

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

ANÁLISE COMPARATIVA DA EFICIENCIA ENERGÉTICA NA CLIMATIZAÇÃO DE UM
PASTIFÍCIO

por

Alexandre Koch Melatte

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



Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

ANÁLISE COMPARATIVA DA EFICIENCIA ENERGÉTICA NA CLIMATIZAÇÃO DE UM
PASTIFÍCIO

por

Alexandre Koch Melatte

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

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

Orientador: Prof. Cirilo Seppi Bresolin

Comissão de Avaliação:

Prof. Thamy Hayashi

Prof. Volnei Borges

Prof. Pedro Mello

Porto Alegre, 18 de Novembro de 2016.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Roberto e Ingeborg, que sempre me apoiaram e que, com muito esforço, tornaram possível que eu chegasse até aqui; à minha avó Jenny (in memoriam) que me ensinou, entre muitas coisas, o valor do conhecimento; e às minhas irmãs, Simone e Mônica, que sempre solícitas, nos momentos em que precisei, se dispuseram a me ajudar como fosse possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família, especialmente aos que familiares a que dediquei este trabalho, por confiarem em mim, me apoiarem e me incentivarem a não desistir e sempre ir em frente.

À minha namorada, Daniele, por toda ajuda, paciência e carinho nesta fase.

Também aos meus amigos, que foram fundamentais durante toda a jornada, sempre estiveram ao meu lado, me ajudando, apoiando e aconselhando.

Ao professor Cirilo Seppi Bresolin, por me orientar, compartilhar seu conhecimento e dedicar o seu tempo a ensinar.

MELATTE, A. K. **Análise Comparativa da Eficiência Energética na Climatização de um Pastifício**. 2016. 15 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

Um pastifício é um ambiente que requer maior atenção no que diz respeito à sua climatização em decorrência da natureza de seus produtos. Devido a este fato, foi elaborado o presente trabalho, tendo como objetivo a comparação entre a eficiência de dois diferentes sistemas de ar condicionado aplicados às necessidades de um ambiente deste tipo. Para tal, fez-se um estudo do local escolhido e suas cargas internas, bem como uso de *softwares* para a simulação termoenergética da edificação. Posteriormente, foi feita uma comparação da energia demanda por cada equipamento e esse resultado foi convertido em custo, para uma análise de viabilidade. Após a análise, concluiu-se que a economia que se faz ao comprar um aparelho sem *inverter* não compensa devido ao elevado custo de operação, proveniente do alto consumo de energia elétrica.

PALAVRAS-CHAVE: Pastifício, *Inverter*, *EnergyPlus*, AVAC

MELATTE, A. K. **Comparative Analysis of Energy Efficiency in the Air Conditioning of a Pasta Factory**. 2016. 15 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

ABSTRACT

Pasta factories are environments that require more attention related to their air conditioning due to the nature of its products. Due to this fact, the present assignment was elaborated, aiming at comparing the efficiency of two different air conditioning systems applied to the needs of this kind of environment. For this purpose, a study of the chosen site and its internal gains, as well as the use of software for the thermoenergetic simulation of the building were done. Subsequently, a comparison of the energy demand for each equipment was made and this result was converted into cost, for a feasibility analysis. After the analysis, it was concluded that the economy that is made when buying a non-inverter device does not compensate due to the high cost of operation, coming from the high consumption of electric energy.

KEYWORDS: Pasta factory, Inverter, *EnergyPlus*, HVAC

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	1
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
4.1	Split convencional.....	3
4.2	Inverter	4
5	METODOLOGIA.....	4
5.1	Estudo do local	5
5.2	Cargas internas	6
5.3	Simulação.....	6
5.3.1	Sketchup® e Openstudio®	7
5.3.2	Energy Plus®	8
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	8
6.1	Sistema split convencional.....	9
6.2	Sistema com inversor de frequência.....	10
6.3	Discussão.....	11
7	CONCLUSÃO.....	13
8	BIBLIOGRAFIA.....	13

1 INTRODUÇÃO

O projeto de climatização de um pastifício apresenta algumas particularidades, e isto o diferencia desde as primeiras etapas. Ao desenvolver um sistema de condicionamento de ar, deve-se estar atento aos requisitos que ele deve atender, como o conforto térmico, condições ideais para manuseio e armazenamento dos produtos e concentração de impurezas e poluentes no ar. No caso de um pastifício, todos estes parâmetros devem ser levados em consideração simultaneamente, uma vez que o ambiente onde as massas são fabricadas é o mesmo onde as pessoas que as fabricam trabalham.

Por mais que não haja uma norma que especifique a temperatura e a umidade relativa que devem ser mantidas em um pastifício, é de conhecimento dos profissionais do ramo que estes parâmetros influenciam, consideravelmente, na qualidade final do produto que chegará à mesa dos consumidores. Na produção de massas frescas, a baixa e a alta umidade do ar podem prejudicar a produção, deixando as massas secas e quebradiças, ou fazendo com que a massa rasgue com facilidade, respectivamente, podendo até impossibilitar o seu preparo posteriormente.

Com a importância das propriedades psicrométricas neste contexto, investir na instalação de um sistema capaz de manter as condições o mais próximo possível das adequadas representa uma melhoria significativa no processo de produção. A comparação aqui feita põe em prova a premissa de que o maior investimento ao adquirir um ar condicionado com inversor de frequência (comercialmente chamado de *inverter*) se paga devido ao seu consumo de energia reduzido.

2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como propósito a simulação termo energética de uma fábrica de massa, que será feita através do *software EnergyPlus®* em conjunto com o *OpenStudio®*. Para fazer uma análise das cargas térmicas, identificar o período crítico e dimensionar um sistema de condicionamento de ar, com e sem *inverter*, adequado para o caso em estudo. Por fim, usar a simulação para comparar a eficiência energética dos diferentes sistemas aplicados ao pastifício. Esta análise será feita com o intuito de encontrar a opção com melhor custo-benefício que atenda, de maneira satisfatória, às peculiares necessidades de uma fábrica de massas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em busca de embasamento teórico para a realização deste estudo, foram consultadas bibliografias a respeito de projetos de engenharia na área de climatização, bem como simulação termoenergética de edificações através de *softwares*. De acordo com estes conteúdos foram obtidas as diretrizes para este trabalho.

Existe um grupo de opções factíveis que atendem à necessidade que deu origem ao projeto, mas geralmente apenas um projeto que melhor atende de acordo com critérios como menor custo, maior eficiência, menor tamanho, menor peso, etc [Moran e Shapiro, 2000]. Como o tamanho do equipamento e o peso do mesmo não são, necessariamente, restrições de projeto em um pastifício, manteve-se o foco no custo e na eficiência dos aparelhos em comparação.

O *software EnergyPlus®* possui recursos para simulação e cálculo de edificações que utilizam sistema de ar condicionado com fluxo de refrigerante variável. Machado, 2014, fez um estudo no qual comparou o equipamento de exemplo do programa com um equipamento comercial e concluiu que o resultado obtido com o

programa se mostrou conservador ao que se refere à economia de energia do VRF. Partindo desta premissa, este estudo foi feito com base no exemplo do *software* que nos confere uma margem de 5% a favor da segurança.

Pozza, 2011, afirma que para avaliação de edificações com sistema de climatização com *splits*, não se faz necessário aplicar as correlações de desempenho de uma máquina real, pois a existente no *EnergyPlus®* fornece valores de consumo dentro da faixa de precisão aceitável para uma simulação. Isto nos mostra que para o *split*, assim como no caso do sistema VRF, também é possível trabalhar com os valores predefinidos pelo *software*.

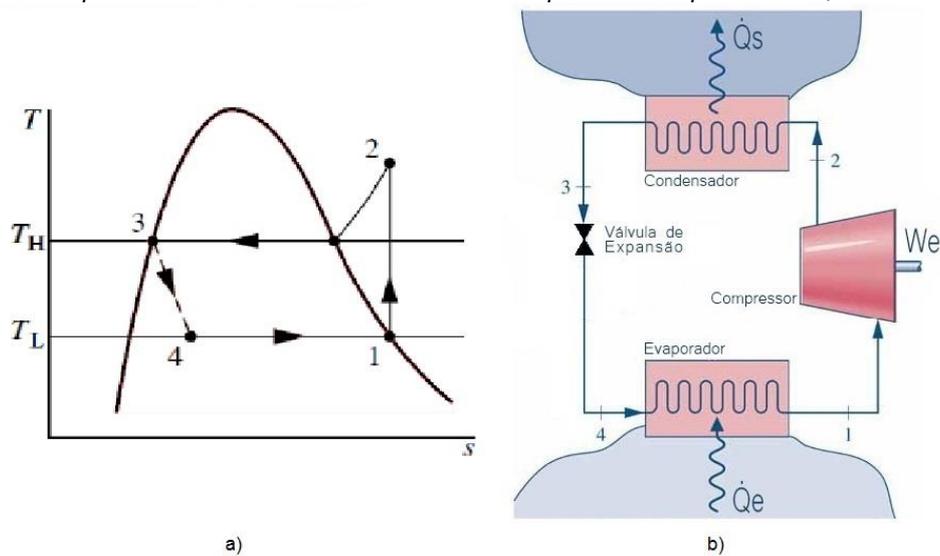
Existem condições ideais de temperatura e umidade do ar quando se trabalha em uma fábrica de massa, no entanto ainda não existe um estudo que defina categoricamente estas informações, uma vez que não se está lidando com massas secas (que têm parte do seu processo realizado no interior de uma estufa), nem de massas fermentadas. Ainda que não muito preciso, é sabido que o ideal para panificadoras (que fabricam massas fermentadas) é manter o ambiente entre 22°C e 28°C e a umidade relativa próxima a 75%, segundo o site do Centro de Produções Técnicas (CPT). Acontece que estes dados são estimados para a etapa de fermentação da massa, o que não faz parte do processo de produção de massas frescas em um pastificio. As informações desejadas acabam por ser obtidas fora da literatura, de uma maneira pouco ortodoxa, muitas vezes tendo sido adquiridas de maneira empírica e propagadas através da prática de trabalho pelas pessoas deste meio.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O processo de climatização de um ambiente consiste em transferir energia térmica de uma região para outra, o que muitas vezes contraria a segunda lei da termodinâmica que afirma, de uma forma coesa, que a energia flui naturalmente do maior potencial para o menor potencial, vencendo as resistências existentes no caminho. Para que o processo ocorra no sentido contrário, é preciso fazer uso de trabalho externo, e é nesta etapa que os aparelhos condicionadores de ar se fazem necessários.

Aparelhos de ar condicionado têm seu funcionamento baseado no ciclo ideal de refrigeração por compressão de vapor – ilustrado através de um diagrama de temperatura e entropia na Figura 1 a) - e são fundamentalmente constituídos por uma válvula de expansão, um evaporador, um compressor e um condensador que operam com um fluido refrigerante, conforme mostrado na Figura 1 b). O trabalho entra no ciclo pelo compressor e é aplicado sobre o fluido refrigerante, que nesta etapa está em estado de vapor superaquecido e que posteriormente segue para o condensador. No condensador, o fluido encontra-se sob pressão elevada e libera calor ao passar para a fase líquida. Após sofrer uma expansão adiabática ao passar pela válvula de expansão, o fluido apresenta-se em duas fases (líquido e vapor saturado) e encaminha-se para o evaporador, onde completa o ciclo absorvendo calor e voltando unicamente ao estado de vapor.

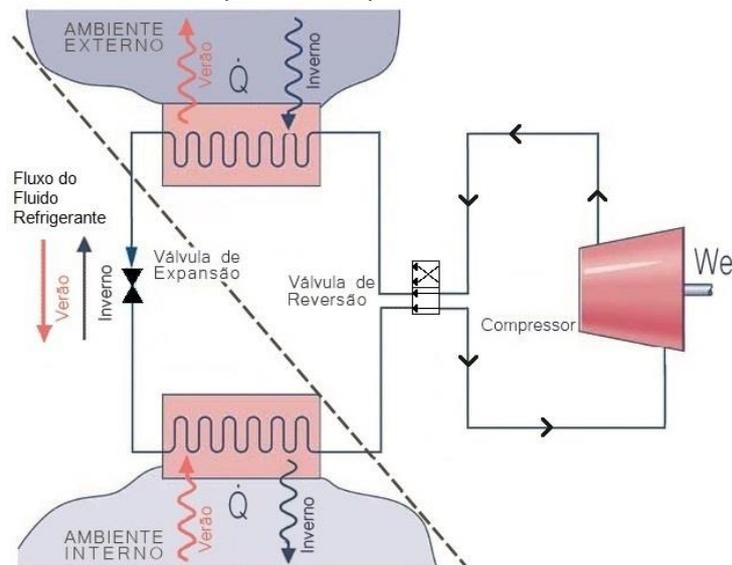
Figura 1 – Diagrama Ts para ciclo ideal de refrigeração por compressão de vapor e representação esquemática de um condicionador de ar – Adaptada de Shapiro e Moran, 2000



4.1 Split Convencional

Os aparelhos do tipo *split* são aqueles que possuem um trocador de calor do lado de dentro do ambiente e outro do lado de fora da edificação separados por alguma distância. O compressor é posicionado junto ao trocador externo e a válvula de expansão junto ao trocador no interior do ambiente. Quando o sistema está configurado para refrigerar o ambiente, o trocador interno assume o papel de evaporador e o trocador externo o papel de condensador. Ao alterar a operação para que ele aqueça o ambiente, os trocadores de calor invertem suas funções, vide Figura 2.

Figura 2 - Representação esquemática de um condicionador de ar split com válvula de reversão – Adaptada de Shapiro e Moran, 2002



Conforme afirma a Inventor, fabricante de condicionadores de ar, a forma como este tipo de aparelho é composto não tem impacto relevante na sua eficiência. Estas modificações foram feitas visando a facilidade na instalação e o maior conforto dos usuários, minimizando os ruídos provenientes do compressor. O ruído elevado se deve ao fato de que ele opera, sempre que está em funcionamento, na sua rotação máxima, caracterizando o sistema *on/off*. Esta característica que este tipo de aparelho possui,

assim como os demais aparelhos que não têm controle sobre a vazão do fluido refrigerante, acaba por diminuir a eficiência do sistema.

4.2 Inverter

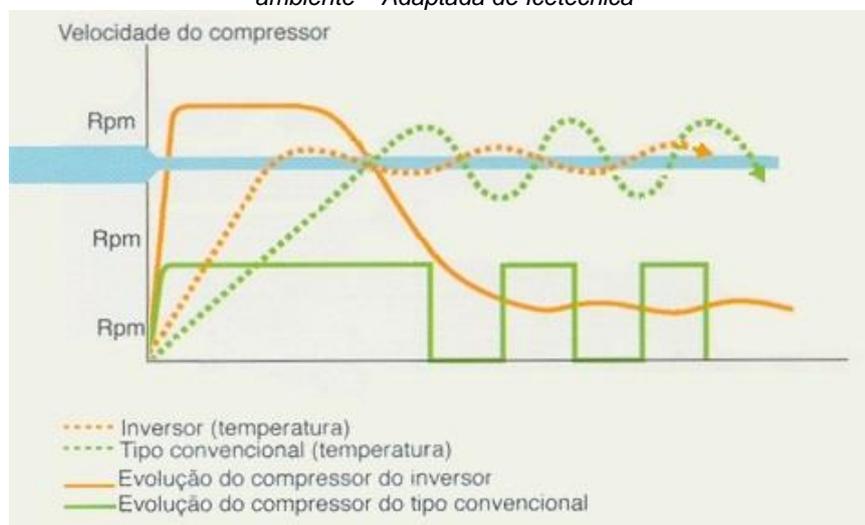
Aparelhos do tipo *inverter* (nome comercial dado ao equipamento que possui um inversor de frequência) têm o mesmo princípio de funcionamento dos demais condicionadores de ar, podendo ser *split*, de janela ou central. O que os diferencia é a capacidade que o compressor possui de operar fora da sua capacidade máxima, enquanto compressores convencionais operam na sua capacidade total, contrapondo o sistema *on/off*.

A grande vantagem do *inverter* se deve ao inversor de frequência, equipamento eletrônico que tem a capacidade de controlar a frequência da corrente elétrica que alimenta o compressor. Esta característica nos permite ter controle sobre a vazão de fluido refrigerante do sistema, e assim operar sem grandes picos de funcionamento, de maneira a diminuir a amplitude térmica em relação à temperatura desejada, evitando gastos de energia para vencer a inércia térmica, utilizando a energia mínima necessária para manter o ambiente na temperatura desejada, uma vez que já tenham sido alcançadas as condições psicrométricas ideais.

A modulação da rotação do compressor da unidade externa é controlada por variadores de frequência que regulam automaticamente a vazão de refrigerante para atender as solicitações de cargas de aquecimento ou resfriamento das unidades internas o que auxilia na economia de energia [Machado, 2014].

Estes efeitos podem ser observados de acordo com a Figura 3.

Figura 3 – Representação qualitativa da ação do compressor no tempo em relação à temperatura no ambiente – Adaptada de Ictecnica



5 METODOLOGIA

Neste capítulo são detalhadas cada uma das etapas realizadas para o dimensionamento e simulação de um sistema de condicionamento de ar, para um pastificio, para manter a temperatura do ar entre 22°C e 26°C e a umidade relativa próxima de 55% ao longo do período de produção em que as massas estão expostas ao ambiente. Posteriormente, será feita uma análise, com base nos resultados, a fim de verificar a superioridade na eficiência do sistema com inversor de frequência em relação ao sistema convencional e sua aplicabilidade com referência aos custos.

5.1 Estudo do local

Nesta etapa são definidas as características do ambiente em estudo assim como as características climáticas do local onde ele se encontra. Este conjunto de fatores tem impacto direto na climatização do ambiente e é de suma importância para a posterior simulação.

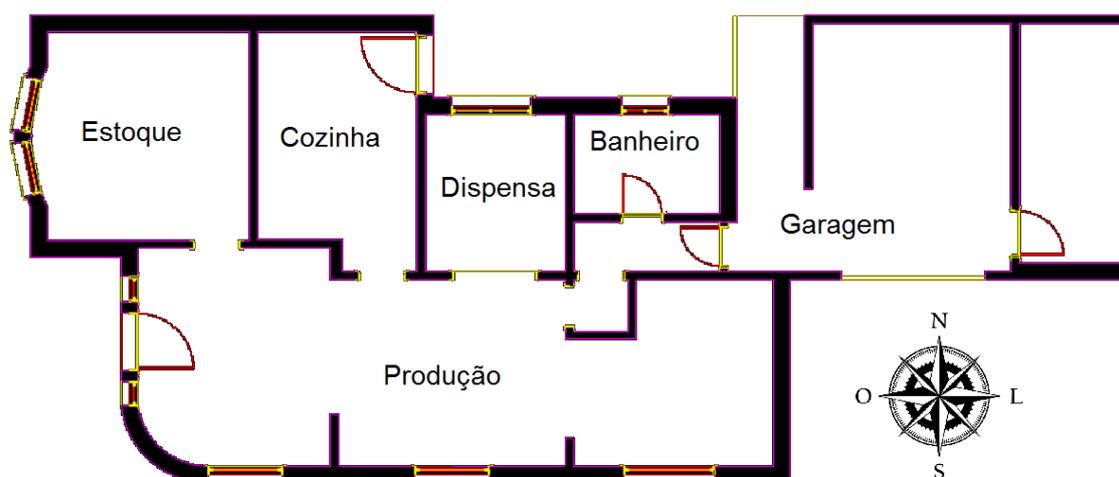
A edificação na qual o pastifício está instalado é uma casa térrea, localizada na cidade de Porto Alegre, cuja as coordenadas são 30°1' Sul e 51°13' Oeste e está a 47 metros acima do nível do mar. As construções nas proximidades são, em sua maioria, residências e não passam de três pavimentos, o que acaba proporcionando grande incidência solar e exposição ao vento, o que não é amenizado pela vegetação pois não há a presença de árvores no entorno, vide Figura 4.

Figura 4 – Edificação em estudo e seu entorno



Tendo 97 m² mais uma garagem anexada, que não será climatizada, a casa é composta por uma cozinha, uma grande área onde se dá a produção, uma dispensa, um local de estoque e um banheiro. A orientação solar e a proporção das áreas podem ser conferidas na Figura 5 a seguir.

Figura 5 – Planta esquemática da edificação



Informações climáticas sobre o local são obtidas através de um “Weather File”, arquivo que compila dados meteorológicos de uma determinada cidade durante o

período de um ano. Estes arquivos são utilizados diretamente pelo *software* de simulação. Maiores informações serão dadas na seção 5.3.2.

5.2 Cargas internas

Toda e qualquer fonte de calor presente nas áreas da edificação que será climatizada devem ser consideradas para o correto dimensionamento do condicionador de ar. Deve ser levada em conta a energia dissipada por cada uma das fontes, desde fornos e fogões até iluminação e pessoas (bem como as atividades que praticam), pois independentemente da origem da energia ela acabam por ser transformada em calor.

Nesta etapa foi feito um levantamento de todos os equipamentos utilizados no pastifício, sua potência e o tempo que eles ficam em funcionamento por semana (ciclo de produção), que deu origem à Tabela 1.

O fogão, por ser o único equipamento a gás da produção, teve a sua emissão de calor calculada através do poder calorífico inferior do GLP (Gás Liquefeito de Petróleo). Tendo conhecimento da quantidade de bocas utilizadas por hora durante os cinco dias do ciclo de produção, calculou-se as horas equivalentes a uma boca. Sabendo que neste período são utilizados 26 quilogramas de gás, foi possível fazer uma estimativa da taxa de calor que uma boca libera durante o uso, que resultou em 5,96 kW.

Tabela 1 – Levantamento das cargas internas

Ambiente	Fonte de calor	Quant.	Potência de cada equip. (W)	Subtotal por tipo de equip (W)	Tempo de uso na semana (h)	Energia total na semana (kW.h)
Produção	Lâmpadas 1,20 m	12	54,0	648,0	55	35,64
	Misturador	1	1500,0	1500,0	8	12,00
	Extrusoras	2	735,5	1471,0	32	47,07
	Seladora	1	100,0	100,0	4	0,40
	Refrigerador Horiz.	1	700,0	700,0	70	49,00
	Moedor	1	367,7	367,8	3	1,10
Estoque	Lâmpadas 1,20 m	4	54,0	216,0	10	2,16
	Freezer Horiz.	2	293,0	586,0	70	41,02
	Freezer Vert.	4	236,0	944,0	70	66,08
	Empacotador	1	300,0	300,0	4	1,20
Cozinha	Lâmpadas 1,20 m	4	54,0	216,0	30	6,48
	Liquidificador industrial	1	665,0	665,0	2	1,33
	Fogão Industrial (por boca)	1	5964,0	5964,0	57	339,95
Dispensa	Lâmpadas 1,20 m	4	54,0	216,0	10	2,16
Corredor	Lâmpadas 1,20 m	2	54,0	108,0	1,25	0,14
Banheiro	Lâmpadas	1	27,0	27,0	10	0,27

Durante a semana, estão presentes na empresa três pessoas que trabalham quarenta e oito horas semanais praticando atividades leves, o que, segundo Beyer, 2015, resulta em 110 watts de calor sensível e 185 watts de calor latente, totalizando 295 watts produzidos por cada trabalhador. Ao fim de uma semana de trabalho, tem-se 14,16 kW.h gerados por cada um dos ocupantes, no entanto estes dados não estão incluídos na tabela acima pois são inseridos separadamente no *EnergyPlus®*, conforme veremos mais adiante na seção 5.3.2.

5.3 Simulação

Esta etapa consiste em passar para o computador todos os dados necessários para a realização dos cálculos e a execução dos mesmos. Para tal, foram utilizados os *softwares* SketchUp e *OpenStudio®* para a modelagem em três dimensões da

edificação e posteriormente o *EnergyPlus®* para a simulação termoenergética do pastifício.

5.3.1 *SketchUp®* e *OpenStudio®*

Estes programas foram utilizados para apoio no estudo do local (seção 5.1), tais como orientação solar, dimensões, tipos de abertura, sombreamento, etc.

Devido à sua versatilidade, *SketchUp®* é frequentemente empregado nas áreas da arquitetura, engenharia e *design*, sendo utilizado para representar diversos tipos de elementos que necessitam de visualização em três dimensões. Aliado a ele, foi utilizado o *OpenStudio®*, um *plugin* que, ao rodar junto com o *SketchUp®*, possibilita a caracterização, de acordo com o *EnergyPlus®*, de cada um dos elementos criados. Em suma, o primeiro *software* citado foi utilizado para construir uma maquete virtual da edificação e o *plugin* tornou possível a interpretação das informações contidas nela para o programa que executará a simulação (*EnergyPlus®*).

A quantidade de informações contidas nestas maquetes virtuais pode ser altíssima, quanto maior o nível de detalhamento, maior a complexidade dos dados a serem processados posteriormente. Devido a esta restrição, o *OpenStudio®* limita bastante a complexidade geométrica dos elementos a serem criados. Com isso, a representação final acaba sendo extremamente simplificada, mantendo única e exclusivamente as características relevantes da edificação.

Figura 6 - Comparação da representação 3D com e sem as simplificações



Na Figura 6, vê-se o modelo da edificação desenvolvido com as ferramentas do *OpenStudio®* seguida de o modelo desenvolvido, unicamente, com o *SketchUp®*. De forma simplificada, foram representados apenas os elementos do entorno que exercem alguma influência na edificação através do sombreamento, representados na cor roxa e denominados pelo programa de “Shading Group”; o telhado foi representado por uma superfície plana logo acima da laje interna, de maneira a reproduzir o bloqueio da radiação solar; as aberturas foram modeladas, sem nenhum detalhamento, por retângulos que não caracterizam as demais propriedades de cada janela ou porta.

5.3.2 *Energy Plus®*

A simulação do ambiente em análise feita com o auxílio do *EnergyPlus®*, *software* gratuito, desenvolvido e financiado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE) que, assim como o *OpenStudio®*, faz parte do portfólio de programas de simulação de energia de construções do BTO (Building Technologies Office).

Os dados climáticos são parte fundamental da simulação e são obtidos por arquivos climáticos, que compilam informações meteorológicas do período de um ano de uma determinada cidade. Ao se instalar o *EnergyPlus®*, tem-se acesso a um pequeno acervo desses arquivos que é complementado pelo *site* do programa, na seção “Weather Data”, sendo é possível fazer o *download* de dados climáticos de mais de 2100 cidades. Como não há dados referentes a Porto Alegre em nenhuma destas fontes, fez-se necessário recorrer a outros meios. O LabEEE (Laboratório de Eficiência Energética em Edificações), da Universidade Federal de Santa Catarina, disponibiliza arquivos climáticos de diversas cidades brasileiras, e através dele que foram obtidos dados para este estudo.

Após introduzir as informações provenientes do *OpenStudio®* e do arquivo climático, o próximo passo para a simulação é fornecer ao *EnergyPlus®* os dados referentes aos ganhos internos de energia, previamente vistos na seção 5.2. Para facilitar a inserção dos dados, as fontes de calor foram separadas nos seguintes grupos: fogão, pessoas, iluminação, refrigeradores do estoque e produção. Como o levantamento foi feito em ganho de energia por semana, e o programa requer em taxa de energia e horas de ganho por dia, o somatório dos ganhos internos foi igualmente distribuído pelos cinco dias da semana durante o período de atividade no pastifício. Os ganhos referentes às pessoas são calculados com base na estimativa de 295 W por ocupante, e o período em que eles se encontram na zona climatizada, conforme mencionado anteriormente.

Os ganhos e as perdas de calor relativos a infiltrações não foram considerados durante o período de funcionamento dos sistemas de ar condicionado. Por haver renovação de ar, assume-se que a pressão interna é superior à externa, o que impede que o ar não condicionado entre no ambiente.

Devido à sua variedade de aplicações, o *EnergyPlus®* permite que o usuário escolha as variáveis de saída, facilitando o foco no que se está estudando. Tendo realizado esta escolha e configurando o tipo de sistema de condicionamento de ar que se deseja dimensionar, estipulando faixas de temperatura, umidade e o período de funcionamento, dá-se início à simulação.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

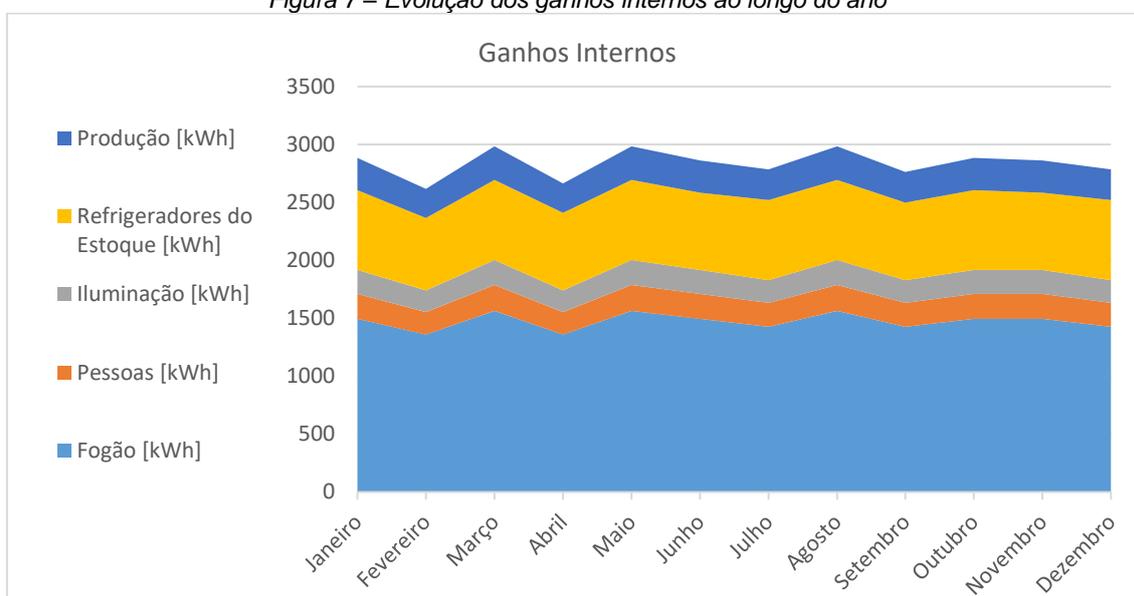
Neste capítulo são apresentados, separadamente, os resultados das simulações com o sistema split convencional e com o sistema com inversor de frequência aplicados ao pastifício. Posteriormente é feita uma discussão acerca das diferenças entre cada uma das simulações realizadas.

Os únicos valores resultantes que são os mesmos para ambos os sistemas são os resultados dos ganhos internos. Baseado nos valores fornecidos pelo usuário, é calculado anteriormente por ser um pré-requisito para a simulação. O programa disponibiliza os dados discriminados por tipo fonte de calor, informando o quanto cada um deles entregou de energia ao meio durante o mês, como se vê a seguir na Tabela 2.

Tabela 2 – Cálculo das cargas internas referentes a cada mês

Fonte de calor/ Mês	Fogão [kWh]	Pessoas [kWh]	Iluminação [kWh]	Refrigeradores do Estoque [kWh]	Produção [kWh]	Ganho Interno TOTAL [kWh]
Janeiro	1495,78	214,17	206,12	691,30	277,66	2885,03
Fevereiro	1359,80	194,70	187,38	624,40	252,42	2618,70
Março	1563,77	223,90	215,49	691,30	290,28	2984,75
Abril	1359,80	194,70	187,38	669,00	252,42	2663,30
Mai	1563,77	223,90	215,49	691,30	290,28	2984,75
Junho	1495,78	214,17	206,12	669,00	277,66	2862,73
Julho	1427,79	204,43	196,75	691,30	265,04	2785,32
Agosto	1563,77	223,90	215,49	691,30	290,28	2984,75
Setembro	1427,79	204,43	196,75	669,00	265,04	2763,02
Outubro	1495,78	214,17	206,12	691,30	277,66	2885,03
Novembro	1495,78	214,17	206,12	669,00	277,66	2862,73
Dezembro	1427,79	204,43	196,75	691,30	265,04	2785,32
Soma	17677,39	2531,10	2435,95	8139,50	3281,47	34065,44
Menor Valor	1359,80	194,70	187,38	624,40	252,42	2618,70
Maior Valor	1563,77	223,90	215,49	691,30	290,28	2984,75
Média	1473,12	210,92	203,00	678,30	273,45	2838,79

Figura 7 – Evolução dos ganhos internos ao longo do ano



Na Figura 7 é possível observar que, da média mensal de 2838,79 kW.h, a maior fonte de calor é o fogão industrial, a qual representa 52% do total de energia dissipada no ambiente ao longo do ano, seguido dos refrigeradores com 24%.

6.1 Sistema *split* convencional

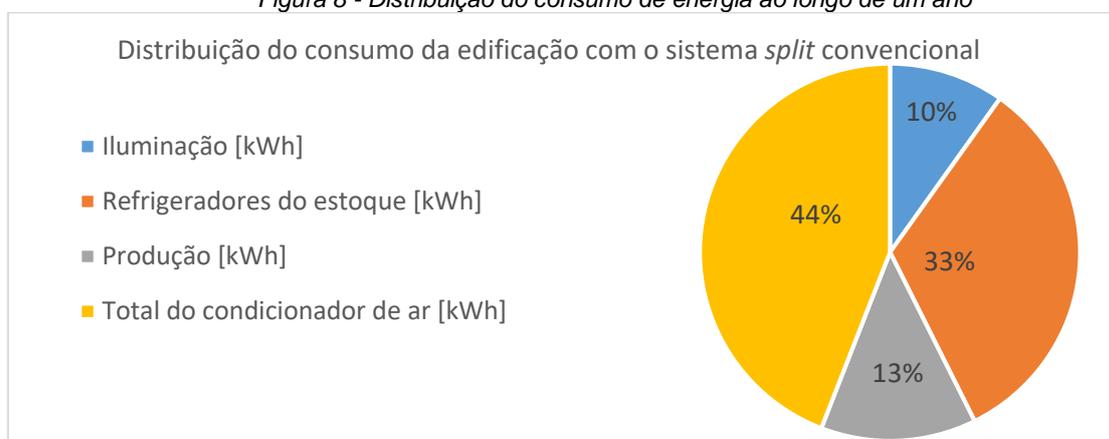
Com base no modelo dimensionado pelo *EnergyPlus®*, é assumido que o pastifício, com um sistema AVAC (aquecimento, ventilação e ar condicionado) comum, teria um consumo de energia conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 – Consumo de energia com sistema AVAC convencional

	Iluminação [kW.h]	Refrigeradores do Estoque [kW.h]	Produção [kW.h]	Condicionador de Ar [kW.h]	Total [kW.h]
Janeiro	206	691	278	1081	2256
Fevereiro	187	624	252	962	2025
Março	215	691	290	1087	2283
Abril	187	669	252	863	1971
Maió	215	691	290	816	2012
Junho	206	669	278	775	1928
Julho	197	691	265	781	1934
Agosto	215	691	290	821	2017
Setembro	197	669	265	802	1933
Outubro	206	691	278	952	2127
Novembro	206	669	278	976	2129
Dezembro	197	691	265	1022	2175
Soma	2436	8140	3281	10938	24790
Mínimo	187	624	252	775	1928
Máximo	215	691	290	1087	2283
Média	202.8	678.1	273.4	911.5	2065.8

De acordo com o programa, estima-se que um condicionador de ar convencional, aplicado a estas condições, totalize um gasto de 10.938 kW.h durante o ano, com uma média mensal de 911,5 kW.h. Representando 44% do consumo de energia no pastifício, conforme Figura 8, e considerando o valor do kW.h de R\$ 0,48 (conforme resolução homologatória ANEEL nº 1.971), tem-se um gasto médio de R\$ 437,52 por mês apenas com o sistema de climatização.

Figura 8 - Distribuição do consumo de energia ao longo de um ano



6.2 Sistema com inversor de frequência

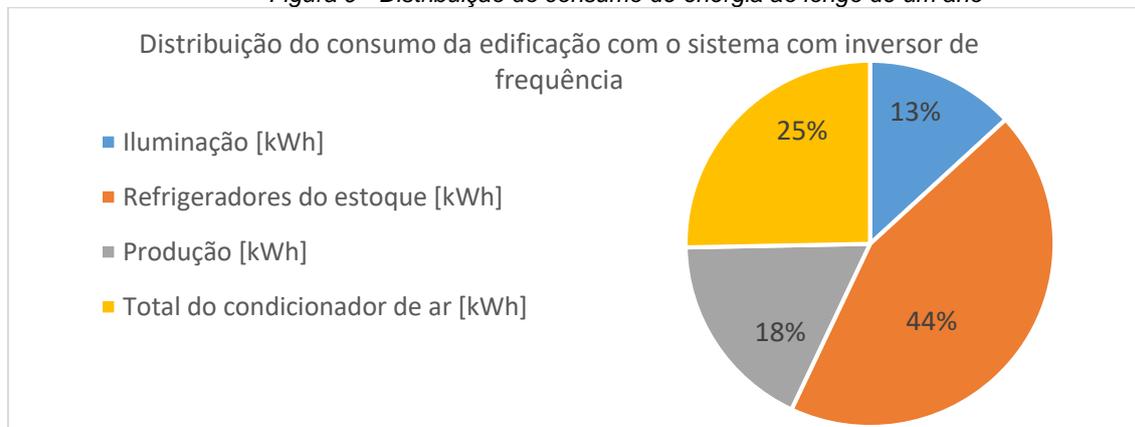
Com o intuito de realizar uma comparação direta, foram escolhidos os mesmos dados de saída para ambas as simulações, sendo assim tem-se os valores referentes ao consumo de energia com um sistema AVAC com inversor de frequência, conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Consumo de energia com sistema AVAC com inverter

	Iluminação [kW.h]	Refrigeradores do Estoque [kW.h]	Produção [kW.h]	Condicionador de Ar [kW.h]	Total [kW.h]
Janeiro	206	691	278	563	1738
Fevereiro	187	624	252	501	1564
Março	215	691	290	554	1750
Abril	187	669	252	360	1468
Maió	215	691	290	266	1462
Junho	206	669	278	265	1418
Julho	197	691	265	286	1439
Agosto	215	691	290	282	1478
Setembro	197	669	265	274	1405
Outubro	206	691	278	397	1572
Novembro	206	669	278	418	1571
Dezembro	197	691	265	530	1683
Soma	2436	8140	3281	4696	18548
Mínimo	187	624	252	265	1405
Máximo	215	691	290	563	1750
Média	202.8	678.1	273.4	391.3	1545.7

Fazendo uma análise análoga à do modelo anterior, tem-se que um condicionador de ar que possui um inversor de frequência consome, anualmente, 4696 kW.h, com uma média mensal de 391,3 kW.h sob estas condições. Por consequência, o sistema com *inverter* acaba por representar apenas 25% do consumo de energia do pastifício, implicando em um gasto médio de R\$ 187,84 por mês com a climatização, como mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Distribuição do consumo de energia ao longo de um ano



6.3 Discussão

De acordo com o resultado da simulação, a capacidade necessária dos aparelhos, para que satisfaçam as condições de projeto, é de 37.914 e 36.853 BTU/h, na ordem em que foram apresentados. No entanto, no mercado encontram-se apenas aparelhos com potência pré-determinada, o que torna necessária a compra de um aparelho mais potente do que se precisa. Para suprir esta demanda de energia integralmente, dispõe-se de aparelhos de 42.000 e 48.000 BTU/h.

De acordo com uma pesquisa de preço feita no site da WebArCondicionado, www.webarcondicionado.com.br, acessado em 27 de setembro de 2016, que relaciona diferentes marcas e modelos de condicionadores de ar, observou-se que os aparelhos convencionais, com esta potência, têm um valor médio de R\$ 6.336,43, enquanto

aparelhos com potência equivalente, mas equipados com o inversor de frequência, têm o valor médio de R\$ 9.618,45. Ou seja, a tecnologia inverter tem um sobrecusto de mais de três mil reais, nesta categoria de equipamentos, que equivale à metade de um aparelho de ar condicionado convencional.

Para que se possa afirmar que a aquisição de um sistema AVAC com inversor de frequência realmente vale a pena, é preciso fazer uma avaliação a longo prazo, verificar se o valor excedente na compra é revertido durante o uso com a economia de energia. Baseado no valor da energia e nas tabelas vistas anteriormente, foi construída a Tabela 5 e plotado o gráfico da Figura 10, com o propósito de comparar as despesas previstas do pastifício com energia elétrica.

Tabela 5 – Custos com energia elétrica

	Sistema AVAC		Equipamentos elétricos	Total da edificação	
	Split convencional	Inverter		Split convencional	Inverter
Janeiro	R\$ 518,88	R\$ 270,24	R\$ 564,00	R\$ 1.082,88	R\$ 834,24
Fevereiro	R\$ 461,76	R\$ 240,48	R\$ 510,24	R\$ 972,00	R\$ 750,72
Março	R\$ 521,76	R\$ 265,92	R\$ 574,08	R\$ 1.095,84	R\$ 840,00
Abril	R\$ 414,24	R\$ 172,80	R\$ 531,84	R\$ 946,08	R\$ 704,64
Mai	R\$ 391,68	R\$ 127,68	R\$ 574,08	R\$ 965,76	R\$ 701,76
Junho	R\$ 372,00	R\$ 127,20	R\$ 553,44	R\$ 925,44	R\$ 680,64
Julho	R\$ 374,88	R\$ 137,28	R\$ 553,44	R\$ 928,32	R\$ 690,72
Agosto	R\$ 394,08	R\$ 135,36	R\$ 574,08	R\$ 968,16	R\$ 709,44
Setembro	R\$ 384,96	R\$ 131,52	R\$ 542,88	R\$ 927,84	R\$ 674,40
Outubro	R\$ 456,96	R\$ 190,56	R\$ 564,00	R\$ 1.020,96	R\$ 754,56
Novembro	R\$ 468,48	R\$ 200,64	R\$ 553,44	R\$ 1.021,92	R\$ 754,08
Dezembro	R\$ 490,56	R\$ 254,40	R\$ 553,44	R\$ 1.044,00	R\$ 807,84
Soma	R\$ 5.250,24	R\$ 2.254,08	R\$ 6.648,96	R\$ 11.899,20	R\$ 8.903,04
Mínimo	R\$ 372,00	R\$ 127,20	R\$ 510,24	R\$ 925,44	R\$ 674,40
Máximo	R\$ 521,76	R\$ 270,24	R\$ 574,08	R\$ 1.095,84	R\$ 840,00
Média	R\$ 437,52	R\$ 187,84	R\$ 554,08	R\$ 991,60	R\$ 741,92

Figura 10 – Comparação dos gastos resultantes de cada tipo de sistema AVAC

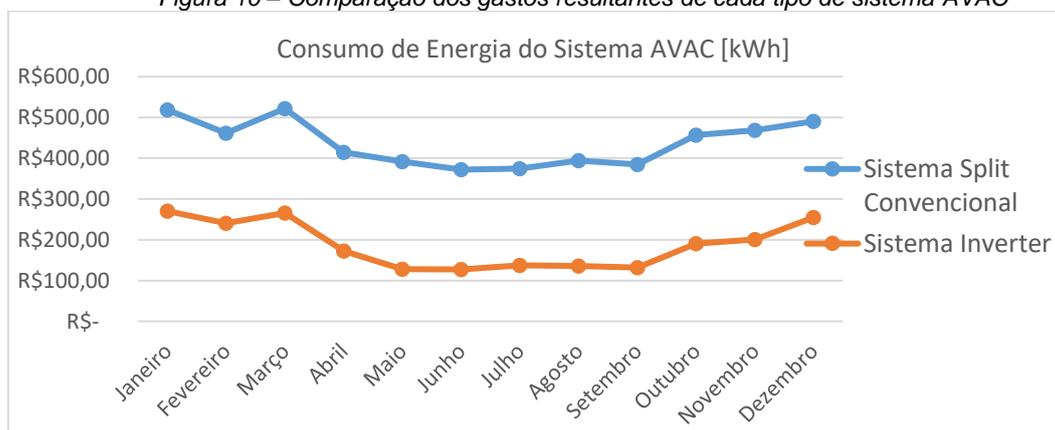


Tabela 6 – Diferença de consumo entre AVAC convencional e com inverter

	Absoluta		Percentual
	[kW.h]	[R\$]	[%]
Janeiro	518	R\$ 248,64	47,9%
Fevereiro	461	R\$ 221,28	47,9%
Março	533	R\$ 255,84	49,0%
Abril	503	R\$ 241,44	58,3%
Mai	550	R\$ 264,00	67,4%
Junho	510	R\$ 244,80	65,8%
Julho	495	R\$ 237,60	63,4%
Agosto	539	R\$ 258,72	65,7%
Setembro	528	R\$ 253,44	65,8%
Outubro	555	R\$ 266,40	58,3%
Novembro	558	R\$ 267,84	57,2%
Dezembro	492	R\$ 236,16	48,1%
Soma	6242	R\$ 2.996,16	-
Mínimo	461	R\$ 221,28	47,9%
Máximo	558	R\$ 267,84	67,4%
Média	520,2	R\$ 249,68	57,9%

Conforme visto na Tabela 6 e no gráfico da Figura 10, há uma diferença substancial no gasto com energia elétrica entre os dois tipos de equipamento. Ao optar pela aquisição de um equipamento com maior tecnologia embarcada, tem-se um maior investimento no primeiro momento, mas que ao longo do tempo acaba sendo revertido devido a economia no consumo. Para o pastificio, esta economia de 520 kW.h por mês, equivalente a R\$ 249,68, é o bastante para recuperar, integralmente, o investimento em um prazo de treze meses.

7 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou a comparação da eficiência de dois sistemas de ar condicionado ao atender as necessidades de um pastificio. Para isto foram utilizados os *softwares* *OpenStudio®* para modelamento e o *EnergyPlus®* para simulação. Posteriormente, a eficiência foi convertida em custo, o que permitiu uma análise sobre o tipo de equipamento mais adequado visando os menores custos com a climatização.

A edificação possui apenas 97 m², mas a sua carga térmica é bastante elevada devido aos ganhos internos e ao período de atividade durante maior incidência solar. O resultado destes fatores é o funcionamento do AVAC quase sempre em regime de resfriamentos, no entanto o *inverter* se mostrou conveniente em ambos os regimes.

Comparando o sistema convencional com o sistema com inversor de frequência, foi possível confirmar a sua, considerável, maior eficiência e estimar o período necessário para obter o retorno (*payback*) do investimento adicional que se faz ao adquirir um equipamento com maior tecnologia embarcada. No caso estudado esse período é de treze meses.

8 BIBLIOGRAFIA

ABRAVA, Associação Brasileira de Refrigeração, Ar condicionados, Ventilação e Aquecimento. **“Cresce Tecnologia em Ar Condicionado que Permite Economia e Proteção”**, Segs, 2013.

ASHRAE, American Society of Heating, Refrigeration and air-conditioning Engineers. **“ASHRAE Handbook & Product Directory 1977 Fundamentals”**. New York. 1977.

Beyer, P. O. **Apostila de Climatização e Refrigeração**, Universidade Federal do Rio Grande Do Sul, UFRGS, Brasil, 2015.

Companhia Estadual de Energia Elétrica. “**Tarifas para poderes públicos**”. Disponível em: <http://www.ceee.com.br>. Acessado em 27 de Setembro de 2016.

EnergyPlus 8.5 disponível em <http://www.energy.gov>. Acessado em 10 de Agosto de 2016.

Google SketchUp, <http://www.sketchup.com/intl/pt-BR/>. Acessado em 10 de Agosto de 2016.

IceTecnica Ar Condicionado, <http://www.icetecnica.com.br/informacoes.html>. Acessado em 4 de Agosto de 2016.

Inventor, <https://www.inventorairconditioner.com/faq>. Acessado em 27 de Setembro de 2016.

LabEEE, www.labeee.ufsc.br. Acessado 4 de Agosto de 2016.

Machado, R. A. – “**Determinação dos Coeficientes e Avaliação das Equações de Desempenho de Condicionadores de Ar com Vazão de Refrigerante Variável**”, Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

Moran, M. J.; Shapiro H. N. “**Princípios de termodinâmica para engenharia**”. LTC, 2000, 4ª edição.

OpenStudio 1.0.14 disponível em <http://www.energy.gov>. Acessado em 10 de Agosto de 2016.

Pozza, F., “**Análise térmica e energética de uma edificação residencial climatizada com sistema de fluxo refrigerante variável – VRF**”, Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

WebArCondicionado, <http://www.webarcondicionado.com.br/>. Acessado em 27 de Setembro de 2016.