

**SIMPLES ANÁLISE DA SEGURANÇA DE EXPLOSÃO DE UM CICLO DE
REFRIGERAÇÃO OPERANDO COM HIDROCARBONETO**

Jacqueline Pedrera Yanes(*)

jpyanes2@yahoo.com

José R. Simões Moreira

Jrsimoes@usp.br

SISEA – Lab. de Sistemas Energéticos Alternativos

Depto. Enga. Mecânica - Escola Politécnica da USP

Av. Prof. Mello Moraes, 2231

05508-900, São Paulo – SP

(*) também

do Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría,
ISPJAE, Habana, Cuba

RESUMO

As pesquisas na busca de refrigerantes alternativos que possam substituir os refrigerantes tradicionalmente usados nos sistemas de refrigeração por compressão a vapor de pequeno porte, abarcam desde substâncias sintéticas até as substâncias naturais. Dentro das substâncias naturais sobressaem os hidrocarbonetos por suas excelentes propriedades como refrigerantes. Este trabalho contém um levantamento bibliográfico sobre as últimas pesquisas realizadas sobre a utilização de hidrocarbonetos em geladeiras domésticas, o que inclui a comparação dos fluidos hidrocarbonetos com maiores potenciais de uso com outros grupos de refrigerantes tradicionais. Neste trabalho estudam-se teoricamente as possibilidades que existem de misturar hidrocarbonetos com um gás inerte, ou não-condensável, que iniba, em caso de vazamento ao ambiente, a formação de uma mistura inflamável do gás refrigerante com o ar atmosférico, aproveitando a possibilidade que tem os inertes de modificar os limites de inflamabilidade dos gases inflamáveis puros e de suas misturas, principalmente aumentando o valor do limite inferior de inflamabilidade. É feito um estudo da influência da presença de pequenas quantidades de gás inerte no ciclo de refrigeração, principalmente, no desempenho do ciclo de uma geladeira doméstica real e a comprovação de que o sistema é seguro em caso de vazamento, pois a mistura se mantém abaixo do limite inferior de inflamabilidade para o caso estudado.

Palavras Chaves: Refrigeração pequeno porte, Refrigerantes alternativos, Hidrocarbonetos

1. Introdução

Nos últimos anos, a utilização dos refrigerantes sintéticos clorados tem sido questionados devido a uma nova exigência: a proteção ao meio ambiente. As indústrias que produzem, usam e consomem esses produtos devem reconsiderar sua utilização e eliminá-los em um tempo determinado, como é o caso dos clorofluorocarbonos (CFCs), devido ao fato desses

compostos atuarem diretamente no empobrecimento da camada de ozônio e no aumento do efeito estufa. Durante meio século, os clorofluorocarbonos (*CFCs*), que são consideradas como as substâncias mais prejudiciais para a camada de ozônio, foram considerados refrigerantes milagrosos, de uma utilidade incomparável para a indústria da refrigeração e aos consumidores e inócuas para os seres humanos e ao meio ambiente. Com o decorrer dos anos, começaram-se a ver os efeitos destrutivos que tinham aquelas substâncias manufaturadas sobre a vida no planeta. Como resultado disso, em 1987 foi assinado o Protocolo de Montreal com o objetivo de se encarar os problemas globais do meio ambiente. Em 1990, numa revisão feita ao Protocolo de Montreal, decidiu-se pela paralisação da produção e a comercialização dos refrigerantes halogenados. Frente à futura escassez desses refrigerantes, são de grande importância as pesquisas realizadas com o objetivo de encontrar substâncias de trabalho para substituírem os refrigerantes até agora usados nas instalações de refrigeração e ar condicionado e que sejam seguras para o meio ambiente.

A indústria da refrigeração faz tempo desenvolveu os hidroclorofluorocarbonos (*HCFCs*), substâncias que ao ter hidrogênio em adição ao cloro e ao flúor tem menor estabilidade química e, conseqüentemente, uma vida atmosférica mais curta, o que evita que o gás chegue à estratosfera. Na realidade chegam à atmosfera menor porcentagem de *HCFCs* que de *CFCs*, que é um composto muito mais estável, mais ainda assim os *HCFCs* prejudicam o meio ambiente. Mais tarde surgiu outro grupo de substâncias sintéticas, os hidrofluorocarbonos (*HFCs*), que não colaboram com a destruição do ozônio mais influem no efeito estufa. Essas substâncias são as mais usadas como alternativas na atualidade embora provoquem inúmeros problemas técnicos e econômicos que serão revistos no presente trabalho. Outra categoria estudada são os refrigerantes naturais como a amônia, os hidrocarbonetos (*HCs*) puros e suas misturas. A limitação fundamental desta variante, no caso da amônia é a sua toxicidade e no caso dos hidrocarbonetos, sua inflamabilidade. No caso particular dos hidrocarbonetos, embora tenham características termodinâmicas ótimas e sejam substâncias muito compatíveis com os sistemas que trabalham com *CFCs* e *HCFCs*, o simples fato de serem substâncias altamente inflamáveis paralisou por muitos anos as possibilidades de serem usadas, muito embora sejam reconhecidas todas as enormes vantagens que possuem.

Tendo em vista estes aspectos o presente trabalho trata de um estudo teórico cujo objetivo principal é investigar de que forma influi um gás inerte, como o nitrogênio, no desempenho de um ciclo de refrigeração por compressão de vapor de hidrocarbonetos quando misturado em diferentes composições com a carga de refrigerante. Verifica-se a influência na diminuição das possibilidades de acidentes em caso de vazamentos. Os seguintes objetivos específicos são perseguidos:

- Estudar como é possível minimizar o perigo de acidentes de explosão, ao ser misturada à carga de refrigerante hidrocarboneto um gás não-condensável ou inerte. Com isso, pretende-se modificar o ponto de inflamabilidade da mistura refrigerante mais gás não-condensável com o ar atmosférico.
- Analisar teoricamente as variações dos parâmetros de um ciclo de refrigeração de pequeno porte e principalmente do desempenho do sistema com a presença deste gás inerte.

1.1. Últimas pesquisas sobre a utilização de hidrocarbonetos como alternativas.

Nas publicações científicas aparece uma grande quantidade de trabalhos que analisam o problema ambiental, o papel das substâncias que esgotam a camada de ozônio e as possíveis soluções a este problema. Na refrigeração, onde são mais consumidos os clorofluorocarbonetos (*CFCs*), definidos como os gases mais prejudiciais à atmosfera, o trabalho dos pesquisadores está dirigido no sentido de encontrar substitutos que sejam inócuos

ao meio ambiente e que conservem a maior quantidade de parâmetros iguais aos das substâncias que estão sendo substituídas, o que permitirá que sejam utilizadas as instalações já existentes sem mudanças tecnológicas muito radicais e garantirá sua comercialização no mercado internacional. Esses fluídos refrigerantes são conhecidos como alternativas “*drop-in*”. Outra vertente das pesquisas atuais é a de realizar mudanças nos ciclos mais usados de forma a diminuir as irreversibilidades termodinâmicas como resultado da operação ineficiente dos sistemas e da introdução dos refrigerantes alternativos nos mesmos, já que a melhora da eficiência energética dos sistemas influi indiretamente na proteção do meio ambiente. Isso se dá pois, com a diminuição dos consumos elétricos e por conseguinte dos consumos de combustíveis fósseis, diminui também a emissão à atmosfera de CO_2 e outros gases que colaboram com o aquecimento terrestre. (Fischer, 1993).

Um grupo de fluídos que está sendo analisado como uma boa alternativa é as substâncias naturais como o dióxido de carbono (CO_2), a amônia e os hidrocarbonetos (HCs), esta última compete com os hidroclorofluorocarbonos ($HCFCs$) e os hidrofluorocarbonos ($HFCs$) como substitutos dos clorofluorocarbonos ($CFCs$) em instalações de pequenas capacidades. Do ponto de vista termodinâmico e tecnológico, os hidrocarbonetos são a melhor alternativa para os $CFCs$, $HCFCs$ e $HFCs$, em uma ampla faixa de temperaturas e capacidades. A única característica negativa destas substâncias é a sua inflamabilidade. Entretanto, no caso das geladeiras, que utilizam uma pequena carga de refrigerante (perto da terça parte da carga usada no sistema com $R-12$), esta é uma desvantagem pouco perigosa (Camporese et al., 1991; Bodin et al., 1993; Baskin e Chorowski, 1994; Liu et al., 1995). Os hidrocarbonetos têm baixo custo e grande disponibilidade. São seguros ambientalmente já que são substâncias naturais, tem zero ODP e um GWP desprezível. Suas propriedades de transporte são muito boas, baixa viscosidade e maior condutividade térmica que outras alternativas e suas propriedades termodinâmicas são similares às do $R-12$ e $R-22$. Outra vantagem dos hidrocarbonetos é a boa miscibilidade com os óleos minerais usados na lubrificação nas instalações de $R-12$. Kuipjev (1988), testou uma mistura de 79 % de n-butano e 21 % de propano em geladeiras domésticas, e obteve excelentes resultados quanto ao desempenho do sistema. Já em 1992, James e Missenden, realizaram uma pesquisa em geladeiras domésticas com testes que simularam incêndios e explosões. Os resultados foram introduzidos em países em vias de desenvolvimento onde existiam disponibilidades adequadas destas substâncias. Na Europa, a organização *Greenpeace*, tem estimulado a introdução desta tecnologia dos hidrocarbonetos em países do artigo 2 ou desenvolvidos e também em países do artigo 5 ou em vias de desenvolvimento, onde estão sendo aceitos rapidamente. Em 1992 na Alemanha, se iniciou a comercialização da primeira geladeira doméstica funcionando com um hidrocarboneto. Esta geladeira, chamada *Greenfreeze*, funciona com uma mistura de propano-isobutano ($R-290/R-600a$) ou com isobutano como substância refrigerante pura. O propano e o isobutano são gases naturais disponíveis no mercado internacional por um preço de quase 50 % abaixo dos $CFCs$ mais vendidos e 10 % do preço do $R-134a$ e a eficiência dos sistemas com estas substâncias é pelo menos 10 % maior que para o $R-12$ (Greenpeace, 1996). Paulatinamente *Greenfreeze* foi dominando o mercado alemão em quase 100%. Em 1994 existiam aproximadamente 12 milhões de geladeiras que trabalhavam com hidrocarbonetos no mundo e estima-se que para o 2000 será superior aos 40 milhões. Infelizmente a maioria dos hidrocarbonetos puros não são adequados para substituir ao $R-12$, mas trabalhos realizados por Richardson e Butterworth em 1995 e outros, mostram que as misturas de propano e isobutano podem ser usadas em sistemas de $R-12$ sem modificações e ainda com melhor desempenho. Foram testadas várias misturas e após diversas horas de trabalho não foram detectados problemas no compressor ou degradação no óleo de lubrificação. Os que se opõem à introdução dos hidrocarbonetos como refrigerantes no mercado e defendem os $HCFCs$ e os

HFCs argumentam que a tecnologia dos *HCs* se torna muito cara devido ao investimento em segurança dos sistemas por causa da sua inflamabilidade, o que não é totalmente certo, como será analisado posteriormente neste artigo. Várias pesquisas mostram que não são necessárias medidas especiais durante a operação dos sistemas, apenas uma boa ventilação durante a carga do sistema. Além do mais a carga de hidrocarboneto dentro dos ciclos é tão pequena quando comparada com a de *CFCs* ou *HCFCs* para as mesmas condições de trabalho, que em muitos casos não existe a possibilidade de formação de uma mistura inflamável em caso de vazamento para o gabinete do refrigerador. Experimentos realizados na Holanda com geladeiras com uma média de 5 anos de uso, indicam que o propano, misturas de propano-isobutano e propano-butano, podem ser usadas como substitutos nesses equipamentos sem mudanças significativas nos componentes. O efeito refrigerante é similar e o consumo de energia é pelo menos equivalente e em alguns casos menor que com o *R-12*. Misturas perto do 50 % de propano e 50 % de isobutano apresentam características de saturação similares com a do *R-12* e o *COP* apresenta melhoras em proporção ao aumento de propano (*Richardson e Butterworth, 1995*). Os *HCFCs* e os *HFCs* são alternativas para o período de transição, mas já os hidrocarbonetos oferecem soluções reais e são tecnológica e ambientalmente confiáveis e sua adoção em definitivo é tão somente limitada por uma diminuição do perigo de explosão ao mínimo possível, respeitando as normas de segurança internacionalmente impostas há muito tempo, para oferecer confiança e segurança aos consumidores. Foi demonstrado que em geladeiras que usam *HCFCs/HFCs*, como pode ser a mistura de *R-141b/R-134a*, o custo de operação é cinco vezes maior que para os hidrocarbonetos, já que existem custos significativos associados à tecnologia necessária para preservar o *R-134a* de uma mistura indesejável com o lubrificante do compressor. Isto porque ao ser contaminado com o óleo de lubrificação este refrigerante muda seu comportamento e, além disso, existem custos associados a problemas que aparecem facilmente durante a operação dos sistemas com esta substância, principalmente nos compressores causados pela presença de umidade (*Meyersen, 1997*). A eficiência energética das geladeiras que usam *HCs* é muito boa, tanto quanto, ou maior ainda, que para as geladeiras que usam *CFCs* ou *R-134a*. Utilizam-se óleos minerais como lubrificantes e não apresentam nenhuma dificuldade durante o serviço, como no caso do *R-134a*.

O principal fator limitante ou desvantagem para o uso destas substâncias na refrigeração é a sua inflamabilidade, mas é difícil entender porque os hidrocarbonetos são considerados inviáveis em muitos países, já que tem sido utilizados por muitos anos em outras aplicações como em sistemas térmicos e em processos industriais, em sistema abertos ou de uso direto como equipamentos para soldagens, iluminação, combustível para automóveis e aviões e em cozinhas nas residências. No caso de sistemas de refrigeração doméstica com hidrocarbonetos é necessária uma quantidade de substância refrigerante perto da terça parte da carga de *R-12* numa geladeira qualquer. Nas geladeiras típicas a quantidade que se usa é tão pequena, que não oferece nenhum perigo ao consumidor. A quantidade média de hidrocarbonetos numa geladeira doméstica de 200 litros de capacidade, por exemplo, está entre 60g e 90g. Como se verá nesse trabalho adiante, mesmo em caso de vazamento total do refrigerante (o que não deve ocorrer) para um compartimento de volume reduzido como é o gabinete da geladeira, assim mesmo ainda não existiria a possibilidade teórica de que se forme uma mistura explosiva. Quanto à segurança, os sistemas de refrigeração são intrinsecamente seguros e existem há muitos anos normas internacionais de segurança para estas instalações. Algumas medidas práticas de segurança para a utilização de hidrocarbonetos em sistemas de refrigeração de pequeno porte poderiam ser selecionar um projeto de sistema e materiais para a instalação, de forma que fique reduzido ao mínimo qualquer risco de vazamento, usar exclusivamente componentes elétricos que não produzam faíscas e, em caso contrário submergi-los em óleo ou isolados com plástico e verificar que os compressores se encontrem

corretamente isolados, para evitar qualquer possibilidade de formação de arco elétrico. Outra possibilidade poderia ser a mistura da carga de refrigerante com um gás inerte, solução analisada logo a seguir.

1.2. Influência de um gás inerte nos limites de inflamabilidade de um gás inflamável.

O objetivo de adicionar um gás inerte ao hidrocarboneto que será usado como refrigerante no ciclo, está principalmente no fato de que, como os hidrocarbonetos são substâncias muito inflamáveis, no caso de vazamento de refrigerante ao meio existe a possibilidade de formação de uma mistura explosiva deste com ar como será explicado a seguir. Ao contrário do que acontece com os combustíveis sólidos e líquidos, para os quais existem temperaturas (pontos) de inflamação ou ignição espontânea ou pontos de fulgor (*“flash point”*) e de fogo (*“fire point”*) respectivamente, para os combustíveis gasosos a matéria inflama ou não inflama, não há realmente alternativa, embora sempre exista uma indesejável possibilidade de explosão. Isto se explica pelo fato de que a combustão de um combustível gasoso necessita da presença de um carburante como ozônio, oxigênio ou simplesmente ar atmosférico em proporção adequada. Variando a composição de uma mistura de qualquer hidrocarboneto com ar desde 0% de ar e 100% de HC até 100% de ar e 0% de HC, é possível observar como a combustão só se pode iniciar e se propagar para uma série de valores de composição, temperaturas e pressões. Esta faixa é a chamada escala de inflamabilidade e está determinada por dois limites fundamentais (Lewis e Elbe, 1961):

- limite inferior de inflamabilidade (L_i) que mostra além de que valor existe ar demais na mistura para que a combustão possa se desenvolver e,
- limite superior de inflamabilidade (L_s) que mostra além de que valor existe combustível demais para que a combustão aconteça.

Os limites são obtidos experimentalmente e esta referência pode ser encontrada em manuais e livros de combustão, para a maioria das substâncias combustíveis puras. Os limites de inflamabilidade de qualquer substância podem ser mudados pela adição de um inerte como por exemplo: CO_2 , H_2O ou N_2 . Este fenômeno pode ser usado em sistemas de refrigeração de pequeno porte, já que se poderia adicionar certa quantidade de um gás inerte ao refrigerante hidrocarboneto de tal forma que ao vazar a mistura refrigerante para o gabinete refrigerado e ao se misturar com o ar nele confinado, a quantidade de inertes na mistura com ar seja maior que a que permite a formação de uma mistura inflamável. Este tema será retomado novamente para calcular a quantidade de gás inerte mínima que deve ser adicionado ao refrigerante hidrocarboneto dentro do ciclo para que as possibilidades de formação de uma mistura inflamável seja a mínima possível.

2. Análise termodinâmica dos ciclos de uma geladeira doméstica quando trabalhando com uma mistura de gás combustível e gás inerte.

Uma análise termodinâmica elementar foi realizada para os componentes principais de um sistema refrigerador doméstico em regime permanente (Pedrera, 2000). Estabeleceram-se as equações para cada um dos componentes do ciclo: compressor hermético alternativo, condensador estático, tubo capilar não-adiabático e evaporador do tipo *“roll-bond”*. Foi analisado particularmente cada componente mostrando quais parâmetros poderiam mudar durante a troca das substâncias de trabalho e a introdução do gás inerte. Muito importante foi considerar um sistema em particular, o que fixa de alguma forma alguns parâmetros operacionais do ciclo, mesmo depois de substituídos os valores das propriedades para a mistura de hidrocarboneto com gás inerte. Para efeito de análise da presença do gás inerte, os resultados foram parametrizados pelo coeficiente λ , valor que representa a razão entre o fluxo

mássico de gás com respeito ao fluxo mássico de refrigerante. O sistema de equações foi implementado no programa computacional *Engineering Equation Solver*, (*EES*) que possibilita a resolução de equações simultaneamente e consulta um banco de dados de propriedades termodinâmicas, cuja exatidão foi suficiente para os objetivos do presente trabalho. Este sistema de equações foi resolvido para dois casos principais de mistura: (1) propano puro - nitrogênio e (2) isobutano puro - nitrogênio. A geladeira analisada foi a *CONSUL*, fabricada pela *Multibrás S.A.* É uma geladeira que opera sem nenhum grau de subresfriamento, mas com certo grau de superaquecimento na sucção do compressor garantido pelo trocador de calor tubo capilar linha de sucção. Os parâmetros de funcionamento principais foram fornecidos pelo fabricantes. Para os objetivos da presente análise elementar, adotou-se que (1) na fase vapor trata-se de uma mistura de gases perfeitos, (2) a capacidade de refrigeração do ciclo foi mantida constante para qualquer composição da nova substância de trabalho, bem como a temperatura no evaporador e (3) foi considerado que os componentes do sistema não mudam.

3. Cálculo do valor real de λ necessário para garantir a operação segura

Para calcular o valor do parâmetro λ capaz de garantir a segurança quanto ao problema de explosão, adotou-se o critério de análise da pior situação possível para a qual há a possibilidade de formação de uma mistura explosiva. Acredita-se que o pior cenário deve ocorrer quando houver o completo vazamento de todo o refrigerante para o menor espaço confinado disponível, ou seja, caso ocorra o vazamento para dentro do gabinete da geladeira. De fato, essa certamente deve ser a pior condição, visto que, caso existisse um vazamento para o ambiente em que se encontra a geladeira (cozinha), a quantidade de ar seria demasiadamente grande para que se formasse uma mistura explosiva, como se verá. Por outro lado, existe a improvável possibilidade de entrada de ar no sistema durante a operação normal. Contudo, essa hipótese foi descartada porque a pressão do sistema é sempre positiva (acima da atmosférica). Há de se considerar que o problema de explosão possa ocorrer durante o processo de manutenção ou de carga do sistema. Nesse caso, o pessoal técnico envolvido deve receber o treinamento adequado.

A análise começa com o gráfico da figura 1 que ilustra a influência da diluição de uma mistura ar – combustível sobre os limites de inflamabilidade de diversas misturas em várias proporções com diferentes inertes. Nota-se nesse gráfico que abaixo da curva inferior de uma dada mistura combustível, ar e inertes, esta não é inflamável, pois trata-se do limite inferior de inflamabilidade, *Linf*. O ramo superior da curva chama-se de limite superior de inflamabilidade, *Lsup*. No presente caso, trata-se de analisar as situações abaixo do limite inferior. Evidentemente a mistura será não-inflamável se a fração molar do gás hidrocarboneto for sempre inferior ao limite inferior de inflamabilidade, ou seja:

$$x_{(HC)} < L_{min} \quad (1)$$

Da observação daquela figura pode-se, para efeito de uma rápida estimativa, aproximar o limite inferior por uma reta para uma dada mistura. Chamando de *R* a razão molar entre gás inerte e gás inflamável e *Lmin* como o limite inferior de inflamabilidade mínimo que ocorre quando a reta cruza o eixo vertical (*R* = 0); *Lmáx* é o valor do limite inferior de inflamabilidade máximo que ocorre para a situação em que *Linf* encontra o limite superior de inflamabilidade em *Rmáx*. Assim, representando a curva do *Linf* por uma reta comum, a seguinte equação é dada:

$$L_{inf} = \frac{L_{max} - L_{min}}{R_{max}} R + L_{min} \quad (2)$$

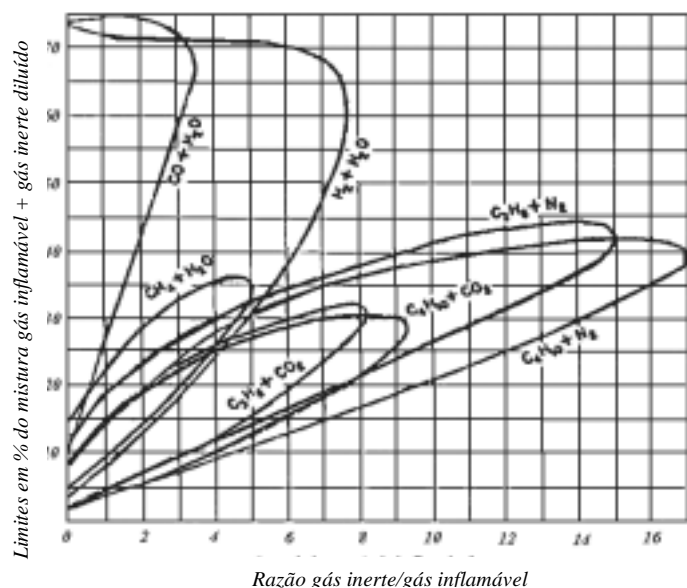


Figura 1. Limites de inflamabilidade do H_2 , CO e CH_4 misturados com H_2O , e do C_3H_8 e C_4H_{10} misturados com CO_2 e N_2 em diversas proporções. (Lewis e Elbe, 1961);

sendo que os valores L_{min} , $L_{máx}$ e R_{max} podem ser obtidos das curvas específicas para cada hidrocarboneto e diluente na figura 1. Mas, deseja-se agora calcular qual deve ser a razão molar R que pode ocorrer dentro do gabinete da geladeira em caso de vazamento total da mistura refrigerante. Analisa-se a pior situação hipotética, considerando que normalmente não deve ocorrer o vazamento total do hidrocarboneto, pois o mesmo deve vazar até que a pressão da linha alcance a pressão atmosférica. Entretanto, para efeitos de estimativa, considera-se que a massa total de hidrocarboneto seja considerada. Assim, R é dado por:

$$R = \frac{m_{T(N_2)}}{m_{(HC)}} \cdot \frac{M(HC)}{M(N_2)}, \quad (3)$$

sendo:

- $m_{T(N_2)}$ - massa total de nitrogênio dentro do gabinete depois do vazamento [kg],
- $m_{(HC)}$ - massa de hidrocarboneto total que vaza para o gabinete. [kg], e
- M_i - são as respectivas massas moleculares [kg/kmol].

Por outro lado, a massa total de inertes dentro do gabinete depois do vazamento pode ser calculada como a soma da massa de nitrogênio que estava inicialmente dentro do gabinete da geladeira (simbolizado pelo índice “atm”) antes do vazamento e a massa de nitrogênio que é acrescida ao gabinete que originalmente pertencia à mistura de refrigerante (simbolizado pelo índice “ciclo”), ou seja:

$$m_{T(N_2)} = m_{(N_2)ciclo} + m_{(N_2)atm}. \quad (4)$$

Logo, substituindo a expressão acima na equação (3), e lembrando que $\lambda = \frac{m_{(N_2)ciclo}}{m_{(HC)}}$, tem-se:

$$R = \left(\lambda + \frac{m_{(N_2)atm}}{m_{(HC)}} \right) \cdot \frac{M(HC)}{M(N_2)}. \quad (5)$$

A massa de nitrogênio que existia na geladeira antes do vazamento, ou massa do nitrogênio atmosférico $m_{(N_2)}$, pode ser calculada como sendo aquela que ocupava o volume e a estava à mesma temperatura do gabinete, que, usando a lei dos gases perfeitos, tem-se:

$$m_{(N_2)atm} = \frac{P_{(N_2)}V}{R_{(N_2)}T}, \quad (6)$$

onde:

V - volume do gabinete da geladeira [m^3]

T – temperatura no gabinete, considerada igual a 273 K

$R_{(N_2)}$ – constante dos gases para o nitrogênio [kJ/kg K]

$P_{(N_2)}$ – pressão parcial do nitrogênio atmosférico dentro da geladeira antes do vazamento [kPa]

Recordando a lei de *Dalton* de mistura para os gases perfeitos, a pressão parcial do nitrogênio é dado pelo produto $P_{(N_2)} = x_{(N_2)} \cdot P_{atm}$, logo:

$$m_{(N_2)atm} = x_{(N_2)atm} \frac{P_{atm}V}{R_{(N_2)}T}, \quad (7)$$

onde, $x_{(N_2)atm}$ – é a fração molar do nitrogênio atmosférico, considerada igual a 0,79.

Agora, pode-se obter a fração molar do vapor de hidrocarboneto para cada caso analisado segundo a seguinte expressão:

$$x_{(HC)} = \frac{m_{(HC)}R_{(HC)}T}{P_{atm}V}, \quad (8)$$

sendo, $R_{(HC)}$ a constante particular do hidrocarboneto em questão, que para propano vale 0,1885 e isobutano vale 0,1430 [kJ/kg K].

Finalmente, primeiro deve-se substituir a equação (7) na equação (5) e, depois, a equação resultante na equação (2). Aplica-se o critério dado pela equação (1) para que a mistura seja não-explosiva, então tem-se a forma final da relação mássica λ , ou seja:

$$\lambda > \left(x_{(HC)} - L_{min} \right) \frac{R_{max}}{L_{max} - L_{min}} \frac{M_{(N_2)}}{M_{(HC)}} - \frac{m_{(N_2)atm}}{m_{(HC)}}, \quad (9)$$

sendo que a massa de nitrogênio atmosférico é estimada pela equação (6), a massa de hidrocarboneto é conhecida e a fração molar de hidrocarboneto é calculada pela equação (8).

Então, com o valor do volume interno da geladeira e os valores das massas de hidrocarboneto para cada caso, pode-se calcular os valores das frações molares de hidrocarboneto dentro da geladeira para cada caso. Com esse valor e os limites de inflamabilidade e demais dados conhecidos pode-se, então calcular o valor limite de λ para as misturas envolvendo esses vapores de hidrocarbonetos.

4. Análise dos resultados

Os resultados completos da simulação são apresentados no trabalho de mestrado, *Pedreira 2000*. Como era de se esperar, o comportamento do *COP* mostra para ambos casos uma diminuição gradual com o aumento do coeficiente λ , ou seja, com o incremento da quantidade de gás inerte dentro do sistema. A tendência é decrescer quase linearmente. Na seqüência nas figuras 2 e 3, observa-se o efeito da mistura do fluido refrigerante (aumentando λ) sobre o coeficiente de desempenho para a geladeira usando propano e isobutano.

Com relação à figura 2, é interessante notar que: (1) os coeficientes de desempenho são mais elevados para o sistema operando com isobutano e que, (2) a sensibilidade (derivada da curva) é mais acentuada para o caso que trabalha com isobutano também. Isto é um indicativo que, embora o *COP* seja elevado em termos absolutos, o sistema tem um decréscimo de *COP* mais acentuado pela presença do gás inerte. O problema da diminuição do *COP* está claramente associado com o fato de que o gás não produz efeito refrigerante, pelo contrário, parte do efeito de refrigeração produzido pelo hidrocarboneto é absorvido pelo gás inerte, diminuindo portanto o efeito de refrigeração global.

Os valores de λ para que a geladeira opere dentro dos limites de segurança em caso de vazamento de toda a mistura de vapor de hidrocarboneto com nitrogênio para dentro da geladeira foram negativos para ambos os casos (-6,1 para propano-nitrogênio e -5,0 para

isobutano-nitrogênio. Ou seja, não há a necessidade de introdução de nenhum gás inerte ao ciclo para manter a mistura abaixo do limite inferior de inflamabilidade em caso de vazamento total da mistura refrigerante para dentro do gabinete da geladeira. Isto significa dizer, que somente a quantidade de nitrogênio naturalmente presente no ar atmosférico é suficiente para manter a mistura confinada dentro do gabinete abaixo daquele limite. Evidentemente, isso é verdade para o caso de estudo da geladeira estudada com um volume de gabinete fixo. Outras situações de espaço confinado devem ser analisadas em particular.

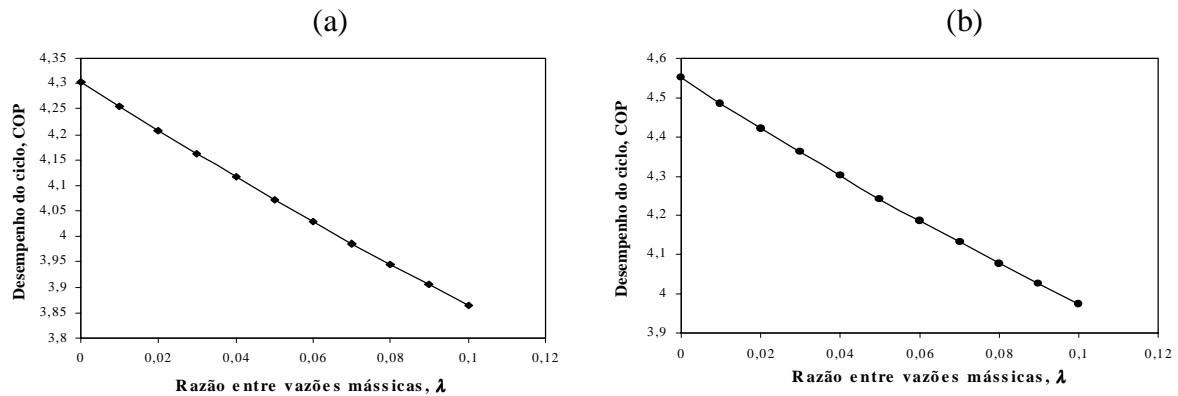


Figura 2. Coeficiente de desempenho da geladeira *CONSUL* para valores crescentes do parâmetro λ para (a) mistura de propano com nitrogênio e (b) mistura de isobutano com nitrogênio.

5. Conclusões

Os maiores adversários do uso em pequenas instalações residenciais e comerciais de hidrocarbonetos como fluidos de trabalho são o fato de sua elevada inflamabilidade em caso de vazamento. Assim, no presente trabalho propôs-se o uso de pequenas quantias de um gás inerte (nitrogênio) misturadas com propano, num caso, e isobutano em outro. Percebeu-se que o COP do sistema se deteriora na medida que frações crescentes de gás inerte são introduzidas, como era de se esperar, pois o gás inerte não produz efeito refrigerante. Por outro lado, surpreendentemente, verificou-se que, para os dois casos estudados para uma geladeira residencial típica, o sistema é inerentemente seguro. Analisou-se a pior situação hipotética que seria o completo vazamento do fluido refrigerante para o menor espaço confinado (gabinete da geladeira). Verificou-se que, ainda nessa pior situação do ciclo operando com refrigerante hidrocarboneto puro, a mistura formada após o vazamento está bem abaixo do limite inferior de inflamabilidade.

Referências Bibliográficas

- BASKIN, E., PERRY, R. B. 1994. The performance of hydrocarbons in a household refrigerator-freezer. *Proc. Intern. Refrig. Conference at Purdue*.
- BODIN, E., CHOROWSKI, M. 1993. Working parameters of domestic refrigerators filled with propane-butane mixture. *Intern. Journal Refrig.*
- BUSONGO, F. N. 1991. Aceitabilidade Ambiental dos Fluorocarbonetos Alternativos (AFEAS). *XVIII Intern. Cong. Refrig. Montreal*.
- CAMPORESE, R., BIGOLARO, G., CORTELLA, G., SCATTOLINI, M. 1991. Flammable

- refrigerants in domestic refrigeration. *XVIII Intern. Cong. Refrig.* Montreal.
- FISCHER, S. K., FAIRCHILD, P. J. HUGHES. 1992. Global warming implications of replacing CFCs. *ASHRAE Journal*. April.
- FISCHER, S. K. 1993. Total equivalent warming impact: a measure of the global warming impact of CFCs alternatives in refrigerating equipment. *Intern. Journal of Refrig.* Vol. 16.
- GREENPEACE. 1994. Hydrocarbons and other progressive answer to refrigeration. *Editorial Greenpeace*.
- GREENPEACE. 1996. The best technological option for developing countries. *Editorial Greenpeace*.
- JAMES, R. W E MISSENDEN, J. F. 1992. The use of propane in domestic refrigerators. *Intern. Journal of Refrig.* Volume 5.
- KIUIPER, L. J. M. 1988. Possibilidade da substituição do CFC-12 em geladeiras domesticas. *Intern. Journal of Refrig.* Vol 11.
- LIU, Z., HIDER, I., LIU, B. Y., RADERMACHER, R. 1995. Test result of hydrocarbons mixtures in domestic refrigerator/freezers. *Proc. Int. CFC and Halon Alternatives Conference*.
- MEYERSEN, K. 1997. Problems Associated with HFC-134a in *Householh Refrigeration*. Advisor to GTZ. PROKLIMA CFC-Phase-Out Projets.
- RICHARDSON, R. N., BUTTERWORTH, J. S. 1995. The performance of propane/isobutane mixtures in a vapour-compression refrigeration system. *Intern.. Journal of Refrig.* Vol 18, No 1.
- PEDRERA Yanes, J. 2000. *Influência da Presença de um gás não-condensável no Desempenho de um Ciclo de Refrigeração por Compressão a vapor de Hidrocarbonetos*. Dissertação de Mestrado apresentada ao Depto. de Engenharia Mecânica da EPUSP, São Paulo, SP.

SIMPLE EXPLOSION SAFETY ANALISYS OF A REFRIGERATION CICLE WORKING WITH A HIDROCARBON AS A WORKING FLUID

ABSTRACT

New alternative refrigerants for vapor compression refrigeration system of low capacity are continually tested looking for the substitution of traditional refrigerants. Natural and synthetic substances have been investigated with this purpose. The hydrocarbons are one group among the natural substances with better characteristics, including, the possibility of a drop in substitution in pure or mixed state at different proportions. Their high inflammability properties, however, have been presented as a hurdle to avoid their widespread usage as refrigerants. The present work presents an extensive literature review about the use of hydrocarbons (propane and isobutane) in domestic refrigeration equipment. Advantages and disadvantages of these substances are mentioned and a comparison with traditional refrigerants is made. A study is carried out to investigate the possibility of adding inert or non-condensable gases into the refrigeration system along with the hydrocarbon aiming to increase the lower inflammability limit, in case of leakage. Nitrogen was studied for this purpose and their effect on the performance of a typical domestic refrigerator was examined.