



## **MANUAL PARA CONSTRUÇÃO E INSTALAÇÃO DO PROTÓTIPO DA BOMBA DE CALOR**

Professor Mestre Frederico Sporket  
Professor Doutor Carlos Fernando Jung

*O presente documento tem o objetivo de difundir a tecnologia desenvolvida no projeto Sistema Otimizado para Aquecimento de Água em Prédios e Residências, Aplicado a Redução do Consumo de Energia de forma a explicar como construir e instalar o protótipo desenvolvido.*

Taquara, agosto de 2013.

## ***Ao Leitor***

O programa de Polos do estado do Rio Grande do Sul tem possibilitado o desenvolvimento de vários projetos em várias regiões do Estado. O vale do Paranhana conta com um Polo instalado no campus das Faculdades Integradas de Taquara – Faccat, com apoio tanto da instituição de ensino, do governo do estado, através da Secretaria da Ciência, Inovação e Desenvolvimento Tecnológico, como da empresa parceira, Pirisa Piretro Industrial LTDA. Com o convênio firmado entre estas três parceiras foi capaz de ser devolvido um projeto que objetiva difundir a tecnologia do uso de Bomba de Calor no aquecimento residencial e predial de água quente de consumo. O foco do projeto é desenvolver um protótipo gerando dados para demonstrar a viabilidade de seu uso além de ofertar um curso para demonstrar o funcionamento e construção do protótipo a empresários e comunidade em geral, interessados no sistema de aquecimento. Para acompanhar o curso desenvolvido se elabora o presente manual, completando o material didático apresentado. Assim o manual é complementado pelo curso oferecido pois alguns conteúdos não podem ser abordados aqui sem uma formação inicial de conceitos de termodinâmica. Também se precisa salientar que o manual é apoiado pelo próprio curso oferecido já que programas computacionais devem ser utilizados e atividades práticas dão a fundamentação ao aqui descrito.

A aqueles que desejarem desenvolver um protótipo, sem a participação no curso oferecido, é importante salientar a necessidade de conhecimentos básicos, tanto teóricos como práticos, em refrigeração.

Por fim, se deixe registrado que o Polo de Inovação Tecnológica Paranhana/Encosta da Serra, se põe a disposição aos interessados para maiores esclarecimentos sobre o projeto desenvolvido. Maiores informações em; <http://polovp.faccat.br/moodle/>.

Os autores,

## 1. A Bomba de Calor e o ciclo termodinâmico de compressão de vapor

Observando o princípio de funcionamento da Bomba de Calor (BC) se nota uma grande semelhança com o refrigerador, sendo a principal diferença o efeito útil. Enquanto que em um refrigerador o efeito útil é baixar a temperatura de um ambiente (interior do refrigerador) na BC o efeito útil é o meio quente, nesse caso água. Observando esse princípio a BC também pode ser aplicada no aquecimento de ar ambiente, em sistemas de calefação. Avaliando o princípio termodinâmico a BC tem a função de transferir energia térmica de um nível energético mais baixo (inferior) a um mais alto (superior). O nível energético inferior é o ar atmosférico, enquanto o nível superior é a água de consumo. Com o objetivo de aproveitar a energia disponível no ar atmosférico, BC transfere esta energia para a água, através de um ciclo de termodinâmico de refrigeração por compressão de vapor.

Para que se tenha como efeito útil o calor, é preciso contrariar a natureza, o que representa um consumo de energia (trabalho elétrico), Figura 1.

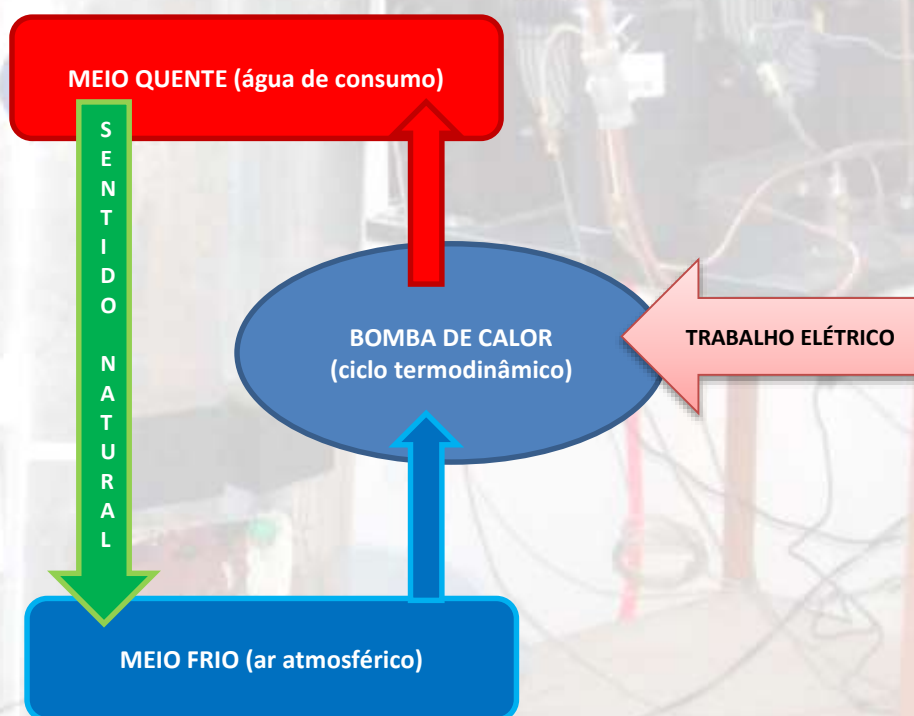


Figura 1 - A transferência natural de calor.

O meio quente já está estabelecido, sendo água, o que exige um reservatório para acumulação. A água não poderá ser aquecida em processo de passagem, pois isso exige uma potência elevada, equipamento caro e de tamanho excessivo, sendo ainda o principal limitador a temperatura de trabalho. No caso do aquecimento por passagem, a troca de calor tem de ser intensificada, o que exige uma temperatura operacional não atingida pela BC.

O meio frio, no caso deste manual, é o ar atmosférico. Assim a BC retira energia da atmosfera para transferir à água. Retirar energia da atmosfera pode ser realizado de forma simples, com uma serpentina aletada, mas apresenta seus inconvenientes, principalmente em atmosferas frias e úmidas. Assim, sempre deve ser previsto um sistema de apoio, em caso de dificuldade de retirar energia da atmosfera.

Para que o sistema proposto na Figura 1 possa ser realizado, um ciclo termodinâmico é necessário. A forma prática mais simples de montar tal ciclo é o chamado ciclo de compressão de vapor. Neste, um conjunto de dispositivos faz circular um fluido, chamado fluido refrigerante (aqui chamado refrigerante), circular em ciclo fechado. Nesse ciclo o refrigerante



necessariamente passa por duas fases, líquido e vapor, se utilizando da mudança de fase como principal forma de troca de calor. A mudança de fase possibilita a troca de calor mais intensa, diminuindo o tamanho dos dispositivos e mantendo a temperatura do refrigerante constante. Para garantir essas trocas de calor mais dois dispositivos são necessários, o compressor e o dispositivo de expansão.

No ciclo termodinâmico por compressão de vapor acontecem quatro processos, cujos dispositivos podem ser observados na Figura 2. O compressor que comprime uma substância na fase de vapor de uma pressão baixa para uma mais alta em um processo quase isoentrópico tem a função de fazer o processo 1-2. Neste processo existe o consumo de energia elétrica para fornecimento do trabalho de compressão. O condensador onde vapor a alta pressão e alta temperatura libera calor resfriando e passando para a fase líquida representa o processo 2-3. Aqui o calor liberado é adicionado à água a ser aquecida. O dispositivo de expansão onde acontece uma queda da pressão, representa o processo 3-4. O evaporador, onde o líquido recebe calor e passa para a fase de vapor representa o processo 4-1. Esta entrada de calor ao ciclo representa a retirada da energia do ar ambiente externo. Assim, são utilizados os fluxos de calor no evaporador e no condensador para transferir energia do ar para a água e como meio de transporte temos o refrigerante.

Para construção da BC estes quatro dispositivos são necessários, com eventuais acréscimos em função das diferenças em relação aos processos reais e proteções ao circuito.

Na Figura 2 se observa uma região definida como unidade evaporadora. Composta por três dispositivos (expansão, evaporador e compressor) é um conjunto mecânico construído em uma estrutura única localizada no meio frio. No caso do protótipo a unidade evaporadora será construída a partir da adaptação de uma unidade condensadora comercial

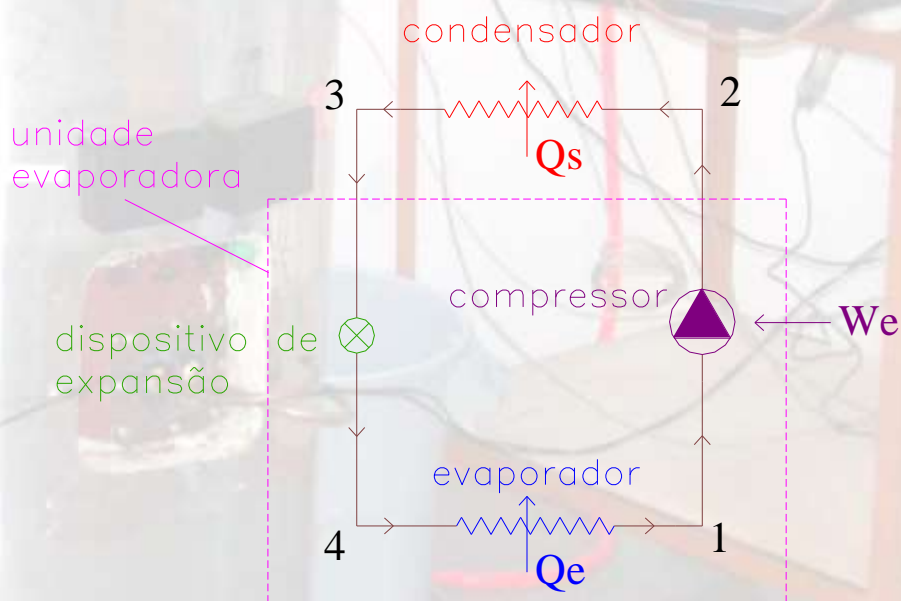


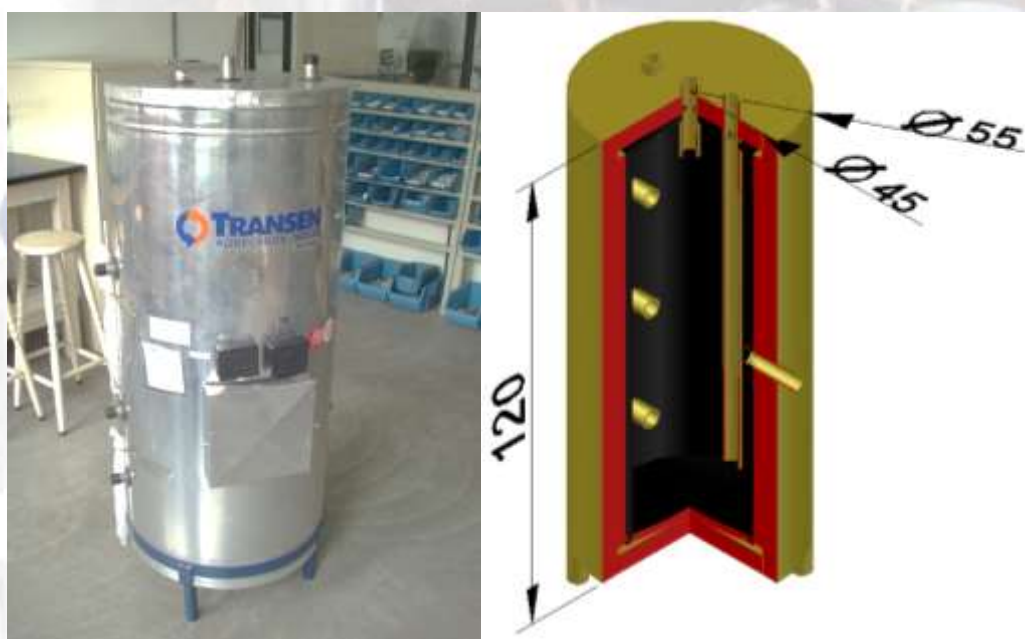
Figura 2 - Dispositivos do ciclo de refrigeração por compressão de vapor.

Dos capítulos 2 ao 6 são demonstrados os métodos de dimensionamento do Boiler e dos dispositivos do ciclo termodinâmico.

## 2. Acumulador de água, o Boiler

Ponto inicial para construção do sistema é estabelecer o volume de água que deve ser armazenada. O dispositivo de armazenamento é chamado de Boiler e comercialmente encontrado nas formas de aquecimento elétrico, a gás e solar. Para cada um dos casos o volume do boiler muda em função da energia de aquecimento. Quando a fonte de calor tem alta potência e disponibilidade facilitada o Boiler tende a ter um volume menor.

Para facilitar a construção da BC, todos dispositivos encontrados comercialmente são usados, isso inclui o Boiler, o que limita o volume aos encontrados no mercado local. Não se faz análise da capacidade de isolamento ou mesmo qualquer outro ponto do Boiler, pois esse já deve atender as normas vigentes. Para seleção de um fabricante recomendamos a análise junto ao INMETRO no PROGRAMA BRASILEIRO DE ETIQUETAGEM que avalia os Boilers de acordo com sua eficiência. Estes dados podem ser obtidos junto ao INMETRO. Importante é que o Boiler seja de construção vertical, pois isso influencia no funcionamento correto da BC bem como sua instalação. A Figura 3 mostra o Boiler comercialmente encontrado e utilizado para construção do protótipo da BC. Nele se pode verificar as entradas e saídas de água na parte superior e lateral esquerda. A figura também mostra um desenho em corte do Boiler indicando as tubulações e as principais dimensões. Como o Boiler adquirido tem aplicação para energia solar, conexões hidráulicas adicionais facilitam a adaptação.



Fonte: Nilton Cesar Padilha Rech

Figura 3 – Boiler comercial utilizado na construção do protótipo.

Não se encontra na literatura uma forma exata de cálculo assim dois métodos são abordados aqui; método A, método de dimensionamento para o Boiler convencional, com resistência elétrica, segundo a ABNT-NB-128 e método B, considerando o Boiler aplicado no aquecimento solar, segundo o projeto de norma 55:003.01-002.

#### Método A

Este método está baseado em tabelas práticas usualmente encontradas em livros voltados ao tema, que se baseiam na norma ABNT-NB-128, já cancelada. O método se apoia em tabelas referencias para o consumo predial de água quente e devem ser atendidos, no mínimo, os valores estabelecidos na Tabela 1.

Tabela 1. Estimativa de consumo.

Aplicação	Consumo diário pessoal $c_{dp} \left( \frac{\text{litros}}{\text{dia} \times \text{pessoa}} \right)$
alojamento provisório	24
casa popular	36
casa rural	36
residência	45
apartamento	60



Para os cálculos:

$$V_{cons} = c_{dp} \cdot n_p$$

Onde;  $V_{cons}$  é o volume consumido diariamente  $\left(\frac{\text{litros}}{\text{dia}}\right)$ .

$c_{dp}$  é o consumo diário por pessoa  $\left(\frac{\text{litros}}{\text{dia} \cdot \text{pessoa}}\right)$ .

$n_p$  o número de pessoas.

Já o dimensionamento do Boiler é estabelecido pelo volume de armazenamento, com água a 70 °C, com resistência elétrica, conforme Tabela 2. Como se considera a energia elétrica disponível a qualquer instante, a medida que existe o consumo de água a resistência vai repondo a temperatura, o que possibilita utilizar o volume do Boiler menor que o volume consumido diariamente.

Tabela 2. Dimensionamento para aquecedores elétricos (resistência).

<b>Volume de armazenamento</b> $V_{armaz}$ (litros)	<b>Volume consumido diariamente a 70 °C</b> $V_{cons}$ $\left(\frac{\text{litros}}{\text{dia}}\right)$	<b>Potência da resistência</b> (kW)
50	60	0,75
75	95	0,75
100	130	1,00
150	200	1,25
200	260	1,50
250	330	2,0
300	430	2,5

Quando o reservatório não estiver à temperatura de 70 °C uma menor quantidade de água fria será misturada no momento do consumo e consequentemente maior quantidade de água quente consumida. Como reflexo o tempo de reaquecimento aumenta o que pode, em parte, ser compensado com maior potência de aquecimento, e se reflete em maior consumo instantâneo, aumentado o pico de consumo de energia. Um dos limitadores da BC é justamente a temperatura do reservatório, que está estabelecida em 55 °C, de acordo com um equipamento comercial produzindo em outro país e também para o Boiler com resistência elétrica adquirido.

**Exemplo:** Efetuando os cálculos para o protótipo, considerando uma residência com quatro pessoas, pode-se calcular o Boiler à resistência elétrica como:

O volume consumido diariamente.

$$V_{cons} = 45 \left( \frac{\text{litros}}{\text{dia} \times \text{pessoa}} \right) \cdot 4 \text{ pessoas}$$

$$V_{cons} = 180 \left( \frac{\text{litros}}{\text{dia}} \right)$$

Já o volume do Boiler pode ser determinado conforme Tabela 2.

$$V_{armaz} = \text{da Tabela 2 com } V_{cons} = 200 \text{ litros}$$
$$V_{armaz} = 150 \text{ litros}$$

Considerando que a água no Boiler está a 55 °C, praticamente na temperatura de consumo, é melhor adotar a  $V_{cons}$  como sendo o volume do Boiler.

## Método B

Neste método se pode avaliar o volume do Boiler, não esquecendo que neste caso a energia, agora solar, não está disponível ao longo de todo o dia, o que aumenta o volume do Boiler.

O projeto de norma da ABNT, 55:003.01-002, estabelece como valores sugeridos para consumo o que segue na Tabela 3. Neste caso deve ser levado em conta que o coletor solar não pode fornecer energia durante todo dia, necessitando armazenar mais energia o que aumenta o volume do Boiler.

Tabela 3. Componentes do sistema de aquecimento solar.

Peças de utilização	Vazão mínima da peça $V_{pu} \left( \frac{\text{litros}}{\text{min}} \right)$	Vazão máxima da peça $V_{pu} \left( \frac{\text{litros}}{\text{min}} \right)$	Ciclo diário $c_d \left( \frac{\text{min}}{\text{pessoa}} \right)$	Temperatura de consumo $T_{cons} (^{\circ}\text{C})$
Ducha de banho	6,6	12,0	10	39 - 40
Lavatório	3,0	4,8	2	39 - 40
Pia de cozinha	3,0	4,8	3	39 - 40

No caso de adotar a Tabela 3, os cálculos podem ser feitos conforme o projeto de norma da ABNT, 55:003.01-002, adaptados nas equações abaixo.

$$V_{cons} = \sum V_{pu} \cdot c_d \cdot n_p$$

Onde;  $V_{cons}$  é o volume consumido diariamente (litros).

$V_{pu}$  é vazão da peça de utilização  $\left( \frac{\text{litros}}{\text{min}} \right)$ .

$c_d$  é o ciclo diário da peça de utilização  $\left( \frac{\text{min}}{\text{pessoa}} \right)$ .

$n_p$  o número de pessoas a utilizar a peça de utilização.

$$V_{armaz} = \frac{V_{cons}(T_{cons} - T_{amb})}{(T_{armaz} - T_{amb})}$$

Onde;  $V_{armaz}$  é o volume do boiler (litros), sugerido  $V_{armaz} \geq 0,75 \cdot V_{cons}$ .

$V_{cons}$  é o volume consumido diariamente (litros).

$T_{cons}$  é a temperatura de consumo ( $^{\circ}\text{C}$ ), sugerido  $40^{\circ}\text{C}$ .

$T_{amb}$  é a temperatura ambiente média anual ( $^{\circ}\text{C}$ ), para a região pode ser obtida no site do projeto (<http://polovp.faccat.br/moodle/course/view.php?id=11>).

$T_{armaz}$  é a temperatura ajusta para o Boiler ( $^{\circ}\text{C}$ ), sugerido ( $T_{armaz} \geq T_{cons}$ ), para o protótipo  $55^{\circ}\text{C}$ .

**Exemplo:** Efetuando os cálculos para o protótipo, considerando uma residência com quatro pessoas, aplicando para ducha e pia de cozinha, reservatório a  $55^{\circ}\text{C}$  e temperatura ambiente  $19,8^{\circ}\text{C}$  (de acordo com o site do projeto) pode-se calcular:

O volume consumido diariamente.

$$V_{cons} = 6,6 \cdot 10 \cdot 4 + 3,0 \cdot 3 \cdot 4$$
$$V_{cons} = 300 \text{ litros}$$

Já o volume do Boiler pode ser determinado conforme.



$$V_{armaz} = \frac{300(40^{\circ}\text{C} - 19,8^{\circ}\text{C})}{(55^{\circ}\text{C} - 19,8^{\circ}\text{C})}$$

$$V_{armaz} = 172 \text{ litros}$$

Se considerada a sugestão  $V_{armaz} \geq 0,75 \cdot V_{cons}$  se pode estabelecer o volume do boiler como.

$$V_{armaz} \geq 0,75 \cdot 300 \text{ litros}$$

$$V_{armaz} \geq 225 \text{ litros}$$

Não esquecendo que a BC tem disponibilidade de energia a qualquer instante do dia e curva de aquecimento satisfatória, se comparada a resistência elétrica o reservatório pode assumir um volume ligeiramente menor que o calculado pelo método B. Note que não existe uma norma brasileira para aplicação de BC, sendo os valores encontrados meramente referenciais.

Para o protótipo foi estabelecido um volume de 200 Litros, que para marca adquirida tem um resistência elétrica comercial de 2 kW e 220 V. O termostato de controle de temperatura vem regulado de fábrica em 55 °C.

### 3. Fluido refrigerante

No ciclo de compressão de vapor há transferência de energia do meio frio ao meio quente transportado por um fluido de refrigeração, refrigerante. Esse fluido é concebido para aplicações específicas, sendo encontrados vários tipos comerciais. Destes para aplicação em BC, pelas suas características, se opta em analisar duas possibilidades, os comercialmente denominados R-22 e R-134a. Note que para utilização destes produtos é preciso ter um cadastro junto ao IBAMA, por serem fluidos potencialmente poluidores (com prejuízo a camada de ozônio e efeito estufa). A compra somente pode ser feita com esse cadastro. Maiores informações sobre o cadastro podem ser obtidas em: <http://servicos.ibama.gov.br/ctf/logout.php> acesso em 30/08/2013 14:24)

Para determinar os parâmetros de operação da BC com os fluidos pré-selecionados se faz uso de um aplicativo de um programa gratuito e comercial, denominado CoolPack (o link para baixar o programa pode ser encontrado em: <http://gestao.faccat.br/moodle/course/view.php?id=28> ou diretamente no desenvolvedor: <http://en.ipu.dk/Soegeresultat.aspx?sw=coolpack>). O Coolpack é um conjunto de ferramentas computacionais desenvolvidas para aplicação em refrigeração, sendo capaz de simular desde ciclos completos até dispositivos isolados. Importante ressaltar que a BC é um ciclo de refrigeração onde o efeito desejado é o aquecimento, e não a refrigeração, assim ao utilizar o programa se deve ter especial cuidado quando se entra com os parâmetros ambientais.

No caso da seleção do fluido refrigerante se utiliza o aplicativo CoolTools: Auxiliary. Veja na Figura 4 onde encontrar o aplicativo depois de instalado e já iniciado o programa CoolPack.



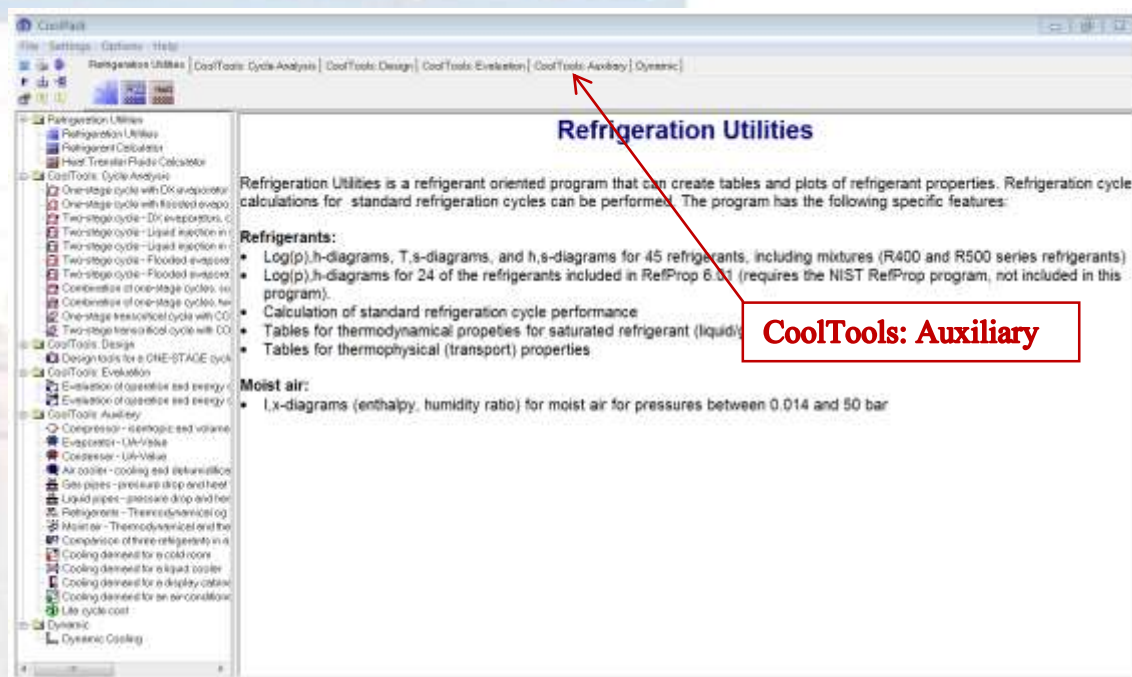


Figura 4 – Tela do programa CoolPack e seleção do aplicativo CoolTools: Auxiliary.

Uma vez aberto o aplicativo se deve utilizar a opção COMPARISON OF REFRIGERANTS. Que pode ser acessada conforme mostrado na Figura 5.

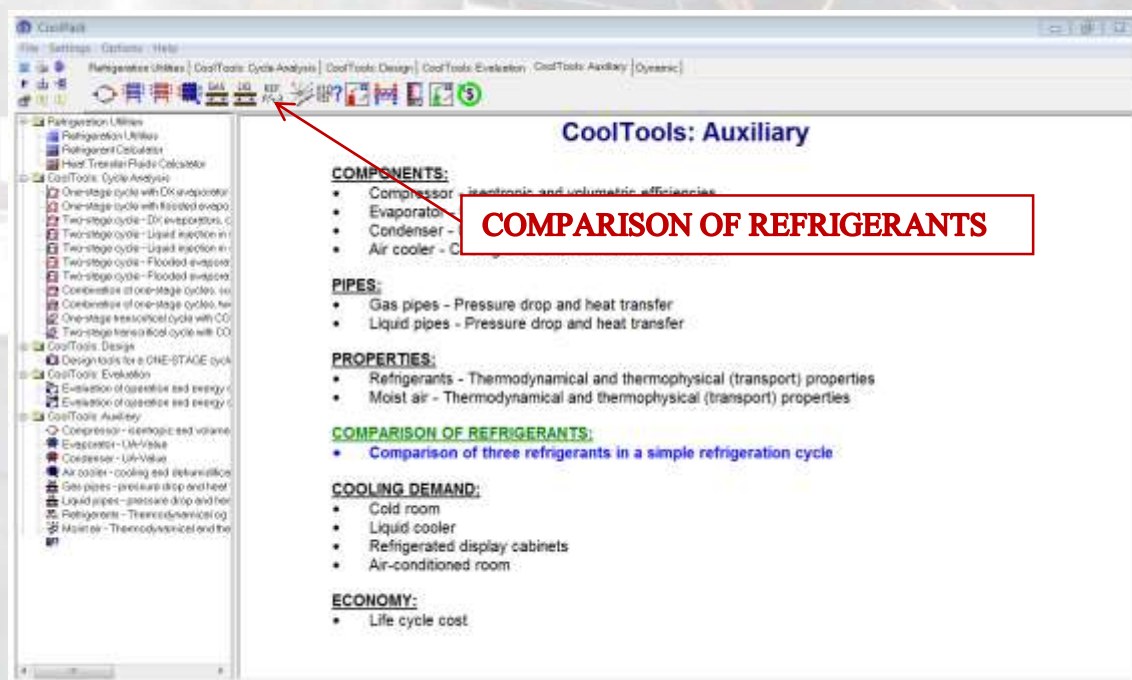


Figura 5 – Seleção do aplicativo COMPARISON OF REFRIGERANTS.

Neste aplicativo é possível simular três fluidos refrigerantes em suas aplicações ideais, desconsiderando as limitações construtivas e ambientais. Assim se pode comparar fluidos refrigerantes operando nas mesmas condições e se obtêm dados a cerca destes e o ciclo operando nas condições ideais. Utilizando os fluidos pré-selecionados, R-22 e R134a, adicionando um terceiro já que o programa assim o solicita, se opta pelo R600a, que tem surgido no mercado. Outros fluidos podem ser simulados se estes já forem utilizados ou mesmo para comparações com a fim de encontrar resultados melhores. Muitos fluidos são misturas de outros, tentando melhorar o desempenho do equipamentos reduzindo os problemas ambientais que possam surgir, por exemplo o R-404a. As misturas comerciais também podem ser simuladas.

Para preenchimento dos dados é necessário informar a capacidade de refrigeração  $Q_E$  (a partir do dimensionamento do Boiler verificar a potência da resistência utiliza no boiler comercial selecionado e aplicar esse valor, para o protótipo foi usado 2 kW), informar os valores  $h_{is}$ ,  $h_{vol}$ ,  $f_Q$  (deixar os valores padrões do programa),  $T_{AMB}$  (considerar a temperatura da água quente de consumo, para o protótipo foi utilizado o valor regulado de fábrica 55 °C),  $T_{ROOM}$  considerar a temperatura do ar atmosférico onde será instalada a BC (conforme estações meteorológicas do projeto mínimas de 2 °C),  $UA_{COND}$ , deixar o padrão do programa  $DT_{SC}$ , usar 10 K,  $UA_{EVAP}$ , deixar o padrão do programa e  $DT_{SH}$ , usar 10K. Uma vez inseridos os dados solicitar que sejam calculados. Assim se obtêm os dados de funcionamento para cada um dos fluidos refrigerantes selecionados. A Figura 5, mostra a tela do aplicativo com os dados inseridos e os resultados obtido após o cálculo. Importante observar nestes resultados o COP (coeficiente de performance) o  $p_E$  (pressão do evaporador),  $p_C$  (pressão do condensador) e  $T_{DSCH}$  (temperatura na descarga do compressor).

**CoolPack**

© 1999 - 2001  
Department of  
Mechanical Engineering  
Technical University  
of Denmark  
Version 1.48  
TOOL A.8

**COMPARISON OF REFRIGERANTS**  
> ONE-STAGE REFRIGERATION CYCLE

COMMON INPUTS		CHOICE OF REFRIGERANT AND RESULTING CAPACITIES			
INPUT	VALUE	REFRIGERANT	R22	R134a	R600a
Cooling Capacity $\dot{Q}_E$ [kW]	3	$\dot{V}_D$ [m <sup>3</sup> /h]	4,04	6,44	12,13
$h_{is}$ [-]	0,7	$\dot{Q}_E$ [kW]	3	3	3
$h_{VOL}$ [-]	0,85	$\dot{W}$ [kW]	1,09	1,08	1,06
$f_Q$ [%]	10	COP [-]	2,74	2,77	2,84
$T_{AMB}$ [°C]	55	$T_E$ [°C]	0,24	0,24	0,24
$T_{ROOM}$ [°C]	2	$T_C$ [°C]	55,66	55,66	55,66
$UA_{COND}$ [kW/K]	6	$p_E$ [kPa]	501,1	295,4	159,0
$DT_{SC}$ [K]	10	$p_C$ [kPa]	2205,5	1515,0	776,7
$UA_{EVAP}$ [kW/K]	1,7	Pressure ratio	4,402	5,129	4,885
$DT_{SH}$ [K]	10	$T_{DSCH}$ [°C]	102,01	79,02	66,67
		DCOP [%]	-3,4	-2,3	0,0

The calculations are based on a simple one-stage cycle with isenthalpic expansion and isobaric evaporation and condensation

Figura 6 – O aplicativo COMPARISON OF REFRIGERANTS com os dados de entrada e os dados calculados.

O COP, coeficiente de performance, é o indicativo da capacidade que o ciclo tem em retirar energia do meio frio em relação a energia gasta para fazê-lo, ou seja, se o COP apresenta valor 2, se desloca duas vezes mais energia térmica que a quantidade de energia consumida. Note que não são levadas em conta as limitações construtivas. Quanto maior o valor do COP melhor para a BC. O valor de  $p_E$  é mais satisfatório quanto maior e o valor de  $p_C$  é mais satisfatório o quanto menor, assim a relação de pressão sobre o compressor diminui e este tem eficiência melhor. O valor de  $T_{DSCH}$  está associado ao tamanho da serpentina condensadora em relação ao desuperaquecimento do fluido refrigerante, que quanto menor o  $T_{DSCH}$ , menor a serpentina. De outra forma esta seria a temperatura máxima do ciclo de refrigeração e consequentemente o valor máximo da água pode ser aquecida. Avaliando de forma global estes parâmetros se pode indicar o fluido refrigerante R-600a como uma boa opção para BC. A questão é que este fluido tem preço de mercado mais elevado e é mais difícil de obter dispositivos mecânicos não tornando viável economicamente. Como segunda opção se pode escolher o R-22, embora com COP um pouco menor que o do R-134a, a relação de pressão é menor, a  $p_E$  mais elevada e  $T_{DSCH}$  também mais elevada. Note que as limitações práticas devem alterar bastante os dados obtidos com esse



aplicativo, sendo apenas um referencial para escolha do fluido refrigerante. Considerando todas as condições da simulação, além da possibilidade em aproveitar condicionadores de ar comerciais com R-22, se opta pelo fluido refrigerante R-22.

#### 4. Unidade condensadora

Como descrito no item 1, a BC funciona conforme o princípio do ciclo por compressão de vapor, o que exige no mínimo 4 dispositivos. Para construção da BC de forma mais simples se utiliza de dispositivos comerciais, os mais prontos possíveis para as aplicações desejadas. No caso do compressor e do evaporador, comercialmente se pode encontrar um dispositivo denominado Unidade Condensadora, que apresenta um conjunto mecânico onde se encontram um compressor, trocador de calor (originalmente o condensador) um ventilador e uma estrutura de fixação. Como na BC a troca de calor com o ar atmosférico acontece no evaporador, a serpentina condensadora original vai ser adaptada para trabalhar como evaporadora. Não se apresentam problemas construtivos para essa alteração. Importante na seleção desse dispositivo é que tenha um bom ventilador, com vazão de ar aproximada de 1200 m<sup>3</sup>/h e se possível mais que um ventilador. Alta vazão de ar é importante em temperaturas atmosféricas baixas, por ter pouca energia armazenada no ar se faz necessário um volume grande de circulação deste. Dois ventiladores se fazem importantes pois permitem um controle da vazão do ar. Em temperaturas atmosféricas elevadas um volume de ar excessivo pode provocar problemas no compressor. Nesse caso se pode desligar um dos ventiladores, trabalhando com metade da vazão de ar.

A Figura 7 mostra a unidade condensadora adquirida para construção da BC. Na Figura 7 ainda se pode observar, na figura (a), a serpentina, originalmente condensadora, na figura (b) o compressor e os dois ventiladores, e na figura (c) um cilindro vertical, sendo este um acessório denominado de tanque de líquido. O tanque de líquido não é de uso obrigatório para o ciclo de compressão de vapor mas importante no desenvolvimento do protótipo por dois fatores; a unidade condensadora trabalha fora de seu projeto original e as temperatura ambiente tem grande variação. Se observados os dados atmosféricos das estações meteorológicas do projeto se pode observar que valores da temperatura varia de 2 °C a 43°C, variação bastante elevada que muda muito os parâmetros de operação da BC. O tanque de líquido tem o objetivo de, quando se tem a mistura das fases líquida e vapor na tubulação, garantir que em sua saída somente se tenha a fase líquida. Uma vez que todas otimizações sobre o protótipo são realizadas se pode estabelecer sua necessidade ou não.



Figura 7 – Unidade condensadora comercial adquirida para o protótipo.

Para dimensionamento da unidade condensadora alguns parâmetro precisam ser determinados e a partir destes a procura em catálogos comerciais pela melhor opção.

Assim pontos importantes para seleção da unidade condensadora são:

- ❖ *fluido refrigerante utilizado*, no caso do protótipo R-22, pela seleção prévia no item 3.

- ❖ **sua aplicação**, baixa pressão de retorno (LBP), média pressão de retorno (MBP) e alta pressão de retorno (HBP). A chamada pressão de retorno se refere a pressão de trabalho do evaporador, a mais baixa do sistema, e está relacionada a temperatura ambiente. Para aplicação em BC se deve utilizar uma unidade condensadora de média/alta pressão de retorno (M/HBP), pois o evaporador trabalha a temperaturas ambientes e não em aplicação de refrigeração (conservação ou congelamento de alimentos).
- ❖ **tensão da rede elétrica e frequência**, para o protótipo 220 V 60 Hz.
- ❖ **capacidade de refrigeração**, esta se refere a capacidade de calor que pode ser transferida no meio frio (o evaporador). Para seleção se deve observar a temperatura de evaporação padrão, para HBP, 7,2 °C. Nesta temperatura a unidade condensadora deve transferir o calor com o valor comercial. Mesmo sendo 7,2 °C a temperatura padrão, a unidade condensadora pode trabalhar com valores diferentes destes, mas a capacidade de refrigeração se altera. O catálogo de cada unidade condensadora deve fornecer o valor de capacidade de refrigeração para temperaturas diferentes da padrão. Como seleção se deve observar que a capacidade de refrigeração, na temperatura de trabalho esperada para o evaporador seja igual ou maior que a potência da resistência elétrica do Boiler comercial selecionado. Assim se garante que a BC consegue fornecer o mesmo calor que a resistência elétrica original, na temperatura ambiente estimada. Para o protótipo, a capacidade de refrigeração considerada foi de 2 kW, aproximadamente 6800 BTU/h ou 1720 kcal/h, em função do Boiler utilizado. Embora a temperatura mínima para região seja 2 °C, não se dimensiona a unidade condensadora para esse limite e se espera que ela funcione satisfatoriamente a temperatura ambiente de 10 °C. Isso implica que a temperatura de evaporação deve ser de 0 °C. Conforme medições efetuadas no protótipo nessas temperaturas ambientais a temperatura de evaporação é 10 K menor que a ambiente. Comercialmente a temperatura de evaporação para seleção da unidade condensadora será de 7,2 °C. Caso a BC se já dimensionada para uma aplicação em época específica do ano, se deve utilizar uma temperatura de evaporação mais adequada, lembrando que quanto menor essa temperatura menor o desempenho da BC.
- ❖ **Ventilador**, considerar vazão de ar de 1200 m<sup>3</sup>/h, com dois ventiladores.
- ❖ **Elemento expansivo**, também chamado de dispositivo de expansão, a unidade condensadora deve ser aplicável para capilar e válvula de expansão.

Aplicando esses parâmetros em um catálogo de fabricante se pode fazer a seleção. Observando um catálogo comercial se estabelece a unidade condensadora MODELO UT6222E.

14	UT	2	500000	1000000	1500000	2000000	2500000	3000000	3500000	4000000	4500000	5000000	5500000	6000000	6500000	7000000	7500000	8000000	8500000	9000000	9500000	10000000	10500000	11000000	11500000	12000000	12500000	13000000	13500000	14000000	14500000	15000000	15500000	16000000	16500000	17000000	17500000	18000000	18500000	19000000	19500000	20000000	20500000	21000000	21500000	22000000	22500000	23000000	23500000	24000000	24500000	25000000	25500000	26000000	26500000	27000000	27500000	28000000	28500000	29000000	29500000	30000000	30500000	31000000	31500000	32000000	32500000	33000000	33500000	34000000	34500000	35000000	35500000	36000000	36500000	37000000	37500000	38000000	38500000	39000000	39500000	40000000	40500000	41000000	41500000	42000000	42500000	43000000	43500000	44000000	44500000	45000000	45500000	46000000	46500000	47000000	47500000	48000000	48500000	49000000	49500000	50000000	50500000	51000000	51500000	52000000	52500000	53000000	53500000	54000000	54500000	55000000	55500000	56000000	56500000	57000000	57500000	58000000	58500000	59000000	59500000	60000000	60500000	61000000	61500000	62000000	62500000	63000000	63500000	64000000	64500000	65000000	65500000	66000000	66500000	67000000	67500000	68000000	68500000	69000000	69500000	70000000	70500000	71000000	71500000	72000000	72500000	73000000	73500000	74000000	74500000	75000000	75500000	76000000	76500000	77000000	77500000	78000000	78500000	79000000	79500000	80000000	80500000	81000000	81500000	82000000	82500000	83000000	83500000	84000000	84500000	85000000	85500000	86000000	86500000	87000000	87500000	88000000	88500000	89000000	89500000	90000000	90500000	91000000	91500000	92000000	92500000	93000000	93500000	94000000	94500000	95000000	95500000	96000000	96500000	97000000	97500000	98000000	98500000	99000000	99500000	100000000	100500000	101000000	101500000	102000000	102500000	103000000	103500000	104000000	104500000	105000000	105500000	106000000	106500000	107000000	107500000	108000000	108500000	109000000	109500000	110000000	110500000	111000000	111500000	112000000	112500000	113000000	113500000	114000000	114500000	115000000	115500000	116000000	116500000	117000000	117500000	118000000	118500000	119000000	119500000	120000000	120500000	121000000	121500000	122000000	122500000	123000000	123500000	124000000	124500000	125000000	125500000	126000000	126500000	127000000	127500000	128000000	128500000	129000000	129500000	130000000	130500000	131000000	131500000	132000000	132500000	133000000	133500000	134000000	134500000	135000000	135500000	136000000	136500000	137000000	137500000	138000000	138500000	139000000	139500000	140000000	140500000	141000000	141500000	142000000	142500000	143000000	143500000	144000000	144500000	145000000	145500000	146000000	146500000	147000000	147500000	148000000	148500000	149000000	149500000	150000000	150500000	151000000	151500000	152000000	152500000	153000000	153500000	154000000	154500000	155000000	155500000	156000000	156500000	157000000	157500000	158000000	158500000	159000000	159500000	160000000	160500000	161000000	161500000	162000000	162500000	163000000	163500000	164000000	164500000	165000000	165500000	166000000	166500000	167000000	167500000	168000000	168500000	169000000	169500000	170000000	170500000	171000000	171500000	172000000	172500000	173000000	173500000	174000000	174500000	175000000	175500000	176000000	176500000	177000000	177500000	178000000	178500000	179000000	179500000	180000000	180500000	181000000	181500000	182000000	182500000	183000000	183500000	184000000	184500000	185000000	185500000	186000000	186500000	187000000	187500000	188000000	188500000	189000000	189500000	190000000	190500000	191000000	191500000	192000000	192500000	193000000	193500000	194000000	194500000	195000000	195500000	196000000	196500000	197000000	197500000	198000000	198500000	199000000	199500000	200000000	200500000	201000000	201500000	202000000	202500000	203000000	203500000	204000000	204500000	205000000	205500000	206000000	206500000	207000000	207500000	208000000	208500000	209000000	209500000	210000000	210500000	211000000	211500000	212000000	212500000	213000000	213500000	214000000	214500000	215000000	215500000	216000000	216500000	217000000	217500000	218000000	218500000	219000000	219500000	220000000	220500000	221000000	221500000	222000000	222500000	223000000	223500000	224000000	224500000	225000000	225500000	226000000	226500000	227000000	227500000	228000000	228500000	229000000	229500000	230000000	230500000	231000000	231500000	232000000	232500000	233000000	233500000	234000000	234500000	235000000	235500000	236000000	236500000	237000000	237500000	238000000	238500000	239000000	239500000	240000000	240500000	241000000	241500000	242000000	242500000	243000000	243500000	244000000	244500000	245000000	245500000	246000000	246500000	247000000	247500000	248000000	248500000	249000000	249500000	250000000	250500000	251000000	251500000	252000000	252500000	253000000	253500000	254000000	254500000	255000000	255500000	256000000	256500000	257000000	257500000	258000000	258500000	259000000	259500000	260000000	260500000	261000000	261500000	262000000	262500000	263000000	263500000	264000000	264500000	265000000	265500000	266000000	266500000	267000000	267500000	268000000	268500000	269000000	269500000	270000000	270500000	271000000	271500000	272000000	272500000	273000000	273500000	274000000	274500000	275000000	275500000	276000000	276500000	277000000	277500000	278000000	278500000	279000000	279500000	280000000	280500000	281000000	281500000	282000000	282500000	283000000	283500000	284000000	284500000	285000000	285500000	286000000	286500000	287000000	287500000	288000000	288500000	289000000	289500000	290000000	290500000	291000000	291500000	292000000	292500000	293000000	293500000	294000000	294500000	295000000	295500000	296000000	296500000	297000000	297500000	298000000	298500000	299000000	299500000	300000000	300500000	301000000	301500000	302000000	302500000	303000000	303500000	304000000	304500000	305000000	305500000	306000000	306500000	307000000	307500000	308000000	308500000	309000000	309500000	310000000	310500000	311000000	311500000	312000000	312500000	313000000	313500000	314000000	314500000	315000000	315500000	316000000	316500000	317000000	317500000	318000000	318500000	319000000	319500000	320000000	320500000	321000000	321500000	322000000	322500000	323000000	323500000	324000000	324500000	325000000	325500000	326000000	326500000	327000000	327500000	328000000	328500000	329000000	329500000	330000000	330500000	331000000	331500000	332000000	332500000	333000000	333500000	334000000	334500000	335000000	335500000	336000000	336500000	337000000	337500000	338000000	338500000	339000000	339500000	340000000	340500000	341000000	341500000	342000000	342500000	343000000	343500000	344000000	344500000	345000000	345500000	346000000	346500000	347000000	347500000	348000000	348500000	349000000	349500000	350000000	350500000	351000000	351500000	352000000	352500000	353000000	353500000	354000000	354500000	355000000	355500000	356000000	356500000	357000000	357500000	358000000	358500000	359000000	359500000	360000000	360500000	361000000	361500000	362000000	362500000	363000000	363500000	364000000	364500000	365000000	365500000	366000000	366500000	367000000	367500000	368000000	368500000	369000000	369500000	370000000	370500000	371000000	371500000	372000000	372500000	373000000	373500000	374000000	374500000	375000000	375500000	376000000	376500000	377000000	377500000	378000000	378500000	379000000	379500000	380000000	380500000	381000000	381500000	382000000	382500000	383000000	383500000	384000000	384500000	385000000	385500000	386000000	386500000	387000000	387500000	388000000	388500000	389000000	389500000	390000000	390500000	391000000	391500000	392000000	392500000	393000000	393500000	394000000	394500000	395000000	395500000	396000000	396500000	397000000	397500000	398000000	398500000	399000000	399500000	400000000	400500000	401000000	401500000	402000000	402500000	403000000	403500000	404000000	404500000	405000000	405500000	406000000	406500000	407000000	407500000	408000000	408500000	409000000	409500000	410000000	410500000	411000000	411500000	412000000	412500000	413000000	413500000	414000000	414500000	415000000	415500000	416000000	416500000	417000000	417500000	418000000	418500000	419000000	419500000	420000000	420500000	421000000	421500000	422000000	422500000	423000000	423500000	424000000	424500000	425000000	425500000	426000000	426500000	427000000	427500000	428000000	428500000	429000000	429500000	430000000	430500000	431000000	431500000	432000000	432500000	433000000	433500000	434000000	434500000	435000000	435500000	436000000	436500000	437000000	437500000	438000000	438500000	439000000	439500000	440000000	440500000	441000000	441500000	442000000	442500000	443000000	443500000	444000000	444500000	445000000	445500000	446000000	446500000	447000000	447500000	448000000	448500000	449000000	44
----	----	---	--------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	----



Caso o modelo selecionado não esteja disponível, buscar o mais próximo que atenda as especificações, ou melhor. No caso do protótipo se conseguiu no mercado o modelo UNJ9232E.

Alguns fabricantes também possuem catálogo eletrônico online para seleção de produtos, como o caso da EMBRACO, onde se pode selecionar as unidades condensadoras, através de seus parâmetros de trabalho, em: <http://www.embraco.com/catalog/Default.aspx?language=PT> acesso em 02/09/2013 00:05. Para o caso do protótipo o modelo selecionado seria o UNJ9232E com capacidade de refrigeração aproximada de 3600 W.

## 5. Dispositivo de expansão

O dispositivo de expansão é o elemento que controla o fluxo de fluido refrigerante em relação as pressões de trabalho. Em harmonia com o compressor, o dispositivo de expansão permite que o compressor trabalhe dentro dos parâmetros de projeto, atendendo as especificações mecânicas e elétricas. O dispositivo de expansão pode ser de duas formas construtivas, tubo capilar ou válvula de expansão. Independente do tipo utilizado o dispositivo de expansão deve casar com o compressor, assim é importante utilizar os dados do compressor instalado na unidade condensadora para realizar o dimensionamento.

No caso do compressor instalado na unidade condensadora, modelo NJ9232E, os dados de catálogo a serem considerados são os da Figura 9.

CONDIÇÕES DE TESTE:		ASHRAE46			(Temperauta de condensação 45°C (+113°F) )					
@208V60Hz		Forçada								
Temperatura de evaporação		Capacidade de refrigeração			Consumo de potência	Consumo de corrente	Fluxo de massa	FAIXA DE EFICIÊNCIA		
		+/- 5%			+/- 5%	+/- 5%	+/- 5%	+/- 7%		
°C	(°F)	[Btu/h]	[kcal/h]	[W]	[W]	[A]	[kg/h]	[Btu/Wh]	[kcal/Wh]	[W/W]
-20	(- 4)	4244	1069	1244	911	4.75	23.75	4.67	1.18	1.37
-15	(+ 5)	6082	1533	1782	1027	5.32	34.12	5.91	1.49	1.73
-10	(+14)	8023	2022	2351	1147	5.91	45.17	6.99	1.76	2.05
-5	(+23)	10080	2540	2954	1271	6.51	57.04	7.93	2.00	2.32
0	(+32)	12266	3091	3594	1400	7.13	69.84	8.77	2.21	2.57
+5	(+41)	14595	3678	4277	1535	7.75	83.72	9.51	2.40	2.79
+10	(+50)	17081	4304	5005	1675	8.38	98.80	10.20	2.57	2.99

CONDIÇÕES DE TESTE:		ASHRAE46			(Temperauta de condensação 55°C (+131°F) )					
@208V60Hz		Forçada								
Temperatura de evaporação		Capacidade de refrigeração			Consumo de potência	Consumo de corrente	Fluxo de massa	FAIXA DE EFICIÊNCIA		
		+/- 5%			+/- 5%	+/- 5%	+/- 5%	+/- 7%		
°C	(°F)	[Btu/h]	[kcal/h]	[W]	[W]	[A]	[kg/h]	[Btu/Wh]	[kcal/Wh]	[W/W]
-20	(- 4)	3395	856	995	926	4.77	20.41	3.67	0.93	1.08
-15	(+ 5)	4975	1254	1458	1065	5.47	30.01	4.67	1.18	1.37
-10	(+14)	6696	1687	1962	1211	6.20	40.59	5.53	1.39	1.62
-5	(+23)	8571	2160	2511	1362	6.94	52.26	6.30	1.59	1.85
0	(+32)	10613	2675	3110	1520	7.70	65.15	6.98	1.76	2.05
+5	(+41)	12837	3235	3762	1686	8.46	79.39	7.61	1.92	2.23
+10	(+50)	15257	3845	4471	1859	9.22	95.12	8.21	2.07	2.41

Figura 9 – Dados do compressor para evaporação de -10 °C a 10 °C na condensação de 55 °C.

A Figura 9 mostra os dados do compressor para evaporação -10 °C a 10 °C, embora sejam esperadas temperaturas de evaporação maiores. O valor de 10 °C é limitado pelo catálogo do compressor por ser temperatura da norma sob qual foi ensaiado. O compressor deve suportar as temperaturas de evaporação maiores em que vai trabalhar, por que nesses casos o tempo de funcionamento é curto, já que a capacidade calorífica deve ser maior que 4471 W. Com capacidades caloríficas maiores o reaquecer da água do Boiler é mais rápido.

**Tubo capilar;** de forma construtiva mais simples, se trata de um tubo de diâmetro interno bem determinado e comprimento definido. É um elemento que provoca a queda de pressão



permanente para um determinado dimensionamento. Sua vantagem é o baixo custo, em contrapartida não permite nenhum controle sobre o ciclo de refrigeração. É indicado para equipamentos que funcionam em temperaturas não muito variáveis.



Figura 10 – Imagem de um tubo capilar.

Caso a BC vá trabalhar em temperaturas específicas e pouco variáveis se pode dimensionar o tubo capilar com o programa da empresa fabricante de dispositivo de refrigeração Danfoss. O programa denominado DanCap pode ser encontrado no site <http://gestao.faccat.br/moodle/course/view.php?id=28> ou diretamente no desenvolvedor <http://www.danfoss.com/Portugal/BusinessAreas/Refrigeration+and+Air+Conditioning/Product+Selection+Tools+Details/DanCap.htm> acesso em 02/09/2013 01:35.

Utilizando o DanCap para os limites de evaporação de  $-10^{\circ}\text{C}$  e  $10^{\circ}\text{C}$  com condensação de  $50^{\circ}\text{C}$  e considerando um superaquecimento de 10 K, se obtêm os resultados da Figura 11.

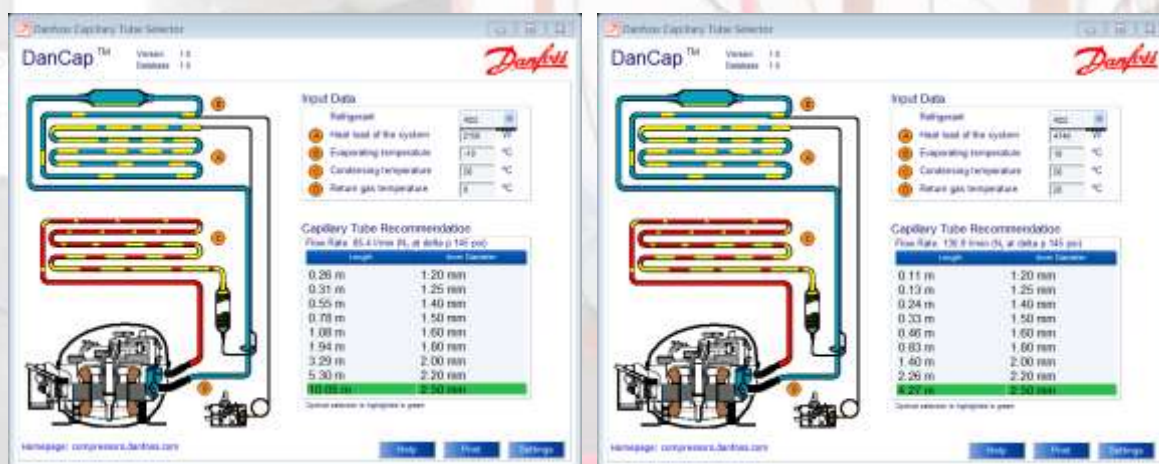


Figura 11 – Janelas do programa DanCap para duas simulações de capilar, evaporação ao  $-10^{\circ}\text{C}$  e  $10^{\circ}\text{C}$ .

A Figura 11 mostra a simulação para duas condições de evaporação a  $-10^{\circ}\text{C}$ , medida no protótipo, e  $10^{\circ}\text{C}$ , limite do programa, com temperatura de condensação de  $50^{\circ}\text{C}$ , limitada pelo programa. As tabelas da figura indicam as possibilidades de tubo capilar a utilizar, enquanto os valores indicados em verde são os sugeridos. Se pode notar a grande diferença de comprimento para o tubo capilar de mesmo diâmetro 2,50 mm. O comprimento varia de 10,05 m a 4,27 m. Isso sugere que a melhor opção para a BC é a utilização da válvula de expansão.

**Válvula de expansão termostática;** diferente do tubo capilar a válvula de expansão pode atuar sobre o ciclo de refrigeração ajustando a vazão do fluido refrigerante em função de alguns parâmetros. A mais simples das válvulas faz o controle sobre as pressões de trabalho somente pela temperatura do fluido refrigerante na entrada do compressor. Quando esta temperatura se



eleva a válvula de expansão se abre permitindo a passagem de mais fluido refrigerante. Assim o evaporador se inunda com mais líquido aproveitando melhor a área de troca do evaporador. A figura 12 mostra a imagem de válvula de expansão, com seu bulbo para medição de temperatura.



Figura 12 – Válvula de expansão termostática.

Embora a válvula de expansão permita uma regulação isso normalmente não é feito pois se necessita de uma boa medição para tal. Como protótipo isso poderia ser feito pois as medições são realizadas mas, como o propósito de possibilitar que a BC seja construída por outras pessoas a montagem é conduzida sem alterações na regulação. O melhor que se pode fazer é adquirir uma válvula de expansão com orifício intercambiável. A válvula de expansão tem sua capacidade determinada por um orifício interno, que pode ou não ser intercambiável. É interessante, embora de custo maior, utilizar uma válvula de expansão com orifício intercambiável por isso permite que se use o mesmo corpo para capacidade de refrigeração diferentes. Assim se houver uma mudança significativa nos parâmetros de funcionamento da BC se tem a possibilidade de alterar a capacidade da válvula de expansão. A troca do orifício só pode ser feita desconectando a válvula de expansão da tubulação, ou seja abrindo o circuito de refrigeração. Assim, a troca do orifício não pode ser feito como um ajuste do sistema às variações das condições ambientais, e sim, somente com alteração dos dispositivos que compõe o ciclo.

A válvula de expansão está relacionada a capacidade de refrigeração, consequentemente a capacidade do compressor. Para sua seleção é preciso ter em mãos um catálogo de fabricante onde são necessários conhecer a capacidade de refrigeração nominal, faixa de temperatura de evaporação, temperatura de condensação, subresfriamento de líquido, fluido refrigerante, tipo de orifício e tipo de conexões. As Figura 13 e Figura 14 mostram parte de um catálogo de seleção de válvula de expansão da marca Danfoss. Na Figura 13 se faz uma seleção prévia, a partir da temperatura de evaporação. No caso da BC e da região de aplicação, são esperadas temperaturas de evaporação baixas no inverno, quando a BC deve ter o maior desempenho. Assim a seleção leva ao tipo T2/TE com temperatura de evaporação entre  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

**Quadro geral de válvulas de expansão para refrigerantes fluorados**

Tipo	Capacidade nominal R-22 kW	Faixa de temperatura de evaporação <sup>1)</sup>					Refrigerantes				MOP	Orifício intercambiável	Conexões		
		N	NM	NL	B	A	R-22	R-134a	R-404A R-507 R-402B	R-407C			Rúscas	Sektor cabo ODF	Flanges
T2/TE2	0,5 — 15,5	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	
TE3	19,7 — 55,3	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	
TE12	26,8 — 84,4	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	
TE20	108	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	
TE35	239 — 356	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	
PHF	105 — 1890	x				x	x	x	x	x	x	x			x

1) Faixa N: —40°C a +10°C  
 Faixa NM: —40°C a -2°C  
 Faixa NL: —40°C a -13°C  
 Faixa B: —60°C a -25°C  
 Faixa A: +10°C a +50°C

Figura 13 – Catálogo de válvula de expansão termostática da DANFOSS, seleção prévia.

**Válvulas de expansão termostática com conexão rosca, tipos T2 e TE2**  
 Faixa N (sem MOP) -40 a +10°C

**R-22 / R-134a / R-404A / R-507 / R-402B / R-407C**

Refrigerante	Tipo de válvula	Capacidade nominal kW	Número do orifício	Equalização de pressão	Conexões em polegada rosca		Nº de código com orifícios
					Entrada	Saída	
R-22	TX2-0.15	0,5	08	Int.	3/8	1/2	068Z320609
	TX2-0.3	1,0	09	Int.	3/8	1/2	068Z320610
	TX2-0.7	2,5	01	Int.	3/8	1/2	068Z320601
	TX2-1.0	3,5	02	Int.	3/8	1/2	068Z320602
	TX2-1.5	5,2	03	Int.	3/8	1/2	068Z320603
	TX2-2.3	8,0	04	Int.	3/8	1/2	068Z320604
	TX2-3.0	10,5	05	Int.	3/8	1/2	068Z320605
	TX2-4.5	15,5	06	Int.	3/8	1/2	068Z320606
	TEX2-0.15	0,5	08	Ext.	3/8	1/2	068Z320909
	TEX2-0.3	1,0	09	Ext.	3/8	1/2	068Z320910
	TEX2-0.7	2,5	01	Ext.	3/8	1/2	068Z320901
	TEX2-1.0	3,5	02	Ext.	3/8	1/2	068Z320902
	TEX2-1.5	5,2	03	Ext.	3/8	1/2	068Z320903

Figura 14 – Catálogo de válvula de expansão termostática da DANFOSS, seleção do nº de código.

A Figura 14, indica o nº de código das válvulas de expansão Danfoss, com orifícios intercambiável, de acordo com a capacidade de refrigeração nominal. No caso do protótipo, o compressor, para temperatura de evaporação de -10 °C e condensação de 55 °C, apresenta uma capacidade de refrigeração de 1962 W. A temperatura de evaporação foi estabelecida em função da aplicação da BC no inverno. Assim a válvula de expansão recomendada, como o devido orifício, tem nº de código 068Z320601.

## 6. Condensador

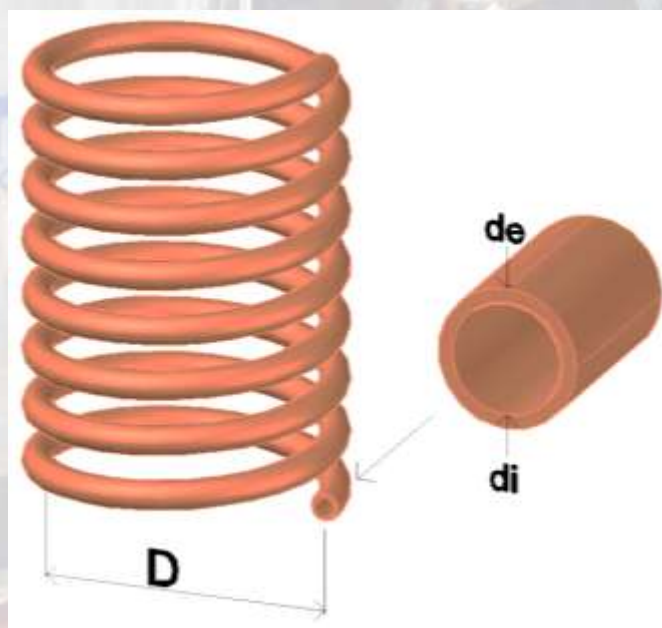
O dispositivo de condensação um trocador de calor confeccionado de tubo de cobre enrolado na forma helicoidal, deve ser construído, pois não é encontrado pronto no mercado. É muito importante que este trocador tenha área de troca suficiente para que o calor possa ser adicionado a água na quantidade desejada. Por trabalhar em temperatura baixa, se comparado a resistência original, a área de troca se torna bastante elevada. Tradicionalmente estes trocadores são colocados com seu eixo na vertical, o que exige o uso de um Boiler vertical. Isso se faz importante para haver uma boa distribuição de temperaturas no interior do condensador garantindo as três regiões distintas, desuperaquecimento, condensação e subresfriamento. Na primeira região, o desuperaquecimento, o fluido refrigerante que sai do compressor na fase de vapor a alta temperatura deve ser resfriado até a temperatura de mudança de fase de condensação. Em seguida o fluido troca de fase, saído da fase de vapor para fase de líquido, é onde acontece a maior troca de calor. Por último o fluido refrigerante deve ser subresfriado, garantido que se mantenha na fase líquida, o que é exigido pelo dispositivo de expansão. Para dimensionamento dessas regiões se faz uso de uma metodologia de troca de calor em tubos horizontais, que geram equações complicadas pelos diversos parâmetros envolvidos. Baseado no trabalho de HERBERT (1992) foram desenvolvidos três softwares computacionais, um para cada região avaliada. Estes softwares podem ser encontrados em <http://gestao.faccat.br/moodle/course/view.php?id=28> denominados CONDESU, para a região



de desuperaquecimento, CONCOND, para região de condensação e CONSUB, para região de subresfriamento. Estes softwares estão baseado no sistema operacional DOS, sendo arquivos executáveis não necessitando de instalação e rodam no sistema operacional WINDOS 32 Bits. Apenas deve ser observado que estes não funcionam nos computadores com sistema operacional WINDOWS 64 Bits. Observar que para esses softwares o separador decimal é o ponto e não a vírgula.

**Importante ressaltar que os dados gerados e utilizados são de inteira responsabilidade do usuário por se tratar de um software para dimensionamento referencial e que seus desenvolvedores não se responsabilizam por erros que possam surgir.**

O Condensador utilizado é do tipo helicoidal, de eixo vertical, imerso na água dentro do Boiler comercial. As dimensões utilizadas podem ser observadas na Figura 15.



Fonte: Nilton Cesar Padilha Rech

Figura 15 – Desenho do condensador helicoidal de eixo vertical

Para utilização dos softwares desenvolvidos, as dimensões referenciais são aquelas mostradas na Figura 15, e os parâmetros de entrada seguem conforme os itens abaixo.

**CONDESU;** o fluido refrigerante, ao sair do compressor, se encontra na fase de vapor a altas temperaturas e pressões ( $110\text{ }^{\circ}\text{C}$  e pressão manométrica  $250\text{ kPa} = 355\text{ PSI}_g$ ). Nessas condições não acontece a mudança de fase para líquido, sendo necessário resfriar esse vapor. Assim a primeira região do condensador fica responsável em diminuir a temperatura até o início da mudança de fase. Essa região do condensador, de calor sensível, pode ser dimensionada com o software CONDESU para ao qual são necessários os seguintes dados:

Temperatura de saturação, em K ( $T_{\text{água}}\text{ }^{\circ}\text{C} + 8\text{ }^{\circ}\text{C} + 273$ ), para o protótipo 336 K.

Temperatura do vapor superaquecido, em K ( $T_{\text{descarga do compressor}}\text{ }^{\circ}\text{C} + 273$ ), para o protótipo 383 K.

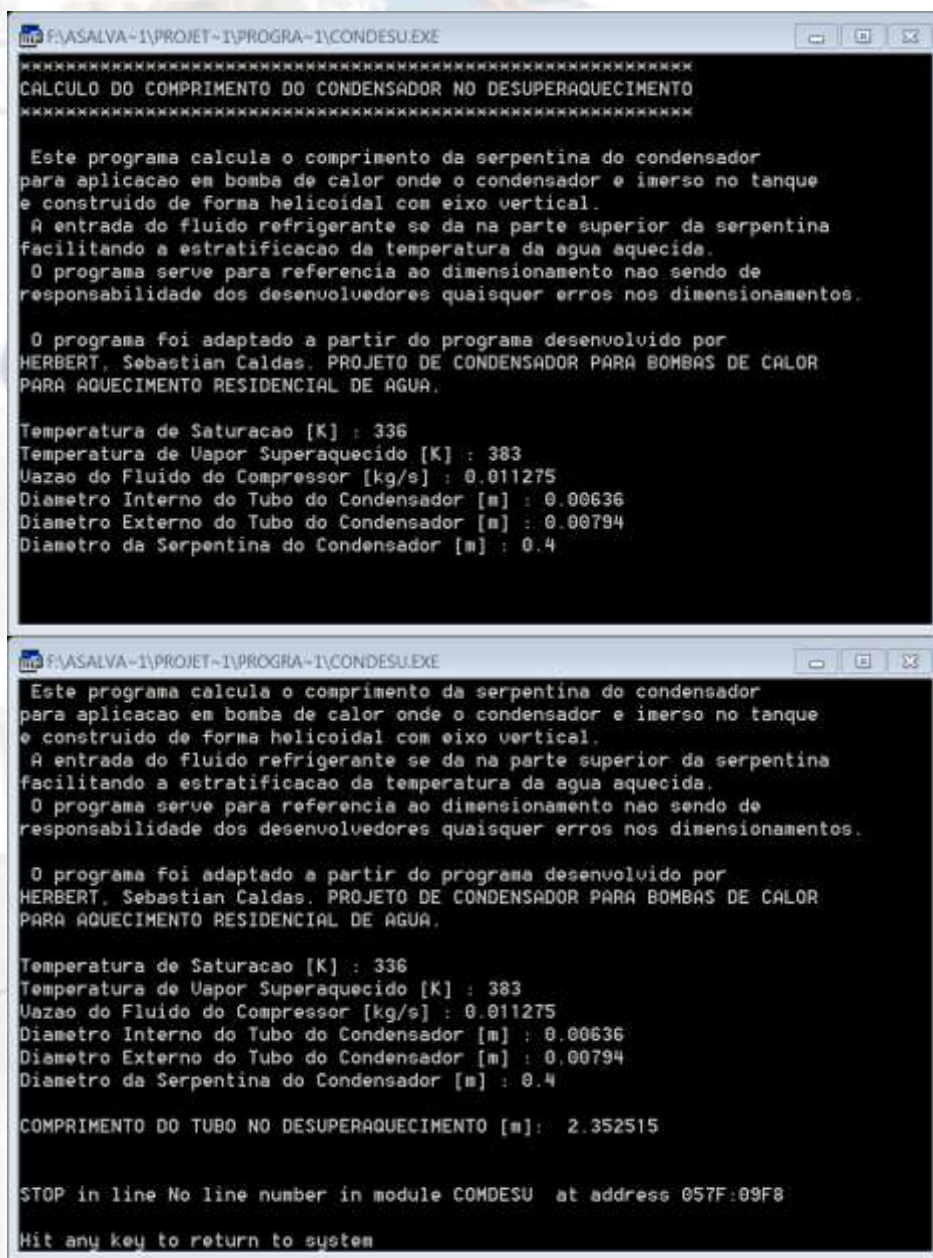
Vazão mássica do fluido no compressor, em kg/s (deve ser adquirida pela tabela do compressor, Figura 9, 40,59 kg/h), para o protótipo 0,011275 kg/s.

Diâmetro interno do tubo do condensador, em m (observar a tabela comercial de tubos de cobre, é sugerido utilizar a bitola igual a da saída do compressor), para o protótipo 6,36 mm = 0,00636 m.

Diâmetro externo do tubo do condensador, em m (observar a tabela comercial de tubos de cobre, é sugerido utilizar a bitola igual a da saída do compressor), para o protótipo 7,94 mm = 0,00794 m.

Diâmetro da serpentina do condensador, em m ( a limitação deste diâmetro são o diâmetro do Boiler e a forma de instalação, sugerido o valor do raio do Boiler), para o protótipo 0,6 m.

A Figura 16 mostra as telas do software com os dados de entrada e comprimento calculado.



```
F:\ASALVA-1\PROJET-1\PROGRA-1\CONDESU.EXE
*****
CALCULO DO COMPRIMENTO DO CONDENSADOR NO DESUPERAQUECIMENTO
*****

Este programa calcula o comprimento da serpentina do condensador
para aplicacao em bomba de calor onde o condensador e imerso no tanque
e construido de forma helicoidal com eixo vertical.
A entrada do fluido refrigerante se da na parte superior da serpentina
facilitando a estratificacao da temperatura da agua aquecida.
O programa serve para referencia ao dimensionamento nao sendo de
responsabilidade dos desenvolvedores quaisquer erros nos dimensionamentos.

O programa foi adaptado a partir do programa desenvolvido por
HERBERT, Sebastian Caldas. PROJETO DE CONDENSADOR PARA BOMBAS DE CALOR
PARA AQUECIMENTO RESIDENCIAL DE AGUA.

Temperatura de Saturacao [K] : 336
Temperatura de Vapor Superaquecido [K] : 383
Uazao do Fluido do Compressor [kg/s] : 0.011275
Diametro Interno do Tubo do Condensador [m] : 0.00636
Diametro Externo do Tubo do Condensador [m] : 0.00794
Diametro da Serpentina do Condensador [m] : 0.4

F:\ASALVA-1\PROJET-1\PROGRA-1\CONDESU.EXE
Este programa calcula o comprimento da serpentina do condensador
para aplicacao em bomba de calor onde o condensador e imerso no tanque
e construido de forma helicoidal com eixo vertical.
A entrada do fluido refrigerante se da na parte superior da serpentina
facilitando a estratificacao da temperatura da agua aquecida.
O programa serve para referencia ao dimensionamento nao sendo de
responsabilidade dos desenvolvedores quaisquer erros nos dimensionamentos.

O programa foi adaptado a partir do programa desenvolvido por
HERBERT, Sebastian Caldas. PROJETO DE CONDENSADOR PARA BOMBAS DE CALOR
PARA AQUECIMENTO RESIDENCIAL DE AGUA.

Temperatura de Saturacao [K] : 336
Temperatura de Vapor Superaquecido [K] : 383
Uazao do Fluido do Compressor [kg/s] : 0.011275
Diametro Interno do Tubo do Condensador [m] : 0.00636
Diametro Externo do Tubo do Condensador [m] : 0.00794
Diametro da Serpentina do Condensador [m] : 0.4

COMPRIMENTO DO TUBO NO DESUPERAQUECIMENTO [m]: 2.352515

STOP in line No line number in module COMDESU at address 057F:09F8
Hit any key to return to system
```

Figura 16 – Telas do software CONDESU desenvolvido para dimensionamento do condensador.

Com os dados simulados para o protótipo se obtém, na primeira região do condensador, um comprimento de tubo de 2,4 m.

**CONCOND;** uma vez reduzida a temperatura do vapor que sai do compressor se encontra a região de mudança de fase, condensação, onde o vapor se transforma em líquido. Essa é a principal e mais intensa troca de calor no condensador, girando em torno de 80 % do calor total trocado no condensador. A pressão se mantém como a da saída do compressor, 250 kPa



manométrica enquanto a temperatura baixa para a temperatura de condensação. Se espera que essa temperatura seja de 8 °C a 10 °C maior que a da água quente. O software CONCOND calcula o comprimento dessa região do condensador, onde são esperados os seguintes dados de entrada:

Temperatura de saturação, em K ( $T_{\text{água}}^{\circ\text{C}} + 8^{\circ\text{C}} + 273$ ), para o protótipo 336 K.

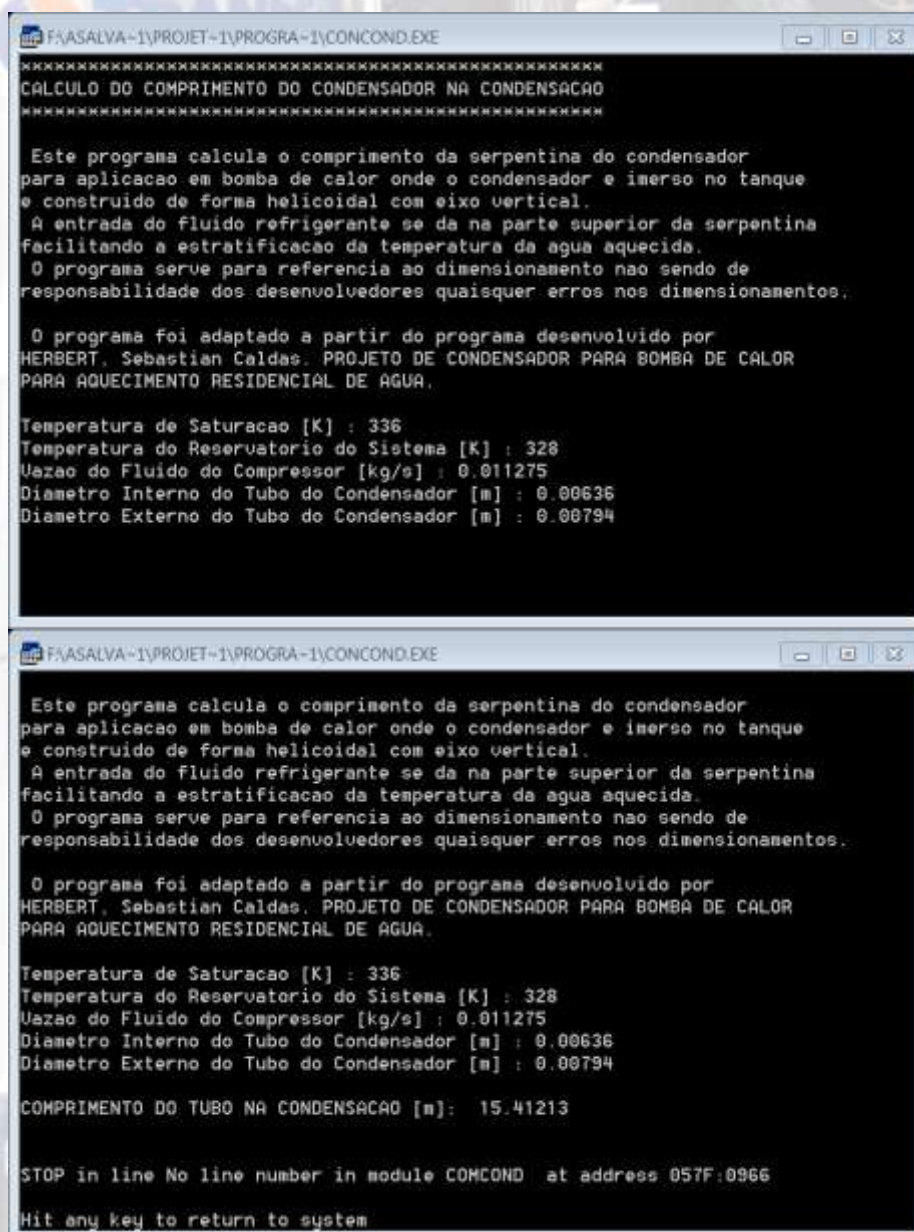
Temperatura do reservatório do sistema, em K ( $T_{\text{água}}^{\circ\text{C}} + 273$ ), para o protótipo 328 K.

Vazão mássica do fluido no compressor, em kg/s (deve ser adquirida pela tabela do compressor, Figura 9, 40,59 kg/h), para o protótipo 0,011275 kg/s.

Diâmetro interno do tubo do condensador, em m (observar a tabela comercial de tubos de cobre, é sugerido utilizar a bitola igual a da saída do compressor), para o protótipo 6,36 mm = 0,00636 m.

Diâmetro externo do tubo do condensador, em m (observar a tabela comercial de tubos de cobre, é sugerido utilizar a bitola igual a da saída do compressor), para o protótipo 7,94 mm = 0,00794 m.

A Figura 17 mostra as telas do software com os dados de entrada e comprimento calculado.



```
F:\ASALVA-1\PROJET-1\PROGRA-1\CONCOND.EXE
*****
CALCULO DO COMPRIMENTO DO CONDENSADOR NA CONDENSACAO
*****

Este programa calcula o comprimento da serpentina do condensador
para aplicacao em bomba de calor onde o condensador e imerso no tanque
e construido de forma helicoidal com eixo vertical.
A entrada do fluido refrigerante se da na parte superior da serpentina
facilitando a estratificacao da temperatura da agua aquecida.
O programa serve para referencia ao dimensionamento nao sendo de
responsabilidade dos desenvolvedores quaisquer erros nos dimensionamentos.

O programa foi adaptado a partir do programa desenvolvido por
HERBERT, Sebastian Caldas. PROJETO DE CONDENSADOR PARA BOMBA DE CALOR
PARA AQUECIMENTO RESIDENCIAL DE AGUA.

Temperatura de Saturacao [K] : 336
Temperatura do Reservatorio do Sistema [K] : 328
Vazao do Fluido do Compressor [kg/s] : 0.011275
Diametro Interno do Tubo do Condensador [m] : 0.00636
Diametro Externo do Tubo do Condensador [m] : 0.00794

F:\ASALVA-1\PROJET-1\PROGRA-1\CONCOND.EXE
Este programa calcula o comprimento da serpentina do condensador
para aplicacao em bomba de calor onde o condensador e imerso no tanque
e construido de forma helicoidal com eixo vertical.
A entrada do fluido refrigerante se da na parte superior da serpentina
facilitando a estratificacao da temperatura da agua aquecida.
O programa serve para referencia ao dimensionamento nao sendo de
responsabilidade dos desenvolvedores quaisquer erros nos dimensionamentos.

O programa foi adaptado a partir do programa desenvolvido por
HERBERT, Sebastian Caldas. PROJETO DE CONDENSADOR PARA BOMBA DE CALOR
PARA AQUECIMENTO RESIDENCIAL DE AGUA.

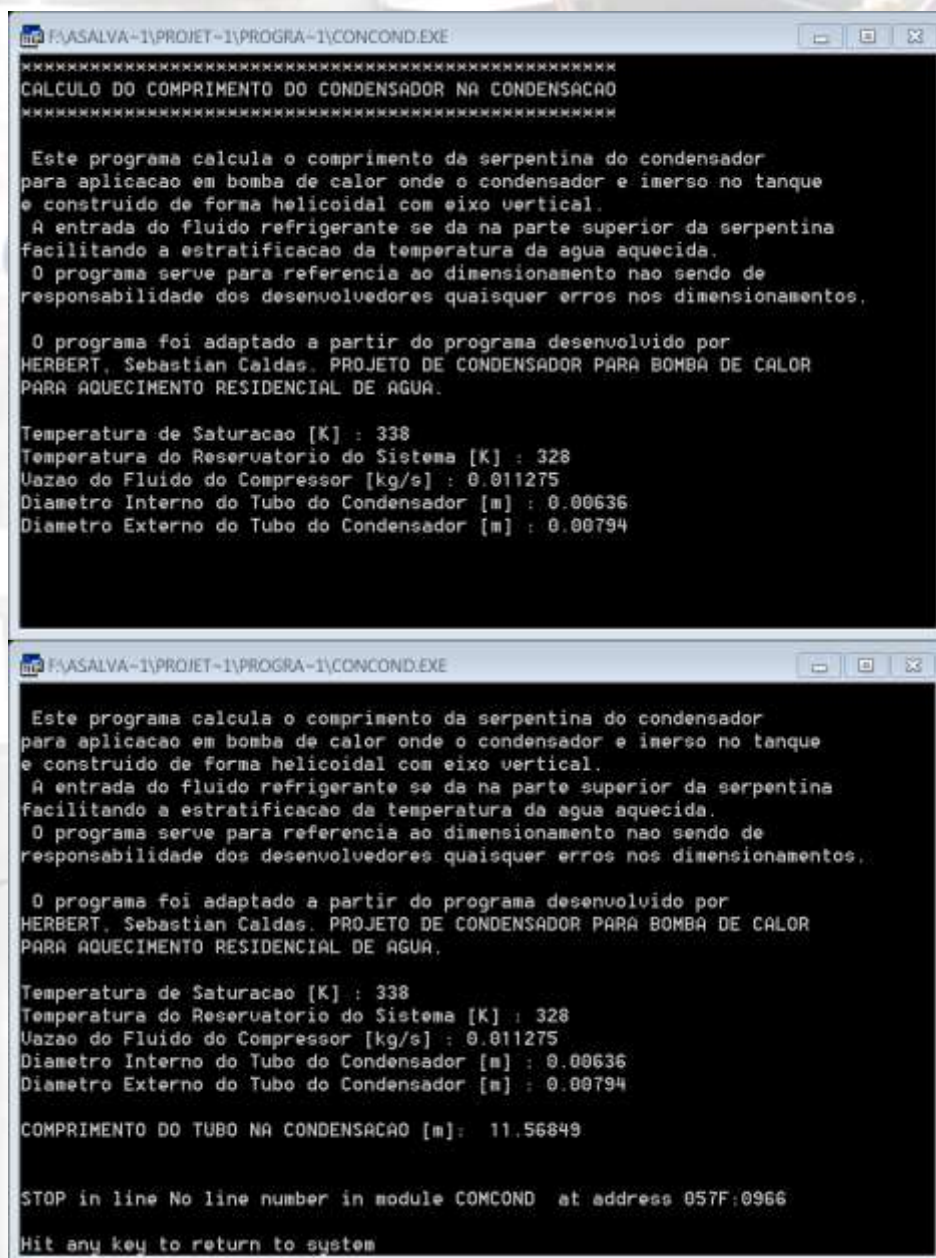
Temperatura de Saturacao [K] : 336
Temperatura do Reservatorio do Sistema [K] : 328
Vazao do Fluido do Compressor [kg/s] : 0.011275
Diametro Interno do Tubo do Condensador [m] : 0.00636
Diametro Externo do Tubo do Condensador [m] : 0.00794

COMPRIMENTO DO TUBO NA CONDENSACAO [m]: 15.41213

STOP in line No line number in module COMCOND at address 057F:0966
Hit any key to return to system
```

Figura 17 – Telas do software CONCOND desenvolvido para dimensionamento do condensador.

Com os dados simulados para o protótipo se obtém, na mudança de fase do condensador, um comprimento de tubo de 15,4 m. Note que este comprimento é maior que o comercialmente encontrado para o tubo. Assim se faz um redimensionamento dessa região, considerando agora a diferença entre a temperatura da água e do fluido refrigerante em condensação de 10 °C. Para esse caso; Temperatura de saturação, em K ( $T_{\text{água}} \text{ } ^\circ\text{C} + 1 - ^\circ\text{C} + 273$ ), para o protótipo 338 K. Como pequenas variações nos parâmetros se refletem em alterações significativas do comprimento do tubo, essa nova estimativa pode ser feita. Note que o software é para dimensionamento referencial e o ciclo de refrigeração modifica automaticamente seus parâmetro de trabalho procurando a melhor condição operacional. A Figura 18 mostra o novo valor simulado.



```
F:\ASALVA-1\PROJET-1\PROGRA-1\CONCOND.EXE
*****
CALCULO DO COMPRIMENTO DO CONDENSADOR NA CONDENSACAO
*****

Este programa calcula o comprimento da serpentina do condensador
para aplicacao em bomba de calor onde o condensador e imerso no tanque
e construido de forma helicoidal com eixo vertical.
A entrada do fluido refrigerante se da na parte superior da serpentina
facilitando a estratificacao da temperatura da agua aquecida.
O programa serve para referencia ao dimensionamento nao sendo de
responsabilidade dos desenvolvedores quaisquer erros nos dimensionamentos.

O programa foi adaptado a partir do programa desenvolvido por
HERBERT, Sebastian Caldas. PROJETO DE CONDENSADOR PARA BOMBA DE CALOR
PARA AQUECIMENTO RESIDENCIAL DE AGUA.

Temperatura de Saturacao [K] : 338
Temperatura do Reservatorio do Sistema [K] : 328
Uazao do Fluido do Compressor [kg/s] : 0.011275
Diametro Interno do Tubo do Condensador [m] : 0.00636
Diametro Externo do Tubo do Condensador [m] : 0.00794

F:\ASALVA-1\PROJET-1\PROGRA-1\CONCOND.EXE
Este programa calcula o comprimento da serpentina do condensador
para aplicacao em bomba de calor onde o condensador e imerso no tanque
e construido de forma helicoidal com eixo vertical.
A entrada do fluido refrigerante se da na parte superior da serpentina
facilitando a estratificacao da temperatura da agua aquecida.
O programa serve para referencia ao dimensionamento nao sendo de
responsabilidade dos desenvolvedores quaisquer erros nos dimensionamentos.

O programa foi adaptado a partir do programa desenvolvido por
HERBERT, Sebastian Caldas. PROJETO DE CONDENSADOR PARA BOMBA DE CALOR
PARA AQUECIMENTO RESIDENCIAL DE AGUA.

Temperatura de Saturacao [K] : 338
Temperatura do Reservatorio do Sistema [K] : 328
Uazao do Fluido do Compressor [kg/s] : 0.011275
Diametro Interno do Tubo do Condensador [m] : 0.00636
Diametro Externo do Tubo do Condensador [m] : 0.00794

COMPRIMENTO DO TUBO NA CONDENSACAO [m]: 11.56849

STOP in line No line number in module COMCOND at address 057F:0966
Hit any key to return to system
```

Figura 18 – Telas do software CONDESU para novo dimensionamento.

Agora se observa na Figura 18 que o novo comprimento calculado passa a ser de 11,6 m, estando dentro do valor comercial.



**CONSUBR;** na terceira região do condensador se faz o subresfriamento, o fluido refrigerante é levado a uma temperatura menor que a da condensação, para garantir o pleno funcionamento do dispositivo de expansão. Um valor usual é de uma temperatura 8 °C mais baixa que a da saturação. Essa região do condensador, de calor sensível, pode ser dimensionada com o software CONSUBR para ao qual são necessários os seguintes dados:

Temperatura de saturação, em K ( $T_{\text{água}}^{\circ\text{C}} + 8^{\circ\text{C}} + 273$ ), para o protótipo 336 K.

Temperatura do líquido subresfriado, em K ( $T_{\text{saturação K}} - 8$ ), para o protótipo 328 K.

Vazão mássica do fluido no compressor, em kg/s (deve ser adquirida pela tabela do compressor, Figura 9, 40,59 kg/h), para o protótipo 0,011275 kg/s.

Diâmetro interno do tubo do condensador, em m (observar a tabela comercial de tubos de cobre, é sugerido utilizar a bitola igual a da saída do compressor), para o protótipo 6,36 mm = 0,00636 m.

Diâmetro externo do tubo do condensador, em m (observar a tabela comercial de tubos de cobre, é sugerido utilizar a bitola igual a da saída do compressor), para o protótipo 7,94 mm = 0,00794 m.

Diâmetro da serpentina do condensador, em m (a limitação deste diâmetro são o diâmetro do Boiler e a forma de instalação, sugerido o valor do raio do Boiler), para o protótipo 0,6 m.

A Figura 19 mostra as telas do software com os dados de entrada e comprimento calculado.

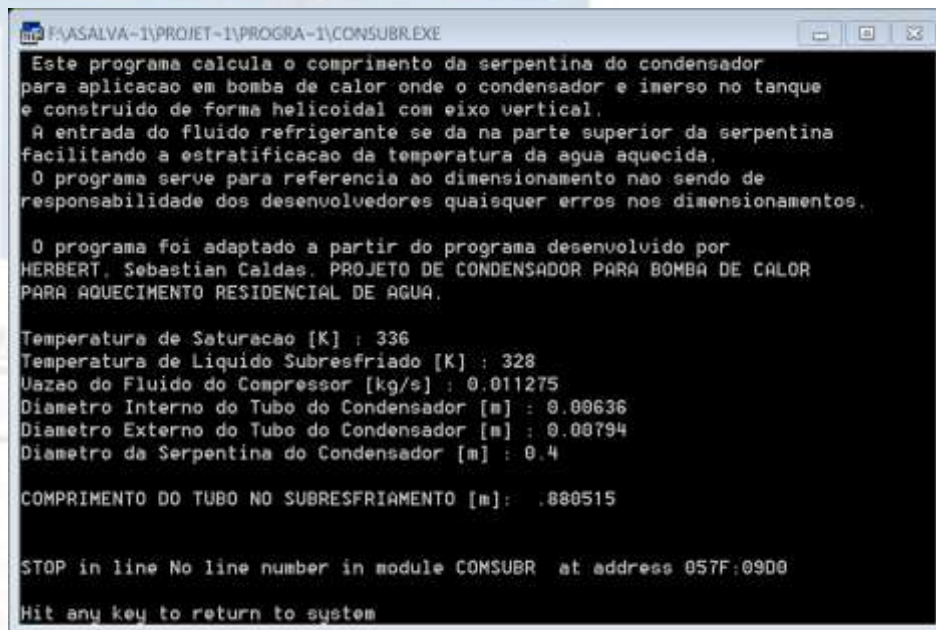


```
F:\ASALVA-1\PROJET-1\PROGRA-1\CONSUBR.EXE
*****
CALCULO DO COMPRIMENTO DO CONDENSADOR NO SUBRESFRIAMENTO
*****

Este programa calcula o comprimento da serpentina do condensador
para aplicacao em bomba de calor onde o condensador e imerso no tanque
e construido de forma helicoidal com eixo vertical.
A entrada do fluido refrigerante se da na parte superior da serpentina
facilitando a estratificacao da temperatura da agua aquecida.
O programa serve para referencia ao dimensionamento nao sendo de
responsabilidade dos desenvolvedores quaisquer erros nos dimensionamentos.

O programa foi adaptado a partir do programa desenvolvido por
HERBERT, Sebastian Caldas. PROJETO DE CONDENSADOR PARA BOMBA DE CALOR
PARA AQUECIMENTO RESIDENCIAL DE AGUA.

Temperatura de Saturacao [K] : 336
Temperatura de Liquido Subresfriado [K] : 328
Vazao do Fluido do Compressor [kg/s] : 0.011275
Diamentro Interno do Tubo do Condensador [m] : 0.00636
Diamentro Externo do Tubo do Condensador [m] : 0.00794
Diamentro da Serpentina do Condensador [m] : 0.4
```



```
F:\ASALVA-1\PROJET-1\PROGRA-1\CONSUBR.EXE

Este programa calcula o comprimento da serpentina do condensador
para aplicacao em bomba de calor onde o condensador e imerso no tanque
e construido de forma helicoidal com eixo vertical.
A entrada do fluido refrigerante se da na parte superior da serpentina
facilitando a estratificacao da temperatura da agua aquecida.
O programa serve para referencia ao dimensionamento nao sendo de
responsabilidade dos desenvolvedores quaisquer erros nos dimensionamentos.

O programa foi adaptado a partir do programa desenvolvido por
HERBERT. Sebastian Caldas. PROJETO DE CONDENSADOR PARA BOMBA DE CALOR
PARA AQUECIMENTO RESIDENCIAL DE AGUA.

Temperatura de Saturacao [K] : 336
Temperatura de Liquido Subresfriado [K] : 328
Uazao do Fluido do Compressor [kg/s] : 0.011275
Diametro Interno do Tubo do Condensador [m] : 0.00636
Diametro Externo do Tubo do Condensador [m] : 0.00794
Diametro da Serpentina do Condensador [m] : 0.4

COMPRIMENTO DO TUBO NO SUBRESFRIAMENTO [m]: .880515

STOP in line No line number in module COMSUBR at address 057F:09D9
Hit any key to return to system
```

Figura 19 – Telas do software CONSUBR desenvolvido para dimensionamento do condensador.

Para os dados de entrada do protótipo, conforme Figura 19, o comprimento do condensador deve ser de 0,9 m.

Assim, para dimensionamento do comprimento do condensador, se deve somar as parcelas das três regiões, desuperaquecimento, condensação e subresfriamento. Somando os valores se obtém um comprimento total da serpentina condensadora de 15 m.



## 7. Construção da Bomba de Calor

*Os subcapítulos que se seguem apresentam a construção do protótipo e é importante salientar a necessidade de conhecimentos básicos, tanto teóricos como práticos, em refrigeração.*

Para construção da BC se pretende valorizar os itens comerciais mais adequados, facilitando a construção. Isso, de certa forma, pode prejudicar o funcionamento ou rendimento, sendo que melhorias podem ser adicionadas por aqueles que pretendem construir o sistema.

Os itens utilizados para construção do protótipo podem ser encontrados na lista da Tabela 1, sendo que os itens em verde são necessários ao funcionamento do ciclo termodinâmico e os itens em vermelho podem ter suas quantidades variadas de acordo com a construção.

Tabela 1. Itens utilizados na construção da Bomba de Calor.

ITEM	QUANTIDADE	OBSERVAÇÕES
Boiler	01 peça	Foi utilizado de 200 litros, mas deve ser observado o dimensionamento conforme item 2.
Condensador	01 peça	Deve ser calculado conforme item 6.
Unidade condensadora	01 peça	Foi utilizada a UNJ9232E da EMBRACO, mas deve ser observado o dimensionamento conforme item 4.
Tanque de líquido	01 peça	Deve ter capacidade da carga de fluido refrigerante mais, no mínimo, 20% para expansão.
Acumulador de sucção ou separador de líquido	01 peça	Deve ter capacidade de pelo menos 50% da carga de fluido refrigerante.
Válvula de expansão	01 peça	Foi utilizado o código 068Z320601 da DANFOSS. Deve ser observado o dimensionamento conforme item 5.
Filtro secador	01 peça	Deve ter a capacidade de refrigeração da unidade condensadora, ou mais.
Visor de líquido	02 peças	De acordo com a tubulação utilizada na sucção do compressor e no condensador.
Pressostato de baixa pressão	01 peça	Regulagem de 0 a 6 bar, com rearme automático.
Pressostato de alta pressão	01 peça	Regulagem de 10 a 330 bar, com rearme automático.
Controlador de temperatura	01 peça	Termostato para controlar a temperatura, pode ser usado o original do Boiler mas é sugerido o modelo RT-607Riplus da FullGauge, pois possibilita a aplicação de eventos e pode ser controlado a distância pela internet. A FullGauge agora tem termostatos específicos para Bomba de Calor, segundo seu departamento comercial.
Tubo de cobre	20 metros	Verificar dimensionamento do condensador mais uma folga para as conexões e distâncias entre elementos de refrigeração.
Fluido refrigerante	1,5 kg	A quantidade pode variar de acordo com a tubulação utilizada. Comercialmente se pode adquirir em cilindros descartáveis de 13,6 kg.

### 7.1 Adaptação do Boiler para aplicação da serpentina condensadora.

Trabalhando com uma serpentina condensadora em seu interior, o Boiler deve receber adaptações que possibilitem essa instalação de forma simples. Para tanto se considera instalação do Boiler em nível, ou seja, o nível da água é estabelecido pelo depósito de água fria que fica a mesma altura. Isso permite que o Boiler tenha uma abertura em sua parte superior sem vazamentos de água. Formas alternativas podem ser consideradas e a eventual pressão de água dentro do Boiler não tem influência sobre a BC por se tratar de circuito separado. No entanto, alterações desse tipo devem levar em conta um redimensionamento do vazo de pressão bem como os testes pertinentes segundo as normas vigentes.

O Boiler original se apresenta segundo a Figura 3. Já a alteração é apresentada na Figura 20, onde se mostra a abertura na parte superior do Boiler, com a retirada do isolamento térmico. O furo para inserir a serpentina condensadora foi feito com uma serra copo de uso industrial para metal de diâmetro 64 mm (2 ½"). Nesse furo deve ser inserida a serpentina condensadora.



Figura 20 – Alteração no Boiler para instalação da serpentina condensadora.



## 7.2 Construção e instalação da serpentina condensadora.

O dimensionamento da serpentina condensadora segue o que estabelece o capítulo 6, atendendo as especificações do projeto. Para o protótipo foi utilizado um tubo de cobre comercial de 5/16" com comprimento de 15 m e o helicoide com diâmetro de 0,4 m. Para que se possa enrolar essa serpentina se deve ter um cilindro com o raio do helicoide como referência para a dobra do tubo de cobre. Para ao diâmetro de 0,4 m foi utilizado um cilindro de fluido refrigerante descartável de 13,6 kg, como mostra Figura 21. Nessa figura se observa que o helicoide foi enrolado de forma que as entrada e saída do condensador ficassem para o mesmo lado. Como visto anteriormente, essa não é a melhor forma construtiva para o trocador de calor, mas a melhor forma para instalação do helicoide no Boiler.



Figura 21 – Dobra do tubo de cobre para construção do condensador em forma helicoidal.

Para instalar o condensador helicoidal no Boiler basta girá-lo junto furo de 64 mm feito previamente. A Figura 22 mostra a instalação do tubo no Boiler.





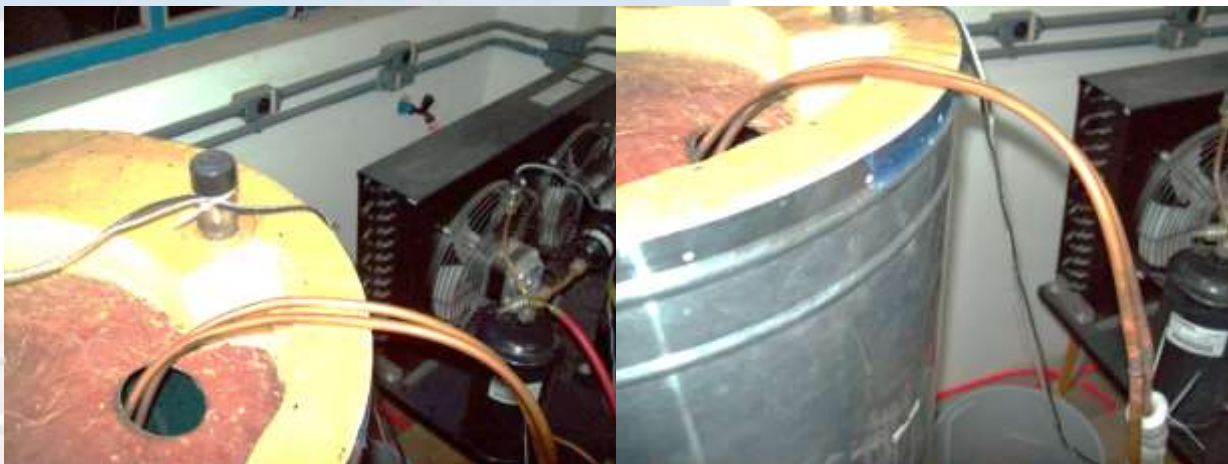


Figura 22 – Instalação do tubo de cobre no Boiler.

As conexões do condensador foram feitas por meio de solda, sendo sempre vantajosa em relação ao flange pelo fato de evitar o vazamento de fluido refrigerante.

### 7.3 Adaptação da unidade condensadora.

A unidade condensadora original deve ser adaptada para funcionar como unidade evaporadora. Para tanto é preciso fazer a inversão do fluxo do fluido refrigerante. O trocador de calor original (condensador) passa a trabalhar como evaporador. Assim é preciso dessoldar as tubulações e soltar o compressor. Se observada a Figura 2, a unidade condensadora trabalha dos pontos 1 ao 3, enquanto a unidade evaporadora trabalha dos pontos 4 ao 2. O compressor é reposicionado somente para facilitar a conexão das novas tubulações. A Figura 23 mostra a unidade condensadora original e a Figura 24 a unidade condensadora modificada (unidade evaporadora), sendo que a numeração de identificação segue conforme Figura 2.

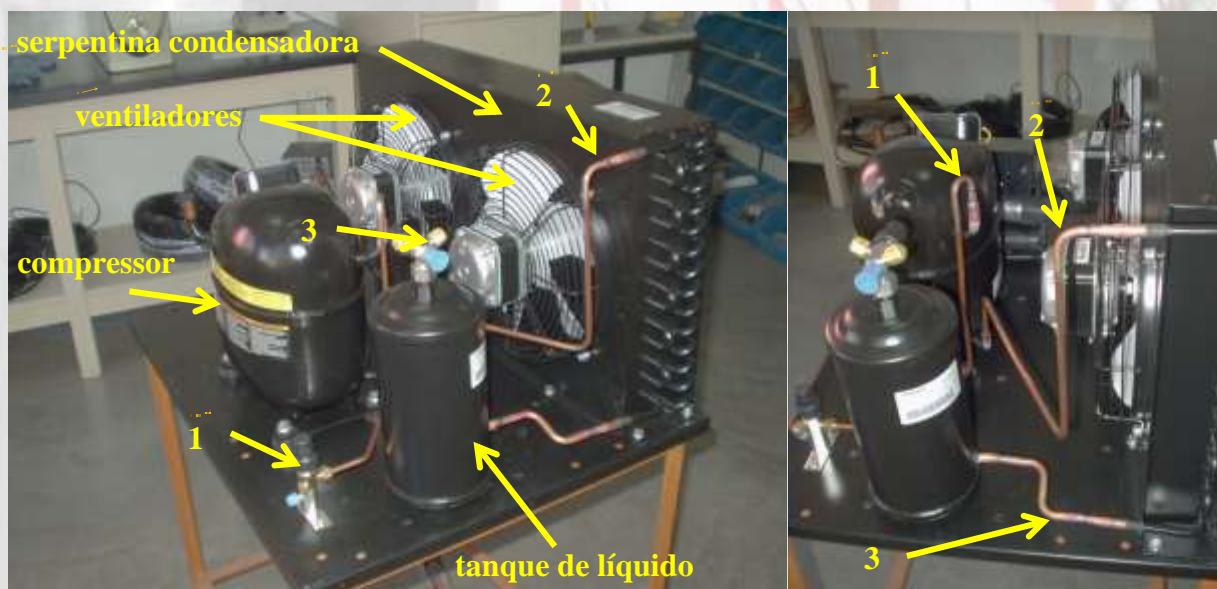


Figura 23 – Unidade condensadora original.

Na Figura 23, se observa que as conexões nos pontos 2 e 4 são feitas por meio de flanges nas válvulas de serviço. O tanque de líquido (acessório) é utilizado para armazenar o fluido durante as manutenções além de garantir a saída de líquido da unidade condensadora pois o dispositivo de expansão necessita de líquido em sua entrada. Não é um dispositivo necessário ao ciclo termodinâmico, sendo assim a BC pode funcionar sem este. É recomendado em caso de muita variação da temperatura da água quente, o que foi observado no protótipo durante a



simulação de consumo de água, quando é reposta água fria no reservatório. No caso do protótipo é importante observar que a saída do condensador se dá na parte superior, pela facilidade de instalação, o que não é o mais conveniente para o ciclo termodinâmico e pode obrigar o uso do tanque de líquido.

A Figura 24 mostrar as alterações feitas onde se observa a inclusão de um tanque azul, o acumulador de sucção, também chamado de separador de líquido. Este dispositivo tem o objetivo de evitar a entrada de refrigerante na fase líquida no compressor, o que o danificaria. Este deve ser dimensionado de forma a acumular no mínimo 50% da massa de refrigerante do sistema. Para o protótipo o acumulador de sucção se mostrou importante pois se observou o retorno de líquido em dias frios e quando a temperatura da água do reservatório diminui.

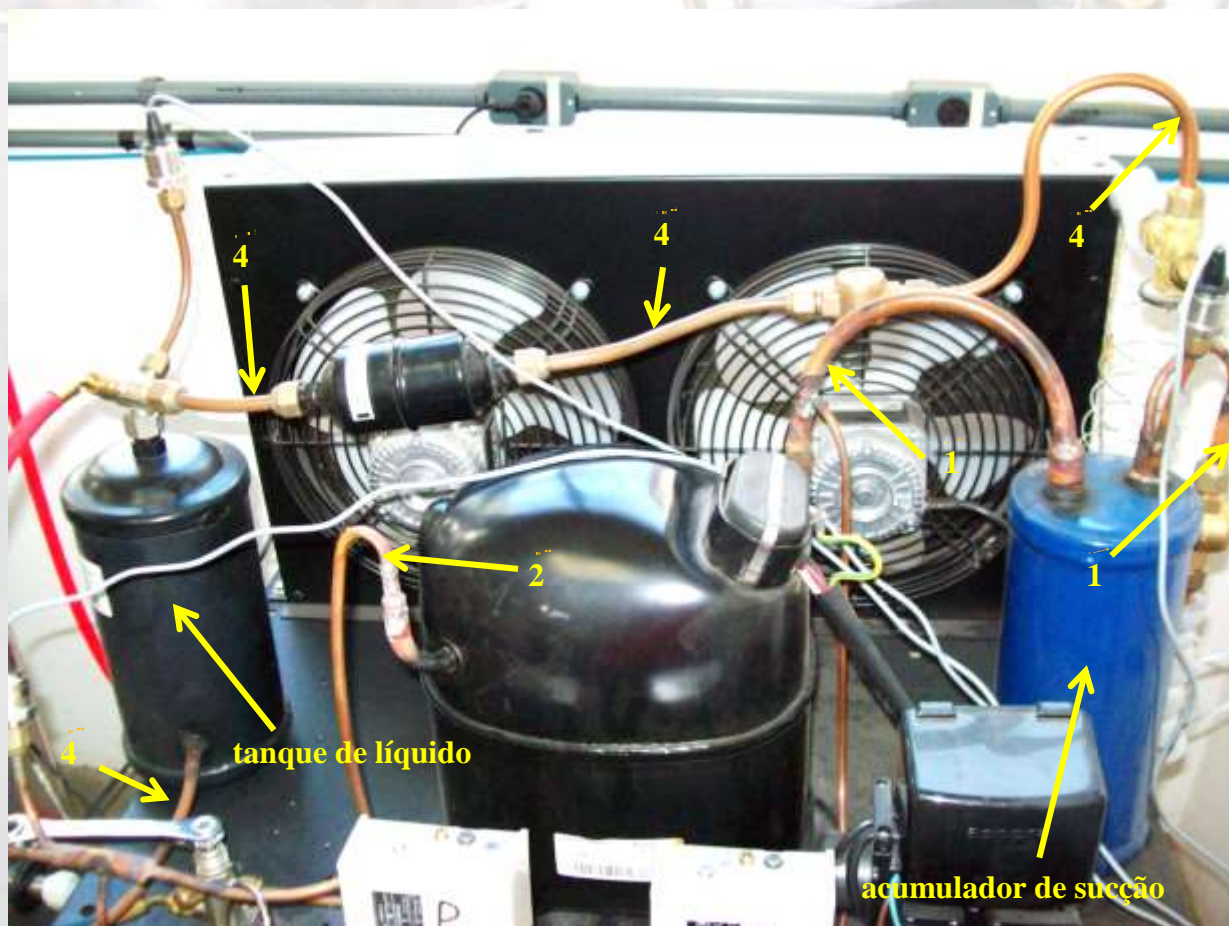


Figura 24 – Unidade condensadora modificada (unidade evaporadora).

É importante ressaltar que os dispositivos acrescentados e não essenciais ao ciclo termodinâmico, não alteram a numeração do ciclo entre sua entrada e saída, em relação a Figura 2. Os dispositivos auxiliares têm o objetivo de adequar o ciclo as condições reais.

O novo ciclo de compressão de vapor, com os dispositivos auxiliares, pode ser visto na Figura 25.

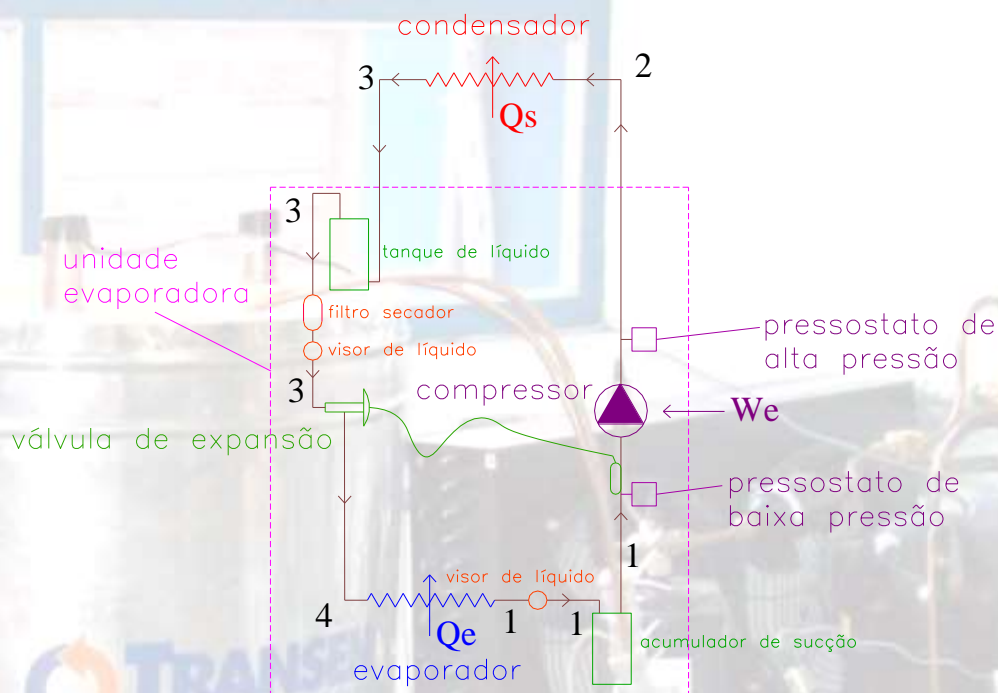


Figura 25 – Ciclo de compressão de vapor com dispositivos auxiliares.

#### 7.4 Válvula de expansão.

A válvula de expansão é um dispositivo integrante do ciclo termodinâmico e seu dimensionamento segue conforme o item 5. Na aquisição se pode optar por conexão flangeada ou soldada. No caso do protótipo se usa conexão flangeada em todos os elementos para facilitar a desmontagem, em detrimento a possíveis vazamentos. A Figura 12 mostra a válvula de expansão adquirida enquanto a Figura 26 mostra sua instalação. Se observada a Figura 25, a válvula de expansão deve ser instalada entre os pontos 3 e 4, ficando sua entrada no ponto 3. A entrada deve ser conectada na saída do tanque de líquido, na falta desse, na tubulação que vem do condensador. O bulbo de temperatura tem o objetivo de controlar o fluido refrigerante na saída do evaporador, ponto 1 da Figura 25. Assim se deve instalar o bulbo junto a tubulação naquele ponto fixando com a fita metálica e isolando termicamente do ambiente. Deve ser garantida uma boa troca térmica e um bom isolamento para que bulbo tenha a mesma temperatura do fluido refrigerante. O posicionamento do bulbo, em relação ao tubo, depende o diâmetro do tudo utilizado e deve ser observado o manual de cada fabricante e modelo sobre correta instalação do bulbo.



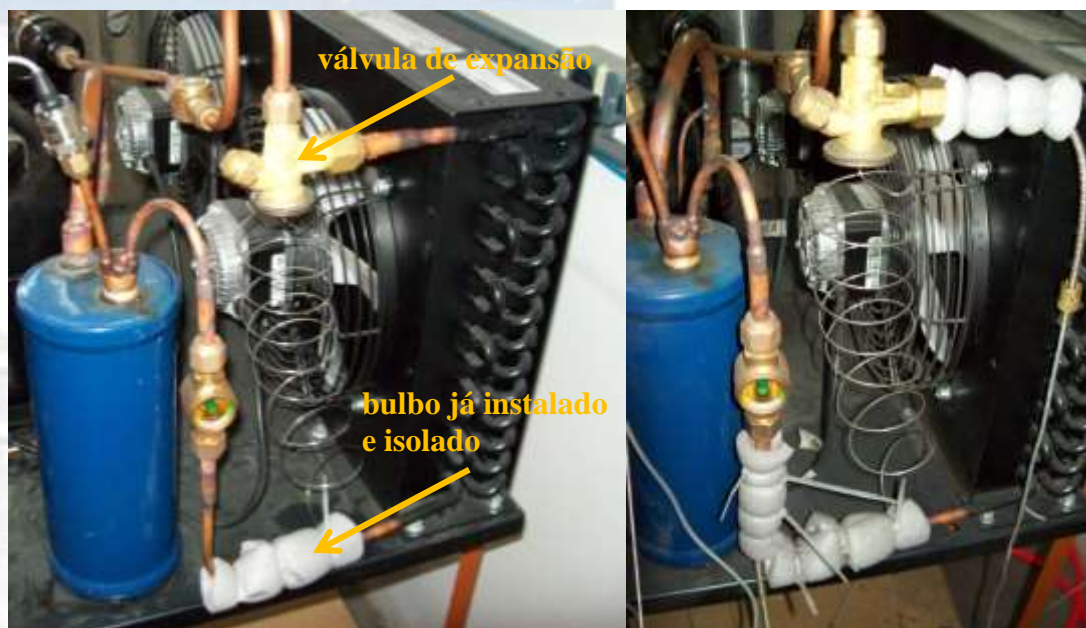


Figura 26 – Válvula de expansão instalada e manual de instruções do fabricante.

### 7.5 Filtro secador.

O filtro secador é um dispositivo que não pertence ao ciclo termodinâmico mas tem importância fundamental pois evita a circulação, e eventual entupimento, de orifícios pequenos por escória de solda. Também possui elemento secante, absorvendo umidade que possa ter ficado dentro da tubulação. Não existe um dimensionamento desse dispositivo, deve ser de capacidade igual ou superior a de refrigeração da unidade condensadora e adequado ao diâmetro da tubulação onde vai ser instalado. Na instalação se deve tomar o cuidado de obedecer o sentido do fluxo de refrigerante. A Figura 27 mostra a instalação do filtro secador. O filtro deve ser instalado na saída do condensador (ou tanque de líquido, se houver) e antes da válvula de expansão (é nesta que se encontra o orifício de menor diâmetro do sistema).

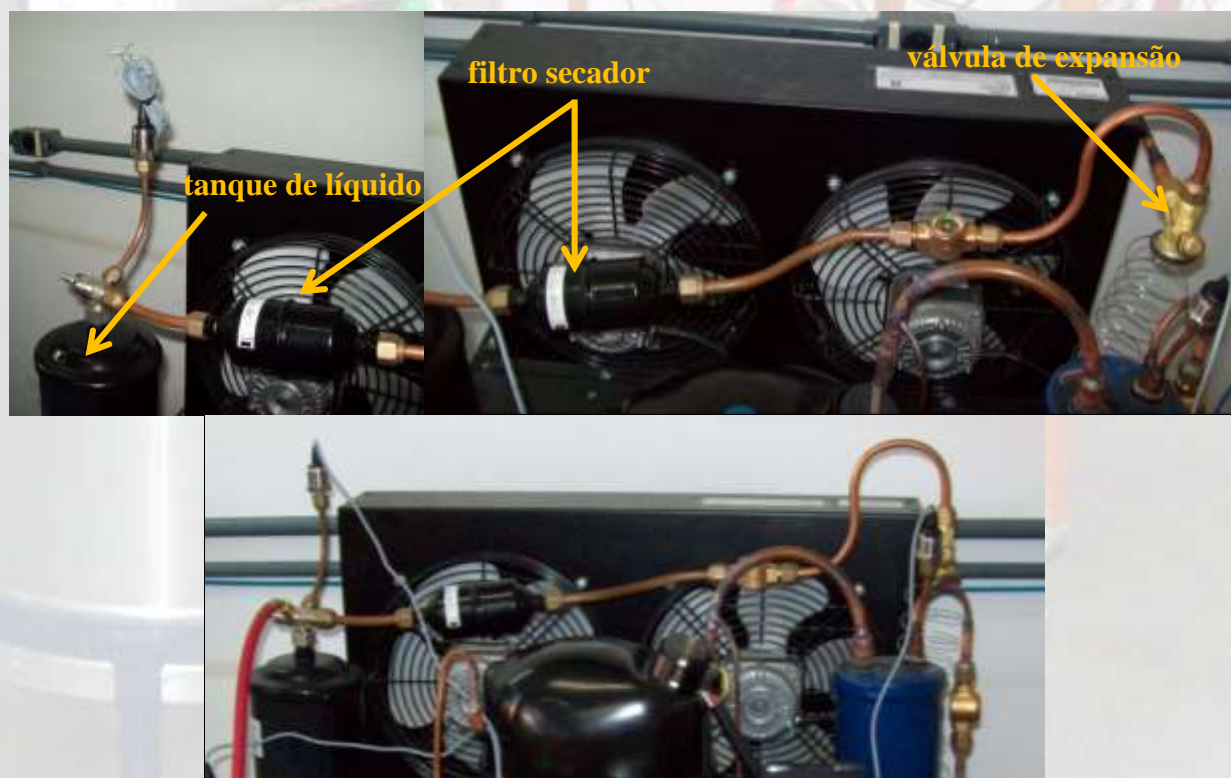


Figura 27 – Filtro secador instalado e sua posição.

## 7.6 Visor de líquido.

O visor de líquido é um dispositivo que não pertence ao ciclo termodinâmico e não tem influência sobre o funcionamento do sistema. Sua função é de permitir a visualização do fluido refrigerante dentro da tubulação, permitindo observar a fase presente, líquida e vapor. Ele se torna importante para o protótipo pois permite acompanhar o funcionamento do sistema. Foram instalados dois visores de líquido, na entrada na válvula de expansão e na saída do evaporador, pontos 3 e 1 da Figura 25, respectivamente. A Figura 28 mostra os visores de líquido instalados, onde a numeração é aquela utilizada na Figura 25. Para determinar sua especificação basta observar a pressão de trabalho e o diâmetro da tubulação onde será instalado. Também se optou pela fixação por flange para facilitar eventual desmontagem, mas pode ser adquirido na forma soldada.



Figura 28 – Visores de líquido instalados e identificados conforme posição na numeração da Figura 2.

## 7.7 Pressostatos.

Os pressostatos são dispositivos de proteção que atuam pelo controle da pressão no sistema. São instalados dois pressostatos, um controlando a pressão baixa e outro controlando a pressão alta. Para especificação basta considerar o fluido de trabalho a faixa de pressão e o se o rearme é automático. Esses dispositivos tem a função de controlar a pressão e em caso dessa ser extrapolada desligar o compressor. Para pressão de baixa do sistema regular o pressostato para atuar em 20 psi com diferencial de 10 psi enquanto o pressostato de alta deve ser regulado para 370 psi com diferencial de 40 psi (para água quente á 55 °C). A Figura 29 mostra os dois pressostatos. Estes possuem na parte de trás fixação por meio de parafusos às barras azuis. Sua conexão é feita por flange à tubos de que são soldados na tubulação como mostra a Figura 30.



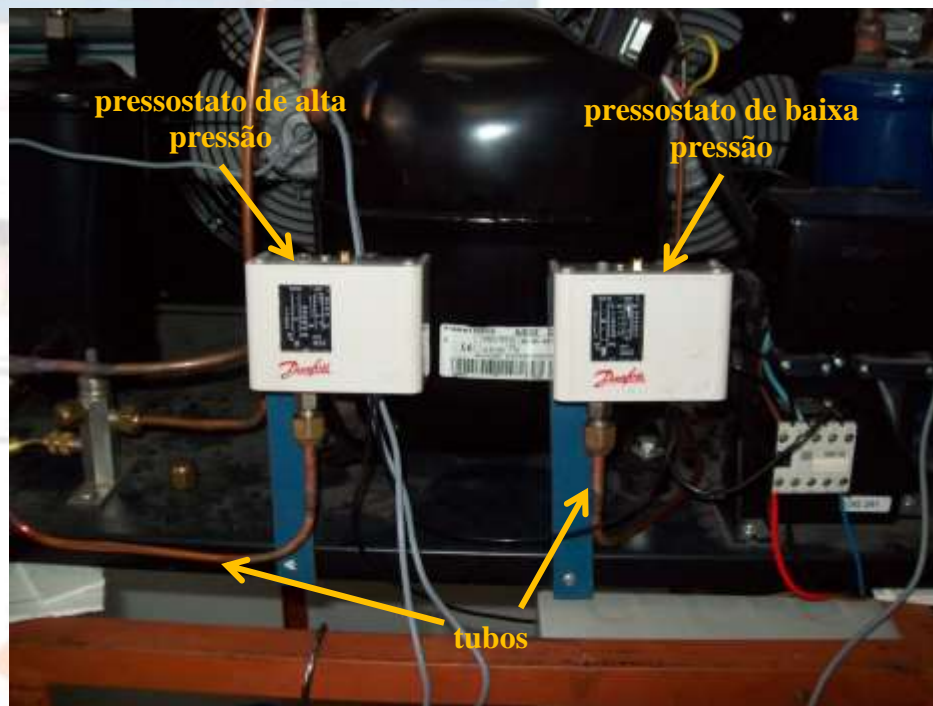


Figura 29 – Pressostatos instalados.

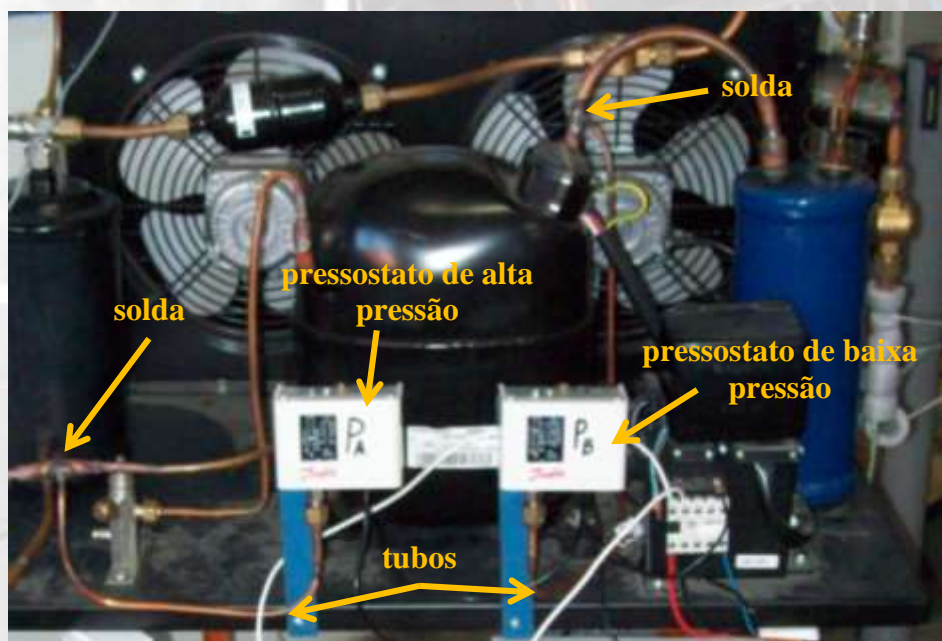


Figura 30 – Conexão dos pressostatos à tubulação do sistema.

Os tubos vistos na Figura 29 podem ser de diâmetro pequeno, pois nestes não há fluxo de fluido refrigerante. Muitas vezes são suados tubos capilares de diâmetro maior. Importante observar que caso estes tubos forem de diâmetro muito pequeno pode haver uma atraso na informação da alteração da pressão no sistema ao pressostato.

## 7.8 Controlador de temperatura.

O controlador de temperatura, também denominado termostato, tem a função de manter a temperatura da água quente em um valor preestabelecido. Pode ser encontrado na forma construtiva mecânica ou eletrônica. O Boiler original já deve ter dois termostatos instalados, normalmente mecânicos, sendo um para ajuste da temperatura desejada e outra de segurança. O termostato de segurança se faz necessário pois a temperatura da resistência é maior que 100 °C e

em eventual falha do termostato de controle a água pode ferver, o que tornaria o Boiler um caldeira de vapor. No caso da BC, o condensador não atinge temperaturas maiores que 100 °C além de se ter instalado um pressostato de alta pressão que desarma o sistema em caso de pressão elevada (consequentemente temperatura elevada). Para o caso do protótipo foi optado pelo uso de um termostato eletrônico por possibilitar controle mais exato e permitir conexão com o computador. O modelo adquirido foi o RT-607Riplus da FullGauge, que permite também a agenda de eventos possibilitando acionamentos em períodos programados e controle pela internet. O termostato tem seu sensor imerso na água na mesma altura do termostato original, aproximadamente a meia altura do Boiler. Seu ajuste é feito para manter a água a 55 °C com variação de 1 °C. A variação é feita em uma faixa estreita pois a inércia térmica é elevada garantindo que não ajam acionamentos frequentes em caso de não ser consumida a água quente. É preciso observar que existem vários tipos de termostatos, além daqueles que em de fábrica instalados no Boiler, e que a escolha depende muito do que se pretende controlar.

### **7.9 Tubo de cobre.**

Os tubos de cobre dependem dos dispositivos utilizados e calculados mas sempre devem ser aqueles utilizados em refrigeração. Os tubos de refrigeração tem a parede mais fina, possibilitando a dobra com mais facilidade e muitas vezes sem equipamentos especiais. Se recomenda sempre que o diâmetro destes devem ser iguais ou o mais próximo dos dispositivos aos quais serão conectados. As conexões podem ser feitas por meio de solda ou flange, lembrando que no caso de solda se tem a vantagem da conexão não soltar por vibrações, o que pode ocorrer com os flanges. No caso da construção de protótipos o flange se torna mais adequado por possibilitar a desmontagem com mais facilidade. Sempre deve ser lembrado que óleo também circula na tubulação e que esta deve ser montada de forma a facilitar que o óleo possa percorrer a tubulação, evitando concentrações. Nos trocadores de calor fazer a ligação de forma que o refrigerante entre na parte superior e saia na inferior, facilitando a circulação do óleo.

### **7.10 Fluido refrigerante.**

A seleção do fluido refrigerante segue como estabelecido no item 3 e sua quantidade depende do diâmetro e comprimento das tubulações, bem como da unidade condensadora e condensador calculado. Uma boa opção de aquisição são os cilindros descartáveis de 13,6 kg, pois não necessitam da aquisição de cilindros em separado e são fáceis de transportar.

Para carga de fluido refrigerante é importante observar que seja feito um bom vácuo no sistema, como especificado pelo fabricante da unidade condensadora adquirida. A carga por controle de pressão deve ser cuidadosa, evitando a entrada de líquido no compressor e em etapas. A carga é função da temperatura ambiente e da temperatura da água, assim a carga deve ser controlada com pressão de baixa da ordem de 30 psi e pressão de alta de 350 psi, sem deixar de acompanhar a corrente elétrica de trabalho da unidade condensadora, segundo catálogo do fabricante. Valores referenciais para o inverno com água no reservatório a 55 °C.



## 8. Instalando o protótipo

A instalação do protótipo aborda dos fatores importantes, a instalação do Boiler e a instalação da BC. Para instalação é considerada a possibilidade colocar, tanto o Boiler, quando a BC sob o telhado da residência onde será instalado o sistema. Nesse caso se tem a vantagem de proteger ambos os dispositivos das adversidades atmosféricas além do grande ganho em instalá-los em ambiente aquecido. O ambiente aquecido reduz a perda de calor pelas paredes do Boiler e aumenta a temperatura do ar atmosférica em volta da BC, melhorando seu desempenho. Em caso de prédios, a instalação deve ser feita de forma a proteger todo o conjunto das adversidades ambientais, tais como chuvas e ventos, prevendo também a circulação do ar atmosférico externo através de venezianas.

Para instalação do Boiler devem ser observadas as condições do fabricante em função de cada tipo de aplicação. Aqui se aborda a instalação em nível, como ensaiado no protótipo desenvolvido. Isso se faz pelo fato do Boiler ter sido alterado em sua construção com o furo realizado em sua parte superior para entrada da tubulação de condensação. Ao realizar o furo se perde a estanqueidade original do Boiler, não permitindo que este trabalhe sob pressão ou mesmo nível de água acima do furo realizado, considerada uma margem de segurança. Caso se pretenda produzir o sistema, o melhor será a construção com a tubulação de condensação já instalada no Boiler, solicitada ao fabricante. Assim serão atendidas as normas específicas, quanto a instalação sob pressão já que o sistema da BC fica isolado hidraulicamente da água do Boiler.

Na instalação em nível, o nível da água no Boiler é determinado pelo nível do reservatório de água fria, instalado logo ao lado do Boiler, conforme a Figura 31. É importante ressaltar o uso sifão para evitar que água quente possa voltar a caixa de água, já que esta é mais leve. Levando em conta que a pressão na caixa d'água é igual a do Boiler a conexão entre estes deve ser de tubulação com diâmetro de pelo menos 35 mm. Para a saída de água quente utilizar tubulação adequada para temperatura elevada. Embora o sistema esteja ajustado para água a 55 °C não se pode esquecer que um sistema de apoio deve ser utilizado, por exemplo, a resistência original do Boiler. Assim as especificações do manual do Boiler devem ser seguidas.

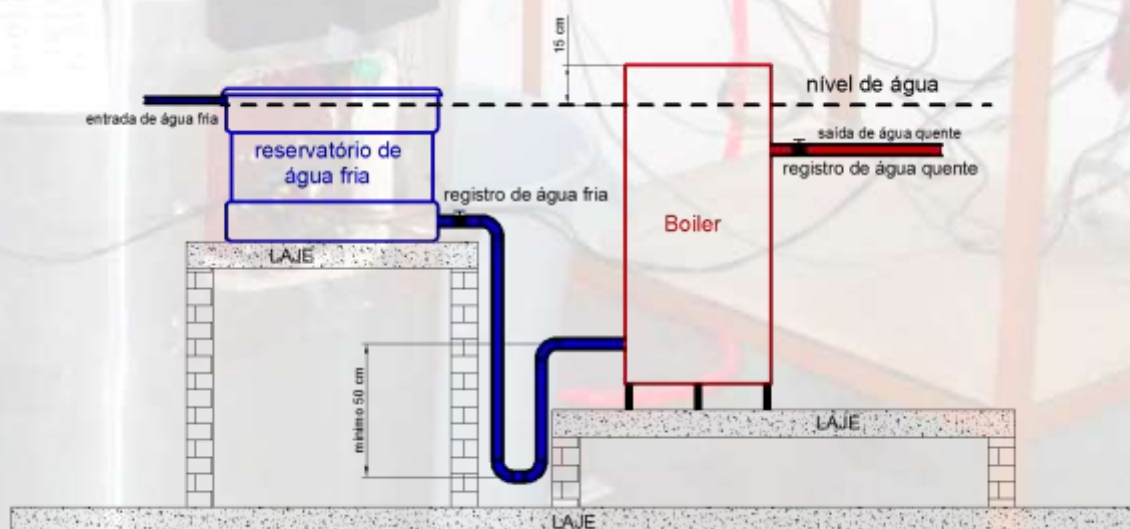


Figura 31 – Boiler instalado em nível com caixa d'água exclusiva.

A Figura 32 mostra a instalação da BC ao lado do Boiler. É possível observar que a unidade evaporadora fica sobre a laje, nunca esquecendo que nesta há condensação de vapor d'água do ar obrigando a instalação de um dreno. A coleta dessa água no evaporador depende da unidade condensadora adquirida, mas se sugere colocar uma bandeja de aço galvanizado com saída apropriada para o dreno.

Para instalação da BC, levar em conta que a tubulação de refrigerante conectada ao condensador (tubulação do condensador) seja a mais curta possível e sempre isolada termicamente.

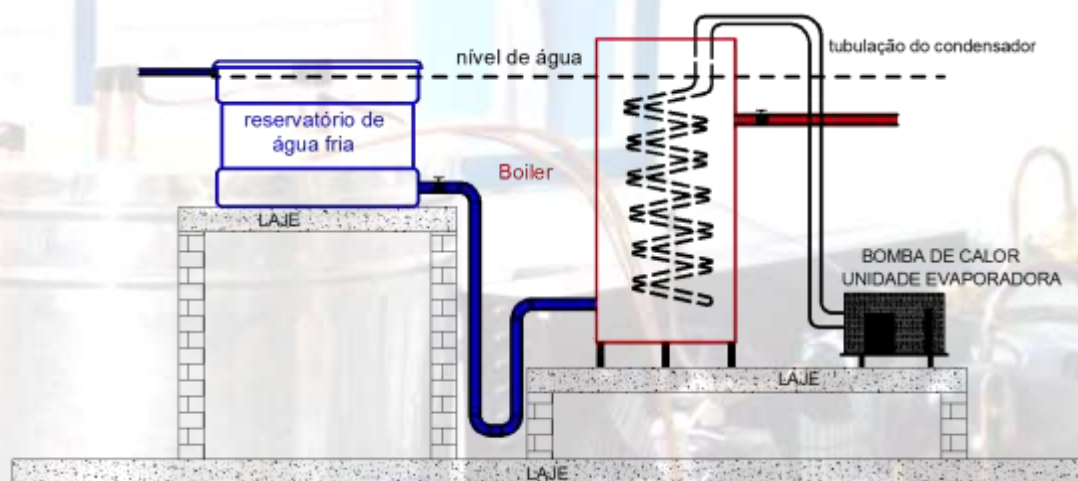


Figura 32 – Boiler instalado em nível com caixa d'água exclusiva.