

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS ARARANGUÁ**

JANYARA CECÍLIA PACHECO DE ALMEIDA

**VALIDAÇÃO DE UMA BANCADA DE TESTES DE TROCADORES DE CALOR DO
TIPO CASCO-TERMOSSIFÃO**

ARARANGUÁ

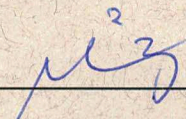
2017

JANYARA CECÍLIA PACHECO DE ALMEIDA


**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE ENERGIA**

Trabalho de conclusão de curso na modalidade de artigo científico para a aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso do curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal de Santa Catarina – Campus Araranguá

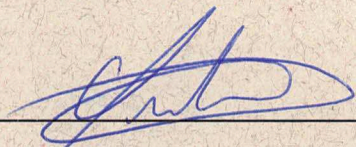
Aprovado em: 30/11/2017



Prof. Dr. Fernando Henrique Milanese (Orientador)



Prof. Dr. Rogério Gomes de Oliveira (Examinador)



Prof. Dr. Thiago Dutra (Examinador)

VALIDAÇÃO DE UMA BANCADA DE TESTES DE TROCADORES DE CALOR DO TIPO CASCO-TERMOSSIFÃO

Janyara Cecília Pacheco de Almeida*

RESUMO

Tubos de calor e termossifões são dispositivos altamente eficazes para trocas térmicas, que operam em um ciclo bifásico fechado e utilizam calor latente de vaporização para transferir calor mesmo com pequenas diferenças de temperatura. No Laboratório de Tubos de Calor da UFSC (LABTUCAL/EMC), existe uma bancada universal de testes de trocadores de calor (BANCUN), a qual é utilizada principalmente para testes de trocadores de calor assistidos pela tecnologia de termossifões bifásicos. O presente trabalho analisa o desempenho térmico desta bancada, operando com óleo térmico comercial, gases de combustão e água. Fazendo uso das propriedades térmicas de cada fluido, como por exemplo calor específico e densidade, bem como dos dados de temperatura e vazão fornecidos por sensores, foi possível obter a taxa de transferência de calor transferido de uma corrente para a outra, utilizando a 1ª Lei da Termodinâmica. Neste trabalho, verificou-se se a BANCUN estava apresentando resultados confiáveis de trocas térmicas, ou seja, se ela poderia ser validada em termos de balanço de energia, para aplicações em futuros testes com petróleo, o qual tem propriedades muito variáveis de um campo de extração para outro e por isso não foi utilizado de imediato. Após os testes, verificou-se que a perda térmica global foi da ordem de 16% e, levando em consideração que ainda existem perdas na tubulação, principalmente em componentes com pouco isolamento térmico como válvulas, sensores e flanges, um valor desta ordem pode ser considerado aceitável. Com base nesse resultado, a BANCUN foi considerada suficientemente precisa para receber os testes com petróleo.

Palavras-chave: Trocadores de calor. Termossifão. Tubos de calor.

* Graduanda do Curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Araranguá, Rodovia Governador Jorge Lacerda, 3201, Jardim das Avenidas Araranguá, Santa Catarina, Brasil, CEP 88900-000. E-mail: janyara.pacheco@hotmail.com

VALIDATION OF A THERMOSYPHON SHELL HEAT EXCHANGER TEST BENCH

ABSTRACT

Heat pipes and thermosyphons are highly effective thermal exchange devices that operate in a closed two-phase cycle and use the latent heat of vaporization to transfer heat even with small temperature differences. In the Laboratory of Heat Pipes of UFSC (LABTUCAL / EMC), there is an universal heat exchanger test bench (BANCUN), which is used mainly for tests of heat exchangers assisted by the two-phase thermosyphon technology. The present work analyzes the thermal performance of this bench, operating with commercial thermal oil, combustion gas and water. Making use of the thermal properties of each fluid, such as specific heat and density, as well as temperature and flow data provided by sensors, it was possible to obtain the heat transfer rate transferred from one stream to another one using first Law of Thermodynamics. In this work, it was verified if the bench was presenting reliable results of thermal exchanges, that is, if it could be validated in terms of energy balance for applications in future tests with petroleum, which has very variable properties from one field to another and so it was not used immediately. After the tests, it could be verified that the overall heat loss was of 16% and taking into account that there are still heat losses in the pipeline, mainly in components with low thermal insulation like valves, sensors and flanges, this value can be considered acceptable. Based on this result, the BANCUN was considered sufficiently accurate to receive petroleum tests.

Keywords: Heat exchangers. Thermosyphon. Heat pipes.

1 INTRODUÇÃO

As aplicações para os trocadores de calor são inúmeras, podendo variar desde uso residencial para aquecimento de ambientes, bem como a refrigeração dos mesmos, até o emprego em processos químicos (INCROPERA et al., 2008). Algumas atividades, como por exemplo a recuperação de calor residual de processos industriais para sua posterior inserção em ciclos térmicos, têm levado ao rápido aprimoramento de dispositivos térmicos mais eficientes e, dentre os diversos equipamentos que evoluíram com o passar dos anos, um dos destaques foram os trocadores de calor (CAJAMARCA, 2016).

Dentre os tipos de trocadores de calor estão os que utilizam a tecnologia de tubos de calor ou termossifões. A patente de Angier March Perkins e Jacob Perkins de 1831 é o primeiro registro oficial de tubos termossifões monofásicos. Esta patente descreve o funcionamento do dispositivo até então intitulado Tubo Perkins, que era composto basicamente por um tubo hermético carregado com um fluido de trabalho, que acoplava termicamente uma fornalha a um tanque de água, proporcionando o aquecimento indireto desta através da circulação de água sem mudança de fase no interior do tubo. Em 1929, Frazer W. Gay obteve uma patente sobre um dispositivo similar ao Tubo Perkins, carregado com uma pequena quantidade de água e operando em um ciclo de mudança de fase, posicionado verticalmente, com o evaporador abaixo do condensador. Este dispositivo, agora conhecido como termossifão, estabeleceu as bases para que mais tarde se pudesse desenvolver o que hoje é conhecido como tubo de calor, e foi em 1944 que Richard Gaugler introduziu o conceito da utilização de uma estrutura capilar como parte deste dispositivo. Contudo, o estágio de desenvolvimento tecnológico da época não permitiu um emprego imediato deste trocador de calor, ficando “esquecido” por duas décadas (PAIVA, 2007).

O conceito de tubo de calor renasceu em 1962, conectado ao desenvolvimento de um programa espacial americano e também em forma de patente requerida por Wyatt Theodore, em 1963. Em 5 de abril de 1967, o primeiro teste com tubos de calor em “gravidade zero” foi realizado por um grupo de engenheiros do Laboratório Científico de Los Alamos. O teste foi bem sucedido e superou as expectativas iniciais, tornando-se, para os projetistas da época, a nova tecnologia para solucionar o problema de controle de temperatura em naves espaciais. Desde então, cada vez mais naves espaciais dependem de tubos de calor para controle de temperatura de componentes individuais, de equipamentos mais complexos ou da estrutura (PAIVA, 2007).

Hoje em dia, tubos de calor são empregados na maioria dos satélites, incluindo os do programa espacial brasileiro como os desenvolvidos em conjunto com a China, os CBERS (Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres). Entretanto, termossifões e tubos de calor não são apenas empregados para fins espaciais, eles têm sido aplicados nas mais diversas áreas, que vão desde o controle de temperatura em oleodutos no Alasca, até o controle térmico de componentes eletrônicos, tais como semicondutores de alta performance (PAIVA, 2007).

Tubos de Calor e Termossifões apresentam alta efetividade na recuperação de calor residual em processos industriais e por isso sua aplicabilidade para este fim. A Bancada Universal de Testes de Trocadores de Calor (BANCUN) do Laboratório de Tubos de Calor (LABTUCAL) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), foi projetada para aquecer e resfriar petróleo cru através de trocadores com tubos termossifões. Deseja-se replicar este protótipo, em escala maior, na indústria petrolífera, onde calor residual advindo de processos industriais irá aquecer o petróleo tanto no campo de extração como para sua posterior destilação. No campo de extração, o que se pode obter após o bombeado do subsolo, é uma mistura viscosa de petróleo e água, sendo necessário aquecer esse combinado para diminuir sua viscosidade e facilitar a separação desses dois fluidos. Já quando o petróleo entra no processo de destilação, é necessário aquecê-lo para que seja possível obter seus diversos subprodutos. Após o processo de aquecimento desejado, o petróleo é resfriado a temperaturas próximas da ambiente, para que seja passível de transporte. Esse processo de refrigeração utiliza geralmente água de torre de resfriamento evaporativa ou outra corrente fluida que se deseja aquecer.

O objetivo principal da BANCUN é a realização de testes com petróleo cru, entretanto, é necessária a sua validação com óleo térmico comercial, de propriedades físico-químicas muito mais conhecidas que as do petróleo. Essa validação é possível a partir da análise do balanço de energia na bancada, através da inserção das propriedades físico-químicas de cada fluido e seus valores de temperatura e vazão, na equação da taxa de transferência de calor, obtida a partir da 1ª Lei da Termodinâmica. É devido à essa necessidade de se trabalhar com a equação do balanço de energia entre correntes a diferentes temperaturas, que o conhecimento das propriedades do óleo térmico são importantes. A validação da BANCUN é necessária para ter conhecimento se ela está oferecendo resultados reais e confiáveis a respeito das trocas térmicas ocorridas entre os fluidos. Caso o petróleo tivesse sido utilizado antes da validação, não se saberia se os resultados obtidos seriam corretos, pois suas propriedades podem variar muito de um campo de extração para outro e, na sua maioria, não são catalogadas.

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo analisar o desempenho térmico da BANCUN, quando empregada para testes de trocadores de calor do tipo Casco-Termossifão, operando com gases quentes de combustão, óleo térmico comercial e água.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

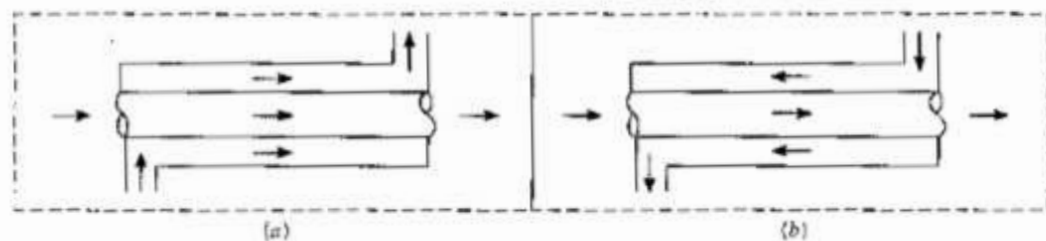
As seguintes seções apresentam a teoria necessária para o desenvolvimento deste trabalho.

2.1 TROCADORES DE CALOR

Para possibilitar a troca de calor entre dois fluidos, não necessariamente no mesmo estado físico, mas que estejam a diferentes temperaturas e separados por uma parede sólida, se faz necessário o uso de trocadores de calor. As aplicações destes dispositivos são inúmeras, podendo variar desde uso residencial, para aquecimento e refrigeração de ambientes, até o emprego em processos químicos (INCROPERA et al., 2008).

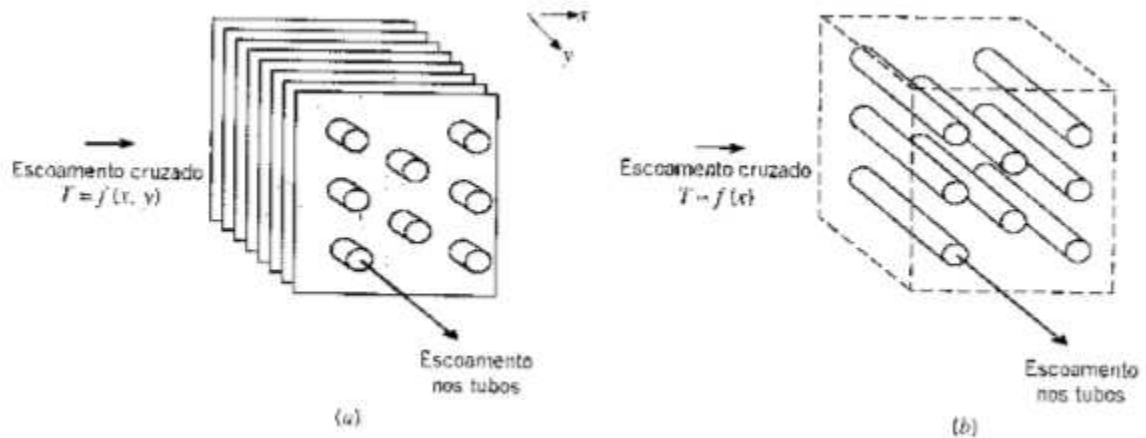
Os trocadores de calor são classificados em função da configuração do escoamento e do tipo de construção. Nos trocadores mais simples, os fluidos quente e frio se movem no mesmo sentido, ou em sentidos opostos, em uma construção com tubos concêntricos (ou bitubulares). Quando os fluidos quente e frio entram pela mesma extremidade, escoam no mesmo sentido e deixam o equipamento também na mesma extremidade, tem-se a configuração paralela (Figura 1a). Já quando entram por extremidades opostas, escoam em sentidos opostos e deixam o equipamento também em extremidades opostas, tem-se a configuração contracorrente (Figura 1b) (INCROPERA et al., 2008).

Figura 1: Trocadores de calor de tubos concêntricos. (a) Escoamento paralelo. (b) Escoamento contracorrente (INCROPERA et al., 2008)



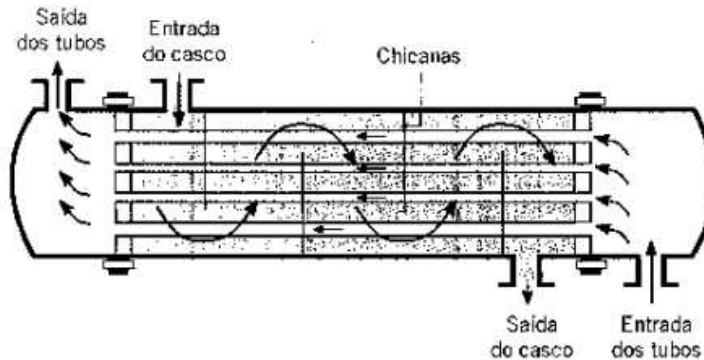
Os fluidos podem se mover em escoamento cruzado, tendo um fluido escoando perpendicularmente ao outro, como ilustrado pelos trocadores de calor tubulares, com e sem aletas, na Figura 2.

Figura 2: Trocadores de calor com escoamentos cruzados. (a) Aletados com ambos os fluidos não-misturados. (b) Não-aletados com um fluido misturado e o outro não-misturado (INCROPERA et al., 2008)



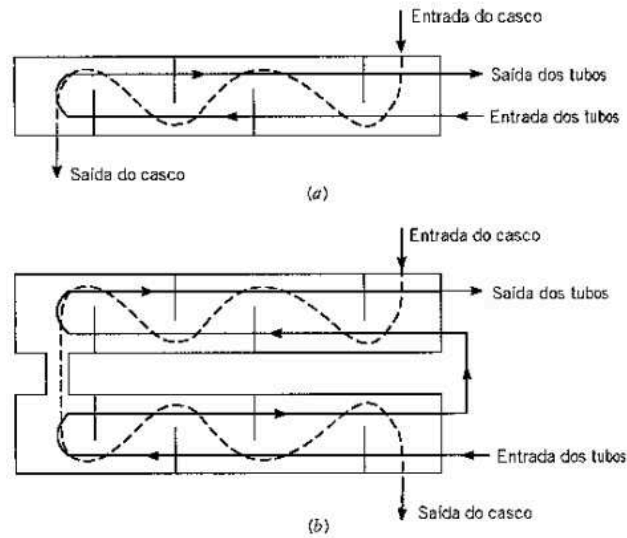
Os trocadores de calor podem também possuir outra configuração comum chamada de casco e tubos, sendo que as formas específicas desse tipo de trocador de calor diferem de acordo com os números de passes no casco e nos tubos. A forma mais simples de um trocador de calor do tipo casco e tubos envolve um único passe nos tubos e no casco, como mostra a Figura 3.

Figura 3: Trocadores de calor casco e tubos com um passe no casco e um passe nos tubos (modo de operação contracorrente) (INCROPERA et al., 2008)



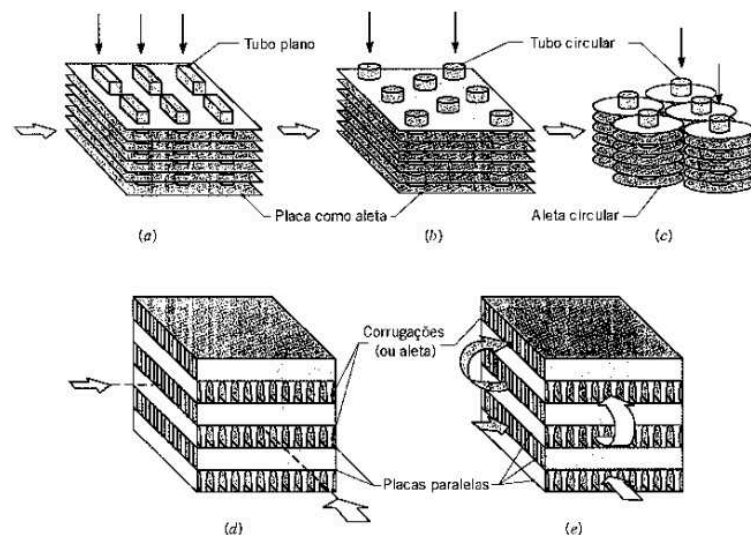
Com o objetivo de aumentar o coeficiente convectivo do fluido no lado do casco, são instaladas chicanas, que também acabam por induzir turbulência e um componente de velocidade na direção do escoamento cruzado (INCROPERA et al., 2008). Trocadores de calor com chicanas e com um passe no casco e dois passes nos tubos, e com dois passes no casco e quatro passes nos tubos são mostrados nas Figuras 4a e 4b, respectivamente.

Figura 4: Trocadores de calor casco e tubos. (a) Um passe no casco e dois passes nos tubos. (b) Dois passes no casco e quatro passes nos tubos (INCROPERA et al., 2008)



Outro tipo desses dispositivos térmicos são os trocadores de calor compactos, utilizados quando se deseja atingir superfícies de transferência de calor muito grandes ($\geq 400 \text{ m}^2/\text{m}^3$ para líquidos e $\geq 700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ para gases) por unidade de volume. Esses equipamentos possuem densas matrizes de tubos aletados, ou placas, e são tipicamente usados quando pelo menos um dos fluidos é caracterizado por um pequeno coeficiente de transferência de calor, como é o caso dos gases (INCROPERA et al., 2008). A Figura 5 mostra as diferentes configurações de tubos e aletas para esse tipo de dispositivo.

Figura 5: Núcleos de trocadores de calor compactos. (a) Tubo aletado (tubos planos, placas contínuas como aletas). (b) Tubo aletado (tubos circulares, placas contínuas como aletas). (c) Tubo aletado (tubos circulares, aletas circulares). (d) Placa aletada (passe único). (e) Placa aletada (múltiplo passe) (INCROPERA et al., 2008)



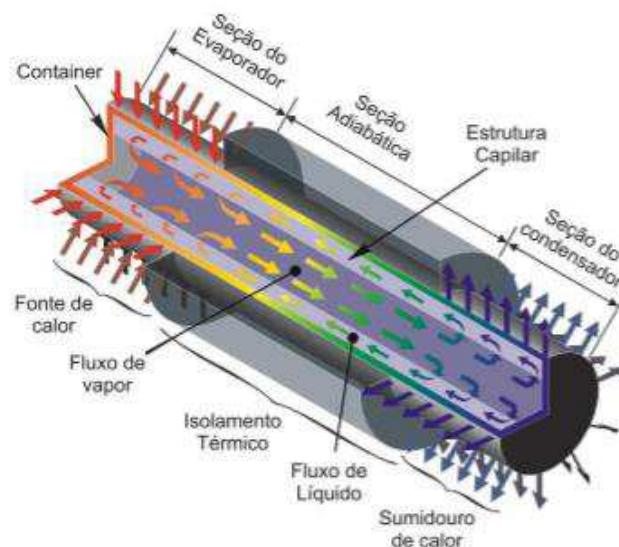
2.2 TROCADORES DE CALOR DO TIPO TUBOS DE CALOR E TERMOSSIFÃO

Termossifões, assim como os tubos de calor, são dispositivos altamente eficazes para trocas térmicas, que operam em um ciclo bifásico fechado e utilizam calor latente de vaporização para transferir calor a partir de pequenas diferenças de temperatura. Esses tipos de trocadores de calor são basicamente formados por um tubo metálico oco, evacuado, onde uma determinada quantidade de fluido de trabalho é inserida. Nos tubos de calor propriamente dito, o tubo metálico é revestido internamente por um meio poroso, de estrutura capilar e encharcado com o fluido de trabalho. Já nos termossifões, o meio poroso é inexistente, entretanto, tanto os tubos de calor como os termossifões são compostos por duas regiões distintas, evaporador e condensador, e uma terceira seção chamada de região adiabática, que pode ou não existir dependendo da aplicabilidade (CAJAMARCA, 2016).

É na região do evaporador que o calor é imposto, o fluido de trabalho ali contido é aquecido até vaporizar e, com o aumento da pressão de vapor no evaporador, o vapor se desloca para a região mais fria do tubo, o condensador. A rejeição de calor nesta região faz com que o fluido condense, liberando o calor latente de vaporização. Quando existir a região adiabática, sua dimensão poderá ser variável e sua localização sempre será entre o evaporador e o condensador, sendo isolada do meio externo (MANTELLI, 2012).

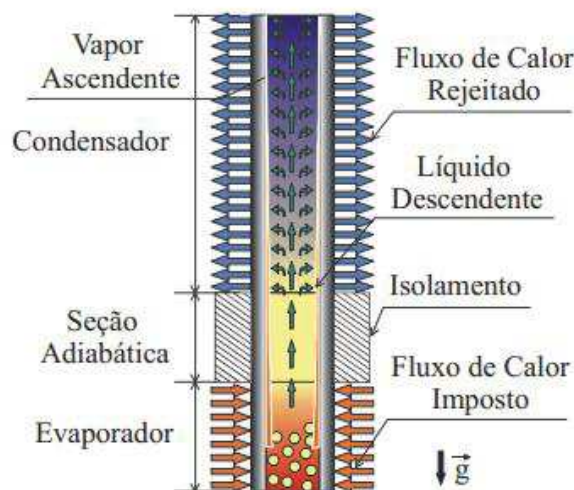
Nos tubos de calor, as forças capilares bombeiam o fluido ali presente de volta ao evaporador, fechando assim um ciclo (PAIVA, 2007). A Figura 6 ilustra o princípio de funcionamento de um tubo de calor.

Figura 6: Esquema de funcionamento de um tubo de calor (PAIVA, 2007)



No caso dos termossifões, o fluido condensado retorna ao evaporador por efeito da gravidade, sendo esta uma das limitações dos termossifões em relação aos tubos de calor, eles devem trabalhar na vertical ou em um ângulo de inclinação que permita o fluido retornar ao evaporador apenas com a ação da gravidade. Sendo assim, o evaporador deve estar sempre localizado abaixo do condensador, para que não ocorra secagem do fluido de trabalho (CAJAMARCA, 2016). Essa configuração está mostrada na Figura 7.

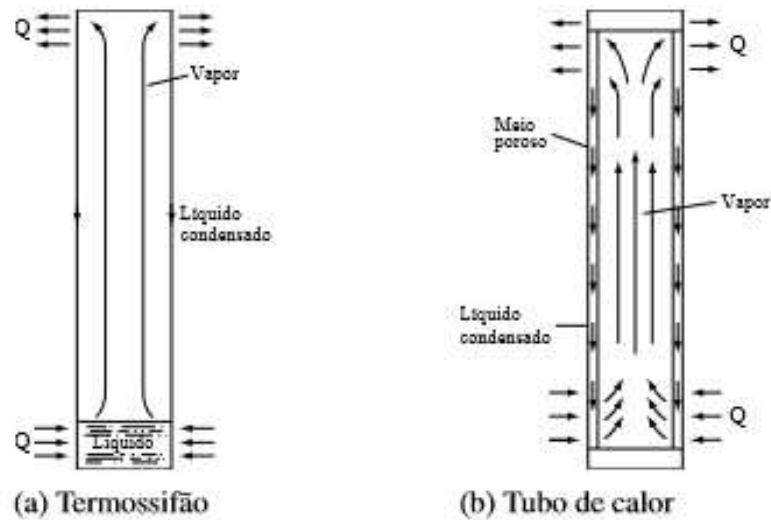
Figura 7: Princípios físicos de funcionamento de um termossifão (MANTELLI, 2012)



Como no caso dos tubos de calor o retorno do fluido de trabalho do condensador ao evaporador se dá pelo efeito de bombeamento capilar, é possível trabalhar com esse dispositivo na posição que for desejada, não limitando-o a estar na vertical. Devido ao fato de apresentarem maior flexibilidade que os termossifões, podendo operar em circunstâncias adversas, onde, por exemplo, o condensador se situe abaixo do evaporador, ou em ambientes de micro ou ausência de gravidade (aplicações espaciais), os tubos de calor são mais caros, pois exigem processos de fabricação mais complexos. Por outro lado, a facilidade de construção e o custo reduzido, fazem dos termossifões os equipamentos preferidos para aplicações industriais, sempre que for possível utilizar gravidade (MANTELLI, 2012).

A Figura 8 apresenta o esquema de um termossifão e de um tubo de calor, respectivamente.

Figura 8: (a) Termossifão. (b) Tubo de calor (CAJAMARCA, 2016)

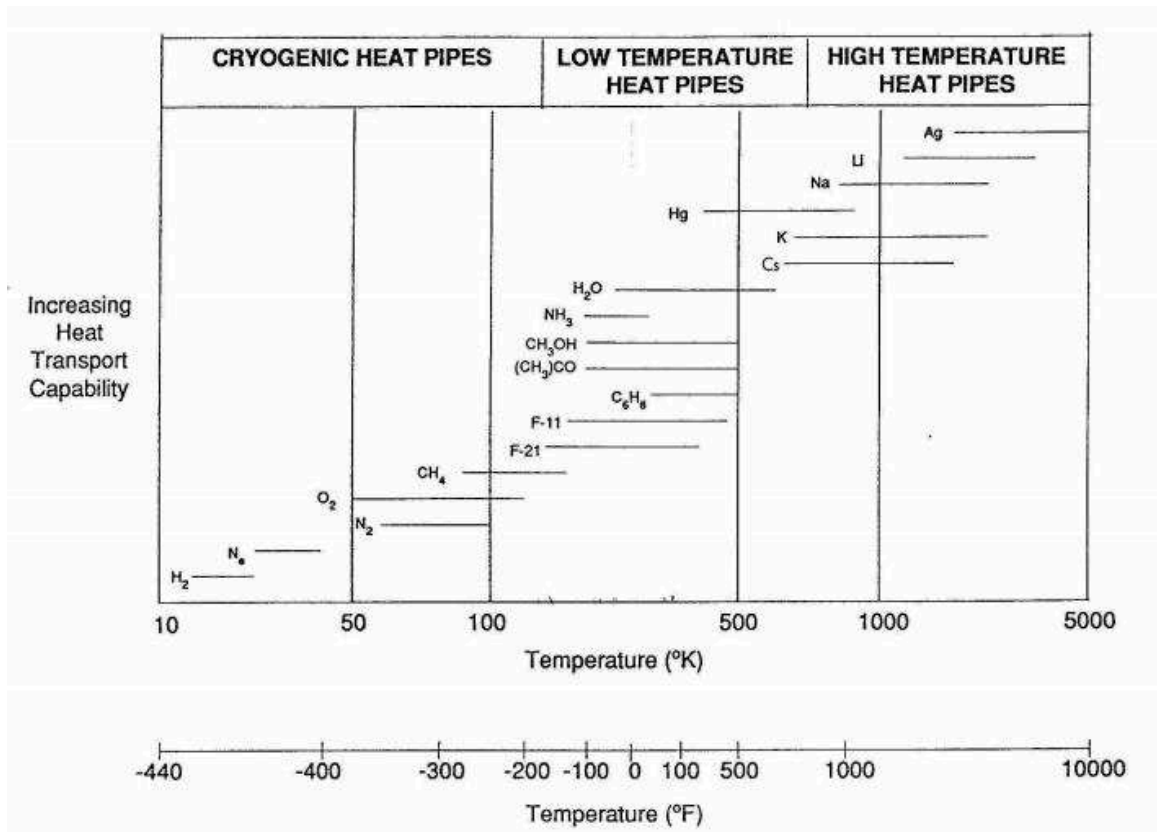


2.2.1 Fluido de trabalho

O fluido de trabalho é o elemento responsável pela absorção e rejeição de calor dentro de um tubo de calor ou de um termossifão. Ele pode variar de hidrogênio, para operações em baixas temperaturas, até metais líquidos, como o mercúrio, sódio, potássio e lítio, para operar em altas temperaturas. Usa-se água como fluido de trabalho, quando se deseja trabalhar com temperaturas intermediárias de operação (MANTELLI, 2012).

Como o funcionamento de um tubo de calor ou termossifão se baseia principalmente na vaporização e condensação do fluido de trabalho, este deve ser criteriosamente selecionado. O principal critério empregado na seleção do fluido de trabalho é a sua temperatura de operação, que pode variar de temperaturas extremamente baixas, de 5 a 100K, até níveis bastante altos, passando dos 1000K (MANTELLI, 2012). A Figura 9 apresenta alguns fluidos de trabalho típicos, que estão agrupados de acordo com a temperatura de operação. Além das propriedades termofísicas, propriedades como molhabilidade do fluido e tensão superficial são importantes e devem ser avaliadas para fins de projeto.

Figura 9: Possíveis faixas de temperatura de trabalho para alguns fluidos (MANTELLI, 2012)



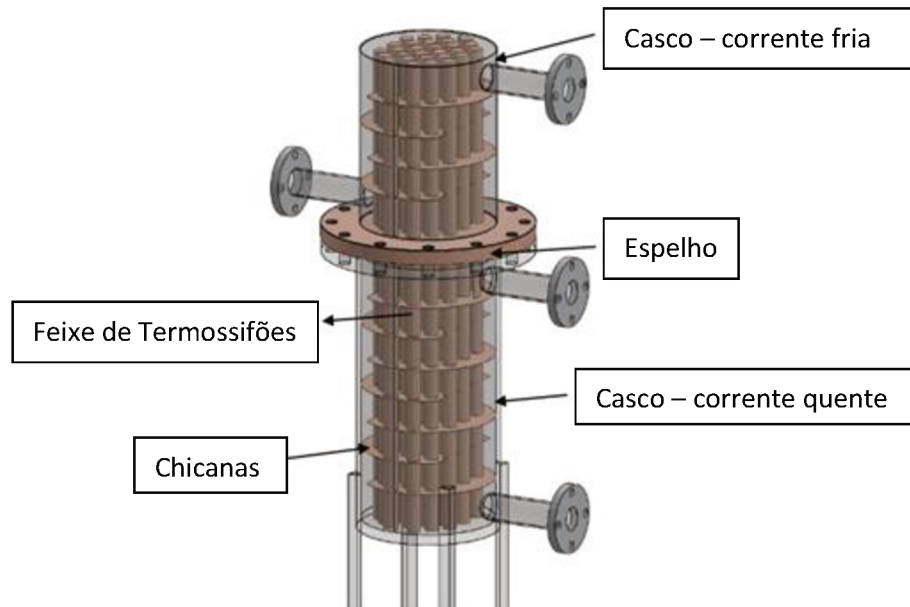
2.3 TROCADORES DE CALOR COM TUBOS TERMOSSIFÕES

Trocadores de calor assistidos por termossifões são uma alternativa para a substituição dos trocadores de calor convencionais utilizados na indústria. Essa tecnologia visa equipamentos mais robustos, compactos, mais eficientes e com menores custos operacionais de manutenção.

Os trocadores de calor do tipo Casco-Termossifão, também chamados de Casco-Casco, apresentam características construtivas semelhantes aos Casco-Tubo convencionais. Neste último caso, uma das correntes circula no interior dos tubos e a outra pelo casco, já no Casco-Termossifão, ambas correntes circulam em cascos separados, ou seja, há um casco para cada corrente. Na parte inferior está alocado o casco com os evaporadores dos termossifões e na parte superior, o casco com os seus condensadores. Os dois cascos estão acoplados mediante um feixe de termossifões, e são ligados entre si via flange, onde um espelho intermedia essa conexão. A troca térmica é garantida pelo feixe de termossifões, que são inseridos no espelho da mesma forma que os tubos de trocadores Casco-Tubo. A transferência de calor ocorre entre a corrente quente (casco inferior) e o fluido de trabalho em ebulição no interior dos termossifões

e, entre o fluido de trabalho em condensação localizado no interior do termossifão e a corrente fria do casco superior (CAJAMARCA, 2016). A Figura 10 ilustra um trocador de calor tipo Casco-Termossifão.

Figura 10: Trocador de Calor Casco - Termossifão Bifásico



Pode-se encontrar diversas configurações para trocadores de calor com tubos termossifões. A configuração onde o evaporador e condensador estão acoplados em um mesmo dispositivo, está representada anteriormente na Figura 10. Esse modelo é ideal quando se deseja realizar trocas térmicas entre duas correntes que podem passar em um mesmo local. Na BANCUN, essa é a configuração que foi adotada e o ANEXO A apresenta uma foto deste trocador de calor.

Existem muitas vantagens ao se utilizar trocadores de calor com tubos termossifões, dentre elas pode-se destacar a não necessidade de limpeza interna dos tubos, o que facilita a manutenção do dispositivo; menor risco de contaminação, pois correntes trocam calor por intermédio do fluido de operação que está interno aos tubos termossifões; possibilidade de efetuar a troca térmica entre correntes distantes (configuração em *Loop*) e, operam sob elevadas pressões em ambas correntes quando usados em carcaças cilíndricas (MANTELLI, 2012)

Esses trocadores de calor possuem um *design* flexível, o que possibilita ser construído em diferentes tamanhos e configurações. No Brasil, desenvolveu-se um secador de ervas finas, assistido pela tecnologia de termossifões. Nessa pesquisa, foi adaptado um forno de cocção de pães, desenvolvido pelo LABTUCAL, com termossifões distribuídos nas paredes laterais da câmara de secagem. Neste forno, foram realizados testes de secagem com o objetivo de

comparar o desempenho deste com o de outro secador convencional. Observou-se que o tempo de secagem, assim como o consumo total de energia no forno de cocção de pães adaptado, diminuíram consideravelmente em comparação com equipamentos convencionais (CISTERNA, 2014). Na construção civil, é possível aplica-los sob o asfalto em lugares muito frios, impedindo o acúmulo de neve sobre o mesmo. De fato, são inúmeras as possibilidades de aplicação para esta tecnologia (MANTELLI, 2012).

2.4 ÓLEO TÉRMICO COMERCIAL PARA VALIDAÇÃO DA BANCUN

Quando uma bancada experimental é projetada e montada, é necessário que se encontre meios para validá-la, ou seja, existe a necessidade de saber se ela está oferecendo resultados confiáveis. No caso da BANCUN, onde a seção de testes se localiza nos trocadores de calor Casco-Termossifão, uma alternativa é analisar o balanço de energia ocorrido e discutir se os resultados obtidos conferem com as leis da física, ou seja, verificar se os valores de ganho e perda de calor de uma corrente para outra são coerentes.

A intenção de projeto desta bancada, como já foi mencionado, é aquecer petróleo cru, entretanto, seria necessário que se conhecesse as propriedades físico-químicas do mesmo para inseri-las na equação do balanço de energia, e saber o quanto se obteve de perdas térmicas e ainda, se essas seriam aceitáveis dentro da realidade. Entretanto, as propriedades do petróleo são pouco conhecidas e variam muito com o tempo e com a posição geográfica de cada campo de extração. Devido a isso, utiliza-se um óleo térmico comercial, previamente ao uso do petróleo, pelo fato de já possuir propriedades físico-químicas bem definidas e catalogadas.

Sendo assim, as propriedades do óleo térmico possibilitaram a análise das perdas térmicas nos trocadores de calor e na bancada como um todo, a partir da utilização da 1ª Lei da Termodinâmica. Analisando o resultado experimental da taxa de transferência de calor entre as correntes, analisa-se também o desempenho térmico dos trocadores de calor Casco-Termossifão e da BANCUN, validando-a, ou não, para receber o petróleo e seguir com os testes.

3 METODOLOGIA

Esta seção apresentará a metodologia utilizada para a validação térmica da BANCUN, quando operada com gases de combustão, óleo térmico comercial e água.

3.1 BANCADA UNIVERSAL DE TESTES DE TROCADORES DE CALOR (BANCUN)

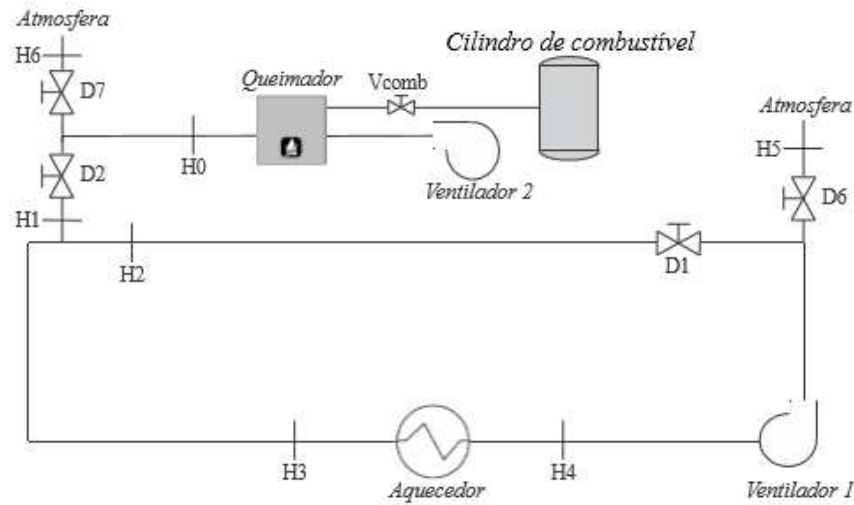
Em 2012, dentro de um projeto de pesquisa desenvolvido no LABTUCAL com recursos da PETOBRAS, foi iniciada a construção da Bancada Universal de Testes de Trocadores de Calor (BANCUN), a fim de se testar o desempenho e a acurácia dos modelos térmicos desses dispositivos desenvolvidos por este mesmo laboratório. Para serem avaliadas as soluções de trocas térmicas no projeto atual, foi necessária adaptar a BANCUN com a construção de uma linha de líquido pressurizado para passagem do óleo térmico e posteriormente do petróleo.

Existiam, originalmente, duas linhas na bancada, uma de corrente quente, conseguida através da queima de um combustível (gás liquefeito de petróleo ou gás natural), e a outra de ar frio, inutilizada para os testes em questão. A movimentação dos gases quentes de combustão é mantida por ventiladores com controle de capacidade através da variação de rotação e, esta bancada permite o controle da temperatura desses gases para simular diferentes condições de trocas térmicas. Os trocadores de calor do tipo Casco-Termossifão a serem avaliados são instalados entre a linha de gás quente e a linha de ar frio, desconectada para os testes em questão, de forma a promover a transferência de calor entre a corrente de gases quentes da combustão e a corrente fria de líquido pressurizado. Esta região é denominada seção de testes.

Com o intuito de adaptar a BANCUN ao novo projeto, foi necessário desconectar a corrente fria de ar e construir uma nova linha, agora para líquidos pressurizados, que troca calor com os gases quentes da bancada. Essa linha de líquidos é o ponto principal de testes, pois é nela que passará o petróleo após a validação com o óleo térmico comercial. Na sequência, o líquido pressurizado aquecido, neste caso o óleo, rejeitará calor para uma linha de água fria proveniente da torre de arrefecimento disponível no laboratório. A pressão máxima disponível para operar na linha de líquido é de 10 bar.

São três linhas de fluido na BANCUN: linha de gás quente, linha de líquido pressurizado e linha de líquido não pressurizado. A linha de gás quente é composta por um circuito recirculante, podendo operar descartando todo o gás de exaustão proveniente do queimador ou recircular parte dele para a chaminé, através da abertura do *damper* D6. A Figura 11 ilustra essa situação.

Figura 11: Diagrama de processos da linha de gases quentes

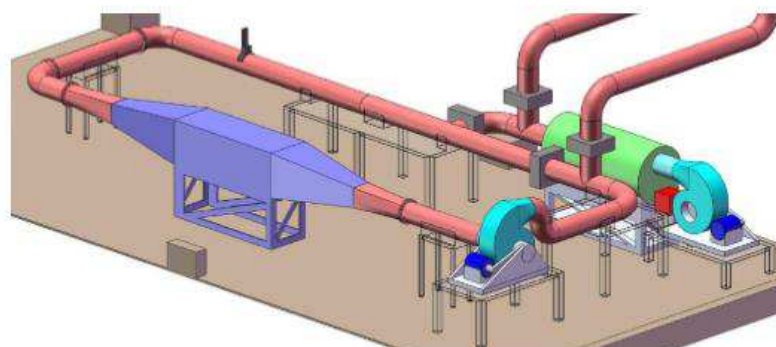


Na linha de gases quentes, existem dois ventiladores, um para o controle da queima conforme a vazão de combustível (Ventilador 2), e o outro para promover a recirculação dos gases de combustão (Ventilador 1). Estão presentes também na linha, *dampers*, como os representados por D1 e D6, que são responsáveis pelo controle da recirculação de gases, e os *dampers* após o queimador, D2 e D7, os quais permitem regular a parcela de gás que vai para linha e a que vai direto para a chaminé. Além disso, o Ventilador 2 e a válvula de combustível do queimador, V_{comb} , garantem o controle de vazão e temperatura de forma independente, o que permite grande flexibilidade nas condições de testes.

A bancada está portanto, apta a operar com diferentes combinações de vazão mássica, temperatura e potência térmica, uma vez que o controle da temperatura da seção de testes é independente da vazão mássica, podendo depender apenas do posicionamento dos *dampers* e da quantidade de combustível.

Para melhor visualização, a Figura 12 apresenta um desenho em *Solidworks* da linha de circulação da corrente de gases quentes.

Figura 12: Linha de gases quentes



Conforme dito anteriormente, a BANCUN está apta a operar com uma ampla faixa de vazão mássica, temperatura e potência térmica. Portanto, os cálculos para determinação dessas variáveis de controle são realizados com base na combinação desejada para esses três parâmetros. Algumas restrições são impostas para fins de modelagem: a temperatura máxima na saída da câmara de combustão é de 700°C e a temperatura máxima dos gases no ventilador de 500°C.

Ainda que a linha de ar frio não tenha sido utilizada para os testes em questão, é importante apresentá-la para se ter conhecimento da posição dos protótipos de trocadores de calor. Esta linha é composta por um circuito também recirculante, o qual operava descartando todo o ar aquecido proveniente da seção de testes ou recirculando parte dele, de acordo com a posição dos *dampers* D3 e D5. Essa situação pode ser observada na Figura 13 e a Figura 14 ilustra, em *Solidworks*, a linha de ar frio (azul) juntamente com a linha de gases quentes (vermelho).

Figura 13: Diagrama de processos da linha de ar frio

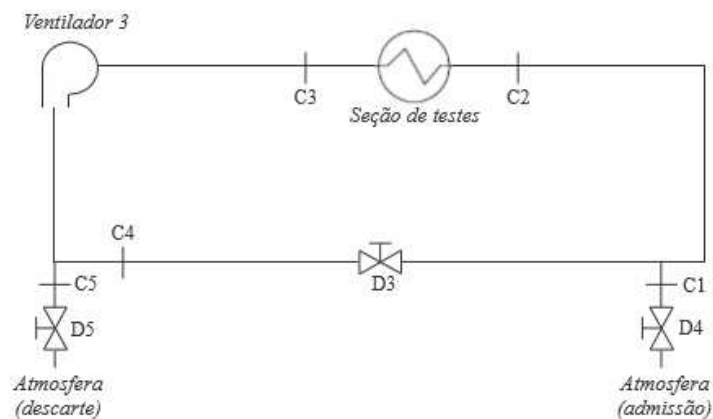
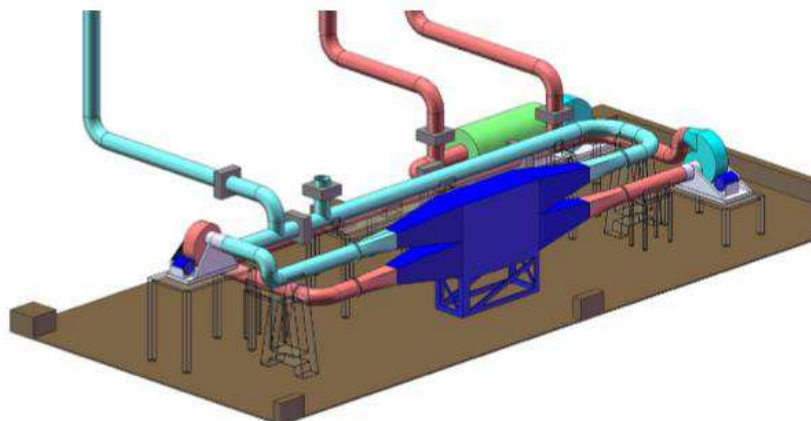


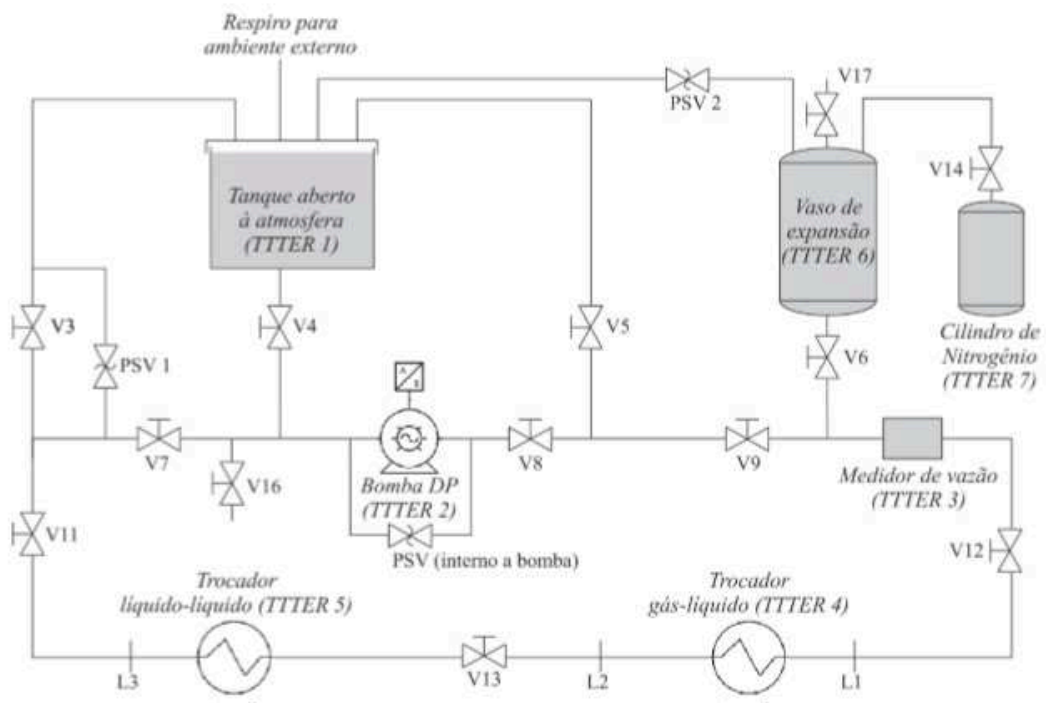
Figura 14: Linha de ar frio e linha de gases quentes



A linha de líquido é composta por um circuito principal de líquido pressurizado, em que dois trocadores de calor do tipo Casco-Termossifão são dispostos em série. Um recebe calor da linha de gases quentes e o outro rejeita-o para uma linha secundária de água, não pressurizada, proveniente da torre de arrefecimento do laboratório. Adicionalmente, existem tubulações secundárias para conectar a linha principal ao tanque de armazenamento e ao sistema de pressurização, composto por um vaso de expansão conectado a um cilindro de nitrogênio.

A Figura 15 mostra esquematicamente a linha de líquido pressurizado com todos os dispositivos necessários para o seu funcionamento.

Figura 15: Diagrama de processos da linha de líquido pressurizado



O enchimento da linha de líquido pressurizado se dá através do tanque atmosférico (TTTER 1), vertendo a amostra de óleo térmico que está contido nele. Após o tanque estar cheio, o enchimento da linha será através da abertura da válvula V4 permitindo que o fluido presente no reservatório preencha, por gravidade, toda a linha e também uma fração do vaso de expansão. Ao encerramento dos testes, o retorno do líquido ao tanque é feito pela tubulação da válvula V5 via pressão de descarga da bomba. A Figura 16 apresenta as linhas de líquido juntamente com as tubulações de gás em vermelho e de ar frio (inutilizada neste trabalho) em azul. As Figuras 17 e 18 mostram, respectivamente, a vista frontal e a visão geral da linha de líquido pressurizado e de água, conforme indica a própria figura.

Figura 16: Montagem da linha de líquido na BANCUN

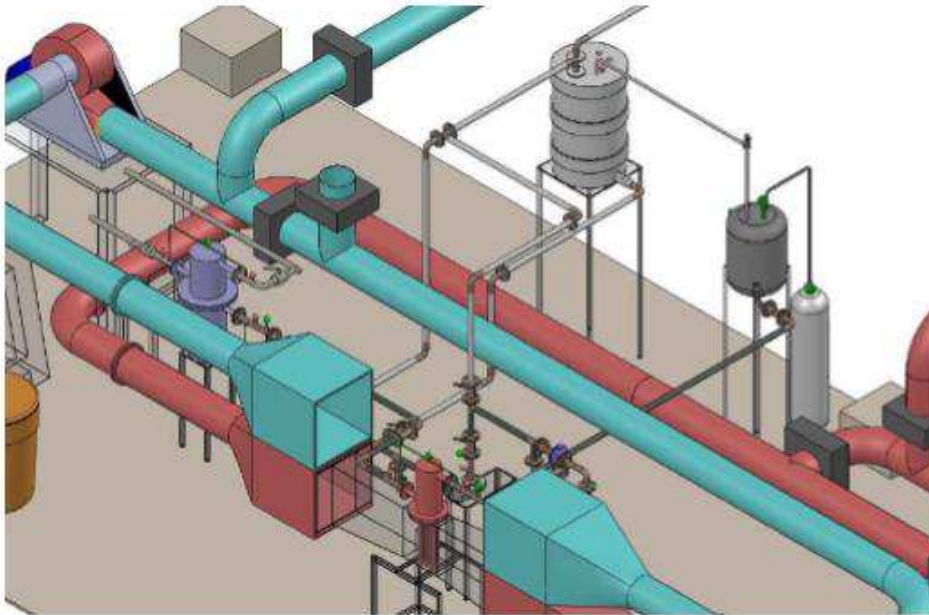


Figura 17: Vista frontal da linha de líquido pressurizado

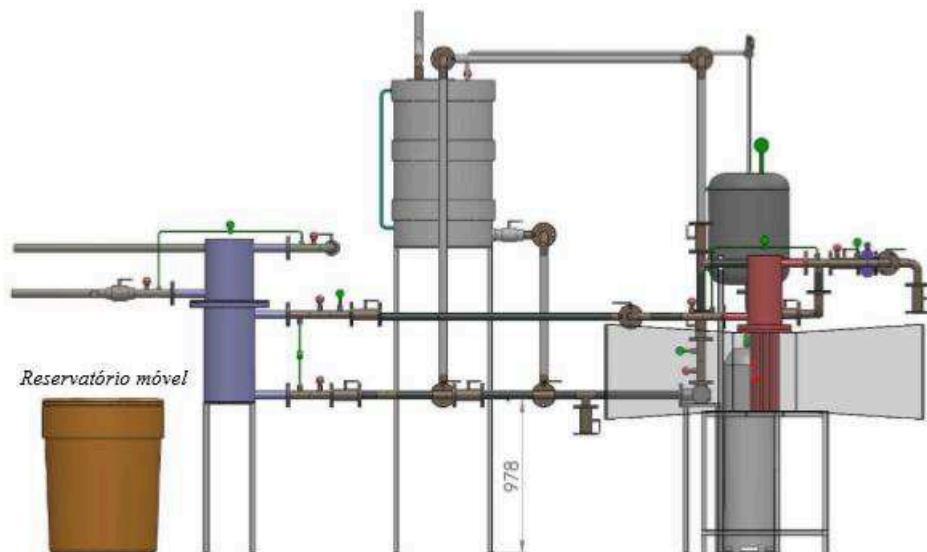
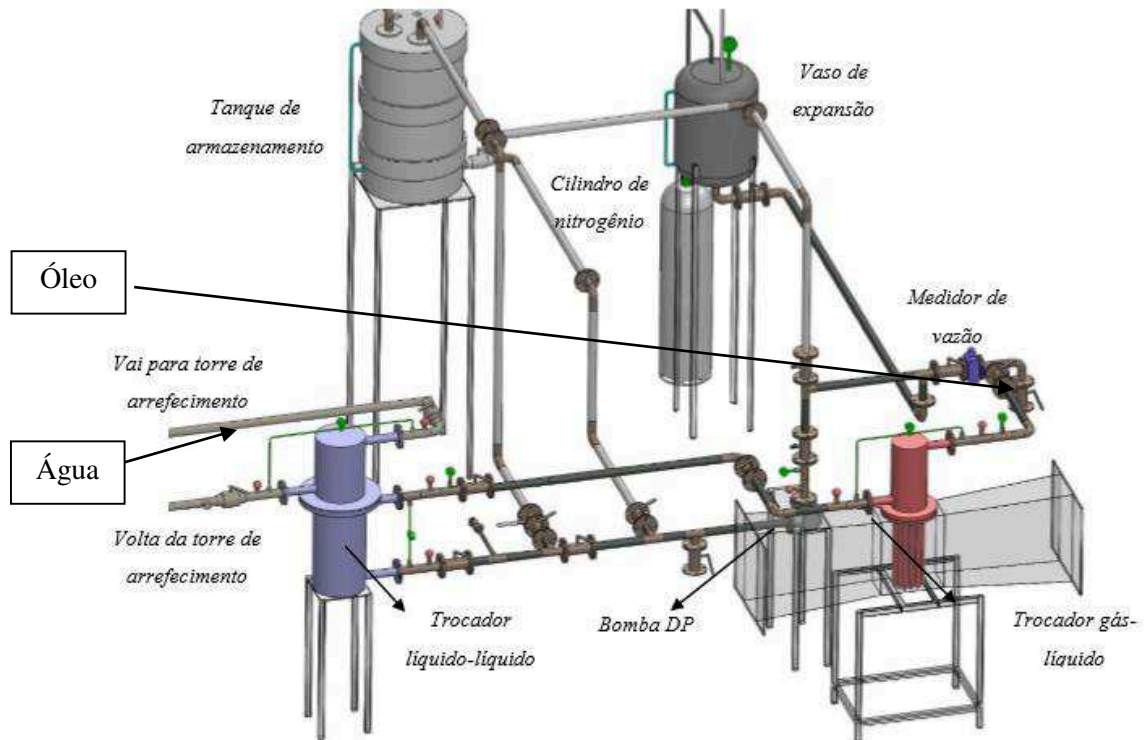


Figura 18: Linha de líquido pressurizado e linha de água



3.1.1 Trocador de calor gás-líquido (GL)

Foi utilizado um trocador de calor gás-líquido (GL) tipo Casco-Termossifão na BANCUN, o qual servirá como dispositivo de aquecimento para o óleo térmico comercial. Chama-se de gás-líquido, devido ao fato do trocador realizar a troca térmica entre a corrente de gases quentes de exaustão, provenientes do queimador, e uma corrente fria de líquido pressurizado, neste caso óleo. Quando a corrente quente flui pela parte inferior do trocador GL, existe a transferência de calor para o óleo, que estará passando internamente ao casco superior deste dispositivo.

Este trocador consiste em um casco acoplado a um feixe de tubos, inserido em uma corrente quente de seção retangular. O equipamento é composto por três partes separáveis: casco, feixes de tubos (composto por espelhos, tubos termossifões, chicanas e chapa defletora) e defletores de ar. As Figuras 19 e 20 apresentam os aspectos construtivos do trocador de calor GL.

Figura 19: Trocador de calor gás-líquido (GL)

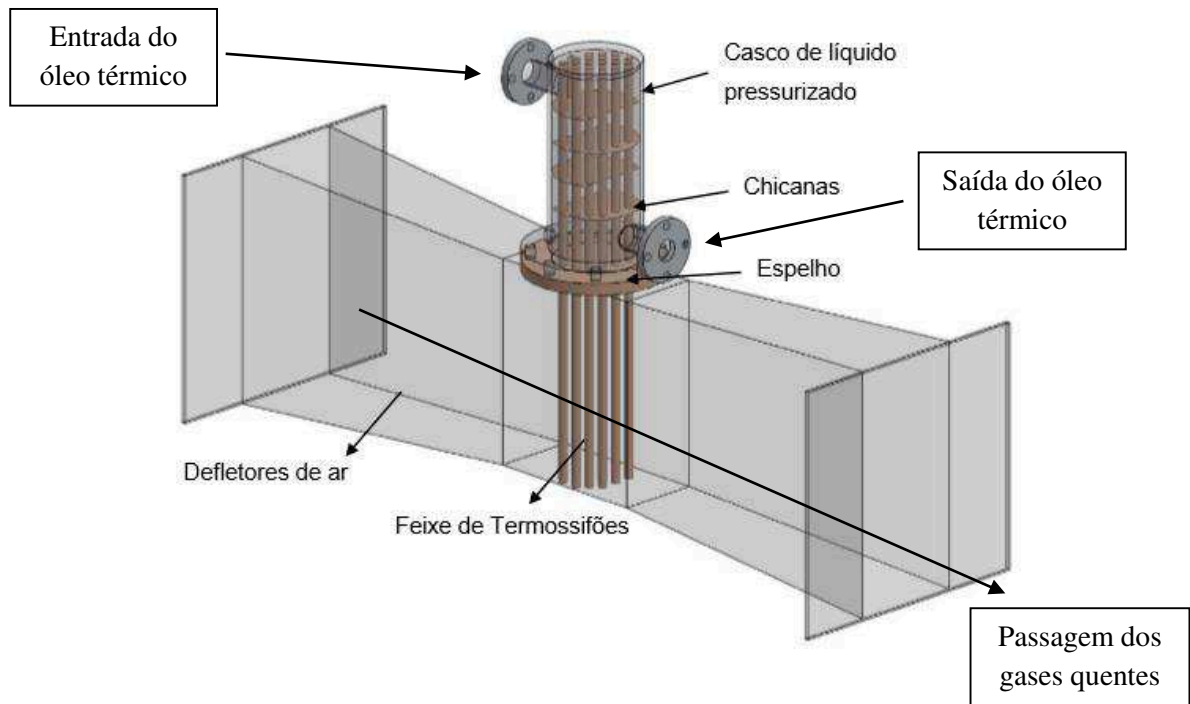
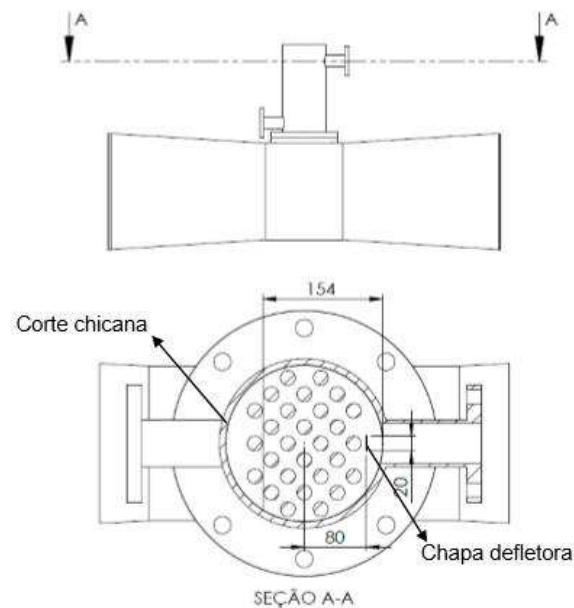


Figura 20: Esquema do arranjo de tubos do trocador gás-líquido (GL)



3.1.2 Trocador de calor líquido-líquido (LL)

Em série com o trocador GL, é testado um protótipo do trocador de calor, também tipo Casco-Termossifão, porém líquido-líquido (LL). Ele recebe esse nome por existir a transferência de calor entre duas linhas de líquidos, sendo elas, óleo quente e água fria. O

protótipo recebe calor da linha de líquido pressurizado, óleo, e o rejeita para a corrente fria de água, proveniente da torre de arrefecimento. Por estar conectada diretamente à esta torre, que se encontra no mesmo nível da linha de óleo, a linha de água opera, aproximadamente, a pressão atmosférica.

Esse trocador de calor é composto também por três partes: casco da água, apto para operar somente a pressão atmosférica; casco do líquido e feixe de tubos, composto por um espelho, tubos termossifões, chicanas, chapas defletoras e barras de selagem.

As Figuras 21 e 22 apresentam os aspectos construtivos do equipamento.

Figura 21: Trocador de calor líquido-líquido (LL)

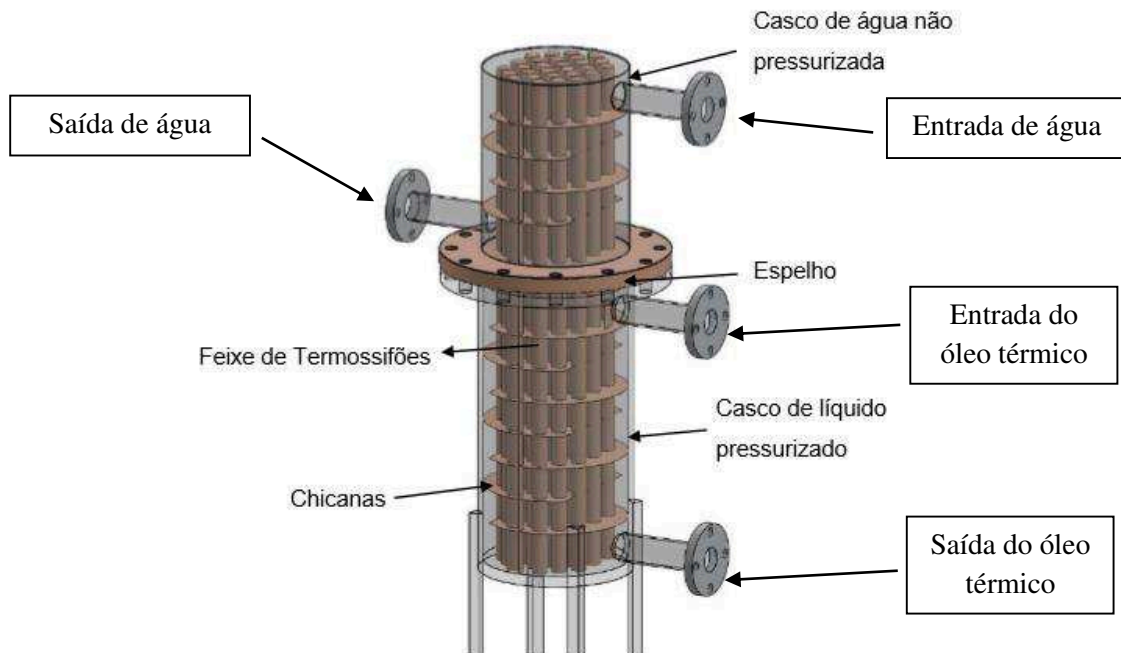
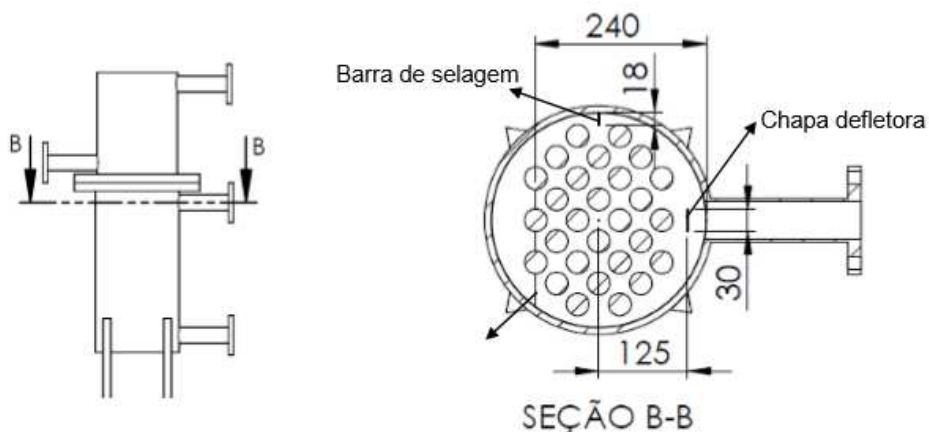


Figura 22: Esquema do arranjo de tubos do trocador líquido-líquido (LL)



3.2 VALIDAÇÃO DA BANCUN COM ÓLEO TÉRMICO LUBRAX UTILE OT 32

Utilizou-se o óleo térmico comercial LUBRAX UTILE OT 32, da PETROBRAS, que em sistemas fechados, apresenta bom desempenho a temperaturas de até 300°C, sem alteração de suas características físico-químicas, desde que observadas suas condições adequadas de aquecimento e circulação. Este óleo é de base parafínica e é indicado para operações envolvendo transferência de calor em sistemas circulatórios de aquecimento indireto (FOLHETO TÉCNICO PETROBRAS, 1999).

O objetivo dos testes de validação da BANCUN é avaliar o desempenho térmico, ou seja, a capacidade de transferência de calor, dos trocadores de calor tipo Casco-Termossifão e da bancada como um todo. Através de testes com diferentes vazões na bomba de circulação de óleo térmico e vários níveis de temperatura deste na saída do trocador GL, tornou-se possível obter diferentes medidas de temperatura de entrada e saída de cada corrente em cada trocador de calor. Com os dados de temperatura e vazão de cada corrente, bem como de suas propriedades físico-químicas, obtém-se a taxa de transferência de calor nesses dispositivos a partir do uso da equação do balanço de energia, apresentada na próxima seção.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, serão apresentados os resultados experimentais obtidos nos testes com óleo térmico, bem como análises e discussões convenientes para a validação da BANCUN.

4.1 RESULTADOS DOS TESTES DE VALIDAÇÃO DA BANCUN

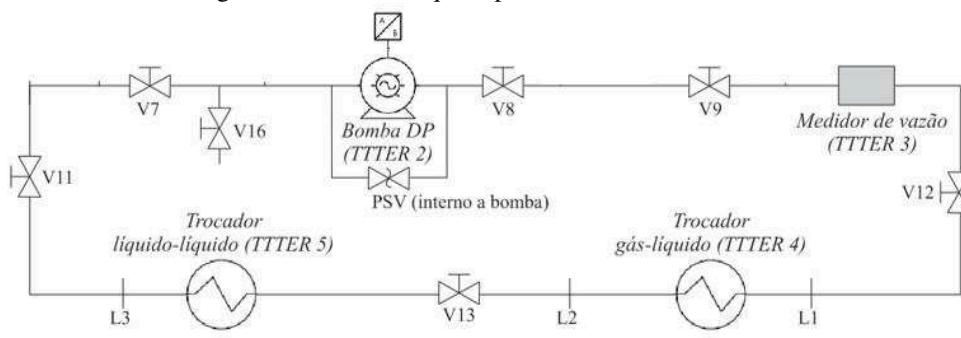
Os testes foram realizados em dois protótipos de trocadores de calor assistidos por termossifões bifásicos, integrantes da BANCUN. Neste trabalho, foram analisados e discutidos os testes com óleo térmico comercial LUBRAX UTILE OT 32, o qual possui propriedades mais conhecidas e controladas, quando comparadas ao petróleo. Sendo assim, a utilização do óleo previamente aos testes com petróleo, serve para verificar o grau de confiabilidade dos dados medidos, através da análise do balanço de energia no aparato experimental.

Como visto anteriormente, são três linhas de correntes utilizadas no experimento:

- Corrente de gases de exaustão, proveniente da combustão de GLP (gás liquefeito de petróleo) no queimador;
- Corrente de líquido pressurizado, que é o óleo térmico comercial;
- Corrente de água de resfriamento, proveniente da torre de arrefecimento do laboratório.

Um dos trocadores de calor é um trocador Casco-Duto, que vem a ser o gás-líquido (GL) descrito anteriormente. Ele foi instalado com o objetivo de transferir calor dos gases de combustão para o líquido pressurizado, nesse caso, o óleo térmico. O outro trocador de calor é o Casco-Casco, que é o trocador líquido-líquido (LL), também já apresentado neste trabalho. Este foi instalado para permitir a transferência de calor do óleo térmico para a água de resfriamento. Ambos dispositivos foram instalados em série e testados simultaneamente. A Figura 23 representa, de maneira mais simplificada que a Figura 15, o esquema da linha de líquido pressurizado da BANCUN.

Figura 23: Linha de líquido pressurizado da BANCUN



As condições de operação testadas referem-se a diferentes níveis de controle da corrente de óleo térmico, cujas variáveis de testes foram temperatura e vazão mássica, sendo dispostas da maneira que segue:

- Quatro níveis de temperatura do óleo térmico na saída do trocador GL: 65, 80, 100 e 120°C.
- Quatro níveis de vazão do óleo térmico, ajustada através da frequência do motor: 20, 40, 60 e 80Hz.

Essas variáveis foram combinadas entre si e resultaram nos valores apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Dados de temperatura do óleo e frequência na bomba.

ÓLEO TÉRMICO COMERCIAL

Identificação dos testes	Temperatura [°C] na saída do trocador GL	Frequência na bomba [Hz]
O65/80 – TESTE 1	64,0	80
O65/60 – TESTE 2	65,4	60
O65/40 – TESTE 3	68,2	40
O65/20 – TESTE 4	75,3	20
O80/80 – TESTE 5	82,0	80
O80/60 – TESTE 6	85,6	60
O80/40 – TESTE 7	90,1	40
O80/20 – TESTE 8	99,1	20
O100/80 – TESTE 9	99,3	80
O100/60 – TESTE 10	102,9	60
O100/40 – TESTE 11	108,3	40
O100/20 – TESTE 12	117,2	20
O120/80 – TESTE 13	123,6	80
O120/60 – TESTE 14	127,9	60
O120/40 – TESTE 15	133,5	40
O120/20 – TESTE 16	142,8	20

Não é possível setar um valor de temperatura para o óleo térmico de forma direta, portanto, foi possível aquece-lo indiretamente, a partir da variação da vazão de combustível no queimador, pois quanto mais combustível é inserido na combustão, maior a temperatura dos gases quentes que a deixam e, por consequência, maior a temperatura do óleo ao trocar calor com essa corrente ao passar pelo trocador GL. A identificação dos testes como “O65/80” significa que foi desejada para o óleo térmico uma temperatura de 65°C a uma vazão mássica

correspondente a 80 Hz na bomba. Como valores exatos dificilmente são obtidos em testes experimentais, quando chegava-se próximo da temperatura desejada, a válvula V_{comb} era fechada e seguia-se com os testes sob essas condições.

O grau de confiabilidade dos dados medidos pode ser verificado através da análise do balanço de energia no aparato experimental e nos dois trocadores de calor desenvolvidos. A seção a seguir irá apresentar esta análise.

4.2 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS TESTES DE VALIDAÇÃO DA BANCUN

As seções a seguir apresentarão a análise do balanço de energia, com o intuito de verificar a possibilidade de validação da BANCUN.

4.2.1 Balanço de energia

O módulo da taxa de transferência de calor q [W], representada pela Equação (1), proveniente de uma corrente quente ou para uma corrente fria, em um trocador de calor, pode ser calculada a partir da 1ª Lei da Termodinâmica.

$$q = \dot{m} c_p |T_{saída} - T_{ent}| \quad (1)$$

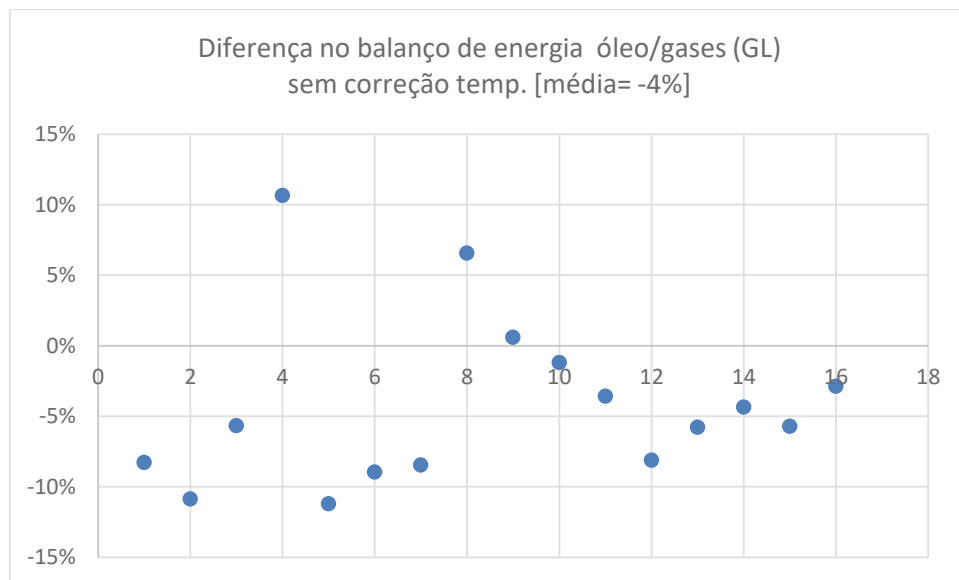
Segundo a 1ª Lei da Termodinâmica, em estado estacionário, a taxa de calor transferido (q) entre correntes em diferentes temperaturas se dá pelo produto entre o calor específico do fluido, c_p [J/kg.K], a vazão mássica do mesmo, \dot{m} [kg/s], e a diferença de temperatura de mistura nas tubulações de entrada e saída do trocador de calor, T_{ent} e $T_{saída}$ [°C], respectivamente. Nos testes realizados, essas temperaturas são medidas por sensores do tipo Pt100 inseridos no interior das tubulações de óleo, de gases quentes e de água.

Durante os testes, foram realizadas medições de vazão mássica e temperatura nas duas correntes, quente e fria, dos dois protótipos. Tendo posse desses dados e conhecimento da Equação (1), pode-se calcular:

- Calor retirado dos gases de combustão;
- Calor transferido ao óleo no trocador gás-líquido (GL);
- Calor retirado do óleo no trocador líquido-líquido (LL);
- Calor transferido à água no trocador líquido-líquido (LL).

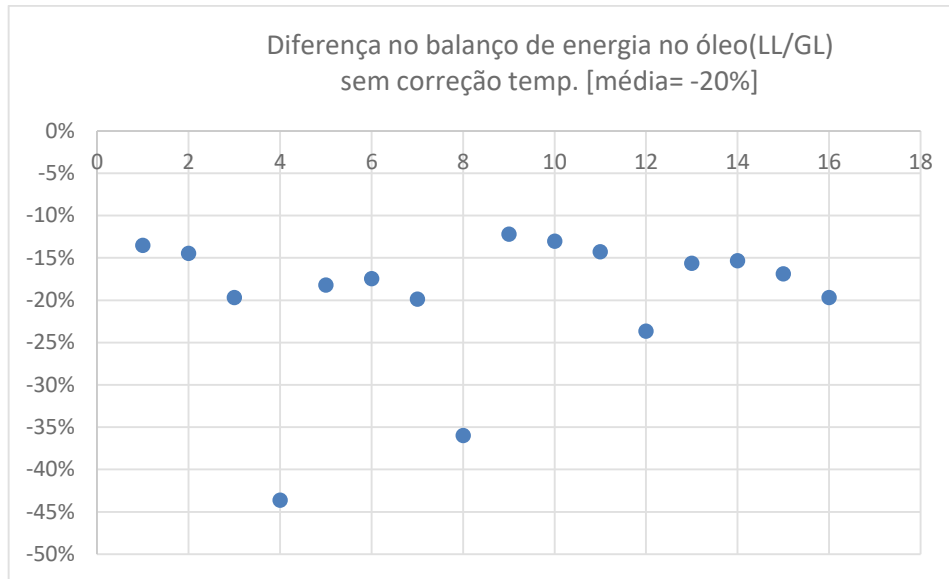
Pode-se observar nos gráficos das Figuras 24 e 25, os balanços de energia para os testes com óleo comercial, a partir dos dados retirados da Tabela 1. Cada ponto corresponde a um teste (de 1 a 16) e representa a perda percentual de calor. Na Figura 24, tem-se o balanço de energia no trocador gás-líquido (GL) e, como pode-se observar, alguns valores são positivos, o que sugere uma suposta “geração de calor”, ainda que pequena, neste trocador. Mesmo sendo poucos, esses dados tornam-se incoerentes, pois não faz sentido fisicamente que calor seja gerado, ou seja, que o calor absorvido pelo óleo seja maior que o cedido pelos gases quentes. O correto seria que, uma vez que existem perdas, o calor absorvido pelo óleo fosse menor que o cedido pelos gases quentes e a diferença, portanto, seria negativa.

Figura 24: Diferença percentual entre o calor absorvido pelo óleo e o calor cedido pelos gases quentes no trocador gás-líquido



A diferença entre o calor cedido pelo óleo no trocador LL e o absorvido pelo mesmo no GL, está apresentado no gráfico da Figura 25. Este gráfico mostra o balanço no escoamento de óleo nos dois trocadores citados e, pode-se observar que, em geral, há uma perda térmica na média de 20% com relação ao calor que havia sido absorvido. Este resultado também não corresponde à realidade, tendo em vista que as perdas térmicas na tubulação de líquido pressurizado que liga os dois trocadores de calor, foram estimadas como sendo bem menores que este valor.

Figura 25: Diferença percentual entre o calor cedido pelo óleo no trocador LL e o calor absorvido pelo mesmo no trocador GL



4.2.2 Análise da distribuição de temperaturas no trecho de ligação entre os trocadores de calor GL e LL

Como analisado na seção anterior, os valores positivos do balanço de energia que aparecem no gráfico da Figura 24 (nas trocas térmicas do trocador GL) indicam que há algo de errado com os dados experimentais. Apesar de os sensores terem sido calibrados, a maneira como ele foi posicionado e fixado na bancada pode ter feito com que a leitura não tivesse sido a realidade do que se desejava medir.

Analisou-se teoricamente a perda de calor em um curto trecho da tubulação de líquido pressurizado (apenas entre a saída do trocador GL e a entrada do LL), para se ter conhecimento do que poderia estar acontecendo. Nesse trecho, a temperatura média deveria cair menos de $0,03^{\circ}\text{C}$ entre as duas extremidades da linha de líquido pressurizado. Em outras palavras, a diferença de leituras dos sensores na saída do trocador GL e na entrada do trocador LL deveria ser menor que $0,03^{\circ}\text{C}$. Entretanto, os valores medidos pelos sensores foram muito maiores. A Tabela 2 apresenta estes valores para todos os testes efetuados. Pôde-se observar quedas de temperatura entre as extremidades da tubulação de até $3,7^{\circ}\text{C}$ em um dos testes realizados com o óleo comercial, o que é mais de uma centena de vezes maior que o esperado.

Tabela 2: Diferenças de temperaturas entre o sensor de entrada do trocador LL e o de saída do trocador GL

Teste (temperatura/frequência)	ΔT [°C]
Óleo 65/80 – TESTE 1	-0,3
Óleo 65/60 – TESTE 2	-0,4
Óleo 65/40 – TESTE 3	-0,9
Óleo 65/20 – TESTE 4	-3,7
Óleo 80/80 – TESTE 5	-0,3
Óleo 80/60 – TESTE 6	-0,3
Óleo 80/40 – TESTE 7	-0,5
Óleo 80/20 – TESTE 8	-2,9
Óleo 100/80 – TESTE 9	-0,5
Óleo 100/60 – TESTE 10	-0,6
Óleo 100/40 – TESTE 11	-0,8
Óleo 100/20 – TESTE 12	-1,8
Óleo 120/80 – TESTE 13	-0,4
Óleo 120/60 – TESTE 14	-0,5
Óleo 120/40 – TESTE 15	-0,8
Óleo 120/20 – TESTE 16	-1,4

Notou-se então que o sensor de temperatura do óleo na saída do trocador GL está fixado à parede da tubulação, que vem a ser conectada via flange ao casco cilíndrico do trocador GL, que por sua vez está aparafusado via flange ao duto de gases quentes. Como todo esse conjunto vem a ser de aço, cuja condutividade térmica é alta, cerca de 55 W/m.K, o calor proveniente do duto de gases quentes, que pode atingir mais de 500 °C, acaba por ser transferido facilmente à base de fixação do sensor, alterando assim o real valor de temperatura que deveria ser medido naquele ponto. Além disso, percebeu-se também, que as maiores quedas de temperaturas são encontradas na frequência mais baixa da bomba (20 Hz), o que faz sentido, pois com valores de vazões mais baixos, maior é o tempo de permanência do óleo em contato com o sensor na saída do trocador GL. Sendo assim, quanto maior o tempo de residência do óleo nesse ponto de medição, mais tempo há para calor proveniente dos gases quentes ser transferido por condução ao sensor. O ANEXO B mostra uma foto do sensor de temperatura do óleo.

Com base nesse pressuposto, concluiu-se que o sensor pudesse ter sido muito influenciado pela proximidade com o duto de escoamento dos gases quentes, efeito que não vem a acontecer no trocador LL, já que o outro fluido é a água a 30 °C. Em suma, enquanto o sensor próximo a água está sujeito a um gradiente de temperatura de 70 °C, o sensor próximo aos gases quentes enfrentava uma variação de temperatura de até 400 °C. Sendo assim, decidiu-se rejeitar as leituras do sensor de temperatura do óleo na saída do trocador GL e empregar em

seu lugar as leituras do sensor na entrada do trocador LL, para poder obter resultados mais confiáveis com relação ao balanço de energia.

4.2.3 Incerteza de medição dos sensores de temperatura e vazão

Antes da análise dos resultados dos balanços de energia corrigidos, é importante ressaltar que todos os sensores de temperatura e vazão utilizados para os testes, apesar de serem novos e teoricamente calibrados pelo fabricante, passaram por testes de calibração no LABTUCAL.

Na medição de temperaturas de entrada e saída, T_{ent} e $T_{saída}$, respectivamente, dos trocadores de calor de todas as correntes, foram empregados sensores do tipo Pt100, que têm incerteza determinada pelo fabricante de $\pm 0,2$ K. No cálculo da taxa de transferência de calor através da Equação 1, a menor diferença de temperaturas entre entrada e saída ocorreu com a água e é de, aproximadamente, 4 K, ou seja, 20 vezes maior que a incerteza de medições de temperaturas.

No cálculo das densidades e vazões utilizou-se os valores obtidos em suas calibrações, onde as incertezas dos instrumentos empregados são inferiores a 1%. Na estimativa dos calores específicos, empregou-se polinômios interpoladores dos valores fornecidos pela fabricante do óleo térmico comercial (LUBRAX UTILE OT 32) e da literatura para a água. As incertezas dos polinômios são de no máximo 2%.

Combinando todas as incertezas acima, tem-se a incerteza para o cálculo da taxa de transferência de calor de, no máximo, 14%.

4.2.4 Balanços de energia corrigidos

Os gráficos das Figuras 26 e 27 apresentam os mesmos dados que os das Figuras 24 e 25, respectivamente, porém, com a correção de temperatura proposta e justificada na seção anterior. Sendo assim, para a temperatura de saída do trocador GL adota-se a de entrada do trocador LL. Realizando esta modificação, pôde-se encontrar resultados muito mais condizentes com as leis da física, não observando mais a “geração de calor” que havia no trocador GL. Agora, notam-se também perdas de calor neste trocador, conforme mostram os valores negativos no gráfico da Figura 26, com média de 20%. No gráfico da Figura 27, a média aponta para um valor negativo de 10%, valor menor e mais condizente com a realidade de perdas de calor em uma tubulação do que o encontrado no gráfico da Figura 25.

Figura 26: Diferença percentual entre o calor absorvido pelo óleo e o calor cedido pelos gases quentes no trocador GL com correção de temperatura

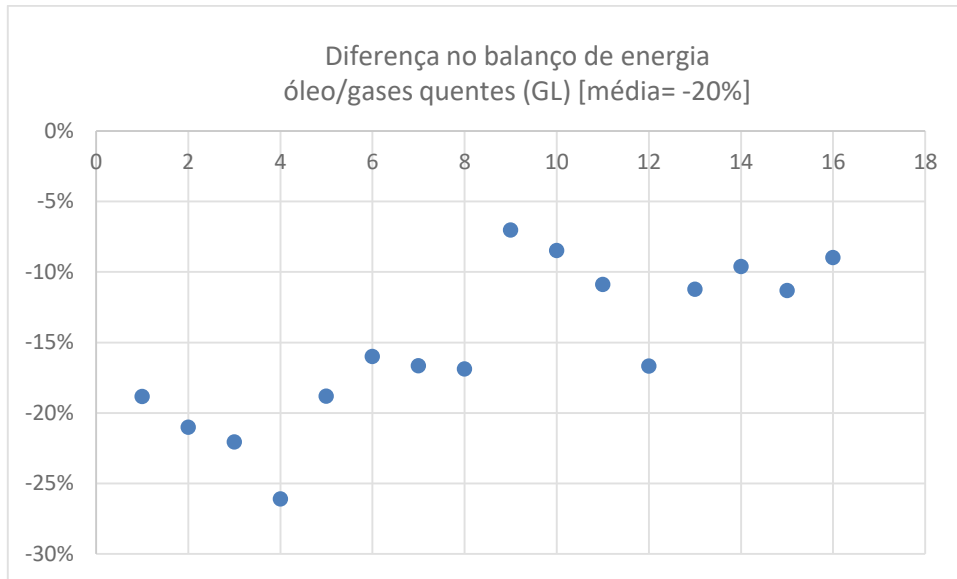
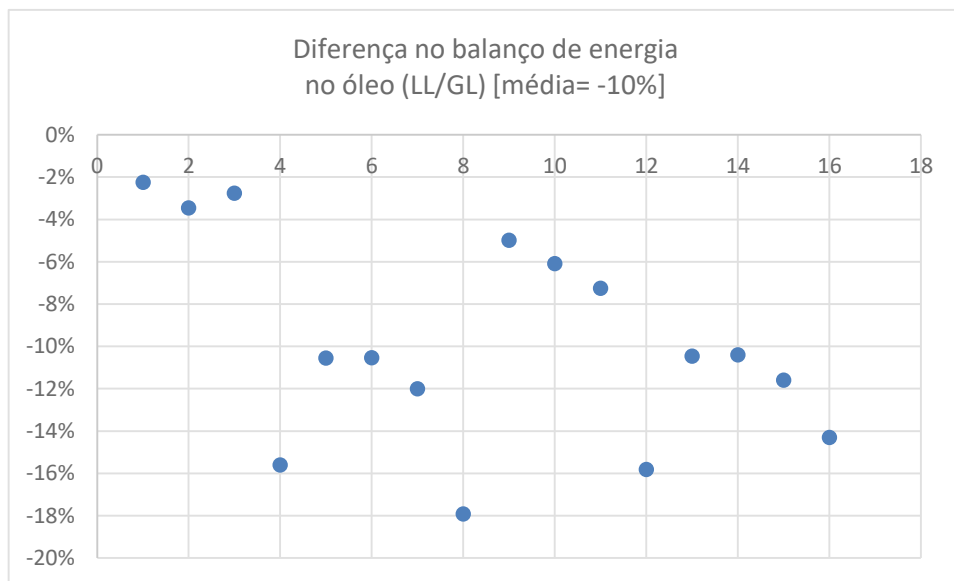
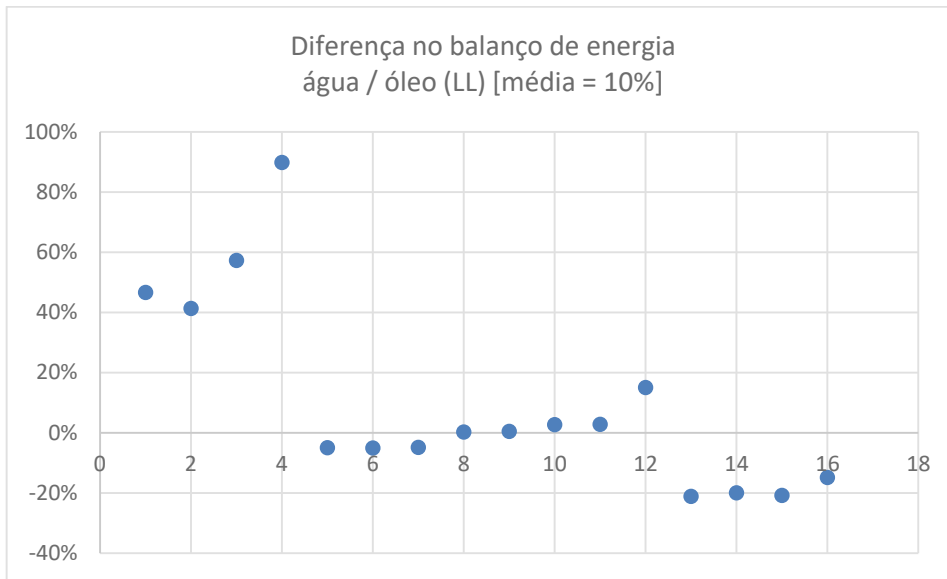


Figura 27: Diferença percentual entre o calor cedido pelo óleo no trocador LL e o calor absorvido pelo óleo no trocador GL com correção de temperatura



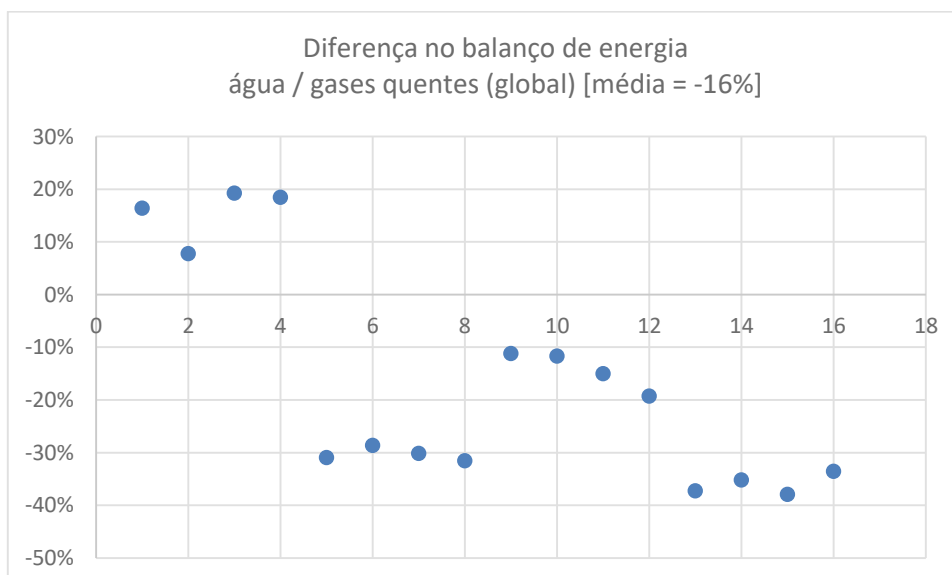
O gráfico da Figura 28 apresenta o balanço de energia no trocador LL, ou seja, a diferença entre o calor absorvido pela água e o cedido pelo óleo. Em média, a diferença é positiva em 10%, o que indica, novamente de maneira equivocada, uma pequena “geração de calor”. Entretanto, como analisado na seção que descreve a incerteza de medição dos sensores, deve-se considerar um erro experimental, ou incerteza, de medição da taxa de transferência de calor de, aproximadamente, 14%, podendo ser então justificado o resultado do balanço de energia deste gráfico.

Figura 28: Diferença percentual entre o calor absorvido pela água e o calor cedido pelo óleo no trocador LL



Tem-se no gráfico da Figura 29, o balanço de energia global da BANCUN, que vem a ser o resultado de maior interesse para este trabalho. Esse balanço indica a diferença entre o calor absorvido pela água e o cedido pelos gases quentes, não levando em consideração as medidas de temperatura do óleo. Pode-se observar que quase todos os pontos são negativos, indicando que existem perdas de calor em todos os testes. O valor médio de perdas foi de 16%, aumentando conforme aumenta a temperatura do óleo, o que faz sentido, tendo em vista que as perdas de calor são diretamente proporcionais à temperatura da superfícies da tubulação e dos trocadores de calor.

Figura 29: Diferença percentual entre o calor absorvido pela água e o calor cedido pelos gases quentes (balanço global) nos testes com óleo



Tendo em vista o tamanho e a complexidade da BANCUN, como dois trocadores de calor sendo testados simultaneamente, um valor médio de perda de calor de 16% é bastante satisfatório. No caso do trocador de calor líquido-líquido (LL), estimou-se que para as temperaturas mais altas testadas, estas perdas sejam da ordem de 500 W, enquanto que a taxa de transferência de calor é da ordem de 15 kW, o que corresponde a apenas 3% de perdas. Já as perdas no trocador GL são maiores, tendo sido estimadas em 5%, aproximadamente 750 W. A literatura informa que perdas na ordem de 5% são normais para trocadores de calor, tornando aceitáveis as perdas de calor nos protótipos dessa bancada. Levando em consideração que ainda existem perdas térmicas na tubulação, principalmente em componentes com pouco isolamento térmico como válvulas, sensores e flanges, um valor de perda global da ordem de 16% pode ser considerado aceitável.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, trocadores de calor com termosifões bifásicos foram testados na Bancada Universal de Testes de Trocadores de Calor (BANCUN) do Laboratório de Tubos de Calor da UFSC. Os testes foram realizados com o óleo térmico comercial LUBRAX UTILE OT 32, de modo que se pudesse validar a bancada com um fluido de propriedades físico-químicas conhecidas, para então introduzir um petróleo de interesse da PETROBRAS, financiadora do projeto.

Os resultados experimentais com o óleo térmico mostraram que a BANCUN está válida termicamente e portanto, apta a receber o petróleo e seguir com os testes planejados em projeto. A perda térmica global foi da ordem de 16%, o que vem a ser um resultado satisfatório, levando em consideração o erro experimental na taxa de transferência de calor, que é de, aproximadamente, 14%; o tamanho e a complexidade da BANCUN, por ter dois trocadores de calor sendo testados simultaneamente, e também a existência de perdas térmicas na tubulação, principalmente em componentes com pouco isolamento térmico como válvulas, sensores e flanges.

REFERÊNCIAS

CAJAMARCA, Andrés Paul Sarmiento. **Análise teórica de trocadores de calor casco – casco termossifões**. 2016. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

CISTERNA, Luis Hernán Rodríguez. **Análise de um secador de ervas finas assistido por termossifões**. 2014. 284 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

INCROPERA, Frank P. et al. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 2008. 643 p.

Informações técnicas – **LUBRAX UTILE OT**. Disponível em:

<<http://www.br.com.br/wcm/connect/c33704b4-60d5-4f58-9953-1f4f6d9b262b/ft-lub-ind-diversas-lubrux-utile-ot.pdf?MOD=AJPERES&CVID>>. Acesso em: 14 de outubro de 2017.

MANTELLI, M. B. H. **Notas de aula: Tubos de Calor e Termossifões**. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

PAIVA, Kleber Vieira de. **Comportamento térmico em gravidade e microgravidade de mini tubos de calor do tipo fios-placas**. 2007. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus pela força imensurável que me deu todos os dias durante esta graduação e pela audácia de fazer minha vida se encaminhar maravilhosamente por caminhos que jamais imaginei traçar.

Aos meus pais, que não mediram esforços para que eu pudesse estudar tranquilamente. Ao meu pai por me ensinar a ser reta e à minha mãe, que sempre será meu exemplo de força e perseverança.

À família 2013.1, que nunca me abandonou e sempre esteve disposta a ajudar uns aos outros. Foram os cinco anos mais fantásticos da minha vida, e foram com vocês!

Às minhas amigas de longa data Amanda, Marina e Moema, por me fazer sentir segura a cada novo passo, mesmo estando longe.

Aos amigos que a UFSC me trouxe Jeovane, Nathália, Paulo Cesar, Talita e Tâmilis, vocês foram muito importantes pra mim!

À todos os Professores do Campus UFSC Araranguá pela dedicação na profissão e pelo esforço de tornar o curso de Engenharia de Energia cinco estrelas. Muito obrigada a cada um de vocês e em especial ao meu orientador, Prof. Fernando Henrique Milanese, Dr. Eng., por tornar possível o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu namorado Marcelo pelo amor, carinho, dedicação e paciência. Tudo se tornou mais claro.

ANEXO A – TROCADOR DE CALOR TIPO CASCO-TERMOSSIFÃO

Trocador de calor tipo Casco-Termossifão utilizado na BANCUN.

ANEXO B – SENSOR DE TEMPERATURA Pt100

Sensor de temperatura Pt100 introduzido no óleo térmico comercial na saída do trocador gás-líquido (GL).