

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA – UFU  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA – FEMEC  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**GUILHERME OLIVEIRA GONÇALVES**

**AVALIAÇÃO TERMO-ECONÔMICA DA SUBSTITUIÇÃO DE FLUIDOS REFRIGERANTES  
EM EQUIPAMENTOS: CONDICIONAMENTO DE AR E CONSERVAÇÃO DE PRODUTOS  
EM UMA EMPRESA DE GRANDE PORTE**

**UBERLÂNDIA – MG  
AGOSTO DE 2017**

**GUILHERME OLIVEIRA GONÇALVES**

**AVALIAÇÃO TERMO-ECONÔMICA DA SUBSTITUIÇÃO DE FLUIDOS REFRIGERANTES  
EM EQUIPAMENTOS: CONDICIONAMENTO DE AR E CONSERVAÇÃO DE PRODUTOS  
EM UMA EMPRESA DE GRANDE PORTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

**Orientador: Prof. Dr. Arthur Heleno Pontes Antunes**

**UBERLÂNDIA – MG**

**2017**

**GUILHERME OLIVEIRA GONÇALVES**

**AVALIAÇÃO TERMO-ECONÔMICA DA SUBSTITUIÇÃO DE FLUIDOS REFRIGERANTES  
EM EQUIPAMENTOS: CONDICIONAMENTO DE AR E CONSERVAÇÃO DE PRODUTOS  
EM UMA EMPRESA DE GRANDE PORTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Banca Examinadora

---

Prof. Dr. Arthur Heleno Pontes Antunes  
(Orientador – UFU)

---

Prof. Dr. Bruno Henrique Oliveira Mulina  
(Examinador – UFU)

---

Prof. Dr. Valério Luiz Borges  
(Examinador – UFU)

Uberlândia, 03 de Agosto de 2017

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por todas as bênçãos que Ele sempre proporcionou a mim em todos os momentos de minha vida, e pela sabedoria para conseguir dedicar ao máximo às atividades que sempre estive envolvido.

Agradeço aos meus familiares, que mesmo longe, sempre me deram total apoio em todas as decisões tomadas, principalmente durante o período de graduação, e em especial no período de intercâmbio na University of Alabama at Birmingham e na reta final do curso.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Arthur Heleno Pontes Antunes, pelo apoio, confiança e incentivo para realização deste trabalho, bem como toda a equipe de professores e técnicos administrativos da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, pelo suporte oferecido aos alunos durante toda a graduação.

Agradeço à toda equipe da Termo Eletro Ltda que me acolheu e apoiou desde o princípio do estágio em Julho de 2016 até o presente momento no desenvolvimento profissional e de projetos em meio a grandes indústrias multinacionais.

Agradeço à UFU e à FEMEC pelo compromisso com a formação de profissionais aptos ao mercado de trabalho e aos desafios que surgirão em nossas carreiras independentemente da área de atuação escolhida.

Agradeço a todos os colegas e amigos que contribuíram com a minha formação nas várias e dedicadas horas de estudo desde o início em Agosto de 2010.

## RESUMO

Os efeitos decorrentes do elevado consumo de produtos que são potenciais degradantes do meio ambiente, seja na destruição da camada de ozônio ou aquecimento global trouxe à tona reuniões entre os principais países desenvolvidos para que soluções para estes problemas, dando origem à dois protocolos sobre o referido assunto, o Protocolo de Montreal quanto à Convenção de Viena para a Proteção da Camada de Ozônio e o outro Protocolo de Kyoto quanto à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima.

Estes protocolos atingiram as diversas áreas da indústria, sendo uma delas a refrigeração, uma vez que fluidos refrigerantes utilizados no mercado são agentes que tem potenciais elevados de aquecimento global e outros que possuem um potencial de destruição da camada de ozônio, sendo que estes possuem prazo para sua total suspensão de comercialização no Brasil até o ano de 2040.

Tendo isto, o presente trabalho propõe-se a fazer um estudo de viabilização econômica para a substituição deste fluido em uma empresa do setor de grãos que possui muitos equipamentos que utilizam fluidos refrigerantes convencionais a partir da avaliação entre a utilização de equipamentos novos do tipo inverter ou através do retrofit para adotar fluidos refrigerantes que não degradem a camada de ozônio. Para obter esta análise, é utilizada uma metodologia de cálculo de custos envolvidos entre tempo de manutenção, equipamentos de manutenção necessários, mão-de-obra, vida útil dos equipamentos condicionadores de ar, investimento em novos equipamentos ou retrofit, tendo como base uma previsão no aumento do preço e dificuldade de aquisição de fluidos refrigerantes que se comportam de modo que degradem o meio ambiente.

Finalmente, são apresentados resultados para os valores de cada proposta a partir das vantagens e desvantagens de cada método, buscando assim identificar a alternativa que melhor atende para adequação quanto à norma que entrará em vigor nos próximos anos.

## ABSTRACT

The effects of high consumption of products that are potentially environmentally degrading, whether in the destruction of the ozone layer or global warming, has brought to the fore meetings between the major developed countries to find out solutions to these problems, giving rise to two protocols, the Montreal Protocol to the Vienna Convention for the Protection of the Ozone Layer and the Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change.

These protocols reached the various areas of the industry, one of which is refrigeration, since refrigerants used in the market are agents with high potential for global warming and there are still fluids that have a potential for destruction of the ozone layer, these have a deadline for their total extinction in Brazil until 2040.

The present work aims to make an economic feasibility study for the replacement of this fluid in a company in the grain sector that has many equipment that uses conventional refrigerants from the evaluation between the use of new equipment inverter-type or retrofitting equipment to adopt non ozone-depleting refrigerants. In order to obtain this analysis, a methodology is used to calculate the costs involved between maintenance time, maintenance equipment required, labor, air conditioners equipment life, investment in new equipment or retrofit, based on an increase forecast of the price and difficulty of acquiring refrigerant fluids that behave in a way that could degrade the environment.

Finally, results are presented for the values of each proposal based on the advantages and disadvantages of each method, thus seeking to identify the alternative that best suits to fit the norm that will come into force in the coming years.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluidos Refrigerantes utilizados para aplicações comerciais e industriais. (a) R22; (b) R404A; (c)R410A.....	11
Figura 2: Modelos de equipamentos de refrigeração. Em (a) equipamento de ar condicionado tipo split Hi-Wall Inverter, em (b) equipamento de ar condicionado tipo split Hi-Wall Convncional.....	13
Figura 3: Primeiras geladeiras refrigeradas à base de gelo. ....	15
Figura 4: Projeção do consumo de CFCs no Brasil desde até 2010.....	17
Figura 5: Mecanismo de destruição da Camada de Ozônio pelo radical Cloro. ....	17
Figura 6: Cronograma para redução do uso de HCFCs.....	21
Figura 7: Parte do Anexo C do Protocolo de Montreal. ....	22
Figura 8: Ciclo básico de refrigeração por compressão de vapor.....	24
Figura 9: Tipos de unidades evaporadoras existentes. Em (a) Ar condicionado split tipo Cassete; em (b) Ar condicionado split tipo Hi Wall; em (c) Ar condicionado split tipo Piso Teto.....	26
Figura 10: Cotrolador Full Gauge MT-543R instalado para acionamento de 2 equipamentos de ar condicionado para funcionamento simultâneo e de acordo com seu horário programado. ....	29
Figura 11: Trena a laser Bosch GLM 30. ....	32

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Relação entre fluido refrigerante e ODP. ....	20
Tabela 2: Relação entre fluido refrigerante e GWP. ....	23
Tabela 3: Relação da quantidade de equipamentos instalados. ....	26
Tabela 4: Equipamentos do Grupo 1. ....	28
Tabela 5: Equipamentos do Grupo 2. ....	28
Tabela 6: Itens a serem adquiridos para retrofit de todos os equipamentos da Tabela 3. ....	30
Tabela 7: Equipamentos do tipo inverter para serem adquiridos. ....	31

## LISTA DE ABREVIATURAS

- ASHRAE – American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
- BTU – *British Thermal Unit* (Unidade Térmica Britânica)
- CCM – Centro de Controle de Máquinas
- CFC – Clorofluorcarbono
- GWP – Potencial de Aquecimento Global
- HCFC – Hidroclorofluorcarbono
- HFC – Hidrofluorcarboneto
- HFO – Hidrofluorolefina
- IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
- ODP – Potencial de Degradação da Camada de Ozônio
- PBH – Programa Brasileiro de Eliminação dos HCFCs
- PNC – Plano Nacional de Eliminação de CFCs
- POE – Óleo Polioléster
- R-11 – Fluido refrigerante 11
- R-12 – Fluido refrigerante 12
- R-22 – Fluido refrigerante 22
- R-404A – Fluido refrigerante 404A
- R-410A – Fluido refrigerante 410A
- R-438A – Fluido refrigerante 438A ou ISCEON MO99
- R-449A – Fluido refrigerante 449A ou Opteon XP40
- R-452A – Fluido refrigerante 452A ou Opteon XP44
- R-502 – Fluido refrigerante 502
- SDOs – Substâncias que Destroem a Camada de Ozônio

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
1.1	FLUIDOS REFRIGERANTES .....	10
1.2	OBJETIVOS .....	11
1.3	METODOLOGIA .....	12
1.3.1	<i>Mapeamento de Todos os Equipamentos de Refrigeração</i> .....	12
1.3.2	<i>Levantamento para Retrofit de Equipamentos de Ar Condicionado</i> .....	13
1.3.3	<i>Levantamento dos Custos de Instalação de Novos Equipamentos de Ar Condicionado</i> .....	13
1.3.4	<i>Cálculo do Consumo Energético Total</i> .....	13
1.3.5	<i>Simulação de Cronograma para Ambos Cenários Propostos</i> .....	14
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	14
<b>2</b>	<b>EVOLUÇÃO DOS FLUIDOS REFRIGERANTES</b> .....	<b>15</b>
2.1	PROTOCOLO DE MONTREAL .....	16
2.2	AQUECIMENTO GLOBAL .....	18
2.3	PROTOCOLO DE KYOTO .....	18
2.4	CLOROFLUORCARBONOS – CFCs .....	19
2.5	HIDROCLOROFLUORCARBONOS (HCFCs) .....	20
2.5.1	<i>Refrigerante 22</i> .....	21
2.6	HIDROFLUORCARBONOS (HFCs) .....	22
2.7	HIDROFLUOROLEFINAS (HFOs) .....	23
2.8	CICLO DE REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO DE VAPOR .....	23
<b>3</b>	<b>AVALIAÇÕES ECONÔMICAS PARA SUBSTITUIÇÃO DO R-22</b> .....	<b>26</b>
3.1	MAPEAMENTO DOS EQUIPAMENTOS QUE DEVERÃO SER SUBSTITUÍDOS .....	26
3.2	CENÁRIO 1 – RETROFIT COM FLUIDO REFRIGERANTE R-438A .....	29
3.3	CENÁRIO 2 – SUBSTITUIÇÃO POR NOVOS EQUIPAMENTOS .....	31
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>33</b>
4.1	ATENDIMENTO ÀS NORMAS DO PROTOCOLO DE MONTREAL .....	33
4.2	CUSTO TOTAL DE ENERGIA ELÉTRICA .....	33
4.3	CUSTO TOTAL PARA INVESTIMENTO INICIAL .....	34
4.4	AVALIAÇÃO DE CONSUMO X TEMPO .....	34
4.5	CRONOGRAMA PARA INSTALAÇÃO DE EQUIPAMENTOS .....	36
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>37</b>
<b>6</b>	<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>38</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Sistemas frigorígenos são utilizados para manter ambientes climatizados de acordo com a demanda para retirada de calor do ambiente a uma taxa determinada por hora. Esta taxa de calor varia de acordo com a quantidade de energia gerada por parte de tudo que está interno àquele meio, como por exemplo equipamentos eletrônicos de uma sala de escritório, e também devido a fatores externos como a energia solar que é transferida para o interior do ambiente climatizado através das paredes e janelas. As condições desejadas para estes ambientes devem levar em consideração os índices de climatização desejados para determinado produto ou condição específica de conforto térmico, assim sendo, a quantidade de equipamentos varia de acordo com a capacidade térmica de refrigeração e condições físicas para a instalação, ambos visando a escolha certa do equipamento de ar condicionado a ser utilizado.

Cada sistema possui suas aplicações e restrições de acordo com seu tipo de operação, faixa de trabalho, componentes, tempo de operação, condições do ambiente e aplicação. Um dos componentes fundamentais destes sistemas chama-se fluido refrigerante, agente responsável por absorver calor do ambiente a ser refrigerado e liberar este mesmo calor em outro meio, ambos processos realizados quando o fluido se desloca através das tubulações envolvidas pelas unidades evaporadora e condensadora.

### 1.1 Fluidos Refrigerantes

O fluido refrigerante é um elemento do ciclo de refrigeração por compressão a vapor e é fundamental para que seja feita a troca de calor no meio a ser refrigerado e ambiente que receberá calor do fluido. São necessárias algumas condições de operação quanto a faixa de temperatura e pressão as quais será submetido para garantir seu estado físico de vapor antes de chegar até o compressor, uma vez que líquidos são incompressíveis, portanto resultaria em uma possível quebra do equipamento.

Em virtude das condições de refrigeração serem diversas, muitas vezes o mesmo fluido não atende demandas diferentes, como quando comparamos a refrigeração industrial e a residencial. Porém em casos específicos o mesmo fluido poderá ser utilizado em virtude da sua faixa de trabalho e também da sua compatibilidade com os componentes do sistema frigorígeno.

**Figura 1:** Fluidos Refrigerantes utilizados para aplicações comerciais e industriais. (a) R22; (b) R404A; (c) R410A.



(a)



(b)



(c)

Fonte: O autor (2017).

O Refrigerante 22 (R-22) pertence à classe dos HCFCs e terá a sua utilização regulada em virtude do seu potencial de destruição da camada de ozônio, tornando a sua comercialização cada vez mais restrita. Os outros dois fluidos, R-404A e R-410A pertencem à classe dos HFCs e não degradam a camada de ozônio e vem sendo muito utilizados em sistemas de refrigeração industrial e comercial.

Devido à necessidade de operação em condições específicas de temperatura e pressão, os fluidos refrigerantes foram se desenvolvendo com o passar dos anos de modo a adequar os sistemas frigorígenos para sua melhor eficiência e rendimento. No entanto, a partir das discussões em torno do impacto que o desenvolvimento industrial estava causando no meio ambiente e os principais agentes responsáveis pela degradação da camada de ozônio e aquecimento global, iniciaram-se de estudos para a evolução de fluidos refrigerantes não apenas voltados para sua qualidade de refrigeração, mas também com potencial de degradação do meio ambiente reduzido.

## 1.2 Objetivos

Diversos fatores motivam a execução deste trabalho:

1. Adequação às normas ambientais que já estão em vigor e tendem a se tornar cada vez mais rigorosas para aquisição de um fluido refrigerante que possui potencial de degradação do meio ambiente.

2. A utilização de equipamentos que atuam como inversor de frequência pode se mostrar vantajosa em relação ao retrofit, uma vez que a longo prazo, seu consumo de energia tende a ser menor, não se mostrando viável no atual cenário o investimento apenas na troca por outros fluidos refrigerantes, fazendo um comparativo econômico.

3. Planeja-se montar um cronograma para manutenção ou troca de equipamentos seja de forma gradativa e tenha um impacto reduzido no custo, principalmente de mão-de-obra buscando o aproveitamento da força de trabalho já contratada para serviços de manutenção preventiva pela própria multinacional, viabilizando ainda mais a questão econômica.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar economicamente a substituição de um fluido refrigerante que ainda possui impacto na camada de ozônio através de duas vertentes iniciais, utilização de novos equipamentos com tecnologia inverter com valor agregado inicial maior, porém propõe que o consumo energético seja reduzido, ou através do retrofit dos equipamentos passando a utilizar fluidos refrigerantes que não sejam agressivos à camada de ozônio. Para isto, serão avaliados os custos envolvidos para a instalação de ambos sistemas.

### **1.3 Metodologia**

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram realizadas as seguintes etapas para atingir o objetivo proposto:

#### **1.3.1 Mapeamento de Todos os Equipamentos de Refrigeração**

Para que fossem levantados os custos para retrofit ou substituição dos equipamentos, primeiro foram verificados todos os equipamentos *in loco* que devem ser substituídos para adequação ao Protocolo de Montreal até 2040, bem como as suas características de operação e instalação.

### 1.3.2 Levantamento para Retrofit de Equipamentos de Ar Condicionado

Na análise do cenário atual, a primeira opção para substituição do Refrigerante 22 (HCFC 22 ou R-22) é o retrofit dos equipamentos já existentes, ou seja, modernizar os equipamentos atuais substituindo a menor quantidade de componentes possível. Para isso foram levantados os custos de manutenção, peças e fluidos para adequação dos sistemas de refrigeração de conforto da multinacional.

### 1.3.3 Levantamento dos Custos de Instalação de Novos Equipamentos de Ar Condicionado

A partir da quantidade de equipamentos a serem substituídos por outros do tipo inverter, foi solicitado um orçamento com o modelo de todos os equipamentos modelo inverter ou que operem com o Refrigerante 410A (HFC 410A ou R-410A) que deveriam ser fornecidos para substituição. O R-410A é o fluido mais utilizado pelos fabricantes de equipamentos de condicionamento de ar para refrigeração comercial e residencial.

**Figura 2:** Modelos de equipamentos de refrigeração. Em (a) equipamento de ar condicionado tipo split Hi-Wall Inverter, em (b) equipamento de ar condicionado tipo split Hi-Wall Convncional.



Fonte: <http://www.mideadobrasil.com.br> (Acesso em 27 de Julho de 2017).

### 1.3.4 Cálculo do Consumo Energético Total

Para substituição dos equipamentos ou retrofit será avaliado todo o consumo energético dos equipamentos a partir dos dados apresentados nas suas fichas técnicas, possibilitando uma estimativa de acordo com o tempo médio de operação diária em ambos os

cenários anteriormente avaliados e a partir dos valores encontrados, optar pela melhor solução para substituição dos HCFCs.

### **1.3.5 Simulação de Cronograma para Ambos Cenários Propostos**

A partir dos dados levantados, será possível identificar o melhor cronograma para cada tipo de substituição de acordo com sua viabilidade de cada um dos cenários e a partir disso avaliar os ganhos reais tanto no quesito ambiental quanto econômico através do investimento a ser realizado.

## **1.4 Organização do Trabalho**

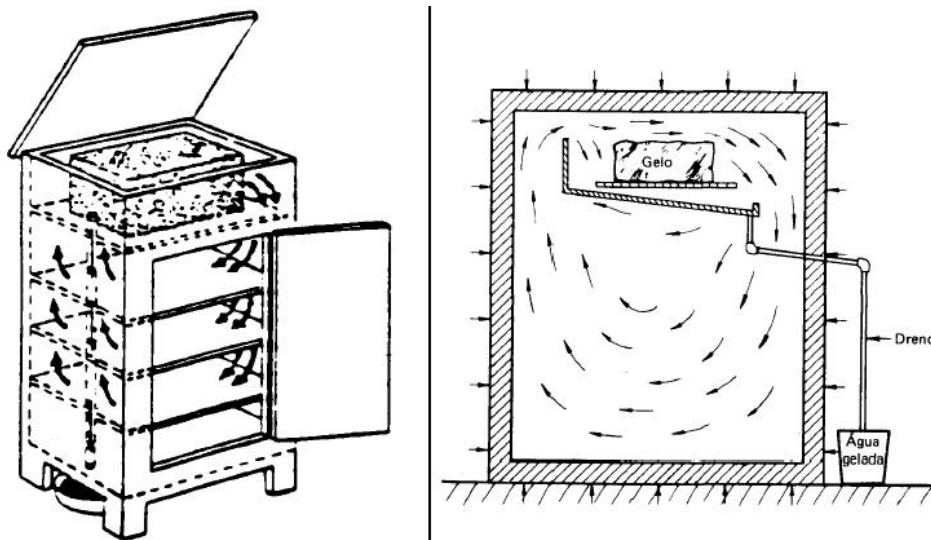
Para uma abordagem mais didática sobre o tema, o presente trabalho foi dividido em capítulos. No Capítulo 2, será feita uma revisão da literatura sobre a evolução dos fluidos refrigerantes utilizados para refrigeração de ambientes climatizados. Os levantamentos econômicos referentes a cada um dos cenários propostos são apresentados no Capítulo 3. No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos e também proposto o cronograma para realização do projeto. Considerações e conclusões serão apresentadas no Capítulo 5, finalizando assim este trabalho.

## 2 EVOLUÇÃO DOS FLUIDOS REFRIGERANTES

O presente capítulo tem como objetivo apresentar as características, aplicações e comportamento dos fluidos refrigerantes que serão avaliados neste trabalho conforme descrito pela American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (2005), pelos Protocolo de Montreal (1987) e Protocolo de Kyoto (1997), e pelo Ministério do Meio Ambiente (2011)

Os processos de refrigeração não se tratam de necessidades da sociedade atual, mas sim, desde quando o homem se viu com a necessidade de estocar comida para sua conservação pelo frio. No entanto, o desenvolvimento de tecnologias que fossem capaz de proporcionar tal refrigeração começou a ter destaque em 1918 com o surgimento do primeiro refrigerador automático, uma invenção da Kelvinator Company nos Estados Unidos após uma série de invenções utilizando gelo como meio de produção de frio isolado por placas de cortiça.

**Figura 3:** Primeiras geladeiras refrigeradas à base de gelo.



Fonte: Ferraz e Gomes (2008).

Após a difusão desta solução para que fossem conservados alimentos, uma série de estudos passaram a ser desenvolvidos na busca de elementos que pudessem compor um circuito de refrigeração sem que houvesse a necessidade de repor qualquer tipo de agente refrigerante com o tempo, ou seja, criar um sistema fechado no qual algum fluido pudesse remover calor de um local e rejeitar para outro. Assim iniciou-se o estudo sobre os fluidos refrigerantes.

Fluidos refrigerantes são os elementos responsáveis por garantir as trocas de calor entre o meio e o equipamento de refrigeração através da absorção de calor do local a ser refrigerado (ambiente interno) e rejeição de calor para o outro local, podendo ser um local específico que se deseja aquecer ou o próprio meio ambiente. Este processo geralmente ocorre através de processos físicos de evaporação e condensação. Além disso, tratam-se de elementos que devem possuir uma série de características que permitam a troca de calor nas condições impostas.

Dentre as características necessárias, as principais são:

- Evaporar-se a pressões superiores à pressão atmosférica;
- Condensar-se a pressões moderadas;
- Possuir pequeno volume específico;
- Possuir elevado calor latente de vaporização;
- Possuir estabilidade química;
- Não ser corrosivo;
- Não ser inflamável (condição desejável);

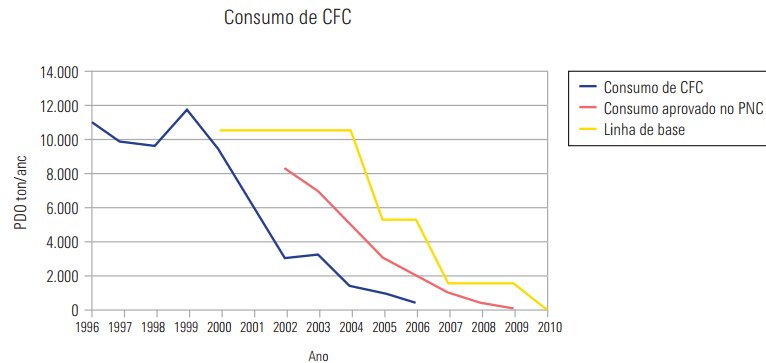
## **2.1 Protocolo de Montreal**

Em 1985, visando o controle de produção e monitoramento dos CFCs, foi realizado na Áustria a Convenção de Viena para a Proteção da Camada de Ozônio que contribuiu para que dois anos depois surgisse o Protocolo de Montreal sobre Substâncias que Destroem a Camada de Ozônio. Este tratado entrou em vigor em 01 de Janeiro de 1987, cujo acordo ambiental entre todos os países é o comprometimento em proteger a camada de ozônio.

No Brasil, os efeitos do Protocolo de Montreal passaram a valer a partir do Decreto Nº 99.280, de 6 de Junho de 1990, tendo continuidade com emendas feitas ao protocolo em Londres, Copenhague, Montreal e Pequim com os decretos 181 de 24 de Julho de 1991, 2.679 de 17 de Julho de 1998 e 5.280 de 22 de Novembro de 2004. Em 2002 foi criado o PNC – Plano Nacional de Eliminação dos CFCs, o qual teve como medidas adotadas a entrega de máquinas recolhedoras de gás, implantação de centrais de regeneração, elaboração de normas técnicas, combate ao comércio ilícito de substâncias que degradam a camada de ozônio, fornecimento de treinamentos técnicos para refrigeristas e difusão de informações tecnológicas sobre o tema.

Após a adesão ao Protocolo de Montreal, o Brasil eliminou o uso de CFCs em 2010, com raras excessões de importação fiscalizadas pelo IBAMA e pelo Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior através do Sistema Integrado de Comércio Exterior – SISCOMEX.

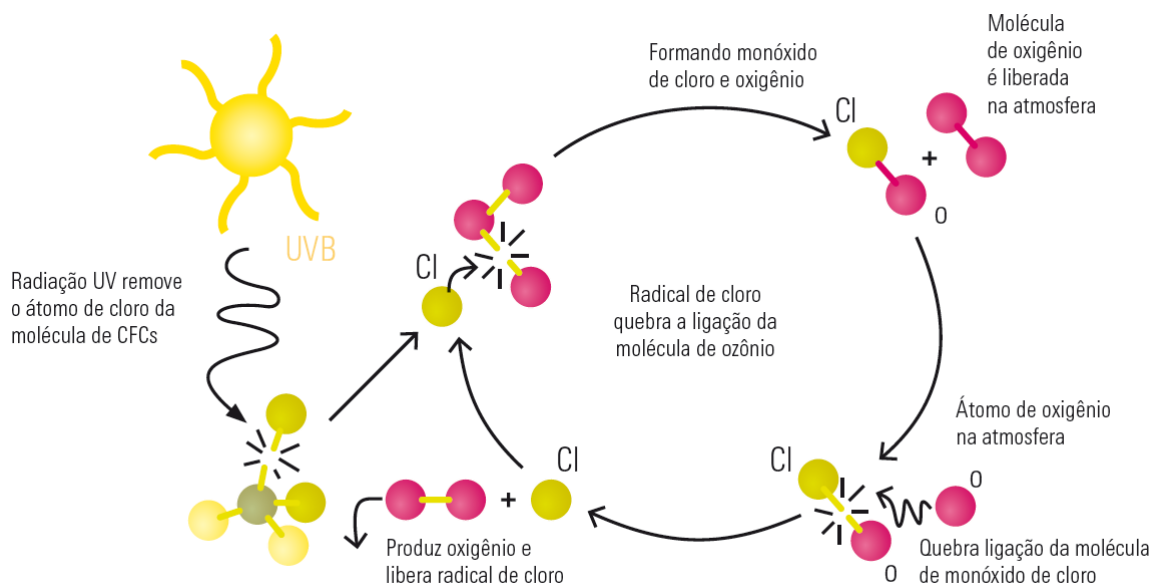
**Figura 4:** Projeção do consumo de CFCs no Brasil desde até 2010.



Fonte: <http://www.protocolodemontreal.org.br/site/> (Acesso em 27 de Julho de 2017).

Em 1974, os químicos F. Sherwood Rowland e Mario Molina, da Universidade da Califórnia em Irvine previram o fator que torna o CFC um agente altamente nocivo à camada de ozônio, o radical cloro formado a partir da exposição de moléculas estáveis à radiação ultravioleta na estratosfera. Segundo estimativas, um radical de cloro possui potencial para destruir 100.000 moléculas de ozônio através de reações em cadeia (GIRARD, 2016).

**Figura 5:** Mecanismo de destruição da Camada de Ozônio pelo radical Cloro.



Fonte: Manual de ajuda para o controle de substâncias que destroem a Camada de Ozônio.

## 2.2 Aquecimento Global

O aquecimento global é um mecanismo natural que ocorre a partir da absorção da energia solar pelo planeta Terra. No entanto, esta energia absorvida tende a ser irradiada na mesma proporção, gerando assim um equilíbrio. No entanto, existem alguns fatores que dificultam a emissão desta energia para fora do planeta, ocasionando assim um aumento indesejado da temperatura global. Tendo em vista as consequências do aquecimento global, as conferências climáticas passaram a ganhar grande destaque nas mídias mundiais.

Os grandes vilões deste tema são os chamados gases do efeito estufa, pois trata-se de agentes que agravam ainda mais o aquecimento global. Dentre todos os gases responsáveis pelo efeito estufa, os HFCs podem ser citados como agentes que possuem elevado potencial de aquecimento global, uma vez que possuem GWP médio ou alto, ou seja, entre 150 a 2500 ou maior que 2500, respectivamente.

## 2.3 Protocolo de Kyoto

Realizada na cidade do Rio de Janeiro no ano de 1992, a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima tinha como objetivo propor ações para estabilizar as concentrações dos gases causadores do efeito estufa na atmosfera, de modo que não ocorressem alterações climáticas perigosas em detrimento de ações do homem.

Esta convenção acabou dando origem ao Protocolo de Kyoto assinado em 1997, com diversos compromissos assinados por todos os países que se comprometeram com as obrigações contidas em tal documento. Dentre os principais pontos, podem ser salientados os seguintes:

- Implementar e/ou aprimorar políticas e medidas de acordo com suas circunstâncias nacionais (aumento da eficiência energética em setores relevantes da economia, promoção de formas sustentáveis de agricultura, promoção do uso de energias renováveis, entre outros de acordo com o Artigo 2 do protocolo);
- Aumento da eficácia, individual e combinada com os outros países, das políticas e medidas adotadas para regular as emissões de gases do efeito estufa;
- Limitar ou reduzir as emissões de gases do efeito estufa que não são controlados pelo Protocolo de Montreal;

- Assegurar que as emissões dos gases do efeito estufa sejam controladas de acordo com os valores determinados pelo Protocolo de Kyoto em seu Anexo A;
- Estabelecer um sistema nacional para estimar as emissões antrópicas dos gases do efeito estufa;
- Formular programas nacionais e/ou regionais adequados e eficazes para melhorar a qualidade dos fatores de emissão, dados de atividade e/ou modelos locais de acordo com as condições socioeconômicas de cada país;

Em suma, o Protocolo de Kyoto tinha como objetivo primordial estabelecer regulamentações sustentáveis para o desenvolvimento dos países signatários de modo a regular e garantir que as emissões de gases do efeito estufa fossem controladas e reportadas pelos próprios membros do protocolo para a Organização das Nações Unidas e todos as outras Partes.

Apesar do Protocolo de Kyoto ter iniciado sua assinatura no ano seguinte a sua elaboração, só entrou em vigor em 2005, quando foi atendida a exigência do Artigo 25, o qual afirma que só entraria em vigor tal protocolo com a adesão de pelo menos 55 países signatários do protocolo, incluindo os países do seu Anexo I (Alemanha, Austrália, Áustria, Bélgica, Bulgária, Canadá, Comunidade Européia, Croácia, Dinamarca, Eslováquia, Eslovênia, Espanha, Estados Unidos da América, Estônia, Federação Russa, Finlândia, França, Grécia, Hungria, Irlanda, Islândia, Itália, Japão, Letônia, Liechtenstein, Lituânia, Luxemburgo, Mônaco, Noruega, Nova Zelândia, Países Baixos, Polônia, Portugal, Reino Unido da Grã-Bretanha e Irlanda do Norte, República Tcheca, Romênia, Suécia, Suíça e Ucrânia) contabilizassem pelo menos 55% das emissões totais de dióxido de carbono em 1990 dos mesmos países do anexo.

## **2.4 Clorofluorcarbonos – CFCs**

Esses elementos formaram a primeira família de fluidos refrigerantes desenvolvidos desde a década de 1930, compostos de moléculas de cloro, flúor e carbono. Os principais refrigerantes desta família que merecem destaque são: R-11 e R-12. Em virtude do efeito degradante da camada de ozônio que estas substâncias possuem suas produções foram interrompidas em 2010.

A descoberta que estes fluidos destroem a camada de ozônio foi feita na década de 1970 e esta destruição tornou-se um tema muito difundido nos anos seguintes em virtude de todo o impacto que teria no planeta, uma vez que é esta camada da atmosfera que absorve

parte da radiação ultravioleta enviada pelo Sol. Além da exposição a este tipo de radiação que dentre vários impactos um dos mais graves é o câncer de pele, o efeito estufa também se agrava com a destruição desta camada.

O termo ODP – *Ozone Depletion Potential* ou Potencial de Degradação da Camada de Ozônio passou a ser empregado para medir o grau de impacto de cada substância, sendo adotado como padrão o valor 1,0 para o R-11. Abaixo temos uma tabela com o valor de cada substância.

**Tabela 1:** Relação entre fluido refrigerante e ODP.

<b>FLUIDO REFRIGERANTE</b>	<b>CLASSE</b>	<b>ODP</b>
R-11	CFC	1
R-12	CFC	1
R-22	HCFC	0.055
R-134A	HFC	Zero
R-404A	HFC	Zero
R-410A	HFC	Zero
R-438A	HFC	Zero
R-449A (XP40)	HFO	Zero

## 2.5 Hidroclorofluorcarbonos (HCFCs)

Segundo um material publicado pelo Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) de Santa Catarina, os HCFCs passaram a ser utilizados a partir da década de 1950, com destaque para o Refrigerante 22 e o Refrigerante 502, porém vale destacar o primeiro em virtude de sua grande utilização em sistemas de refrigeração por compressão de vapor atuais.

Assim como os CFCs, os HCFCs também possuem cloro na sua estrutura e também possuem um prazo limite para sua eliminação, 2040 segundo o PBH – Programa Brasileiro de Eliminação dos HCFCs que foi aprovado em 2011 e estabelece um cronograma para redução completa da utilização de refrigerantes desta família conforme figura abaixo.

**Figura 6:** Cronograma para redução do uso de HCFCs.

**Linha de Base = Média do consumo nos anos 2009 e 2010**

2013 → congelamento no valor da Linha de Base

2015 → redução de 10% em relação à Linha de Base

2020 → redução de 35% em relação à Linha de Base

2025 → redução de 67,5% em relação à Linha de Base

2030\* → redução de 97,5% em relação à Linha de Base

2040 → redução de 100% em relação à Linha de Base

\* o consumo residual (2,5%) poderá ser usado apenas para o setor de serviço

Fonte: Programa Brasileiro de Eliminação dos HCFCs (2011).

### 2.5.1 Refrigerante 22

O clorodifluormetano, ou simplesmente R-22 ainda é muito utilizado em sistemas de refrigeração, principalmente aqueles mais antigos que ainda continuam operando mesmo após sua vida útil já ter sido ultrapassada em virtude da sua elevada demanda. A aquisição de equipamentos que operam com este fluido é rara, uma vez que a redução de sua utilização e de todos os outros HCFCs está em fase de redução constante até sua total proibição conforme Figura 5 ilustrada previamente.

Esta substância se enquadra no Grupo 1 do Anexo C do Protocolo de Montreal referente às substâncias degradantes da camada de ozônio, conforme exposto abaixo.

Figura 7: Parte do Anexo C do Protocolo de Montreal.

Grupo	Substância	Número de isômeros	Potencial de deterioração da camada de ozônio (¹)
<b>Grupo I</b>			
<i>CHFCl<sub>2</sub></i> .....	(HCFC-21) (²)	1	0,04
<i>CHF<sub>2</sub>Cl</i> .....	(HCFC-22) (²)	1	0,055
<i>CH<sub>2</sub>FCl</i> .....	(HCFC-31)	1	0,02
<i>C<sub>2</sub>HFC<sub>4</sub></i> .....	(HCFC-121)	2	0,01-0,04
<i>C<sub>2</sub>HF<sub>2</sub>Cl<sub>3</sub></i> .....	(HCFC-122)	3	0,02-0,08
<i>C<sub>2</sub>HF<sub>3</sub>Cl<sub>2</sub></i> .....	(HCFC-123)	3	0,02-0,06
<i>CHCl<sub>2</sub>CF<sub>3</sub></i> .....	(HCFC-123) (²)	-	0,02
<i>C<sub>2</sub>HF<sub>4</sub>Cl</i> .....	(HCFC-124)	2	0,02-0,04
<i>CHFClCF<sub>3</sub></i> .....	(HCFC-124) (²)	-	0,022
<i>C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>FCl<sub>3</sub></i> .....	(HCFC-131)	3	0,007-0,05
<i>C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>F<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub></i> .....	(HCFC-132)	4	0,008-0,05
<i>C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>F<sub>3</sub>Cl</i> .....	(HCFC-133)	3	0,02-0,06
<i>C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>FCl<sub>2</sub></i> .....	(HCFC-141)	3	0,005-0,07
<i>CH<sub>3</sub>CFCl<sub>2</sub></i> .....	(HCFC-141b) (²)	-	0,11
<i>C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>F<sub>2</sub>Cl</i> .....	(HCFC-142)	3	0,008-0,07
<i>CH<sub>3</sub>CF<sub>2</sub>Cl</i> .....	(HCFC-142b) (²)	-	0,065
<i>C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>FCl</i> .....	(HCFC-151)	2	0,003-0,005
<i>C<sub>3</sub>HFCl<sub>6</sub></i> .....	(HCFC-221)	5	0,015-0,07
<i>C<sub>3</sub>HF<sub>2</sub>Cl<sub>5</sub></i> .....	(HCFC-122)	9	0,01-0,09
<i>C<sub>3</sub>HF<sub>3</sub>Cl<sub>4</sub></i> .....	(HCFC-223)	12	0,01 -0,08
<i>C<sub>3</sub>HF<sub>4</sub>Cl<sub>3</sub></i> .....	(HCFC-224)	12	0,01-0,09
<i>C<sub>3</sub>HF<sub>5</sub>Cl<sub>2</sub></i> .....	(HCFC-225)	9	0,02-0,07
<i>CF<sub>3</sub>CF<sub>2</sub>CHCl<sub>2</sub></i> .....	(HCFC-225ca) (²)	-	0,025
<i>CF<sub>2</sub>ClCF<sub>2</sub>CHClF</i> .....	(HCFC-225cb) (²)	-	0,033
<i>C<sub>3</sub>HF<sub>6</sub>Cl</i> .....	(HCFC-226)	5	0,02-0,10
<i>C<sub>3</sub>H<sub>2</sub>FCl<sub>5</sub></i> .....	(HCFC-231)	9	0,05-0,09
<i>C<sub>3</sub>H<sub>2</sub>F<sub>2</sub>Cl<sub>4</sub></i> .....	(HCFC-232)	16	0,008-0,10
<i>C<sub>3</sub>H<sub>2</sub>F<sub>3</sub>Cl<sub>3</sub></i> .....	(HCFC-233)	18	0,007-0,23
<i>C<sub>3</sub>H<sub>2</sub>F<sub>4</sub>Cl<sub>2</sub></i> .....	(HCFC-234)	16	0,01-0,28

Fonte: Protocolo de Montreal sobre as Substâncias que Empobrecem a Camada de Ozônio (1987).

As propriedades do R-22 garantem que ele possa ser utilizado para aplicações de baixas e médias temperaturas, o que explica a sua utilização em sistemas de condicionamento de ar para conforto térmico ou conservação de temperaturas que variam de 10°C a 24°C.

## 2.6 Hidrofluorcarbonos (HFCs)

Estas substâncias não possuem cloro em sua composição, portanto não sofrerão nenhum tipo de consequência relativo à sua utilização em virtude do Protocolo de Montreal. Por isso compõem uma vasta gama de fluidos refrigerantes presentes na refrigeração industrial, comercial e residencial, sendo que os mais utilizados são: R-134A, R-404A e R-410A.

Apesar do suprimento da exigência do Protocolo de Montreal, possuir zero ODP, os HFCs possuem um outro impacto sobre o meio ambiente, pois tratam-se de agentes agravantes do efeito estufa devido ao fato de geralmente possuírem elevados valores de

Potencial de Aquecimento Global (GWP – *Global Warming Potential*) que também é um valor medido a partir do valor de referência para o CO<sub>2</sub>, determinado como sendo 1.

**Tabela 2:** Relação entre fluido refrigerante e GWP.

FLUIDO REFRIGERANTE	CLASSE	GWP
CO <sub>2</sub>	Natural	1
R-12	CFC	10900
R-22	HCFC	1870
R-134A	HFC	1430
R-404A	HFC	3922
R-410A	HFC	2088
R-438A	HFC	2264
R-449A (XP40)	HFO	1282

## 2.7 Hidrofluorolefinas (HFOs)

Tratam-se da última geração de fluidos refrigerantes desenvolvidos com o objetivo de substituir os HCFCs e HFCs utilizados no mercado da refrigeração, porém por se tratar de substâncias desenvolvidas nos últimos anos a disponibilidade para aquisição destes fluidos ainda é um pouco menor em comparação aos HFCs.

Dentre os principais refrigerantes desta família, podem ser citados os precursores R-1234yf e R-1234ze, sendo que o primeiro possui propriedades termofísicas similares ao R-134A que é muito utilizado para refrigeração veicular, porém com índice de GWP igual a 4. Além destes dois, também podem ser citados o R-449A (Opteon XP40) e o R-452A (Opteon XP44), que vem sendo estudados para substituir o R-22 e R-404A dentre outros fluidos refrigerantes nos sistemas de refrigeração industrial de grande porte.

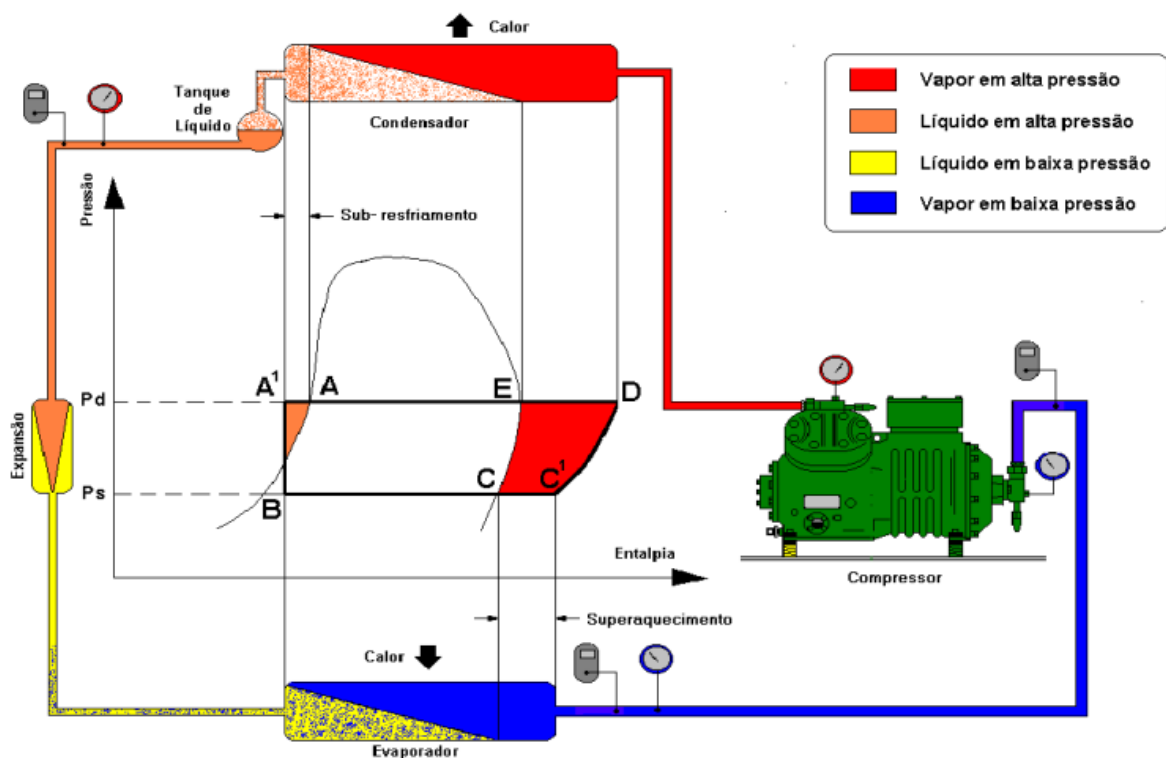
## 2.8 Ciclo de refrigeração por compressão de vapor

A refrigeração mecânica pode ser dividida em três grupos principais: Ciclo de refrigeração por compressão a vapor, ciclo de refrigeração por compressão em múltiplos estágios, e sistemas de refrigeração com recirculação de líquido, sendo que o primeiro é o

mais utilizado. Além destes métodos ainda existem a refrigeração por absorção e refrigeração termomagnética.

No ciclo de refrigeração por compressão a vapor, o sistema é composto basicamente por um compressor, condensador, dispositivo de expansão, evaporador, filtro secador e tanque reservatório de líquido. Estes elementos são interligados por tubulações, estas serão percorridas apenas pelo fluido refrigerante após inserido ao final de toda a montagem do sistema.

**Figura 8:** Ciclo básico de refrigeração por compressão de vapor.



Fonte: Bitzer - Boletim de Engenharia nº20 (2005).

Conforme a legenda da Figura 8, os fluidos refrigerantes percorrem o sistema no sentido anti-horário, ou seja, saem do compressor com elevada temperatura e pressão até chegar no condensador onde percorrerão uma serpentina para troca de calor com o meio ambiente até chegar no reservatório (tanque) de líquido, onde na parte inferior percorrem uma tubulação até o evaporador, passando antes pelo dispositivo de expansão para reduzir sua pressão e temperatura, possibilitando que seja feita a troca de calor entre o ambiente a ser climatizado e o fluido refrigerante até percorrer toda unidade evaporadora e por fim ser conduzido até o compressor.

É fundamental que o fluido refrigerante chegue no compressor em seu estado gasoso, uma vez que líquidos são incompressíveis, portanto caso retorne líquido para o compressor, estará sujeito a sérios danos e até mesmo a sua quebra.

Por estes motivos, a escolha do fluido refrigerante deve ser feita de acordo com o sistema de refrigeração instalado e suas condições de operação determinadas pelos fabricantes pelas propriedades termofísicas do refrigerante.

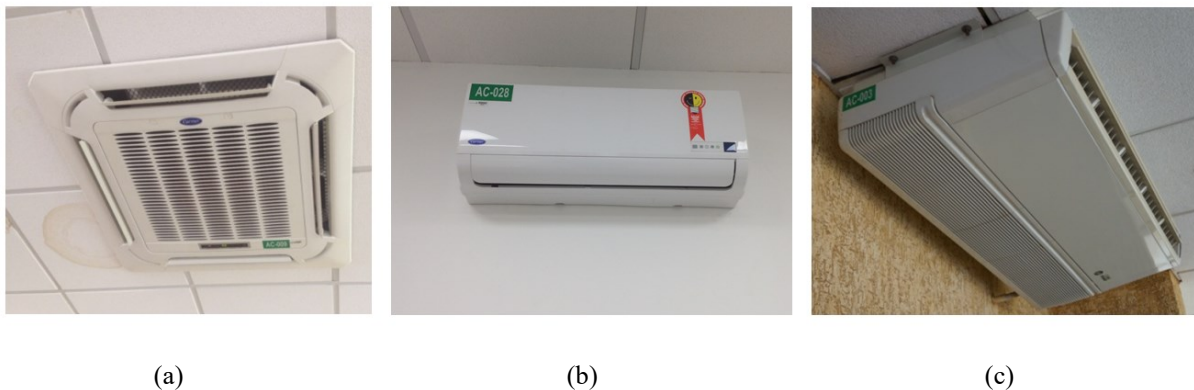
### 3 AVALIAÇÕES ECONÔMICAS PARA SUBSTITUIÇÃO DO R-22

Este capítulo irá abordar os cenários sugeridos para substituição do Clorodifluorometano, ou simplesmente R-22, por outros fluidos que não tenham potencial de destruição da camada de ozônio.

#### 3.1 Mapeamento dos Equipamentos que Deverão ser Substituídos

Com o levantamento *in loco* de todos os equipamentos de ar condicionado que devem ser substituídos por ainda estarem trabalhando com o R-22, identificou-se a existência de 3 tipos distintos de unidades evaporadoras dos refrigeradores split: Cassete, Hi Wall e Piso Teto.

**Figura 9:** Tipos de unidades evaporadoras existentes. Em (a) Ar condicionado split tipo Cassete; em (b) Ar condicionado split tipo Hi Wall; em (c) Ar condicionado split tipo Piso Teto.



Fonte: O autor (2017).

Neste levantamento, de acordo com o tipo de equipamento, foi identificado a quantidade de cada equipamento que deveria ser substituído ou passar pelo processo de retrofit, levando em consideração as diferentes capacidades térmicas de cada modelo expressa em BTU por hora.

**Tabela 3:** Relação da quantidade de equipamentos instalados.

TIPO DE EQUIPAMENTO	QUANTIDADE INSTALADA	CAPACIDADE TÉRMICA	TENSÃO X CORRENTE NOMINAL	CAPACIDADE DE FLUIDO REFRIGERANTE
Cassete	8	24.000 Btu/h	2442 W	900 g

Cassete	13	48.000 Btu/h	3058 W	2900 g
Hi Wall	30	9.000 Btu/h	880 W	570 g
Hi Wall	13	12.000 Btu/h	1210 W	670 g
Hi Wall	5	18.000 Btu/h	1815 W	1050 g
Hi Wall	11	24.000 Btu/h	2552 W	1131 g
Hi Wal	3	30.000 Btu/h	2930 W	1175 g
*Piso Teto	2	12.000 Btu/h	1584 W	1050 g
Piso Teto	1	18.000 Btu/h	2288 W	1130 g
Piso Teto	14	24.000 Btu/h	3300 W	1375 g
Piso Teto	2	30.000 Btu/h	3366 W	1550 g
Piso Teto	15	36.000 Btu/h	3916 W	1950 g
Piso Teto	5	48.000 Btu/h	4004 W	2400 g
Piso Teto	3	58.000 Btu/h	4222 W	2750 g

\* O equipamento do tipo split Piso Teto novo não foi encontrado disponível no mercado para substituição, porém, os locais onde estão instalados são duas sala de escritório distintas que permitem pelas configurações físicas a instalação de um equipamento do tipo split Hi Wall.

Após este levantamento, temos que a quantidade de equipamentos que devem ser adequados às normas do Protocolo de Montreal para eliminação de Substâncias que Destroem a Camada de Ozônio (SDOs) é de 125 divididos em 14 categorias quanto ao tipo e capacidade de refrigeração simultaneamente.

Com os dados da Tabela 3, estima-se que a quantidade instalada de fluido regrigrante é de aproximadamente 167 kg.

Para calcular os valores gastos com energia elétrica para estes equipamentos será considerado a adequação que está sendo feita para os ambientes climatizados. Essa adequação consiste em instalar temporizadores que controlem o funcionamento do equipamento de acordo com o período de utilização.

Para efeito de cálculo será considerado o período de atuação dos equipamentos de ar condicionado entre 07:30 e 18:00, com a ressalva de que alguns setores devem ter o equipamento ligados de forma ininterrupta, como por exemplo os equipamentos do refeitório e dos centros de controle de máquinas (CCMs), portanto todos os equipamentos serão divididos em 2 grandes grupos, sendo o Grupo 1 formado por equipamentos que não devem

ser desligados durante todo o ano e Grupo 2 formado por equipamentos que funcionam apenas no horário pré-estabelecido anteriormente, comandados pelo controlador instalado.

**Tabela 4:** Equipamentos do Grupo 1.

<b>TIPO DE EQUIPAMENTO</b>	<b>QUANTIDADE INSTALADA</b>	<b>POTÊNCIA DO EQUIPAMENTO</b>
Cassete	8	4385 W
Hi Wall	1	880 W
Hi Wall	2	1210 W
Hi Wall	1	2552 W
Hi Wall	1	2930 W
Piso Teto	4	3300 W
Piso Teto	1	4004 W
Piso Teto	2	4222 W

**Tabela 5:** Equipamentos do Grupo 2.

<b>TIPO DE EQUIPAMENTO</b>	<b>QUANTIDADE INSTALADA</b>	<b>POTÊNCIA DO EQUIPAMENTO</b>
Cassete	8	2442 W
Cassete	5	3058 W
Hi Wall	31	880 W
Hi Wall	11	1210 W
Hi Wall	5	1815 W
Hi Wall	10	2552 W
Hi Wall	2	2930 W
Piso Teto	1	2288 W
Piso Teto	10	3300 W
Piso Teto	2	3366 W
Piso Teto	15	3916 W
Piso Teto	4	4004 W
Piso Teto	1	4222 W

**Figura 10:** Controlador Full Gauge MT-543R instalado para acionamento de 2 equipamentos de ar condicionado para funcionamento simultâneo e de acordo com seu horário programado.



Fonte: O autor (2017).

### 3.2 Cenário 1 – Retrofit com Fluido Refrigerante R-438A

Baseado nas informações contidas no manual “Diretrizes de Retrofit” do fluido refrigerante Freon MO99 (R-438A) fabricado pela Chemours (desde julho de 2015 é a nova empresa referente a Divisão de Especialidades Químicas de Alta Performance da DuPont, e conseqüentemente responsável por toda a divisão de fluidos refrigerantes), seguem listadas as etapas para retrofit do R-22 em equipamentos para climatização de ambientes.

- Estabelecer uma referência dos parâmetros de operação do sistema antes de iniciar a substituição para o R-438A com objetivo de facilitar a parametrização do equipamento após a troca do fluido;
- Remover o R-22 utilizando uma bomba de vácuo e colocá-lo diretamente em um cilindro para destinação apropriada;
- Substituir o filtro secador e avaliar a necessidade de substituir as vedações e gaxetas de elastômeros utilizadas de acordo com o estado de conservação das mesmas;
- Remova o ar e outros gases existentes na tubulação através do processo de evacuação, possibilitando assim também indentificar a existência de vazamentos;
- Executar a carga de R-438A;
- Monitorar as pressões do sistema, os parâmetros de superaquecimento e subresfriamento, níveis de óleo para identificação de qualquer inconformidade com o sistema;

- Identificar as alterações feitas no sistema;

Além dos itens anteriores, vale ressaltar que a carga de gás deve ser aproximadamente 95% da carga original de R-22 e em casos de necessidade de reposição do óleo, pode ser feito utilizando lubrificante polioléster (POE).

Neste cenário, será prevista a troca do óleo lubrificante, do fluido refrigerante, frete para destinação correta do mesmo e filtros secadores, sendo que como este se trata de um item que pode variar para cada equipamento, para estimar o custo deste item será considerado um filtro secador que se adequa a sistemas que utilizam fluido refrigerante HFC e sistemas com faixa de temperatura entre  $-40^{\circ}\text{C}$  e  $70^{\circ}\text{C}$ . Para o óleo lubrificante, será considerado o volume de até 2000 ml por equipamento.

Tendo vista os dados acima, para avaliação de valores deste cenário, serão seguidas as informações da Tabela 5 abaixo, conforme orçamento solicitado à empresa prestadora de serviços de manutenção preventiva que possui contrato com a multinacional.

**Tabela 6:** Itens a serem adquiridos para retrofit de todos os equipamentos da Tabela 3.

DESCRIÇÃO DO ITEM	QUANTIDADE PARA SUBSTITUIÇÃO	UNIDADE DISPONÍVEL PARA COMPRA	VALOR UNITÁRIO
Fluido Refrigerante R-438A (Freon MO99)	167 kg	Cilindro de 11.35 kg	R\$1025.41
Filtro secador Danfoss	125	Peça Individual	R\$81.92
Óleo lubrificante POE	250 lt	Galão de 1 lt	R\$96.47
Frete R-22 para descarte adequado	-	-	R\$ 879.00

Considerações sobre a etapa de retrofit:

- Consiste em uma etapa que exige acompanhamento contínuo para ajustes nas regulagens de quantidade de fluido refrigerante, corrigir vazamentos ou substituir algum componente de vedação, portanto o valor final pode sofrer alterações;
- O consumo dos equipamentos tende a permanecer o mesmo, uma vez que o retrofit visa uma modernização para adequar à normas estabelecidas pelo Protocolo de Montreal;

- A quantidade de fluido refrigerante adquirida é superior à necessária porque cada cilindro de R-438A possui 11.35 kg, portanto a quantidade mínima para compra é de 15 cilindros, totalizando 170.25 kg de R-438A.
- O óleo substituído não acrescentará nenhum custo, uma vez que o descarte do mesmo é feito sob contrato com a empresa multinacional possui, onde o descarte está incluído sem alteração com volumes pequenos.

### 3.3 Cenário 2 – Substituição Por Novos Equipamentos

Considerando a substituição por equipamentos novos, a alternativa mais interessante quanto à questão do fluido refrigerante e tecnologia disponível no mercado são os equipamentos de refrigeração com tecnologia para controle de rotação do compressor que possuem um dispositivo trabalhando como um inversor de frequência para efetuar tal operação.

Os principais fabricantes de equipamentos de ar condicionado, Midea, LG, Samsung, Fujitsu, Carrier, garantem que este tipo de equipamento consegue economizar até 40% (alguns destes afirmam até 60%) no consumo de energia elétrica quando comparados com equipamentos convencionais.

Diferentemente do cenário 1, quando se é feita a aquisição de um equipamento de ar condicionado, o fluido refrigerante já está incluso no valor do produto, necessitando apenas a sua instalação, portanto, este item não será considerado para os cálculos deste cenário. Para esta etapa, serão considerados os custos de instalação de cada equipamento de acordo com um orçamento fornecido pela empresa Termo Eletro Ltda.

**Tabela 7:** Equipamentos do tipo inverter para serem adquiridos.

TIPO DE EQUIPAMENTO	QUANTIDADE INSTALADA	CAPACIDADE TÉRMICA	VALOR UNITÁRIO
Cassete	8	24.000 Btu/h	R\$5,450.00
Cassete	13	48.000 Btu/h	R\$8,580.00
Hi Wall	32	9.000 Btu/h	R\$2,210.00
Hi Wall	13	12.000 Btu/h	R\$2,600.00
Hi Wall	5	18.000 Btu/h	R\$4,300.00
Hi Wall	11	24.000 Btu/h	R\$5,420.00
Hi Wall	3	30.000 Btu/h	R\$5,280.00

Piso Teto	1	18.000 Btu/h	R\$8,620.00
Piso Teto	14	24.000 Btu/h	R\$9,795.00
Piso Teto	2	30.000 Btu/h	R\$12,215.00
Piso Teto	15	36.000 Btu/h	R\$12,315.00
Piso Teto	5	48.000 Btu/h	R\$15,645.00
Piso Teto	3	58.000 Btu/h	R\$17,742.00

Neste orçamento, também está incluso as tubulações de cobre das linhas de sucção e expansão, os elementos para realização de soldas nas tubulações e conexões, tubos esponjosos para envolvimento das tubulações e mão-de-obra para instalação dos equipamentos.

Conforme identificado anteriormente, os equipamentos do tipo split Piso Teto de 12.000 Btu/h com tecnologia inverter não foram encontrados disponíveis no mercado, porém suas instalações são feitas em duas salas de escritórios com parede de alvenaria que suportam a alteração para o tipo de equipamento split Hi Wall com tecnologia inverter de mesma capacidade de refrigeração e que possuem as mesmas configurações de linhas de sucção e expansão.

As medições para dimensionamento das tubulações foram feitas utilizando uma trena a laser da Bosch modelo GLM 30, com capacidade para medições de até 30 metros, e repassadas para orçamento das tubulações conforme os fabricantes dos equipamentos indicam em seus manuais de instalação.

**Figura 11:** Trena a laser Bosch GLM 30.



Fonte: O autor (2017).

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados do presente trabalho de acordo com os dados apresentados anteriormente para adequação de 125 equipamentos de ar condicionado de conforto instalados em uma empresa multinacional que devem substituir o fluido refrigerante R-22 por outro que atenda às exigências adotadas no Protocolo de Montreal e que também possam impactar da menor maneira possível no meio ambiente.

### 4.1 Atendimento às Normas do Protocolo de Montreal

Dentre os cenários propostos no presente trabalho, os dois fluidos refrigerantes propostos (R-438A e R-410A) atendem às exigências do protocolo, ou seja, não possuem potencial de degradação da camada de ozônio.

Outro ponto importante a ser analisado é o GWP destes fluidos refrigerantes. Conforme a Tabela 2, este índice para o R-438A e para o R-410A são 2264 e 2088, respectivamente, portanto, olhando para este dado, o segundo se mostra uma opção melhor para substituição do R-22.

### 4.2 Custo Total de Energia Elétrica

Considerando as Tabelas 3 e 4, a quantidade de dias úteis do ano de 2017 (252), o preço do kwh pago pela multinacional de acordo com a sua localização e contrato com a concedente (R\$0.29/kwh), potência dos equipamentos, tempo de operação dos mesmos, obtém-se o valor de referente ao consumo de energia elétrica entre 01 de Janeiro de 2017 a 31 de Dezembro de 2017 para os equipamentos de ar condicionado listados na Tabela 3, a partir do seguinte cálculo:

$$CT = \frac{Ne * Nd * Td * Pot * kWh}{1000} \quad (4.1)$$

Onde:

CT: Consumo total de energia elétrica;

Ne: Número de equipamentos;

Nd: Número de dias que o cada equipamento fica ligado por ano;

Td: Tempo ligado por dia;

Pot: Potência do equipamento;

kWh: Preço do kWh;

Vale ressaltar que esta fórmula deve ser aplicada duas vezes, uma para os equipamentos do Grupo 1 (dados na Tabela 4) e para os equipamentos do Grupo 2 ( dados na Tabela 5).

Realizando este cálculo, o valor encontrado é de R\$358.700,96. Considerando que os equipamentos de ar condicionado do tipo inverter possuem uma economia de até 60% em relação aos equipamentos convencionais, utilizando a margem de 35%, o valor economizado em energia elétrica por ano para os mesmos equipamentos estima-se que seja R\$125.994,77.

### 4.3 Custo Total para Investimento Inicial

Para o primeiro cenário, Retrofit dos Equipamentos atualmente instalados, o custo inicial pode ser calculado através dos dados da Tabela 5. Neste caso, o valor final para aquisição dos itens necessários para modernização dos equipamentos atuais é de R\$50.605,15, em média isto representa um total de R\$404,84 por equipamento.

Por outro lado, para instalação de novos equipamentos com tecnologia inverter, este custo aumenta consideravelmente. Calculado a partir dos dados da Tabela 6, o valor para investimento em novos aparelhos de ar condicionado é R\$842.976,00, aumentando a média por equipamento para aproximadamente R\$6.743,81.

### 4.4 Avaliação de Consumo x Tempo

Com base nas informações da seção 4.3, pode-se utilizar uma equação para avaliar o comportamento dos custos envolvidos pelo período tempo de utilização destes equipamentos, sendo o gasto, considerando apenas energia elétrica, uma função dependente do investimento inicial somado à quantidade de energia consumida pelo tempo de utilização.

$$G = I + (E * t) \quad (4.2)$$

Sendo:

G: Gasto [R\$];

I: Investimento inicial [R\$];

E: Gasto com energia elétrica por ano [R\$];

t: Tempo [anos].

- Equipamentos com Tecnologia Convencional

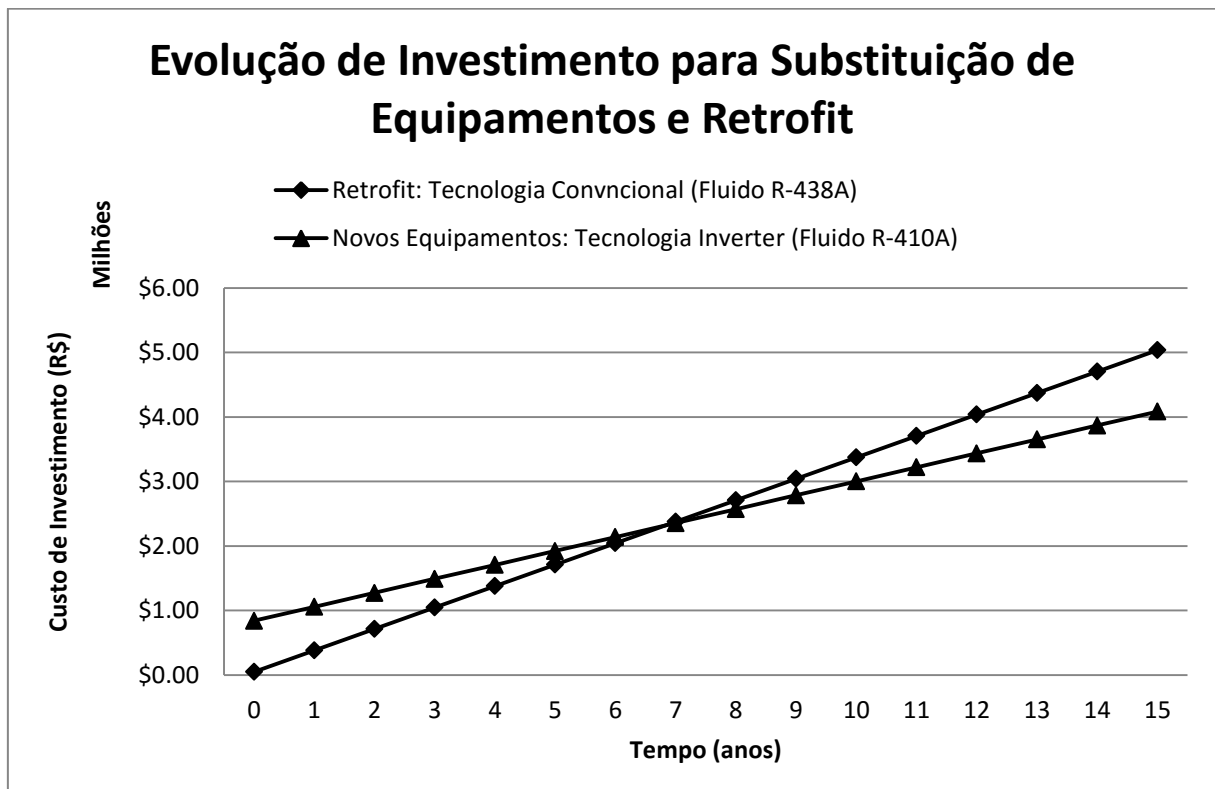
$$G = 50.605,15 + (332.453,79 * t) \quad (4.3)$$

- Equipamentos com Tecnologia Inverter

$$G = 842.976,00 + (216.094,96 * t) \quad (4.4)$$

Igualando as equações, chega-se ao valor de 6.8 anos (aproximadamente seis anos e dez meses) para que os equipamentos do tipo inverter tenham acumulado o mesmo valor em termos de consumo de energia e investimento para substituição. A seguir, o gráfico das equações avaliando os parâmetros custo x tempo para visualizar a evolução dos gastos.

**Gráfico 1:** Custos totais de energia elétrica e investimento inicial para substituição de equipamentos e retrofit.



#### **4.5 Cronograma para Instalação de Equipamentos**

Para ambos os cenários, pode ser considerado um tempo médio de substituição ou retrofit dos equipamentos de aproximadamente dois dias. Este tempo é baseado em todo o procedimento de segurança necessário para realização de todas as atividades de manutenção ou operação. No entanto, em virtude da necessidade de manter as outras manutenções preventivas de forma regular e contínua, será limitado a 1 equipamento por semana, portanto a substituição dos equipamentos e adequação ao Protocolo de Montreal podendo ser realizada em conformidade com o prazo para 2040, sendo realizada em aproximadamente 2 anos e 5 meses.

## 5 CONCLUSÕES

No presente trabalho foram apresentados os impactos que fluidos refrigerantes utilizados em sistemas de refrigeração possuem no meio ambiente a partir dos parâmetros ODP e GWP de cada. Após uma breve revisão bibliográfica sobre o tema, foram escolhidos dois fluidos refrigerantes atualmente existentes e próprios para sistemas de refrigeração que pudessem substituir o R-22 em dois modos de substituição do mesmo em uma indústria multinacional.

Este trabalho serve para fundamentar dados reais de manutenção a partir de orçamentos fornecidos por uma empresa do ramo de refrigeração para substituição do fluido refrigerante que ainda está presente nos sistemas de manutenção e causa ainda algum efeito nocivo no meio ambiente, mais especificamente na camada de ozônio.

Os resultados obtidos indicam o Cenário 2 – Substituição dos equipamentos de ar condicionado atuais, como mais apropriado, uma vez que o retorno econômico é feito em 6 anos e 10 meses, e dentre os equipamentos que devem ser substituídos alguns possuem fabricação em 2002, portanto a vida útil pode ser prolongada por mais de dez anos de acordo com a periodicidade e qualidade das manutenções preventivas, condições de operação, cuidados durante a instalação. Além disso, equipamentos novos geralmente consomem menos potência, são menos barulhentos e mais eficientes, tornando a refrigeração mais efetiva.

Após o período para equilíbrio dos valores de investimento entre os cenários de retrofit e substituição dos equipamentos, a economia anual de energia estimada é que seja de R\$116.358,83 por ano, que passa a fornecer uma margem para substituir equipamentos que possam sofrer a necessidade de troca em virtude de algum fator relativo ou não à manutenção.

Vale ainda adicionar que a substituição do fluido R-22 em um período próximo deve aumentar ainda mais a redução de custos, uma vez que este fluido deve ter o seu valor de mercado crescente como meio de inclinação forçada à sua eliminação em equipamentos de refrigeração.

Como sugestão para trabalhos futuros, podem ser feitos estudos utilizando fluidos refrigerantes da classe de HFOs como alternativa para equipamentos de refrigeração de conforto em virtude desta classe de fluido possuir, em geral, valores de GWP inferiores às outras classes de fluidos refrigerantes.

## 6 BIBLIOGRAFIA

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE Handbook – Fundamentals**. Chapter 19, Refrigerants. 2005.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Uso de Fluidos Naturais em Sistemas de Refrigeração e Ar-condicionado: artigos técnicos**. The Use of Natural Refrigerants, Technical articles. Brasília-DF: MMA, 2008. 339p.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Uso de Fluidos Alternativos em Sistemas de Refrigeração e Ar-condicionado: artigos técnicos**. Brasília-DF: MMA, 2011. 170p. :il. color ; 29 cm.

BRASIL. Presidência da República: Casa Civil. **Decreto N° 181, de 24 de Julho de 1991**. Brasília-DF, 1991.

BRASIL. Presidência da República: Casa Civil. **Decreto N° 5.280, de 22 de Novembro de 2004**. Brasília-DF, 2004.

BRASIL. Presidência da República: Casa Civil. **Decreto N° 99.280, de 6 de Junho de 1990**. Brasília-DF, 1990.

BRASIL. Presidência da República: Subchefia para Assuntos Jurídicos. **Decreto N° 2.679, de 17 de Julho de 1998**. Brasília-DF, 1998.

CHEMOURS. **Freon MO99, Fluido Refrigerante: Diretrizes de Retrofit**. 2016.

DIAS, GUSTAVO PIRES. **Análise do uso de Inversores para Motores Monofásicos em Aparelhos de Ar Condicionado Visando à Eficiência Energética**. São Carlos-SP: Univeridade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Elétrica e Computação. 2014.

DUARTE, José Arnaldo; LOPES, José Dermeval Saraiva. **Curso Básico de Refrigeração**. Viçosa-MG, CPT, 2009. 212p.FERRAZ, F.; GOMES, M. **O Histórico da Refrigeração**.

**Fluidos Refrigerantes. Ozônio/Processo de Formação/Destruição. Sistemas de Refrigeração. Componentes de um Sistema de Refrigeração.** Centro Federal de Educação Tecnológica da Bahia. Santo Amaro-BA. 2008. 60p.

FUCHS, Angela Maria Silva. **Guia para Normalização de Publicações Técnico-Científicas.** Uberlândia-MG : EDUFU, 2013. 286p. : il.

GIRARD, James. **Princípios de Química Ambiental.** Tradução Marcos José de Oliveira. Revisão técnica Marcos Tadeu Grassi. Rio de Janeiro : LTC, 2016. il. ; 28 cm.

MARANGONI, F., TELLINI, T., MORENO, R. P. R., FERREIRA, S. O., KONOPATPKI, E. A. **Comparativo econômico entre condicionadores de ar com tecnologias convencional e inverter.** XXXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção – Perspectivas Globais para a Engenharia de Produção, Fortaleza-CE, Brasil. 2015.

McQUISTON, Faye C. **Heating, ventilating and air conditioning : analysis and design.** Faye C. McQuiston, Jerald D. Parker, Jeffrey D. Splitter. 6. ed. Estados Unidos da América: John Wiley & Sons, Inc., 2004, 623p.

MOLION, Luiz Carlos Baldicero. **Desmistificando o Aquecimento Global.** Instituto de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Alagoas. [20--].

SENAISC – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial de Santa Catarina. **Treinamento em Manutenção de Ar Condicionado Automotivo.** São José, SC, Brasil. 2009. 112p.

SILVA, R. W. C., PAULA, B. L. **Causa do aquecimento global: antropogênica versus natura.** *Terrae Didatica*, 5(1):42-49<<http://www.ige.unicamp.br/terraedidatica/>>. 2009.

UNITED NATIONS. **Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change.** Kyoto. 1998.

VIANA, A. N. C, et al. **Eficiência Energética: Fundamentos e Aplicações.** Campinas, SP: Elektro, Universidade Federal de Itajubá, Excen, Fupai, 2012. 314p.