos), edifícios com baixo consumo energético e sistemas de climatização de ar, sistemas de energia renováveis, cogeração e de células de combustível.

Contudo, apesar de ser amplamente utilizado em simulações de processos de energia solar e outras energias renováveis para o uso em edificações de alta performance e plantas de geração de energia, devido a sua robustez, pode ser empregado nas mais diversas aplicações.

4 METODOLOGIA

Este capítulo tem como objetivo a definição da metodologia aplicada no desenvolvimento desta dissertação. De modo a facilitar a compreensão e leitura, a metodologia empregada foi disposta de forma cronológica, de acordo com o desenvolvimento do trabalho. Aborda o trabalho inicial de compilação de dados referentes ao consumo de energia elétrica do edifício por meio da análise das contas de energia da distribuidora Neoenergia. Em seguida, foi desenvolvido o modelo geométrico do edifício no software SketchUp através das plantas disponibilizadas pelo setor de arquitetura da autarquia. Em seguida foi realizado o levantamento das propriedades térmicas e padrões de uso da edificação. Foi desenvolvida a modelagem numérica do sistema de climatização com o cenário de referência split usados e a estimativa do consumo de energia pelo sistema de climatização. Tais resultados foram comparados com os dados da coleta do uso da energia do edifício inicial do trabalho. Então, foi definida o padrão e a performance energética e econômica do cenário de referência. Posteriormente, após a validação da modelagem do edifício, foi desenvolvido para cada cenário um sistema de geração fotovoltaico e climatização novos, conforme será proposto posteriormente. Após a análise energética do cenário em estudo, foi realizada a comparação com os dados de performance energética e econômica do cenário de referência, para a definição do fluxo de caixa e posteriormente o cálculo dos parâmetros econômicos de VPL, TIR e payback. O fluxograma do desenvolvimento do trabalho está disposto na Figura 20.

Figura 20: Fluxograma da implementação da metodologia



Fonte: O autor (2023)

4.1 LEVANTAMENTO DA DEMANDA ENERGÉTICA

O estudo do consumo de energia elétrica demandada pelo prédio iniciou pelo levantamento das contas de energia elétrica da distribuidora CELPE Neoenergia. Ao todo, foram coletados 14 faturamentos de energia consecutivos, compreendendo o período de setembro/2018 ao mês de outubro/2019.

De modo a analisar a influência das mudanças de estações e do perfil de ocupação da edificação no consumo de energia do edifício, foi definido o perfil anual do consumo de energia do edifício através da extração do quantitativo do consumo ativo do horário de

ponta e fora de ponta e distribuídos em ordem crescente de janeiro a dezembro. Os meses cujo constatado duplicidade de dados, o valor adotado foi a média aritmética dos dados obtidos. Junto ao gráfico dos dados de consumo, foram dispostos a temperatura média compensada mensal (INMET 2022).

Para a análise do consumo médio mensal e o desvio padrão das amostras, foram analisados os 14 faturamentos de energia disponíveis. Ainda, foram analisados separadamente os consumos ativos nos horários de ponta e fora de ponta, bem como o valor monetário que tais parcelas representam na conta de energia final.

Os dados obtidos serão utilizados de modo a validar a simulação, a partir da comparação com a simulação do caso base, demanda de climatização atendida por *split system*, de modo a obter um parâmetro de comparação da edificação.

4.2 MODELAGEM DO EDIFÍCIO

O edifício a ser analisado está localizado na região nordeste do Brasil, na cidade de Recife, Pernambuco. O prédio é composto por 9 pavimentos, sendo distribuído em térreo mais oito andares superiores. Sua ocupação é caracterizada como uso para escritório, sendo utilizado como a sede da Superintendência Regional do Nordeste da autarquia federal do Instituto Nacional do Seguro Social. Os pavimentos possuem composição semelhante ao longo dos 8 andares superiores, podendo ser divididos em 2 zonas climáticas: a zona climatizada, que é composta por 3 salas do tipo escritório; e a não-climatizada, composta por casa de máquinas, elevador, escada, sanitários, copa e circulação. Com exceção do pavimento térreo, no qual pode ser dividida em: zona climatizada composta por recepção, atendimento e protocolo, e zona não climatizada composta por casa de máquina, sanitários, elevador e escadaria.

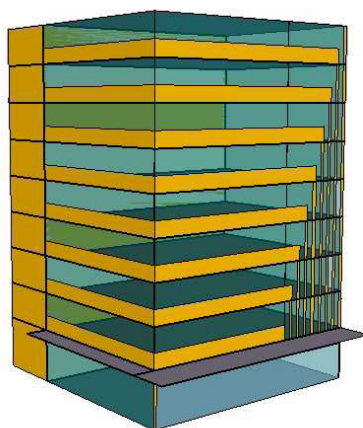
O terreno do edifício possui 320 m² de área total, com área construída projetada ao solo de 259,20 m², sendo a fachada de 16,05 metros frontal e 16,15 metros de lateral, o que resulta em uma área de telhado de 259,20 m² e aproximadamente 1.668,40 m² de área climatizada. A fachada principal é direcionada a leste. Os pavimentos possuem pé direito de 2,50 metros.

4.2.1 Construção do modelo 3D

O início da simulação se deu a partir da construção da maquete eletrônica da edificação, que foi realizada por meio do software Google SketchUp através do *plugin* Trnsys3d. Para isto, foram obtidas as plantas de construção e layout do edifício, disponibilizadas pelo setor de engenharia do instituto, onde foram extraídas todas as informações relativas à construção do edifício e sua ocupação necessária para a simulação.

O software SketchUp permite a construção de modelos em três dimensões contendo a definição detalhada do edifício. A partir deste modelo, todas as informações relacionadas à geometria do edifício como área de construção, volume das zonas térmicas, área de janelas e paredes, bem como a sua orientação de fachadas são automaticamente importadas para dentro do ambiente de simulação do software TRNSYS. A extensão do arquivo elaborado deve ser salvo em formato *.idf*, de modo a permitir a integração com o software TRNSYS. A Figura 21 apresenta o modelo 3D da edificação elaborada pelo software SketchUp.

Figura 21: Modelagem 3D –
SketchUp edifício em estudo

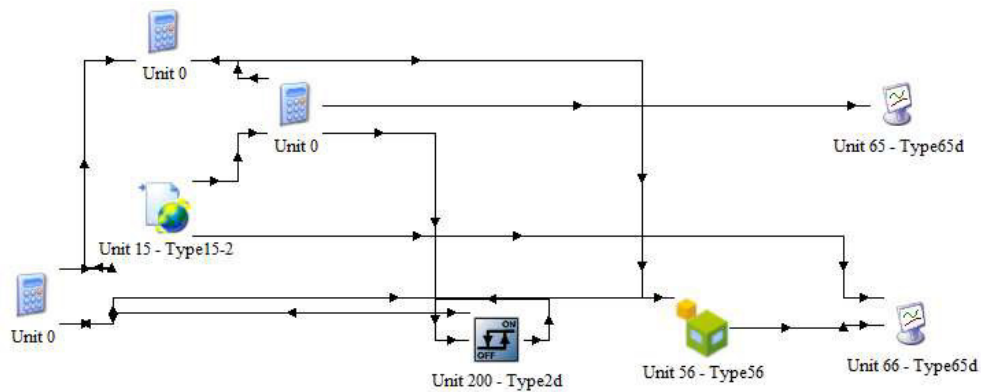


Fonte: O autor (2023)

A importação do modelo geométrico para o ambiente de simulação *Simulation Studio* é feita através da criação de um novo projeto do tipo “*3D Building Project (multizone)*”, onde é definido o arquivo climático a ser utilizado e o modelo geométrico em extensão *.idf*. Por meio deste passo, ocorre a integração automática do arquivo climático e desenho geométrico, com informações de radiação térmica incidente, das temperaturas

internas de cada zona térmica definida, ângulos de incidência interconectadas. A Figura 22 apresenta o modelo básico criado a partir deste passo, com suas conexões.

Figura 22: Projeto básico inicial no *3D Building Project (multizone)*



Fonte: O autor (2023)

O módulo *Type 56*, modela o comportamento térmico de uma edificação com diferentes zonas térmicas. Neste módulo, é possível definir as características das propriedades térmicas construtivas da edificação, o perfil de ocupação e funcionamento, os ganhos térmicos internos provenientes da ocupação e equipamentos, cálculo de carga térmica ideal, entre outras funcionalidades.

Já o módulo *Type 15*, é responsável por importar arquivo climático que será utilizado na simulação. Importante salientar que a plataforma do TRNSYS dispõe inúmeros arquivos climáticos ao redor do mundo. Contudo, ocorre diferenças entre a formatação dos diferentes arquivos climáticos em cada base de dados, devendo ser adotado o submódulo com a respectiva formatação. Esta informação consta-se mais relevante quando deseja-se utilizar a simulação desenvolvida na comparação com outras localidades, pois na geração do projeto básico esta definição do submódulo ocorre de forma automática.

O modelo básico apresenta o controle de dispositivos de controle de incidência solar em janelas, mas não foi utilizado pois o edifício não possui dispositivos de sombreamento automático interligado com a iluminação.

4.2.2 Simplificações do modelo

O modelo construído contou com algumas simplificações de modo a otimizar o desenvolvimento e tempo computacional durante a simulação no *software* TRNSYS. Foram adotadas simplificações nas zonas climáticas, dias e horários de funcionamento e ocupação do edifício.

4.2.2.1 Zonas climatizadas

As zonas climatizadas foram definidas de modo a abranger a todo o andar climatizado. Ao todo, o edifício é constituído de 26 salas de escritórios climatizadas distribuídas ao longo dos 9 pavimentos do edifício, separadas por divisórias ou paredes internas de alvenaria. Contudo, na simulação as salas pertencentes ao mesmo pavimento foram juntadas como uma mesma zona térmica, excluindo as divisões internas. Desse modo, houve a redução de 26 para apenas 9 zonas térmicas, 1 por pavimento. A justificativa desta redução é a redução do número de controladores, termostatos e equipamentos durante a simulação, economizando tempo de programação e computacional na convergência da simulação.

4.2.2.2 Dias, horário de funcionamento e ocupação

Durante a simulação, os dias de funcionamento padrão tiveram os horários e escalonamentos de ocupação pré-definidos. Com isso, não foram considerados dias atípicos com horário de funcionamento reduzido e feriados, funcionamento de acordo com os padrões pré estabelecidos de segunda a sexta feira.

Com relação à distribuição durante o dia, fora adotado o mesmo padrão escalonado de ocupação em todas as zonas térmicas, embora cada setor possua suas particularidades em função das atividades desempenhadas.

Ainda com relação à ocupação, embora ocorra a variação durante o ano da quantidade de servidores efetivamente trabalhando, não foram considerados períodos com maior incidência de servidores em férias, como ocorre nos meses de janeiro, fevereiro e julho.

4.2.3 Propriedades Térmicas

As propriedades térmicas do edifício foram definidas de acordo com a composição da estrutura da edificação, dispondo dos materiais já padronizados no software. Foram definidos as propriedades térmicas dos seguintes elementos construtivos: parede externa, parede interna, forro interno, piso interno, telhado e janela exterior. Embora a biblioteca do software possua inúmeras opções de elementos construtivos, as propriedades térmicas foram desenvolvidas individualmente, uma vez que os elementos construtivos utilizados no edifício em estudo diferem dos padrões definidos pelo software. Por se tratar de um edifício antigo e de construção típica do Brasil, baseados em tijolos cerâmicos e concreto, com exceção das janelas, tais elementos foram “construídos” dentro do software.

Tal construção ocorre da seguinte forma: Tomando o elemento parede externa como exemplo, sua propriedade térmica pode ser definida através da combinação de todos os materiais empregados na sua construção, como argamassa, tijolos cerâmicos, revestimentos, etc. Como o software possui uma extensa base de materiais construtivos, os mesmos foram utilizados com suas propriedades térmicas já existentes, alterando as espessuras das camadas. A Figura 23 apresenta o modelo construtivo da parede externa no software TRNSBuild e a Tabela 5 apresenta as principais propriedades térmicas das camadas de elementos da parede.

Tabela 5: Propriedades dos elementos construtivos que compõem a parede externa

Elemento	Propriedade	Camada 1	Camada 2	Camada 3	Camada 4	Camada 5
	Nome	Acabamento	Argamassa	Bloco	Argamassa	Acabament o
	Espessura (m)	0,001	0,02	0,19	0,02	0,001
Parede externa	Condutividade (kJ/hmK)	1,494	5,04	4,68	5,04	1,494
	Calor específico (kJ/kg.K)	1,09	1	0,365	1	1,09
	Densidade (kg/m ³)	1249	2000	1800	2000	1249

Fonte: O autor (2023)

Figura 23: Janela no TRNBuild para definição do elemento construtivo parede externa

Wall Type Manager

wall type: **EXT_WALL**

Layer

front / inside

No.	Layer	Thickness	Type
1	FINISH	0.001	massive
2	CEMENT_MOR	0.020	massive
3	HOLLOW_BLO	0.190	massive
4	CEMENT_MOR	0.020	massive
5	FINISH	0.001	massive

back

total thickness: **0.232** m

u - value: **2.861** W/m² K for reference only
(incl. alpha_i=7.7 W/m² K and alpha_o=25 W/m² K !)

Solar Absorptance of Wall

front: **0.4**

back: **0.5**

Longwave Emission Coefficient

front: **0.9**

back: **0.9**

Note:
The emissivity of inside surfaces are applied by the detailed longwave radiation mode only!
For the standard model fixed values of 0.9 are used.

Convective Heat Transfer Coefficient of Wall

front

☒ userdefined ☐ internal calculation

11 kJ/h m² K

back

☒ userdefined ☐ internal calculation

64 kJ/h m² K

Save to User Library

RDCN

Fonte: O autor (2023)

A Tabela 6 apresenta as propriedades térmicas dos principais elementos construtivos que foram utilizados para a modelagem do edifício após a definição pelo usuário.

Tabela 6: Propriedades térmicas dos principais elementos construtivos

Elemento Construtivo	Espessura (m)	U-value (W/m ² .K)
Parede externa	0,232	2,861
Parede interna	0,182	3,215
Forro interno	0,266	2,927
Piso interno	0,376	0,295
Telhado exterior	0,275	2,089
Janela	0,004	1,06

Fonte: O autor (2023)

4.2.4 Perfil de ocupação

O perfil de ocupação do edifício pode ser definido como do tipo escritório. Esta definição é utilizada para a determinação da demanda energética necessária para atender a edificação, uma vez que determina o perfil de gasto energético por pessoa, iluminação, equipamentos, etc. Edifícios do tipo escritório padrão possuem a característica de gasto energético concentrado nos horários comerciais, no período de segunda a sexta feira, tendo o seu consumo reduzido nos finais de semana.

No caso em estudo, o período de funcionamento do edifício é de 12 horas consecutivas em horário comercial, compreendendo o horário de 6:30 às 18:30, de segunda a sexta feira.

A quantidade de pessoas por zona térmica é determinado pela distribuição dos postos de trabalho determinados em planta baixa. A distribuição de pessoas entre as zonas térmicas é bastante heterogênea, a depender da atividade exercida pelo setor. A Tabela 7 contém a distribuição da quantidade de pessoas que ocupam cada zona térmica.

Tabela 7: Ocupação máxima de pessoas por andar

Local	Pessoas
Térreo	5
1 Andar	17
2 Andar	44
3 Andar	18

4 Andar	30
5 Andar	22
6 Andar	14
7 Andar	24
8 Andar	24

Fonte: O autor (2023)

No entanto, durante o período de funcionamento, a distribuição de ocupação dos funcionários não ocorre de maneira homogênea, com 100% de ocupação ao longo do dia. Embora o edifício tenha o período de funcionamento de 12 horas, a carga horária de trabalho dos servidores compreende, geralmente, de 9 horas consecutivas, sendo 1 hora para horário de almoço. Neste sentido, a ocupação ocorre de maneira escalonada ao longo do dia. A distribuição escalonada foi determinada pelo usuário, conforme observação da rotina da instituição. A Figura 24 ilustra, de maneira simplificada, a ocupação ao longo do dia de trabalho. Durante os finais de semana não ocorre o funcionamento. O perfil de ocupação do prédio definido é aplicado durante a simulação do edifício no software TRNSYS.

Figura 24: Ocupação escalonada dos servidores ao longo dos dias úteis



Fonte: O autor (2023)

4.2.5 Ganhos Térmicos

Para o ganho térmico interno da edificação, foram considerados os ganhos provenientes das pessoas, dos equipamentos eletrônicos e iluminação. Os ganhos térmicos relacionados ao clima local, radiação, janela, são calculados diretamente pelo software através da definição das propriedades térmicas da construção e do arquivo climático utilizado.

Os dados referentes aos ganhos térmicos relativos as pessoas foram extraídos da norma ISO 7730, disponível no pacote do TRNSYS. Para isso, é necessário a definição do grau de atividade e da aplicação típica. Para a seleção da quantidade de calor sensível e latente por pessoa, temos que a aplicação do edifício é do tipo escritório e o grau de atividade pode ser definido como trabalho sentado, leve e de digitação. A Tabela 8 demonstra os valores de calor sensível, latente e ajustado, por pessoa, utilizado na simulação.

Tabela 8: Valores referenciais para ganhos térmicos por pessoa, segundo ISO 7730

Grau de atividade	Aplicação típica	Calor total ajustado		Calor Sensível		Calor Latente	
		Watts	BTU/h	Watts	BTU/h	Watts	BTU/h
Sentado, digitação, trabalho leve	Escritório, hotel, apartamentos	150	510	75	225	75	225

Fonte: O autor (2023)

Já para os equipamentos eletrônicos, foi considerado a quantidade de um computador por ocupante. A dissipação térmica dos equipamentos eletrônicos é considerada ganhos térmicos por calor sensível. A potência térmica dissipada foi considerada de 140 W, padrão de potência dissipada característica de computador com monitor. É importante ressaltar que a distribuição escalonada contida na Figura 24 afeta diretamente os ganhos térmicos dos equipamentos eletrônicos, uma vez que é considerado que estão ligados apenas quando há usuário ativo.

Os ganhos térmicos com iluminação artificial foram modelados em potência de 10W/m² sendo a fração de 40% atribuída à parte convectiva. Os valores se referem a média de lâmpadas tubulares fluorescentes, conforme instaladas no edifício. Diferentemente dos ganhos térmicos por pessoa e equipamentos eletrônicos, por não

haver modulação da iluminação do edifício, o sistema de iluminação tem seu funcionamento definido durante todo o expediente, sendo ligado às 6:30 e desligado às 18:30. Não foram considerados a utilização da iluminação noturna e aos finais de semana.

4.2.6 Arquivo Climático

A cidade do Recife fica localizada na região litorânea do nordeste brasileiro, e possui clima caracterizado como quente e úmido ao longo de todo o ano. Não possui as quatro estações do ano bem definidas, podendo ser dividida em verão quente e úmido ensolarado e inverno quente e úmido com maior incidência de chuvas entre os meses de março a agosto.

Os dados climáticos utilizados para a simulação foram compilados utilizando uma extensa base de dados pelo aplicativo Meteonorm V5, com dados obtidos na estação meteorológica nº 828990 localizada no Aeroporto Internacional do Recife/Guararapes - Gilberto Freyre.

A base de dados gerada pelo programa Meteonorm é licenciada pela empresa MeteoTest, e incluem mais de 1000 localizações, abrangendo mais de 150 países no mundo.

4.3 SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO

Com os dados de construção e ocupação do edifício definidos, a simulação energética do sistema de climatização será realizado para os casos de referência, climatização suprida por sistemas do tipo split e do modelo proposto pelo equipamento chiller, termoacumulador e geração de energia elétrica fotovoltaica. O desenvolvimento da simulação está descrito abaixo.

4.3.1 Cenário de referência

A demanda energética para a climatização do edifício é suprida por sistemas unitários do tipo *split system* convencional, ou seja, com compressores de velocidade fixa. Ao todo, são 32 equipamentos bastante heterogêneos instalados de capacidades entre 30.000 BTU/h (8,79 kW) a 60.000 BTU/h (17,58 kW), com idade média de uso de 15

anos. De acordo com os catálogos dos equipamentos instalados, os condicionadores de ar instalados quando novos possuíam um COP médio de 2,8. Segundo Eleftheriadis e Hamdy (2017), é esperado uma redução de 18% a 33% do valor nominal da eficiência do climatizador devido ao desgaste natural do equipamento. Em sua análise dos equipamentos instalados nos EUA, Hendron (2006) propôs que a degradação da eficiência dos equipamentos splits depreciavam de 1% a 3% ao ano, a depender do tipo de intervenção na manutenção, enquanto que em um estudo mais recente de Fenaughty e Parker (2018) em uma simulação numérica estimou que a degradação da eficiência dos equipamentos é de 2 a 3% ao ano. A equação 5 apresenta o cálculo da estimativa da eficiência após o intervalo de uso, onde M representa a taxa de degradação e o tempo de uso em anos.

$$COP_{degradado} = COP_{nominal} \cdot (1 - M)^{Tempo} \quad (5)$$

Considerando a idade, o COP médio dos condicionadores de ar e o Fator de Degradação da eficiência de 2,6% ao ano, estima-se que o COP médio da instalação do sistema de climatização seja de aproximadamente 1,87.

A simulação do cenário atual é realizada de modo a obter um parâmetro base de consumo energético elétrico e financeiro para atender a climatização do prédio. Com base nas simulações do cenário atual, serão propostos e analisados diferentes sistemas de climatização para atender o edifício, com os respectivos cálculos de retorno financeiro.

Em virtude da indisponibilidade de um módulo dedicado que simule a operação e controle de equipamentos do tipo *split system* dentro do TRNSYS, a modelagem do equipamento split foi realizada por meio da integração de três módulos contidos na biblioteca do programa, sendo: Type 921, Type 108 e Type 112a.

O Type 921 modela um ar condicionado unitário de rotação fixa para aplicações do tipo residencial ou comercial. O modelo requer um arquivo externo que contenha dados normalizados da capacidade total, sensível e potência elétrica em função das temperaturas de bulbo seco externa e interna, da temperatura de bulbo úmido interna e da vazão de ar no evaporador. No entanto, tal modelo não possui controle de seu funcionamento por temperatura, apenas um controle de liga e desliga. Neste sentido, ocorre a necessidade de inserir um controle externo ao equipamento, que será suprido pelo modelo de termostato Type 108. Ainda, o modelo não possui equipamento para a

movimentação do ar, devendo ser inserido também um ventilador, adotado um ventilador de velocidade fixa, Type 112a.

O Type 108 corresponde a um termostato de cinco estágios, no qual modela o sinal de saída de cinco funções de controle on/off que pode ser utilizada para controlar sistemas que possuem até dois estágios de fonte de calor para aquecimento, um aquecedor auxiliar e dois estágios de sistemas de resfriamento. O controle comanda o primeiro estágio de resfriamento quando a temperatura do ambiente é moderadamente alta, o segundo estágio de resfriamento quando atinge temperaturas altas, o primeiro estágio de aquecimento para temperaturas amenas, o segundo estágio de aquecimento para temperaturas baixas e o sistema auxiliar de temperatura para temperaturas ainda mais baixas. O usuário tem a opção de desabilitar as opções de aquecimento e resfriamento de primeiro estágio quando as temperaturas demandarem o próximo estágio de aquecimento ou resfriamento. O termostato trabalha com sinais de on/off e possui deve ser definido a banda de oscilação (dead band) no qual o termostato irá trabalhar. Diferenças de temperatura muito pequenas acarretará no mal funcionamento do termostato e equipamento de climatização, demandando inúmeros comandos de liga e desliga. Já a definição de grandes oscilações podem levar ao mau dimensionamento e desconforto térmico pelo usuário, além de possíveis problemas de convergência caso as temperaturas entre os estágios sejam sobrepostas pela dead band. Para a simulação dos sistemas do tipo split, foi adotado um dead band de $\pm 2^{\circ}\text{C}$. Por se tratar apenas de um sistema de climatização simples, foi utilizado apenas sinal correspondente ao primeiro estágio de resfriamento, tendo desabilitado todos os outros sinais do termostato. A temperatura de conforto foi definida como 24°C . Com isso, o termostato irá controlar tanto o equipamento de climatização quanto o ventilador.

Type 112a modela um ventilador de rotação fixa e de fluxo mássico constante. Deve ser controlado pelo sinal de controle como parâmetro de entrada, proveniente do termostato. Na simulação, é responsável pela integração entre as propriedades do fluxo de ar da zona térmica com o respectivo equipamento de climatização.

A Tabela 9 trás as configurações empregadas no sistema split system.

Tabela 9: Configuração do sistema split system

Parâmetros	Valor	Unidade
Capacidade total de refrigeração	16.71	kW

Capacidade de calor sensível	12	kW
Consumo	8.93	kW
Set point do termostato	23	°C
Variação de temperatura da sala	2	Δ°C

Fonte: O autor (2023)

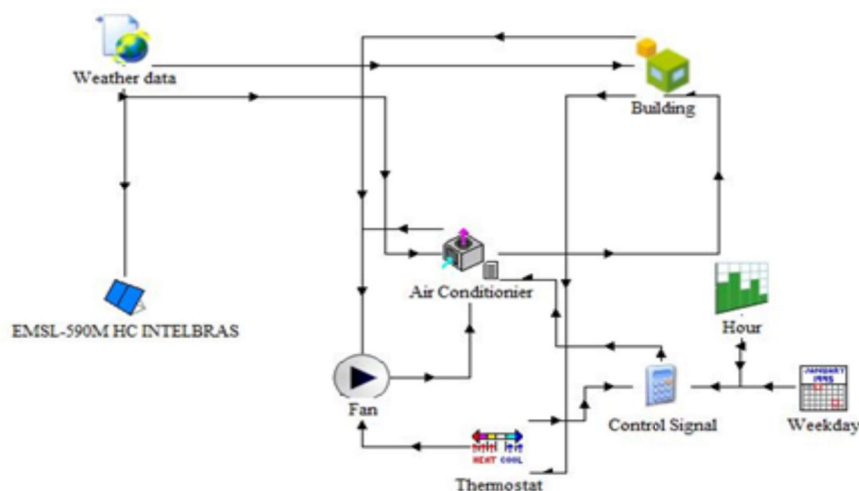
Com a integração dos três módulos, é possível a simulação do comportamento dos sistemas tipo split na climatização dos ambientes. Importante salientar que para cada zona térmica é atendida por um sistema unitário. A Figura 25 representa o desenvolvimento do sistema tipo split para atender a determinada zona térmica.

O intervalo de funcionamento do split system é dado em função da temperatura do ar interno na sala (Type 108), dos dias da semana (Type 41c) e horário diário (Type 14h).

Como os sinais dos types são definidos através do sinal 0 e 1, a função de controle do funcionamento do split é dado através da equação 6.

$$Sinal = Sinal_{TYPE\ 108} \cdot Sinal_{TYPE\ 41\ C} \cdot Sinal_{TYPE\ 14\ H} \quad (6)$$

Figura 25: Desenvolvimento do sistema de climatização tipo split



Fonte: O autor (2023)

4.3.2 Sistema Fotovoltaico

As placas fotovoltaicas foram inseridas pelo através do módulo Type 194b, que já conta com um sistema inversor acoplado ao conjunto de placas. O modelo da placa inserido foi a EMSL-590M HC da fabricante INTELBRAS. O módulo fotovoltaico escolhido é do tipo monocristalino, composto por 156 células distribuídos em uma área de 2,77m². O dimensionamento da geração fotovoltaica foi definido como a potência necessária para gerar energia o suficiente para suprir a demanda anual de energia da climatização. O ângulo de inclinação utilizado nos painéis fotovoltaicos foi de 0°. A Tabela 10 apresenta o dimensionamento da potência fotovoltaica utilizada para cada cenário.

Tabela 10: Dimensionamento fotovoltaico

Cenário	Nº de placas	Área necessária (m²)	Potência Fotovoltaica (kW_p)
Cenário 1	220	609,40	129,8
Cenário 2	130	360,10	76,7
Cenário 3	95	263,15	56,05
Cenário 4	130	360,10	76,7

Fonte: O autor (2023)

Os parâmetros de eficiência e desempenho do painel fotovoltaico EMSL-590M HC foram obtidos através do catálogo da fabricante Intelbrás e estão dispostos na Tabela 11.

Tabela 11: Especificações técnicas do painel EMSL-590M HC Intelbras

Parâmetros	Performance em STC	Performance em NOCT
Potência Máxima [W]	590	435
Tensão Máxima de operação [V]	44,80	41,80
Corrente máxima de operação [A]	13,17	10,41
Tensão de circuito aberto [V]	53,70	50,20
Corrente de circuito aberto [A]	13,94	11,23
Eficiência do módulo [%]	21,30	-

Fonte: Intelbras (2022)

Devido ao banco de dados do TRNSYS não possuir as referências do modelo do painel fotovoltaico escolhido, é necessário que tais dados dos parâmetros 18 a 22 sejam gerados a partir do aplicativo PV_ref_params, por meio do *Engineering Equation Solver* (FChart 2022). O aplicativo aplica a metodologia desenvolvida por De Soto et al. (2005) para o cálculo dos parâmetros. A Figura 26 demonstra a janela com os dados técnicos provenientes do catálogo do painel escolhido e os parâmetros calculados pelo programa.

Figura 26: Janela do aplicativo PV_ref_params

PV Reference Parameter Determination¹

Number of cells in series within a module = 156 [-]

Open circuit voltage at reference conditions = 53.7 [V]

Short circuit current at reference conditions = 13.94 [amp]

Max. power voltage at reference conditions = 44.8 [V]

Max. power current at reference conditions = 13.17 [amp]

Temperature. coef. of short circuit current = 0.00697 [1/K]

Temperature. coef. of open circuit voltage = -0.1504 [V/K]

Buttons: Load Inputs, Calculate, Save Inputs

Standary method - usually works fine

Calculated parameters:

- $a_{ref} = 2,119$ [V]
- $I_{L,ref} = 13,95$ [amp]
- $I_{o,ref} = 1,358E-10$ [amp]
- $R_s = 0,1849$ [Ω]
- $R_{sh,ref} = 382,1$ [Ω]

¹ Desoto, W, Klein, S.A. and Beckman, W.A
 "Improvement and Validation of a Model for Photovoltaic Array Performance"
 to appear in Solar Energy Journal, 2005

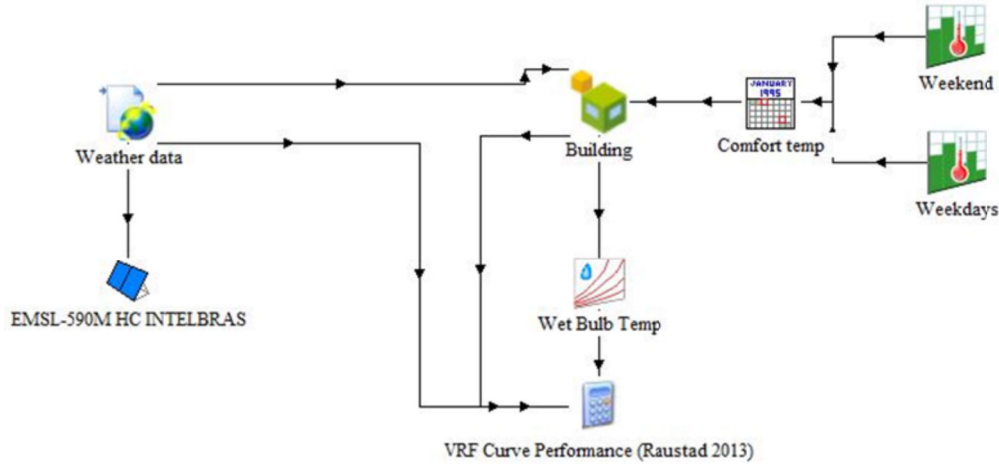
Buttons: Show Reference

Fonte: O autor (2023)

4.3.3 Variable Refrigerant Flow - VRF

Esta seção descreve o modelo matemático proposto para a estimativa da performance do sistema VRF em modo de refrigeração, em ambientes cuja temperatura de bulbo seco externa é elevada. O modelo matemático descrito é utilizado na simulação dos sistemas VRF pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos no software EnergyPlus. No entanto, a simulação numérica será implementada diretamente no software TRNSYS 16 conforme Figura 27

Figura 27: Modelagem do sistema de climatização do tipo VRF



Fonte: O autor (2023)

A versão 8.9 do software EnergyPlus contém um modelo matemático de um sistema de climatização do tipo VRF padrão, baseado na obtenção das curvas de performance através da dedução de equações empíricas a partir dos dados obtidos em catálogo de fornecedores. Embora o modelo matemático desenvolvido seja abrangente para todas as condições climáticas e modo de refrigeração e aquecimento, nesta seção serão apresentados os pontos relevantes particulares ao caso de estudo, ou seja, a modelagem implementada poderá ser utilizada para simular apenas sistemas VRF com condições similares a este dimensionamento e suas simplificações. O estudo completo do modelo matemático desenvolvido pode ser encontrado em Raustad 2013, enquanto que a metodologia para obtenção dos coeficientes de performance em Raustad 2012.

O modelo do sistema VRF calcula, entre outros resultados, consumo elétrico da unidade condensadora de modo a compatibilizar com a demanda de refrigeração interna das zonas internas. A potência consumida pela unidade externa ($P_{hp,cool}$) pode ser calculada através da equação 7.

$$P_{hp,cool} = \left(\frac{\dot{Q}_{cool,total,ref} \cdot (CAPFT_{hp,cool})}{COP_{cool,ref}} \right) \cdot (EIRFT_{HP,cool}) \cdot (EIRFPLR_{hp,cool}) \cdot (RTF_{hp}) \quad (7)$$

O coeficiente $\dot{Q}_{cool,total,ref}$ corresponde à capacidade total de refrigeração instalada e o $COP_{cool,ref}$ corresponde ao Coeficiente de Performance de referência e são obtidos

facilmente a partir do catálogo dos fabricantes após a seleção do equipamento. O sistema VRF selecionado foi o Carrier X-Power New Generation, cuja capacidade interna instalada total de 100,80 kW (9 unidades internas de 11,2 kW) e unidade externa de condensação de 90 kW (2 unidades condensadoras de 45 kW). O COP de referência do sistema é de 3,67.

Já os demais componentes da equação correspondem aos efeitos da temperatura média de bulbo úmido interna e da temperatura de bulbo seco externa na capacidade de refrigeração do equipamento ($CAPFFT_{hp,cool}$), aos efeitos da temperatura externa no consumo da unidade condensadora ($EIRFT_{HP,cool}$), aos efeitos da operação em cargas parciais no consumo da unidade externa ($EIRFPLR_{hp,cool}$) e do efeito das cargas térmicas abaixo do mínimo recomendado para funcionamento do compressor com inversor de frequência, operando em modo cíclico (RTF_{hp}). Este último é considerado 1 quando a unidade condensadora não opera em modo de liga/desliga e será adotado nessa simulação. As equações de 7 a 13 apresentam o cálculo dos componentes necessários à simulação numérica da simulação numérica.

$$CAPFT_{hp,cool} = a_1 + a_2 \cdot (T_{wb,avg}) + a_3 \cdot (T_{wb,avg})^2 + a_4 \cdot (T_{con}) + a_5 \cdot (T_{con})^2 + a_6 \cdot (T_{wb,avg}) \cdot (T_{con}) \quad (8)$$

$$T_{wb,avg} = \sum_{i=1}^n T_{wb,(i)} \cdot \left(\frac{\dot{Q}_{coil(i),cool}}{\dot{Q}_{coil,total,cool}} \right) \quad (9)$$

$$\dot{Q}_{coil,total,cool} = \sum_{i=1}^n \dot{Q}_{coil(i),cool} \quad (10)$$

$$PLR = \frac{\sum_{i=1}^n \dot{Q}_{coil(i),cool}}{\dot{Q}_{coil,ref,cool}} \quad (11)$$

$$EIRFT_{HP,cool} = b_1 + b_2 \cdot (T_{wb,avg}) + b_3 \cdot (T_{wb,avg})^2 + b_4 \cdot (T_{con}) + b_5 \cdot (T_{con})^2 + b_6 \cdot (T_{wb,avg}) \cdot (T_{con}) \quad (12)$$

$$EIRFPLR_{hp,cool} = c_1 + c_2 \cdot (PLR) + c_3 \cdot (PLR)^2 + c_4 \cdot (PLR)^3 \quad (13)$$

A equação 8 representa a média ponderada da temperatura de bulbo úmido das zonas climatizadas da edificação. A temperatura é obtida através do cálculo por meio do Type 33c - Psychrometrics utilizando a temperatura de bulbo seco interna e umidade relativa de cada zona. Já a carga térmica é obtida por ativando o modo de refrigeração dentro do aplicativo TRNBuild. A temperatura de conforto empregada foi de 24° C, umidade relativa interna do ar de 50% e capacidade de refrigeração de 11,2 kW. Todas as demais propriedades definidas no subitem 4.2 são mantidas para o cálculo da carga térmica.

Os coeficientes das equações 8, 12 e 13 são definidas a partir dos dados contidos nos catálogos de fornecedores. Na modelagem padrão contida no EnergyPlus, os coeficientes apresentados $a_{(i)}$, $b_{(i)}$ e $c_{(i)}$ são obtidos do estudo de Raustad 2012. Tais coeficientes serão utilizados nesta simulação e estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12: Coeficientes utilizados derivados

Índice	1	2	3	4	5	6
$a_{(i)}$	0,6867358	0,0207631	0,0005447	-0,0016218	- 0,0000004259	-0,0003392
$b_{(i)}$	0,1435147	0,01860035	-0,0003954	0,02485219	0,00016329	-0,0006244
$c_{(i)}$	0,46281232	-1,0402406	2,17490997	-0,5974817	-	-

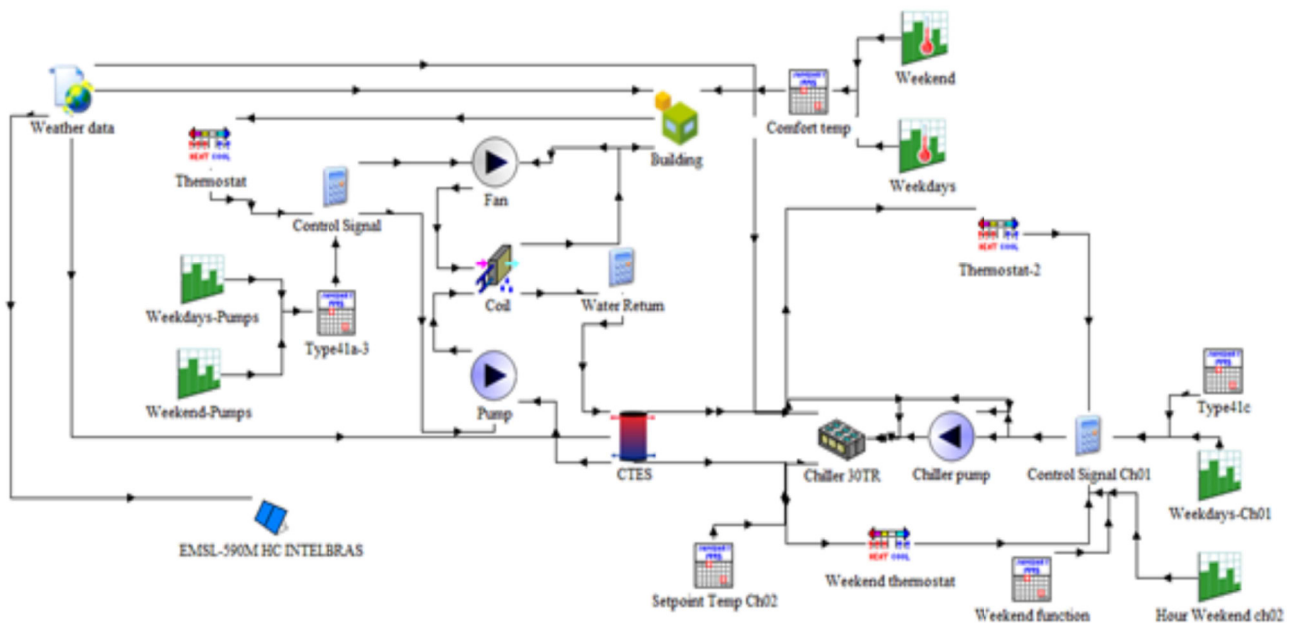
Fonte: Raustad (2012)

4.3.4 Chiller com termoacumulação

A proposta para a substituição do sistema atual de climatização constitui de um chiller resfriado a ar, no qual fornece água gelada para a climatização do edifício. A distribuição do ar refrigerado para as zonas térmicas é suprida por meio de equipamentos do tipo fan coils. A fonte de energia elétrica para o chiller é proveniente do conjunto fotovoltaico instalado na cobertura do edifício e da rede elétrica pública. De modo a aumentar o consumo próprio de energia fotovoltaica gerada, será acoplado um tanque termoacumulador de água gelada para o acúmulo de energia térmica gerada durante os finais de semana.

A Figura 28 apresenta o desenho esquematicamente o projeto de simulação.

Figura 28: Desenho esquemático da simulação



Fonte: O autor (2023)

4.3.4.1 Chiller

Para a simulação do equipamento de climatização do tipo Chiller, foi utilizada o modelo Type 655 que modela um chiller de compressão de vapor com condensação a ar. Tal módulo possui um arquivo interno no qual determina a performance do chiller em condições de operação do chiller, capacidade de refrigeração e COP, em função da temperatura de água gelada, variando de 4,44°C a 10°C e temperatura de bulbo seco do ar externo, variando entre 23,89°C a 46,11°C. Ao todo, são 30 condições normalizadas.

O sistema de produção de água gelada conta chiller de capacidade 105.5 kW_{th}, COP de referência de 3.1 (CARRIER 2022).

4.3.4.2 Tanque termoacumulador de frio

Acoplado ao chiller, foi inserido um tanque de termoacumulação de água gelada, modelado através do Type4a, responsável por estocar o excesso de energia térmica produzida e fornecer água gelada para o sistema de distribuição de ar formado pelos Fan Coils no edifício. Foi adotado um tanque de base circular com volume total de 140 m³ de capacidade e 6 metros de altura. O coeficiente de perda térmica adotado foi de 3,0 kJ/h.m².K. O setup de temperatura de funcionamento do termoacumulador foi dividido

entre dias da semana e de final de semana. Para os dias da semana foi definido a temperatura do termoacumulador de 7 °C, de modo a preservar o funcionamento normal dos resfriadores de líquido. Contudo, aos finais de semana foi definido uma temperatura de 5 °C. A diferença de temperatura é justificada em face da disponibilidade de energia fotovoltaica, da ausência de demanda e limitação física do volume do termoacumulador. Neste sentido, o decréscimo do COP do resfriador de líquido pela diminuição da temperatura do termoacumulador é compensada pela disponibilidade de energia fotovoltaica.

4.3.4.3 Distribuição de ar refrigerado – Fan Coils

Para a distribuição do ar entre as zonas térmicas, foi adotado o Type 508c, o qual utiliza o método de bypass para o controle da temperatura do ar que sai do trocador de calor. A temperatura de insuflamento para as zonas térmicas foi definida em 17 °C. Quanto aos fluxos de ar e água que passam pelo trocador de calor são providos individualmente por ventilador e bomba de água de rotação fixa.

4.3.4.4 Controles

O sistema conta com três controles de funcionamento, sendo dois para o conjunto de climatização formado pelos chillers e termoacumulador (dias de semana e final de semana) e outro para o sistema de distribuição de ar para as zonas térmicas climatizadas.

O controle de funcionamento do conjunto chiller e termoacumulador é realizado através do Type 108 – termostato de 5 estágios, do Type 14h que condiciona as horas de funcionamento durante o dia e do Type 41c que define o funcionamento nos dias da semana. A Tabela 13 apresenta as configurações do chiller em função dos controles impostos pelo usuário.

Tabela 13: Parâmetros de funcionamento do sistema chiller com termoacumulador

Parâmetro	Chiller
Capacidade	105,5 kW
COP	3,1
Horário de funcionamento durante a	7:30 às 17:30

semana

Horário de funcionamento durante o final
de semana

8:30 às 16:30

Temperatura de set point do
termoacumulador na semana

7°C

Temperatura de set point do
termoacumulador no final de semana

5°C

Fonte: O autor (2023)

Já o controle do sistema de distribuição de ar ocorre de maneira individual para cada sistema fan coil, e é dado por meio de um termostato de cinco estágios, que controla o sinal referente à temperatura interna de cada zona térmica e do horário de demanda de climatização, definidos pelo horário de ocupação do edifício, compreendendo o período de 6:30 às 18:30, de segunda a sexta feira.

4.4 ANÁLISE DE PERFORMANCE ENERGÉTICA

Para a análise da performance energética dos condicionadores de ar fotovoltaicos será utilizado os indicadores de fração solar (SF) e a fração de consumo solar (SCR). Embora no Brasil a performance energética de projetos fotovoltaicos esteja voltada à somatória de geração mensal ou anual, a tendência mundial notada dos projetos dos PVACs são entorno da autonomia e eficiência da geração e consumo de energia dos equipamentos. De modo diminuto, tal tendência começa a ser desenvolvida no país com o início da vigência da Lei 14.300 no qual irá considerar o fator de simultaneidade das plantas geradoras fotovoltaicas.

Os índices de performance serão analisados separadamente nos horários de ponta e fora de ponta.

4.4.1 Fração Solar – SF

A fração solar é o indicador da quantidade de energia fotovoltaica gerada que é instantaneamente utilizada pelo sistema de climatização, não sendo contabilizada no cálculo a energia retirada da rede pública. O indicador é obtido a partir da divisão entre a energia fotovoltaica gerada consumida instantaneamente pelo sistema de climatização

(E_{ac-pv}) pela quantidade total consumida pelo sistema de climatização (E_{ac}). Valores de SF próximos a 1,0 indicam o quanto os climatizadores de ar fotovoltaicos são independentes de armazenamento de energia elétrica ou da rede pública. O índice é obtido por meio da equação 14.

$$SF = \frac{E_{ac-pv}}{E_{ac}} \quad (14)$$

4.4.2 Fração de consumo solar – SCR

A fração de consumo solar é o indicador da quantidade de energia fotovoltaica gerada que é instantaneamente utilizada pelo total de energia fotovoltaica gerada. O indicador é obtido a partir da divisão entre a energia fotovoltaica gerada consumida instantaneamente pelo sistema de climatização (E_{ac-pv}) pela quantidade total de energia fotovoltaica gerada pelo parque solar (E_{pv}). Valores de SCR próximos a 1,0 indicam a eficiência da compatibilidade do projeto da geração de energia fotovoltaica com o consumo do sistema de climatização. O índice é obtido por meio da equação 15.

$$SCR = \frac{E_{ac-pv}}{E_{pv}} \quad (15)$$

4.5 ANÁLISE ECONÔMICA

A análise econômica será realizada mediante a obtenção do fluxo de caixa, contabilizando a economia dos cenários propostos em comparação ao cenário de referência. Com o fluxo de caixa definido, será calculado indicadores econômicos de viabilidade como Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e período de Payback.

4.5.1 Fluxo de caixa

O fluxo de caixa é calculado a partir da economia obtida através da proposta de geração de energia fotovoltaica e/ou aumento da eficiência da substituição do sistema de climatização atual tendo como contrapartida os altos custos de aquisição, instalação e manutenção dos sistemas de geração fotovoltaica e climatização.

O cenário atual com a climatização sendo suprida por sistema do tipo split de rotação fixa já degradado e sem geração de energia fotovoltaica é utilizada como cenário de referência.

A equação 16 apresenta a estimativa do fluxo de caixa para os cenários propostos:

$$FC_i = (CO_i)_{referência} - (CI_i + CO_i + CE_i)_{Cenário.j} \quad (16)$$

Onde FC_i representa o fluxo de caixa, CO_i o custo de operação e manutenção dos sistemas, CI_i o custo de aquisição e instalação e CE_i o custo com energia, todos calculados para o ano “i”.

Os custos de aquisição dos sistemas de climatização do tipo Split e VRF, do sistema fotovoltaico e de manutenção dos sistemas de climatização do tipo split, VRF e Chiller foram obtidos através da pesquisa de preço definidas pela legislação vigente, utilizando a média dos valores obtidos de ao menos 3 valores contratados pela Administração Pública.

Contudo, devido a particularidade e ausência de contratações correlatas, os custos de aquisição e instalação do sistema de climatização tipo *chiller* com termoacumulador por água gelada não pode ser definido por meio da pesquisa de preços no Portal de Compras do Governo Federal. Com isso, os valores utilizados foram extraídos de Cho et al. (2020).

De acordo com Honrubia-Escribano et al. (2018) os custos de operação e manutenção dos painéis fotovoltaicos pode ser estimado em 5% ao ano do custo total da instalação inicial e é esperado uma degradação anual dos painéis fotovoltaicos de 0,7% ao ano.

Para os custos de energia, foi utilizado a tarifa vigente para a distribuidora local Neoenergia Pernambuco, que é definida pela ANEEL (Neoenergia 2023). Ainda, de modo a simular o reajuste anual das tarifas de energia, foi utilizado o percentual de 6,8% ao ano, correspondente ao percentual mínimo utilizado em (Leite et al. 2019).

Não obstante, conforme a tabela de escalonamento da remuneração da componente tarifária Fio B da TUSD para a distribuidora de energia, será aplicada para o cálculo na análise econômica. Apesar da previsão de outras remunerações que incidirão sobre o crédito de energia fotovoltaico injetado à rede para as distribuidoras de energia, em razão da não regulamentação da ANEEL sobre o tema, não serão abordados neste trabalho.

4.5.2 Valor Presente Líquido

O Valor Presente Líquido (VPL) é um indicador econômico no qual permite estimar para a data atual a estimativa de todos os fluxos de caixa de determinado período, descontando o valor inicial de investimentos do projeto. Para isto, adota-se uma taxa mínima de atratividade (TMA) que consiste em aplicar os juros mínimos que o investidor está disposto a obter ao realizar tal investimento. Em sua análise econômica do acoplamento de sistemas de climatização e geradores fotovoltaicos no Brasil, Leite et al. (2019) adotou uma TMA de 8%.

A equação 17 apresenta o cálculo do VPL:

$$VPL = -Q_0 + \sum_{1}^n \frac{FC_n}{(1 + TMA)^n} \quad (17)$$

Onde Q_0 representa o valor de investimento inicial, FC_n o Fluxo de Caixa de determinado ano, TMA a taxa mínima de atratividade e n é a quantidade de anos do período analisado.

Como o indicador analisado traz todo o retorno devido à economia do projeto à presente data, caso o VPL seja positivo o projeto apresenta-se viável, caso nulo é indiferente e no caso de valor negativo o projeto se demonstra inviável para o período analisado.

4.5.3 Taxa Interna de Retorno

A taxa interna de retorno é a taxa no qual o VPL da vida do projeto se torna zero, e é calculado pela Equação 18.

$$0 = \sum_{i=1}^n \frac{FC_i}{(1-TIR)^i} - Q_0 \quad (18)$$

A TIR é analisada em comparação com a TMA pré definida para o cálculo do VPL. Caso a TIR seja maior que a TMA, o projeto demonstra viável economicamente e caso seja menor, o projeto apresenta pouco interesse econômico.

4.5.4 Período de Payback

O período de payback corresponde ao tempo em que o investidor obtém o retorno do capital investido através do fluxo de caixa. O tempo é calculado através da equação 19.

$$Payback = t \text{ quando } \sum_{i=0}^t FC_i = Q_0 \quad (19)$$

O projeto se demonstra viável economicamente quando o período de payback se demonstra menor que o seu tempo de vida útil. Ainda, quanto menor o período de payback, mais atrativo e seguro economicamente o projeto se demonstra.

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo será apresentado os resultados obtidos para os cenários propostos. A análise energética e econômica foi conduzida mediante os índices de performance definidos na metodologia. Por fim, foi conduzida a comparação entre os cenários estudados de modo a avaliar a melhor proposta para a solução do problema apresentado.

5.1 ANÁLISE ENERGÉTICA

A análise energética foi realizada individualmente para cada cenário, indicando o consumo de energia do sistema de climatização e os respectivos índices de SF e SCR. Ainda, é apresentado o impacto energético da proposta na economia e redução da dependência do sistema de climatização da rede pública de energia.

A implementação dos cenários para a simulação está descrita no fluxograma apresentado na Figura 20.

Para o cenário 1 é proposto somente a instalação das placas fotovoltaicas no edifício. A implementação da simulação é realizada por meio da introdução dos dados do fornecedor das placas fotovoltaicas e complementados pela geração dos parâmetros 18 a 22 no aplicativo PV_ref_params. O cenário 1 foi utilizado em todas as simulações posteriores, de 2 a 4. Para o cenário 1 e 2 foi utilizado a modelagem do sistema de climatização desenvolvido para o cenário de referência, do tipo split system.

Para o cenário 2 é proposto a substituição dos splits instalados de baixa eficiência por splits novos e recalculando a potência fotovoltaica instalada. Para isso, foi modificado apenas os dados do Coeficiente de Performance dos condicionadores de ar implementados no cenário de referência e a quantidade de placas fotovoltaicas.

Para o cenário 3 é proposto a substituição do sistema de climatização split por um sistema central do tipo VRF. Para isso, foi gerado a partir da modelagem do edifício a carga térmica ideal de climatização e implementada nas equações descritas do sistema VRF, atualizando a geração fotovoltaica para ser compatível com o consumo da climatização.

Por fim, o cenário 4 é proposto a utilização do sistema chiller com termoacumulação e geração fotovoltaica. A implementação da modelagem ocorreu por meio da implementação do sistema de refrigeração composta 1 chiller de 105,5 kW_{th}, do

sistema de termoacumulação de água gelada de volume 140m³ e do sistema de distribuição de água e ar climatizados.

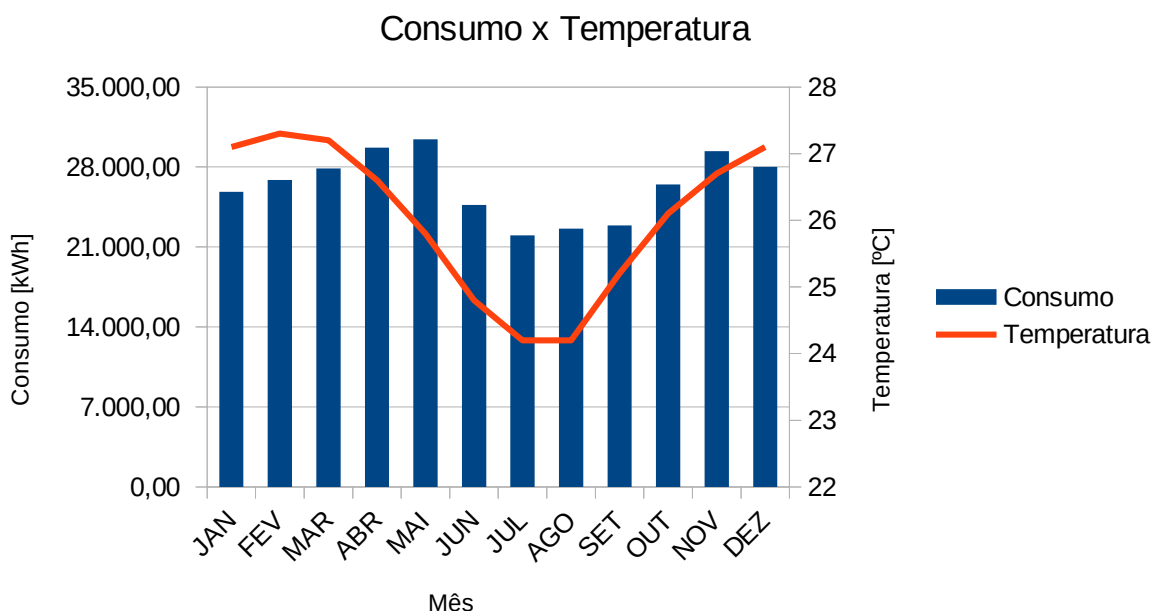
5.1.1 Cenário de Referência

5.1.1.1 Contas de energia

A Figura 29 ilustra o gráfico do consumo real mensal em kWh do edifício em comparação com a temperatura média mensal. É possível observar uma grande relação entre o consumo mensal e a temperatura média mensal. Correlação esperada uma vez que a demanda energética do perfil do edifício é bastante impactada devido ao sistema de climatização. Tal correlação é visivelmente observada para os meses de julho e agosto, os quais registraram os meses de menor temperatura média mensal e consequentemente os menores consumos mensais. Contudo, embora os meses com maior temperatura média ocorra nos meses de Dezembro, Janeiro e Fevereiro, o pico de consumo mensal foi registrado no mês de Maio. Tal fenômeno ocorre pois há a maior ocorrência de feriados, recessos de final de ano e férias dos servidores, reduzindo consideravelmente o número de ocupantes no edifício, parâmetro que impacta diretamente no uso e consumo do sistema de climatização e consequentemente da energia elétrica. O maior consumo registrado foi no mês de Maio, com o total de 30.423 kWh e o menor consumo registrado no mês de Julho, com 22.025 kWh.

No período analisado de 1 ano, o edifício consumiu um total de 316.716 kWh de consumo ativo. Em virtude do edifício utilizar a tarifa horossazonal verde, é de suma importância mensurar os consumos nos horários de ponta e fora de ponta. Deste montante, o total do consumo pode ser dividido entre os horários de pico e fora de pico, com consumo anual de 14.842 kWh e de 301.874 kWh, respectivamente.

Figura 29: Demanda energética mensal anualizada e temperatura média mensal



Fonte: O autor (2023)

5.1.1.2 Consumo estimado do sistema de climatização instalado tipo Split

A Tabela 14 apresenta o consumo mensal dos equipamentos do tipo split, divididos pelo horário de pico e fora de pico, em kWh_{elétrico} e o Coeficiente de Performance médio mensal do sistema.

Anualmente, estima-se que o consumo total do sistema de climatização ($E_{AC.TOTAL}$) é de 187.1 MWh, sendo 13,5 MWh e 174,6 MWh utilizados nos horários de ponta ($E_{AC.PONTA}$) e fora de ponta ($E_{AC.FORA.PONTA}$). O COP médio anual do sistema de climatização é de 1,85, com variação de 1,80 a 1,90.

Tabela 14: Consumo elétrico segmentado nos horários de pico e fora de pico e COP mensal em kWh

Mês	$E_{AC.FORA.PONTA}$	$E_{AC.PONTA}$	$E_{AC.TOTAL}$	COP_{mensal}
Janeiro	16.188	1.339	17.527	1,85
Fevereiro	12.929	980	13.909	1,87
Março	16.008	1.382	17.390	1,80

Abril	13.729	1.037	14.765	1,87
Maio	15.626	1.221	16.848	1,83
Junho	13.244	948	14.193	1,86
Julho	11.621	768	12.388	1,90
Agosto	14.137	1.010	15.148	1,87
Setembro	13.992	1.120	15.111	1,82
Outubro	16.835	1.449	18.284	1,81
Novembro	15.463	1.229	16.692	1,85
Dezembro	13.820	1.022	14.842	1,89
Total	173.591	13.505	187.096	1,85

Fonte: O autor (2023)

A partir da definição da estimativa de consumo do sistema de climatização foi possível quantificar a energia consumida pelos outros sistemas instalados na edificação, como iluminação, equipamentos eletrônicos, elevadores, bombeamento de água, etc.

A Tabela 15 apresenta a estimativa do consumo ativo anual do sistema de climatização e outros (iluminação, equipamentos eletrônicos, elevadores, bombeamento de água, entre outros), pormenorizados nos horários de ponta e fora de ponta, bem como o total anual.

Tabela 15: Consumo ativo nos horários de ponta, fora de ponta e total anual em kWh

Parâmetro	Horário Fora de Ponta	Horário Ponta	Total
Climatização	173.591	13.505	187.096
Outros	128.283	1.337	129.620
Total	301.874	14.842	316.716

Fonte: O autor (2023)

Como o objetivo deste trabalho é o estudo aplicado à otimização do sistema de condicionamento de ar auxiliado por painéis fotovoltaicos, não haverá um estudo mais aprofundado no consumo e otimização dos outros equipamentos. Neste sentido, os valores de consumo ativo de “Outros” obtidos desta simulação serão replicados na análise energética dos demais cenários propostos.

Contudo, em uma análise pormenorizada entre os horários de consumo, têm-se que anualmente o sistema de climatização consome 91,0 % de toda a energia do período de ponta. Já para o horário fora de ponta, o sistema corresponde a um percentual de 57,5% para o período. Anualmente, o sistema de climatização atual é responsável por cerca de 59,1% de toda a energia elétrica consumida pela edificação, sendo os outros 40,9% distribuídos entre o sistema de iluminação, equipamentos eletrônicos, elevadores, bombeamento de água, etc.

5.1.2 Cenário 1 – Splits antigos

Com o intuito de reduzir a dependência energética do edifício, foi proposto a utilização de 220 de painéis fotovoltaicos, com potência instalada de 129,8 kWp. A Tabela 16 apresenta a geração mensal estimada em kWh para a configuração utilizada, divididos em energia fotovoltaica gerada no horário de ponta (PV_{PONTA}), no horário fora de ponta ($PV_{\text{Fora.PONTA}}$) e mensal total (PV).

Tabela 16: Geração fotovoltaica mensal estimada em kWh

Mês	$PV_{\text{FORA.PONTA}}$	PV_{PONTA}	PV
Janeiro	18.432	243	18.676
Fevereiro	14.941	200	15.141
Março	14.799	143	14.942
Abril	17.576	83	17.659
Maio	13.486	39	13.525
Junho	12.179	40	12.219
Julho	13.231	63	13.294
Agosto	14.485	82	14.567
Setembro	14.442	68	14.509
Outubro	18.063	64	18.127
Novembro	17.090	75	17.165
Dezembro	20.377	160	20.538
Total	189.103	1.259	190.362

Fonte: O autor (2023)

Anualmente, é estimado que os painéis fotovoltaicos tenham uma geração total de 190,4 MWh de energia, distribuída em 189.1 MWh de energia elétrica nos horários de fora de ponta e 1.3 MWh de energia elétrica nos horários de ponta. Da tabela, é possível observar que a energia fotovoltaica é gerada majoritariamente nos horários fora de ponta.

Com a proposta de instalação dos painéis fotovoltaicos, foi analisada a performance energética em associação ao sistema de climatização atual por meio dos parâmetros SF e SCR_{mensal} .

5.1.2.1 Consumo do sistema de climatização – Splits

Para a análise da performance energética do sistema de climatização auxiliado pelos painéis fotovoltaicos, foi estimado o consumo ativo dos condicionadores de ar que são instantaneamente supridos pela geração de energia fotovoltaica ($E_{\text{pv,ac}}$). Os valores simulados estão dispostos na Tabela 17, divididos em horário de ponta ($E_{\text{pv,ac.PONTA}}$), fora de ponta ($E_{\text{pv,ac.FORA.PONTA}}$) e total ($E_{\text{pv,ac.TOTAL}}$).

Tabela 17: Energia consumida pelos splits diretamente das placas fotovoltaicas em kWh

Mês	$E_{\text{pv,ac.FORA.PONTA}}$	$E_{\text{pv,ac.PONTA}}$	$E_{\text{pv,ac.TOTAL}}$
Janeiro	12.008	176	12.183
Fevereiro	9.210	144	9.354
Março	9.812	97	9.909
Abril	10.623	56	10.679
Maio	9.347	28	9.375
Junho	8.097	28	8.125
Julho	7.904	44	7.948
Agosto	9.598	59	9.656
Setembro	9.036	44	9.079
Outubro	12.164	52	12.215
Novembro	11.225	54	11.278
Dezembro	11.508	107	11.615
Total	120.530	886	121.416

Fonte: O autor (2023)

A partir dos dados da simulação da energia fotovoltaica consumida diretamente pelos PVAC, é possível determinar os parâmetros de autonomia e eficiência SF e SCR para os horários de ponta e fora de ponta.

A Tabela 18 apresenta os valores do parâmetro SF (SF_{Total}) mensal e total anual, obtidos para os horários fora de ponta ($SF_{Fora.Ponta}$) e ponta (SF_{Ponta}).

Tabela 18: Valores dos parâmetros de SF para cenário 1

Mês	$SF_{Fora.Ponta}$	SF_{Ponta}	SF_{Total}
Janeiro	0,74	0,13	0,70
Fevereiro	0,71	0,15	0,67
Março	0,61	0,07	0,57
Abril	0,77	0,05	0,72
Maio	0,60	0,02	0,56
Junho	0,61	0,03	0,57
Julho	0,68	0,06	0,64
Agosto	0,68	0,06	0,64
Setembro	0,65	0,04	0,60
Outubro	0,72	0,04	0,67
Novembro	0,73	0,04	0,68
Dezembro	0,83	0,10	0,78
Total	0,69	0,07	0,65

Fonte: O autor (2023)

Da análise do parâmetro SF, observa-se uma baixa autonomia e independência do sistema da rede pública. Foram obtidos valores anuais de 0,69 para horários fora de ponta e 0,07 para o horário de ponta, o que demonstra que de toda a energia consumida pelos climatizadores, apenas 69% da energia no horário de fora de ponta é proveniente da geração fotovoltaica e 7% no horário de ponta. Contudo, devido ao funcionamento dos condicionadores de ar serem dentro do horário fora de ponta, a média do índice SF anual ficou em 0,65.

A Tabela 19 apresenta os valores dos parâmetros de autoconsumo (SCR) considerando a geração de energia fotovoltaica apenas durante os dias úteis e com a produção aos finais de semana. Os resultados estão do índice SCR estão separados para os calculados no horário fora de ponta ($SCR_{Fora.Ponta}$) e no horário de ponta (SCR_{Ponta})

Tabela 19: Valores dos parâmetros de SCR para o cenário 1

Mês	Dias úteis			Dias úteis e finais de semana		
	SCR _{Fora.Ponta}	SCR _{Ponta}	SCR _{Total}	SCR _{Fora.Ponta}	SCR _{Ponta}	SCR _{Total}
Janeiro	0,90	1,00	0,90	0,65	1,00	0,65
Fevereiro	0,88	0,99	0,88	0,61	0,99	0,62
Março	0,95	1,00	0,95	0,66	1,00	0,66
Abril	0,86	1,00	0,86	0,60	1,00	0,60
Maio	0,95	1,00	0,95	0,69	1,00	0,69
Junho	0,95	1,00	0,95	0,66	1,00	0,66
Julho	0,85	1,00	0,85	0,60	1,00	0,60
Agosto	0,91	1,00	0,91	0,66	1,00	0,66
Setembro	0,93	1,00	0,93	0,62	1,00	0,63
Outubro	0,91	1,00	0,91	0,67	1,00	0,67
Novembro	0,91	1,00	0,91	0,66	1,00	0,66
Dezembro	0,82	1,00	0,83	0,56	1,00	0,57
Total	0,90	1,00	0,90	0,64	1,00	0,64

Fonte: O autor (2023)

Da análise dos resultados obtidos, é possível observar que aproximadamente toda a energia fotovoltaica gerada durante os dias da semana foram consumidos pelo sistema fotovoltaico, mantendo uma média anual de 0,90, ou seja, o que indica que 90% de toda a energia fotovoltaica gerada pelos painéis fotovoltaicos durante os dias da semana foi consumida pelo sistema de climatização. Ainda, o parâmetro SCR mensal, considerando toda a geração de energia fotovoltaica, inclusive aos finais de semana é possível observar que houve uma redução dos índices do parâmetro de SCR para cerca de 0,64. Isso ocorre pelo fato da disponibilidade de energia fotovoltaica gerada aos finais de semana que não é absorvida pelo sistema de climatização, demonstrando o impacto da geração fotovoltaica aos finais de semana.

Com isso, considerando os três indicadores analisados foi possível identificar a insuficiência da capacidade fotovoltaica instalada em fornecer energia para sistema de climatização, evidenciada pelos baixos índices de SF e altos índices de SCR considerando apenas os dias úteis. Contudo, o aumento da capacidade de geração de energia fotovoltaica impactaria negativamente na performance quanto à eficiência da

compatibilidade entre o sistema de geração e o consumo pela climatização, sobretudo quanto à geração aos finais de semana.

Em virtude de o enfoque do estudo em questão ser o desenvolvimento de um climatizador solar fotovoltaico ligado à rede de energia, toda a energia excedente não utilizada pelo sistema de climatização foi assumido que fora injetado à rede pública para ser utilizada na forma de créditos futuros. A Tabela 20 apresenta a quantidade de energia fotovoltaica excedente injetada à rede em kWh. Os valores estão divididos de acordo com os horários de ponta ($PV_{\text{Ponta.Injetada}}$) e horários fora de ponta ($PV_{\text{Fora.Ponta.Injetada}}$).

Tabela 20: Energia fotovoltaica injetada na rede no cenário 1 em kWh

Mês	$PV_{\text{Fora.Ponta.Injetada}}$	$PV_{\text{Ponta.Injetada}}$	$PV_{\text{Total.Injetada}}$
Janeiro	6.492	0	6.492
Fevereiro	5.786	1	5.787
Março	5.033	0	5.033
Abril	6.980	0	6.980
Maio	4.150	0	4.150
Junho	4.094	0	4.094
Julho	5.347	0	5.347
Agosto	4.910	0	4.910
Setembro	5.430	0	5.430
Outubro	5.912	0	5.912
Novembro	5.887	0	5.887
Dezembro	8.923	0	8.923
Total	68.944	1	68.946

Fonte: O autor (2023)

Deste modo, considerando as análises, o perfil do consumo energético da edificação da rede pública é apresentado na Tabela 21.

Tabela 21: Perfil do consumo energético anual da edificação da rede pública para cenário 1 em kWh

Parâmetro	Horário Fora de Ponta	Horário Ponta	Total
Climatização	53.061	12.619	65.680
Outros	128.283	1.337	129.620
PV (-)	68.944	1	68.946
Total	112.400	13.954	126.354

Fonte: O autor (2023)

Do cenário de referência, com a instalação do sistema fotovoltaico estima-se que o sistema de climatização reduza em 69% do consumo de energia no horário fora de ponta, 7% no horário de ponta, o que corresponde a uma redução total de 65% de energia anual. Ainda, quanto à redução do consumo energético da edificação considerando a energia fotovoltaica injetada, a redução esperada é de 63% no horário fora de ponta, 6% no horário de ponta, perfazendo uma redução energética total de 60% do consumo da edificação com a proposta.

5.1.3 Cenário 2 – Renovação dos equipamentos *splits* com painéis fotovoltaicos

O cenário 2 foi simulado com a substituição do sistema de climatização do tipo split system por equipamentos novos com COP padrão de 3,13 e a instalação fotovoltaica de potência 76,7 kWp. A Tabela 22 apresenta a geração mensal estimada em kWh para a configuração utilizada, divididos em energia fotovoltaica gerada no horário de ponta (PV_{PONTA}), no horário fora de ponta ($PV_{Fora.PONTA}$) e mensal total (PV).

Tabela 22: Geração fotovoltaica mensal estimada em kWh

Mês	$PV_{FORA.PONTA}$	PV_{PONTA}	PV
Janeiro	10.932	104	11.035
Fevereiro	8.861	85	8.946
Março	8.772	57	8.829
Abril	10.401	33	10.434
Maior	7.975	16	7.992
Junho	7.204	16	7.220

Julho	7.830	26	7.855
Agosto	8.573	35	8.607
Setembro	8.548	26	8.573
Outubro	10.681	30	10.711
Novembro	10.111	32	10.143
Dezembro	12.073	63	12.136
Total	111.960	523	112.483

Fonte: O autor (2023)

Anualmente, é estimado que os painéis fotovoltaicos tenham uma geração total de 112,5 MWh de energia, distribuída em 112 MWh de energia elétrica nos horários de fora de ponta e 0,5 MWh de energia elétrica nos horários de ponta.

Os resultados do consumo mensal total do sistema de climatização (E_{AC}) para os horários de ponta ($E_{AC,PONTA}$) e fora de ponta ($E_{AC,FORA,PONTA}$), do COP e o consumo ativo dos condicionadores de ar que são instantaneamente supridos pela geração de energia fotovoltaica ($E_{PV,AC}$) nos horários de ponta ($E_{pv,ac,PONTA}$) e fora de ponta ($E_{pv,ac,FORA,PONTA}$) estão dispostos na Tabela 23.

Tabela 23: Energia consumida, COP e consumo instantâneo da climatização da energia fotovoltaica para cenário 2 em kWh

Mês	$E_{AC,FORA,PONTA}$	$E_{AC,PONTA}$	$E_{AC,TOTAL}$	COP_{mensal}	$E_{pv,ac,FORA,PONTA}$	$E_{pv,ac,PONTA}$	$E_{pv,ac,TOTAL}$
Janeiro	9.670	800	10.470	3,10	7.135	104	7.239
Fevereiro	7.723	585	8.309	3,12	5.473	85	5.558
Março	9.563	825	10.388	3,01	5.819	57	5.876
Abril	8.201	619	8.820	3,13	6.318	33	6.351
Maio	9.335	730	10.064	3,06	5.539	16	5.555
Junho	7.912	566	8.478	3,11	4.798	16	4.814
Julho	6.942	459	7.400	3,18	4.694	26	4.720
Agosto	8.445	604	9.049	3,12	5.697	35	5.732
Setembro	8.358	669	9.027	3,04	5.362	26	5.388
Outubro	10.057	866	10.922	3,03	7.227	30	7.258

Novembro	9.237	734	9.971	3,09	6.667	32	6.699
Dezembro	8.256	611	8.866	3,17	6.850	63	6.913
Total	103.698	8.068	111.765	3,09	71.579	522	72.102

Fonte: O autor (2023)

A partir dos dados da simulação da energia fotovoltaica consumida diretamente pelos PVAC, foi possível determinar os parâmetros de autonomia e eficiência SF e SCR para os horários de ponta e fora de ponta.

A Tabela 24 apresenta os valores do parâmetro SF mensal e total anual, obtidos para os horários fora de ponta ($SF_{\text{Fora.Ponta}}$) e ponta (SF_{Ponta}).

Tabela 24: Valores dos parâmetros de SF para cenário 2 em kWh

Mês	$SF_{\text{Fora.Ponta}}$	SF_{Ponta}	SF_{Total}
Janeiro	0,74	0,13	0,69
Fevereiro	0,71	0,15	0,67
Março	0,61	0,07	0,57
Abril	0,77	0,05	0,72
Maio	0,59	0,02	0,55
Junho	0,61	0,03	0,57
Julho	0,68	0,06	0,64
Agosto	0,67	0,06	0,63
Setembro	0,64	0,04	0,60
Outubro	0,72	0,04	0,66
Novembro	0,72	0,04	0,67
Dezembro	0,83	0,10	0,78
Total	0,69	0,06	0,65

Fonte: O autor (2023)

Da análise do parâmetro SF, observa-se uma baixa autonomia e independência do sistema da rede pública. Foram obtidos valores anuais de 0,69 para horários fora de ponta e 0,06 para o horário de ponta, o que demonstra que de toda a energia consumida pelos climatizadores anualmente, apenas 69% da energia no horário de fora de ponta foi proveniente da geração fotovoltaica e 6% no horário de ponta. Contudo, devido ao funcionamento dos condicionadores de ar serem dentro do horário fora de ponta, a média do índice SF anual ficou em 0,65.

A Tabela 25 apresenta os valores dos parâmetros de SCR mensal, considerando a geração de energia fotovoltaica apenas durante os dias úteis e com a produção aos finais de semana. Os resultados estão do índice SCR estão separados para os calculados no horário fora de ponta ($SCR_{\text{Fora.Ponta}}$) e no horário de ponta (SCR_{Ponta})

Tabela 25: Valores dos parâmetros de SCR mensal para cenário 2

Mês	Dias úteis			Dias úteis e finais de semana		
	$SCR_{\text{Fora.Ponta}}$	SCR_{Ponta}	SCR_{Total}	$SCR_{\text{Fora.Ponta}}$	SCR_{Ponta}	SCR_{Total}
Janeiro	0,90	1,00	0,90	0,65	1,00	0,66
Fevereiro	0,88	0,99	0,88	0,62	0,99	0,62
Março	0,96	1,00	0,96	0,66	1,00	0,67
Abril	0,86	1,00	0,87	0,61	1,00	0,61
Maio	0,95	1,00	0,95	0,69	1,00	0,70
Junho	0,95	1,00	0,95	0,67	1,00	0,67
Julho	0,86	1,00	0,86	0,60	1,00	0,60
Agosto	0,91	1,00	0,91	0,66	1,00	0,67
Setembro	0,93	1,00	0,93	0,63	1,00	0,63
Outubro	0,91	1,00	0,91	0,68	1,00	0,68
Novembro	0,91	1,00	0,91	0,66	1,00	0,66
Dezembro	0,83	1,00	0,83	0,57	1,00	0,57
Total	0,90	1,00	0,90	0,64	1,00	0,64

Fonte: O autor (2023)

Da análise dos resultados obtidos, é possível observar que aproximadamente toda a energia fotovoltaica gerada durante os dias da semana foram consumidos pelo sistema fotovoltaico, mantendo uma média anual de 090, ou seja, o que indica que 90% de toda a energia fotovoltaica gerada pelos painéis fotovoltaicos durante os dias da semana foi consumida instantaneamente pelo sistema de climatização.

De modo complementar, dos valores do parâmetro de SCR mensal, considerando a geração inclusive aos finais de semana foi possível observar que houve uma redução dos índices de SCR para cerca de 0,64. Isso ocorre pelo fato da disponibilidade de energia fotovoltaica gerada aos finais de semana que não é absorvida pelo sistema de climatização, demonstrando o impacto da geração fotovoltaica aos finais de semana.

Considerando os três indicadores analisados é possível identificar a insuficiência da capacidade fotovoltaica instalada em fornecer energia para sistema de climatização,

evidenciada pelos baixos índices de SF e altos índices de SCR considerando apenas os dias úteis. De forma análoga ao cenário anterior, o aumento da capacidade de geração de energia fotovoltaica impactaria negativamente na performance quanto à eficiência da compatibilidade entre o sistema de geração e o consumo pela climatização, sobretudo quanto à geração aos finais de semana.

Em razão do alto consumo de energia fotovoltaica pelos climatizadores de ar instantânea, é possível inferir que a produção de energia fotovoltaica produzida aos finais de semana são injetados à rede no sentido da obtenção de créditos para abatimentos futuros. A Tabela 26 apresenta a estimativa mensal e anual do montante de energia injetada à rede para ser utilizada na forma de créditos. Os valores estão divididos de acordo com os horários de ponta ($PV_{\text{Ponta.Injetada}}$) e horários fora de ponta ($PV_{\text{Fora.Ponta.Injetada}}$).

Tabela 26: Energia fotovoltaica injetada na rede para cenário 2 em kWh

Mês	$PV_{\text{Fora.Ponta.Injetada}}$	$PV_{\text{Ponta.Injetada}}$	$PV_{\text{Total.Injetada}}$
Janeiro	3.797	0	3.797
Fevereiro	3.388	0	3.389
Março	2.953	0	2.953
Abril	4.083	0	4.083
Maio	2.436	0	2.436
Junho	2.406	0	2.406
Julho	3.135	0	3.135
Agosto	2.876	0	2.876
Setembro	3.185	0	3.185
Outubro	3.454	0	3.454
Novembro	3.444	0	3.444
Dezembro	5.223	0	5.223
Total	40.381	1	40.381

Fonte: O autor (2023)

Deste modo, considerando as análises, o perfil do consumo energético da edificação da rede pública é apresentado na Tabela 27.

Tabela 27: Perfil do consumo energético anual da edificação da rede pública para Cenário 2 em kWh

Parâmetro	Horário Fora de Ponta	Horário Ponta	Total
Climatização	32.118	7.545	39.664
Outros	128.283	1.337	129.620
PV (-)	40.381	1	40.381
Total	120.021	8.881	128.902

Fonte: O autor (2023)

Do cenário de referência, constata-se uma redução de 78,8% do consumo do sistema de climatização da rede pública anualmente, sendo 81,5% nos horários fora de ponta e 44,13% nos horários de ponta. Com a redução do consumo do sistema de climatização da energia proveniente da rede pública com os créditos de energia injetados, estima-se uma atenuação de 59,3% da dependência da rede pública, sendo 60,24% no horário fora de ponta e 40,16% no horário de ponta.

5.1.4 Cenário 3 – Sistema de climatização com VRF e painéis fotovoltaicos

O cenário 3 foi simulado com a substituição do sistema de climatização do tipo split system por equipamentos do tipo central VRF e a instalação fotovoltaica de potência 56,05 kWp . A Tabela 28 apresenta a geração mensal estimada em kWh para a configuração utilizada, divididos em energia fotovoltaica gerada no horário de ponta (PV_{PONTA}), no horário fora de ponta ($PV_{\text{FORA.PONTA}}$) e mensal total (PV).

Tabela 28: Geração fotovoltaica mensal estimada em kWh

Mês	$PV_{\text{FORA.PONTA}}$	PV_{PONTA}	PV
Janeiro	7.988	76	8.064
Fevereiro	6.475	62	6.537
Março	6.410	42	6.452
Abril	7.601	24	7.625
Maio	5.828	12	5.840
Junho	5.264	12	5.276
Julho	5.721	19	5.740

Agosto	6.265	25	6.290
Setembro	6.246	19	6.265
Outubro	7.805	22	7.827
Novembro	7.389	23	7.412
Dezembro	8.822	46	8.868
Total	81.815	381	82.196

Fonte: O autor (2023)

Anualmente, é estimado que os painéis fotovoltaicos tenham uma geração total de 82,2 MWh de energia, distribuída em 81,8 MWh de energia elétrica nos horários de fora de ponta e 0,4 MWh de energia elétrica nos horários de ponta.

Os resultados do consumo mensal total do sistema de climatização (E_{AC}), do COP e o consumo ativo dos condicionadores de ar que são instantaneamente supridos pela geração de energia fotovoltaica para os horários de ponta ($E_{pv,ac.PONTA}$), fora de ponta ($E_{pv,ac.FORA.PONTA}$) e total ($E_{pv,ac.TOTAL}$) estão dispostos na Tabela 29.

Tabela 29: Energia consumida, COP e consumo instantâneo da climatização da energia fotovoltaica para cenário 3 em kWh

Mês	$E_{AC.FORA.PONTA}$	$E_{AC.PONTA}$	$E_{AC.TOTAL}$	COP_{mensal}	$E_{pv,ac.FORA.PONTA}$	$E_{pv,ac.PONTA}$	$E_{pv,ac.TOTAL}$
Janeiro	7.312	529	7.841	3,81	5.296	76	5.371
Fevereiro	5.610	395	6.005	3,95	3.996	62	4.058
Março	7.528	563	8.090	3,64	4.312	42	4.353
Abril	5.992	421	6.413	3,95	4.643	24	4.668
Maio	6.994	491	7.485	3,80	4.016	12	4.028
Junho	5.640	390	6.030	3,96	3.459	12	3.471
Julho	4.745	339	5.084	4,14	3.320	19	3.338
Agosto	5.846	410	6.256	4,01	4.097	25	4.122
Setembro	6.072	425	6.497	3,80	3.883	19	3.901
Outubro	7.687	556	8.242	3,69	5.362	22	5.384
Novembro	6.837	475	7.312	3,82	4.901	23	4.924
Dezembro	5.846	400	6.246	4,04	4.945	46	4.991
Total	76.108	5.394	81.502	3,87	52.229	381	52.610

Fonte: O autor (2023)

A partir dos dados da simulação da energia fotovoltaica consumida diretamente pelos PVAC, foi possível determinar os parâmetros de autonomia e eficiência SF e SCR para os horários de ponta e fora de ponta.

A Tabela 30 apresenta os valores do parâmetro SF mensal e total anual, obtidos para os horários fora de ponta ($SF_{\text{Fora.Ponta}}$) e ponta (SF_{Ponta}).

Tabela 30: Valores dos parâmetros de SF para cenário 3

Mês	$SF_{\text{Fora.Ponta}}$	SF_{Ponta}	SF_{Total}
Janeiro	0,72	0,14	0,69
Fevereiro	0,71	0,16	0,68
Março	0,57	0,07	0,54
Abril	0,77	0,06	0,73
Maio	0,57	0,02	0,54
Junho	0,61	0,03	0,58
Julho	0,70	0,06	0,66
Agosto	0,70	0,06	0,66
Setembro	0,64	0,04	0,60
Outubro	0,70	0,04	0,65
Novembro	0,72	0,05	0,67
Dezembro	0,85	0,12	0,80
Total	0,69	0,07	0,65

Fonte: O autor (2023)

Da análise do parâmetro SF, observa-se que os climatizadores de ar do tipo VRF possuem uma boa autonomia e independência do sistema da rede pública. Foram obtidos valores anuais de 0,69 para horários fora de ponta e 0,07 para o horário de ponta, o que demonstra que de toda a energia consumida pelos climatizadores, 69% da energia no horário de fora de ponta foi proveniente da geração fotovoltaica enquanto que no horário de ponta foi apenas 7%. Contudo, devido ao funcionamento dos condicionadores de ar serem dentro do horário fora de ponta, a média do índice SF anual ficou em 0,65.

A Tabela 31 apresenta os valores dos parâmetros de SCR mensal, considerando apenas a geração de energia fotovoltaica durante os dias úteis, excluindo a produção aos

finais de semana. Os resultados estão do índice SCR estão separados para os calculados no horário fora de ponta ($SCR_{\text{Fora.Ponta}}$) e no horário de ponta (SCR_{Ponta})

Tabela 31: Valores do parâmetro SCR para cenário 3

Mês	Dias úteis			Dias úteis e finais de semana		
	$SCR_{\text{Fora.Ponta}}$	SCR_{Ponta}	SCR_{Total}	$SCR_{\text{Fora.Ponta}}$	SCR_{Ponta}	SCR_{Total}
Janeiro	0,92	1,00	0,92	0,66	1,00	0,67
Fevereiro	0,88	1,00	0,88	0,62	1,00	0,62
Março	0,97	1,00	0,97	0,67	1,00	0,67
Abril	0,87	1,00	0,87	0,61	1,00	0,61
Maio	0,95	1,00	0,95	0,69	1,00	0,69
Junho	0,94	1,00	0,94	0,66	1,00	0,66
Julho	0,83	1,00	0,83	0,58	1,00	0,58
Agosto	0,90	1,00	0,90	0,65	1,00	0,66
Setembro	0,92	1,00	0,92	0,62	1,00	0,62
Outubro	0,93	1,00	0,93	0,69	1,00	0,69
Novembro	0,92	1,00	0,92	0,66	1,00	0,66
Dezembro	0,82	1,00	0,82	0,56	1,00	0,56
Total	0,90	1,00	0,90	0,64	1,00	0,64

Fonte: O autor (2023)

Da análise dos resultados obtidos, é possível observar que o sistema de climatização tem participação relevante no consumo da energia fotovoltaica gerada durante os dias da semana. Para o período de análise, cerca de 90% de toda geração de energia obtida nos dias úteis foram consumidos pelo sistema de climatização no horário fora de ponta e 100% da geração foi utilizada no horário de ponta.

Já para os valores dos parâmetros de SCR mensal considerando toda a geração de energia fotovoltaica, inclusive aos finais de semana, da análise dos resultados obtidos é possível observar que houve uma redução dos índices do parâmetro de SCR, tendo o SCR anual médio reduzido para cerca de 0,64, demonstrando o impacto da disponibilidade de energia fotovoltaica gerada aos finais de semana que não é absorvida pelo sistema de climatização.

Com isso, considerando os três indicadores analisados é possível constatar uma boa compatibilidade entre a geração de energia fotovoltaica e o consumo pelos climatizadores. Ainda, os indicadores SF e $SCR_{\text{dias.úteis}}$ indicam que com a instalação de

sistema de armazenamento de energia relativamente pequeno seria possível otimizar a eficiência e independência dos climatizadores de ar fotovoltaicos. Contudo, embora o aumento da capacidade da instalação de geração fotovoltaica seja benéfica e contribua para a independência do sistema de climatização com aumento o índice SF, a quantidade de energia fotovoltaica gerada e não utilizada seria relativamente grande, principalmente devido aos finais de semana.

Em razão do alto consumo de energia fotovoltaica pelos climatizadores de ar instantânea, é possível inferir que a produção de energia fotovoltaica produzida aos finais de semana deveria ser injetada à rede no sentido da obtenção de créditos para abatimentos futuros. A Tabela 32 apresenta a estimativa mensal e anual do montante de energia injetada à rede para ser utilizada na forma de créditos. Os valores estão divididos de acordo com os horários de ponta ($PV_{\text{Ponta.Injetada}}$) e horários fora de ponta ($PV_{\text{Fora.Ponta.Injetada}}$).

Tabela 32: Energia fotovoltaica injetada na rede para cenário 3 em kWh

Mês	$PV_{\text{Fora.Ponta.Injetada}}$	$PV_{\text{Ponta.Injetada}}$	$PV_{\text{Total.Injetada}}$
Janeiro	2.692	0	2.692
Fevereiro	2.479	0	2.479
Março	2.098	0	2.098
Abril	2.957	0	2.957
Maio	1.812	0	1.812
Junho	1.805	0	1.805
Julho	2.402	0	2.402
Agosto	2.168	0	2.168
Setembro	2.363	0	2.363
Outubro	2.444	0	2.444
Novembro	2.488	0	2.488
Dezembro	3.877	0	3.877
Total	29.586	0	29.586

Fonte: O autor (2023)

Deste modo, considerando as análises, o perfil do consumo energético da edificação da rede pública é apresentado na Tabela 33.

Tabela 33: Perfil do consumo energético anual da edificação da rede pública no cenário 3 em kWh

Parâmetro	Horário Fora de Ponta	Horário Ponta	Total
Climatização	23.879	5.013	28.892
Outros	128.283	1.337	129.620
PV (-)	29.586	0	29.586
Total	122.576	6.350	128.926

Fonte: O autor (2023)

Do cenário de referência, é possível observar que o consumo energético do sistema de climatização reduziu em 86,24% do consumo anual no horário fora de ponta e 62,88% no horário de ponta da energia requisitada da rede, o que equivale a uma redução no consumo total de 84,56% em bases anuais. Já para o consumo da edificação, a simulação indica a redução em 59,39% no horário fora de ponta, 57,22% no horário de ponta e de 59,29% no consumo total da edificação da rede pública, considerando os créditos gerados pela energia fotovoltaica injetados à rede.

5.1.5 Cenário 4 – Sistema de climatização Chiller com termoacumulação e painéis fotovoltaicos

O cenário 4 foi simulado com a substituição do sistema de climatização do tipo split system por equipamentos do tipo chiller com termoacumulador e a instalação fotovoltaica de potência 76,7 kWp, mesma potência do cenário 2. A Tabela 34 apresenta a geração mensal estimada em kWh para a configuração utilizada, divididos em energia fotovoltaica gerada no horário de ponta (PV_{PONTA}), no horário fora de ponta ($PV_{\text{Fora.PONTA}}$) e mensal total (PV).

Tabela 34: Geração fotovoltaica mensal estimada em kWh

Mês	$PV_{\text{FORA.PONTA}}$	PV_{PONTA}	PV
Janeiro	10.932	104	11.035
Fevereiro	8.861	85	8.946
Março	8.772	57	8.829
Abril	10.401	33	10.434

Maio	7.975	16	7.992
Junho	7.204	16	7.220
Julho	7.830	26	7.855
Agosto	8.573	35	8.607
Setembro	8.548	26	8.573
Outubro	10.681	30	10.711
Novembro	10.111	32	10.143
Dezembro	12.073	63	12.136
Total	111.960	523	112.483

Fonte: O autor (2023)

Anualmente, é estimado que os painéis fotovoltaicos tenham uma geração total de 112,5 MWh de energia, distribuída em 112 MWh de energia elétrica nos horários de fora de ponta e 0,5 MWh de energia elétrica nos horários de ponta.

Os resultados do consumo mensal total do sistema de climatização (E_{AC}), do COP e o consumo ativo dos condicionadores de ar que são instantaneamente supridos pela geração de energia fotovoltaica ($E_{PV,AC}$) nos horário de ponta ($E_{pv,ac.PONTA}$), fora de ponta ($E_{pv,ac.FORA.PONTA}$) e total ($E_{pv,ac.TOTAL}$) estão dispostos na Tabela 35.

Tabela 35: Energia consumida, COP e consumo instantâneo da climatização da energia fotovoltaica para cenário 4 em kWh

Mês	$E_{AC.FORA.PONTA}$	$E_{AC.PONTA}$	$E_{AC.TOTAL}$	COP_{mensal}	$E_{pv,ac.FORA.PONTA}$	$E_{pv,ac.PONTA}$	$E_{pv,ac.TOTAL}$
Janeiro	10.183	82	10.264	3,14	8.668	58	8.726
Fevereiro	8.565	55	8.619	2,98	6.794	40	6.834
Março	10.494	89	10.583	2,84	7.651	39	7.690
Abril	9.255	68	9.323	2,92	8.028	27	8.055
Maio	9.905	67	9.972	3,10	7.175	14	7.189
Junho	8.961	51	9.012	2,88	6.297	14	6.311
Julho	6.913	41	6.955	3,33	5.145	17	5.161
Agosto	8.598	51	8.650	3,18	6.429	22	6.451
Setembro	9.573	60	9.632	2,80	7.137	21	7.157

Outubro	10.560	95	10.655	2,95	8.688	29	8.717
Novembro	9.967	87	10.054	2,94	8.187	29	8.216
Dezembro	9.210	53	9.263	3,01	8.445	31	8.476
Total	112.184	799	112.982	3,00	88.643	341	88.984

Fonte: O autor (2023)

A partir dos dados da simulação da energia fotovoltaica consumida diretamente pelos PVAC, é possível determinar os parâmetros de autonomia e eficiência SF e SCR para os horários de ponta e fora de ponta.

A Tabela 36 apresenta os valores do parâmetro SF mensal e total anual, obtidos para os horários fora de ponta ($SF_{\text{Fora.Ponta}}$) e ponta (SF_{Ponta}).

Tabela 36: Valores dos parâmetros de SF para cenário 4

Mês	$SF_{\text{Fora.Ponta}}$	SF_{Ponta}	SF_{Total}
Janeiro	0,85	0,71	0,85
Fevereiro	0,79	0,73	0,79
Março	0,73	0,44	0,73
Abril	0,87	0,40	0,86
Maio	0,72	0,21	0,72
Junho	0,70	0,27	0,70
Julho	0,74	0,41	0,74
Agosto	0,75	0,43	0,75
Setembro	0,75	0,35	0,74
Outubro	0,82	0,31	0,82
Novembro	0,82	0,34	0,82
Dezembro	0,92	0,59	0,92
Total	0,79	0,43	0,79

Fonte: O autor (2023)

Da análise do parâmetro SF, observa-se que os climatizadores de ar do tipo Chiller com termoacumulação possuem uma boa autonomia e independência do sistema da rede pública. Foram obtidos valores anuais de 0,79 para horários fora de ponta e 0,43 para o horário de ponta, o que demonstra que de toda a energia consumida pelos climatizadores, 79% da energia no horário de fora de ponta foi proveniente da geração fotovoltaica enquanto que no horário de ponta foi de 43%. Contudo, devido ao funcionamento dos

condicionadores de ar serem dentro do horário fora de ponta, a média do índice SF anual ficou em 0,79.

A Tabela 37 apresenta os valores dos parâmetros de SCR mensal, considerando toda a geração de energia fotovoltaica, inclusive aos finais de semana. Os resultados estão do índice SCR estão separados para os calculados no horário fora de ponta ($SCR_{\text{Fora.Ponta}}$) e no horário de ponta (SCR_{Ponta})

Tabela 37: Valores dos parâmetros de SCR mensal total para cenário 4

Mês	$SCR_{\text{Fora.Ponta}}$	SCR_{Ponta}	SCR_{Total}
Janeiro	0,80	0,40	0,79
Fevereiro	0,77	0,34	0,76
Março	0,87	0,46	0,87
Abril	0,77	0,56	0,77
Maio	0,90	0,64	0,90
Junho	0,88	0,60	0,87
Julho	0,66	0,46	0,66
Agosto	0,75	0,46	0,75
Setembro	0,84	0,52	0,83
Outubro	0,81	0,77	0,81
Novembro	0,81	0,66	0,81
Dezembro	0,70	0,33	0,70
Total	0,79	0,46	0,79

Fonte: O autor (2023)

Da análise dos resultados obtidos, é possível observar elevados índices do parâmetro de SCR mensal, de 0,79 para o horário fora de ponta, 0,46 para o horário de ponta e um total anual de 0,79. Isso indica que o sistema de climatização consome 79% da totalidade da geração de energia fotovoltaica, o que já era esperado, uma vez que a proposta abrange a termoacumulação de energia térmica aos finais de semana no intuito de aproveitar a disponibilidade de energia fotovoltaica, em alternativa à injeção da energia na rede para a obtenção dos créditos. Neste sentido, como o sistema de climatização atua aos finais de semana, o parâmetro SCR não foi calculado apenas para os dias úteis.

Com isso, considerando os três indicadores analisados foi possível constatar uma boa compatibilidade entre a geração de energia fotovoltaica e o consumo pelos climatizadores. Contudo, os indicadores SF e SCR indicam que a potência instalada dos

painéis fotovoltaicos é insuficiente para sustentar o sistema de climatização, sendo recomendado o aumento da potência instalada.

A Tabela 38 apresenta a estimativa mensal e anual do montante de energia injetada à rede para ser utilizada na forma de créditos. Os valores estão divididos de acordo com os horários de ponta ($PV_{\text{Ponta.Injetada}}$) e horários fora de ponta ($PV_{\text{Fora.Ponta.Injetada}}$).

Tabela 38: Energia fotovoltaica injetada na rede para cenário 4 em kWh

Mês	$PV_{\text{Fora.Ponta.Injetada}}$	$PV_{\text{Ponta.Injetada}}$	$PV_{\text{Total.Injetada}}$
Janeiro	2.223	86	2.309
Fevereiro	2.035	78	2.113
Março	1.094	45	1.139
Abril	2.358	22	2.379
Maio	795	8	803
Junho	900	9	909
Julho	2.674	20	2.694
Agosto	2.131	26	2.156
Setembro	1.397	19	1.416
Outubro	1.986	9	1.994
Novembro	1.912	15	1.927
Dezembro	3.596	64	3.659
Total	23.098	401	23.499

Fonte: O autor (2023)

Deste modo, considerando as análises, o perfil do consumo energético da edificação da rede pública é apresentado na Tabela 39.

Tabela 39: Perfil do consumo energético anual da edificação da rede pública para cenário 4 em kWh

Parâmetro	Horário Fora de Ponta	Horário Ponta	Total
Climatização	23.541	458	23.998
Outros	128.283	1.337	129.620
PV (-)	23.098	401	23.499
Total	128.725	1.394	130.119

Fonte: O autor (2023)

Do cenário de referência, é possível observar que o consumo energético do sistema de climatização reduziu em 86,44% do consumo anual no horário fora de ponta e 96,61% no horário de ponta da energia requisitada da rede, o que equivale a uma redução no consumo total de 87,17% no ano. Já para o consumo da edificação, considerando a energia injetada na rede, a simulação indica a redução em 57,36% no horário fora de ponta, 90,61% no horário de ponta e de 58,92% no consumo total da edificação da rede pública no ano.

5.2 ANÁLISE ECONÔMICA

5.2.1 Composição de tarifas e preços

O preço da tarifa de energia elétrica vigente aplicado pela distribuidora Neoenergia Pernambuco foi estimado após a aplicação das alíquotas dos tributos sobre o valor tarifário definido pela ANEEL. Os preços estão apresentados na Tabela 40. A componente tarifária TUSD Fio B foi apresentada separada, uma vez que há a previsão da incidência de cobrança deste componente sobre a energia fotovoltaica injetada na rede. Para a estrutura tarifária Horossazonal Verde do Grupo A4 ocorre a incidência da componente TUSD Fio B apenas no horário de ponta.

Tabela 40: Valores e preço das componentes tarifárias vigente da Neoenergia Pernambuco por MWh

Parâmetro	Horário	TUSD		TE	Total
		Fio B	Outros		
Tarifa	Ponta	R\$ 1.049,21	R\$ 211,09	R\$ 493,04	R\$ 1.753,34
	Fora ponta	R\$ 0,00	R\$ 45,92	R\$ 305,15	R\$ 351,07
Preço	Ponta	R\$ 1.346,00	R\$ 270,80	R\$ 632,51	R\$ 2.249,31
	Fora ponta	R\$ 0,00	R\$ 58,91	R\$ 391,47	R\$ 450,38

Fonte: O autor (2023)

5.2.2 Custos de aquisição de equipamentos

Para o levantamento dos custos de aquisição dos sistemas com novos splits, climatizador VRF e da geração fotovoltaica foi utilizado o Portal de Compras do Governo Federal. Da pesquisa das contratações públicas realizadas pela Administração, fora utilizado a média dos valores unitários encontrados. Já para a estimativa do custo de aquisição do sistema de climatização composto por chiller e um termoacumulador, foram utilizados os dados de Luerksen et al. (2020). Para a conversão da moeda, fora utilizado a cotação de R\$5,0822/USD (Banco Central do Brasil 2023). A Tabela 41 resume os custos de aquisição e implantação dos sistemas de climatização e geração de energia fotovoltaica.

Tabela 41: Custo de aquisição dos sistemas de climatização e energia fotovoltaica

Equipamento	Valor Unitário	Unidade	Quantidade	Valor
Splits novos	R\$ 7.000,00	Un	24	R\$168.000,00
VRF	R\$7.002,35	HP	36	R\$252.084,57
Chiller + Termoacumulador	R\$ 383.147,06	un	1	R\$ 383.147,06
Sistema fotovoltaico	R\$4.110,03	kWp	44,25	R\$181.868,66

Fonte: O autor (2023)

5.2.3 Custos de operação e manutenção de equipamentos

Os preços dos sistemas Splits, VRF e Chiller foram obtidos através de contratações vigentes da Autarquia local, refletindo os valores praticados entre contratos públicos privados de manutenção de climatização.

Contudo, embora exista diversas contratações de aquisição e instalação de sistemas fotovoltaicos, não há disponível ainda a contratação de serviços de manutenção anual de tais sistemas. Neste sentido, foi adotado a taxa de operação e manutenção de 6% em relação ao investimento inicial de aquisição (Leite 2019 Escribano 2018). A Tabela 42 representa os custos de operação e manutenção dos sistemas de climatização e geração fotovoltaica.

Tabela 42: Custos de operação e manutenção dos sistemas de climatização e geração fotovoltaica

Equipamento	Valor Unitário	Unidade	Quantidade	Valor
Splits	42,97	un	24	R\$ 12.374,40
VRF	R\$20,85	TR	28,66	R\$7.170,73
Chiller	R\$20.485,92	Un	1	R\$20.485,92
Sistema fotovoltaico – Caso 1	R\$533.481,38	%	6%	R\$ 32.008,88
Sistema fotovoltaico – Caso 2 e 4	R\$315.238,99	%	6%	R\$ 18.914,34
Sistema fotovoltaico – Caso 3	R\$230.366,98	%	6%	R\$ 13.822,02

Fonte: O autor (2023)

5.2.4 Cenário 1 – Instalação de painéis fotovoltaicos

Para o cenário 1, com a instalação dos painéis fotovoltaicos e a manutenção dos sistemas de climatização por splits antigos, os parâmetros econômicos calculados estão dispostos na Tabela 43. Podemos observar que o projeto se mostra viável uma vez que apresenta VPL positivo de R\$ 524.150,99, Taxa Interna de Retorno de 16,29%, superior à Taxa Mínima de Atratividade de 8% e Payback entre 8 e 9 anos, ante ao ciclo de vida do projeto de 20 anos.

Tabela 43: Resultados econômicos para cenário 1

Indicador	Valores
VPL	R\$ 524.140,99
TIR	16,29%
Payback	8-9 anos

Fonte: O autor (2023)

5.2.5 Cenário 2 – Renovação dos splits

Para o cenário 2 com a proposta de instalação de painéis fotovoltaicos e a renovação dos sistemas splits por equipamentos novos, o projeto apresentou valores positivos de VPL de R\$ 871.079,98, Taxa Interna de Retorno de 22,19% e período de payback entre 6 e 7 anos. Com isso, o cenário 02 se mostra viável e mais atrativo que o

cenário 01, impactado principalmente pela menor consumo de energia pelo sistema de climatização e menor geração fotovoltaica. A Tabela 44 resume os valores dos índices econômicos do cenário 2.

Tabela 44: Resultado análise econômica do cenário 2

Indicador	Valores
VPL	R\$ 871.079,98
TIR	22,19%
Payback	6-7 anos

Fonte: O autor (2023)

5.2.6 Cenário 3 – VRF

O cenário 3 proposto pela substituição do sistema de climatização por equipamento do tipo VRF e instalação de painéis fotovoltaicos, foi obtido um VPL positivo de R\$ 918.778,85, Taxa Interna de Retorno de 20,61% e período de payback entre 6 e 7 anos, dispostos na Tabela 45. Apesar do maior investimento inicial para aquisição do sistema VRF, a economia de energia superior do sistema de climatização tem grande impacto na viabilidade do projeto.

Tabela 45: Resultado análise econômica do cenário 3

Indicador	Valores
VPL	R\$ 918.778,85
TIR	20,61%
Payback	6-7 anos

Fonte: O autor (2023)

5.2.7 Cenário 4 – Chiller com termoacumulador

Para o cenário 4, proposto pela climatização por chiller de compressão de vapor e tanque termoacumulador, foi obtido um VPL de R\$ 782.165,39, Taxa Interna de Retorno de 17,36% e payback entre 7 e 8 anos. Neste sentido, apesar da economia de energia em comparação ao cenário de referência, os custos elevados de aquisição e O&M do sistema

de climatização possuem grande impacto econômico do projeto. Os resultados dos índices econômicos do cenário 4 estão dispostos na Tabela 46.

Tabela 46: Resultado análise econômica do cenário 4

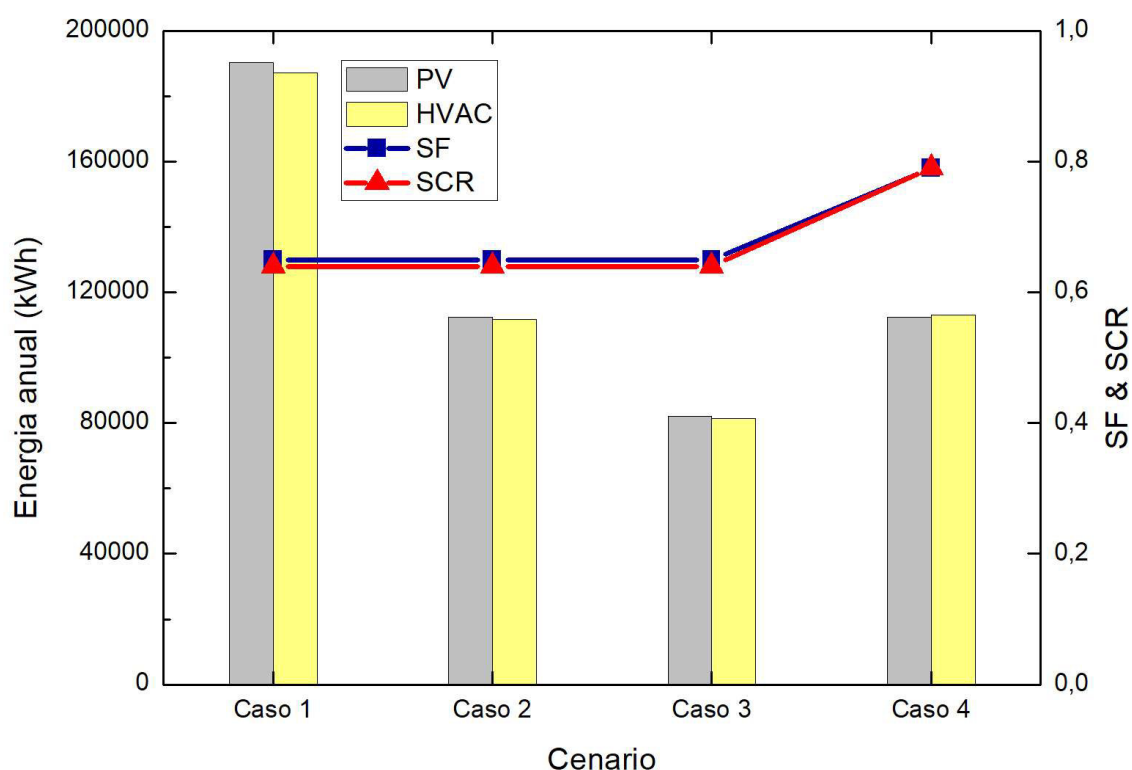
Indicador	Valores
VPL	R\$ 782.165,39
TIR	17,36%
Payback	7-8 anos

Fonte: O autor (2023)

5.3 ANÁLISE COMPARATIVA E CRÍTICA DOS CENÁRIOS

A análise quanto ao consumo anual da climatização, da geração fotovoltaica e de desempenho energético pode ser ilustrada através da Figura 30. As propostas para os cenários 1, 2 e 3, composto por sistema de climatização de expansão direta sem termoacumulação apresentaram índices de desempenho energéticos semelhantes, com índice anual de SF de 0,65 e SCR de 0,64, enquanto que para o cenário com termoacumulação foram obtidos índices anuais de SF e SCR de 0,79. Os resultados obtidos para os cenários 1, 2 e 3 estão compatíveis com os apresentados em Zhao et al. (2018) apesar dos valores de SF de 0,75 e SCR de 0,4 da análise de edificações com demanda apenas de refrigeração para ocupação do tipo escritório.

Figura 30: Consumo do sistema HVAC e geração fotovoltaica anual e indicadores de performance SF e SCR



Fonte: O autor (2023)

Tal diferença ocorre devido a divergência da potência fotovoltaica instalada adotada em cada simulação, onde em Zhao et al. (2018) é superior ao consumo da climatização, privilegiando o desempenho de autossuficiência em detrimento do autoconsumo. Já para o cenário 4, a melhora do desempenho energético ocorre em razão do sistema de termoacumulação acoplado ao chiller, aumentando o autoconsumo de energia fotovoltaica gerada localmente e a autossuficiência do sistema.

A Tabela 47 apresenta o consumo do sistema de climatização para os cenários propostos em comparação ao cenário de referência.

Tabela 47: Consumo dos cenários propostos em comparação ao cenário de referência em kWh

Parâmetro	Referência	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Horário Fora de Ponta	173.591	53.061	32.118	23.879	23.541
Horário Ponta	13.505	12.619	7.545	5.013	458

Total	187.096	65.680	39.664	28.892	23.998
Redução do consumo total	-	64,89%	78,80%	84,56%	87,17%

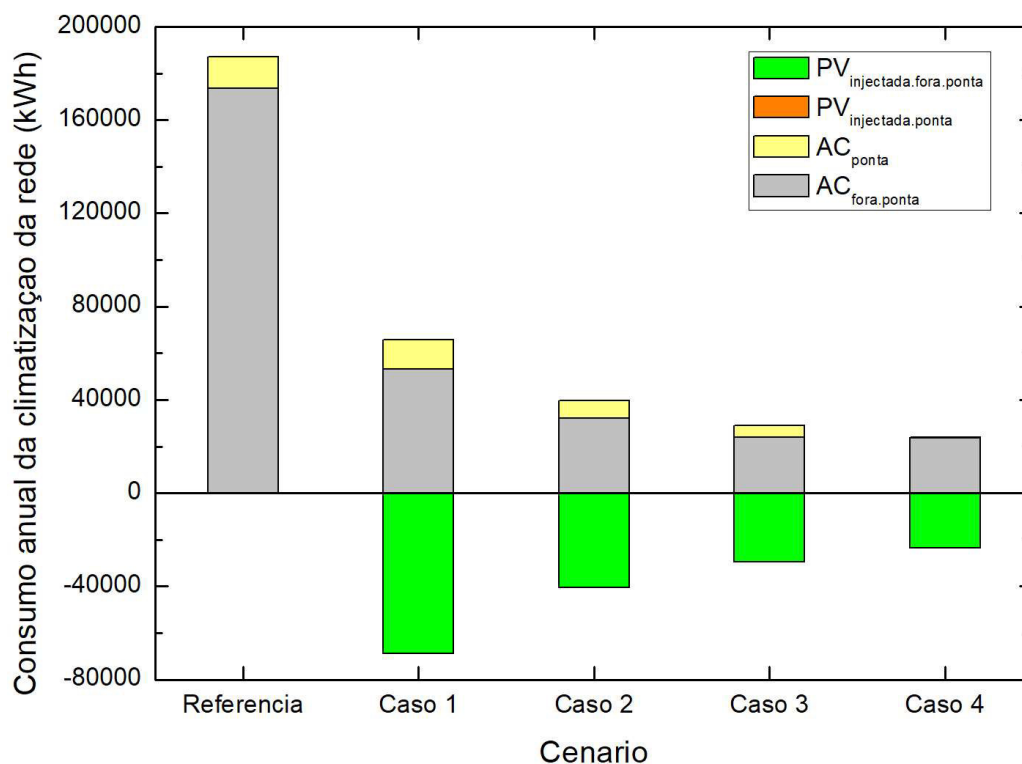
Fonte: O autor (2023)

Em resumo, o cenário 4 apresentou os melhores resultados de performance energética entre os cenários propostos. A dependência do sistema de climatização da rede pública de fornecimento reduziu em 87,17% para o cenário 4 em relação ao cenário de referência, com destaque para o consumo no horário de ponta.

Embora os cenários 1, 2 e 3 tenham apresentado desempenho energético semelhantes quanto à autossuficiência e autoconsumo da geração própria, os sistemas mais eficientes apresentaram maiores reduções da dependência energética da rede pública de energia.

A Figura 31 apresenta o consumo da energia da rede para os diferentes cenários simulados.

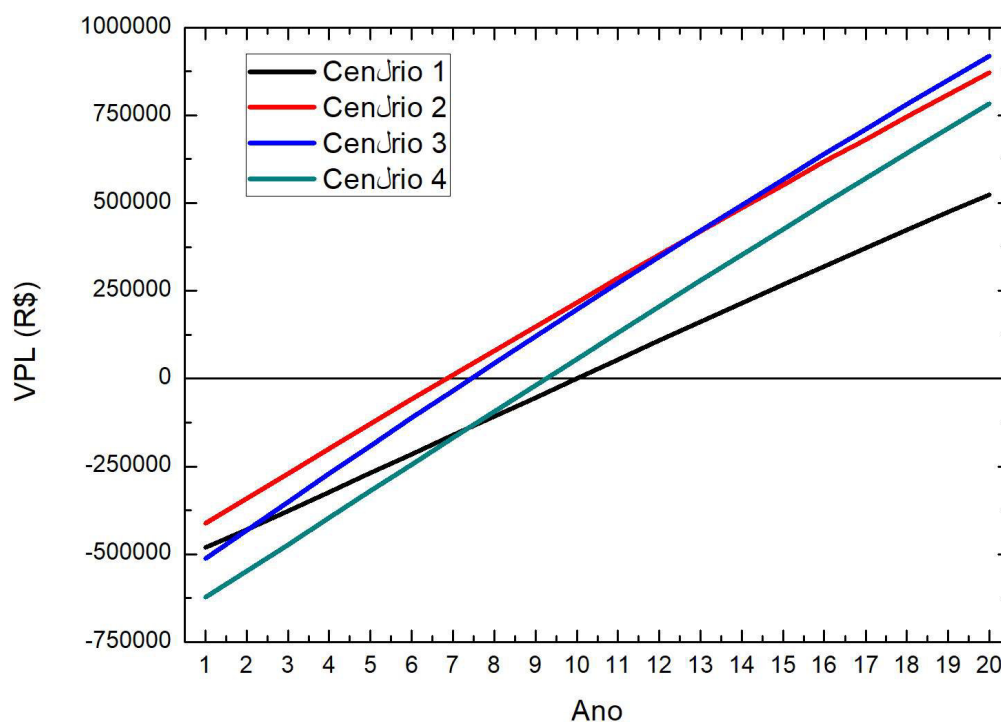
Figura 31: Consumo energético dos sistemas de climatização da rede pública



Fonte: O autor (2023)

Quanto a análise econômica, todos os cenários apresentaram viabilidade econômica para a implantação da proposta. A Figura 32 apresenta a evolução do VPL calculado dos cenários propostos no período de 20 anos, com destaque para o cenário 3, que apresentou o maior VPL do período. Embora o aporte inicial para a implementação do cenário 4 seja maior, no período de vida do projeto de 20 anos se demonstra mais vantajoso do que apenas a instalação dos painéis fotovoltaicos.

Figura 32: Fluxo de caixa dos cenários propostos ao longo de 15 anos



Fonte: O autor (2023)

A Tabela 48 apresenta os resultados econômicos calculados para 20 anos de projeto dos cenários propostos.

Tabela 48: Valores dos indicadores econômicos para o período de 20 anos

Indicador	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
VPL	R\$ 524.140,99	R\$ 871.079,98	R\$ 918.778,85	R\$ 782.165,39
TIR	16,29%	22,19%	20,61%	17,36%
Payback	8-9 anos	6-7 anos	6-7 anos	7-8 anos

Fonte: O autor (2023)

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo será apresentado as principais conclusões observadas no decorrer do desenvolvimento do projeto e as principais sugestões para trabalhos futuros.

6.1 CONCLUSÕES

Foi realizado o levantamento do consumo energético anual do edifício público utilizado pela Superintendência Regional do INSS no Nordeste, localizado na cidade do Recife, Pernambuco. Com isso, foi desenvolvido um modelo computacional para a simulação do sistema de climatização atual composto por equipamentos unitários do tipo split. Com o auxílio do software SketchUp foi desenvolvido o modelo geométrico e realizada a simulação do consumo do sistema de climatização durante um ano corrente no software TRNSYS.

A partir disso, foram construídos 4 modelos para a simulação da melhor configuração para a implantação de um sistema de climatização fotovoltaico economicamente viável e que abrandasse o consumo de energia da rede pública.

O cenário 4, composto por chiller com sistema de termoacumulação demonstrou o melhor desempenho energético dos casos simulados. Contudo, devido a política energética e os custos iniciais de implantação, não demonstrou ser a melhor opção econômica.

Os cenários 2 e 3, composto pela proposta de substituição do sistema split por equipamentos novos e pela central do tipo VRF, apresentaram os melhores índices econômicos. Contudo, para o tempo de vida do projeto, o cenário 3 apresentou o maior VPL.

Até o momento, com a falta de regulamentação da Aneel sobre as normativas para tarifa da lei 14.300, o impacto dos tributos sobre a energia injetada à rede para conversão em créditos futuros não impactos significativos na tarifa do Grupo A4, uma vez que a componente TUSD Fio B tem incidência apenas no horário de ponta (após as 17:30), horário este que a geração de energia fotovoltaica é baixa e totalmente consumida pelo sistema de climatização em todos os cenários.

Aliado a isto, devido ao baixo consumo da climatização durante o horário de pico, a implantação de sistema de armazenamento de energia é inviável para os edifícios do tipo escritório.

Por fim, para o caso de estudo, o edifício apresentou boas perspectivas para a implantação de sistemas de climatização fotovoltaicos autônomos, independentes da rede pública. Dessa forma, locais onde a matriz elétrica é baseada principalmente em fontes não renováveis de energia, a climatização fotovoltaica de edificações com características similares podem se apresentar como uma alternativa sustentável para o desenvolvimento e descarbonização da região.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente estudo teve como objetivo o desenvolvimento de um climatizador fotovoltaico para a edificação da Superintendência Regional do INSS no Nordeste. Com isso, características particulares como padrão de uso, horário de funcionamento, orientação e fachada arquitetônica, condições meteorológicas foram consideradas estáticas, o que estabelece uma série de precedentes para trabalhos futuros, como:

- Estudo da viabilidade de diferentes padrões de ocupação da edificação, como em escolas, shoppings centers, hotéis, entre outros;
- Otimização da capacidade de geração fotovoltaica em função do autoconsumo ou autossuficiência;
- Estudo da eficiência térmica da edificação para diminuição da carga térmica interna e dos ganhos térmicos externos;
- Estudo de outras tecnologias de acumulação de energia (térmica e química)
- Estudar a viabilidade do desenvolvimento de um sistema de climatização fotovoltaico totalmente autônomo;

REFERÊNCIAS

A descarbonização de edificações e o Setor de Ar-Condicionado. Disponível em <https://www.engenhariae arquitetura.com.br/2022/03/a-descarbonizacao-de-edificacoes-e-o-setor-de-ar-condicionado>. Acesso em 31/01/2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Diretoria Geral. Resolução Homologatória nº 3.055, 12 de julho de 2022. Homologa o resultado da Revisão Tarifária Extraordinária, as Tarifas de Energia – TE e as Tarifas de Uso do Sistema de Distribuição – TUSD referentes à Companhia Energética de Pernambuco - Celpe, e dá outras providências. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/reh20223055ti.pdf>. Acesso em: 4 fev 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Diretoria Geral. Resolução Normativa Nº 1.000, de 7 de dezembro de 2021. Estabelece as Regras de Prestação do Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica; revoga as Resoluções Normativas ANEEL nº 414, de 9 de setembro de 2010; nº 470, de 13 de dezembro de 2011; nº 901, de 8 de dezembro de 2020 e dá outras providências.. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.pdf>. Acesso em: 12 nov 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Diretoria Geral. Resolução Normativa Nº 482, de 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf> Acesso em: 12 nov 2022.

ARTECONI, A., CIARROCCHI, E., PAM, Q., CARDUCCI, F., COMODI, G., POLONARA, F., WANG, R. Thermal energy storage coupled with PV panels for demand side management of industrial building cooling loads. **Applied Energy**, vol. 185, pp. 1984-1993, 2017.

Banco Central do Brasil. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/>. Acesso em 26/01/2023

BASSO, G.M., GOMES, G.R., RAMOS, B.S., CARDOSO, F.L., MACHADO, M.A.S., BETERRO, H.M.O., GUERREIRO, M.L. **MANUAL DE PREGÃO ELETRÔNICO**. Brasília: TCU, 2003.

BEN – Balaço Energético Nacional. Ministério de Minas e Energia, 2020. Disponível em <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf>. Acesso em 31/01/2023.

BILGILI, M. Hourly simulation and performance of solar electric-vapor compression refrigeration system. **Solar Energy**, vol. 85, pp. 2720-2731, 2011.

BRASIL. DECRETO Nº 10.024, DE 20 DE SETEMBRO DE 2019. Regulamenta a licitação, na modalidade pregão, na forma eletrônica, para a aquisição de bens e a contratação de serviços comuns, incluídos os serviços comuns de engenharia, e dispõe sobre o uso da dispensa eletrônica, no âmbito da administração pública federal.

BRASIL. INMETRO. PORTARIA nº. 007. Rio de Janeiro/RJ. 04 de jan 2011. Estabelecer os critérios para o programa de avaliação da conformidade para Condicionadores de Ar, tipo monobloco, de janela ou de parede de corpo único e tipo Split System, com capacidade de refrigeração até 17,58 kW (60.000 BTU/h.), através do mecanismo da etiquetagem, para utilização da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia – ENCE, atendendo aos requisitos do Programa Brasileiro de Etiquetagem – PBE, visando a eficiência energética, modo espera (standby) e segurança elétrica.

Brasil. Lei nº14.300, de 6 de janeiro de 2022. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS); altera as Leis nºs 10.848, de 15 de março de 2004, e 9.427, de 26 de dezembro de 1996; e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n.5, p. 4, 7 jan 2022.

BRASIL. Tribunal de Contas da União. PORTARIA-TCU Nº 444. Brasília, DF. 28 de dez 2018. Assunto: Dispõe sobre o processo de contratação de serviços, no âmbito da Secretaria do Tribunal de Contas da União (TCU).

CARRIER. **CT AQUASMART 30E – H**. 2022

CARRIER. **Folder Comm_XPower 380V-220V HP**. 2022.

CHEN, Y., LIU, Y., LIU, J., LUO, X., WANG, D., WANG, Y., LIU, J. Design and adaptability of photovoltaic air conditioning system based on office buildings. **Solar Energy**, vol. 202, pp. 17-25, 2020.

CHO, J., KIM, Y., KOO, J., PARK, W. Energy-cost analysis of HVAC system for office buildings: Development of a multiple prediction methodology for HVAC system cost estimation. **Energy & Buildings**, vol. 173, pp. 562-576, 2018.

CURVA DE CARGA HORÁRIA. Disponível em: http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/curva_carga_horaria.aspx. Acesso em 6 jul 2022.

DAIKIN, VRV INOVA. Disponível em: <https://www.daikin.com.br/produto/vrv-inova>. Acesso em: 15 dez 2022.

DE SOTO, W., KLEIN, S.A., BECKMAN, W.A. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. **Solar Energy**, vol. 80, pp. 78-88, 2006.

DINCER, I.; ROSEN, M.A. Thermal Energy Storage: Systems and Application; **John Wiley & Sons**: Chichester, UK, 2011.

ELEFTHERIADIAS, G., HAMDY, M. Impact of building envelope and mechanical component degradation on the whole building performance: a review paper. **Energy Procedia**, vol. 132, pp. 321-326, 2017.

Energy Statistics Data Browser. Disponível em [https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=WORLD&fuel=Energ y %20supply&indicator=ElecGenByFuel](https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=WORLD&fuel=Energ%20supply&indicator=ElecGenByFuel). Acesso em 04/02/2023.

FENAUGHTY, K. PARKER, D. Evaluation of Air Conditioning Performance Degradation: Opportunities from Diagnostic Methods. Florida Solar Energy Center, 2018

Geração Distribuída. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/geracao-distribuida>. Acesso em: 30 de jun 2022.

GOLDSWORTHY, M.J. Building thermal design for solar photovoltaic air-conditioning in Australian climates. **Energy and Buildings**, vol. 135, pp.176-186, 2017.

HAFFAF, A., LAKDJA, F., ABDESLAM, D.O., MEZIANE, R. Solar energy for air conditioning of an office building in a case study: Techno-economic feasibility assessment. **Renewable Energy Focus**, vol. 39, pp. 148-162, 2021.

HENANDEZ III, A.C., FUMO, N. A review of variable refrigerant flow HVAC system components for residential application. **International Journal of Refrigeration**, vol. 110, pp. 47-57, 2020.

HENDRON, R. Building America Performance Analysis Procedures for Existing Homes. National Renewable Energy Laboratory, 2006.

HONRUBIA-ESCRIBANO, A., RAMIREZ, F.J., GOMEZ-LÁZARO, E., GARCIA-VILLAYERDE, P.M., RUIZ-ORTEGA, M.J., PARRA-REQUENA, G.. Influence of solar technology in the economic performance of PV power plants in Europe. A comprehensive analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 82, pp. 488-501, 2018.

HU, L., LIU, Y., WANG, D., LUO, X., LIU, H. Feasibility analysis and feature comparison of cold thermal energy storage for off-grid PV air-conditioned buildings in the tropics. **Energy Conversion and Management**, vol. 254, pp. 115-176, 2022.

HUANG, B.J., HOU, T.F., JSU, P.C., LIN, T.H., CHEN, Y.A., CHEN, C.W., LI, K., LEE, K.Y. Design of direct solar PV driven air conditioner. **Renewable Energy**, vol. 88, pp. 85-101, 2016.

IEA SANKEY DIAGRAM. Disponível em: <https://www.iea.org/sankey/>. Acesso em: 4 fev 2023.

Informações de Tarifa Grupo A. Disponível em: https://servicos.neoenergiapernambuco.com.br/residencial-rural/Documents/tarifas/NEOENERGIA_PERNAMBUCO_TARIFAS_ENERGIA_ELETRICA_GRUPO_A_ABRIL_2022_REH_3032.pdf. Acesso em 9 jan 2023.

INTELBRAS. **Datasheet_EMSL_590M_HC_V10**. 2022

LAZZARIN, R.M., NORO, M. Past, present, future of solar cooling: Technical and economical considerations. **Solar Energy**, vol. 172, pp. 2-13, 2018.

LEITE, G. N. P., WESCHENFELDER, F., ARAUJO, A. M., OCHOA, A. A. V., PRESTELO NETO, N. F., KRAJ, A. An economic analysis of the integration between air-conditioning

and solar photovoltaic systems. **Energy Conversion and Management**, vol. 185, pp. 836-849, 2019.

LI, S., PENG, J., TAN, Y., MA, T., LI, X., HAO, B. Study of the application potential of photovoltaic direct-driven air conditioners in different climate zones. **Energy and Building**, vol. 226, 2020.

LI, S., PENG, J., ZOU, B., LI, B., LU, C., CAO, J., LUO, Y., MA, T. Zero energy potential of photovoltaic direct-driven air conditioners with considering the load flexibility of air conditioners. **Applied Energy**, vol. 304, 2021.

LUERSSSEN, C. GANDHI, O. REINDL, T., SEKHAR, C., CHEONG, D. Life cycle cost analysis (LCCA) of PV-powered cooling systems with thermal energy and battery storage for off-grid applications. **Applied Energy**, vol. 273, PP. 115-145, 2020.

Micro e mini geração. Disponível em: <https://www.ceee.com.br/a-ceee/micro-e-minigeracao>. Acesso em: 2 de jul 2022.

Most Efficient Solar Panels 2022. Disponível em: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/most-efficient-solar-panels>. Acesso em: 6 de jul 2022.

O'SHAUGHNESSY, E., CRUCE, J.R., XU, K. Too much of a good thing? Global trends in the curtailment of solar PV. **Solar Energy**, vol. 208, pp. 1068-1077, 2020.

OLIVEIRA, Edywin Gabriel Carvalho de. Projeto e análise experimental de uma bomba de calor utilizada para armazenamento térmico da eletricidade gerada por um sistema FV – gestão pelo lado da demanda. 2020. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.

Opções Tarifárias. Disponível em: <https://servicos.neoenergiapernambuco.com.br/residencial-rural/Pages/Alta%20Tens%C3%A3o/opcoes-tarifarias.aspx>. Acesso em: 9 jan 2023.

OPOKU, R., MENSAH-DARKWA, K., MUNTAKA, A.S. Techno-economic analysis of a hybrid solar PV-grid powered air-conditioner for daytime office use in hot humid climates – A case study in Kumasi city. **Solar Energy**, vol 165, pp. 65-74, 2018.

PCM-ClimSel. Disponível em: <https://www.climator.com/en/pcm-climsel>. Acesso em: 7 fev 2021.

PV 5-PARAMETER MODEL. Disponível em: https://fchartsoftware.com/assets/downloads/pv_ref_params.zip. Acesso em: 13 dez 2022.

Raustad, R.A., (2012) Creating Performance Curves for Variable Refrigerant Flow Heat Pumps in EnergyPlus, FSEC-CR-1910-12. Disponível em: https://securedb.fsec.ucf.edu/pub/pub_search. Acesso em: 22 dez 2022.

Raustad, Richard A. 2013. "A Variable Refrigerant Flow Heat Pump Computer Model in EnergyPlus". United States. Disponível em: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1079215>. Acesso em 22 dez 2022.

RELEASE 3T21. Disponível em: <https://ri.aesbrasil.com.br/Download.aspx?Arquivo=iZTGEUu3KRiG8M/YuD6CrQ==>. Acesso em: 22 jul 2022.

ROMANI, J., GASIA, J., SOLÉ, A., TAKASU, H., KATO, Y., CABEZA, L.F. Evaluation of energy density as performance indicator for thermal energy storage at material and system levels. **Applied Energy**, vol.235, pp. 954-962, 2019.

SARBU, I.; DORCA, A. Review on heat transfer analysis in thermal energy storage using latent heat storage systems and phase change materials. **International journal of energy research**, vol. 43, n. 1, pp. 29-64, 2019.

SARBU, I.; SEBARCHIEVICI, C. A comprehensive review of thermal energy storage. **Sustainability**, vol. 10, n. 1, pp. 191, 2018.

SECRETARIA ESPECIAL DE DESBUROCRATIZAÇÃO, GESTÃO E GOVERNO DIGITAL. Secretaria de Gestão. Instrução Normativa Nº 73, de 5 de agosto de 2020. Dispõe sobre o procedimento administrativo para a realização de pesquisa de preços para a aquisição de bens e contratação de serviços em geral, no âmbito da administração pública federal direta, autárquica e fundacional. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, n. 150, p. 19, 5 de agosto de 2020.

SHE, X. CONG, L., NIE, B., LENG, G., PENG, H. CHEN, Y., ZHANG, X., WEN, T., YANG, H., LUO, Y. Energy-efficient and -economic technologies for air conditioning with vapor compression refrigeration: A comprehensive review. **Applied Energy**, vol. 232, pp. 157-187, 2018.

SILVA, Héber Cláudius Nunes. Metodologia técnico-financeira e modelagem de sistemas de cogeração para edificações: estudo de caso. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

SIVARAMAN, N., VAIDYANATHAN, R.M., PATEL, M., MARKOS, M. Performance analysis of refrigerants with various expansion valves in vapour compression refrigeration and air-conditioning system. **Materials Today: Proceedings**. vol. 45, pp. 2465-2469, 2021.

SUNDARAM, S., BENSON, D., MALLICK, T.K. **Solar Photovoltaic Technology Production Potential Environmental Impacts and Implications for Governance**. Penryn, Academic Press, 2016.

TAO, Y.B., HE., Y.L. A review of phase change material and performance enhancement method for latent heat storage system. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. vol. 93, pp. 245-259, 2018.

VILLALVA, Marcelo Gradella. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. 2 ed. São Paulo: Érika, 2015.

WAN WYLEN, Gordon., SONNTAG, Richard., BORGNAKKE, Claus. **Fundamentos da termodinâmica clássica**. 4 ed. São Paulo: Blucher, 1995

XU, Y., MA, X., HASSANIEN, R.H.E., LUO, X., LI, G., LI, M. Performance analysis of static ice refrigeration air conditioning system driven by household distributed photovoltaic energy system. **Solar Energy**, vol 158, pp. 147-160, 2017.

ZHAO, B.Y., LI, Y., WANG, R.Z., ZHAO, Z.G., TAYLOR, R.A. A universal method for performance evaluation of solar photovoltaic air-conditioner. **Solar Energy**, vol. 172, pp. 58-68, 2018.