

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ENGENHARIA DE ENERGIA

**SISTEMA DE TERMOACUMULAÇÃO PARA UM CONSUMIDOR INSERIDO NO
AMBIENTE DE CONTRATAÇÃO LIVRE**

por

Raquel Coimbra Gratieri

Monografia apresentada à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia de Energia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia de Energia.

Porto Alegre, outubro de 2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENGENHARIA DE ENERGIA

**SISTEMA DE TERMOACUMULAÇÃO PARA UM CONSUMIDOR INSERIDO NO
AMBIENTE DE CONTRATAÇÃO LIVRE**

por

Raquel Coimbra Gratieri

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
BACHARELA EM ENGENHARIA DE ENERGIA.
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA

Prof. Prof. Dr. Flávio Antônio Becon Lemos
Coordenador do Curso de Engenharia de Energia

Orientador: Prof.^a Dr.^a Letícia Jenisch Rodrigues

Banca examinadora:

Prof. Dr. Andrés Armando Mendiburu Zevallos – DEMEC / UFRGS

Dra. Fernanda Lamego Guerra - PPGCI/UFRGS

Prof. Dr. Cirilo Seppi Bresolin – DEMEC / UFRGS

Porto Alegre, 04 de outubro de 2022

GRATIERI, R.C. **Sistema de Termoacumulação para um Consumidor Inserido no Ambiente de Contratação Livre**. 2022. 31 fls. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

RESUMO

O presente trabalho analisou a viabilidade econômica da implantação de um sistema de termoacumulação para um consumidor de grande porte, que se encontra inserido no Ambiente de Contratação Livre (ACL), também conhecido como Mercado Livre de Energia. Primeiramente, foi realizado o levantamento da carga térmica com o auxílio de dois softwares: o *Sketchup*, que foi utilizado para a modelagem tridimensional da edificação analisada, e o *Energy Plus* que calculou a carga térmica da edificação utilizando as variáveis de entrada, obtidas a partir de arquivos climáticos e de propriedades termodinâmicas dos materiais. Após definida a carga térmica, foi dimensionado o volume do tanque de termoacumulação, bem como o horário de carga e descarga. Após se obter o perfil horário, a análise de viabilidade econômica foi feita comparando o preço da tarifa horária no momento do carregamento do tanque, com o valor que se gastaria utilizando a energia conforme demanda sem ter um sistema de termoacumulação. Também foi analisado se o deslocamento da curva de consumo afetou o preço da energia negociado no ACL. O que se percebeu primeiramente foi que em lugares com pouca variação de temperatura durante o dia, se o sistema de climatização for o maior consumidor de energia, o sistema não será viável pois não se terá um pico de carga significativo para que seu deslocamento traga economia. Também se notou, a importância de se estar inserido na modalidade tarifária correta, pois dependendo da modelagem de funcionamento do sistema, a modalidade tarifária errada pode inviabilizar o projeto.

PALAVRAS-CHAVE: Termoacumulação, Energy Plus, *Sketchup*, Ambiente de Contratação Livre.

GRATIERI, R.C. **Thermal Energy Storage System for a Consumer Inserted in the Free Contracting Environment**. 2022. 31 fls. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

ABSTRACT

The present work analyzed the economic feasibility of implementing a thermal energy storage system for a large consumer, who is inserted in the Free Contracting Environment (FCE), also known as the Free Energy Market. First, a survey of the thermal load was carried out with the help of two software: Sketchup, which was used for the three-dimensional modeling of the analyzed building, and Energy Plus, which calculated the thermal load of the building using the input variables, obtained from climatic archives and thermodynamic properties of materials. After defining the thermal load, the volume of the thermoaccumulation tank was dimensioned, as well as the loading and unloading schedule. After obtaining the hourly profile, the economic feasibility analysis was carried out by comparing the price of the hourly rate at the time of loading the tank, with the value that would be spent using energy according to demand without having a thermoaccumulation system. It was also analyzed whether the shift in the consumption curve affected the price of energy negotiated in the FCE. What was first noticed was that in places with little temperature variation during the day, if the air conditioning system is the biggest energy consumer, the system will not be viable because there will not be a significant peak load for its displacement to bring savings. . It was also noted the importance of being inserted in the correct tariff modality, because depending on the system's operating model, the wrong tariff modality can make the project unfeasible.

KEYWORDS: Thermoaccumulation, *Energy Plus*, *Sketchup*, Free Contracting Environment.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Revisão da Literatura.....	1
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
2.1	Climatização de edificações	2
2.2	Sistema de armazenamento de energia térmica.....	2
2.3	Termoacumulação de calor sensível.....	2
2.4	Termoacumulação de calor latente.....	2
2.5	Sistemas de refrigeração com termoacumulação.....	3
2.6	Sistema de termoacumulação de gelo.....	4
2.7	Sistema de termoacumulação a água gelada.....	5
2.8	Modelo tarifário brasileiro.....	6
2.9	Ambiente de Contratação Livre (ACL).....	6
2.10	Extensão <i>Euclid</i> , <i>SketchUp</i> e <i>Energy Plus</i>	7
2.11	Método de simulação do <i>Energy Plus</i>	7
3	METODOLOGIA E MODELAGEM.....	8
3.1	Definição do projeto, localização e modelagem no <i>SketchUp</i>	8
3.2	Modelagem e simulação no <i>EnergyPlus</i>	10
3.3	Variáveis de entrada	11
3.4	Análise e validação dos dados	13
3.5	Levantamento dos dados de tarifas de energia e PLD horário	13
3.6	Análise financeira.....	14
4	RESULTADOS	16
4.1	Análise do sistema de climatização sem o tanque de termoacumulação.....	16
4.2	Análise financeira considerando a inserção de um tanque de termoacumulação.	19
5	CONCLUSÃO	20
	REFERÊNCIAS	22
	APÊNDICE A	24
	APÊNDICE B	26

1 INTRODUÇÃO

Uma característica percebida ao longo do tempo, é o fato de que à medida que a economia de um país se desenvolve, mais as pessoas costumam presar e procurar pelo conforto térmico. Segundo a *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*, ASHRAE (2010), “conforto térmico é o estado mental que expressa satisfação do homem com o ambiente térmico que o circunda”. A utilização de equipamentos de climatização como condicionadores de ar, por exemplo, é o método mais empregado para se tentar alcançar o tão desejado conforto térmico. No entanto, esses equipamentos de climatização de ambientes demandam muita energia elétrica, e com isto, um alto custo financeiro. Como forma de tentar reduzir esse custo, muitas empresas acabam por buscar técnicas de eficiência energética a fim de se reduzir o consumo de eletricidade, e é neste momento que a inserção de um sistema de termoacumulação é considerado e analisado.

O sistema de termoacumulação trabalha com o armazenamento de energia térmica em horários em que o custo da energia elétrica é mais reduzido, permitindo, assim, que nos horários em que o consumo e o custo da energia são mais elevados, o sistema de climatização possa ser atendido quase que totalmente pela energia térmica armazenada.

Considerando o exposto, este trabalho tem como objetivo principal simular e analisar a economia obtida quando se instala um sistema de termoacumulação em um supermercado de médio porte, caso ele esteja inserido no Ambiente de Contratação Livre (ACL). O objetivo específico é analisar se o deslocamento da carga de consumo, além de impactar a demanda horária do consumidor, também ocasiona uma redução no custo da energia contratada.

Para a realização da análise e estudo da viabilidade econômica, primeiramente se utilizou o software *Sketchup* (SKETCHUP, 2022) juntamente com o *Energy Plus* (ENERGY PLUS, 2022), para modelagem da estrutura a ser analisada e determinação da carga térmica, respectivamente. Após o levantamento da carga térmica foi definido o dimensionamento do tanque de termoacumulação e seu horário de funcionamento, para finalmente ser analisada a viabilidade econômica do projeto.

1.1 Revisão da Literatura

Apesar de não ter sido possível encontrar na literatura outros estudos que tratassem de termoacumulação para um consumidor inserido no ACL, é possível encontrar na literatura algumas referências que permitem uma análise inicial e servem como apoio ao desenvolvimento deste trabalho, as quais são apresentadas a seguir. Krelling (2019) realizou um estudo sobre o impacto que a inserção de um controlador baseado em previsões (diárias, semanais, mensais e sazonais) teria no sistema de termoacumulação. O que a autora concluiu, foi que, mesmo para as cidades brasileiras que apresentam uma grande variação de temperatura, o emprego de um controle preditivo não se mostrou eficiente, visto que, o fato do sistema consumir pouca energia nos dias de menores temperaturas, era anulado pelo seu elevado consumo nos dias de maiores temperaturas. Portanto, decidiu-se que para esse trabalho seria utilizado apenas o perfil de carga encontrado por meio da simulação, utilizando o *Energy Plus*, para se definir a energia térmica a ser acumulada, mantendo-se a operação constante independentemente da temperatura externa e sua variação

Outro estudo foi o realizado por Cruz (2018) onde foi analisada a viabilidade da reativação de um sistema de termoacumulação para o prédio da Procuradoria Geral da República. Foi concluído nesse estudo, que devido ao fato de o horário de funcionamento do prédio ser predominantemente entre as 08:00 e as 18:00 horas, no horário de ponta (18:00 às 21:00) o *chiller* por si só conseguiria manter a climatização do ambiente, e a solução mais econômica era não reativar o sistema de termoacumulação. Isto mostra o quão importante é saber o perfil da carga térmica e o preço da energia elétrica nos horários de maior carga, pois isto impactará diretamente na economia trazida pela termoacumulação.

Outra referência a ser citada foi o estudo realizado por Arcuri, Spataru e Barret (2016) no qual os autores avaliaram a utilização de um sistema de termoacumulação com gelo, para diferentes tipos de prédios comerciais inseridos em diferentes cidades brasileiras. O que notaram neste estudo, foi que, apesar do consumo de energia se manter quase o mesmo, a diminuição da demanda de energia nos horários de tarifas mais caras proporcionaram uma economia significativa. Destacaram que caso o governo criasse alguma forma de incentivo, o uso de sistemas de termoacumulação poderia ser uma alternativa para diminuir a alta demanda de energia que se tem no Brasil durante o verão, devido ao uso

de ar condicionado. Também destacaram que a termoacumulação é mais viável quando instalada na fase de construção do edifício, pois em casos de *retrofit* muitas vezes pode ser necessária a troca de chillers e outros equipamentos, o que encarece o projeto. O que todos estes estudos mostram é que fatores como tarifas, localização e horários de consumo, são os que irão determinar se o projeto é viável ou não.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção tem por objetivo fazer uma breve apresentação de como funciona um sistema de termoacumulação, suas características e como funciona um sistema de climatização quando inserido um tanque de termoacumulação.

2.1 Climatização de edificações

O conforto térmico é fundamental para que as pessoas realizem suas atividades físicas e intelectuais com boa performance. [...] devido às grandes variações, tanto fisiológicas quanto psicológicas de pessoa para pessoa, é difícil satisfazer todos os ocupantes em um espaço (ASHRAE, 2010, p.6, tradução livre). No entanto, sempre se procura fazer com que a maior parte das pessoas estejam em conforto térmico, e é neste sentido que entra o sistema de climatização em edificações.

Geralmente, se utiliza sistemas de condicionamento de ar quando as estratégias passivas não são suficientes por si só. Um sistema de condicionamento de ar tem a finalidade de proporcionar ar tratado a um ambiente fechado, atuando sobre a temperatura, a umidade, a circulação e a renovação do ar, resultando em condições térmicas adequadas ao ser humano no desempenho de suas atividades.

2.2 Sistema de armazenamento de energia térmica

O armazenamento de energia térmica, também conhecido como *Thermal Energy Storage* (TES), pode ser entendido como uma retenção temporária da energia, para uso posterior. No caso do sistema de termoacumulação para resfriamento, isto envolve o processo de resfriamento ou solidificação do material de trabalho, para depois essa energia ser recuperada na climatização do ambiente. Portanto, o objetivo do sistema de armazenamento térmico de energia não é a redução do consumo de energia, e sim, o deslocamento dos picos horários da demanda de energia para um horário de pouca demanda e tarifas reduzidas. De acordo com Dincer e Rosen (2011), quando o armazenamento envolve apenas o aumento ou diminuição de temperatura este sistema é denominado termoacumulação sensível, e quando o processo envolve uma mudança de fase é conhecido como termoacumulação latente.

2.3 Termoacumulação de calor sensível

Na termoacumulação de calor sensível podem ser utilizados materiais de trabalho como água, ar, óleo, leitos rochosos, tijolos, areia ou solo (DINCER E ROSEN, 2011). Especificamente para o processo de resfriamento, o mais comum de se encontrar é o sistema de água gelada, devido à facilidade de trabalhar com este fluido e ao seu alto calor específico. A quantidade de calor Q armazenada neste tipo de sistema pode ser obtida utilizando a seguinte equação.

$$Q = mc_p \Delta T \quad (2.1)$$

na qual, Q é a energia armazenada, em J, m é a massa do material, em kg, c_p é o calor específico, em $\text{kJ kg}^{-1}\text{K}^{-1}$, e ΔT é a diferença de temperatura, em $^{\circ}\text{C}$.

Algumas características da termoacumulação por calor sensível são:

- A temperatura não é estável durante todo o processo;
- O calor sensível dos materiais é entre 50 a 100 vezes menor do que o calor latente, requerendo maior volume para satisfazer a mesma demanda (KRELLING, 2019, p.23).
- Quando se utiliza a água como fluido de trabalho se obtém baixo custo com material.

2.4 Termoacumulação de calor latente

Na termoacumulação por calor latente ocorre a mudança de fase da substância à temperatura constante. As substâncias tipicamente utilizadas para este tipo de termoacumulação são água/gelo, sais hidratados e certos tipos de polímeros (DINCER E ROSEN, 2011). A quantidade de calor Q armazenada neste tipo de sistema pode ser obtida utilizando

$$Q = mL \quad (2.2)$$

na qual, Q é a energia armazenada, em J, m é a massa do material, em kg, e L é o calor latente específico do material.

Algumas características deste tipo de termoacumulação são:

- A temperatura é estável durante o processo de mudança de fase;
- Como a densidade de armazenamento de energia para o calor latente é maior do que quando se utiliza calor específico, os dispositivos de armazenamento são mais compactos, leves, o que normalmente resulta em menores perdas de armazenamento (DINCER E ROSEN, 2011);
- A manutenção do próprio tanque é mais complexa. Uma vez que podem surgir dilatações anômalas durante o processo de carga e descarga do tanque. Dilatações essas que podem ocasionar em rompimentos dos dutos e ou outros equipamentos internos ao tanque (CRUZ, 2018. P.34).

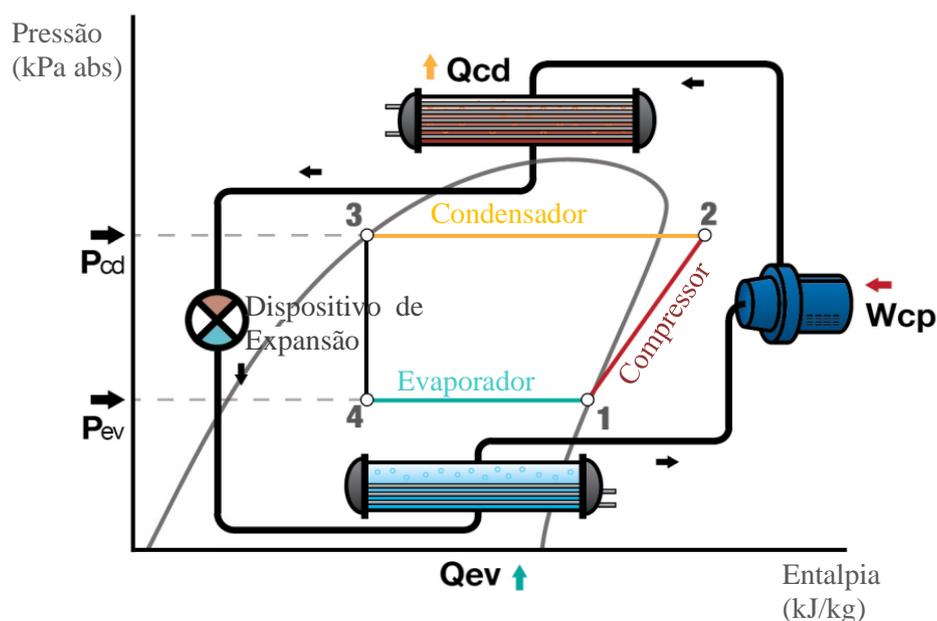
2.5 Sistemas de refrigeração com termoacumulação.

Os sistemas de ar condicionado geralmente utilizam o processo de refrigeração através de compressão de vapor de um fluido, e que consiste em um ciclo fechado composto de quatro etapas:

1. Compressão do fluido refrigerante no estado vapor, de baixa pressão para alta pressão, através de um compressor;
2. Dessuperaquecimento e condensação do fluido refrigerante, a alta pressão, através de um trocador de calor que normalmente utiliza o ar externo direto ou água proveniente de uma torre de resfriamento, onde é resfriada pelo ar externo;
3. Expansão (ou despressurização) do fluido refrigerante líquido, através de um dispositivo de expansão (válvula, orifício, tubo capilar etc.), que resultará em uma mistura de líquido e vapor a baixa pressão;
4. Evaporação total do fluido refrigerante a baixa pressão, através de um trocador que irá resfriar (e desumidificar) o ar (direta ou indiretamente) a ser insuflado no ambiente condicionado (CLETO, 2016, p.18).

A Figura 1 representa as quatro etapas que foram descritas.

Figura 1 - Esquema representando o ciclo de compressão a vapor aplicado aos sistemas de ar condicionado



Um dos principais componentes existentes no sistema de ar condicionado para resfriamento é o *chiller*, pois é onde ocorre todo o ciclo de refrigeração que garante o diferencial de temperatura entre os

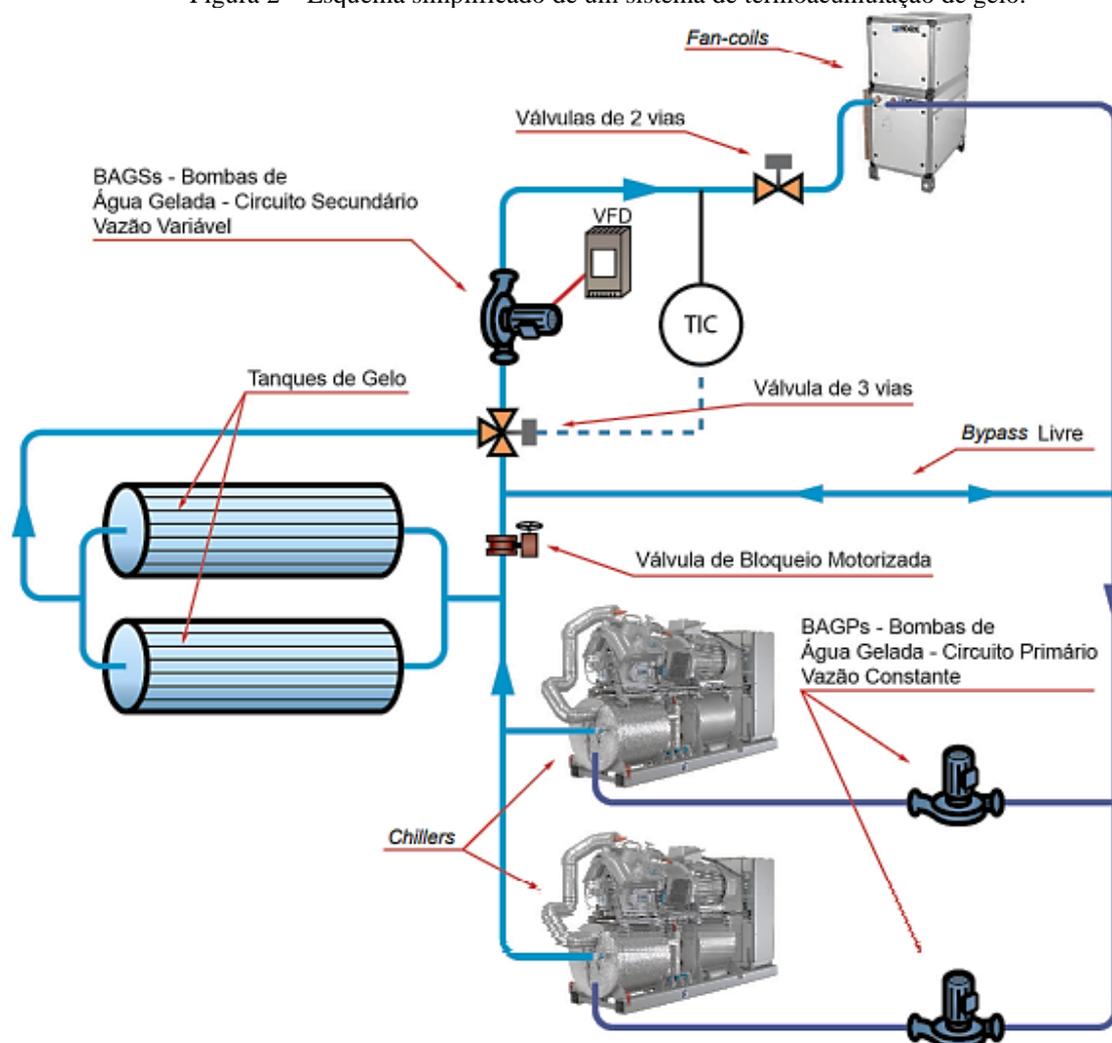
líquidos na entrada e saída do sistema global. Quando se insere um tanque de termoacumulação, este tanque é adicionado próximo ao *chiller*, que passará a operar de duas formas, as vezes fornecendo ar refrigerado ao ambiente, e outras vezes água gelada para o tanque. Quando se deseja utilizar a termoacumulação para resfriamento, os dois sistemas mais encontrados são o de água gelada e de gelo. Desta forma, estes dois sistemas serão revisados.

2.6 Sistema de termoacumulação de gelo

No sistema de termoacumulação de gelo, como é utilizado o calor latente de fusão da água, de acordo com Cleto (2016), o volume do tanque é reduzido cerca de sete vezes quando comparado com o tanque de termoacumulação a água, que utiliza o calor sensível.

Apesar da termoacumulação de gelo apresentar uma vantagem no tamanho do tanque, ela apresenta uma desvantagem. É necessário que os chillers operem em condições diferentes, com temperaturas mais baixas (em torno de $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$) durante o período de termoacumulação (fabricação de gelo). O fato de ter que trabalhar em temperaturas reduzidas, pode encarecer o projeto em caso de *retrofit*, pois o *chiller* já existente precisaria ser substituído por um *chiller* que fosse capaz de operar em temperaturas reduzidas. A Figura 2, apresenta um esquema com uma possível configuração de um sistema de resfriamento que utiliza termoacumulação de gelo.

Figura 2 – Esquema simplificado de um sistema de termoacumulação de gelo.



Fonte: CLETO, 2016.

O sistema funciona com um circuito duplo, em que as bombas primárias atendem os chillers e os tanques de gelo, e as bombas secundárias atendem os demais equipamentos. Durante o dia ocorrem três processos diferentes. Durante a madrugada, os chillers atendem os tanques de termoacumulação de gelo,

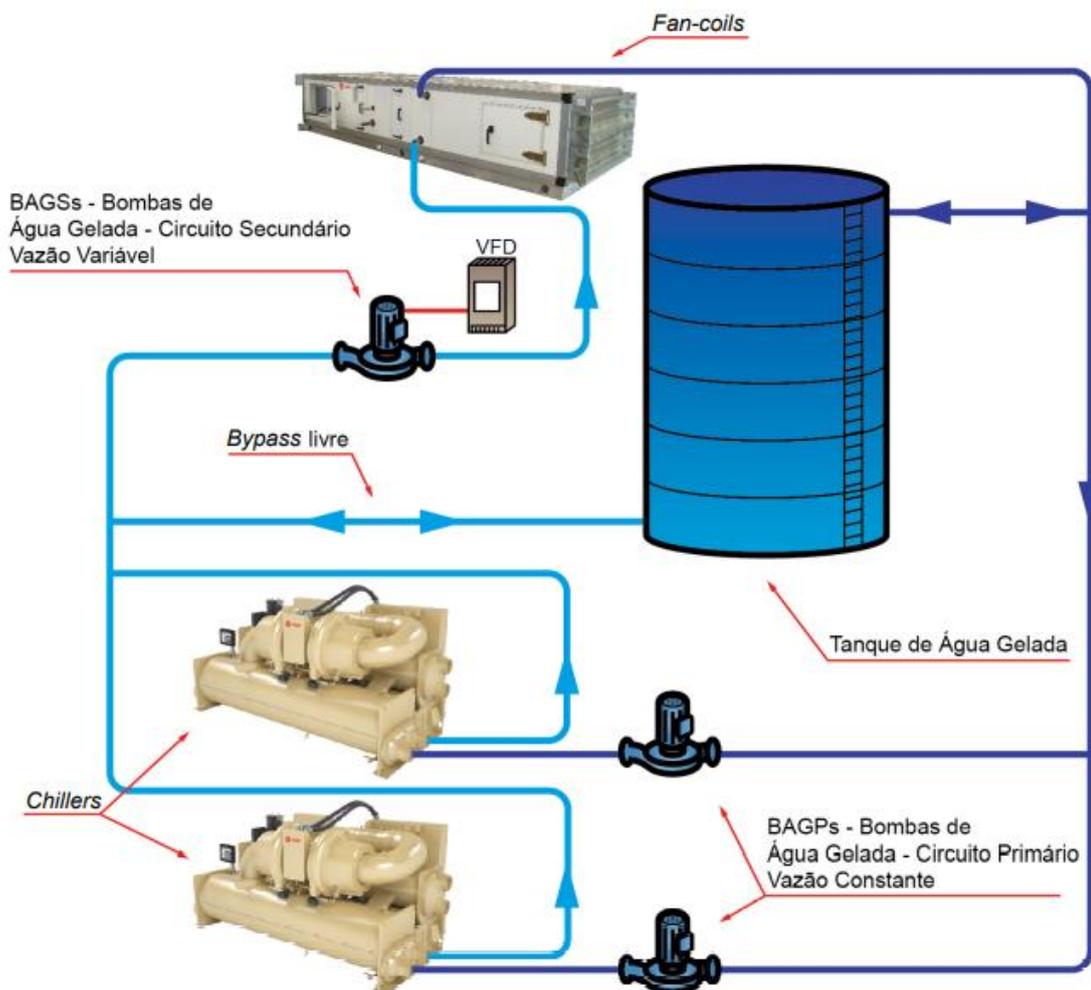
com *setpoint* da temperatura de saída de água gelada dos chillers em $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$. No período normal de operação, quando a edificação está sendo utilizada, mas não está no horário de ponta, os chillers atendem o circuito secundário de água gelada do sistema de ar condicionado, com *setpoint* da temperatura de saída de água gelada dos chillers típico de $6\text{ }^{\circ}\text{C}$. E por fim, durante o período da tarifa de ponta, os chillers são mantidos desligados e apenas as bombas de água gelada operam. As bombas secundárias continuam atendendo os condicionadores de ar e as bombas primárias atendem aos tanques de gelo, descongelando o gelo dos tanques e resfriando a água gelada que retorna dos condicionadores de ar (variável entre $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $13\text{ }^{\circ}\text{C}$) até o valor do *setpoint* de água gelada que alimenta o circuito secundário para os condicionadores de ar, $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (CLETO, 2016).

2.7 Sistema de termoacumulação a água gelada

Como os sistemas termoacumulação de água gelada não precisam operar com um fluido a temperatura tão baixa quanto à termoacumulação de gelo, a termoacumulação de água gelada é a mais empregada em casos de *retrofit*, porque na maioria das vezes é possível aproveitar os chillers já existentes no sistema de condicionamento de ar. [...] os tanques mais comuns têm formato cilíndrico, idealmente com altura maior do que o diâmetro, podendo estar acoplados à edificação ou separados, sobre o solo, parcial ou totalmente enterrados (KRELLING, 2019, p.32).

No sistema de termoacumulação de água gelada, a relação entre densidade e temperatura provoca a formação de camadas dentro do tanque de armazenamento, e desta forma a capacidade de resfriamento do sistema dependerá da diferença de temperatura entre as camadas. A Figura 3 apresenta um esquema simplificado de um sistema de termoacumulação de água gelada.

Figura 3 – Esquema simplificado de um sistema de termoacumulação de água gelada.



Fonte: CLETO, 2016.

O funcionamento deste sistema se dá da seguinte forma. Com o tanque totalmente cheio de água a temperatura ambiente, no período de parada de funcionamento do sistema de ar condicionado, as bombas secundárias estarão desligadas. Assim, os chillers e bombas primárias em funcionamento naturalmente carregam o tanque com água gelada. Todo fluxo de água gelada que sai dos chillers alimenta diretamente a parte inferior do tanque. No retorno, o fluxo de água quente sai do anel superior (topo do tanque) e volta para a entrada dos chillers. No período de ponta da tarifa de energia elétrica, com os chillers e bombas primárias desligados, as bombas secundárias em funcionamento succionam água gelada do lado inferior do tanque (com baixa temperatura – a mesma temperatura de saída dos chillers). O fluxo de água gelada é enviado aos equipamentos usuários e o retorno de água quente volta para o anel superior, que vai se aquecendo e se acumulando nos anéis subsequentes abaixo (CLETO, 2016).

2.8 Modelo tarifário brasileiro

No Brasil, consumidores de alta tensão podem escolher entre duas modalidades tarifárias, verde ou azul. Na modalidade tarifária verde há apenas um valor de demanda, enquanto na modalidade tarifária azul há variação do preço, de acordo com o horário de utilização, horário de ponta e fora ponta. O horário de ponta é um período de três horas consecutivas (excluindo fins de semana e feriados), geralmente compreendido das 18h às 21h, mas que pode mudar de acordo com o estado brasileiro. No horário de ponta a tarifa de energia é mais cara porque este é o horário em que há mais demanda de energia na linha de transmissão. Desta forma, o aumento do preço da tarifa visa reduzir esta demanda. Já o horário fora ponta são as horas restantes, e este horário apresenta uma tarifa inferior. Esta diferença de valor entre as tarifas ponta e fora ponta, faz com que os consumidores de alta tensão busquem alternativas para reduzir a demanda no horário de ponta, sendo a termoacumulação uma destas alternativas.

Para um consumidor que está no Ambiente Contratação Regulada (ACR), ou seja, um consumidor que só pode comprar energia elétrica da concessionária responsável pela distribuição em sua região, o único ponto a ser analisado na hora de se estudar a viabilidade de um sistema de termoacumulação é a diferença entre as tarifas horárias, ponta e fora ponta. Já para um consumidor inserido no Ambiente de Contratação Livre (ACL), também conhecido como Mercado Livre de Energia, há outros fatores que são influenciados pela demanda e seu horário de consumo.

2.9 Ambiente de Contratação Livre (ACL)

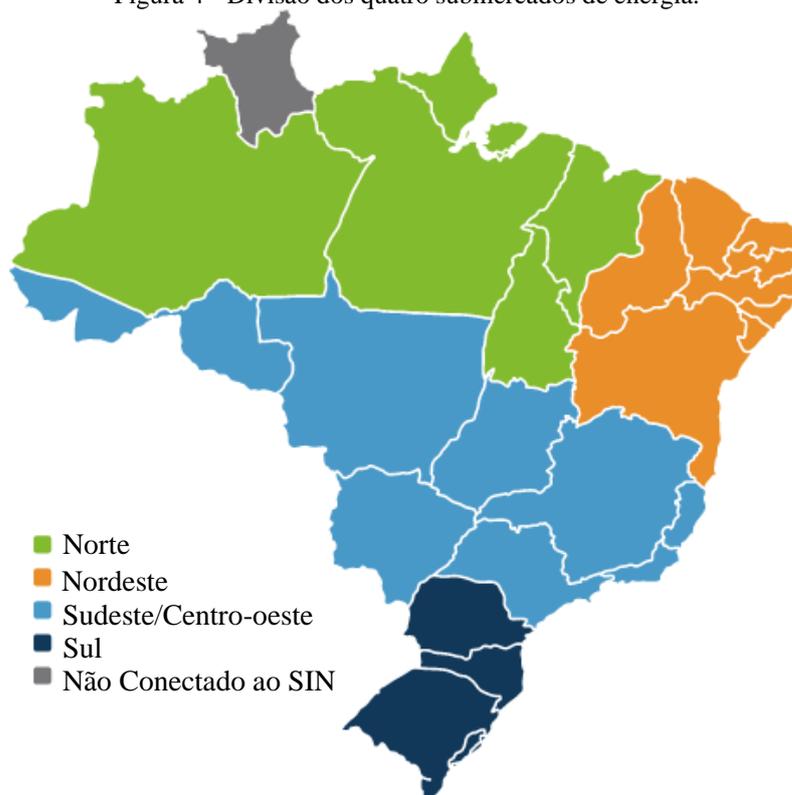
A principal característica do ACL é que o consumidor pode comprar o montante de energia necessário de geradores ou revendedores, com condições acordadas através de contratos bilaterais. Pelas regras vigentes em 2022 apenas grandes consumidores, com demanda contratada superior a 500 kW, podem acessar o segmento. E mesmo assim, atualmente, o segmento representa 34,5% de toda a energia elétrica consumida no Sistema Interligado Nacional – SIN (CCEE, 2022).

Quando um consumidor de alta tensão está no ACL, a demanda além de influenciar no valor pago de acordo com as tarifas dos horários de ponta e fora ponta, também pode influenciar no valor pago no fim do mês, quando ocorre a liquidação financeira na Câmara de Comercialização de Energia Elétrica - CCEE. A liquidação financeira é uma apuração mensal que compara o volume contratado com o volume consumido. Caso o volume consumido seja maior que o volume contratado, o consumidor terá de pagar um valor que é calculado de acordo com o Preço Líquido da Diferença - PLD, que tem base horária. Ou seja, se o consumo foi menor nos horários de PLD mais alto, e maior nos horários de PLD mais baixo, o valor que terá de ser pago para a CCEE será menor.

Portanto, se o consumidor tem um sistema de termoacumulação, e conseguir prever em quais horários o PLD será maior, ele pode programar seu sistema de climatização para usar a termoacumulação não apenas nos horários de ponta, mas também nos horários de maior PLD, para desta forma, poder gerenciar melhor as cláusulas de modulação do contrato.

Caso um consumidor, não possua demanda individual suficiente para migrar no mercado livre, é possível realizar uma comunhão de cargas e somar a demanda de diferentes unidades consumidoras. Há dois tipos de comunhão possíveis, a comunhão de fato e a comunhão de direito. A comunhão de fato é aplicada para unidades consumidoras localizadas em áreas contíguas. Já a comunhão de direito, mais comum para o caso de supermercados, é aplicada para unidades consumidoras que possuem a mesma raiz de CNPJ e que se encontrem situadas no mesmo submercado de energia. Os submercados de energia são definidos pelo sistema interligado nacional, e estão apresentados na Figura 4.

Figura 4 - Divisão dos quatro submercados de energia.



Fonte: WITZLER, 2022.

É importante ressaltar que a divisão dos submercados de energia é diferente da divisão das cinco regiões geográficas do Brasil. Quando comparado, o PLD Horário pode apresentar diferença de valor dependendo do submercado no qual a unidade consumidora está inserida.

2.10 Extensão *Euclid*, *SketchUp* e *Energy Plus*

No presente trabalho, o *SketchUp* foi o software utilizado para a modelagem tridimensional do edifício, e onde foram inseridas as informações como tipo de materiais de construções utilizado, e características geométricas. Esse *software* foi desenvolvido pela *At Last Software* e além da versão paga também oferece uma versão demo, que pode ser utilizada por até 30 dias.

Já o *Energy Plus*, é um *software* gratuito, de código aberto e multiplataforma, desenvolvido e financiado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos da América (DOE) (ENERGYPLUS, 2022). Ele é um programa com uma ferramenta de cálculo versátil, onde o utilizador é capaz de definir desde as propriedades termodinâmicas dos materiais construtivos da edificação, até os arquivos geográficos e climáticos de diversas localidades ao redor do planeta.

O *Euclid* por sua vez, trata-se de uma extensão que reúne as ferramentas de desenho do *SketchUp* e algumas ferramentas de *design* e geometria do *Energy Plus*. A extensão é gratuita e de código aberto.

2.11 Método de simulação do *Energy Plus*

O *EnergyPlus* permite que simulações de climatizações de ambientes sejam realizadas sem que seja necessário incluir os dados de todos os equipamentos que compõe o sistema. Esta é uma alternativa que pode ser utilizada quando o objetivo principal não é realizar o dimensionamento dos equipamentos, mas sim, obter a carga térmica de refrigeração.

A modelagem do sistema pode ser realizada com o uso de objetos denominados *templates*. Os *templates* são inseridos no arquivo IDF do *EnergyPlus*, e a partir deles, quando se realiza a simulação, é realizado um pré-processamento dos dados e criado um arquivo denominado *ExpandObjects* que insere todos os objetos necessários para a simulação do sistema de climatização escolhido. Como o supermercado era de médio a grande porte, optou-se por utilizar um sistema de climatização com Volume de Ar Variável (VAV). Para a entrada adequada dos *templates* foi consultado o documento *EnergyPlus*

Input/Output Reference (ENERGYPLUS, 2016), que indica quais *templates* são necessários para realizar a simulação,

- HVACTemplate: Thermostat;
- HVACTemplate: Zone:VAV;
- HVACTemplate: System:VAV;
- HVACTemplate: Plant:ChilledWaterLoop;
- HVACTemplate: Plant:Chiller.

O *template HVACTemplate:Thermostat* é onde são inseridos os dados de temperatura mínima e máxima para cada zona a ser climatizada. Já o *template HVACTemplate:Zone:VAV* é o responsável por simular as diferentes vazões de volume de ar, com base na temperatura da edificação. Os principais dados de entrada para o *HVACTemplate:Zone:VAV* são referentes a vazão mínima de ar a ser considerada para a zona, o termostato e o fluxo máximo de ar por área de piso. Para o *template HVACTemplate:System:VAV* os principais dados de entrada a serem definidos são o horário de funcionamento do sistema, e o tipo de fluido a ser considerado. Dados como eficiência dos ventiladores e dos motores podem ser definidos ou deixados na opção *default*. Também é possível definir o nível de umidade desejado para a zona. A parte de tubulações e conexões são definidas através do *template HVACTemplate:Plant:ChilledWaterLoop*, onde a palavra *Loop* se refere justamente ao sistema de tubulações. A partir deste *template* é que será realizada a conexão entre o tanque de água gelada (se tiver), o *chiller* e os *coils*. É possível definir neste *template* as características da bomba, seu funcionamento, o esquema de operação do sistema e as temperaturas de *setpoint* do fluido no *chiller*. Por fim, o *template HVACTemplate:Plant:Chiller*, é onde se define quantos *chillers* serão utilizados, o tipo de *chiller* e suas características principais e COP a ser considerado.

Assim que se inicia a simulação, o EnergyPlus, com base nos dados de entrada inseridos, calcula o dimensionamento de cada zona. A partir do dimensionamento das zonas, e utilizando como base as cargas internas, os perfis de ocupação, equipamentos, arquivo climático e os dados setados nos templates iniciais para o sistema de climatização, o programa calcula o dimensionamento de cada equipamento. A análise é realizada considerando o compartimento do sistema durante todo o dia e também em condições de extremas definidas no arquivo climático, de forma a ajustar o dimensionamento dos equipamentos para que atendam o perfil de carga da edificação conforme tolerância definida. Durante este processo, também são considerados fatores como o fluxo de ar máximo e mínimo definido, e também condições de conforto térmico caso esta opção seja selecionada durante a fase de *input*.

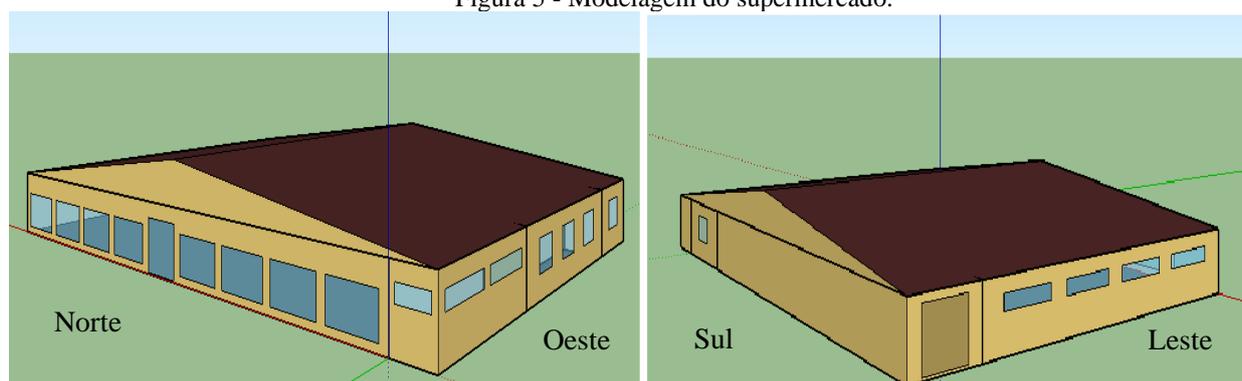
3 METODOLOGIA E MODELAGEM

Essa seção trata de definir a metodologia que foi adotada para a execução das simulações, levantamento e tratamento dos dados.

3.1 Definição do projeto, localização e modelagem no *SketchUp*

Para o projeto, a edificação definida foi um supermercado fictício, ligado na média tensão, e com características construtivas padrão. Desta forma, as zonas climáticas modeladas foram: área de vendas, banheiro, cozinha, vestiário, escritório e depósito. O estacionamento seria a céu aberto, e desta forma, não houve a necessidade de realizar a sua modelagem. Para a modelagem no *SketchUp* se utilizou a versão 2016 do programa, e o *template* simples para modelagem. Primeiramente se desenhou a planta baixa do modelo, e após se adicionou a altura para que o modelo passasse de 2D para 3D. Definido o modelo, ainda no *SketchUp* foi indicado as características construtivas do modelo. Sendo que estas características já tinham sido pré configuradas através do *EnergyPlus*. A Figura 5 apresenta a edificação que foi modelada no *SketchUp*.

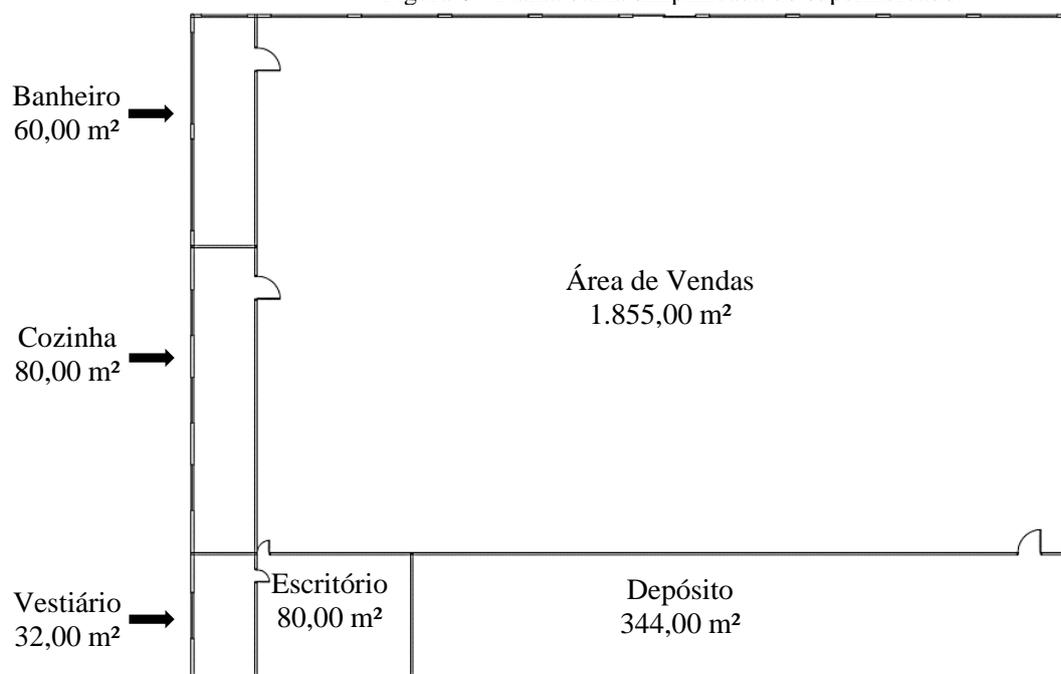
Figura 5 - Modelagem do supermercado.



Fonte: (Autora, 2022)

Onde as paredes externas são de bloco de concreto e possui argamassa nos lados interno e externo, as paredes internas são de blocos cerâmicos e possuem argamassa em ambos os lados. O telhado é composto de laje maciça, uma câmara de ar e telha de fibrocimento. Para uma melhor visualização, a Figura 6 apresenta uma planta baixa simplificada do supermercado.

Figura 6 - Planta baixa simplificada do supermercado.

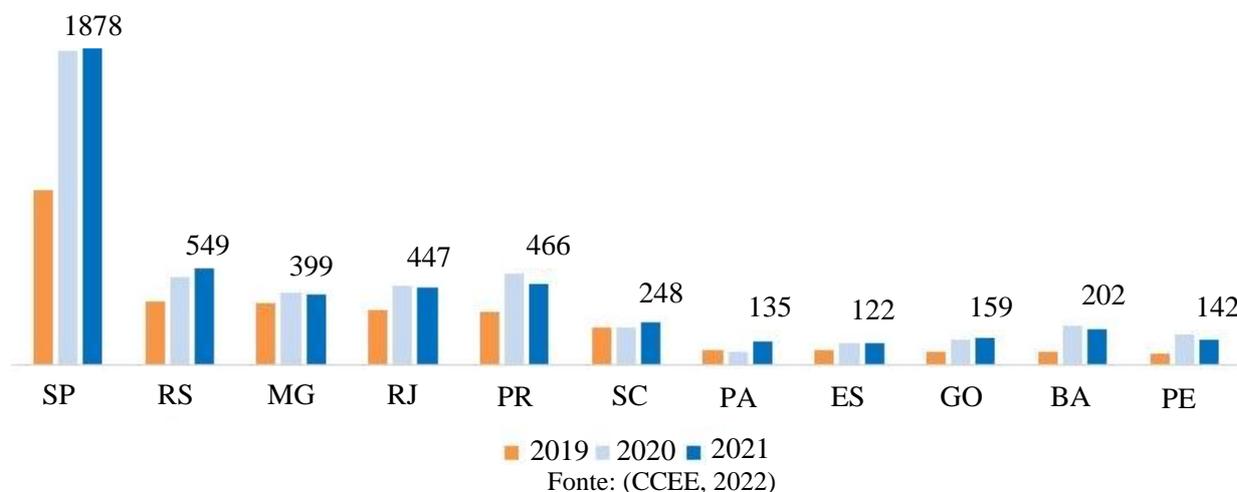


Fonte: (Autora, 2022)

Conforme se observa na Figura 5 e 6, no lado norte ficaria uma das paredes da área de vendas, e por este motivo foi modelado como sendo lado que apresentaria mais janelas. O lado sul, apresentava apenas a janela do escritório, e o depósito não apresentava nenhuma janela. No lado oeste, tinha-se o banheiro com uma janela no lado norte e duas no lado oeste, no meio se encontrava a cozinha e no outro extremo ficava o vestiário. Para o modelo analisado, não foi considerado nenhuma técnica passiva para redução de temperatura, pois se desejava realizar a análise considerando o pior caso.

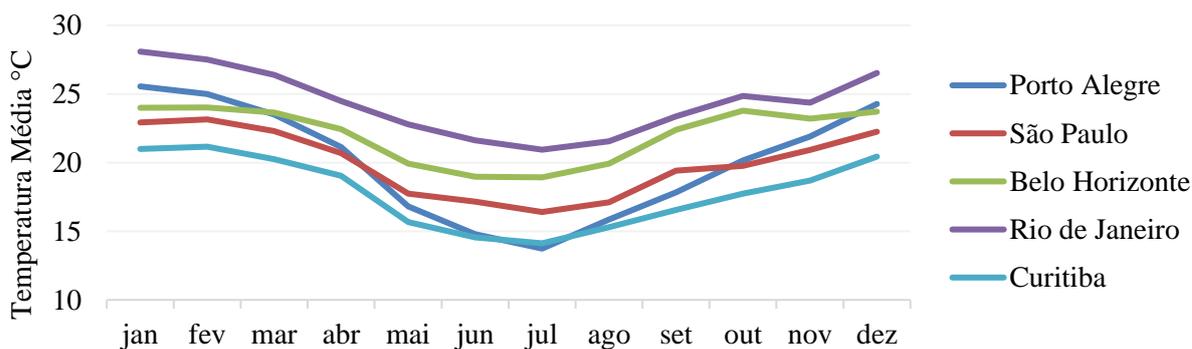
Como o objetivo era analisar um sistema de termoacumulação para um consumidor inserido no ACL, foi realizado um levantamento de quais eram os estados com mais unidades consumidoras no mercado livre de energia. A Figura 7 apresenta os últimos dados divulgados pela (CCEE, 2022), onde é possível notar que São Paulo, Rio Grande do Sul, Minas Gerais, Rio de Janeiro e Paraná são os cinco estados mais presentes no ACL.

Figura 7 - Gráfico representando a evolução de unidades consumidoras no ACL.



Outro fator de influência na necessidade ou não de um sistema de termoacumulação é o clima do local. A Figura 8 apresenta a variação anual de temperatura para as capitais dos cinco estados com mais consumidores no ACL.

Figura 8 - Figura comparando a temperatura média mensal para cinco capitais brasileiras.



Desta forma, para fins de comparação, definiu-se que seriam realizadas três simulações. A primeira, considerando que o supermercado se encontrava localizado em São Paulo – SP, pois é o estado com mais consumidores no mercado ACL. A segunda simulação considerando a cidade de Porto Alegre - RS, por ser a capital com a maior variação anual de temperatura dentre as cinco capitais comparadas, e a terceira simulação considerando a cidade do Rio de Janeiro -RJ, por ser a capital com temperaturas mais elevadas.

3.2 Modelagem e simulação no *EnergyPlus*

O *Energy Plus* foi utilizado na etapa de simulação para determinação da carga térmica da edificação. Para o *EnergyPlus*, se utilizou a versão 8-7-0, pois era a versão compatível com o *plugin Euclid*, que foi utilizado para poder realizar a conexão do *EnergyPlus* com o *SketchUp*.

O sistema de climatização foi configurado para que funcionasse das 07:00 às 23:00 horas, ou seja, a climatização do ambiente teria início uma hora antes do horário de funcionamento do supermercado e terminaria uma hora depois. O termostato foi configurado para que a temperatura do ambiente ficasse setada em 24 °C, e não foi considerado um tanque de aquecimento nesse sistema de climatização. Para o *chiller*, como não se tinha um objeto real para comparação definiu-se que o mesmo teria um Coeficiente de Performance (COP) de 3,5 pois este é um dos menores valores que se encontra para um *chiller* e também porque foi encontrado em várias das bibliografias analisadas. A temperatura com que a água deixaria o *chiller* foi deixada na opção *default* de 6,67 °C. Após a simulação, a carga térmica necessária para o resfriamento da edificação, foi obtida a partir da variável de saída *Chiller Evaporator Cooling Energy* que corresponde ao resfriamento fornecido pelo *chiller*.

3.3 Variáveis de entrada

No *SketchUp*, as variáveis de entrada foram as dimensões do supermercado, definição dos setores, e materiais construtivos das paredes, janelas, piso e teto. Como é um supermercado fictício, suas dimensões, assim como os materiais construtivos, foram obtidos a partir de comparações de supermercados de grande porte existentes. As taxas metabólicas das pessoas foram definidas de acordo com a *ASHRAE Standard - Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy* (ASHRAE, 2010), e a densidade de pessoas foi definida considerando a *ASHRAE Standard - Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality* (ASHRAE, 2003). A Tabela 1 apresenta as zonas térmicas do supermercado, dimensões, capacidade máxima de lotação e taxa metabólica dos ocupantes.

Tabela 1 - Zonas, dimensões, capacidade máxima de lotação e taxa metabólica dos ocupantes.

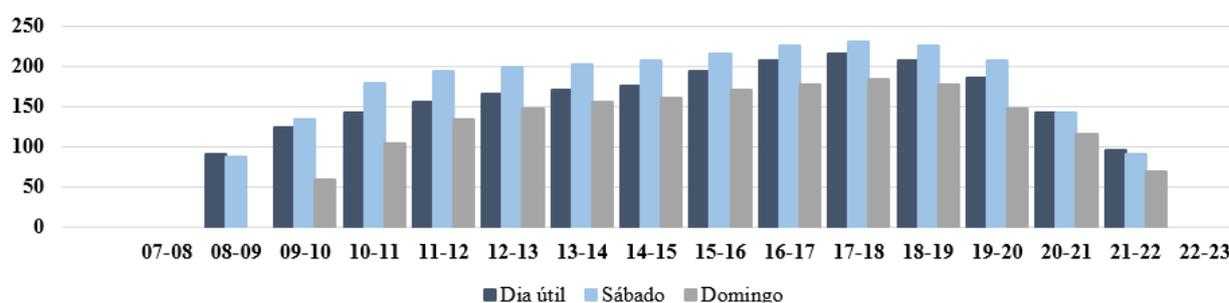
Zona Térmica	Área Piso [m ²]	Volume [m ³]	Área de Janela [m ²]	peçoas/100 m ²	Máximo de pessoas	Taxa Metabólica [met]
Área de Vendas	1.855,00	8.347,50	137,60	10	200	1,98
Banheiro	60,00	270,00	15,00	10	4	1,03
Cozinha	80,00	360,00	18,00	8	4	1,90
Depósito	344,00	1.548,00	-	5	15	2,07
Escritórios	80,00	360,00	6,00	6	5	1,12
Vestiário	32,00	144,00	6,00	15	3	1,21
Telhado	2.451,00	3.492,67	-	-	-	-
Total	4.902,00	14.522,17	182,60	-	231	-

Outros dados que foram necessários se definir para a simulação no *Energy Plus*, foram os dados climáticos dos locais analisados e o perfil de ocupação da edificação. Os arquivos climáticos foram coletados no site do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LABEEE, 2022). O nome dos arquivos climáticos utilizados para Porto Alegre, São Paulo e Rio de Janeiro foram respectivamente.

- BRA_RS_Porto.Alegre-Salgado.Filho.Intl.AP.839710_TMYx.2007-2021
- BRA_SP_Sao.Paulo-Guarulhos.Intl.AP.830750_TMYx.2007-2021
- BRA_RJ_Rio.de.Janeiro-Galeao-Jobim.Intl.AP.837460_TMYx.2007-2021

Já o período de ocupação da edificação, por se tratar de um supermercado de médio porte, localizado nas capitais dos estados de SP, RS e RJ, foi definido como sendo das 08:00 até 22:00 horas. O perfil de ocupação foi traçado considerando a separação em dia de semana, sábado e domingo. Para sua definição foi comparado o perfil de ocupação de quatro supermercados de Porto Alegre observados no *Google Maps*. A partir disto, foi plotada a Figura 9.

Figura 9 - Perfil diário de ocupação considerando três cenários: dia útil, sábado e domingo.



Fonte: (Autora, 2022)

Conforme é possível observar na Figura 9, o dia com maior ocupação é aos sábados e de menor ocupação é no domingo. Também se nota que nos três cenários, o horário com maior ocupação é entre às 16:00 e 19:00 horas. Também se definiu os materiais construtivos do supermercado. Suas características

estão apresentados na Tabela 2. As propriedades dos elementos construtivos, foram definidas de acordo com a Norma Brasileira 154220-2 (ABNT, 2003).

Tabela 2 - Características dos materiais construtivos do supermercado.

Material	Espessura [m]	Condutividade Térmica [W/m.K]	Massa Específica [kg/m ³]	Calor Específico [kJ/kg.K]	Transmitância Térmica - U [W/m ² .K]	Capacidade Térmica C _T [kJ/m ² K]
Paredes Externas						
Argamassa interna	0,0250	1,15	2.000,00	1,00		
Bloco de concreto	0,1400	1,75	2.300,00	1,00	2,69	272,00
Argamassa externa	0,0250	1,15	2.000,00	1,00		
Paredes Internas						
Argamassa interna	0,0250	1,15	2.000,00	1,00		
Bloco Cerâmico	0,0900	0,90	1.500,00	0,92	2,46	150,00
Argamassa externa	0,0250	1,15	2.000,00	1,00		
Piso						
Piso cerâmico	0,0075	1,05	2.000,00	0,92		
Contra piso	0,0200	1,15	2.000,00	1,00	3,34	273,80
Laje de concreto	0,1000	1,75	2.200,00	1,00		
Telhado						
Telha de fibrocimento	0,0080	0,95	2.000,00	0,84		
Câmara de ar	0,1500	1,18	1.2250	1,07	2,06	233,00
Laje maciça	0,1000	1,75	2.200,00	1,00		
Placa Gesso	0,0100	0,35	900,00	0,48		
Janela						
Vidro	0,0060	1,00	2.500,00	0,84	5,00	-
Porta Depósito						
Ferro Aço	0,0050	55,00	7.800,00	0,46	-	-

Por fim, definiu-se a carga interna da edificação. Como na Tabela 1 já havia sido definida a quantidade máxima de pessoa por zona e a taxa metabólica, a Tabela 3 apresenta os dados de carga interna de equipamentos e iluminação.

Tabela 3 - Definição da iluminação e equipamentos.

Equipamentos	Descrição	Quantidade	Potência Nominal [W]	Potência Total [W]
Lâmpadas	LED 133 lm/W	299	70,00	20.930,0
Computadores	Desktop	30	63,00	1.890,00
Portas Automáticas	Duas folhas	1	150,00	150,00
Expositores refrigerados Vertical	Capacidade 1518 L	15	404,00	6.060,00
Freezer horizontal	Capacidade 413 L	20	165,00	3.300,00
Expositores Quentes	Capacidade 300 L	2	100,00	200,00
Câmara fria	Capacidade 1800 L	1	450,00	450,00
Outros área de Vendas	Diversos	-	-	2.000,00
Outros cozinha	Diversos	-	-	1.000,00
Câmara fria	Capacidade 1800 L	1	450,00	450,00

É válido notar que foram definidos apenas os equipamentos principais e que teriam mais impacto na modelagem. Dos equipamentos listados na Tabela 3, os computadores possuem o perfil de uso de 100% durante todo o período de funcionamento (8:00 às 22:00), as lâmpadas, ficam 100% acesas, exceto

quando o supermercado está fechado. Neste caso, apenas 10% das lâmpadas permanecem ligadas. A porta automática foi modelada como se funcionasse 50% do tempo já que ela fica abrindo e fechando. Os demais equipamentos ficam em funcionamento durante todas as 24 horas, sem interrupção. Com todos os parâmetros de entrada definidos, realizou-se a simulação.

3.4 Análise e validação dos dados

Terminada a etapa de simulação, o que se fez foi classificar em ordem decrescente a carga térmica de refrigeração, para o dia de maior demanda. Desta forma, se obteve quais eram os horários que demandavam uma maior carga térmica, e analisou-se se estes horários eram equivalentes com os horários de tarifas mais elevadas. A segunda comparação que foi realizada, foi entre o horário de maior demanda de carga térmica e o preço do PLD horário. Para esta comparação, se analisou o PLD horário considerando todas as horas de uma semana, tanto para o ano de 2020 quanto para o ano de 2021.

Por fim, foi definido o horário de carga e descarga do tanque considerando os seguintes critérios:

1. O tempo de carga do tanque seria de quatro horas consecutivas, que deveriam estar compreendidas dentro do horário em que o prédio não está ocupado (23:00 às 07:00).
2. Durante o horário de ocupação do supermercado, por quatro horas consecutivas, a demanda térmica de refrigeração seria suprida apenas pelo tanque de termoacumulação. Preferencialmente, estas quatro horas deveriam incluir os horários com maiores demandas térmicas de refrigeração.
3. Tanto o horário de carga, quanto de descarga do tanque, deveria ser modelado de forma a se considerar o preço do PLD horário e da tarifa de energia. Caso esses dois requisitos não pudessem ser atendidos simultaneamente, o fator de decisão seria o PLD horário.

Desta forma, sabendo o horário de carga e descarga foi possível realizar o dimensionamento do tanque de termoacumulação. O dimensionamento do tanque foi realizado conforme o recomendado pela *ASHRAE HVAC Systems and Equipments* (ASHRAE, 2016b), considerando-se o dia com maior carga térmica no ano, cuja informação foi obtida da primeira simulação. Primeiramente se encontrou o volume do tanque V

$$V = \frac{\text{Capacidade térmica requerida}}{\rho c_p \Delta T \varepsilon} \quad (3.1)$$

na qual, V é o volume do tanque, em m^3 , a capacidade térmica requerida é inserida em J, ρ é a densidade, em kg/m^3 , c_p é o calor específico, em $J/kg.K$, ΔT é a diferença de temperatura, em $^{\circ}C$, ε é a eficiência do armazenamento, tipicamente 0,9.

Após se encontrar o volume, a altura do tanque foi definida assumindo-se uma relação de altura por diâmetro na ordem de 3:1.

$$h = \frac{V}{\pi r^2} \quad (3.2)$$

na qual, h é a altura, em m, V é o volume, em m^3 , e r é o raio da base, em m.

3.5 Levantamento dos dados de tarifas de energia e PLD horário

Realizada a simulação e validação dos dados, foi necessário obter os dados referente as tarifas de energia e o PLD horário, para a etapa de análise financeira. Para a determinação das tarifas, primeiramente, foi definida a distribuidora que seria considerada em cada análise. A escolha da distribuidora se baseou na quantia de consumidores atendidos por ela em cada capital. Para Porto Alegre, se escolheu a Companhia Estadual de Energia Elétrica – CEEE (Grupo Equatorial). Para o Rio de Janeiro a distribuidora escolhida foi a Light, e para São Paulo a Enel SP. A CEEE e a Light possuem o horário de ponta das 18:00 às 21:00 horas, enquanto a Enel SP considera o horário das 17:30 às 20:30. Para facilitar a comparação, decidiu-se utilizar o horário de ponta das 18:00 às 21:00 para as três capitais.

Após se definir as distribuidoras, e considerando que o supermercado se encontra no ACL, e está conectado em média tensão na classe A4 (2,3 a 25 kV), foi realizado o levantamento das tarifas sem tributos para as três distribuidoras. A Tabela 4 apresenta a tarifa para a demanda e a Tarifa do Uso do Sistema de Distribuição (TUSD), onde a sigla S.D. significa que é aplicado um desconto na tarifa caso a energia comprada seja incentivada, e N.S.D. significa que nenhum desconto é aplicado.

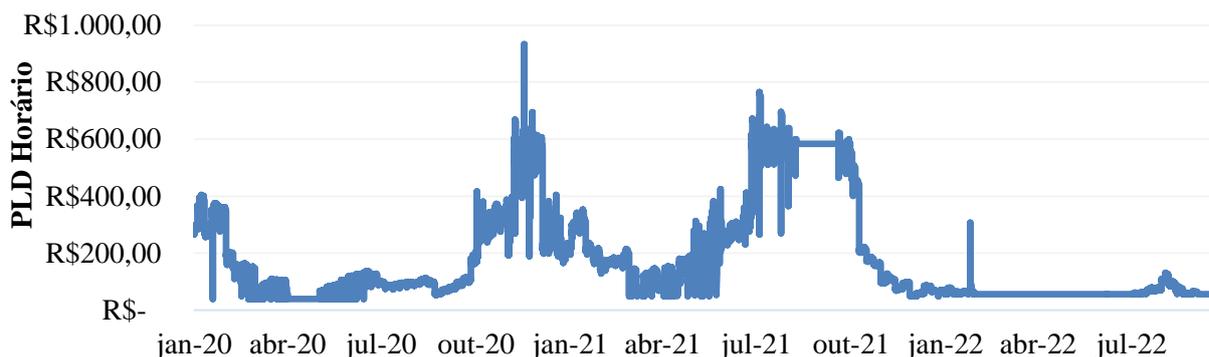
Tabela 4 – Tarifas de energia elétrica aplicadas para consumidores ACL nas distribuidoras de Porto Alegre, Rio de Janeiro e São Paulo, sem tributos.

Modalidade Tarifária	Tipo	CEEE	Light	ENEL SP
Azul	Demanda Ponta [R\$/kW] - S.D.	R\$ 47,96	R\$ 30,57	R\$ 31,00
	Demanda Fora de Ponta [R\$/kW] - S.D.	R\$ 23,45	R\$ 21,86	R\$ 18,82
	TUSD Única [R\$/MWh] - N. S. D.	R\$ 104,45	R\$ 177,30	R\$ 111,19
Verde	Demanda Única [R\$/kW] - S.D.	R\$ 23,45	R\$ 21,86	R\$ 18,82
	TUSD Ponta [R\$/MWh] - S.D.	R\$ 1.165,60	R\$ 740,48	R\$ 751,93
	TUSD Ponta [R\$/MWh] - N. S. D.	R\$ 104,45	R\$ 177,30	R\$ 111,19
	TUSD Fora de Ponta [R\$/MWh] - N. S. D.	R\$ 104,45	R\$ 177,30	R\$ 111,19

Fonte: Adaptado de (CEEE, 2022), (Light, 2022) e (Enel SP, 2022).

É possível notar na Tabela 4, que para um consumidor inserido no mercado livre, na modalidade tarifária azul, não há diferenciação na tarifa da TUSD em horário ponta e fora de ponta. Enquanto na modalidade tarifária verde, não há diferenciação no preço da demanda. Além das tarifas de energia, também foi necessário realizar um levantamento histórico do PLD horário para os submercados no qual os estados analisados estão incluídos. A Figura 10 apresenta um histórico do preço do PLD horário.

Figura 10 - Variação do preço do PLD horário para o submercado sudeste/centro-oeste de jan/2020 a set/2022.



Fonte: Adaptado MEGAWHAT, 2022.

Apesar da contabilização do PLD horário só ter começado a vigorar em janeiro de 2021, o histórico foi plotado desde janeiro de 2020 para que fosse possível observar a divergência entre os valores passados, os valores registrados no ano de 2021 e os valores que estão sendo registrados no ano de 2022. O preço elevado do ano de 2021 pode ser explicado pela crise hídrica que foi ocasionada pelo baixo volume de chuvas que começou a ser registrado em setembro de 2020. A falta de chuva deixou os reservatórios com um baixo nível de armazenamento, o que por consequência, fez com que o preço do PLD horário aumentasse de forma significativa. Já para o ano de 2022, o cenário que se encontra é o inverso, devido ao bom volume dos reservatórios de água, o PLD horário tem se mantido em um valor muito próximo ao piso e com poucas variações. Essa análise mostra como o PLD é dependente das condições meteorológicas, e o quão variável pode ser. Tendo em consideração o que foi exposto, para a análise financeira foi realizada uma comparação utilizando os valores de 2020 e 2021, para se avaliar como diferentes cenários de PLD afetam o custo.

3.6 Análise financeira

Para a análise financeira, primeiramente se calculou qual seria o custo anual e mensal do supermercado, com o sistema funcionando sem considerar um tanque de termoacumulação. Para isto, foi necessário se obter o consumo de energia para as 8760 horas simuladas. O consumo foi obtido através da soma de três *outputs* disponibilizados pelo *Energy Plus*, sendo eles: *Electric Equipment Electric Power*,

Lights Electric Power e Facility Total HVAC Electric Demand Power. Definiu-se também as condições de contorno e hipóteses necessárias para o cálculo do custo mensal e anual.

1. Unidade consumidora é de média tensão A4 (2,3 a 25 kV);
2. A demanda é abaixo de 1.000 kW, portanto o supermercado é um consumidor especial. Ou seja, no mínimo 50% da energia comprada deve ser proveniente de fontes alternativas;
3. Energia contratada: Incentivada 50 %;
4. Percentual de perdas de rede básica, igual ao crédito do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA). Isto é, a soma da parcela de perdas com a parcela do PROINFA é igual a zero;
5. Contrato de modulação FLAT. Ou seja, a energia contratada mensal é dividida de forma uniforme em todas as horas do mês;
6. Preço da energia contratada R\$ 300,00/MWh;
7. Volume contratado, definido conforme consumo obtido da simulação.

De acordo com a condição 3, as tarifas apresentadas na Tabela 4 que são sujeitas ao desconto (S.D.), tem um desconto de 50%. Como o objetivo era entender como o tanque afetava o consumo e a demanda, variáveis como impostos, reativos e ultrapassagens não foram consideradas. Inicialmente, considerando o sistema sem o tanque de termoacumulação, foi calculado o custo de distribuição para modalidade tarifária azul representados pelas siglas CD_{AZUL} e CD_{VERDE} , respectivamente.

$$CD_{AZUL} = T_{DP}DP + T_{DFP}DFP + T_{CT}CT \quad (3.3)$$

$$CD_{VERDE} = T_{DM}DM + (T_{CPD} + T_{CP})CP + T_{CFP}CFP \quad (3.4)$$

na qual,

- T_{DP} e T_{DFP} são as tarifas da demanda ponta e fora ponta respectivamente, R\$/kW;
- DP e DFP são a demanda ponta e fora ponta respectivamente, kW;
- T_{CT} é a tarifa referente ao consumo total, R\$/MWh;
- CT é o consumo total, MWh;
- T_{DM} é a tarifa da demanda máxima, R\$/kW;
- DM é a demanda máxima, kW;
- T_{CPD} e T_{CP} são as tarifas de consumo na ponta com desconto e tarifa de consumo na ponta sem desconto respectivamente, R\$/MWh;
- CP é o consumo na ponta, MWh;
- T_{CFP} é a tarifa de consumo fora ponta, R\$/MWh; CFP é o consumo fora de ponta, MWh.

Além dos valores de distribuição, também se calculou o valor mensal da liquidação financeira, usando a suposição de que o contrato era suficiente apenas para suprir o consumo mínimo. Sendo assim, se dividiu o volume mensal contratado pelas horas mensais, e multiplicou o PLD horário pela diferença entre o volume contratado e consumido, obtendo assim o custo referente a liquidação LF .

$$LF = (V_{CONS} - V_{CONT})PLD_h \quad (3.5)$$

na qual, V_{CONS} é o volume consumido, MWh, V_{CONT} é o volume contratado, MWh, e PLD_h é o PLD horário, R\$/MWh.

Na sequência, para o cálculo do custo incluindo o tanque de termoacumulação, considerou-se um aumento de 5% no consumo de energia elétrica do sistema de climatização, para compensação de possíveis perdas térmicas do armazenamento. Também se deslocou o consumo e a demanda de energia conforme a configuração de carga e descarga do tanque. O custo referente a liquidação financeira foi novamente calculado, conforme a Equação 3.5, para poder analisar como o horário de carga e descarga impactaria no preço da liquidação. Também foi recalculado o custo de distribuição, visto que uma parte da operação do tanque incluía o horário de ponta. Por fim, se realizou um levantamento. Para estimar o custo do tanque foi utilizado como referência o valor de \$ 206,09/m³ (KOBAYAKAWA, 2011). Considerando o dólar atual (2022) de 1 \$ equivalente a R\$ 5,4, custo do tanque utilizado foi de R\$ 1.112,886 /m³. Como o tanque seria instalado em um sistema de climatização já existente, seria necessário realizar a construção do tanque de termoacumulação, inserir bombas para a carga e descarga do tanque, e adicionar um possível chiller para realizar a carga e descarga do tanque, caso o chiller já

existente não possa ser utilizado. Tendo uma referência de valor para o investimento inicial, analisou-se o Valor Presente Líquido (VPL) do investimento. O VPL foi calculado através de

$$VPL = \sum_{n=0}^N \frac{FC_n}{(1 + TMA)^n} \quad (3.6)$$

na qual, FC é o fluxo de caixa no tempo analisado, n o tempo para retorno do investimento, e TMA é a taxa mínima de atratividade, para esta análise decidiu-se que seria utilizada uma TMA de 10%. Se o VPL for menor ou igual a zero o investimento não é viável.

4 RESULTADOS

Após definida a metodologia, a modelagem e os parâmetros iniciais, passou-se para a primeira etapa de simulação no *Energy Plus*.

4.1 Análise do sistema de climatização sem o tanque de termoacumulação

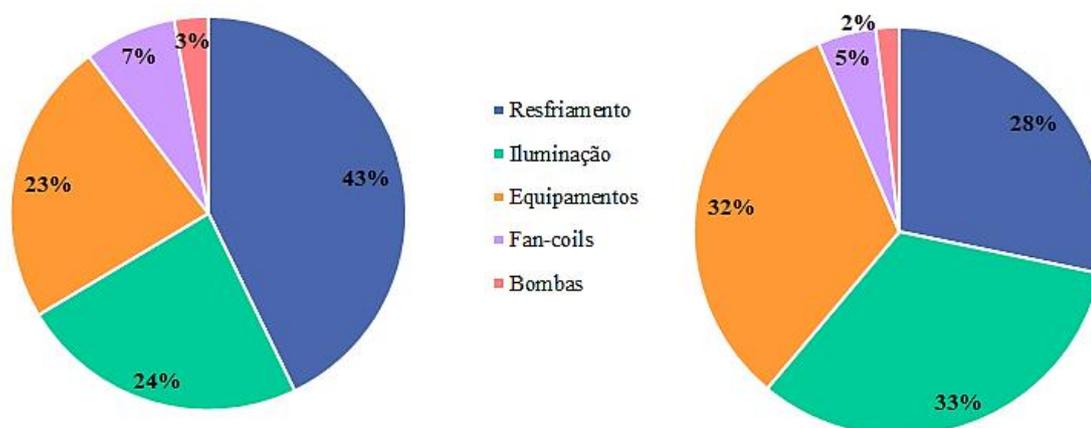
Para a modelagem da climatização, se optou por não inserir o sistema nas zonas climáticas telhado e depósito. Desta forma, apenas cinco das sete zonas foram inseridas no sistema de climatização, o que resultou em uma área climatizada total de 2.107,00 m². Como o objetivo da simulação não era dimensionar todos os equipamentos presentes no sistema, as variáveis de entradas referentes ao dimensionamento foram deixadas na opção *default, autosizing*, para que o programa calculasse as dimensões a serem utilizadas. A Tabela 5 apresenta os dados obtidos de consumo de energia elétrica e demanda máxima de energia da edificação, além da capacidade nominal do chiller. O COP do chiller foi um dado de entrada inserido e mantido o mesmo para as três simulações.

Tabela 5 - Dados obtidos com a simulação sem considerar um TES.

Capital	Energia Total [kWh]	Dia com maior demanda	Demanda Máxima Registrada [kW]	Capacidade Nominal Chiller [kW]	COP Chiller
Porto Alegre	42.5062,56	11-JAN-17:30	113,865	224,039	3,5
Rio de Janeiro	48.6489,34	11-FEB-16:00	124,495	252,691	3,5
São Paulo	34.2251,04	11-NOV-16:00	74,837	120,911	3,5

Conforme se observa na Tabela 5, cada capital apresentou um dia diferente como sendo o dia de maior demanda de energia, isso se deve a variação da temperatura de cada cidade. Rio de Janeiro foi a capital que apresentou o consumo e a demanda de energia maior, enquanto São Paulo apresentou os menores valores. Para uma melhor visualização de como a temperatura afeta o consumo de energia, a Figura 11 apresenta uma comparação do percentual de distribuição da demanda de energia para a simulação realizada com os dados climáticos do Rio de Janeiro (esquerda) e de São Paulo (direita).

Figura 11 - Comparação da distribuição da demanda de energia, para a simulação realizada com os dados climáticos do Rio de Janeiro (esquerda) e de São Paulo (direita).



Fonte: (Autora, 2022)

É possível notar na figura acima, que no Rio de Janeiro, devido ao fato das temperaturas serem mais elevadas, o sistema de refrigeração é o que mais consome energia. Em São Paulo, devido ao fato das temperaturas serem mais amenas, a iluminação e os equipamentos apresentaram um percentual de demanda maior do que a refrigeração.

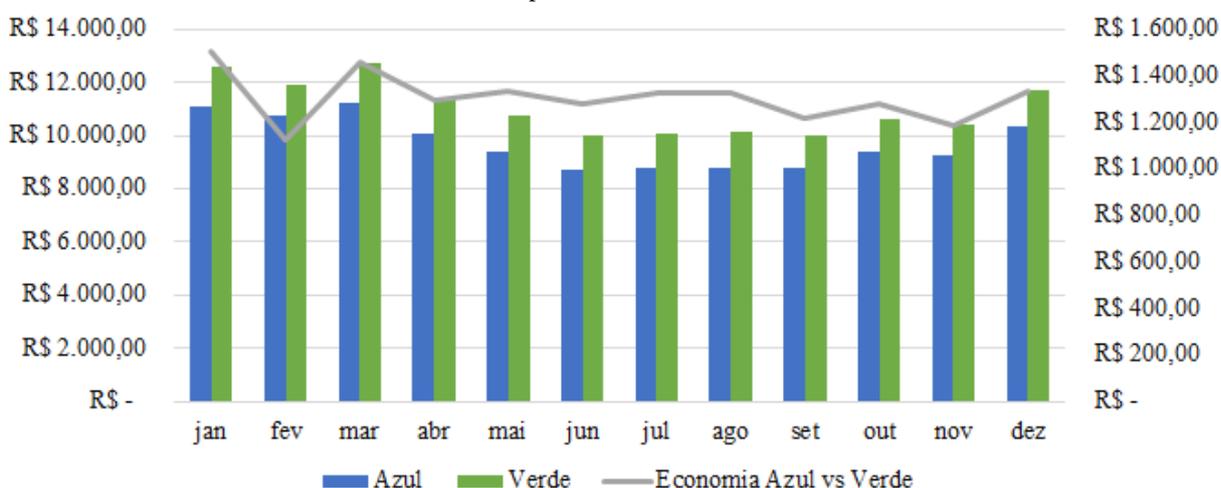
Para a análise do custo de distribuição nas modalidades tarifárias azul e verde, foi necessário organizar os dados em medidas mensais de consumo e demanda. A Tabela 6 está apresentando os dados mensais da cidade do Rio de Janeiro. Para não sobrecarregar a análise com tabelas, os dados para São Paulo e Porto Alegre estão apresentados no Apêndice B.

Tabela 6- Valores mensais de demanda e consumo para o supermercado localizado no Rio de Janeiro.

Mês	CT [MWh]	DM [kW]	DP [kW]	DFP [kW]	CP [MWh]	CFP [MWh]
jan	46,005	114,652	109,279	114,652	8,564	37,441
fev	42,803	124,495	117,653	124,495	7,903	34,901
mar	46,504	119,632	110,667	119,632	8,496	38,008
abr	41,656	107,746	99,001	107,746	7,578	34,078
mai	39,762	93,195	87,901	93,195	7,230	32,533
jun	37,134	83,320	79,401	83,320	6,727	30,407
jul	37,692	81,385	78,786	81,385	6,826	30,865
ago	37,744	82,546	79,418	82,546	6,853	30,891
set	36,971	85,285	83,442	85,285	6,729	30,241
out	39,229	94,642	89,583	94,642	7,147	32,082
nov	38,250	95,874	91,780	95,874	6,987	31,263
dez	42,739	108,847	103,680	108,847	7,878	34,862

Na Tabela 6 é possível observar que a demanda ponta e fora ponta apresentam valores bem próximos um do outro, portanto mesmo que se compare o custo da modalidade azul e verde, o resultado não deve apresentar uma economia alta. Um segundo ponto a se notar é o fato do consumo ter seus valores mais elevados entre dezembro e abril, um período conhecido por ter temperaturas mais elevadas. Por fim, calculou-se o custo na modalidade tarifária azul e verde. O resultado está apresentado na Figura 12.

Figura 12 - Comparação do custo mensal de energia considerando a modalidade tarifária azul em relação a verde para o Rio de Janeiro.



Fonte: (Autora, 2022)

Conforme esperado, a modalidade tarifária azul apresentou uma economia em relação a verde, mas não foram valores elevados. No total anual, para o Rio de Janeiro a economia da modalidade tarifária azul em relação a verde resultou em um valor de R\$ 15.693,42. Para Porto Alegre a economia encontrada foi de R\$ 22.405,37, e para São Paulo R\$ 11.351,28. O fator determinante que fez com que para a cidade de Porto Alegre a economia fosse maior, foi a tarifa da distribuidora que é mais elevada em comparação aos outros estados.

Na segunda análise, após obtido os dias de máxima demanda, se utilizou a variável de saída *Chiller Evaporator Cooling Energy*, para se obter a carga térmica horária de resfriamento da edificação. Classificou-se então em ordem decrescente, a Carga Térmica (C.T.) e o PLD horário de uma semana operativa em 2020 e outra em 2021, a fim de se obter quais eram os horários de valores mais elevados, e portanto, mais indicados para programar a descarga do tanque de termoacumulação. A Tabela 7 apresenta o resultado da classificação para a cidade de Porto Alegre. Onde, as horas com realce vermelho são os horários definidos para ocorrer a descarga do tanque de termoacumulação, e com realce azul são as horas definidas para ocorrer a carga do tanque de termoacumulação.

Tabela 7 - Horários de carga térmica e PLD, classificados em ordem decrescente, para a cidade de Porto Alegre.

C.T.	PLD - 2020							PLD - 2021							
	11/1	11/1	12/1	13/1	14/1	15/1	16/1	17/1	11/1	12/1	13/1	14/1	15/1	16/1	17/1
17:00	0:00	23:00	17:00	18:00	17:00	17:00	17:00	17:00	17:00	17:00	3:00	0:00	0:00	0:00	23:00
16:00	1:00	1:00	18:00	17:00	18:00	18:00	18:00	18:00	18:00	18:00	18:00	1:00	1:00	1:00	22:00
18:00	23:00	0:00	19:00	16:00	16:00	16:00	16:00	16:00	12:00	13:00	17:00	18:00	17:00	2:00	3:00
19:00	22:00	22:00	16:00	19:00	19:00	19:00	19:00	13:00	19:00	14:00	13:00	12:00	18:00	3:00	21:00
15:00	21:00	21:00	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00	13:00	23:00	12:00	13:00	23:00	23:00	4:00
20:00	20:00	20:00	13:00	13:00	13:00	13:00	13:00	19:00	16:00	16:00	0:00	17:00	2:00	22:00	0:00
14:00	14:00	3:00	12:00	0:00	15:00	15:00	15:00	15:00	23:00	19:00	14:00	2:00	13:00	4:00	1:00
21:00	15:00	19:00	15:00	1:00	0:00	0:00	12:00	12:00	22:00	12:00	19:00	19:00	16:00	21:00	2:00
13:00	16:00	14:00	20:00	15:00	23:00	23:00	0:00	14:00	14:00	22:00	16:00	3:00	19:00	13:00	20:00
12:00	17:00	15:00	23:00	12:00	22:00	20:00	23:00	23:00	15:00	15:00	1:00	23:00	22:00	15:00	5:00
11:00	13:00	4:00	22:00	23:00	20:00	22:00	20:00	20:00	20:00	3:00	15:00	14:00	14:00	12:00	19:00
10:00	18:00	18:00	11:00	22:00	1:00	1:00	22:00	22:00	21:00	20:00	23:00	16:00	12:00	14:00	6:00
22:00	19:00	17:00	21:00	20:00	12:00	12:00	1:00	1:00	11:00	21:00	20:00	22:00	15:00	20:00	18:00
9:00	3:00	16:00	0:00	21:00	21:00	21:00	11:00	11:00	3:00	0:00	22:00	11:00	20:00	19:00	7:00
7:00	12:00	13:00	1:00	11:00	11:00	11:00	21:00	21:00	10:00	11:00	11:00	15:00	11:00	17:00	15:00
8:00	4:00	5:00	10:00	10:00	10:00	10:00	3:00	3:00	0:00	1:00	2:00	20:00	21:00	16:00	16:00
0:00	11:00	11:00	3:00	3:00	3:00	3:00	10:00	10:00	4:00	4:00	21:00	21:00	3:00	18:00	13:00
1:00	5:00	6:00	4:00	4:00	4:00	4:00	4:00	4:00	9:00	2:00	4:00	10:00	10:00	5:00	14:00
2:00	6:00	12:00	9:00	9:00	9:00	9:00	5:00	5:00	7:00	5:00	5:00	4:00	4:00	11:00	17:00
3:00	7:00	7:00	5:00	5:00	5:00	5:00	9:00	9:00	6:00	6:00	6:00	5:00	6:00	7:00	12:00
4:00	10:00	10:00	6:00	7:00	7:00	6:00	7:00	7:00	5:00	7:00	10:00	7:00	7:00	10:00	8:00
5:00	8:00	8:00	7:00	6:00	8:00	7:00	6:00	6:00	8:00	10:00	7:00	6:00	5:00	8:00	11:00
6:00	9:00	9:00	8:00	8:00	6:00	8:00	8:00	8:00	1:00	8:00	8:00	8:00	9:00	6:00	9:00
23:00	2:00	2:00	2:00	2:00	2:00	2:00	2:00	2:00	2:00	9:00	9:00	9:00	8:00	9:00	10:00

É possível observar que as maiores cargas térmicas de refrigeração são registradas entre as 15 e 19 horas. Este fato, também foi verificado na simulação para as cidades do Rio de Janeiro e de São Paulo, conforme pode ser observado nas Tabelas A1 e A2, presentes no apêndice deste trabalho. O principal fator que influenciou este pico de demanda foi o perfil de ocupação do supermercado que tem seu pico de ocupação justamente entre as 15 e 19 horas. Já para o PLD, é possível observar que nos fins de semana (11/01/2020, 12/01/2020, 16/01/2021 e 17/01/2021) o mesmo apresenta os maiores valores durante a noite, enquanto que durante a semana os valores mais elevados são registrados no fim da tarde e começo da noite. Após a organização e análise dos dados, seguindo os critérios estabelecidos no subcapítulo 3.5, foi definido que o horário de carga do tanque de termoacumulação começaria às 03:00 e terminaria às 07:00, enquanto que o horário de descarga começaria às 16:00 e terminaria às 20:00 horas.

Antes de se analisar os dados considerando a termoacumulação, foi calculada a Liquidação Financeira (LF), conforme a equação 3.5. A Tabela 8 apresenta o resultado obtido para as três cidades, onde o valor negativo significa um saldo devedor.

Tabela 8 - Valores obtidos para a liquidação financeira considerando PLD horário.

Mês	Porto Alegre		Rio de Janeiro		São Paulo	
	2020	2021	2020	2021	2020	2021
jan	-R\$ 2.778,78	-R\$ 1.949,66	-R\$ 3.254,83	-R\$ 2.177,43	-R\$ 1.354,79	-R\$ 970,79
fev	-R\$ 1.476,55	-R\$ 1.247,74	-R\$ 1.430,66	-R\$ 1.614,17	-R\$ 503,02	-R\$ 587,57
mar	-R\$ 1.074,05	-R\$ 639,92	-R\$ 626,99	-R\$ 1.052,20	-R\$ 218,21	-R\$ 415,70
abr	-R\$ 132,31	-R\$ 504,00	-R\$ 233,95	-R\$ 846,25	-R\$ 118,64	-R\$ 430,85
mai	-R\$ 205,94	-R\$ 481,52	-R\$ 306,80	-R\$ 772,36	-R\$ 253,47	-R\$ 670,06
jun	-R\$ 36,63	-R\$ 403,26	-R\$ 250,18	-R\$ 610,80	-R\$ 358,46	-R\$ 987,09
jul	R\$ 184,74	R\$ 3,63	R\$ 103,91	-R\$ 626,85	-R\$ 147,46	-R\$ 1.726,60
ago	R\$ 305,53	-R\$ 345,20	R\$ 123,38	-R\$ 604,09	-R\$ 145,70	-R\$ 1.850,48
set	R\$ 173,95	-R\$ 875,93	R\$ 9,05	-R\$ 844,43	-R\$ 310,36	-R\$ 2.372,80
out	-R\$ 775,79	-R\$ 527,13	-R\$ 870,76	-R\$ 693,80	-R\$ 1.280,16	-R\$ 989,40
nov	-R\$ 1.902,66	-R\$ 299,72	-R\$ 1.540,77	-R\$ 232,97	-R\$ 2.157,02	-R\$ 347,25
dez	-R\$ 1.603,35	-R\$ 382,42	-R\$ 1.657,54	-R\$ 397,43	-R\$ 1.179,53	-R\$ 282,53
Total	-R\$ 9.321,85	-R\$ 7.652,87	-R\$ 9.936,15	-R\$ 10.472,76	-R\$ 8.026,80	-R\$ 11.631,12

Para apurar a liquidação financeira apresentada na Tabela 08, foi considerado um volume contratado mensal de 32 MWh para Porto Alegre, 36 MWh para o Rio de Janeiro e 25 MWh para São Paulo. Com as análises concluídas passou-se para a próxima etapa onde se considerava um tanque de termoacumulação.

4.2 Análise financeira considerando a inserção de um tanque de termoacumulação.

Conforme comentado anteriormente, foi definido que o tanque de termoacumulação iria fazer seu ciclo de carregamento das 03:00 às 07:00, e de descarga das 16:00 às 20:00. Conhecendo o funcionamento do tanque foi possível deslocar a curva de carga, de forma a tentar otimizar a economia de energia. Desta forma, se deslocou o consumo de energia do sistema de climatização, mas descontando os Fan-coils, pois eles não estariam funcionando no período de carga do tanque. Após se obter o novo perfil de consumo e demanda, os cálculos realizados na etapa 1 foram refeitos com o intuito de observar se ocorreu alguma alteração no custo. A Tabela 9 traz um comparativo de diferentes combinações de ano de análise e modalidade tarifária para as três cidades.

Tabela 9 - Comparativo do custo anual, com e sem termoacumulação.

Sistema de Climatização Sem Tanque de Termoacumulação						
	Rio de Janeiro		Porto Alegre		São Paulo	
	2020	2021	2020	2021	2020	2021
Azul	R\$ 126.496,20	R\$ 127.032,81	R\$ 88.824,27	R\$ 87.155,29	R\$ 49.463,02	R\$ 45.858,71
verde	R\$ 142.135,62	R\$ 142.672,23	R\$ 111.229,64	R\$ 109.560,66	R\$ 60.814,30	R\$ 57.209,99
Sistema de Climatização Com Tanque de Termoacumulação						
	Rio de Janeiro		Porto Alegre		São Paulo	
	2020	2021	2020	2021	2020	2021
Azul	R\$ 133.618,18	R\$ 135.853,36	R\$ 84.445,64	R\$ 81.911,84	R\$ 47.982,47	R\$ 44.795,71
verde	R\$ 138.241,19	R\$ 140.476,37	R\$ 91.470,85	R\$ 88.937,04	R\$ 52.616,39	R\$ 49.429,62
Economia Obtida Depois de Incluir o Tanque de Termoacumulação						
	Rio de Janeiro		Porto Alegre		São Paulo	
	2020	2021	2020	2021	2020	2021
Azul	-R\$ 7.121,98	-R\$ 8.820,55	R\$ 4.378,63	R\$ 5.243,46	R\$ 1.480,56	R\$ 1.063,00
verde	R\$ 3.894,43	R\$ 2.195,86	R\$ 19.758,79	R\$ 20.623,62	R\$ 8.197,92	R\$ 7.780,36

Alguns fatores chamaram a atenção na Tabela 9. O primeiro fator foram os valores negativos para o Rio de Janeiro, considerando a modalidade tarifária azul. Este valor negativo significa que o custo era menor com o sistema sem o tanque de termoacumulação. Uma possível causa para o aumento no custo, é o fato da demanda máxima na ponta ser bem próxima da demanda máxima fora de ponta, o que fez com que a modalidade tarifária azul fosse menos vantajosa que a verde. Ao se adicionar o tanque de termoacumulação, a demanda máxima ponta e fora de ponta ficaram ainda mais próximas, o que encareceu o custo. Este fator também pode ser observado para as outras duas cidades. Nas três simulações a modalidade tarifária verde se mostrou uma escolha mais vantajosa do que a modalidade tarifária azul. Mas, como no Rio de Janeiro a temperatura é mais elevada, o consumo de energia se mantém elevado durante o dia por longos períodos. Desta forma, o tanque de termoacumulação, do jeito que foi utilizado, não conseguiu se adequar de forma satisfatória ao perfil de consumo da unidade.

Por último, um resultado que surpreendeu foi o fato de que o custo obtido para o ano de 2020 e 2021 ficaram bem próximos, mesmo havendo a grande variação no preço do PLD apresentada na Figura 9. Os valores ficaram próximos pelo fato de o volume consumido e contratado ser pequeno, e por este motivo a variação do PLD não teve tanta influência no preço final.

Finalmente, tendo os dados referentes ao dia de maior demanda, e as horas de carga do tanque, foi possível realizar o dimensionamento do tanque utilizando as Equações 3.1 e 3.2. A Tabela 10 apresenta o resultado dos cálculos.

Tabela 10 – Dimensionamento do tanque de termoacumulação.

Capital	Volume [m ³]	Altura [m]	Diâmetro [m]	Espessura [m]	Transmitância Térmica -U [W/m ² K]	Geometria
Porto Alegre	76	9,45	3,20	0,25	0,48	Cilíndrico
Rio de Janeiro	87	9,58	3,40	0,25	0,48	Cilíndrico
São Paulo	40	7,53	2,60	0,25	0,48	Cilíndrico

Os materiais construtivos definidos para o tanque que resultaram em uma espessura de 25 cm foram: isolante térmico externo de poliestireno expandido de 10 cm de espessura, paredes de concreto armado de 15 cm de espessura e vedação emborrachada na parte interna do tanque. Após calculado os dados referentes ao tanque de termoacumulação, foi estimado um valor de investimento inicial para o sistema. Considerando o valor por metro cúbico informado na seção 3.6, um gasto de R\$ 600,00 com bombas e R\$ 500,00 com canos e conexões, o custo inicial para a edificação em Porto Alegre e São Paulo ficou respectivamente, R\$ 85.679,34 e R\$ 45.615,44. O cálculo de viabilidade econômica não foi realizado para o Rio de Janeiro devido à baixa economia apresentada na Tabela 9. Para Porto Alegre e São Paulo a análise foi realizada considerando a modalidade tarifária verde, e a liquidação financeira de 2020.

Para uma TMA de 10% a.a. e considerando como entrada a economia anual, para Porto Alegre, ao final do quinto ano o VPL seria de R\$ 13.114,61. Já para São Paulo, o VPL só seria positivo ao final do sexto ano, onde o valor do VPL seria de 3.572,08. Se for levado em consideração o fato de que o investimento terá uma vida útil média de 15 anos, a implementação do sistema é viável tanto para Porto Alegre quanto para São Paulo.

5 CONCLUSÃO

No presente trabalho, buscou-se analisar como a inserção de um tanque de termoacumulação iria impactar o custo de um consumidor que se encontra inserido no mercado livre de energia. Para que fosse possível realizar a análise proposta, inicialmente se fez uma breve revisão sobre o funcionamento de um sistema de climatização com tanque de termoacumulação, e sobre aspectos gerais do mercado livre de energia. Para a modelagem e simulação se utilizou os *softwares SketchUp e Energy Plus*, juntamente com a extensão *Euclid*.

A análise foi realizada considerando três cidades distintas. O que se concluiu com a comparação entre as cidades, foi de que o clima pode ser um fator decisivo, que pode até inviabilizar o projeto se a modelagem de operação do sistema de climatização não for bem executada. Pois em locais com temperaturas elevadas, o sistema de climatização acaba por consumir a maior parte da energia, e desta

forma, quando se tem um consumo próximo ao pico durante um longo período, o deslocamento da carga de consumo acaba por não ocasionar reduções significativas no custo final da energia. Para que a análise fosse mais completa, também foi comparado o custo considerando duas modalidades de tarifárias diferentes. Essa comparação mostrou que o fato de ter tarifas diferentes para o horário de ponta e fora ponta, não garante que a redução do custo será maior ao se implantar um sistema de termoacumulação. Na verdade, o que se observou foi que considerando a modalidade tarifária verde, foi possível ter uma redução no custo da energia bem mais elevada do que considerando a modalidade tarifária azul. O que se concluiu com isso, é que é necessário sempre se estudar o perfil de demanda e consumo da unidade antes de fazer qualquer alteração no sistema. Pois, se a unidade consumidora estiver em uma categoria inadequada de modalidade tarifária, a inserção de um sistema de termoacumulação pode não trazer o benefício esperado.

Por fim, também se analisou o impacto que o deslocamento da curva de carga teria no valor mensal da liquidação financeira, considerando um contrato que tenha modulação flat. O que se percebeu, foi apesar do PLD horário apresentar uma tendência de ter preços mais elevados entre as 15:00 e 17:00 horas, ele também pode apresentar bastante variações dependendo das condições climáticas. Dessa forma, concluiu-se que caso um consumidor que esteja no ambiente livre deseje adicionar um sistema de termoacumulação, a análise de viabilidade não deve ser realizada tendo como base apenas um fator. É necessário analisar todo o contexto para que seja feita a melhor modulação de funcionamento do sistema.

Para trabalhos futuros, recomenda-se analisar a viabilidade considerando uma estrutura que tenha sistemas construtivos adequados ao clima que se está analisando, como uma cor mais clara para a envoltória, sombreamentos e técnicas passivas de refrigeração, para analisar se desta forma o sistema de termoacumulação se torna inviável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS - ASHRAE. **HVAC Systems and Equipments Handbook**, 2016.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS - ASHRAE. **Standard 55**: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, 2010.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS - ASHRAE. **Standard 62.2**: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, 2003.

ARCURI, B.; SPATARU, C.; BARRETT M.; **Evaluation of ice thermal energy storage (ITES) for commercial buildings in cities in Brazil**. Sustainable Cities and Society v.29, p.178-192, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15.220: Desempenho térmico de edificações** - Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2003.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – CCEE. **Mercado livre de energia bate recorde de migração de unidades consumidoras em 2021**. Disponível em: < <https://www.ccee.org.br/pt/web/guest/-/mercado-livre-de-energia-bate-recorde-de-migracao-de-unidades-consumidoras-em-2021> >. Acesso em: 17 de abril de 2022

CLETO, L. T.; **Ar Condicionado guia prático sobre sistemas de água gelada**. Apostila do Ministério do Meio Ambiente e do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento, Brasília, 2016.

COMPANHIA ESTADUAL DE ENERGIA ELÉTRICA – CEEE. **Tabela de Tarifas do Grupo A**. Disponível em: < <https://ceee.equatorialenergia.com.br/tarifas-e-custos> >. Acesso em: 25 de setembro de 2022.

CRUZ, V. A. **Análise Técnico-Econômica do Sistema de Termoacumulação da Procuradoria Geral da República**. 2018. Projeto de Graduação (Engenharia Mecânica) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

DINCER, I.; ROSEN, M. A.; **Thermal Energy Storage: systems and applications**. John Wiley & Son. 2ª edição, 2011.

ENEL. **Tarifa de Energia Elétrica**. Disponível em: < https://www.enel.com.br/pt-saopaulo/Corporativo_e_Governo/tabela-de-tarifas.html >. Acesso em: 25 de setembro de 2022.

ENERGY PLUS. **Energy Plus**. Disponível em: <<https://energyplus.net/>> Acesso em: 17 de abril de 2022.

ENERGY PLUS. **Input Output Reference**. Version 8.7. U.S. Department of Energy, USA, 2016.

KOBAYAKAWA, F. A. **Eficiência energética em ar condicionado e refrigeração através da aplicação da termoacumulação**. 2011. Monografia – (Bacharelado em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2011.

KRELLING, A. F. **Estudo do Controle Preditivo da Termoacumulação de Água Gelada por Meio de Previsões de Carga**. 2019. Dissertação – (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES -LABEEE. **Arquivos Climáticos**. Disponível em: <<https://labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos> >. Acesso em: 10 de setembro de 2022.

Light. **Composição da Tarifa.** Disponível em: <<http://www.light.com.br/para-residencias/Sua-Conta/composicao-da-tarifa.aspx>>. Acesso em: 25 de setembro de 2022.

MEGAWHAT. **PLD Horário.** Disponível em: <<https://megawhat.energy/>>. Acesso em: 25 de setembro de 2022.

SKETCHUP. **Informações SketchUp.** Disponível em: <<https://www.sketchup.com/pt-BR>> Acesso em: 17 de abril de 2022.

WITZLER. **Mercado Livre de Energia: a Importância dos Submercados no Comércio.** Disponível em: <<https://www.witzler.com.br/2021/12/23/mercado-livre-de-energia/>>. Acesso em: 25 de setembro de 2022.

APÊNDICE A – Horários de maior carga térmica e PLD, classificados em ordem decrescente.

Tabela A1 - Horários de carga térmica e PLD, classificados em ordem decrescente, para a cidade do Rio de Janeiro.

C.T.	2020							2021						
	11/2	12/2	13/2	14/2	15/2	16/2	17/2	11/2	12/2	13/2	14/2	15/2	16/2	17/2
16:00	0:00	17:00	0:00	0:00	0:00	23:00	17:00	0:00	17:00	0:00	23:00	22:00	19:00	18:00
17:00	13:00	18:00	14:00	14:00	1:00	22:00	18:00	17:00	18:00	1:00	22:00	23:00	22:00	17:00
18:00	14:00	22:00	13:00	13:00	22:00	0:00	16:00	18:00	22:00	2:00	21:00	18:00	23:00	19:00
15:00	15:00	23:00	16:00	16:00	23:00	21:00	13:00	23:00	16:00	22:00	0:00	19:00	0:00	0:00
14:00	16:00	19:00	15:00	17:00	21:00	1:00	19:00	19:00	23:00	23:00	1:00	17:00	18:00	22:00
19:00	17:00	16:00	17:00	18:00	20:00	3:00	14:00	22:00	19:00	21:00	20:00	21:00	1:00	23:00
13:00	18:00	0:00	18:00	19:00	14:00	20:00	23:00	16:00	12:00	14:00	2:00	16:00	20:00	13:00
12:00	19:00	14:00	19:00	22:00	19:00	19:00	22:00	1:00	13:00	13:00	19:00	20:00	21:00	16:00
20:00	22:00	13:00	22:00	15:00	15:00	15:00	15:00	13:00	20:00	17:00	18:00	13:00	17:00	1:00
11:00	23:00	15:00	23:00	1:00	17:00	14:00	12:00	12:00	14:00	3:00	16:00	14:00	12:00	14:00
21:00	12:00	1:00	12:00	23:00	16:00	16:00	20:00	14:00	21:00	20:00	15:00	12:00	16:00	12:00
10:00	1:00	12:00	21:00	20:00	18:00	17:00	11:00	11:00	15:00	16:00	17:00	11:00	13:00	15:00
9:00	20:00	21:00	1:00	21:00	13:00	18:00	21:00	21:00	0:00	18:00	14:00	15:00	15:00	20:00
7:00	21:00	20:00	20:00	12:00	12:00	13:00	0:00	15:00	1:00	19:00	13:00	0:00	11:00	2:00
8:00	11:00	11:00	11:00	11:00	3:00	4:00	1:00	20:00	11:00	12:00	3:00	10:00	14:00	21:00
22:00	3:00	10:00	10:00	10:00	11:00	12:00	10:00	10:00	2:00	15:00	12:00	1:00	2:00	11:00
0:00	10:00	9:00	3:00	3:00	4:00	5:00	3:00	2:00	10:00	11:00	4:00	3:00	3:00	3:00
1:00	4:00	3:00	9:00	9:00	5:00	6:00	9:00	3:00	9:00	4:00	11:00	9:00	10:00	10:00
2:00	9:00	8:00	8:00	4:00	10:00	7:00	4:00	9:00	3:00	10:00	5:00	8:00	9:00	4:00
3:00	8:00	4:00	4:00	8:00	6:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	6:00	2:00	4:00	9:00
4:00	5:00	7:00	7:00	5:00	7:00	11:00	5:00	4:00	7:00	7:00	7:00	7:00	6:00	8:00
5:00	6:00	5:00	5:00	7:00	8:00	10:00	7:00	5:00	4:00	9:00	10:00	4:00	7:00	7:00
6:00	7:00	6:00	6:00	6:00	9:00	9:00	6:00	6:00	6:00	6:00	8:00	6:00	5:00	6:00
23:00	2:00	2:00	2:00	2:00	2:00	2:00	2:00	7:00	5:00	5:00	9:00	5:00	8:00	5:00

Tabela A2 - Horários de carga térmica e PLD, classificados em ordem decrescente, para a cidade de São Paulo.

C.T.	2020							2021						
	11/2	11/2	12/2	13/2	14/2	15/2	16/2	17/2	11/2	12/2	13/2	14/2	15/2	16/2
16:00	18:00	22:00	17:00	0:00	22:00	19:00	19:00	23:00	0:00	0:00	22:00	22:00	19:00	18:00
17:00	17:00	18:00	18:00	1:00	23:00	18:00	18:00	22:00	22:00	1:00	21:00	23:00	18:00	19:00
15:00	19:00	17:00	19:00	2:00	21:00	22:00	17:00	19:00	23:00	2:00	23:00	21:00	22:00	22:00
18:00	22:00	19:00	13:00	22:00	0:00	17:00	22:00	18:00	18:00	22:00	0:00	0:00	21:00	17:00
14:00	21:00	23:00	22:00	21:00	1:00	16:00	21:00	21:00	21:00	21:00	1:00	3:00	23:00	21:00
19:00	23:00	21:00	16:00	23:00	20:00	21:00	0:00	0:00	19:00	3:00	2:00	1:00	17:00	0:00
13:00	16:00	16:00	14:00	13:00	2:00	23:00	20:00	17:00	17:00	23:00	3:00	2:00	20:00	23:00
20:00	20:00	20:00	23:00	20:00	19:00	20:00	23:00	20:00	1:00	20:00	20:00	4:00	13:00	13:00
12:00	0:00	0:00	21:00	19:00	3:00	13:00	16:00	13:00	20:00	4:00	4:00	20:00	16:00	14:00
21:00	13:00	13:00	20:00	18:00	18:00	14:00	13:00	14:00	13:00	14:00	5:00	5:00	15:00	20:00
11:00	14:00	14:00	12:00	16:00	14:00	15:00	15:00	16:00	12:00	5:00	14:00	15:00	14:00	16:00
10:00	12:00	12:00	0:00	17:00	15:00	12:00	1:00	1:00	14:00	13:00	19:00	16:00	12:00	1:00
9:00	15:00	1:00	15:00	15:00	16:00	11:00	12:00	12:00	16:00	19:00	13:00	18:00	11:00	12:00
22:00	1:00	15:00	1:00	14:00	17:00	10:00	14:00	3:00	11:00	15:00	15:00	19:00	0:00	15:00
8:00	2:00	2:00	2:00	12:00	13:00	0:00	2:00	11:00	15:00	16:00	6:00	6:00	3:00	2:00
7:00	11:00	11:00	11:00	3:00	4:00	3:00	3:00	2:00	3:00	17:00	18:00	17:00	1:00	11:00
0:00	3:00	3:00	3:00	11:00	5:00	1:00	11:00	15:00	2:00	18:00	16:00	14:00	10:00	3:00
1:00	10:00	10:00	10:00	4:00	6:00	2:00	10:00	10:00	10:00	6:00	17:00	13:00	4:00	10:00
2:00	4:00	4:00	4:00	5:00	12:00	4:00	9:00	4:00	4:00	7:00	7:00	7:00	2:00	4:00
3:00	9:00	5:00	9:00	7:00	7:00	9:00	4:00	5:00	9:00	11:00	8:00	12:00	5:00	5:00
4:00	5:00	9:00	5:00	6:00	8:00	5:00	5:00	9:00	5:00	12:00	12:00	8:00	9:00	9:00
5:00	8:00	7:00	6:00	10:00	11:00	8:00	6:00	8:00	8:00	10:00	9:00	9:00	7:00	6:00
6:00	6:00	6:00	7:00	8:00	10:00	7:00	7:00	6:00	7:00	8:00	11:00	10:00	6:00	7:00
23:00	7:00	8:00	8:00	9:00	9:00	6:00	8:00	7:00	6:00	9:00	10:00	11:00	8:00	8:00

APÊNDICE B – Dados mensais de consumo e demanda obtidos através da simulação do sistema de climatização sem termoacumulação.

Tabela B1 - Valores mensais de demanda e consumo para o supermercado localizado em Porto Alegre

Mês	CT [MWh]	DM [kW]	DP [kW]	DFP [kW]	CP [MWh]	CFP [MWh]
jan	40.638	113.865	110.294	113.865	7.636	33.002
fev	37.106	106.253	99.129	106.253	7.113	29.993
mar	38.434	100.169	95.659	100.169	7.058	31.376
abr	35.120	83.371	80.933	83.371	6.991	28.129
mai	34.321	70.209	69.584	70.209	6.402	27.919
jun	32.416	69.010	68.071	69.010	6.401	26.015
jul	32.500	68.210	67.611	68.210	6.320	26.180
ago	33.216	70.876	70.676	70.876	6.262	26.954
set	33.077	70.536	69.590	70.536	6.195	26.882
out	34.877	72.996	71.847	72.996	6.108	28.769
nov	35.057	83.250	79.025	83.250	6.049	29.008
dez	38.301	92.508	91.931	92.508	6.000	32.300

Tabela B2 - Valores mensais de demanda e consumo para o supermercado localizado em São Paulo

Mês	CT [MWh]	DM [kW]	DP [kW]	DFP [kW]	CP [MWh]	CFP [MWh]
jan	29.392	67.985	65.080	67.985	5.312	24.079
fev	26.466	65.363	64.706	65.363	4.806	21.659
mar	29.293	70.448	64.674	70.448	5.268	24.024
abr	27.798	63.193	60.464	63.193	4.997	22.802
mai	28.236	59.374	58.346	59.374	5.056	23.180
jun	27.486	60.848	58.866	60.848	4.929	22.557
jul	28.370	63.096	59.937	63.096	5.128	23.242
ago	28.657	62.197	60.690	62.197	5.167	23.490
set	28.761	70.792	68.024	70.792	5.246	23.515
out	29.451	67.960	67.340	67.960	5.364	24.088
nov	28.662	74.837	71.629	74.837	5.219	23.442
dez	29.679	73.187	68.871	73.187	5.388	24.291