

4. ESTUDO DE CASO

4.1 LEVANTAMENTO DE DADOS

4.1.1 Identificação das Instalações de Refrigeração Pesquisadas

Das onze indústrias sediadas em Rio Grande, duas não utilizam sistemas de refrigeração com R-717, uma é a MARSILVA, que trabalha com pescado salgado e resfriado em instalações frigoríficas operando com halogenados e a outra é a ASIAMERICA, que também emprega o mesmo tipo de fluido refrigerante.

A empresa Netuno Ltda., não possui equipamento frigorífico próprio, alugando câmaras frias da Pescal.

Das oito indústrias restantes, a Leal Santos não quis participar da pesquisa, sendo que a Furtado encontra-se parada, com reativação prevista somente em fevereiro de 2006, para safra do camarão e a Ártico em férias coletivas.

Do reduzido número de empresas remanescentes, a Paulo Hepp Pescados Ltda., não retornou resposta à proposta do projeto e a Albano de Oliveira e Cia Ltda., alegou que não poderia disponibilizar amostra de R-717, de maneira que das indústrias restantes optou-se realizar o estudo nas instalações de refrigeração de duas das maiores empresas da cidade, Pescal e Torquato Pontes, não só pela tradição das empresas na atividade pesqueira e representatividade do setor, como pelo porte e equipamento empregado. Embora utilizando sistemas muito parecidos, a Torquato Pontes diferencia-se da Pescal, por possuir um regenerador de R-717, de maneira que tornou-se muito interessante o estudo comparativo, não só entre as concentrações de água das amostras, como também da eficiência energética do ciclo simulado de refrigeração. Outro detalhe que diferencia fisicamente as instalações é de que no sistema da Torquato, o resfriamento dos vapores provenientes da descarga do estágio de baixa é feito através de injeção de líquido do recipiente, controlado por válvulas eletrônicas, enquanto o da Pescal é com RI aberto.

Devido à precariedade e imprecisão dos dados referentes às características termodinâmicas operacionais dos equipamentos de refrigeração, que para obtenção das mesmas levariam a um estudo mais aprofundado e específico, fugindo do foco principal do trabalho, as tabelas do anexo F trazem um levantamento das principais elementos para

identificação das empresas e dos sistemas de refrigeração objeto da pesquisa de contaminação do R-717 com água, apenas com o intuito informativo, visto que as informações coletadas foram utilizadas apenas para que se obtivesse uma noção do modelo estipulado na simulação.

4.1.2 Procedimento para Coleta de Amostra de R-717 Contaminado

Em sistemas inundados, a amostra de R-717 contaminado deve ser retirada através da válvula de dreno de óleo, no domo de purga do separador de líquido [12]. Primeiramente porque a água concentra-se no separador, como estudado na seção 3.1, e segundo, devido ao fluido refrigerante líquido necessário para amostra encontrar-se acumulado no fundo do vaso de baixa pressão, facilitando seu recolhimento, porém com um inconveniente, devido à diferença de densidade, todo óleo deverá ser drenado antes.

Embora, para sistemas operando em duplo estágio a pressão no interior do separador de líquido seja inferior à atmosférica, há de se considerar a pressão hidrostática exercida pela coluna de líquido. Até 239,75 K, a pressão no interior do separador é inferior à pressão atmosférica, sendo esta temperatura, a de menor densidade absoluta do fluido refrigerante, no limite da pressão externa.

Os separadores dos sistemas analisados trabalhavam com temperaturas em torno de 237,15 K, nestas condições, em função da pressão de saturação interna e da densidade do R-717 líquido, a altura da coluna do fluido obrigatoriamente teria que passar para mínimos 2,6 m, a fim de garantir pressão superior à atmosférica, incompatíveis com as dimensões do vaso, principalmente se não for vertical e ainda considerando o volume ocupado pelo vapor. Esta acentuada variação na altura ocorre porque, mesmo que a densidade absoluta do R-717 líquido aumente com o rebaixamento da temperatura, não o faz na mesma proporção da diminuição da pressão de saturação.

Para que se obtivesse amostra de R-717 contaminado, retirado do separador de líquido, seria necessária a parada total do sistema, até que a pressão no interior do vaso se estabilizasse em níveis superiores a atmosférica. Como os estudos efetuados em campo, foram nas condições reais de operação dos sistemas, tornava-se extremamente difícil a possibilidade de desligamento do equipamento, por um período tão longo, sem acarretar prejuízo para instalação. Assim, optou-se por fazer o recolhimento da amostra, pela linha de descarga da bomba de líquido do separador, visto que além de sua pressão ser pouco superior à atmosférica, a tomada de sucção da bomba no interior do vaso, é em nível superior ao

acúmulo de óleo e outros resíduos.

Embora, segundo a bibliografia consultada a concentração de água ocorra no separador, para efeito de estudo foi promovida a coleta de amostra, também do resfriador intermediário. Neste caso, a coleta se processou no domo do dreno da purga de óleo, sem necessidade de parada do sistema, pois o vaso opera em pressão acima da atmosférica.

Nas instalações da Torquato Pontes, além da coleta no sistema de congelados, também foram retiradas amostras de R-717 líquido, das máquinas de gelo, junto à purga de óleo, na extremidade inferior dos cilindros geradores (evaporadores), as quais também operavam com pressões superiores à atmosférica.

Para todas situações, foram adotadas precauções extras para extração do R-717 líquido dos sistemas, como máscara protetora facial com filtros, luvas de borracha de punho alto e jaleco de couro, que podem ser visualizados na figura 4.1, além de mangueira de alta vazão de água, ligada à uma válvula de fecho rápido e máxima ventilação possível, do ambiente.



Figura 4.1 – Equipamento de proteção

Para coleta das amostras da amostra de R-717, foi especialmente confeccionada uma peça que constava de um corpo de válvula com registro, dotado de regulação gradual de abertura, para controle da vazão do fluido refrigerante, além de uma adaptação para rosca de $\frac{3}{4}$ ” numa de suas conexões, a fim de permitir um perfeito acoplamento ao engate do manômetro da descarga da bomba de líquido. Associa-se ao dispositivo, um tubo curvado, em

sua outra conexão, para saída afastada do fluido, em relação à posição de atuação sobre o registro da válvula, conforme é demonstrado na figura 4.2.

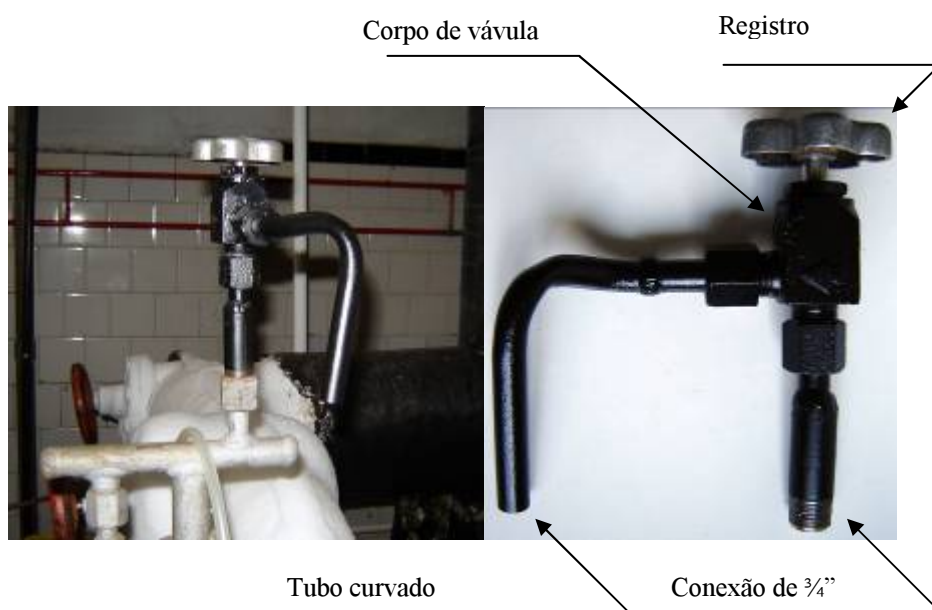


Figura 4.2 – Válvula de controle de vazão para coleta da amostra

Também foram utilizadas duas provetas graduadas, uma de 100 ml e outra de 50 ml, ambas com precisão de 1 ml (figura 4.3) e uma rolha de vedação com respiro (figura 4.4). A proveta menor, possuía 20 ml de óleo mineral para compressores de refrigeração.

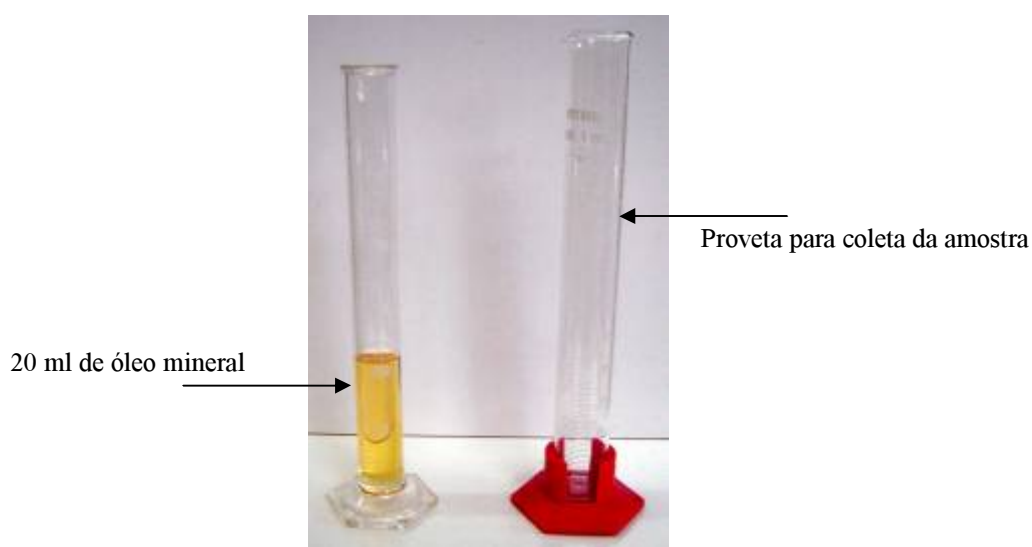


Figura 4.3 – Provetas para coleta da amostra



Figura 4.4 – Rolha de vedação com respiro

Com a abertura gradual e parcial do registro, conseguiu-se controlar em condições ideais a vazão do R-717 líquido expelido, preenchendo a proveta até a marca dos 50 ml.

O tempo de preenchimento da proveta até a marca dos 50 ml, era em torno de 15 s, sendo que nos primeiros dois terços do tempo, completava-se quase todo volume, à partir de onde, restringia-se o fluxo, atuando sobre o registro, a fim de obter-se melhor precisão.

As variações observadas nas três coletas realizadas em cada um dos sistemas, nunca igualaram-se ou ultrapassaram os limites de 49 ml e 51 ml.

Em um primeiro instante, logo após a abertura do registro, a vaporização era relativamente intensa na saída do tubo de coleta, porém, com o rápido rebaixamento de sua temperatura devido à troca de fase do fluido refrigerante, o mesmo escorria líquido, com pequena parcela de vapor, sendo que nesta condição dava-se início ao recolhimento da amostra (figura 4.5).



Figura 4.5 – Coleta do R-717 líquido

O prévio resfriamento da proveta em contato com gelo fundente, garantia uma ebulição no interior do frasco de forma tênue, diminuindo significativamente a parcela de vapor gerado durante todo processo de coleta. Também procurou-se não segurar a proveta na porção dos 50 ml com o R-717 líquido, a fim de impedir intensa troca térmica com o fluido.

Imediatamente após o procedimento de coleta da amostra, tomou-se cuidado extremo para que fosse evitado o contato entre o ar e o conteúdo da proveta de teste, pois o vapor d'água em suspensão no ar condensar-se-ia, solidificando durante a evaporação do R-717, que no final do processo descongelaria misturando-se com o resíduo, distorcendo o resultado da medição, invalidando a mesma. Desta feita, assim que os 50 ml da amostra foram retirados, arrolhou-se instantaneamente a proveta, afogando o respiro em óleo. Embora não fosse essencialmente necessária a imersão da mangueira no lubrificante, considerando a pressão estabelecida pelos vapores do R-717 gerados no interior do frasco ser maior que a atmosférica, não tratou-se de um preciosismo, mas sim uma garantia do final do processo de troca de fase do R-717, através da observação da eclosão das bolhas de vapor do fluido em meio ao óleo.

4.1.3 Metodologia para Determinação do Volume da Solução de Água com R-717

O método de análise adotado para determinação do volume de água com R-717 resultante da amostra de fluido refrigerante extraído das instalações de refrigeração estudadas, em síntese, salvo algumas adaptações, à exemplo dos procedimentos para coleta, foi o prescrito pelo Instituto Internacional de Refrigeração com Amônia, segundo as diretrizes para sistemas de refrigeração operando com R-717 contaminado com água [12].

A presente metodologia não é a mais apropriada para determinações precisas da presença de pequenas quantidades de água na instalação, porém suficientemente eficiente para o fim ao qual se destina, ou seja, indicar a presença do contaminante em concentrações capazes de prejudicar significativamente a performance e integridade do sistema. Para tanto, o equipamento utilizado (figura 4.6), constituiu-se de:

- a. Proveta de 100 ml, com amostra de 50 ml de R-717 contaminado;
- b. Proveta graduada de 50 ml com 20 ml de óleo mineral;
- c. Rolha de borracha com respiro;
- d. Termostato tipo bimetálico;
- e. Bomba de circulação de água de 180 litros por hora;

- f. Resistores, um de 40 W e dois de 100 W;
- g. 20 litros de água potável da rede hidráulica;
- h. Tanque de vidro de 456 mm x 258 mm x 215 mm;
- i. Multímetro digital;
- k. Termômetro digital, com sensor tipo termopar (k').
- m. Proveta de 25 ml, com precisão de 0,2 ml;

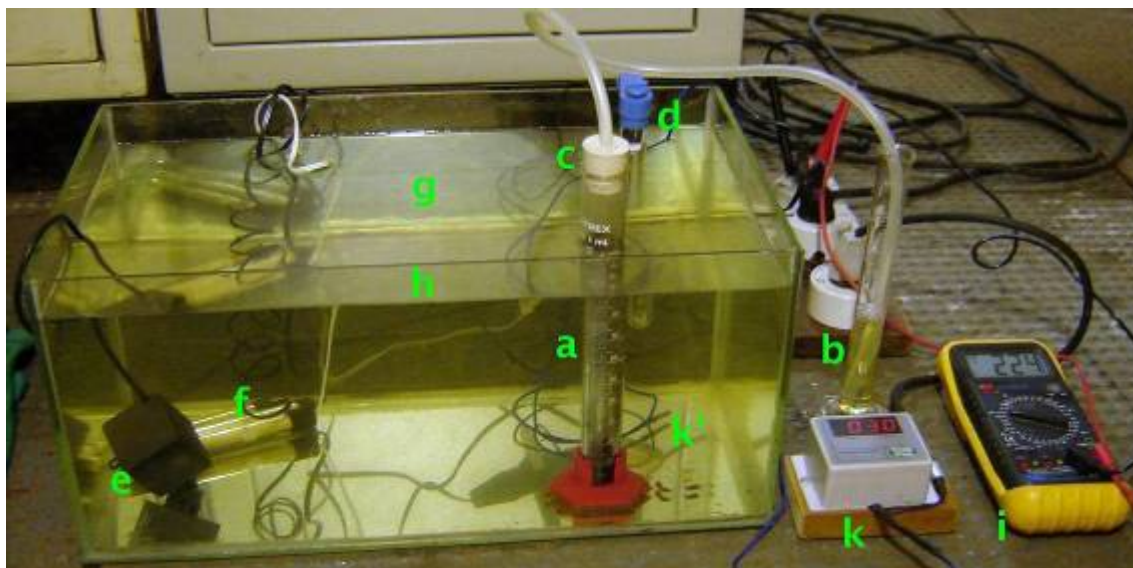


Figura 4.6 – Equipamento para isolamento de água e impurezas da amostra de R-717

Inicialmente, após coleta, e de posse da amostra de R-717 contaminado, esperou-se até que quase todo refrigerante vaporizasse à temperatura ambiente (figura 4.7), sendo que intermitentemente o frasco de vidro tinha sua superfície lavada com a água do banho.

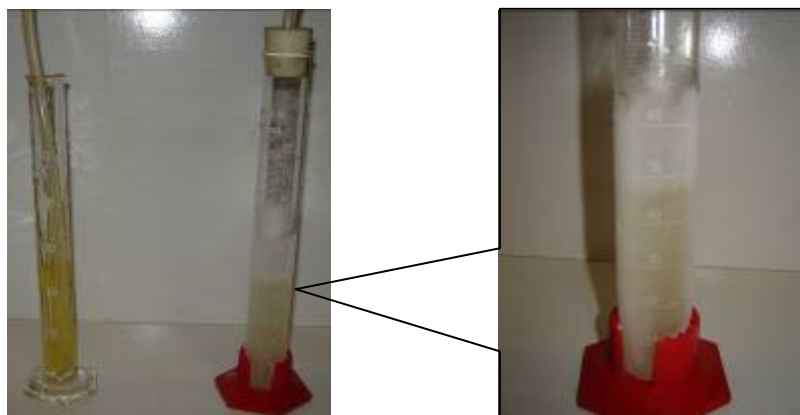


Figura 4.7 – Vaporização do R-717 da amostra à temperatura ambiente

Só então a proveta foi colocada em um banho de imersão com água (figura 4.8), à temperatura constante de 303,15 K, tomando-se o cuidado necessário para evitar a penetração de água no interior da proveta e aumento de temperatura do banho além da estipulada, o que acarretaria aceleração do processo de vaporização do refrigerante, intensificando-o demasiadamente, comprometendo a amostra, pelo arraste de parte do resíduo. Segundo o IIAR (International Institute of Ammonia Refrigeration), a temperatura do banho de imersão deve estar entre 299,82 K e 305,37 K.

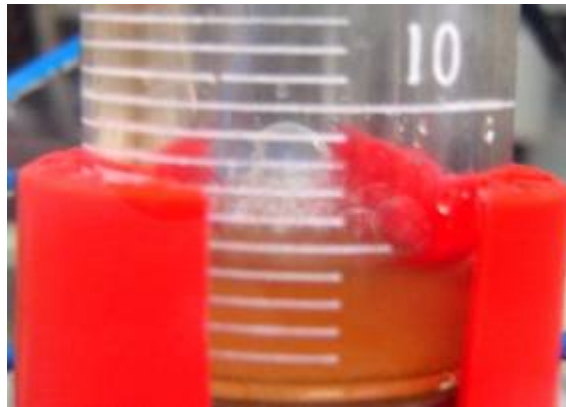


Figura 4.8 – Detalhe da amostra de R-717 vaporizando no banho

Na troca de fase de agregação molecular, a massa que vaporiza absorve energia da massa líquida, rebaixando a temperatura da mesma, que para o R-717 ocorre a 239,75 K, sob pressão atmosférica normal, conforme estudado na seção 2.2.2. Com o rebaixamento da temperatura ocorre um fluxo natural de energia do ambiente para o fluido refrigerante.

Comparando-se a massa específica da água, que é de 1.000 kg/m^3 , com a massa específica do ar, que é de $1,2 \text{ kg/m}^3$ e seus respectivos calores específicos, de $4,19 \text{ kJ/kg.K}$ e $1,004 \text{ kJ/kg.K}$, percebe-se que a água possui maiores valores para as duas grandezas, de tal forma que o produto de ambas chega a ser quase 3.500 vezes maior que do ar.

Por este motivo, mesmo que os dois fluidos estejam à mesma temperatura, quando em contato com a amostra de R-717 na proveta, a água provocaria uma ebulição abrupta do R-717, pelo fornecimento de uma quantidade muito grande de calor, como pode ser analiticamente demonstrado na equação 4.1, razão pela qual a proveta só foi introduzida no banho, após vaporização quase que total do fluido refrigerante.

$$Q = m.Ce.(T_A - T_S) \quad (4.1)$$

Q	quantidade de calor [J]
m	massa [kg]
Ce	calor específico [J/kg.K]
T_A	temperatura ambiente [K]
T_S	temperatura da amostra [K]

Muito embora o aumento da temperatura do banho sirva como catalisador do processo, deu-se preferência pela temperatura de 303,15 K, a fim de facilitar a entrada de valor no diagrama do anexo D.1, para determinação da quantidade de R-717 ainda presente no resíduo, visto que a escala de temperatura é em graus Fahrenheit, ou seja, o valor estipulado em graus Kelvin é convertido em um inteiro na escala Fahrenheit, aumentando a precisão.

Para o banho encheu-se o tanque de vidro até uma altura de 170 mm, bem acima da marca alcançada pela amostra do fluido refrigerante na proveta, porém garantiu-se assim, uma grande inércia térmica, pelos 20 kg de água comportados pelo recipiente, evitando-se oscilações na temperatura e a frequência da atuação do termostato sobre a energização dos resistores.

Conforme pode ser observado através da figura 4.9, três resistores, sendo dois de 100 W e um de 40 W, forneceram energia para aquecer a água (que normalmente se encontrava a 295,15 K) até 303,17 K.



Figura 4.9 – Detalhe dos aquecedores para água do banho

A bomba de circulação, figura 4.10, garantia a homogenização da temperatura da água, aumentando a eficiência da transmissão de calor, através da convecção forçada.



Figura 4.10 – Detalhe da bomba de circulação d'água

O controle da temperatura do banho (figura 4.11), foi realizado por um termostato bimetálico e um termômetro digital (cujas características são descritas no anexo E.1), os quais podem ser visualizados com detalhe na figura 4.12. Na fonte de alimentação do termômetro, foi ligado um multímetro digital, para medição constante da tensão, garantindo que o medidor de temperatura operasse dentro dos limites máximos da variação de tensão permitida, evitando alteração da calibração do mesmo, sendo que as características do multímetro estão no anexo E.2.

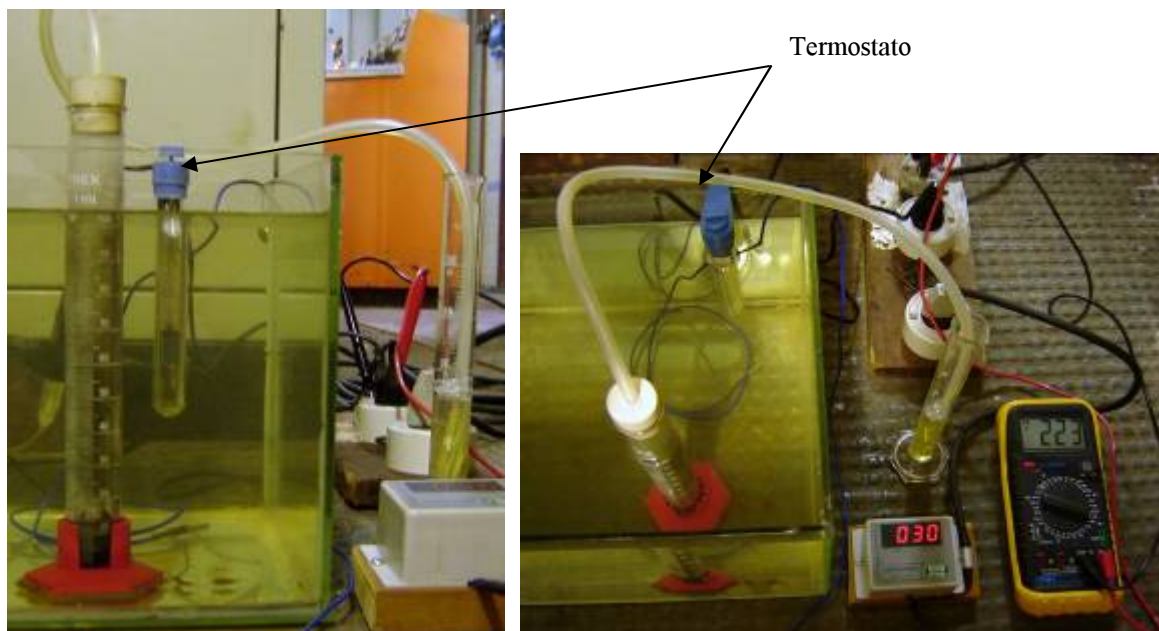


Figura 4.11 – Controle da temperatura do banho

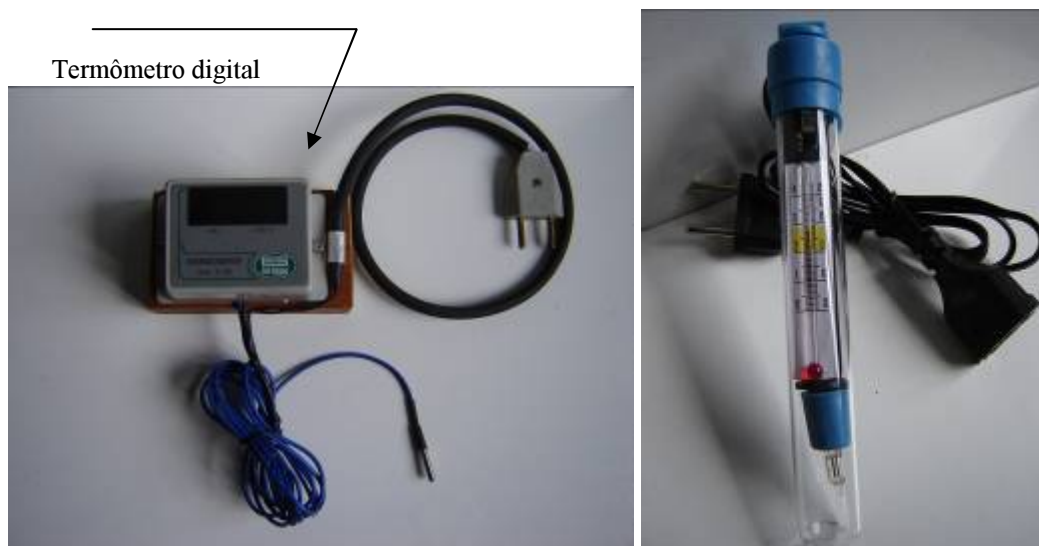


Figura 4.12 – Detalhe dos dispositivos de controle da temperatura do banho

Depois de cessado o processo de vaporização (figura 4.13), diagnosticado pelo término da formação de bolhas de vapor no óleo, o resíduo remanescente era uma mistura de água, óleo lubrificante, impurezas não voláteis e R-717, observando-se que mantida constante a temperatura do banho, conforme o anexo D.1, o resíduo de água deveria conter aproximadamente 29% de R-717.

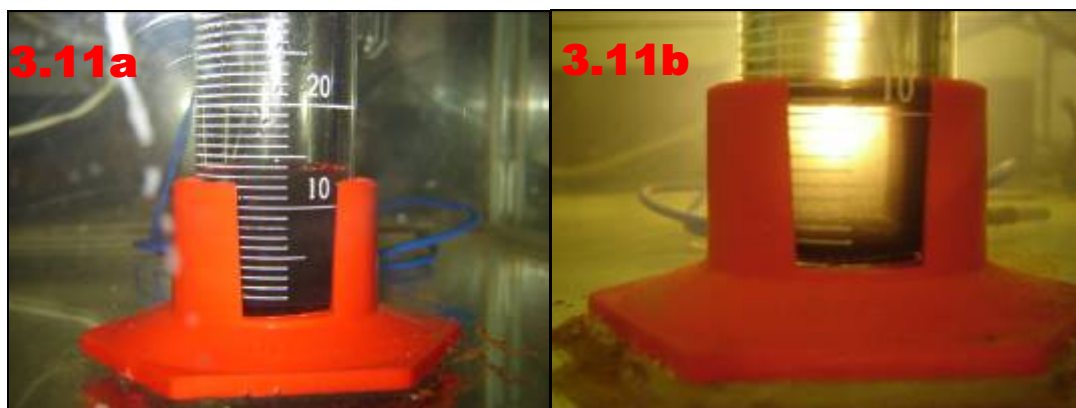


Figura 4.13 – Resíduos da vaporização da amostra do R-717

Pode-se perceber nitidamente, através do quadro 3.11 a, que o resíduo ainda está um pouco acima de sua saturação do fluido refrigerante, para temperatura do banho, porém quase atingindo este limite. Nota-se também a cor vermelha turva, produto do óleo lubrificante e impurezas como óxido de ferro e resíduos carbônicos, entre outros. No quadro 3.11 b, após

transcorridas quase duas horas, as partículas sólidas em suspensão decantaram no fundo da proveta e o óleo por diferença de densidade acumulou-se sobre a superfície livre da água, sendo desta o volume intermediário.

A proveta da amostra foi então desenvolvida e retirada do banho. Num primeiro instante foi verificado diretamente em sua escala, o valor do volume do resíduo.

Mesmo com a abertura do frasco, como a temperatura ambiente era menor que a temperatura do banho, a concentração do refrigerante no resíduo não se reduziria, muito pelo contrário, a tendência seria uma maior capacidade de absorção pela água, porém sem fonte de vapor do R-717, a solução permaneceu inalterada, desde que não fosse fornecida energia para a mesma.

A amostra coletada dos resfriadores intermediários vaporizou-se completamente, sem deixar vestígios visuais de água na proveta, somente um resíduo de óleo no fundo do frasco.

Embora o IIAR, em seu boletim nº 108, anexo C, item 5, recomende apenas duas medições, optou-se pela realização de três, para cada sistema avaliado, a fim de garantir uma menor probabilidade de erro no valor da medida.

Para as amostras do separador de líquido, do sistema sem regenerador, as medições situavam-se entre 10 ml e 11 ml, com regenerador, entre 1ml e 2ml e para as máquinas de gelo, menores que 1 ml. Todavia, para uma maior precisão da medida, posteriormente, em laboratório, o conteúdo foi cuidadosamente transferido para a proveta de 25 ml.

Com a transferência metódica do resíduo para nova proveta, quase todo precipitado sólido ficou no fundo da proveta de 100 ml, e grande parte do óleo sobre o resíduo, aderiu as paredes internas desta, durante o escoamento da solução.

A transvazagem ocasionou uma pequena turbidez na solução, razão pela qual a mesma foi deixada em descanso aproximadamente trinta minutos, até que se realizasse a medição definitiva.

Volumes muito pequenos do resíduo, explicado anteriormente, não foram objeto do estudo, como por exemplo, aconteceu com o sistema das máquinas de gelo, o qual apresentou valores que não chegavam à 0,6 ml, inferiores inclusive ao fundo de escala da proveta de maior precisão.

Nestas condições, o percentual de contaminação calculado (seção seguinte), era menor que 1%, totalmente fora dos parâmetros de comprometimento significativo da eficiência energética, causando inclusive dificuldade de mensurar seus valores de referência nos

diagramas e interpolá-los, razão pela qual a determinação do COP foi realizada somente para as outras duas instalações.

Porém torna-se interessante observar, conforme figura 4.14, que o resíduo resultante da amostra do R-717 colhida deste sistema, em relação aos outros, não apresentou a formação de precipitado sólido, somente óleo.

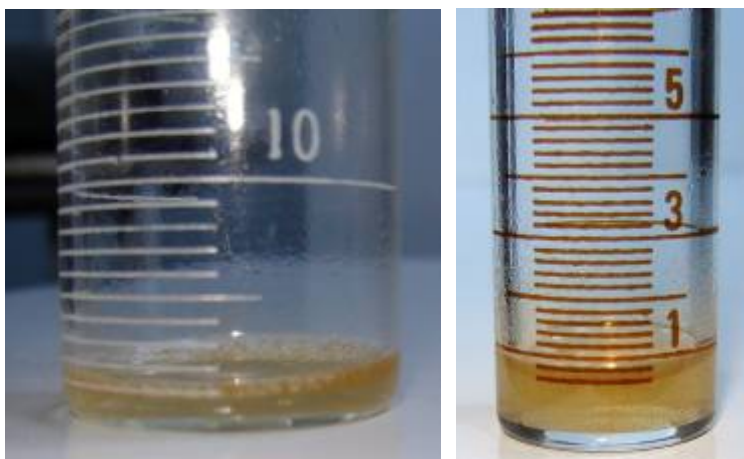


Figura 4.14 – Resíduos da amostra de R-717 das máquinas de gelo

Das instalações restantes, o sistema provido de regenerador de R-717, apresentou volumes para o resíduo de 1,4 ml ou pouco superior, sem contudo alcançar a marca de 1,6 ml, como ilustra a figura 4.15.

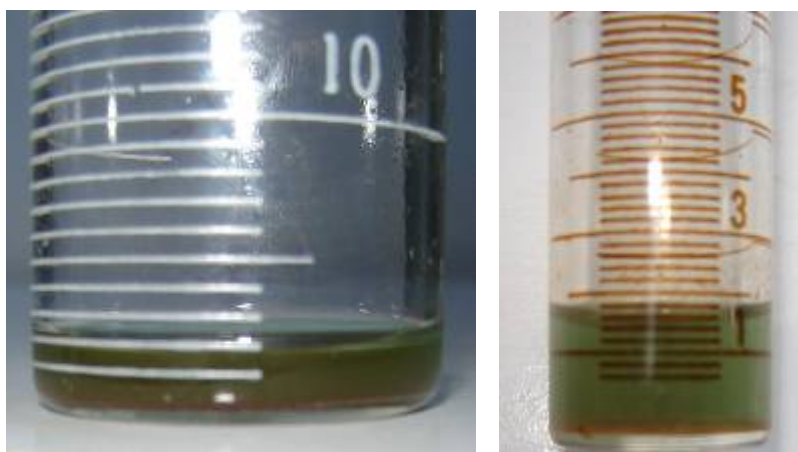


Figura 4.15 – Resíduos da amostra de R-717 do sistema com regenerador

Em análise química, realizada em oportunidade anterior, quando da instalação do regenerador de R-717, aproximadamente dois anos atrás, por solicitação da Torquato, ficou constatada a presença de traços de cobre no fluido refrigerante, o que possivelmente lhe conferiu a característica do tom esverdeado. Embora a água tenha sido retirada em grande parte do sistema, neste aspecto, seus efeitos ainda se pronunciavam, registrando a corrosão dos mancais dos compressores. Quanto ao precipitado sólido, este apresentou-se em pequena quantidade, assim como o óleo.

Como era esperado, o sistema de refrigeração da Pescal, que não contava com um dispositivo para retificar o fluido refrigerante, foi o que apresentou a maior concentração de água, conforme figura 4.16, além de grande quantidade de precipitado sólido e outras impurezas agregadas ao óleo, sobre a superfície livre da solução.

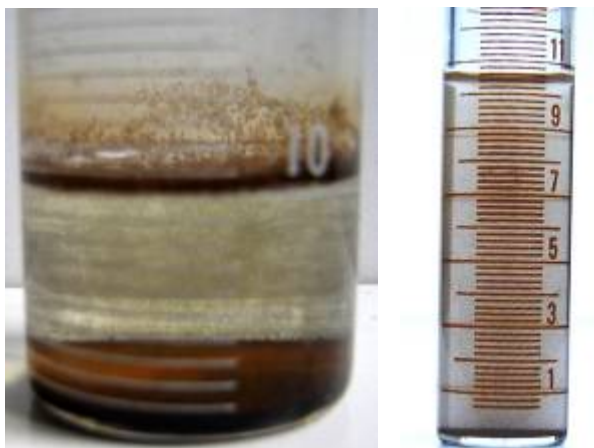


Figura 4.16 – Resíduos da amostra de R-717 do sistema sem regenerador

Os volumes do resíduo resultante da evaporação do R-717 da amostra, para este sistema, situavam-se entre 10,2 ml e 10,4 ml.

Em relação à imprecisão das medidas dos resíduos de ambas instalações, sua influência nos cálculos será discutida no final da seção seguinte.

4.1.4 Cálculo do Percentual de Água na Carga de R-717 da Instalação

Para o cálculo do percentual em massa de água contaminante na mistura com o R-717, foi necessário determinar o fator de vaporização EF , no diagrama do anexo D.4, sendo requerido o valor da pressão no ponto de coleta da amostra, registrado pelo manovacuômetro

(anexo E.3 e E.4) conectado ao mesmo. A instalação do medidor de pressão com conexão de $\frac{1}{4}$ de polegada na conexão da bomba de $\frac{3}{4}$ de polegada, foi realizada por meio de um adaptador especificamente confeccionado (figura 4.17).



Figura 4.17 – Adaptador e manovacuômetro

Optou-se por um manômetro com escala em libras por polegada quadrada, devido ser a mesma escala utilizada no diagrama do anexo D.4.

A descarga das bombas de líquido dos sistemas, com e sem regenerador apresentaram respectivamente em média, pressões de 110.309 Pa e 117.203 Pa, manométricas. O erro do instrumento, conforme anexo E.3, era muito pequeno para interferir de maneira significativa no resultado da medição, para faixa de precisão exigida pelos cálculos.

Identificado o valor da pressão no eixo das abscissas, o mesmo deve ser projetado em uma linha vertical ascendente até a curva, rebatendo-se em uma reta horizontal até o eixo das ordenadas, determinando-se EF , onde foram encontrados os índices de 0,948 para menor pressão e 0,946 para maior.

O fator de vaporização EF , acrescenta a perda percentual de R-717 não contabilizada, depois que parte do conteúdo do fluido refrigerante foi perdido na súbita vaporização parcial, devido a perda de carga sofrida pelo líquido durante a coleta, ao migrar da pressão da descarga da bomba para pressão atmosférica normal, descontando esta parcela do resíduo remanescente na amostra.

Desta maneira, a fim de evitar a inconsistência da amostra inicial, esta deve ser corrigida em sua massa, pelo decréscimo sofrido, em função do fator EF (equação 4.2).

$$m_s = \frac{V_s \cdot \rho_s}{EF} \quad (4.2)$$

EF	fator de vaporização
V_s	volume da amostra [m ³]
m_s	massa da amostra [kg]
ρ_s	massa específica da amostra [kg/m ³]

Após a vaporização do fluido refrigerante, o resíduo da amostra tratava-se na realidade de uma solução de água com R-717. Logo, sabendo-se que o banho de imersão manteve constante a temperatura da mistura em 303,15 K, com base na solubilidade do R-717 em água, conforme o anexo D.1, concluiu-se que o resíduo resultante continha 29% de R-717 e consequentemente 71% de água, fator pelo qual aplicou-se nova correção para obtenção da massa de água restante, reproduzida analiticamente pela equação 4.3.

$$m_w = 0,71 \cdot (V_R \cdot \rho_R) \quad (4.3)$$

V_R	volume do resíduo [m ³]
m_w	massa de água [kg]
ρ_R	massa específica do resíduo [kg/m ³]

Para misturas de água com R-717, nestas concentrações, na faixa de temperatura estipulada pelo IIAR, sob pressão atmosférica normal, o valor da massa específica para solução é de 892 kg/m³, sendo que para a amostra inicial de R-717 líquido saturado considerado anidro é de 682 kg/m³.

A determinação do percentual em massa de água na amostra, foi estabelecida através de uma relação simples entre a massa do resíduo e a massa da amostra representativa do refrigerante da instalação, conforme equação 4.4.

$$CF = \frac{m_w}{m_s} \cdot 100 \quad (4.4)$$

CF	fator de contaminação [%]
------	---------------------------

Inerente ao processo de coleta, a medição do volume da amostra extraída, gerou uma incerteza, de aproximadamente ± 1 ml. Mesmo assumindo limites máximos nesta variação, a alteração do CF pode-se considerar muito pequena, onde os maiores valores de erro alteram de apenas 0,125 °F para menos ou de 0,250 °F para mais a temperatura lida no diagrama do anexo D.2, em função da pressão de operação estipulada para o modelo simulado (93,07 kPa), adotando 50 ml como volume padrão e um valor médio para EF . A tabela 4.1 demonstra os valores assumidos por CF para as variações de volume da amostra, em função da imprecisão da medida.

Tabela 4.1 – Valor do volume da amostra para cálculo do CF

V_R (ml)	CF			Erro em relação ao padrão	
	50 ml	49 ml	51 ml	49 ml	51 ml
1,4	2,462333	2,512585	2,414052	+ 0,050252	- 0,048281
1,6	2,814095	2,871526	2,758917	+ 0,057431	- 0,055178
1,8	3,165857	3,230466	3,103781	+ 0,064609	- 0,062076
2	3,517619	3,589407	3,448646	+ 0,071788	- 0,068973
10	17,58810	17,94704	17,24323	+ 0,358941	- 0,344865
10,2	17,93986	18,30598	17,58810	+ 0,366120	- 0,351762
10,4	18,29162	18,66492	17,93296	+ 0,373298	- 0,358659
10,6	18,64338	19,02386	18,27782	+ 0,380477	- 0,365556

A diferença entre os índices encontrados para os fatores EF dos dois sistemas analisados, divergem entre si de um valor muito pequeno, onde qualquer um dos valores adotados não gera erro no cálculo do percentual da massa de água do outro, a ponto de comprometer o resultado, como pode ser observado na tabela 4.2, além do que, o diagrama do anexo D.2 não comporta tamanha precisão. Assim, optou-se por um valor médio para EF , onde o erro máximo ficou em torno de $\pm 0,019$ pontos percentuais. Na mesma tabela observa-se que o critério de truncamento no quarto dígito significativo da constante numérica gerada no processo de conversão para equação 4.5, acarreta uma diferença absolutamente desprezível no resultado do cálculo.

Tabela 4.2 – Valor de EF para cálculo de CF

V_R (ml)	CF (%)		Diferença entre CF	CF com valor médio de EF	Erro	CF com truncamento da constante	Erro de truncamento
	EF (16 psi)	EF (17 psi)					
1,4	2,464933	2,459733	0,005200	2,462333	$\pm 0,00260$	2,46232	1,33E-05
1,6	2,817067	2,811124	0,005943	2,814095	$\pm 0,00297$	2,81408	1,52E-05
1,8	3,169200	3,162514	0,006686	3,165857	$\pm 0,00334$	3,16584	1,71E-05
2,0	3,521333	3,513905	0,007429	3,517619	$\pm 0,00371$	3,51760	1,9E-05
10,0	17,60667	17,56952	0,037145	17,58810	$\pm 0,01857$	17,58800	9,501E-05
10,2	17,95880	17,92091	0,037888	17,93986	$\pm 0,01894$	17,93976	9,691E-05
10,4	18,31093	18,27230	0,038631	18,29162	$\pm 0,01931$	18,29152	9,882E-05
10,6	18,66307	18,62369	0,039374	18,64338	$\pm 0,01968$	18,64328	0,0001007

Partindo destas condições de contorno, substituindo-se as equações 4.2 e 4.3 em 4.4 e reorganizando a equação do percentual em massa de água na amostra, obtém-se a equação simplificada 4.5, para cálculo do CF , em função apenas do volume do resíduo, em mililitros.

$$CF = 1,7588.V_R \quad (4.5)$$

A partir da equação 4.5, considerando-se a incerteza nas medidas dos volumes do resíduo de aproximadamente 0,1 ml, fora da precisão da escala da proveta, nos dois sistemas de refrigeração analisados, o erro é pouco significativo, como demonstra a tabela 4.3, ou seja, uma variação de 0,17% em CF , para cada 0,1 ml, enquanto que a menor divisão no diagrama, conseguida através de escalímetro é de 0,25%.

Tabela 4.3 - Valores de CF em função de V_R

	Sistema com regenerador			Sistema sem regenerador		
V_R	1,4 ml	1,5 ml	1,6 ml	10,2 ml	10,3 ml	10,4 ml
CF	2,46%	2,63%	2,81%	17,94%	18,11%	18,29%