

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE AR CONDICIONADO PARA UM SUPERMERCADO
COM A UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA ENERGYPLUS

por

Luciano Lejes Pereira

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Novembro de 2016.

**DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE AR CONDICIONADO PARA UM SUPERMERCADO
COM A UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA *ENERGYPLUS*.**

por

Luciano Lejes Pereira

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Energia e Fenômenos de Transporte**

Orientador: Prof. Luiz Alberto Oliveira Rocha

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Cirilo Seppi Bresolin

Prof.^a Dra. Letícia Jenisch Rodrigues

Prof.^a Dra. Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, 30 de Novembro de 2016.

Pereira, L.L. “ **Dimensionamento de um sistema de ar condicionado para um supermercado com a utilização do programa *EnergyPlus***”. 2016. 24 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

RESUMO

O objetivo do presente trabalho é o projeto de um sistema de climatização para um supermercado, localizado na cidade de Porto Alegre, Brasil, em concordância com a norma ABNT NBR 16401. Para atingir esse objetivo é utilizado o programa de simulação energética em edificações *EnergyPlus* que permite uma análise detalhada de todos os aspectos envolvidos, tais como: atribuições de cargas térmicas, propriedades construtivas e consumo de energia do sistema de ar condicionado. São comparados sistemas centrais com utilização de água gelada e *Splits* unitários. Para o caso analisado a opção utilizando de unidades *Split* mostra-se a mais adequada devido ao menor custo de aquisição e ao menor consumo de energia em operação.

PALAVRAS-CHAVE: Ar condicionado, Supermercado, *EnergyPlus*.

Pereira, L.L. “ **Design of an air-conditioning system applied to a supermarket using the *EnergyPlus* software**”. 2016. 24 pages. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

ABSTRACT

The objective of the present work is the design of an air conditioning system for a typical supermarket, located in Porto Alegre, Brazil, according to the ABNT NBR 16401 standardization. For this purpose, *EnergyPlus*, an energy simulation program in buildings, is used, allowing a detailed analysis of all involved aspects such as thermal load assignments, constructive constructions and energy consumption of the air conditioning system. Chilled water systems and *Splits* units is compared. For the case analyzed the option using the system with *Split* units proved to be the most adequate due to the lower cost of acquisition and the lower energy consumption in operation.

KEYWORDS: Air Conditioning, Supermarket, *EnergyPlus*.

Índice

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	1
3.1 O programa EnergyPlus.....	1
3.2 As zonas térmicas.....	1
3.3 Sketchup e o Legacy Openstudio Plugin.....	2
3.4 O arquivos de dados climáticos (Weather File).....	2
3.5 Sistemas de ar condicionado.....	3
3.5.1 Sistema Split	3
3.5.2 Central de água gelada (CAG).....	3
4. METODOLOGIA.....	3
4.1 Idealização do modelo geométrico.....	3
4.2 As zonas térmicas.....	3
4.3 Construções.....	4
4.4 Cargas Térmicas Internas.....	4
4.5 Pessoas.....	4
4.6 Iluminação.....	5
4.7 Equipamentos Elétricos.....	5
4.8 Perda de Carga térmica devida ao Sistema de Refrigeração (frio alimentar).....	6
4.8.1 Expositores de resfriados e congelados.....	6
4.8.2 Câmara frigorífica.....	7
4.9 Ar de renovação e infiltrações.....	8
4.10 Dimensionamento da CAG	8
4.10.1 Queda de pressão na rede hidrônica.....	9
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	10
5.1 Cargas Térmicas Externas.....	10
5.2 Carga térmica total.....	11
5.3 Comparação com capacidades instaladas em supermercados observados.....	11
5.4 Sistema com utilização de Splits.....	12
5.5 Sistema com utilização de CAG.....	12
5.6 Vantagens e desvantagens.....	13
5.7 Consumo de energia elétrica.....	14
6. CONCLUSÕES.....	14
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	15
ANEXO A – Planta baixa da edificação.....	16
ANEXO B – Propriedades dos vidros.....	17
ANEXO C – Modelos de Splits utilizados.....	18
APÊNDICE A – Dimensionamento da rede hidrônica (CAG).....	19

1. INTRODUÇÃO

O dimensionamento de um sistema de ar condicionado para um supermercado é um grande desafio de engenharia que visa possibilitar o conforto térmico e qualidade do ar aos clientes e colaboradores respeitando normas técnicas exigentes. Muitos são os desafios num projeto desse tipo, tais como, determinação da carga térmica de maneira precisa, integração entre os sistemas de conforto e frio alimentar e a determinação de um sistema que seja energeticamente eficiente e durável. A forte concorrência entre as redes exige que as lojas sejam cada vez mais atrativas e a climatização é um dos fatores mais determinantes nesse quesito. Por outro lado, em tempos de energia cara e crise econômica que passa o País, a necessidade da redução no consumo de energia elétrica é um fator que preocupa a muitos empresários do ramo. Fatores como custo inicial de instalação, de operação, de manutenção e tempo de vida do sistema devem ser analisados de maneira a apresentar a melhor relação frente às necessidades e disponibilidades. Pedrotti, 2015, realizou simulação termo-energética em um supermercado existente e chegou a conclusões quanto à distribuição da energia consumida. Ramos, 2014 propôs a utilização de CO₂ como fluido refrigerante para integração da refrigeração e climatização de um supermercado. Padilha, 2010, sugeriu a troca do sistema de água gelada por unidades *Splits* no Salão de atos da UFRGS visando maior eficiência. Dombrosky, 2012, valeu-se da termoacumulação para eficientização do sistema utilizado no aeroporto. Todos trabalhos citados utilizaram o programa *EnergyPlus* em suas avaliações e serviram como revisão bibliográfica para esse trabalho de conclusão de curso.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho teve como objetivo o projeto de um sistema de ar condicionado para um supermercado típico, ainda em fase de construção, localizado em Porto Alegre. Especificamente, objetivou-se a comparação de dois sistemas disponíveis na faixa de potência requerida para climatização da edificação. Para isso foi necessário o desenho em perspectiva 3D da edificação, a inserção de suas características construtivas e atribuição de cargas térmicas. Foi utilizado o programa *EnergyPlus* para a simulação e os sistemas com utilização de *Splits* e CAG (central de água gelada) foram comparados em busca de suas vantagens e desvantagens.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 O programa *EnergyPlus*

O *EnergyPlus*, 2015, é um programa de simulação higratérmica e energética que permite estimar trocas térmicas, ganhos solares, temperaturas e umidades relativas nos compartimentos, nas superfícies dos elementos construtivos e O consumo de energia. Ele é capaz de simular energeticamente uma edificação, integrando os mais diversos sistemas tais como elétricos, térmicos, solares, etc. Também permite a tomada de decisões em relação ao projeto uma vez que admite a modificação dos dados de entrada e os efeitos que estes poderão trazer à análise final. Esse programa permite igualmente dimensionar sistemas de ar condicionado, sendo produzido e distribuído gratuitamente pelo Departamento de Energia do EUA.

3.2 As zonas térmicas

Segundo ABNT, 2008, uma zona térmica é definida como um grupo de ambientes sob o mesmo regime de utilização e mesmo perfil de carga térmica, permitindo que as condições requeridas possam ser mantidas com um único dispositivo de controle ou atendidas por um único equipamento condicionador destinado somente aquele ambiente. A Figura 3.1 representa uma zona térmica do ponto de vista do *EnergyPlus*, 2015.

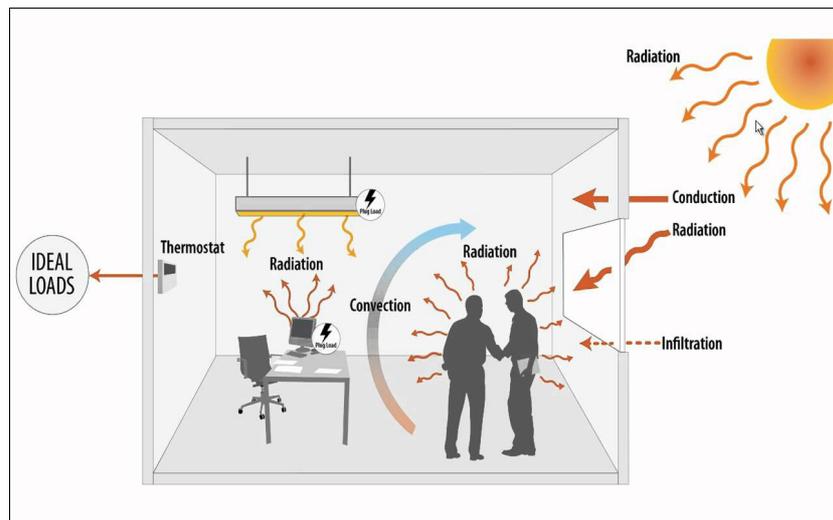


Figura 3.1: Definição de uma Zona Térmica, *EnergyPlus*, 2015.

3.3 Sketchup e o Legacy Openstudio Plugin

O *Sketchup* é um programa de desenho tridimensional que permite desenhar edificações com facilidade e de maneira intuitiva. Não é rigoroso como programas de CAD, mas permite uma boa representação da geometria analisada, conforme o desenvolvedor Trimble Inc, 2016. Para determinação das zonas térmicas fez-se uso de um *plugin*, que é desenvolvido pela NREL (*National Renewable Energy Laboratory*), 2016, mesma agência de energia norte americana que produz o *EnergyPlus*. O *Legacy OpenStudio plugin* permite criar zonas térmicas, sombreamentos, mapas de iluminação, etc. Ele também possibilita a atribuição das cargas térmicas e análise energética. A Partir do plugin, em conjunto com o *Sketchup*, é possível então a criação de um arquivo *.idf* (*input data file*) onde são inseridos os parâmetros de entrada do *EnergyPlus*.

3.4 O arquivos de dados climáticos (*Weather File*)

Os dados climáticos são um dos parâmetros mais importantes na simulação térmica dos edifícios, principalmente quando o objetivo é o estudo do comportamento em condições de aquecimento e/ou arrefecimento e respectivo dimensionamento de sistemas de climatização. O arquivo de dados climáticos traz uma coleção de informações estatisticamente organizadas de forma a simular um ano típico considerando as variáveis de interesse. Segundo LabEEE, 2005, os arquivos climáticos TRY (*Test Reference Year*) representam um ano de dados médios para um local específico, sem extremos de temperatura. O arquivo TRY abrange as variáveis de temperatura de bulbo seco, temperatura de orvalho, umidade relativa do ar, direção e velocidade dos ventos, nebulosidade, pressão barométrica e radiação solar. A Figura 3.2 apresenta a temperatura de bulbo seco anual de Porto Alegre/RS.

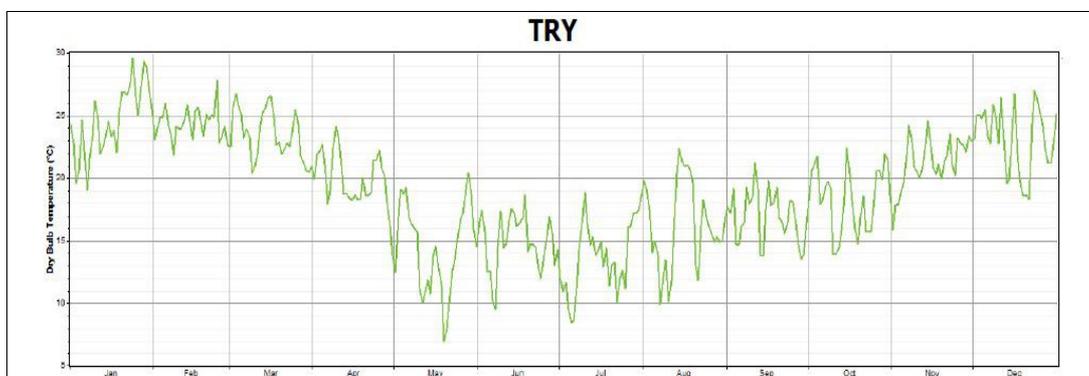


Figura 3.2 : Temperatura de bulbo seco anual de Porto Alegre/RS, LabEEE, 2005.

3.5 Sistemas de ar condicionado

Segundo ABNT, 2008, o condicionamento de ar é o processo que objetiva controlar simultaneamente a temperatura, a umidade, a movimentação, a renovação e a qualidade do ar de um ambiente em relação aos ambientes vizinhos. Em algumas situações, ainda a pressão é objeto de controle.

3.5.1 Sistema *Split*

Conforme ABNT, 2008, o condicionador de ar do tipo do tipo *Split* de grande capacidade é uma unidade com capacidade nominal geralmente maior que 17kW (5TR). Muitas vezes, é chamado de "Splitão" em catálogos comerciais. Trata-se de uma unidade de tratamento de ar com serpentinas de resfriamento de expansão direta (em contato com o ar a ser tratado) sendo ligada a uma unidade condensadora, através de tubulações de cobre que podem ser instaladas à distância. O condicionador é previsto para insuflação de ar por dutos.

3.5.2 Central de água gelada (CAG)

É definido como central de água gelada o sistema onde uma ou mais unidades de tratamento de ar são abastecidas por água gelada em temperatura previamente definida em projeto. A água gelada é produzida em unidades, chamadas *chillers*, que funcionam pela conversão de energia mecânica em frigorígena e obedecem ao ciclo de compressão do vapor, conforme ABNT, 2008. O circuito fechado de água é movido por bombas hidráulicas. O calor extraído no processo é dissipado através de arrefecimento à água ou ar, dependendo do modelo utilizado. O sistema é definido como de expansão indireta, pois a evaporação do gás refrigerante acontece em contato com a água e não com o ar ambiente.

4. METODOLOGIA

O procedimento necessário para a realização do projeto é descrito a seguir.

4.1 Idealização do modelo geométrico

A idealização do modelo virtual da edificação em questão foi realizada no programa *Sketchup* em conjunto com o *Legacy Openstudio plugin*.



Figura 4.1 : Modelo virtual da edificação em estudo.

4.2 As zonas térmicas

Definiu-se, então, seis regiões distintas, que são apresentadas na Tabela 4.1. Cada zona com utilização e características térmicas distintas. Ao lado do supermercado, em construção, está representado um estacionamento de dois andares. Como este é uma construção aberta, é tratada apenas como sombreamento externo.

Tabela 4.1: Zonas térmicas

zona térmica	condição
loja	climatizada artificialmente
banheiro loja	climatizada artificialmente
escritório	ventilação forçada
depósito	ventilação forçada
vestiário	ventilação forçada
cozinha	ventilação forçada

Uma superfície pode ter como condição de contorno o meio externo, uma outra zona térmica, o solo, ou mesmo, pode ser definida como adiabática. Para resolver esse problema, utilizou-se o comando chamado *Surface Matching*, que define as condições de contorno de cada fronteira das zonas térmicas de forma automática. Com a aplicação do comando, os limites de cada zona ficaram bem definidos, inclusive mencionando se estavam exposto ao sol e ao vento.

4.3 Construções

A partir de informações obtidas das construções, foram usadas as propriedades térmicas e físicas dos arquivos de dados do *EnergyPlus*, que é baseado na publicação da ASHRAE, 2009. Esse arquivo traz informações que podem ser utilizadas com muita facilidade, dos mais diversos materiais utilizados em construções. O programa também permite construir camadas a partir dos materiais utilizados e, o coeficiente global de transferência de calor U , é calculado de forma automática pelo programa. As propriedades necessárias para a definição dos materiais foram, além da rugosidade, a espessura (L), a condutividade térmica (k), a massa específica (ρ) e o calor específico (c_p). A Tabela 4.2 informa os materiais usados.

Tabela 4.2: Construções

construções	material	rugosidade	espessura (m)	condutividade (W/m.k)	densidade (kg/m ³)	cp (J/kg.k)	fator-u (W/m ² .K)
paredes	reboco	médio	0,025	0,72	1856	840	1,48
	bloco de concreto	rugoso	0,200	0,33	1380	880	
	reboco	médio	0,025	0,72	1856	840	
pisos externos	tijolo	rugoso	0,20	0,89	1920	790	1,94
	concreto pesado	rugoso	0,20	1,95	2240	900	
	concreto leve	rugoso	0,10	0,53	1280	840	
telha térmica	aço galvanizado	suave	0,0008	45,28	7824	500	0,4
	poliuretano	suave	0,1000	0,04	8,6	1500	
	aço galvanizado	suave	0,0008	45,28	7824	500	
janelas	vidro	liso	0,01	0,9	2500	720	5,6

O programa *EnergyPlus* traz dados para dezenas de vidros em seus arquivos e, para esse trabalho, assumiu-se o modelo chamado de CLEAR 12 mm, suas propriedades quanto à radiação térmica são atribuídas automaticamente. O Anexo B informa todas as propriedades físicas do vidro utilizadas na simulação.

4.4 Cargas térmicas internas

As cargas internas, consideradas para o projeto foram: Pessoas, iluminação, equipamentos elétricos e sistema de frio alimentar. Os resultados foram calculados em função da máxima dissipação de energia e as potências foram estimadas pelo manual dos equipamentos ou então por tabelas definidas na norma ABNT, 2008.

4.5 Pessoas

O calor liberado pelas pessoas é na forma sensível e latente e depende do nível de atividade realizada. Para cada zona térmica, adotou-se um ganho de calor conforme a atividade

tipicamente realizada no ambiente considerado. A ocupação de um supermercado não é constante, varia conforme a hora do dia, tendo seus picos de público entre 11h e 13h e, ainda, entre 17h e 20h. Para aplicação da variação de densidade populacional, dentro dos ambientes, foram definidos *schedules* no *EnergyPlus*, que são cronogramas atribuindo valores de zero a um, em função da ocupação, dentro das 24 horas de um dia. Os valores máximos são apresentados na Tabela 4.3:

Tabela 4.3: Ocupações

zona	área (m ²)	ocupação (m ² /100 pessoas)	número máximo (pessoas)	calor total /pessoa (W)	calor latente /pessoa (W)	calor sensível /pessoa (W)	calor total dissipado (W)
loja	2092	12	251	145	75	70	36416
banheiro loja	40	10	4	100	65	35	400
escritório	70	15	10	130	75	55	1300
depósito	998	1	10	425	170	255	4242
vestiário	84	25	21	220	80	140	4620
cozinha	44	14	2	220	80	140	1383

Uma ferramenta utilizada para a determinação da ocupação em um supermercado foi a consulta no *Google Maps*. Nesse *site*, é possível visualizar a localização de qualquer supermercado, ele informa automaticamente os horários de picos de público, baseado em informações enviadas por seus clientes, em *smartphones*, quando em visita, o chamado *check-in*, frequentemente usado em redes sociais. A distribuição típica, encontrada para um dia de movimento, é mostrada na Figura 4.2. Esse padrão repete-se em praticamente toda semana, para vários supermercados pesquisados, variando somente a intensidade, que é maior aos sábados.



Figura 4.2 : Ocupação típica de um supermercado em Porto Alegre/RS

4.6 Iluminação

Para determinação da carga de iluminação, foram utilizados os valores contidos na norma ABNT, 2008, conforme a zona iluminada. A Tabela 4.4, apresenta as especificações utilizadas, assim como, as potências máximas. Observa-se que a carga devido à potência de iluminação exerce forte influência na zona térmica, devido aos seus altos valores.

Tabela 4.4: Iluminação

zona	área (m ²)	potência/área (W)	potência (W)
loja	2092	21	43932
banheiro loja	40	5	200
escritório	70	16	1120
depósito	998	5	4990
vestiário	84	5	420
cozinha	44	3	132

4.7 Equipamentos elétricos

Para a determinação dos equipamentos elétricos, de uso contínuo, que exercem forte influência sobre a carga térmica em um supermercado, foram feitas observações em lojas de mesmo porte e, os principais aparelhos foram relacionados na Tabela 4.5. Alguns *freezers* foram observados e não faziam parte do sistemas de refrigeração, dissipando assim, toda sua energia na zona térmica.

Tabela 4.5: Equipamentos elétricos

equipamento	quantidade	potência nominal (W)	potência total (W)
computadores	10	100	1000
expositores quente	3	300	900
freezers bebidas geladas	2	750	1500
freezers sorvetes	2	750	1500

4.8 Perda de Carga térmica devida ao Sistema de Refrigeração (frio alimentar)

O sistema de refrigeração influencia diretamente o sistema de climatização do supermercado, pois ali estarão instalados câmaras frigoríficas e expositores, tanto para congelados quanto para resfriados. Num supermercado temos basicamente três zonas de temperaturas: baixa, média e alta que referem-se aos sistemas de congelados, resfriados e conforto, respectivamente.

As cargas térmicas são retiradas do ambiente climatizado pelo sistema de frio alimentar devido à infiltração, radiação e transmissão e, assim, acabam por ajudar o trabalho realizado pelos evaporadores dos climatizadores. O programa *EnergyPlus* permite inserir essa perda, com o objeto *OtherEquipment*, do grupo *Internal Loads*, que permite a inserção de potências negativas, ou seja, sumidouros de calor na zona térmica, divididas entre parcela sensível e latente.

4.8.1 Expositores de resfriados e congelados

Os expositores são considerados um grande desafio para a climatização de supermercados, pois são responsáveis pelos corredores frios, regiões de baixo conforto térmico, grande infiltração e de baixa eficiência energética. Muitas são as configurações possíveis. A Figura 4.3 exemplifica os mais comuns, que são utilizados. Cada qual tem suas características específicas quanto as perdas e ineficiência térmica. Porém o modelo aberto vertical multiprateleira apresenta maior carga de infiltração, aproximadamente 80% de sua capacidade, mesmo com a utilização de cortinas de ar. As ilhas de congelados representam perdas de 24% para infiltração, 43% de radiação e 18% de transmissão, avaliados perante sua potência, segundo estudo realizado por Baxter, 2004.

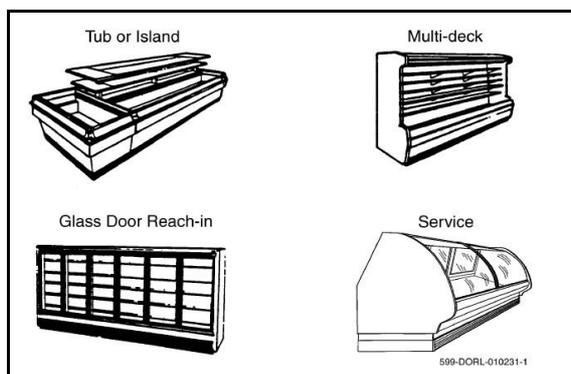


Figura 4.3 : Modelos de expositores mais comuns em supermercados, Baxter, 2004.

O efeito do frio alimentar, sobre o sistema de conforto térmico, foi estimado com a inserção de um modelo de expositor para resfriados e outro para congelados. As especificações, quanto a potência de ambos, foram retiradas do catálogo comercial de Jabur Industria de Refrigeração, 2016, e o comprimento dos expositores foram definidos pelo autor, a partir de visitas em supermercados de mesmo porte, localizados em Porto Alegre/RS. Esse comprimento está diretamente relacionado com o volume de vendas de produtos e, assume-se, que sejam compatíveis entre lojas de mesmo tamanho, conforme Tabela 4.6.

Tabela 4.6 : Expositores de resfriados e congelados

	expositores de resfriados	expositores de congelados
potência/metro	1200 W/m	375 W/m
comprimento	2 m	1,3 m
quantidade	4 unidades	6 unidades
potência total	9600 W	2925 W
potência de infiltração	7680 W	2486 W
temperatura de entrada	25 °C	25 °C
conteúdo de umidade de entrada	10 g/kg	10 g/kg
temperatura de saída	4 °C	-15 °C
conteúdo de umidade de saída	4 g/kg	1 g/kg

A partir desses dados e com a utilização da carta psicrométrica é possível calcular a vazão mássica e a determinação da parcela sensível e latente com as equações abaixo.

$$m = \frac{W}{\Delta h} \quad (4.1)$$

$$Q_s = m \cdot cp \cdot \Delta T \quad (4.2)$$

$$Q_L = W - Q_s \quad (4.3)$$

em que, m é a vazão mássica, em (kg/s), W é a potência em (kW), Q_s e Q_L são as taxas de calor sensível e latente, respectivamente, em (kW), cp é o calor específico do ar, em (kJ/kg.°C), ΔT é a variação de temperatura, em (°C) e Δh , é a variação de entalpia específica, em (kJ/kg). A perda térmica para o frio alimentar é de 10,17kW, sendo 35,8% a fração latente conforme a Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Carga térmica devido ao sistema de frio alimentar

	sensível (W)	latente (W)	total (W)
resfriados	4410	3450	7860
congelados	1570	916	2486
total	5980	4366	10346

4.8.2 Câmara frigorífica

Em supermercados, são necessárias câmaras que atendam às diversas faixas de temperaturas (resfriados, congelados, frutas, etc). As câmaras frias normalmente são instaladas em ambientes externos ao salão de vendas e possuem bom isolamento térmico. Além disso, a abertura das portas acontece de maneira muito restrita. O dimensionamento de uma câmara fria de tamanho compatível com o supermercado em questão apresentou influência desprezível, quando inserida na simulação da zona térmica depósito, menor que 0,01% frente ao somatório das demais cargas, sendo então, desconsiderada do presente estudo.

4.9 Ar de renovação e infiltrações

A infiltração é o fluxo de ar não intencional, do ambiente exterior, diretamente para uma zona térmica. Geralmente é causada pela abertura e fechamento de portas exteriores, rachaduras em torno das janelas e, até mesmo, em quantidades muito pequenas, por meio de elementos da construção. O ar externo representa a entrada de calor sensível e latente na zona climatizada. Segundo a ABNT, 2008, é necessário uma vazão mínima de ar exterior com qualidade aceitável para ser suprida pelo sistema para promover a renovação do interior e manter os poluentes do ar em níveis aceitáveis. As vazões estipuladas foram dimensionadas considerando os agentes químicos, físicos e biológicos esperados num ambiente em condições normais de utilização.

O sistema de ar condicionado modelado no *EnergyPlus* prevê essa necessidade de renovação de ar em função do número de pessoas que ocupam o ambiente ao longo de todo dia conforme cronograma de ocupação. Os valores necessários são apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8: Ar de renovação

zona	área (m ²)	número máximo (pessoas)	vazão máxima (m ³ /s)
loja	2092	251	2,48
banheiro loja	40	4	0,04
escritório	70	10	0,09
depósito	998	10	0,56
vestiário	84	21	0,16
cozinha	44	2	0,06
total	3328	302	3,39

Outro fator importante no dimensionamento de sistemas de lojas, diz respeito à porta principal do estabelecimento. A diferença de massa específica entre ar interior e exterior, tanto em dias frios, quanto em dias quentes, promoverá uma troca de ar entre os ambientes, chamado efeito Stack. Isso depende do quanto a porta será aberta, ou seja, a efetividade de abertura, como é chamado no manual do *EnergyPlus*.

Para considerar esse aspecto, foi utilizado o objeto *ZoneVentilation: Wind and Stack Open Area* que, além de considerar o efeito Stack, ainda considera o efeito *Wind*, devido à diferença de pressão provocada pelo vento, que é informada no arquivo climático e depende de orientação geográfica. O cronograma de abertura da porta principal depende fortemente do fluxo de pessoas na loja. A efetividade de abertura é definida como a razão entre o tempo aberto, dentro do intervalo de tempo medido, e o tempo total, no caso horas/hora. Temos o valor de um, se a porta se mantiver o tempo todo aberta e; o valor de zero, quando estiver completamente fechada.

4.10 Dimensionamento da CAG

Para a central de água gelada (CAG), foi utilizado um sistema de circuito único com fluxo variável. O sistema deverá utilizar controladores digitais de maneira a proporcionar variação na vazão de água gelada no evaporador em função da carga térmica e dentro de certas limitações indicadas pelos fabricantes. Essa configuração é considerada por Albert, 2015, como sendo de última geração em projetos de centrais térmicas de água gelada, pois proporciona maior eficiência energética devido à redução na potência de bombeamento frente aos circuitos de vazão constante. Esse sistema resultou em menores consumos de energia na simulação do *EnergyPlus* em comparação com outros circuitos de água gelada, confirmando as expectativas de maior eficiência.

4.10.1 Queda de pressão na rede hidráulica

O layout da rede hidráulica foi elaborado, considerando a hipótese de que o sistema possa ser montado em um mesmo plano eliminando desníveis. A queda de pressão foi calculada até o *fancoil* de maior distância do módulo resfriador, no caso, FC2, conforme a Figura 4.6. O sistema possui retorno inverso visando o balanceamento da rede.

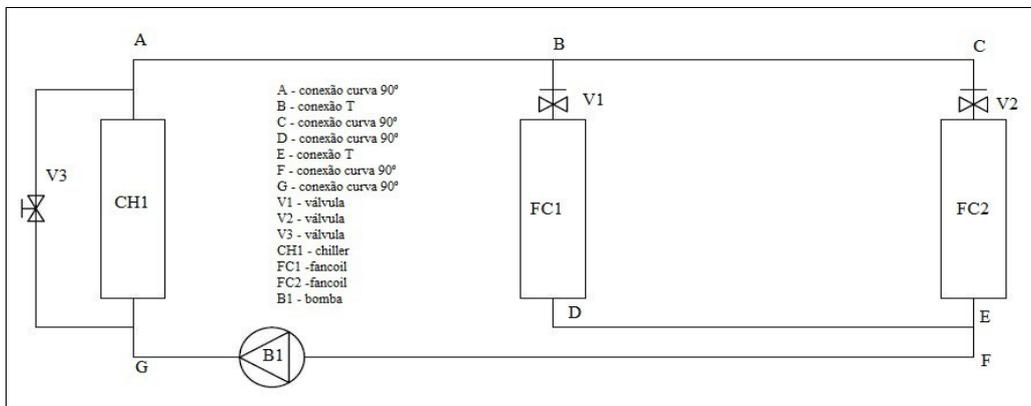


Figura 4.6: Rede hidráulica

A partir das vazões de água informadas no *EnergyPlus* e seguindo o procedimento de ASHRAE, 2009, que recomenda manter a queda de pressão em tubulações de água dentro do intervalo entre 100 e 400 pa/m, foi possível a determinação do diâmetro comercial e velocidade do escoamento em cada trecho da tubulação de aço utilizando a Figura 4.7.

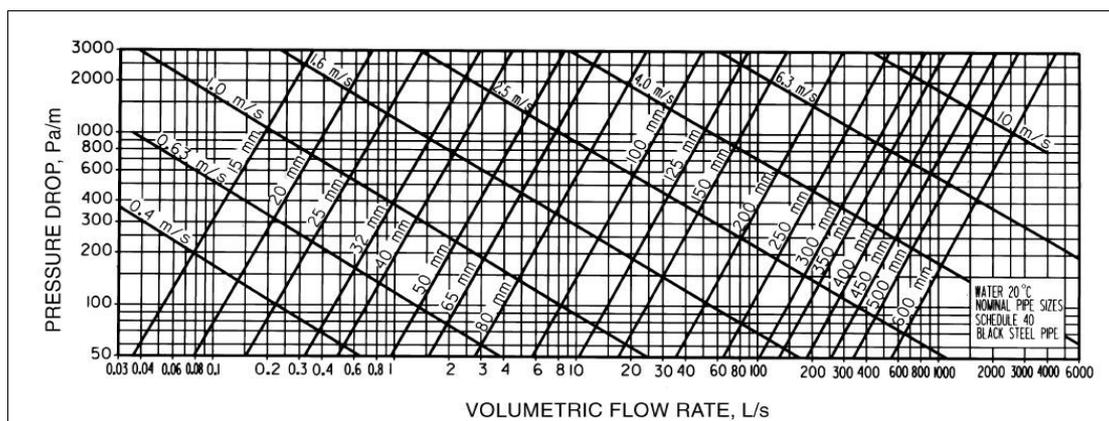


Figura 4.7: Perda de carga da água em tubos de aço comercial, ASHRAE, 2009.

Para o cálculo da perda de carga, devido ao atrito, em escoamento completamente desenvolvido em tubos circulares, foi necessário, primeiramente, a determinação do número de Reynolds, conforme equação 4.4.

$$Re_D = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} \quad (4.4)$$

em que, ρ é a massa específica da água (kg/m^3), V é a velocidade do escoamento (m/s), D é o diâmetro da tubulação (m) e μ é a viscosidade dinâmica ($\text{Pa}\cdot\text{s}$). O fator de atrito f foi determinado pelo diagrama de Moody em função do número de Reynolds e da rugosidade do aço comercial, tomado como $\epsilon=0,046\text{mm}$. A partir desses dados, foi possível o cálculo da perda de carga em cada trecho da tubulação com a Equação de Darcy-Weisbach (4.5), que depende também do comprimento L , dado em metros.

$$\Delta p = f \cdot \left(\frac{L}{D}\right) \cdot \left(\frac{\rho \cdot V^2}{2}\right) \quad (4.5)$$

A perda de carga em válvulas e conexões foi calculada com a equação 4.6 e, a partir da determinação do coeficiente K , que depende da geometria e da forma de fixação, conforme tabelas de ASHRAE, 2009. Esse coeficiente exprime a perda de carga provocada pelos acessórios da tubulação (cotovelos, derivações, válvulas abertas, etc.) em comprimentos equivalentes de tubo reto, que causariam a mesma perda de carga.

$$\Delta p = K \cdot \left(\frac{\rho \cdot V^2}{2}\right) \quad (4.6)$$

A seleção dos Fancoils e suas respectivas perdas de carga, foi determinada a partir do procedimento indicado no catálogo comercial da Termodin, 2014, que depende de muitos fatores, tais, como vazão de ar necessária, carga térmica sensível e latente entre outros. Assim como a perda de carga através do módulo resfriador, que foi retirado do catálogo do fabricante Carrier, 2012, conforme indicado na Figura B.5, do Apêndice B, e depende do modelo do equipamento e da vazão de água necessária.

O resultado da perda de carga total do sistema hidrônico foi inserido no *EnergyPlus*, sendo necessário para o dimensionamento automático da bomba de vazão variável. Os resultados são apresentados na Tabela 4.9 e o resultado dos cálculos realizados constam no Apêndice B.

Tabela 4.9: Queda de pressão ao longo da tubulação de água

perda de carga	Δp (pa)
perdas menores (válvulas e conexões)	4265
perdas maiores (atrito nas tubulações)	12218
perda na serpentina (<i>fancoil</i>)	22360
perda no módulo de resfriamento (<i>chiller</i>)	28000
total	66842

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Cargas térmicas externas

O calor externo é aquele que atravessa as fronteiras do ambiente na forma de calor sensível ou latente, podendo ocorrer em superfícies opacas externas, superfícies translúcidas externas, ar de renovação e superfícies internas.

Um fator importante é a armazenamento de calor na edificação. Esse fenômeno faz com que o pico de ganho não coincida com o máximo de carga térmica e nem com a máxima temperatura do dia na zona térmica. Fatores como sombreamentos externos devido aos prédios vizinhos ou vegetação são muito importantes, porém, utilizou-se o posicionamento da edificação em campo aberto e, com orientação norte local, formando 110° com o norte geográfico pois nas simulações realizadas, esse ângulo resultou na maior carga térmica na zona principal, para o dia de projeto de verão.

A Figura 5.1 compara a temperatura exterior com a temperatura interna, da zona, no qual deseja-se dimensionar o sistema de climatização, para o dia de projeto de verão. Observa-se o pico de temperatura em horário próximo às 18h. Sendo esse um ponto crítico, pois além de representar a maior carga térmica em um dia de projeto de verão, ainda representa o horário de maior custo de energia, cobrado pela distribuidora, conforme Eletrobras, 2011.

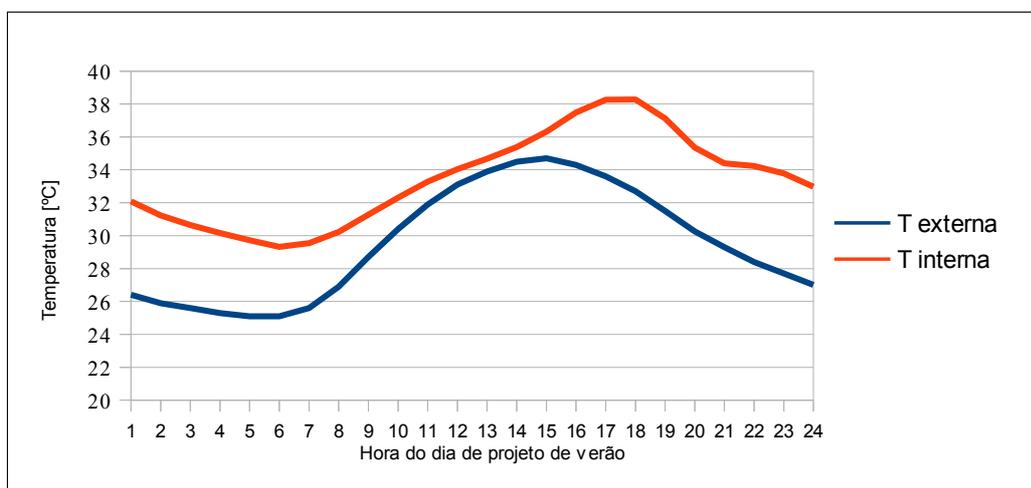


Figura 5.1 : Comparação entre temperatura interna e externa no dia de projeto de verão

5.2 Carga térmica total

Como uma estimativa inicial, foi necessário a utilização de um recurso do *EnergyPlus*, chamado *Ideal Loads*, que fornece um sistema ideal de ar condicionado. Esse recurso é usado para simples determinação da carga térmica, somando internas e externas, sem considerar perdas inevitáveis em simulação de sistemas reais, onde também são atribuídos cargas e consumo de energia devido ao bombeamento de fluidos e ventiladores. Os resultados obtidos, nessa primeira aproximação, foram 275,80 kW (80 TR) de potência de arrefecimento, 110,20 kW para aquecimento e vazão de 12,65 m³/s de vazão de ar, sendo 2,4 m³/s de ar exterior. A partir dos resultados obtidos e a consulta aos catálogos comerciais de fabricantes de sistemas, verifica-se que existiam soluções tanto com utilização de *Splits* quanto com central de água gelada.

5.3 Comparação com capacidades instaladas em supermercados observados

Com o objetivo de verificar a coerência do resultado estimado para capacidade do sistema, foram coletadas informações sobre a capacidade instalada em 27 supermercados distribuídos na região Sul do Brasil. Os valores foram obtidos de portfólios de empresas de climatização que informam essas capacidades e trabalhos acadêmicos, que tratavam do tema climatização em supermercados. Esses valores foram relacionados com a área total das lojas (áreas climatizadas e não climatizadas), pois essa informação pode ser obtida no *Google Maps* com a ferramenta de medição de área. Devido a mesma natureza da atividade realizada, assume-se que a distribuição de espaços de loja climatizada e depósitos pudessem seguir uma mesma tendência e que existisse uma boa relação entre capacidade e área total. Os resultados são apresentados na figura 5.2 e a linha de tendência foi gerada informando R²=63%, ou seja, esse percentual representa o quanto a relação pode ser representada pela relação linear apresentada.

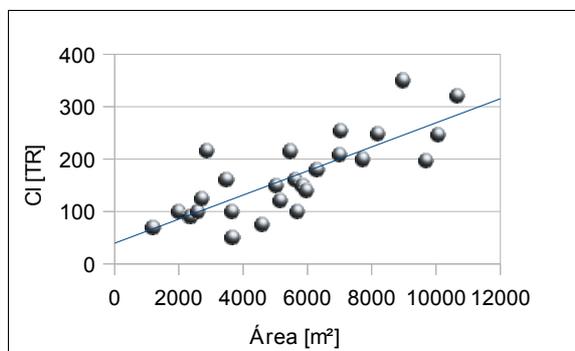


Figura 5.2 : Capacidades instaladas em função da área total

A partir da linha de tendência acima e, considerando que a área da edificação em questão possui 3328 m², o valor da capacidade necessária foi de 106 TR (372 kW). Foi aplicado o critério de Chauvenet, para eliminar dois valores que visivelmente estavam longe da tendência observada. Sendo que *CI* é dada em TR e a área *A*, em m².

$$CI = 0,02 \cdot A + 39,29$$

Outra análise pôde ser realizada à partir da média μ , das capacidades instaladas em função da área total e o respectivo desvio padrão σ , ambos em (m²/TR). Para a edificação em análise, esse valor seria de 41,6 m²/TR que, dentro dessa análise, seria considerado um valor dentro da normalidade. Temos que:

$$\mu \pm \sigma = 33,5 \pm 10,3 \text{ (m}^2\text{/TR)}$$

5.4 Sistema com utilização de *Splits*

Para o dimensionamento do sistema utilizando equipamentos unitários do tipo *Split* o *EnergyPlus* retornou os valores de 306,85 kW (87,25 TR). O sistema ainda necessita ter capacidade de 12,36 m³/s de insuflação sendo 2,4m³/s de ar exterior. Esses resultados são globais para a zona. Apesar de serem considerados equipamentos de grande capacidade os *Splits* restringem-se a faixa de 5 até 50 TR conforme informação de Hitachi, 2014. Logo é necessário a utilização de dois equipamentos completos (2 x 45 TR) sendo que cada equipamento é composto por módulo trocador, módulo ventilador e módulo condensador. Os equipamentos descritos no Anexo C, fabricados pela Hitachi, atenderam as necessidades de projeto.

5.5 Sistema com utilização de CAG

A simulação no *EnergyPlus* indicou a necessidade de um chiller de 346,90 kW (99,1 TR) com vazão de ar de 11,30 m³/s, sendo desses 2,4 m³/s, tomados exteriormente. O dimensionamento dos principais componentes necessários para a CAG foram informados pelo *EnergyPlus*, sendo apresentados nas Figuras 5.3 e 5.4, que representam os circuitos de água e ar, respectivamente. O resfriamento a água do chiller foi preferido em comparação ao resfriamento a ar, pois o manual técnico da Carrier, 2012, indicou coeficientes de performance (COP) mais elevados para essa configuração, resultando em uma maior eficiência energética. Por outro lado, o custo de aquisição deverá ser maior, em função da utilização de mais equipamentos. A simulação do *EnergyPlus* confirmou o menor consumo, quando comparados o resfriamento com ar (menor COP) com o resfriamento a água (maior COP).

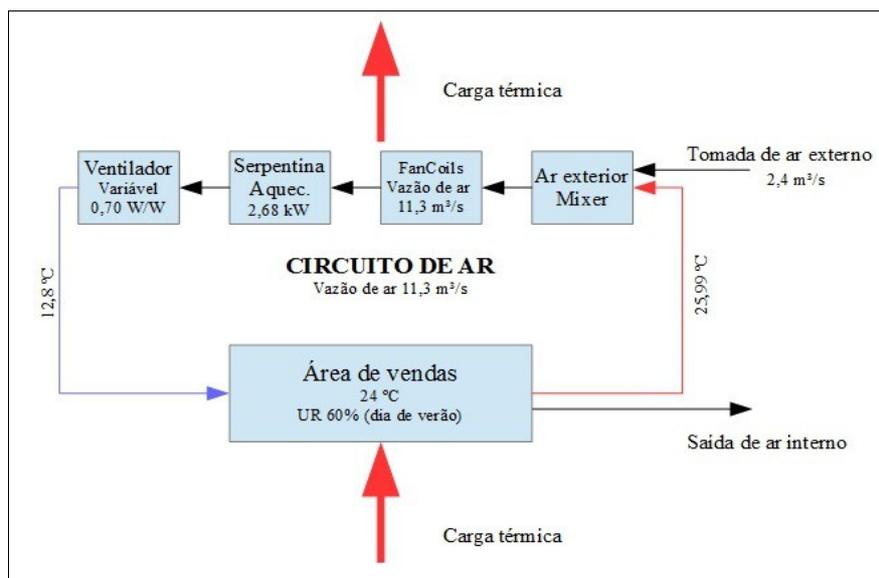


Figura 5.3 : Circuito de ar

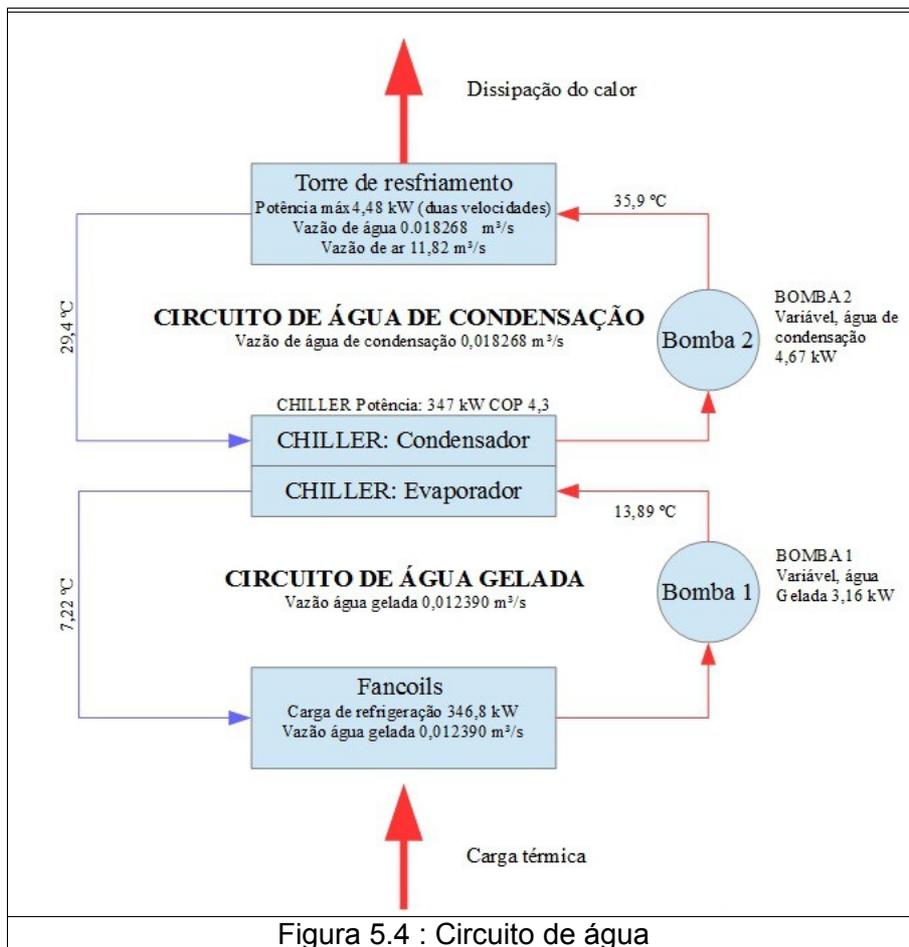


Figura 5.4 : Circuito de água

5.6 Vantagens e desvantagens

Muitos são os fatores a serem considerados na escolha do sistema climatizador. Fatores como, capacidades requeridas, espaço disponível, custos de aquisição, instalação, operação, manutenção, ruídos e vibrações devem ser considerados junto ao empresário da edificação de maneira a escolher a melhor opção possível para cada caso. As Tabela 5.1 e 5.2 trazem as principais vantagens e desvantagens dos sistemas propostos para esse trabalho:

Tabela 5.1: Vantagens dos sistemas considerados.

Sistema Centralizado (CAG)	Sistema Descentralizado (Split)
<p>Vantagens:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Equipamentos maiores, porém em menor quantidade; • Facilidade de acesso ao sistema; • Manutenção facilitada; • Possibilidade de termo acumulação; • Controle mais efetivo dos parâmetros de conforto térmico; • Efeitos do ruído e vibrações são amenizados de forma mais eficiente; • Maior ciclo de vida; 	<p>Vantagens:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Menor custo inicial; • Simples instalação; • Boa eficiência energética; • Menor espaço para instalação; • Fácil operação do sistema; • Fabricante único para todo equipamento; • Em caso de falha o sistema continua funcionando parcialmente;

Tabela 5.2: Desvantagens dos sistemas considerados.

Sistema Centralizado (CAG)	Sistema Descentralizado (<i>Split</i>)
<p>Desvantagens:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Maior custo inicial; • Menor eficiência energética; • Exige operadores especializados; • Grande rede de distribuição de água; • Necessidade de espaço para sala de máquinas junto à edificação; • Complexo sistema de controle; 	<p>Desvantagens:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Manutenção poderá ser mais difícil e cara, quanto maior o número de unidades do sistema; • Menor capacidade de controle; • Para grandes capacidades exigem-se muitas unidades; • Menor ciclo de vida;

5.7 Consumo de energia elétrica

A estimativa de consumo de energia anual para os sistemas foram obtidos da simulação no *EnergyPlus*. Observa-se que, para manter os mesmos parâmetros de conforto, o sistema com utilização de *Split* demonstrou menor consumo de energia frente à CAG. Isso se deve ao fato de que muitos equipamentos são necessários para o funcionamento desse tipo de sistema, tais como resfriador de água, bombas e torres de arrefecimento. Os resultados obtidos foram representados na figura 5.5.

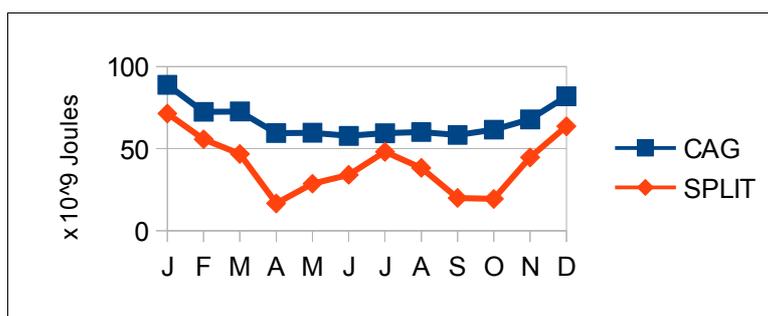


Figura 5.5 : Consumo anual de energia.

6. CONCLUSÕES

Nesse trabalho foi realizado a escolha de um sistema de conforto térmico para um supermercado em Porto Alegre. Utilizou-se o programa *EnergyPlus*, uma poderosa ferramenta para dimensionamento de sistemas de ar condicionado de grandes capacidades, permitindo tomadas de decisões frente as diversas possibilidades de configurações possíveis nesse tipo de instalações. Os resultados obtidos foram considerados coerentes, quando comparados a diversos trabalhos realizados sobre o mesmo tema e, estimativas de consumo de energia puderam ser analisadas.

Para o caso do supermercado em questão, a instalação de dois *Splits*, conforme especificações dadas, foi a opção mais adequada. A CAG também permite a utilização de termoacumulação, o que poderia reduzir consideravelmente consumo de energia, tornando-se essa, uma sugestão para trabalhos futuros. Verifica-se que a utilização do sistema CAG é viável somente quando a capacidade requerida é muito grande, maior que o caso estudado, pois devido à baixa capacidade dos *Split*, tornar-se-ia inviável a instalação de muitas unidades em pontos distintos. Concluiu-se que também existe a necessidade de um projeto que seja unificado, integrando o processo de construção da edificação com as necessidades de conforto e frio alimentar.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (Associação brasileira de normas técnicas); "NBR 16401: Instalação de ar condicionado – Sistemas centrais e unitários", Rio de Janeiro, 2008.

Albert, R.; "Eficiência Energética – Projeto de central de água gelada – parte 1" Porto Alegre, Revista, ASBRAV (associação sul brasileira de refrigeração, ar condicionado e ventilação) nº17, 2015.

ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers); "2009 ASHRAE handbook : fundamentals.", Atlanta, GA, 2009.

Baxter, V.D.; "Investigation of energy-efficient display cases", Tennessee, U.S. Department of Energy, 2004.

Carrier, "Catálogo Técnico 30HX/GX FASE III - F - 10/12", 2012.

Dombrosky, F.D.; "Eficientização de um sistema de climatização aeroportuária a partir do uso da termoacumulação", Dissertação de mestrado, UNISINOS, 2012.

Eletrobras; "Manual de Tarifação da Energia Elétrica", Rio de Janeiro, 2011.

EnergyPlus; "Getting Started with *EnergyPlus*", Lawrence Berkeley National Laboratory, USA, 2015.

EnergyPlus; "Input and Output References", Lawrence Berkeley National Laboratory, USA, 2015.

Hitachi Ar Condicionado do Brasil "Unidades Modulares - Linha RVT/RTC E RUV/RUT", Manual de instalação, São Paulo, 2014.

Jabur, Industria de Refrigeração, <http://www.jaburrefrigeracao.com.br/>, acessado em 27/08/2016.

LabEEE, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações; "Análise de arquivos climáticos para a simulação do desempenho energético de edificações.", UFSC, 2005.

NREL, National Renewable Energy Laboratory USA, "Legacy OpenStudio SketchUp Plugin", <https://github.com/NREL/legacy-openstudio>, acessado em 12/12/2016.

Padilha, G.R.; "Análise de cargas térmicas dimensionamento de sistema de ar condicionado para o salão de atos da UFRGS", Trabalho de conclusão de curso, Engenharia Mecânica-UFRGS, 2010.

Pedrotti, R. F.; "Simulação termo energética de um supermercado", Trabalho de conclusão de curso, Engenharia de Energia-UFRGS, 2015.

Ramos, R. G.; "Projeto de um Sistema de Refrigeração e Climatização em um Supermercado Utilizando CO2 como Refrigerante", Trabalho de conclusão de curso, Escola Politécnica-USP, 2014.

Termodin Componentes Termodinâmicos, "Catálogo Geral Fancoil", Santana do Parnaíba, RJ, 2014.

Trimble Inc, 2016, "Trimble Buildings, solutions for the design buildings Operate Lifecycle" <http://buildings.trimble.com/architecture>, acessado em 12/11/2016.

ANEXO A – Planta baixa da edificação

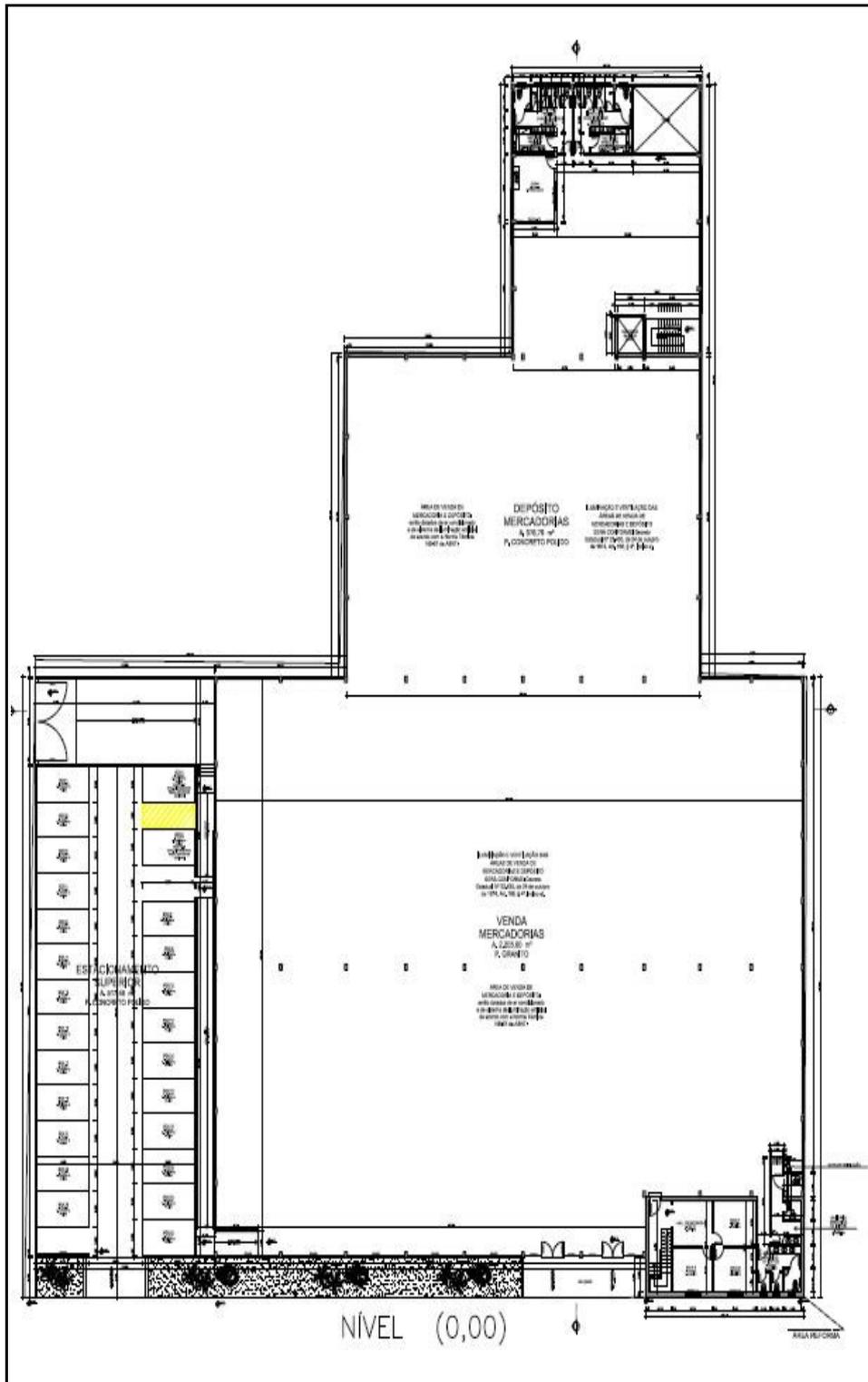


Figura A: Planta baixa da edificação

ANEXO B – Propriedades dos vidros

Field	Units	Obj1
Name		CLEAR 12MM
Optical Data Type		SpectralAverage
Window Glass Spectral Data Set Name		
Thickness	m	0,012
Solar Transmittance at Normal Incidence		0,653
Front Side Solar Reflectance at Normal Incidence		0,064
Back Side Solar Reflectance at Normal Incidence		0,064
Visible Transmittance at Normal Incidence		0,841
Front Side Visible Reflectance at Normal Incidence		0,077
Back Side Visible Reflectance at Normal Incidence		0,077
Infrared Transmittance at Normal Incidence		0
Front Side Infrared Hemispherical Emissivity		0,84
Back Side Infrared Hemispherical Emissivity		0,84
Conductivity	W/m-K	0,9
Dirt Correction Factor for Solar and Visible Transmittanc		
Solar Diffusing		
Young's modulus	Pa	
Poisson's ratio		

Figura B: Propriedades dos vidros utilizados conforme modelo do *EnergyPlus*

ANEXO C – Modelos de *Splits* utilizados

Tabela 5.1: Características técnicas dos *Splits*, Hitachi, 2014.

unidades			2 x 45 TR
módulo ventilador	modelo vazão de ar pressão estática potência de motor peso	código m³/h mmca cv kg	RVT450CP 30600 15~25 15 350
módulo trocador	modelo capacidade (60 Hz) peso altura largura profundidade	código ciclo kcal/h kg mm mm mm	RTC450CP 3 130000 210 2280 3150 880
módulo condensador	tipo ciclo código altura largura profundidade vazão de ar pressão estática peso força comando	mm mm mm m³/h mmca kg	axial superior inverter 1 RAP200FIV 1700 1200 903 23000 - 265 220-380-440 V (50/60 Hz) 220 V (50/60 Hz)

APÊNDICE A – Dimensionamento da rede hidrônica (CAG)

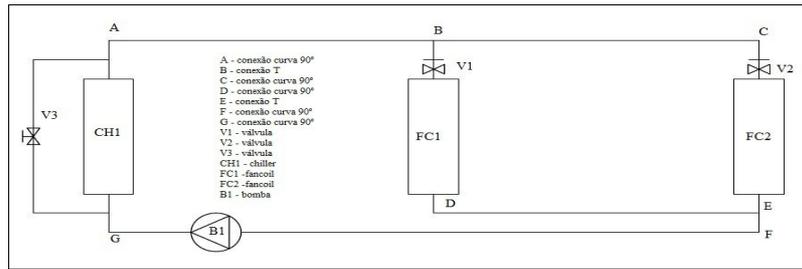


Figura B.1: Rede hidrônica

Tabela B.1: Diâmetro comercial das tubulações de aço SCH 40

tubulação	Vazão (m³/s)	velocidade (m/s)	diâmetro comercial (mm)
A-B	11,3	1,4	100
B-C	5,65	1,2	80
D-E	5,65	1,2	80
F-G	11,3	1,4	100

Tabela B.2: Perdas maiores: Queda de pressão ao longo das tubulações

tubulação	velocidade (m/s)	diâmetro (m)	comprimento (m)	ReD	e/D	Fator de atrito f	Δp (Pa)
A-B	1,4	0,1	13,3	$1,4 \times 10^5$	0,0004600	0,0190	2477
B-C	1,2	0,08	13,3	$9,6 \times 10^6$	0,0005750	0,0200	2394
D-E	1,2	0,08	13,3	$9,6 \times 10^6$	0,0005750	0,0200	2394
F-G	1,4	0,1	26,6	$1,4 \times 10^5$	0,0004600	0,0190	4953
total							12218

Tabela B.3: Perdas menores em conexões e acessórios

conexão	fator K	Velocidade (m/s)	Δp (Pa)
A	0,7	1,4	686
B	0,9	1,4	882
C	0,8	1,2	576
V2	0,14	1,2	101
E	0,9	1,2	648
F	0,7	1,4	686
G	0,7	1,4	686
total			4265

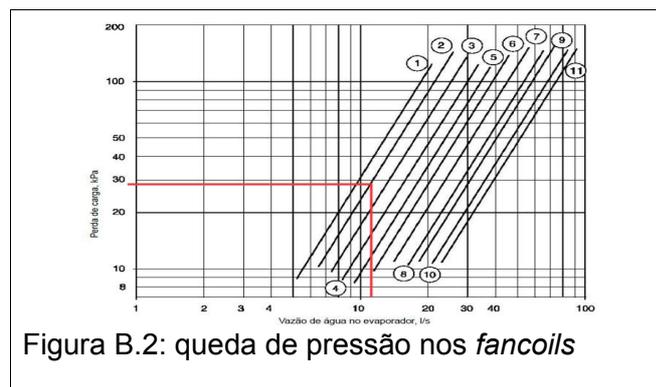


Figura B.2: queda de pressão nos fancoils