

BOM DIA !

Meu nome: Paul Fernand Milcent Orientador da segunda etapa da disciplina de Integração V

Objetivos desta apresentação:

- Orientar quanto ao conteúdo e a forma do trabalho a ser entregue. (Metade da nota; 1/6 do total da disciplina.)
- Orientar quanto ao conteúdo da prova individual de avaliação. (Metade da nota; 1/6 do total da disciplina.)

Canais de comunicação:

Site www.paulfmilcent.net Contém, além de vários outros textos considerados interessantes, a capa padrão do trabalho e esta apresentação.

E-mail paul@paulfmilcent.net Telefone (41) 3264-2827 e Facebook Permite sanar dúvidas e agendar um horário para sanar dúvidas na UFPR.

Capa Padrão: É a folha de rosto do trabalho a ser entregue, inclusive quanto a sua formatação. Apresenta o sumário mínimo a ser seguido por todas as equipes. Apresenta a ordem do sumário a ser entregue por todas as equipes. Não usar a folha de rosto, ou o sumário mínimo ou ainda a ordem estipulada comprometerá fortemente o resultado da avaliação. Compromete também a avaliação, a entrega de trabalhos semelhantes por equipes diferentes; o uso de dados diferentes dos da equipe considerada; o emprego de relatórios informatizados e automatizados por recursos desenvolvidos por equipes de semestres anteriores. Os itens de avaliação tem pesos diferentes para o cômputo da nota.

Memoriais de Cálculo: Os memoriais de cálculo são os que permitem a correção de cada item numérico. A estrutura é: Equações literais na devida sequência; equações com os valores numéricos devidamente substituídos; resultados parciais e finais obtidos. O método de resolução, devidamente ordenado, deve ser claro e transparente e introduzido integralmente no item solicitado. (Notas baixas costumam estar relacionadas com falhas nos memoriais de cálculo.)

TRABALHO

BOMBAS DE CALOR & SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO

Objetivos / Contexto técnico:

- * Diminuição do consumo de energia da instalação industrial.
- * Substituição da fonte de energia, de combustão (o que gera poluição) para elétrica (obtida por meio da maioria dos métodos alternativos de obtenção de energia). (O custo da energia elétrica é uma questão temporal.)
- * Substituição do uso industrial, de substâncias altamente tóxicas por outras praticamente inócuas.
- * Dimensionamento básico de uma bomba de calor. (O problema é o mesmo, caso desejemos projetar um sistema de refrigeração.)
- * Incentivar a realização de trabalho técnico autônomo, sob orientação.

O presente trabalho apresenta uma dimensão ética:

A ética é o diagnóstico e a busca da conduta mais adequada. Ético é procurar fazer o bem.

- * A finalidade de qualquer profissão é o bem do ser humano.
- * As profissões envolvem a obtenção de conhecimento.
- * Porém o conhecimento é neutro: pode promover o bem ou o mal do ser humano.
- * O Engenheiro Químico agirá eticamente quando aplicar o conhecimento para o bem. O Engenheiro Químico será tanto mais ético quanto maior for o bem para o maior número de pessoas.
- * Como o conhecimento é neutro, as decisões técnicas são também decisões éticas.

Do mesmo modo:

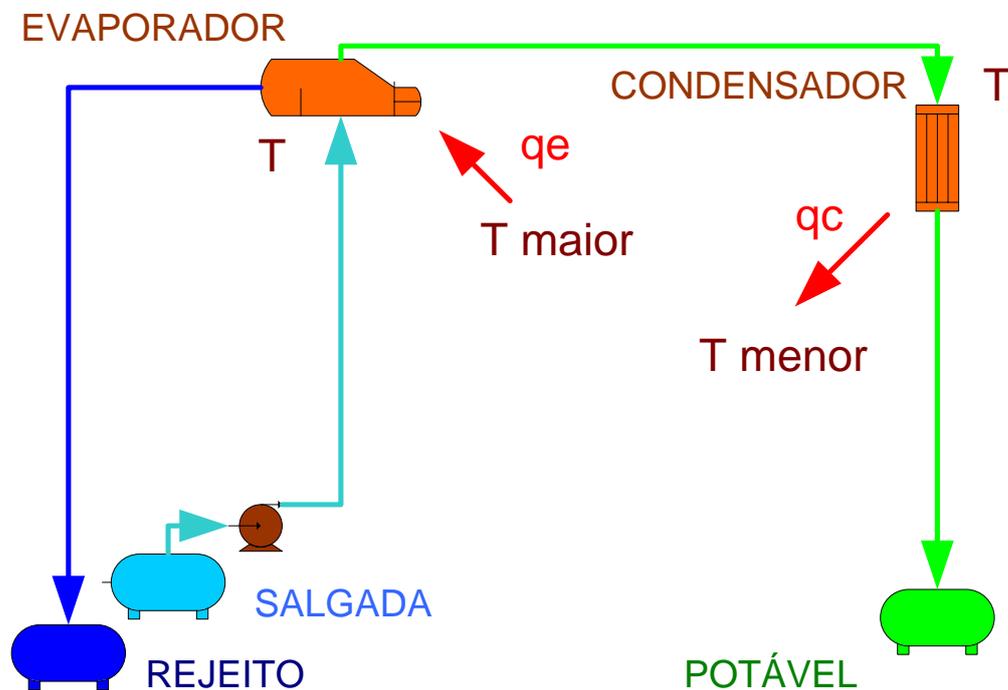
- * As decisões administrativas, econômicas, financeiras e de gestão são também decisões éticas.

Boa parte dos objetivos deste trabalho são simultaneamente técnicos e éticos.

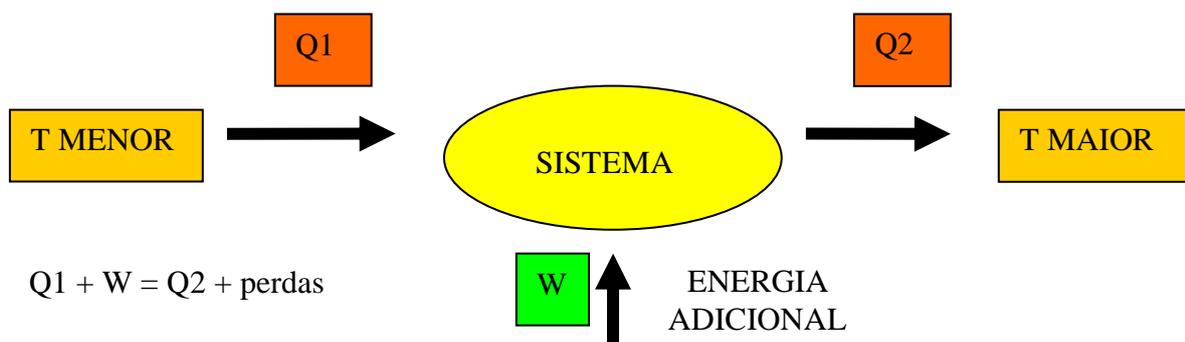
- * Como a Universidade transmite conhecimentos técnicos, lhe cabe também informar conceitos éticos.

O PRETEXTO DO TRABALHO: Um(a) Engenheiro(a) Químico(a) é convocado a participar do projeto integral ou de parte de uma Instalação Industrial. Tal indústria necessita, tal como a grande maioria delas, da utilidade água isenta de sais. Há a disponibilidade de água do mar (3% de sais) ou de uma água salobra (5.000 p.p.m. de sais). O profissional decide projetar um sistema de evaporação por bomba de calor para efetuar a dessalinização a água, numa vazão adequada às necessidades da Instalação.

O ponto de partida para a construção do diagrama do sistema é um evaporador simples.



Há sistemas que 'bombeiam' calor de uma região de menor temperatura para outra a maior temperatura, graças a doação de uma pequena quantidade de energia adicional.



Dentre as bombas de calor, duas são as comumente empregadas:

* Bomba de calor por absorção: Tem menor rendimento (apresenta menor aproveitamento da energia cedida); funciona por combustão (liberando gases nocivos para atmosfera); o fluido auxiliar da bomba costuma ser tóxico (com risco aos servidores da empresa e aos moradores do entorno).

* Bomba de calor por compressão mecânica do vapor: Tem maior rendimento (apresenta maior aproveitamento da energia cedida); funciona com energia elétrica (obtida por inúmeras fontes energéticas); o fluido auxiliar da bomba costuma ser inerte (não tóxico).

TODAS AS EQUIPES EMPREGARÃO BOMBA DE CALOR POR COMPRESSÃO DO VAPOR

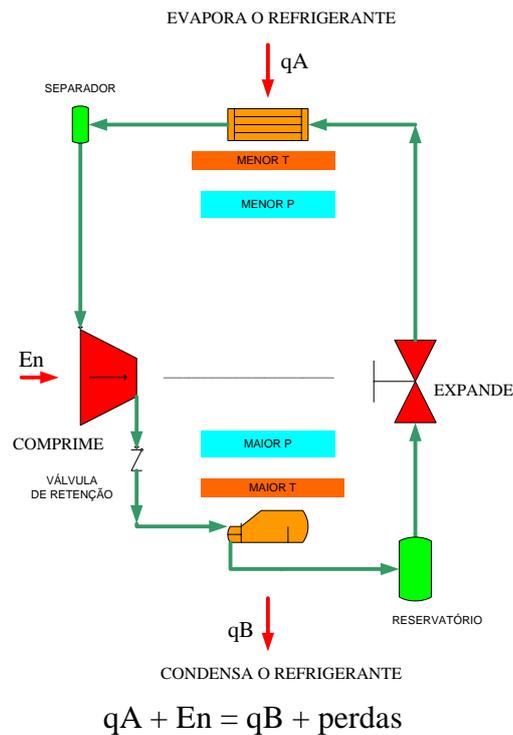
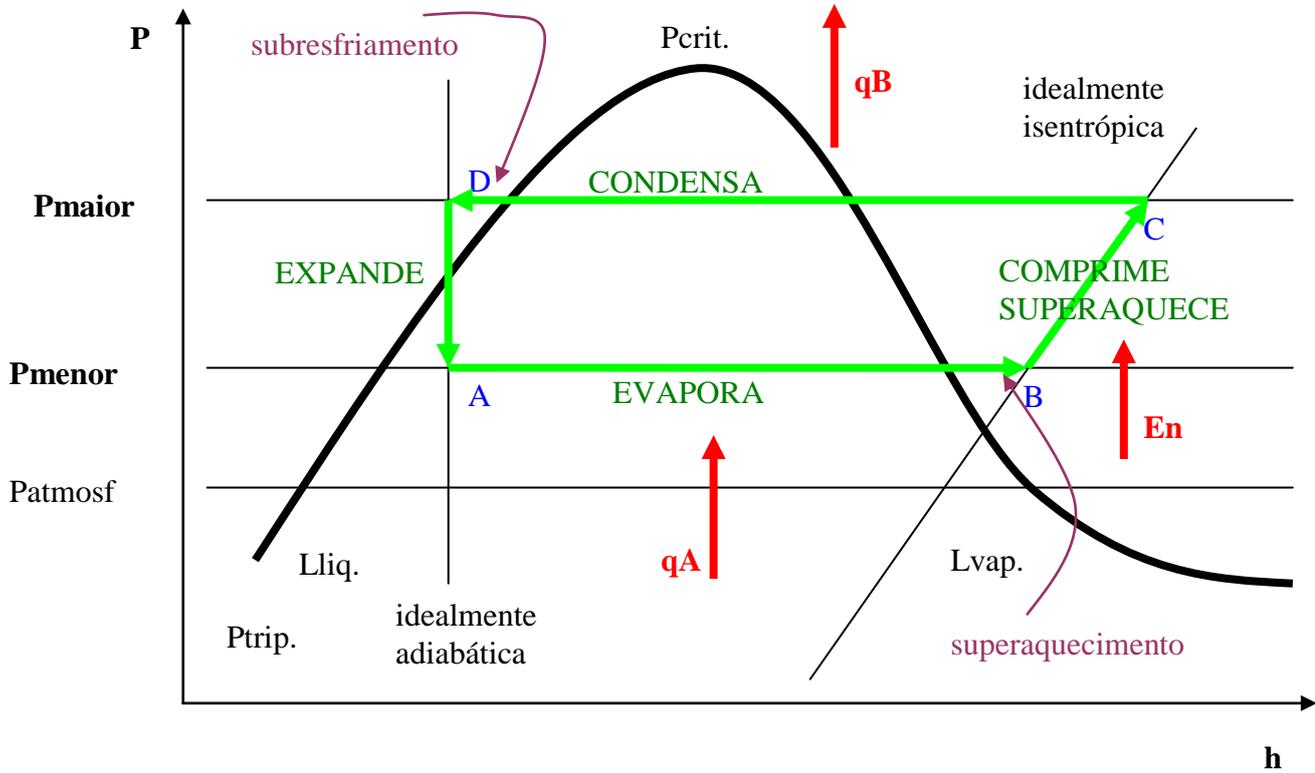


DIAGRAMA P x h PARA O FLUIDO AUXILIAR (OU REFRIGERANTE CONFORME A TEMPERATURA).

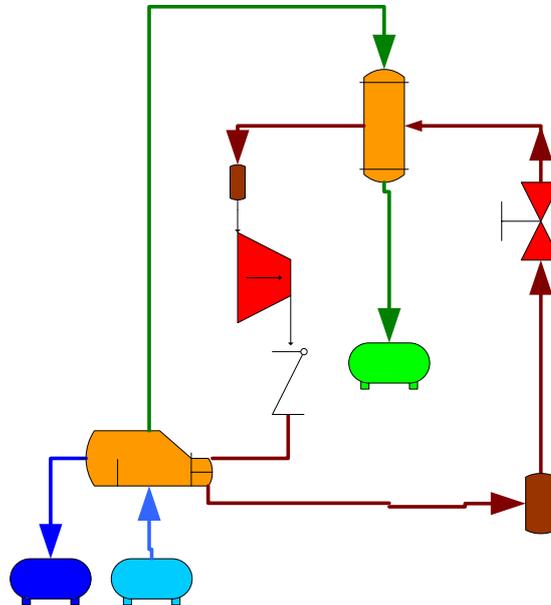
O uso deste diagrama facilita em muito o dimensionamento básico do sistema.



A proposta geral do trabalho é o dimensionamento básico de uma bomba de calor por compressão do vapor para a operação de uma unidade de dessalinização por evaporação.

O mesmo trocador de calor que condensa a água dessalinizada (condensador total) é o que evapora o fluido auxiliar da bomba de calor.

O mesmo trocador de calor (evaporador) que evapora a água salobra ou salgada (evaporador parcial) é o que condensa o fluido auxiliar da bomba de calor.

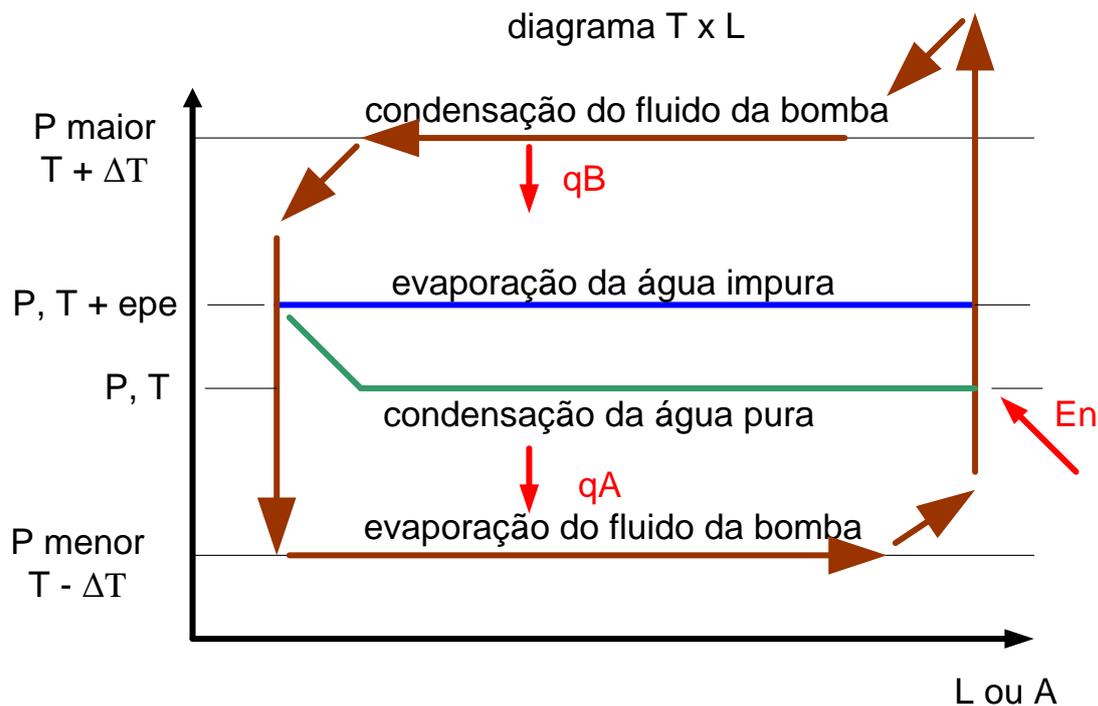


INFORMAÇÕES GERAIS PARA TODAS AS EQUIPES:

- * A pressão na câmara de evaporação do evaporador é a mesma que a pressão na câmara de condensação do condensador. (A referência é o sistema de dessalinização.)
- * As perdas de carga podem ser desprezadas. Desta forma os produtos no interior dos trocadores de calor, estão submetidos às pressões constantes escolhidas pelas equipes.
- * O fluido auxiliar que circula pela bomba de calor também é água (R-718)
- * O setor de menor pressão da bomba de calor está numa pressão um pouco superior à atmosférica, para evitar a entrada de ar no ciclo. (Consequentemente o evaporador dessalinizador opera em pressão positiva e não há a necessidade de trabalho com vácuo.)
- * Cabe as equipes determinar as propriedades da água em estado vapor saturado, superaquecido e líquido, tanto pura quanto contendo sais dissolvidos. (Artigos técnicos da área de dessalinização contém as equações de estimativa. cp, e.p.e. ...)

Quanto menor a compressão exigida (menor ΔP no compressor e na bomba de calor), menor será o consumo de energia. Isto se obtém projetando os trocadores de calor para operar com reduzidos ΔT s. Em consequência as áreas de troca térmica necessárias serão maiores. ($q = A.U.\Delta T$). Todas as equipes procurarão priorizar o baixo custo operacional.

Optando por um ΔT em torno de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ nos trocadores de calor, podemos construir o diagrama $T \times L$ para o sistema.



Sugestão de estratégia de resolução: Fixe a menor pressão de operação da bomba de calor. Com ela determine a temperatura de evaporação do fluido auxiliar. Some o ΔT . Com isto determine a temperatura de condensação da água potável. Com ela determine a pressão na câmara de condensação do condensador da unidade de dessalinização que é a mesma da câmara de evaporação do evaporador da unidade de dessalinização. Determine a temperatura de evaporação da água impura (e.p.e.). Some o ΔT . Determine a temperatura de condensação do fluido auxiliar e assim a maior pressão de operação da bomba de calor.

Dependendo das variáveis (basicamente as pressões) que cada equipe fixará a seu critério para o projeto, as cargas térmicas exigidas para o condensador e o evaporador não permitirão que o balanço de energia na bomba de calor seja satisfeito. **SERÁ NECESSÁRIO** então (fará parte do trabalho) a introdução de um terceiro trocador de calor, também a ser dimensionado, para satisfazer aos balanços de energia. (O professor considerará 'estranho' que duas ou mais equipes fixem as mesmas variáveis para o projeto.) Em anexo encontra-se um estudo das opções para o equilíbrio de cargas para uma destilação a vácuo assessorada por bomba de calor que pode ser útil numa analogia ao presente problema. (Os ciclos são fechados e integrados: bypass não resolve a questão.)

- * O tipo de compressor para todas as equipes é o centrífugo. (É o mais apropriado para o caso.)
- * Surpreenda seu professor: selecione o compressor e obtenha os dados necessários para efetuar a compressão não ideal.
- * Surpreenda seu professor: Selecione o material de construção apropriado para os equipamentos. (Tanto água salgada quanto água pura são altamente corrosivas.)
- * Surpreenda seu professor: Determine apropriadamente a espessura de parede em conformidade com as pressões de trabalho.
- * Não assuste seu professor. :) Em todos os pontos no interior dos trocadores, o fluido quente é sempre o mais quente; o fluido frio sempre o mais frio. (Obedeça a termodinâmica).
- * Para minimizar a incrustação, trabalhe com concentrações abaixo de 30%.
- * Em operações unitárias II só trabalhamos com trocadores de calor sem mudança de fase. Neste trabalho os dois trocadores de calor principais apresentam mudança de fase dos dois fluidos. A metodologia de cálculo é a

mesma. As equações de transferência de calor são diferentes. Cabe às equipes buscar nas obras de referência as equações apropriadas; selecionar quais usar e empregá-las.

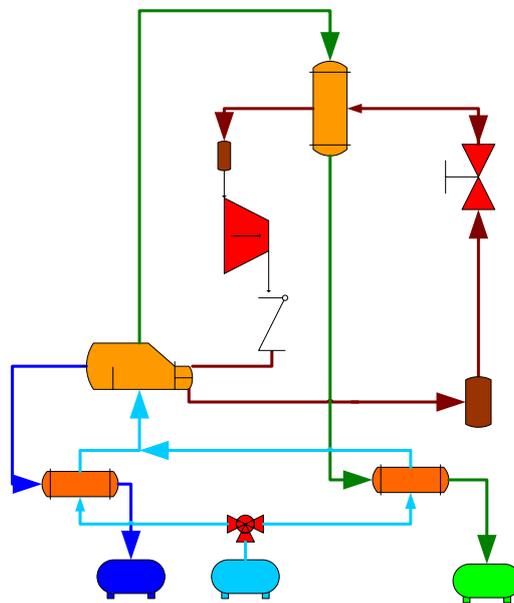
Trabalho adicional desejável não obrigatório.

No sistema proposto trabalhamos em todos os casos com pressões positivas e o fluido é água. As mudanças de fase ocorrem acima de 100 °C. A solução concentrada aquecida caso diretamente descartada gerará poluição térmica e seu calor será perdido. O não aproveitamento deste calor implica em maior consumo de energia e maior custo do produto. Tal energia pode ser utilizada para pré aquecer a alimentação fria.

Caso a água potável seja subresfriada no próprio condensador, a diferença de temperatura representativa neste equipamento será reduzida. Isto forçará uma redução da temperatura de evaporação do fluido na bomba de calor que por sua vez aumentará a diferença de pressões e acarretará num maior consumo de energia na compressão. Um novo trocador de calor poderá ser empregado para a um só tempo reduzir a temperatura da água potável e pré aquecer a alimentação. O custo do produto será menor...

Caso estes dois novos trocadores de calor atuem em paralelo, a diferença de temperatura e o aproveitamento da energia serão maximizados.

Abaixo o esquema da instalação com as melhorias propostas.



Os equipamentos principais serão dimensionados pelos próprios estudantes de Engenharia Química. Através de tal procedimento didático, obterão treinamento quanto às técnicas inerentes a sua profissão.

Os dois trocadores desejáveis, porém opcionais frente aos objetivos instrucionais, poderão ser dimensionados pelo uso de know-how de Engenheiros já formados (simuladores).

Observações:

Neste sistema as temperaturas ultrapassam 100 °C. Eventuais microorganismos são eliminados.

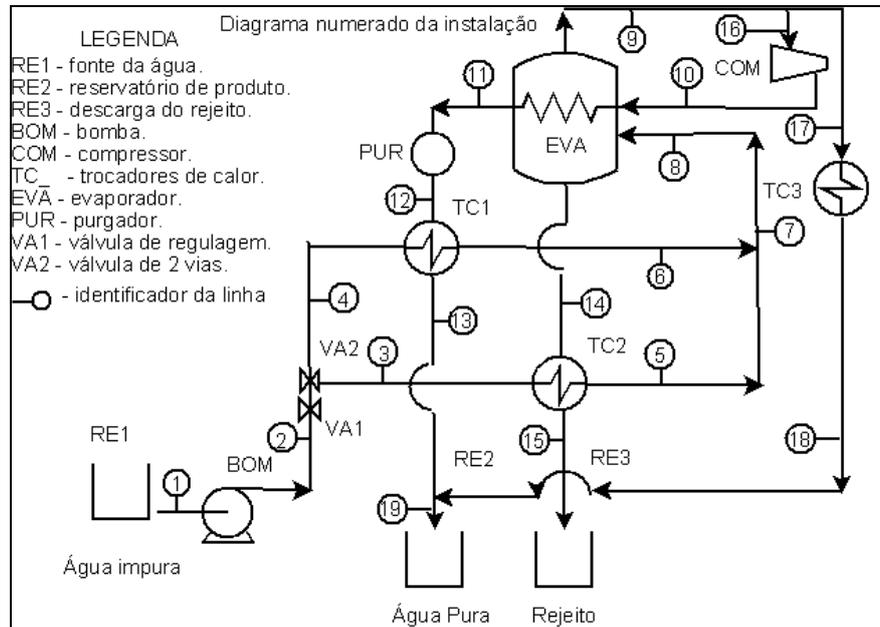
Caso a água tenha sólidos em suspensão (água de rio em especial após chuvas), o evaporador pode ser projetado para atuar simultaneamente como decantador (p. ex. Um evaporador vertical com volume livre adequado em sua parte inferior; zona de troca livre de lodo...).

Na partida da unidade, para atingir-se regime permanente, é adequada a previsão de aquecimento suplementar no evaporador, que pode igualmente ser realizado por meio de energia elétrica. (Comentário.)

O controle da válvula de expansão da bomba de calor, permite adequar o sistema a flutuações nas necessidades de transferência de calor entre as regiões de baixa e alta temperatura. (No entanto permanece a necessidade de equilíbrio de cargas para satisfazer aos balanços de energia.)

EXEMPLO DE UM ESQUEMA NUMERADO

Para a realização do trabalho proposto é necessária a elaboração de um esquema numerado. Cada linha recebe um número de identificação. Os fluidos que circulam pelas linhas são referenciados por tais números.



EXEMPLO DE UMA TABELA DE DADOS

Para a conferência das informações técnicas de projeto, tabelas de dados são necessárias. É a exposição dos resultados na Forma de Tabela, dos Balanços Materiais e de Energia, Ponto a Ponto, em Toda a Instalação.

| Linha | Fluido | Estado Físico | * m (Kg/s) | T (°C) | P (Kgf/cm ²) | h (Kcal/kg) | s (Kcal/kg°C) |
|-------|--------|---------------|--------------|--------|--------------------------|-------------|---------------|
| 1 | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | |
| 3.... | | | | | | | |

Tabelas com o resumo das informações de dimensionamento dos equipamentos também são solicitadas.

DADOS PARA CADA EQUIPE

| Identificação da Equipe: | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L |
|--|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
| Matéria Prima | Água do mar | Água salobra |
| Pessoas * | 270 | 280 | 290 | 300 | 310 | 320 | 330 | 340 | 350 | 360 | 370 | 380 |
| Consumo de água dessalinizada na unidade industrial. (m ³ / hora) | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 |

A água do mar tem 3% de sais.

A água salobra tem 5.000 p.p.m. de sais.

Pessoas: População de uma vila de funcionários hipotética, localizada nas proximidades da unidade industrial, a ser atendida também pelo sistema de dessalinização. O consumo de água / pessoa / dia deve ser pesquisado para as condições nacionais.

Caso os equipamentos fiquem muito grandes, empregue unidades iguais operando em paralelo.

CAPA DO TRABALHO, COM OS ITENS DE AVALIAÇÃO E SUMÁRIO SOLICITADO.

| ITEM PONTUADO | NOTA |
|---|------|
| Apresentação e Estrutura Formal (sumário, índice de figuras, índice de tabelas...). | |
| I.1 - Fundamentação teórica - Bombas de Calor. | |
| I.2 - Bomba de Calor por Absorção. | |
| I.3 - Bomba de Calor por Compressão do Vapor. | |
| I.4 - Nomenclatura dos Fluidos de Trabalho - Bombas de Calor e Refrigeração; Características de Toxicidade, Inflamabilidade e Outras. | |
| I.5 - Fluidos de Trabalho de Uso Proibido em Novas Instalações, no Futuro e no Presente, Conforme Protocolos Internacionais. | |
| I.6 - (Desejável:) Revisão da Dessalinização de Água ao redor do Planeta desde 1960. I.7; I.8;... | |
| II - Dados de Projeto Fornecidos pelo Orientador. | |
| III - Diagrama T x L para o Sistema. | |
| IV - Diagrama P x h do Fluido de Trabalho Selecionado, com a Representação das Transformações na Bomba de Calor. Alternativamente h x s. | |
| V - Equações, Estimativa e Levantamento das Propriedades dos Fluidos Envolvidos. | |
| VI - Cálculo e Memorial de Cálculo das Cargas Térmicas no Evaporador e no Condensador da Unidade de Dessalinização. | |
| VI.1 - (Se necessário:) Estratégia Justificada para o Equilíbrio das Cargas Térmicas, pelo Emprego de um Terceiro Trocador de Calor. | |
| VII - Descrição e Justificativa dos Acessórios de um Sistema de Bomba de calor. | |
| VIII - Esquema Numerado de Toda a Instalação (Evaporador, Trocadores de Calor, Compressor, Válvula de Expansão, Acessórios) com Legenda. | |
| IX - Memorial de Cálculo e Resultados na Forma de Tabela, dos Balanços Materiais e de Energia, Ponto a Ponto, em Toda a Instalação. | |
| X - Seleção Justificada dos Modelos de Trocadores de Calor a serem Empregados. | |
| XI - Equações para Estimativa dos Coeficientes de Transferência nos Trocadores de Calor. | |
| XII - Memorial de Cálculo do Evaporador da Unidade de Dessalinização. | |
| XIII - Memorial de Cálculo do Condensador da Unidade de Dessalinização. | |
| XIII.1 - (Se necessário:) Memorial de Cálculo do Terceiro Trocador de Calor para o Equilíbrio das Cargas Térmicas. | |
| XIII.2 - (Desejável:) Especificação, Folha de Dados e Seleção do Compressor Centrifugo. | |
| XIII.3 - (Desejável:) Especificação e Seleção da Válvula de Expansão. | |
| XIII.4 - (Desejável:) Memorial de cálculo do trocador que aproveita o calor da água dessalinizada. | |
| XIII.5 - (Desejável:) Memorial de cálculo do trocador que aproveita o calor do rejeito salino. XIII.6; XIII.7;... | |
| XVIII - Resumo e Conclusões (Como custo básico da água pelo emprego do sistema.) | |
| Bibliografia | |
| Catálogos e Extras (créditos adicionais; Surpreenda o Orientador Avaliador...) | |
| Catálogos e Extras (créditos adicionais; Surpreenda o Orientador Avaliador...) | |
| Catálogos e Extras (créditos adicionais; Surpreenda o Orientador Avaliador...) | |
| TOTAL | |

Neste trabalho as equipes foram incentivadas a dimensionar uma bomba de calor. O emprego de bombas de calor representa economia de energia para qualquer aplicação industrial onde se tenha disponibilidade de energia em baixa temperatura e necessidade de energia em temperatura maior. Pode ser empregado também para gerar baixas temperaturas. É um sistema altamente versátil que pode ser amplamente explorado por novos ou experientes profissionais.

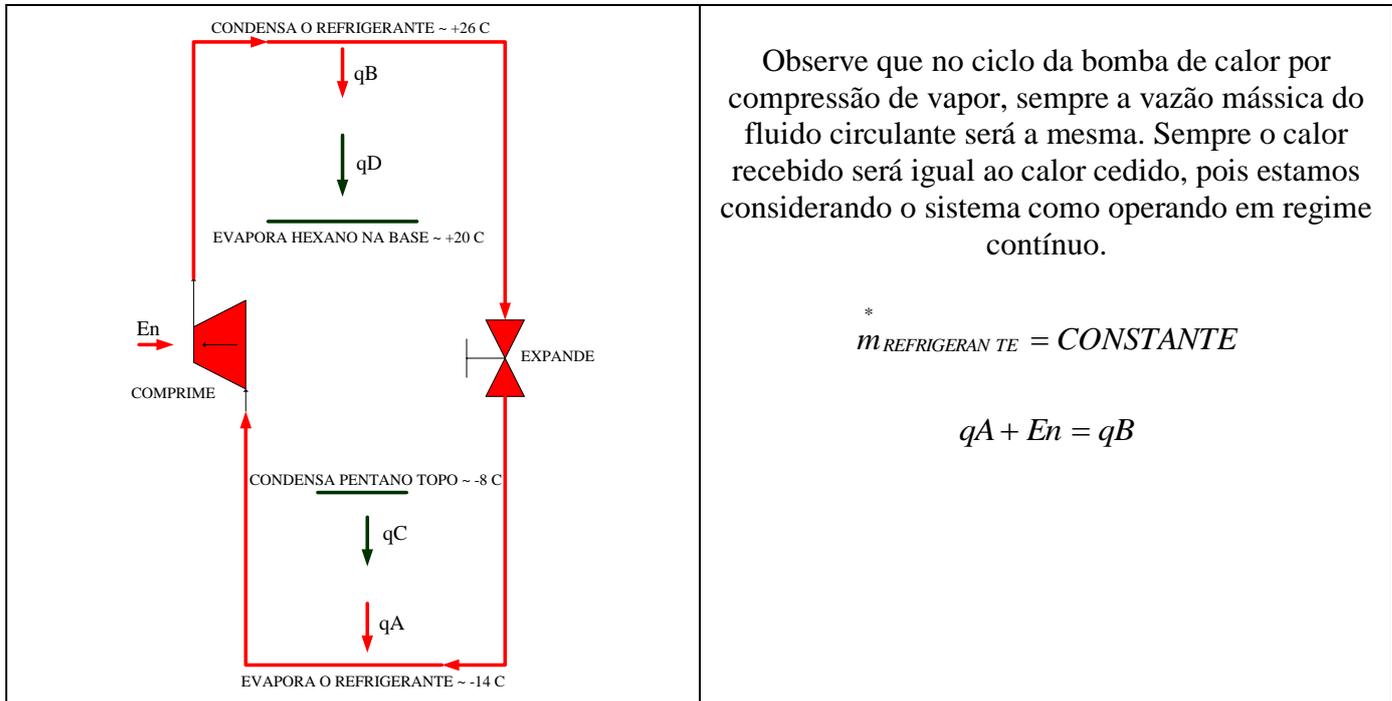
Espero que a presente atividade acadêmica gere bons frutos no futuro.

“Nada é tão popular quanto a bondade.” Benjamin Franklin

SE BEBER NÃO DIRIJA. SE DIRIGIR NÃO BEBA.

ANEXO

Estudo objetivando o equilíbrio de cargas térmicas num sistema de destilação a vácuo assessorado por bomba de calor.



O refeedor do hexano é um trocador de calor com vaporização parcial do hexano. Sua pressão de trabalho é igual a da coluna. (0,167 ata). Entra hexano líquido saturado proveniente da coluna. O produto de fundo é líquido saturado. Retorna para a coluna, vapor saturado. A vazão mássica fornecida é a vazão mássica de vapor saturado que retorna para a coluna.

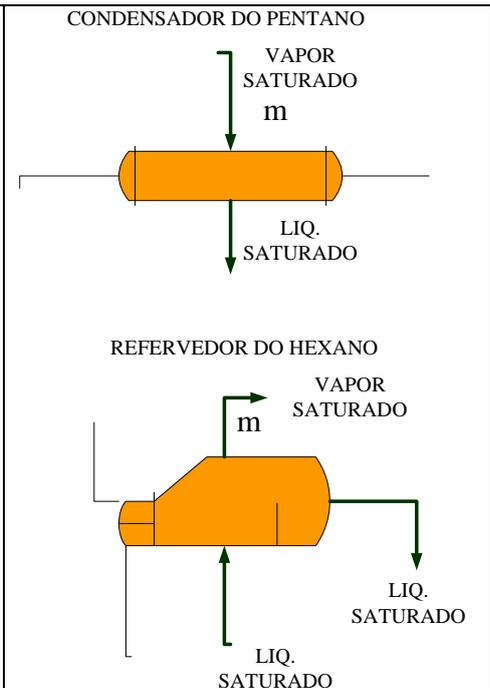
Desta forma,

$$qD = m_{HEXANO}^* . hfg_{HEXANO}$$

O condensador do pentano é um trocador de calor com condensação total do pentano. Sua pressão de trabalho é igual a da coluna. (0,167 ata). Entra vapor saturado e sai líquido saturado. Posteriormente uma parte deste líquido retorna para a coluna como refluxo e outra se torna o produto de topo.

Desta forma,

$$qC = m_{PENTANO}^* . hfg_{PENTANO}$$



Valores numéricos para as equipes.

| * m_{HEXANO} (Kg/s) | * m_{PENTANO} (Kg/s) | EQUIPE |
|------------------------------------|-------------------------------------|--------|
| | | M |
| | | A |
| | | I |
| | | O |
| | | B |
| | | K |
| | | Q |
| | | C |
| | | S |
| | | D |
| | | U |
| | | N |
| | | E |
| | | L |
| | | F |
| | | P |
| | | R |
| | | T |
| | | G |
| | | J |
| | | V |
| | | H |

Observe que pelos valores numéricos fornecidos para cada equipe, é de se esperar que:

$$q_C \gg q_D \quad \text{ou então} \quad q_C \ll q_D$$

Desta forma

$$q_C + En \neq q_D$$

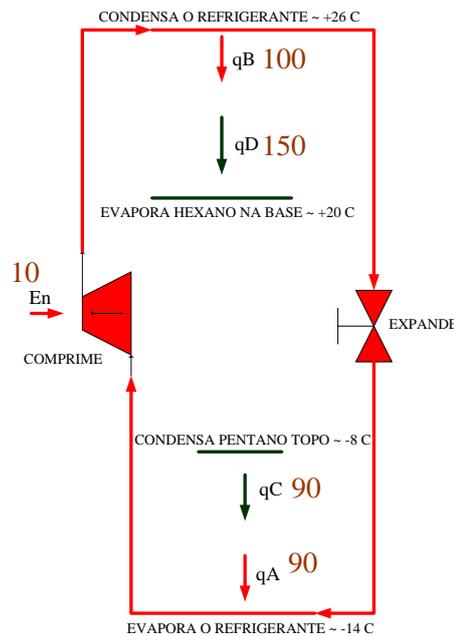
No entanto, sabemos que

$$q_A + En = q_B$$

Conseqüentemente necessitaremos de um terceiro trocador de calor para realizar o equilíbrio das cargas térmicas.

Este terceiro trocador de calor pode não estar ligado com a bomba da calor (ajuste fora do ciclo) ou então vinculado com a bomba de calor (ajuste no ciclo)

I. AJUSTE FORA DO CICLO I.1. SE $q_C \ll q_D$ I.1.1. FAZENDO $q_C = q_A$



I. AJUSTE FORA DO CICLO I.1. SE $qC \ll qD$ I.1.1. FAZENDO $qC = qA$

Já vimos como calcular qC . qA será o produto da vazão mássica de refrigerante com a variação entálpica necessária para evaporar tal refrigerante e sobreaquece-lo um pouco. Tal variação pode ser lida no diagrama P_{xh} para o refrigerante escolhido. Com isto se define a vazão mássica de refrigerante no ciclo.

$qA + En = qB$ qB é o produto da vazão mássica já determinada com a variação entálpica necessária para subresfriar o vapor superaquecido de refrigerante, condensa-lo e subresfriar um pouco o líquido. En é o produto da vazão mássica com a variação entálpica da compressão. Tais variações podem ser lidas no diagrama P_{xh} do refrigerante escolhido. Com isto se define qB e En .

No base da coluna de destilação, qB será menor que qD . Já vimos como calcular qD . Assim faremos $qD = qD1 + qD2$ Isto é, teremos dois trocadores de calor naquela região.

$qB = qD1$ e desta forma temos os dados para dimensionar o trocador de calor que condensa o refrigerante e evapora o hexano.

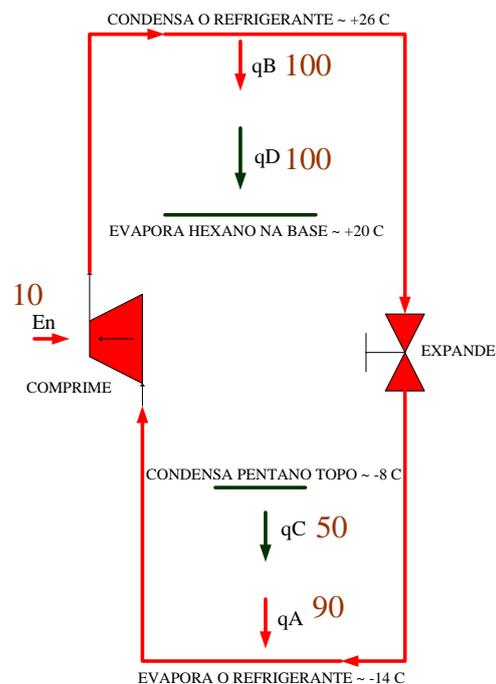
$qD2 = qD - qD1$ Definindo a carga térmica do terceiro trocador de calor, que evapora hexano, com auxílio de um fluido auxiliar, a ser escolhido, de temperatura superior a aproximadamente 20°C.

I. AJUSTE FORA DO CICLO

I.1. SE $qC \ll qD$

I.1.2. FAZENDO $qD = qB$

Neste caso é de se esperar que tenhamos que fornecer calor diretamente ao ciclo, além do cedido pelo pentano.

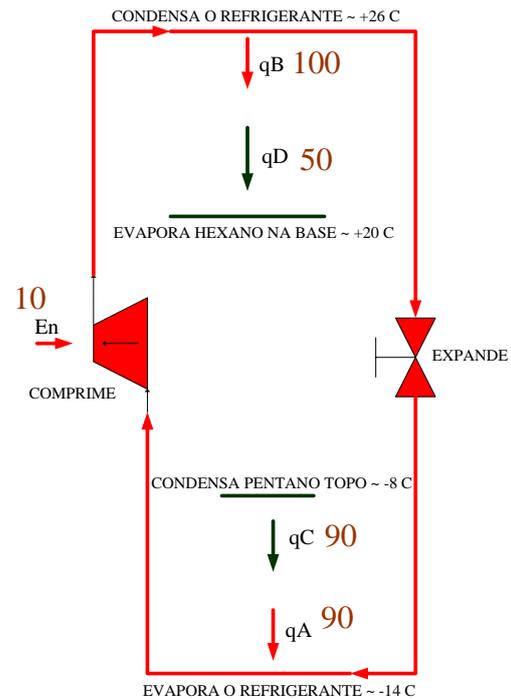


I. AJUSTE FORA DO CICLO

I.2. SE $q_C \gg q_D$

I.2.1. FAZENDO $q_C = q_A$

Neste caso é de se esperar que tenhamos que remover calor diretamente do ciclo, além do removido pelo hexano.

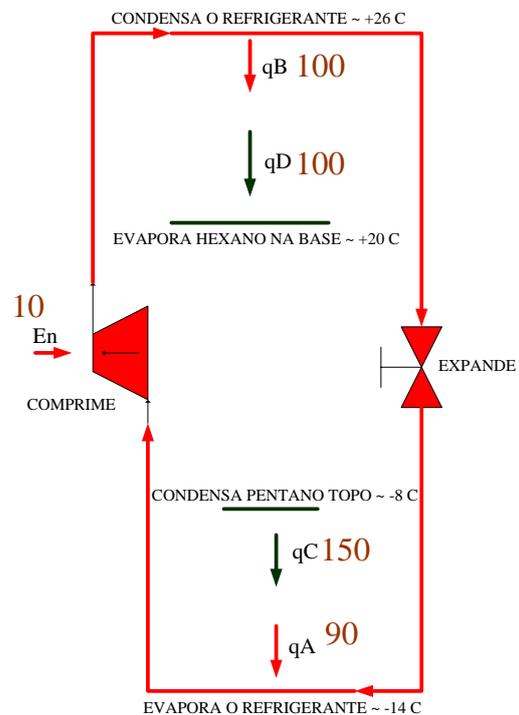


I. AJUSTE FORA DO CICLO

I.2. SE $q_C \gg q_D$

I.2.2. FAZENDO $q_D = q_B$

É de se esperar que no topo da coluna de destilação, a condensação do pentano gere um excedente de calor. Tal excedente teria que ser removido num outro trocador de calor com um fluido em temperatura menor que cerca de $-8\text{ }^\circ\text{C}$. (Necessitaríamos de um outro sistema de frio)

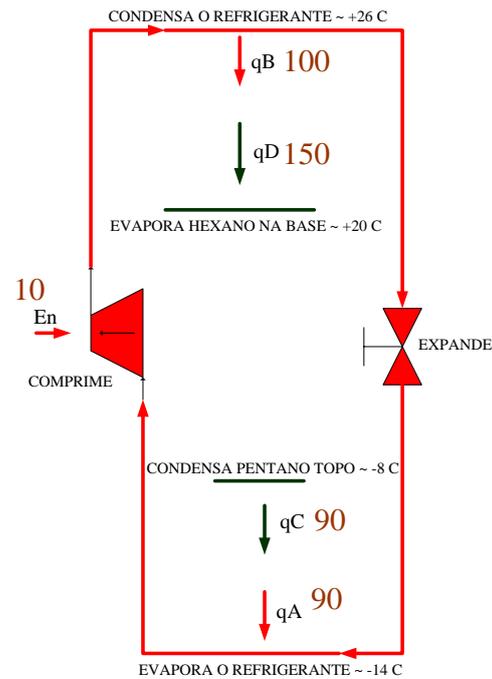


II. AJUSTE NO CICLO

II.1. SE $qC \ll qD$

II.1.1. FAZENDO $qC = qA$

Provavelmente necessitaríamos de mais calor para evaporar o hexano, o qual não poderia ser suprido totalmente pelo ciclo.



II. AJUSTE NO CICLO

II.1. SE $qC \ll qD$

II.1.2. FAZENDO $qD = qB$

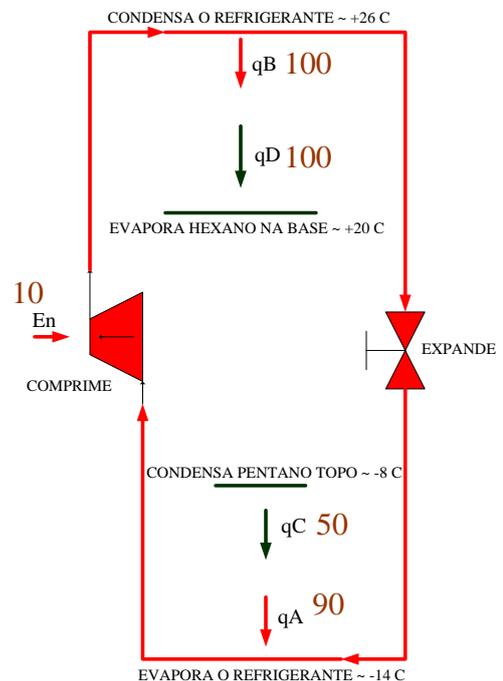
$qD = qB$ e com isto obtemos a vazão mássica de refrigerante

$$qA + E_n = qB \quad \text{obtendo } qA$$

Dois trocadores: $qA = qA1 + qA2$

Um trocador de calor terá carga térmica $qC = qA1$

O outro evaporará o refrigerante com o calor suplementar $qA2$, fornecido por um fluido auxiliar com temperatura superior a cerca de -14 °C.

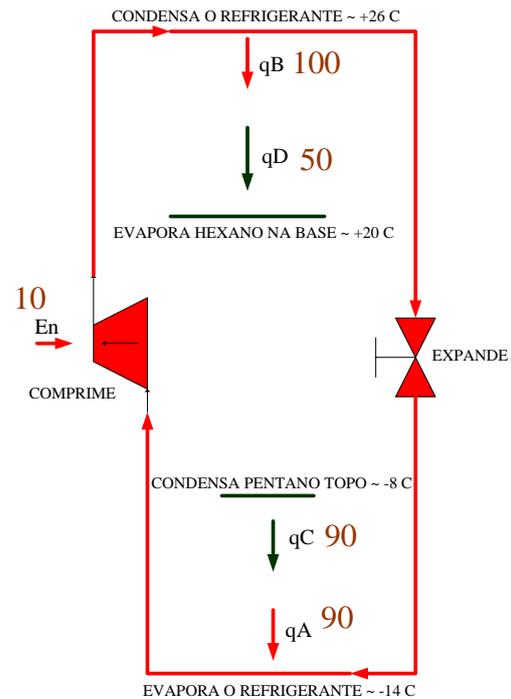


II. AJUSTE NO CICLO
 II.2. SE $q_C \gg q_D$
 II.2.1. FAZENDO $q_C = q_A$

$$q_B = q_{B1} + q_{B2}$$

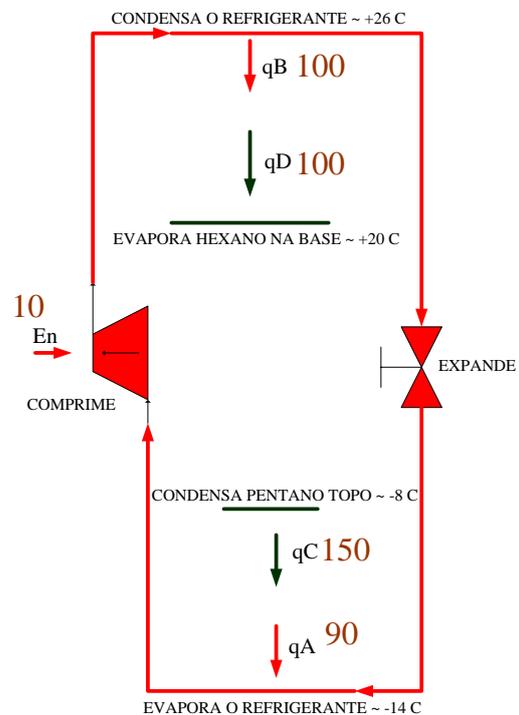
$$q_{B1} = q_D$$

q_{B2} é a carga térmica do trocador de calor que remove suplementarmente calor para a condensação do refrigerante, com o auxílio de um fluído auxiliar em temperatura inferior a aproximadamente $+26\text{ }^\circ\text{C}$



II. AJUSTE NO CICLO
 II.2. SE $q_C \gg q_D$
 II.2.2. FAZENDO $q_D = q_B$

É de se esperar que o ciclo não consiga remover todo o calor liberado pela condensação do pentano.



Sumário das opções prováveis para o equilíbrio das cargas térmicas.

| | | | | |
|--------|---------------|-------------|-------------|--------|
| AJUSTE | FORA DO CICLO | $q_C < q_D$ | $q_C = q_A$ | SIM |
| | | | $q_D = q_B$ | não |
| | | $q_C > q_D$ | $q_C = q_A$ | não |
| | | | $q_D = q_B$ | (não)* |
| | NO CICLO | $q_C < q_D$ | $q_C = q_A$ | não |
| | | | $q_D = q_B$ | SIM |
| | | $q_C > q_D$ | $q_C = q_A$ | SIM |
| | | | $q_D = q_B$ | não |

(não)* - porque parte da operação é realizada em temperatura abaixo de 0°C