

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DÍMISSON ABREU LOUZADA
JOHANNES CORADINI GASPARINI

**ANÁLISE DA REDUÇÃO DA PERDA DE CARGA EM
ESCOAMENTO DE ÓLEOS PESADOS POR TERMO
ACUMULAÇÃO UTILIZANDO ENERGIA SOLAR –
PROJETO E CONSTRUÇÃO DO CONCENTRADOR
SOLAR**

VITÓRIA
2006

DÍMISSON ABREU LOUZADA
JOHANNES CORADINI GASPARINI

**ANÁLISE DA REDUÇÃO DA PERDA DE CARGA EM
ESCOAMENTO DE ÓLEOS PESADOS POR TERMO
ACUMULAÇÃO UTILIZANDO ENERGIA SOLAR –
PROJETO E CONSTRUÇÃO DO CONCENTRADOR SOLAR**

Projeto de Graduação apresentado ao
Departamento de Engenharia Mecânica da
Universidade Federal do Espírito Santo,
como requisito parcial para a obtenção do
Grau de Engenheiro Mecânico.
Orientador: Prof. Dr. Rogério Ramos

VITÓRIA
2006

DÍMISSON ABREU LOUZADA
JOHANNES CORADINI GASPARINI

**ANÁLISE DA REDUÇÃO DA PERDA DE CARGA EM
ESCOAMENTO DE ÓLEOS PESADOS POR TERMO
ACUMULAÇÃO UTILIZANDO ENERGIA SOLAR –
PROJETO E CONSTRUÇÃO DO CONCENTRADOR SOLAR**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Engenheiro Mecânico.

Aprovada em 20 de julho de 2006.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Rogério Ramos
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. Dr. Juan Sérgio Romero Saenz
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. João Luiz Marcon Donatelli
Universidade Federal do Espírito Santo

Agradecemos primeiramente a Deus, e as nossas namoradas
pela compreensão e nossos familiares pelo carinho
Ao nosso orientador, Prof. Dr. Rogério Ramos por todo
incentivo, paciência e dedicação
A FAPES pelo apoio financeiro através do processo 31180280/05,
com termo de outorga 0031/05
A José Augusto, funcionário da marcenaria do
centro tecnológico da UFES
Ao Departamento de Engenharia Mecânica pelo apoio
A Petrobras pelo incentivo e futuro apoio financeiro
Ao Mestrando do curso de Pós Graduação em Engenharia
Mecânica Vitor Luiz Rigoti dos Anjos pelo apoio técnico

RESUMO

Neste trabalho será apresentado o projeto detalhado de um concentrador solar parabólico, bem como os sistemas relacionados a este.

Também serão abordados os testes de operação do concentrado solar operando em circuito aberto e fechado, bem como os testes relativos aos dispositivos projetados e construídos com o objetivo de intensificar a troca de calor visando desta forma aumentar a eficiência de absorção de energia do concentrador solar.

E tendo em vista a localização privilegiada do Estado do Espírito Santo, fato este que proporciona taxas de irradiação elevadas, justifica-se pesquisas relacionadas a aplicação de energia solar.

Este projeto é parte integrante de um projeto principal financiado pela Fundação de Apoio à Ciência e Tecnologia do Espírito Santo (FAPES), o qual tem como objetivo estudar a aplicação de energia solar no processo de transporte de óleos pesados, uma vez que o norte do estado possui grandes reservas deste tipo de óleo e as dificuldades encontradas tanto na sua exploração como no seu transporte.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Taxa de irradiação para diversas regiões do globo	1
Figura 2	- Visão esquemática do equipamento termo-acumulador	6
	- (a) Sistema casco-tubo; (b) Fração do sistema utilizada na	
Figura 3	análise experimental e numérica segundo modelagem de Trp (2005)	9
Figura 4	- Concentrador esférico	11
Figura 5	- Concentrador parabólico cilíndrico	12
Figura 6	- Concentrador solar articulado em dois eixos	12
Figura 7	- Princípio de funcionamento do concentrador parabólico	13
Figura 8	- Dados geométricos do perfil parabólico	14
Figura 9	- Molde do perfil parabólico	15
Figura 10	- Placas laterais confeccionadas com auxilio do molde	16
Figura 11	- Vista da estrutura de madeira	16
Figura 12	- Estrutura com cantoneiras de alumínio	17
Figura 13	- Acomodamento da superfície refletora sobre o berço	17
Figura 14	- Fixação do tubo focal através de cantoneiras de alumínio	18
Figura 15	- Vista do concentrador solar montado	19
Figura 16	- Vista do concentrador solar montado	19
Figura 17	- Vista da base móvel	20
Figura 18	- Concentrador solar em teste, já instalado sobre a base móvel	20
Figura 19	- Relação entre a área projetada do tubo focal e a área de abertura do concentrador	21
Figura 20	- Ângulo de aceitação	22
Figura 21	- Perdas ao final do concentrador solar	23
Figura 22	- Detalhes de cálculo das perdas ao final do concentrador solar	23
Figura 23	- Tubo focal iluminado.....	26
Figura 24	- Teste do tubo focal envolto em um tubo de vidro	27
Figura 25	- Teste do concentrador solar operando em circuito fechado	28

Figura 26	- Teste do concentrador solar operando em circuito fechado	28
Figura 27	- Experimento para seleção do acabamento superficial do tubo coletor focal	29
Figura 28	- Ponteiro solar	30
Figura 29	- Transferidor	31
Figura 30	- Estação meteorológica	31
Figura 31	- Heliógrafo	32
Figura 32	- Detalhe da esfera de vidro do heliógrafo	32
Figura 33	- Rotâmetro	33
Figura 34	- Rotâmetro com as conexões para as mangueiras	33
Figura 35	- Desenho esquemático do circuito aberto	34
Figura 36	- Bancada de ensaios do circuito aberto	35
Figura 37	- Tubo focal recoberto com tinta preta fosca	38
Figura 38	- Arame utilizado para aumentar a troca de calor	38
Figura 39	- Arame inserido no interior do tubo focal	39
Figura 40	- Vista do tubo de cobre inserido no tubo de vidro	40
Figura 41	- Desenho esquemático.....	40
Figura 42	- Anel de nylon instalado no tubo de cobre	41
Figura 43	- Gráfico de comparação entre as técnicas de intensificação da transferência de calor.....	41
Figura 44	- Conexão utilizada inicialmente nas extremidades do tubo focal	43
Figura 45	- Sifão instalado na extremidade do tubo focal.....	43
Figura 46	- Mangueira de borracha recoberta com isolamento térmico.....	44
Figura 47	- Vista da mangueira com isolamento e sem isolamento.....	45
Figura 48	- Sistema aberto operando com mangueira isolada.....	45
Figura 49	- Desenho esquemático do circuito fechado.....	46
Figura 50	- Bancada de ensaios do circuito fechado.....	47
Figura 51	- Gráficos do resultado do teste do concentrador operando em circuito fechado.....	48
Figura 52	- Gráfico da eficiência média de absorção de calor.....	49
Figura 53	- Gráfico do aproveitamento de energia para o tubo de cobre sem	

	arame interno / isolamento.....	50
Figura 54	Gráfico do aproveitamento de energia para o tubo de cobre com arame interno / sem isolamento.....	50
Figura 55	- Gráfico do aproveitamento de energia para o tubo de cobre com arame interno / isolamento com tubo de vidro.....	51
Figura 56	- Gráfico de comparação da variação da radiação direta para os três dias de teste.....	52
Figura 57	- Gráfico de comparação da variação da radiação difusa para os três dias de teste.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Principais características do projeto do concentrador solar projetado	25
------------	-----------------------------------------------------------------------	----

LISTA DE SIGLAS

ITESO - Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente

FAPES - Fundação de Apoio à Ciência e Tecnologia do Espírito Santo.

FUNCITEC - Fundo Estadual de Ciência e Tecnologia

Petrobras – Petróleo Brasileiro S/A

UFES - Universidade Federal do Espírito Santo

UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. OBJETIVO GLOBAL	3
2.2. OBJETIVO ESPECÍFICO	3
3. MOTIVAÇÃO	4
4. DESCRIÇÃO	5
5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
6. PROJETO DO CONCENTRADOR SOLAR	11
6.1. PARÂMETROS QUALIFICADORES DO CONCENTRADOR SOLAR	21
6.2. PERDAS ÓPTICAS RELACIONADAS AO PROJETO	23
6.3. PRINCIPAIS DADOS DO PROJETO	25
7. PROJETOS E CRONOGRAMAS DOS EXPERIMENTOS PARA AVALIAÇÃO E MELHORIA DO DESEMPENHO	26
8. ANÁLISE DO ACABAMENTO SUPERFICIAL DO TUBO FOCAL	29
9. INSTRUMENTAÇÃO	30
10. SISTEMAS DE CIRCULAÇÃO	34
10.1. CIRCUITO ABERTO	34
10.1.1. Análise do ΔT MÁX do Circuito Aberto	36
10.1.2. Testes do Tubo Focal	37
10.1.2.1. Teste do Tubo Focal sem Arame Interior	37
10.1.2.2. Teste do Tubo Focal com Arame Interior	38
10.1.2.3. Tubo Focal com Arame Interior Envolto em Tubo de Vidro	39
10.1.2.4. Comparação de desempenho	41
10.1.3. Análise da Influência de Sifão nas Extremidades do Tubo Focal	42
10.1.4. Análise da Influência do Isolamento da Mangueira de Água Quente ...	44
10.2. CIRCUITO FECHADO	46
10.2.1. Teste do concentrador operando em circuito fechado	48
11. RESULTADOS E DISCUSSÃO	49

12. TRABALHOS FUTUROS	54
13. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	55
14. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
ANEXOS	
Anexo A - Medidas do perfil parabólico.....	59
Anexo B - Projeto dos principais componentes do concentrador solar.....	62
Anexo C - Projeto da base móvel do concentrador solar.....	68
Anexo D - Processo de aferição dos termopares.....	74
Anexo E - Especificação das mangueiras.....	77
Anexo F – Avaliação do raio critico das mangueiras.....	79
Anexo G - Especificações do isolamento térmico	88
Anexo H - Processo de calibração do rotâmetro	90
Anexo I - Variação da temperatura superficial com o tempo para os três tipos de superfícies	92
Anexo J - Projeto dos anéis de nylon.....	94
Anexo L - Projeto da base móvel do circuito fechado.....	96

1. INTRODUÇÃO

A crescente escassez de recursos naturais como o petróleo e o carvão, vem proporcionando o desenvolvimento de novas fontes de energia, com ênfase às renováveis e não poluentes.

Nesta categoria está incluída a energia solar, que é uma das formas de energia mais limpa e abundante na natureza, mas sua utilização em termos industriais ainda é muito restrita, mas sua utilização vem crescendo cada vez mais em aplicações residenciais.

As atuais aplicações podem ser divididas em dois grandes grupos, aquelas que convertem a energia solar diretamente em energia elétrica, através de células fotoelétricas, e aquelas que convertem a energia solar em energia térmica, seja gerando vapor para acionar uma turbina ou o aquecimento de água para usos residenciais, sendo esta a aplicação mais usual.

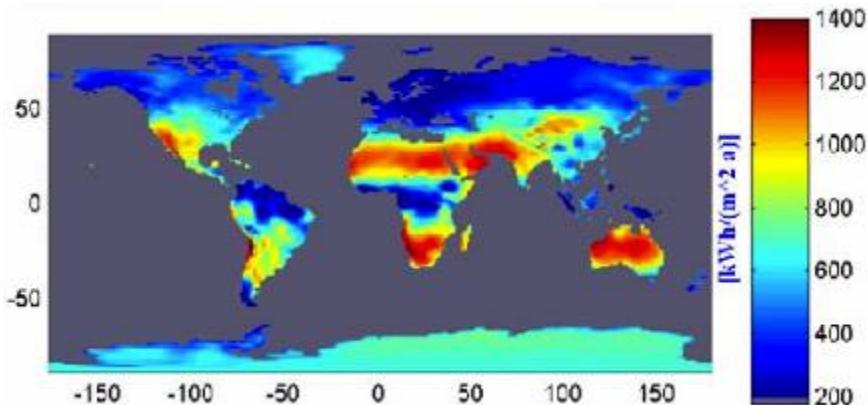


Figura 1 – Taxa de irradiação para diversas regiões do globo

Apesar de ser o Brasil um país intertropical, a média de irradiação em seu território varia de 400 a aproximadamente 700 W/m², em contraste com outros países situados em latitudes próximas como, por exemplo, a Austrália, que possui taxas de irradiação em torno de 1300 W/m², estas elevadas taxas podem ser explicadas pelo clima local, pois climas secos propiciam maiores taxas de irradiação. A Figura 1 mostra os níveis de irradiação solar para as diversas regiões do globo.

Em determinadas regiões do Brasil onde há predominância anual de dias de sol limpo, como é o caso do norte do Estado do Espírito Santo e dos Estados da região nordeste, regiões nas quais também se verifica abundância de recursos naturais como o Petróleo e Gás.

Devido a isso a utilização de energia solar nos processos de exploração e transporte de derivados de petróleo, pode ser uma forma de desenvolver tecnologias capazes de permitir sua aplicação em atividades industriais.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo deste projeto, financiado pela Fundação de Apoio a Ciência e Tecnologia do Espírito Santo (FAPES) e apoiado pela Petrobras, juntamente com o departamento de Engenharia Mecânica, é propor uma metodologia básica visando o desenvolvimento de um equipamento termo-acumulador que tem como meta reduzir a viscosidade de óleos pesados, com consequente redução da perda de carga distribuída durante o escoamento no interior de oleodutos terrestres (on-shore), utilizando a energia solar como fonte de calor e a fusão de parafina como meio de termo-acumulação.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Este projeto de graduação representa uma parte importante do projeto de concentração solar com termo-acumulação como um todo e tem por objetivo projetar, construir e avaliar o desempenho de um concentrador solar parabólico linear, bem como os sistemas de circulação de fluido, isolamentos térmicos necessários e demais dispositivos responsáveis pela intensificação de trocas de calor e aumento de desempenho do mesmo.

3. MOTIVAÇÃO

A necessidade de transportar petróleo das áreas produtoras até os setores de armazenagem e posterior refino, associada ao crescimento da produção nacional torna imperativa a otimização da operação de oleodutos, visando a redução dos custos tanto da operação propriamente dita, quanto da manutenção.

Considerando ainda a característica do Brasil de possuir grandes reservas de óleos pesados e extra-pesados, no Espírito Santo, por exemplo, em São Mateus, e na região Nordeste, essa otimização torna-se ainda mais importante, tendo em vista a enorme quantidade de energia demandada para o bombeamento bem como as elevadas taxas de desgaste da tubulação.

Por outro lado, a reconhecida irradiação a qual o país é submetido, graças às suas latitudes tropicais, apontam para o desenvolvimento de projetos que utilizam a energia solar de uma forma racional, assim, o intuito deste projeto é desenvolver uma nova tecnologia de redução do consumo energético de bombeamento de óleos pesados com aproveitamento de energia solar, a qual é abundante e, segundo Cometta (2004), atinge valores da ordem de até 700 W/m² no território brasileiro.

Vale também destacar como forte incentivo a oportunidade proporcionada pelo apoio financeiro da FAPES e da Petrobras, aliada a atual escassez de fontes de geração de energia, os problemas ambientais e a busca mundial por novas fontes de energia, fato este que tende a atrair investimentos em pesquisa por parte de grandes empresas, o que pode trazer benefícios a longo prazo para Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), em especial para o Departamento de Engenharia Mecânica.

4. DESCRIÇÃO

Neste capítulo será apresentada uma breve descrição do projeto, descrevendo a modelagem física do sistema, juntamente com suas respectivas hipóteses e considerações pertinentes.

O equipamento pode ser dividido em três partes: concentrador solar, sistemas de serpentinas e recipiente de armazenamento do material de mudança de fase (Figura 2).

As serpentinas serão as responsáveis por transferir a energia térmica captada pelo concentrador solar para o interior do recipiente de armazenamento de parafina, sendo estas construídas em material com boa condutividade térmica, isolada termicamente no percurso entre o concentrador e o recipiente de parafina. No interior do recipiente com parafina serão dispostas de forma a aumentar a troca térmica e fundir totalmente a parafina, a forma de espiral em torno da porção da tubulação que se encontra em contato com a parafina será adotada a princípio. Nestas serpentinas o fluido de trabalho de calor será água.

O recipiente terá, inicialmente, seção retangular com estrutura bipartida verticalmente com uma abertura em cada uma de suas extremidades de diâmetro igual ao diâmetro externo da tubulação a qual será acoplado, como um anel. Suas paredes serão metálicas e isoladas termicamente do meio exterior. O interior deste recipiente será totalmente ocupado com parafina 170/190°F, produto fabricado pela Petrobras.

A Figura 2 mostra esquematicamente o equipamento termo-acumulador em análise. Um dos pontos a ser estudado é a utilização do calor armazenado através de simulação numérica, cujas principais hipóteses são:

- Escoamento completamente desenvolvido;
- Temperatura superficial constante da tubulação de óleo e
- Todas as paredes do recipiente armazenador são adiabáticas.

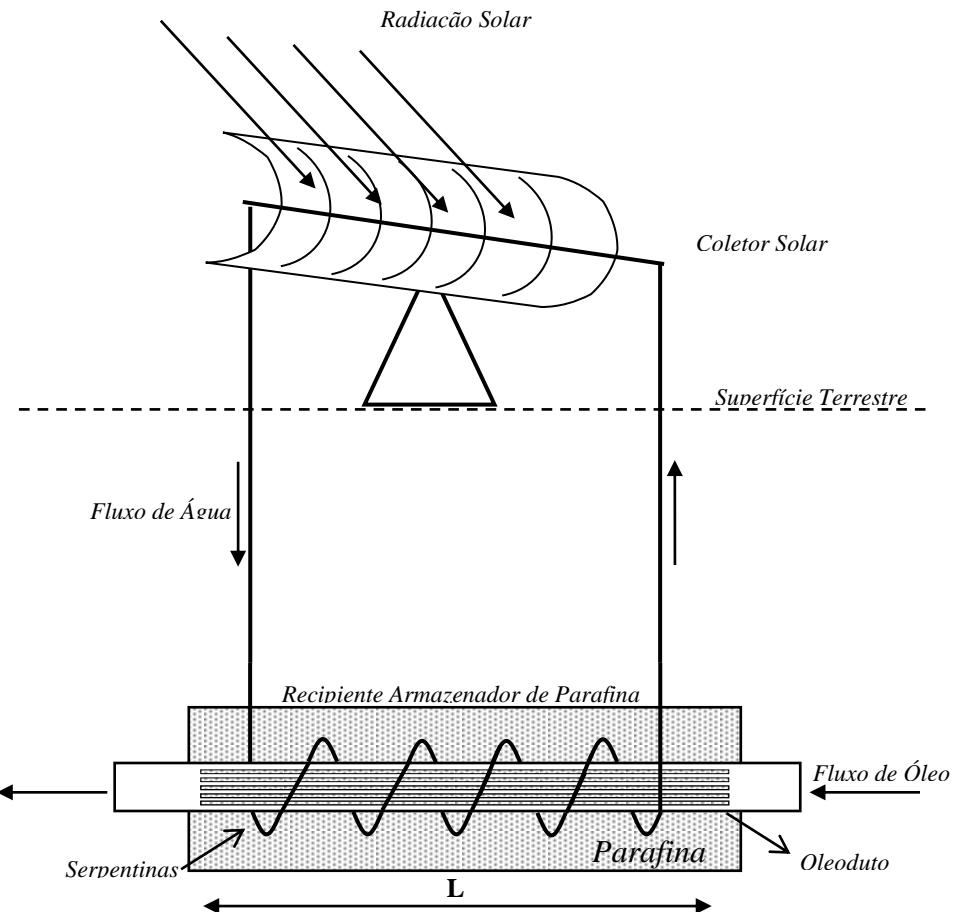


Figura 2 – Visão esquemática do equipamento termo-acumulador

A energia radiante oriunda dos raios solares será captada pelos painéis do concentrador solar, aquecendo as paredes das serpentinhas, fazendo com que estas conduzam calor até sua parte interior onde circula água, e esta por sua vez, armazenará energia térmica na forma de calor sensível. Vale, neste ponto, informar que um coletor solar comum tem capacidade de aquecer água até aproximadamente 87°C em dias de grande insolação, temperatura esta superior a temperatura de fusão da parafina 170/190°F (82,4 °C). Pelo processo de circulação forçada, com uma bomba de baixa potência, a água será conduzida para a parte das serpentinhas que se encontra imersa no recipiente armazenador de parafina, onde cederá o calor absorvido para a parafina que se encontra de imediato no estado sólido, a qual entrará lentamente em fusão à medida que armazena energia com conseqüente aumento de temperatura. A

parafina que estará em contato direto com a parede externa de um determinado trecho da tubulação do oleoduto transferirá o calor absorvido para esta superfície, que imediatamente conduzirá esta energia até sua superfície interna por onde escoa o óleo, ocasionando num gradiente de temperatura entre a superfície interna da tubulação e o óleo, ocorrendo então a troca térmica e o aumento da temperatura do óleo.

Deve-se observar que, graças à mudança de fase da parafina e o consequente acúmulo de energia na forma de calor latente de fusão/solidificação, o projeto pode prever que o aquecimento por termo-acumulação seja realizado até durante o período noturno quando, então, seriam utilizadas essas parcelas de calor latente acumuladas para o aquecimento do oleoduto e consequente redução da viscosidade.

5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De forma a entender melhor os fenômenos físicos que regem os processos de troca de calor, mudança de fase e escoamento interno dos fluidos, bem como suas propriedades físicas, foram consultados artigos e obras de pesquisadores de renome na área de estudo. Dentre aqueles de maior contribuição para o projeto cita-se, por exemplo, o trabalho desenvolvido por Su e Estefen (2005), que propõem o aquecimento elétrico de oleodutos submarinos compostos de multicamadas utilizados no transporte de óleos pesados, com a finalidade de avaliar a queda de pressão entre o poço e o separador, e potência requerida pelo processo. Com a aplicação deste método conseguiu-se uma significante redução da queda de pressão, com consequente redução da potência de bombeamento, foram obtidas reduções de potência de 10 a 31,1%.

Um ponto fundamental do trabalho desenvolvido por Su e Estefen (2005) é a expressão indicada para a viscosidade de um óleo pesado típico (⁰API = 18) em função da temperatura, conforme a equação 1, válida para o intervalo de temperatura entre 20 a 100 ⁰C.

$$\mu_0 = 7094.54e^{-0.05878T} \quad (1)$$

onde, μ_0 e T são respectivamente a viscosidade e a temperatura do óleo e que será utilizada como referência no presente trabalho.

A variação da viscosidade deste tipo de óleo com a temperatura pode vir a ser de grande valia em desenvolvimentos futuros em aplicações numéricas, visando simular o processo de troca de calor no qual o óleo seja o fluido de trabalho.

Outro trabalho com informações representativas para o projeto como um todo, é o trabalho proposto por Trp (2005), no qual ele modela o processo de fusão e a solidificação da parafina em um trocador de calor do tipo casco-tubo, conforme mostrado na Figura 3(a).

A análise numérica e experimental foi executada em uma fração do sistema, conforme mostrado na Figura 3(b), que consiste de um tubo cercado pelo material, este conjunto possui raio limitado até o ponto onde condições aproximadamente adiabáticas sejam verificadas.

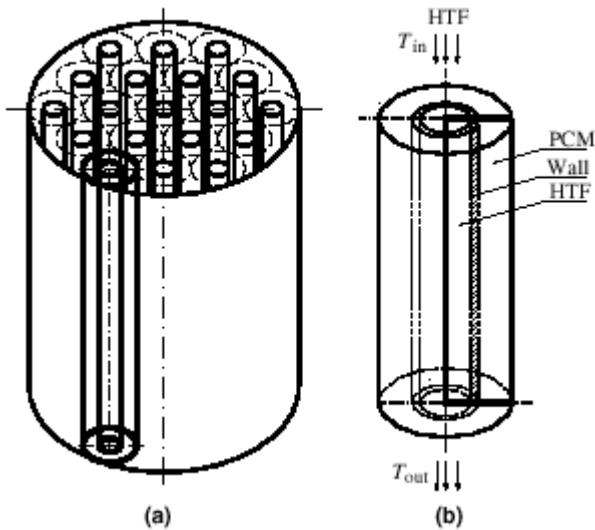


Figura 3 – (a) Sistema casco-tubo; (b) Fração do sistema utilizada na análise experimental e numérica segundo modelagem de Trp(2005)

Além da modelagem adimensional dos fenômenos de solidificação e fusão da parafina, também é avaliada a troca de calor com o Número de Prandtl. Ao final do trabalho de Trp (2005), concluiu-se que a fusão da parafina não se processa de forma isotérmica, enquanto que na solidificação o processo ocorre isotermicamente.

A modelagem proposta por Trp (2005) talvez possa vir a ser aplicada em análises e simulações posteriores do processo de termoacumulação.

O trabalho desenvolvido por Wang, Ruzhu e Wu (2004), no qual investigou-se experimentalmente trocadores de calor para aquecimento de óleo cru usando energia solar, veio a fortalecer a idéia do projeto global, tendo em vista os resultados obtidos. No referido trabalho conseguiu-se elevações de temperatura do óleo de 25º a 30ºC, utilizando como fonte de calor coletores solares planos, que normalmente fornecem

temperaturas de operação inferiores aquelas obtidas por concentradores solares parabólicos.

Na concepção, projeto e montagem do concentrador solar e sistemas correlacionados, foram de crucial importância as notas sobre o curso de energia solar do Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente (ITESO) de 1995 e o trabalho de Pérez (2005).

As notas sobre o curso de energia solar do ITESO (1995), fornecem informações detalhadas sobre os fenômenos envolvidos com sistemas de aproveitamento de energia solar bem como os tipos e suas respectivas aplicações.

Já o trabalho de Pérez (2005) traz informações e detalhes técnicos dos concentradores solar, como, por exemplo, métodos que visam aumentar a captação de calor.

Como fonte de embasamento teórico sobre o assunto de energia solar, foi utilizado como referencia o livro “Energia Solar e Fontes Alternativas”, de Palz (1981), e o livro “Fontes de Energia”, de Acioli (1994).

Já o livro “Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa”, de Incropera e Dewitt (1996) traz o embasamento de todos os conceitos, abordagens e correlações referentes à transferência de calor.

Dentre as principais relações utilizadas no dimensionamento do concentrador solar, em especial aquelas utilizadas para analisar o escoamento interno do fluido de trabalho no interior do tubo focal, bem como o processo transferência de calor por condução e radiação.

Durante o decorrer deste trabalho à medida que se fizerem necessários, serão apresentados os conceitos e relações mencionados.

6. PROJETO DO CONCENTRADOR SOLAR

Os tipos de concentradores podem ser classificados de acordo com tópicos diferentes. Uma classificação leva em consideração se o concentrador solar é refletor ou refrator. O primeiro usa uma superfície refletora para concentrar a radiação solar, enquanto o segundo faz isto por meio de superfícies apropriadas que fazem a refração da luz solar.

Também pode obter uma classificação que considera o local onde se concentra a luz refletida ou refratada no concentrador solar. O concentradores cilíndricos ou lineares, concentram em uma linha, enquanto os de revolução ou circular, concentram em um ponto.

Finalmente, pode-se fazer uma classificação relativa ao tipo de seção que apresenta o concentrador. Os mais comuns são de seção parabólica, seção esférica e de seção plana.



Figura 4 – Concentrador esférico



Figura 5 – Concentrador parabólico cilíndrico

Também existe uma grande variedade de receptores. O receptor é a parte onde a energia solar se transforma em calor. Os tipos de receptores podem ser côncavos, convexos, planos, hemisféricos, cilíndrico, elíptico e concavidades. Cada um destes pode ser linear ou pontual.

Foram desenvolvidos muitos mecanismos de movimentação, dependendo do tipo de coletor. Em geral pode-se falar de mecanismos com um ou dois eixos de movimento. Os concentradores cilíndricos normalmente usam só um eixo de movimento e podem chegar a operar até mesmo fixo. Os circulares precisam de dois eixos de movimento para poder se posicionar da melhor forma possível em relação ao sol.



Figura 6 – Concentrador solar articulado em dois eixos

Existem também mecanismos automáticos e mecanismos manuais. Os primeiros são utilizados para fazer o posicionamento contínuo do concentrador em relação ao sol, já o segundo quando se tem que fazer ajustes diários, semanais e mensais.

O tipo de concentrador solar projetado é do tipo linear, de seção parabólica, cilíndrico e articulado em apenas um eixo, o que lhe proporciona a liberdade de girar em até 45º de leste para oeste. Seu princípio de funcionamento baseia-se no princípio de que todos os raios incidentes sobre a superfície do espelho são paralelos ao eixo central e devem ser refletidos para o foco da parábola, conforme mostrado na Figura 7.

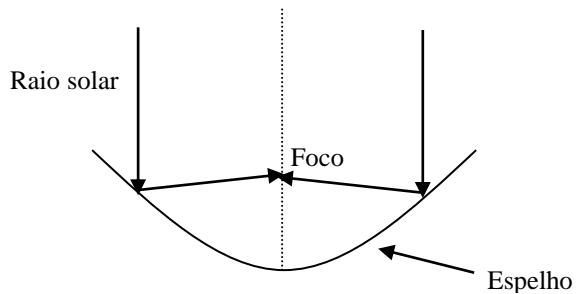


Figura 7 – Princípio de funcionamento do concentrador parabólico

Este tipo de concentrador solar foi escolhido por atingir temperaturas da ordem de 300ºC em detrimento, por exemplo, de coletores planos convencionais que normalmente atingem temperaturas da ordem de 80ºC. Também foi levada em consideração a relativa facilidade de fabricação deste.

Devido a limitações de peso e transporte da estrutura do concentrador, as dimensões deste foram limitadas, ou seja, pré-estabelecidas, a um comprimento de 2 metros e uma largura de 1 metro, representada na Figura 8 por w . De posse destas dimensões, o próximo passo foi encontrar a equação de uma parábola na qual o tubo focal estivesse contido no interior da parábola, devido a intenção inicial de instalar uma tampa de vidro sobre o concentrador solar da mesma largura da w e o mesmo comprimento do mesmo com o objetivo de reduzir possíveis perdas de calor por convecção e gerar um possível efeito estufa.

Após iterações utilizando um programa de engenharia, foi obtido um foco ideal F , mostrado na Figura 8, de 0,20 metros, e de posse desse valor foi possível então determinar a equação da parábola, conforme mostra a equação 2.

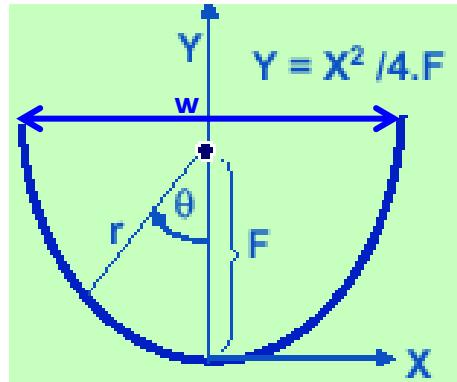


Figura 8 – Dados geométricos do perfil parabólico

Uma vez conhecida a equação do perfil parabólico foi possível então calcular o comprimento do perfil parabólico, conforme mostram as equações 3, 4 e 5, com o objetivo de calcular a área refletiva do espelho, podendo assim determinar a máxima energia captada pelo espelho.

$$y = \frac{x^2}{4F} \quad (2)$$

Dado que para uma parábola, o comprimento do arco é dado pela equação 3:

$$dL^2 = dx^2 + dy^2 \quad (3)$$

e integrando de 0 a 0.5:

$$L = 2 \int_0^{0.5} \sqrt{1 + \frac{x^2}{4F^2}} dx \quad (4)$$

obtém-se:

$$L = 2 \left(\frac{x}{2} \sqrt{1 + \frac{x^2}{4F^2}} + \frac{2F^2 \sqrt{1 + \frac{x^2}{4F^2}} \ln \left(x + \sqrt{4F^2 + x^2} \right)}{\sqrt{4F^2 + x^2}} \right)_0^{0.5} \quad (5)$$

Logo foi obtido um comprimento L de aproximadamente 1,21 metros, então a área do espelho encontrada foi de 2,42 m², conforme a equação 6.

$$A_{espelho} = 2L \quad (6)$$

De posse destes dados, foi possível confeccionar um molde do perfil parabólico em uma fina placa de compensado, conforme mostrado na Figura 9 cujas medidas são mostradas no Anexo A. Este molde tem por finalidade facilitar o processo de corte das placas laterais da estrutura, as quais podem ser vistas nas Figuras 10 e 11.

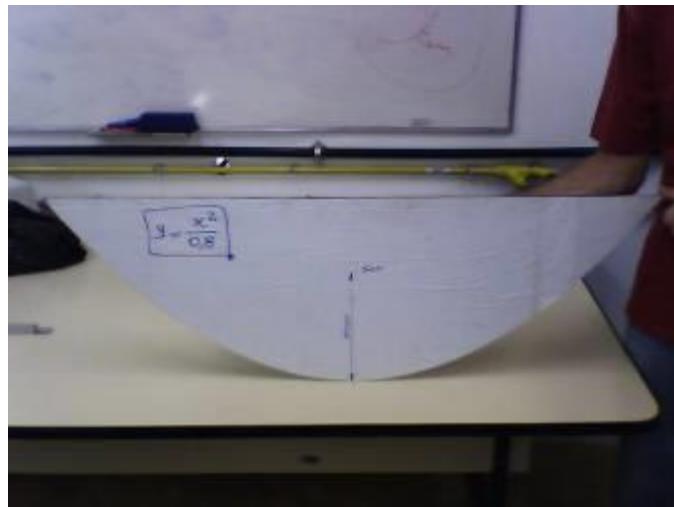


Figura 9 – Molde do perfil parabólico

Optou-se por construir a estrutura do concentrador solar em madeira, devido a maior facilidade de fabricação e menor custo quando comparada com aço e outros materiais. O Anexo B, traz o projeto detalhado dos principais componentes do concentrador solar.

Posteriormente chegou-se a conclusão de que apesar da facilidade de fabricação da estrutura e do menor custo, as tolerâncias dimensionais do processo de corte da madeira, principalmente durante o processo de acabamento, acarretam desvios no perfil parabólico, o que pode afetar drasticamente a eficiência do equipamento.



Figura 10 – Placas laterais confeccionadas com auxilio do molde.



Figura 11 - Vista da estrutura de madeira.

Como superfície refletora optou-se, após pesquisa no mercado, por se utilizar uma chapa de aço inox espelhada de dimensões 2000 x 1200 x 0,6 mm, pois a mesma possui boa refletividade (embora não tenha sido obtido um valor para essa propriedade), facilidade de conformação, baixo peso, além de resistência a corrosão.

Apesar disso foram necessários pequenos ajustes para manter a mesma no perfil desejado, ou o mais próximo deste, dentre os quais pode-se citar a aplicação de cantoneiras de alumínio nas laterais da estrutura, bem como de pequenos calços abaixo da mesma.



Figura 12 – Estrutura com cantoneiras de alumínio.

A Figura 12 mostra a estrutura com as cantoneiras de alumínio instaladas e a Figura 13 mostra a chapa de aço inox acomodada sobre o berço da estrutura.



Figura 13 – Acomodamento da superfície refletora sobre o berço.

Já como tubo focal foi utilizado um tubo de cobre de 1 milímetro de espessura de parede e diâmetro externo de 19 milímetros, com comprimento de 2 metros, devido a

suas propriedades termofísicas, dentre as quais pode-se destacar, por exemplo, a alta condutividade térmica.

Na fixação do tubo focal também foram utilizadas cantoneiras de alumínio, conforme mostra a Figura 14.



Figura 14 – Fixação do tubo focal através de cantoneiras de alumínio.

Vale ressaltar que mesmo com a aplicação de cantoneiras de alumínio nas laterais da estrutura, nota-se ainda a presença de ondulações nas laterais da chapa de aço inox, fato este que influencia diretamente na eficiência do concentrador solar, tendo em vista que os raios de luz que incidem nos bordos da chapa de aço inox ao encontrarem superfícies irregulares sofrem desvio, ou difundem-se, não atingindo o tubo focal, reduzindo a energia coletada.

As Figuras 15 e 16 mostram o concentrador montado, um dos problemas encontrados nesta etapa de montagem, foi a dificuldade de locomoção do mesmo, fato este, que tornou necessário o projeto e construção de uma base de sustentação sobre rodas, que proporcionou maior mobilidade ao equipamento, além de evitar constantes desmontagens do conjunto que poderia fragilizar partes da estrutura com os pés do concentrador.



Figura 15 – Vista do concentrador solar montado.

A base móvel foi construída totalmente em alumínio devido a preocupação em reduzir o peso do conjunto e ao mesmo tempo em manter a rigidez durante a movimentação. O Anexo C traz o projeto detalhado desta base móvel.



Figura 16 – Vista do concentrador solar montado.

As Figuras 17 e 18 mostram com detalhes a base móvel do concentrador solar. A utilização desta base móvel também possibilitou realizar testes do concentrador com um outro tipo de concepção de posicionamento em relação ao sol, chamado de gira-sol, pois neste movimento o concentrador passa a ter mais um grau de liberdade.



Figura 17 – Vista da base móvel.

Além de girar em torno de seu eixo horizontal, ele também pode girar em torno de um eixo vertical fixo, conseguindo assim maior absorção de calor.



Figura 18 – Concentrador solar em teste, já instalado sobre a base móvel.

Em caso de uma posterior automação, este tipo de movimento pode gerar algumas complicações, dificultando automatizar a movimentação do concentrador.

6.1. PARÂMETROS QUALIFICADORES DO CONCENTRADOR SOLAR

Uma vez dimensionado o concentrador solar é possível analisar os principais parâmetros e perdas agregadas ao processo de concentração solar.

Um parâmetro importante é o fator de concentração solar, o qual é a relação entre a área projetada da superfície refletora parabólica e a área projetada do tubo focal, idêntica a área da abertura da parábola, conforme mostra a Figura 19.

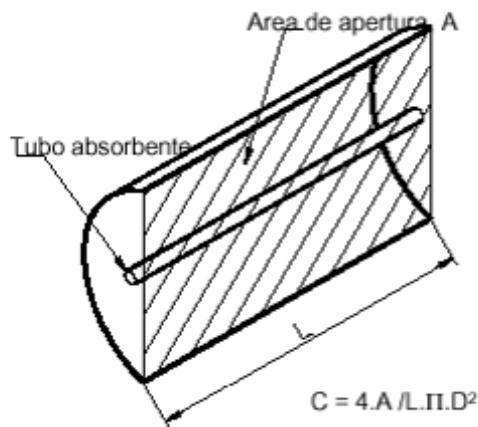


Figura 19 - Relação entre a área projetada do tubo focal e a área de abertura do concentrador

Segundo Perez (2005) e o Curso do ITESO (1995), para concentradores parabólicos lineares o maior fator de concentração possível é definido pela equação 7.

$$C_{máx} = \frac{1}{\operatorname{sen}\theta_s} \quad (7)$$

onde θ_s é definido como o ângulo de aceitação, conforme mostrado na Figura 20.

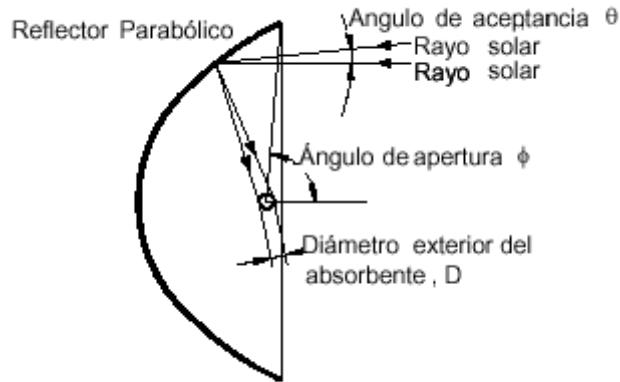


Figura 20 – Ângulo de aceitação

Há uma divergência entre os valores de θ_s adotados por Perez (2005) e o curso do ITESO (1995), o primeiro adota um ângulo de aceitação de $0,53^\circ$ enquanto o segundo adota o valor de $0,27^\circ$.

Por ser um trabalho mais recente, adotou-se o valor apresentado por Perez (2005), e desta forma obteve-se um fator de concentração máximo ($C_{máx}$) de 108,11 para este tipo de espelho.

Dado que a área projetada da superfície parabólica do espelho construído é de 2 m^2 e a área projetada do tubo focal é de $0,04 \text{ m}^2$, pode-se calcular o fator de concentração do concentrador, através da equação 8.

$$C_{conc.} = \frac{A_{p,esp.}}{A_{p,tubo}} \quad (8)$$

Logo, o fator de concentração do concentrador solar construído foi igual a 50. Então o fator real corresponde a 46,25% do máximo fator teórico.

6.2. PERDAS ÓPTICAS RELACIONADAS AO PROJETO

Quando operando com o tubo focal orientado no sentido norte – sul, um tipo de perda óptica é aquela relacionada à reflexão dos raios solares em uma pequena faixa da superfície refletora ao fim do concentrador solar, conforme mostrado na Figura 21.

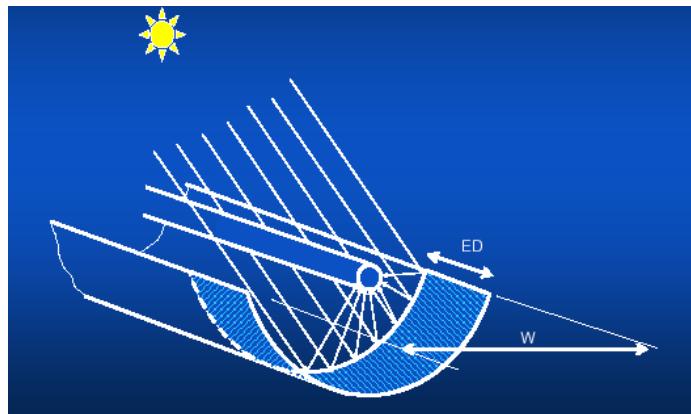


Figura 21 – Perdas ao final do concentrador solar

Logo a área útil será reduzida, pois na faixa final do concentrador solar os raios solares serão refletidos para fora do concentrador solar. Pode-se resolver este problema prolongando o tubo focal após o fim do concentrador solar, ou inclinando a superfície refletora de um ângulo φ .

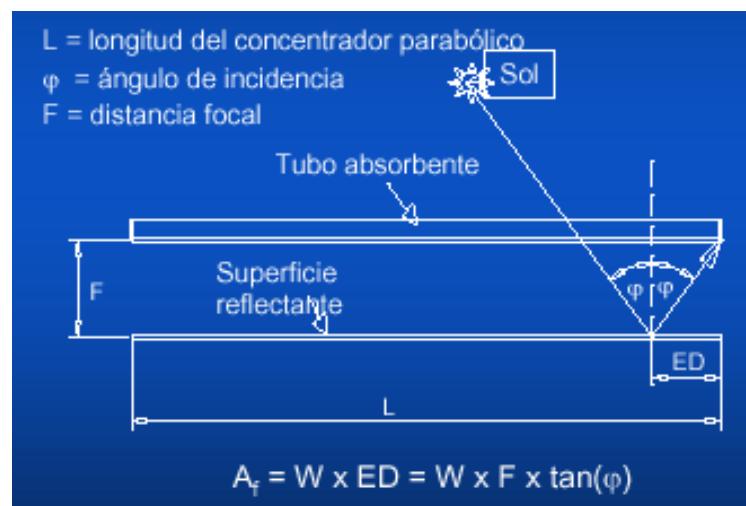


Figura 22 – Detalhes de cálculo das perdas ao final do concentrador solar

Devido a motivos práticos não foi possível utilizar esta técnica no concentrador solar construído, mas foi possível quantificar esta perda.

Considerando que em Vitória o ângulo de incidência dos raios solares (φ) gira em torno de 20° , e segundo o projeto do concentrador solar, os valores da abertura (W) e da distância focal (F) são respectivamente 1 metro e 0,2 metros, pode-se obter a área de perdas (A_f), através da equação 9, de acordo com Perez (2005).

$$A_f = W \cdot ED = W \cdot F \cdot \tan(\varphi) \quad (9)$$

onde, ED é o comprimento da faixa de perdas ópticas.

Logo a área de perdas ópticas (A_f) é igual a aproximadamente $0,0728 \text{ m}^2$, então o comprimento ED é de 7,28 centímetros.

Outras perdas também mencionadas anteriormente, são aquelas associadas a perdas ópticas nos bordos da superfície refletora de aço inox, devido a ondulações e deformações impostas pelo próprio processo de fabricação. Após os testes do concentrador solar foi possível quantificar uma área aproximada de $0,8 \text{ m}^2$ de perdas nos bordos.

Logo a área útil real da superfície refletora é de aproximadamente $1,55 \text{ m}^2$ e dado que a área total da mesma é de $2,42 \text{ m}^2$, então é possível estimar uma eficiência da superfície refletora de aço inox em torno 64 %.

Como segundo Cometta (2005) a irradiação média no Brasil está em torno de 700 W/m^2 , logo se houvesse total predominância da radiação direta poderia se estimar a energia útil máxima absorvida pelo concentrador solar. Tendo em vista que a superfície refletora possui uma área projetada (área de abertura do concentrador parabólico) de 2 m^2 , a máxima energia captada por este será de 1400 W. Mas somente 896 W seriam realmente aproveitados efetivamente pelo concentrador solar.

6.3. PRINCIPAIS DADOS DO PROJETO

A Tabela 1 apresenta os principais dados do projeto do concentrador solar.

Tabela 1 - Principais características do projeto do concentrador solar projetado.

Dados dimensionais	
Perfil parabólico	$y = \frac{x^2}{0,8}$
Comprimento do concentrador	2 m
Abertura do concentrador	1 m
Distância focal	20 cm
Fator de concentração	50
Eficiência	64%
Área da superfície refletora	2,42 m ²
Área útil da superfície refletora	1,55 m ²
Material da superfície refletora	Aço inox espelhado
Ângulo de aceitação	0,53°
Diâmetro externo do tubo focal	19 mm
Espessura da parede	2 mm
Comprimento do tubo focal	2 m
Material do tubo focal	Cobre

7. PROJETOS E CRONOGRAMAS DOS EXPERIMENTOS PARA AVALIAÇÃO E MELHORIA DO DESEMPENHO

O projeto e a montagem do concentrador solar tiveram inicio em agosto de 2005, sendo sua montagem finalizada no inicio de janeiro de 2006, período no qual foram realizados os primeiros testes e consequentemente verificados os primeiros problemas.

Deu-se inicio então aos ajustes necessários ao perfeito funcionamento do concentrador, dentre os quais destaca-se a correção do perfil parabólico com a utilização de pequenos calços na tentativa de fazê-lo aproximar-se o Maximo possível do molde confeccionado.

Após o ajuste do perfil, foi dado inicio ao ajuste da distancia focal tendo em vista que a mesma encontrava-se irregular, apresentando uma área iluminada descontínua. A Figura 23 mostra o foco após a correção durante um teste, como pode-se notar a faixa iluminada abaixo do tubo focal tornou-se mais homogênea.



Figura 23 – Tubo focal iluminado

Uma vez realizadas as correções mencionadas anteriormente, foram iniciados os testes

propriamente ditos do concentrador solar operando em circuito aberto, com objetivo de quantificar a capacidade máxima de operação deste, bem como a influencia de diversos fatores em sua eficiência.

Em abril de 2006 foram realizados testes com três tipos de tubos focais, os quais serão mencionados oportunamente, comparando assim o desempenho destes. A Figura 24 mostra o teste do tubo focal envolto em um tubo de vidro.



Figura 24 – Teste do tubo focal envolto em um tubo de vidro

Após os testes do tubo foram feitas algumas implementações como adição de isolamento térmico as mangueiras de borracha e instalação de sifão nas extremidades do tubo focal, com o objetivo de aumentar a eficiência do mesmo.

Paralelamente as atividades citadas foi desenvolvido o projeto e a construção do circuito fechado, pois se esperava um ganho considerável em eficiência do concentrador solar.

E em julho de 2006 a construção do circuito fechado foi finalizada, realizando um único teste devido a condições atmosféricas desfavoráveis do período. As Figuras 25 e 26 mostram o teste do concentrador solar operando em circuito fechado.



Figura 25 – Teste do concentrador solar operando em circuito fechado



Figura 26 – Teste do concentrador solar operando em circuito fechado

8. ANÁLISE DO ACABAMENTO SUPERFICIAL DO TUBO FOCAL

Uma das dificuldades que foram afrontadas durante a fase de projeto, foi a respeito da influência da refletividade da superfície do tubo de cobre sobre a eficiência do concentrador. Existiam três possíveis formas de utilizar o tubo: recoberto com uma camada de tinta preta fosca, com a superfície polida ou recoberta com sua camada natural de óxido. Para definir qual seria a melhor forma de utilizá-lo foi realizada uma experiência simples que consistiu em expor dois pequenos pedaços do tubo ao sol, um recoberto com tinta preta fosca e outro possuindo metade de sua superfície lixada e a outra em seu estado natural recoberta com uma camada de óxido, desta forma fixou-se um termopar sobre cada um dos três tipos de superfícies e realizou-se tomadas de temperatura das três situações simultaneamente, em determinados intervalos de tempo, a Figura 27 mostra o experimento e o Anexo I que apresenta os resultados obtidos.



Figura 27 - Experimento para seleção do acabamento superficial do tubo coletor focal.

9. INSTRUMENTAÇÃO

Os instrumentos utilizados durante a operação do concentrador solar podem ser divididos em três grupos: instrumentos de orientação do concentrador solar, instrumentos meteorológicos e instrumentos de controle e monitoração do sistema de fluido.



Figura 28 – Ponteiro solar

No primeiro grupo estão o ponteiro solar e o transferidor, conforme mostrados nas Figuras 28 e 29. O ponteiro solar tem por objetivo monitorar a posição do sol, quando o concentrador opera com seu tubo focal orientado no sentido norte-sul, já quando o concentrador solar está operando seguindo o sol, efeito gira sol, o ponteiro é responsável por garantir a perpendicularidade deste em relação aos raios solares, o que é garantido pela ausência de sombra sobre o disco base.

O transferidor instalado na lateral da estrutura do concentrador solar tem como finalidade permitir o monitoramento do ângulo de incidência dos raios solares.

Também foi utilizado como instrumento de orientação uma bússola, de forma a orientar o tubo focal de forma adequada.



Figura 29 – Transferidor

No segundo grupo, estão os instrumentos meteorológicos, os quais são responsáveis por monitorar as condições climáticas locais, estes instrumentos formam uma mini estação meteorológica, conforme mostrado na Figura 30.



Figura 30 – Estação meteorológica

A estação meteorológica é constituída de um anemômetro para monitorar a velocidade do vento nordeste, vento predominante na região de Vitória, um ponteiro de mesa fixo, responsável por monitorar a posição do sol, um termógrafo para medir a umidade e temperatura ambiente, e um heliógrafo, instrumento que registra a duração do brilho solar, a radiação solar é focalizada por uma esfera de cristal sobre uma fita de papel e pela ação da radiação é sofre um lento processo de queima, gerando uma frente de chama, que se movimenta junto com o sol, e em caso da ausência momentânea de

radiação a frente de chama é imobilizada, recomeçando com o aumento da radiação, porém deixando um pedaço de fita intacto. O comprimento das regiões queimadas da fita exposta a radiação solar mede o número de horas de insolação. As Figuras 31 e 32 mostram este instrumento.



Figura 31 – Heliógrafo



Figura 32 – Detalhe da esfera de vidro do heliógrafo

Já na terceira categoria de instrumentos estão os termopares utilizados para medir a temperatura do fluido de trabalho nos diversos pontos do circuito, o Anexo D traz detalhes do processo de aferição dos mesmos, um multímetro com leitura de temperatura e um seletor de canais. Além dos instrumentos citados há também os manômetros utilizados para monitorar a pressão do sistema e um rotâmetro utilizado

para controlar e medir a vazão de fluido, o Anexo H trás a calibração do mesmo, as Figuras 33 e 34 mostram o rotâmetro utilizado.

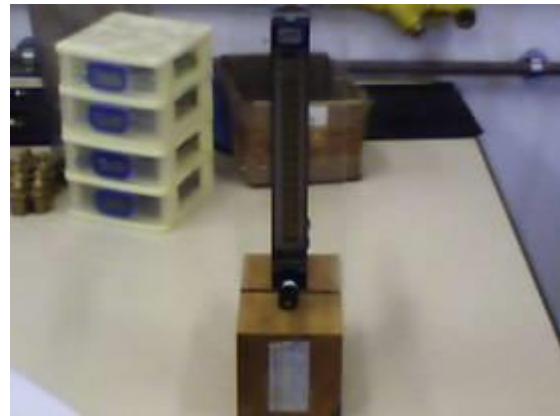


Figura 33 – Rotâmetro



Figura 34 – Rotâmetro com as conexões para as mangueiras

10. SISTEMAS DE CIRCULAÇÃO

Intimamente ligados ao projeto do concentrador solar estão os sistemas de circulação do fluido de trabalho, seja ele o circuito aberto ou fechado. Nos próximos itens os mesmos serão detalhados.

10.1. CIRCUITO ABERTO

O circuito aberto compreende o sistema pelo qual o fluido de trabalho, no caso a água, escoa de forma continua, desde a válvula de alimentação até o concentrador solar, onde o fluido recebe energia na forma de calor sensível, e do concentrador até o ponto onde se deseja aproveitar a energia acumulada pelo fluido de trabalho. Porém operando em circuito aberto o fluido de trabalho atravessa o concentrador solar uma única vez. A Figura 35 mostra o desenho esquemático deste sistema, com seus respectivos componentes.

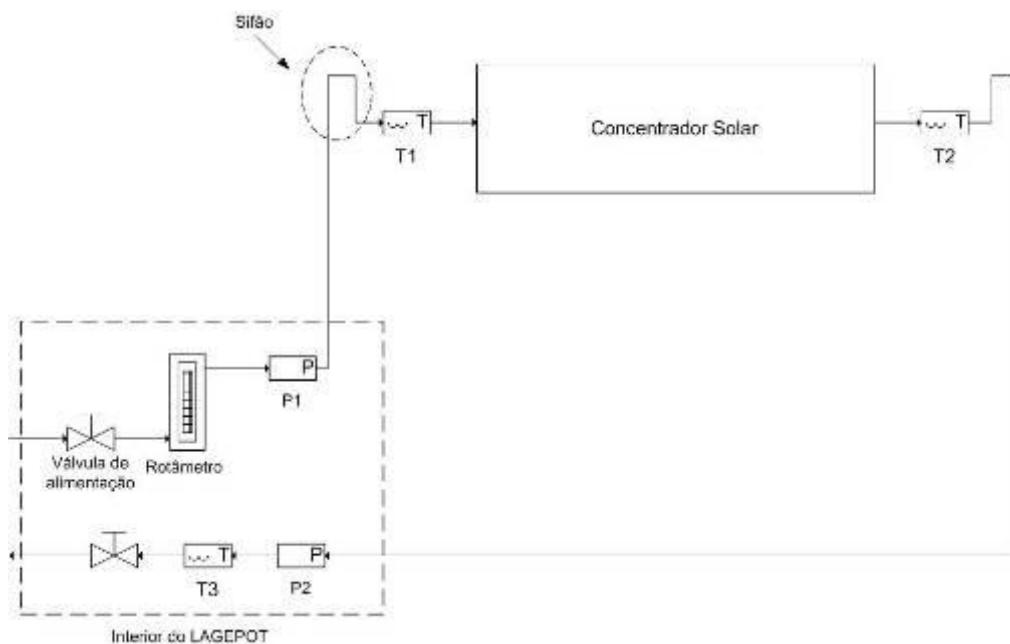


Figura 35 – Desenho esquemático do circuito aberto

Neste sistema foi utilizado como meio de condução do fluido de trabalho, mangueiras de borracha resistentes à pressão e ao calor, conforme especificado no Anexo H, devido à flexibilidade e facilidade montagem e desmontagem do sistema proporcionada pela mesma.

Conforme pode ser visto na Figura 35, foi construída uma bancada de ensaios dentro do Laboratório de Geração de Vapor (LAGEPOT), a qual pode ser vista na Figura 36. Esta bancada consiste de uma válvula de alimentação de água, a qual faz parte da própria rede de alimentação do LAGEPOT, ligada em série a um rotâmetro, o qual é utilizado como medidor e controlador da vazão do circuito, no Anexo G encontra-se a tabela de calibração do mesmo, apresentando o range de vazão no qual pode operar, após o rotâmetro encontra-se também um manômetro chamado de P1, tendo como função apenas monitorar o nível de pressão na linha de alimentação do concentrador solar, ainda sobre esta bancada encontra-se o manômetro chamado de P2, responsável por monitorar a pressão na linha de saída do concentrador solar, em série com um termopar (T3), sendo este responsável por medir a temperatura com a qual o fluido de trabalho chega ao laboratório após a passagem pelo concentrador solar, há ainda uma válvula antes da descarga do fluido de trabalho para o sistema de esgoto do LAGEPOT.



Figura 36 – Bancada de ensaios do circuito aberto

A distância percorrida pelo fluido de trabalho entre o manômetro P1 e o manômetro P2 é de aproximadamente 32 metros, tendo em vista que durante os testes o concentrador solar situa-se a aproximadamente 15 metros da bancada de testes, na parte exterior do LAGEPOT.

Os termopares T1 e T2, respectivamente a entrada e a saída do concentrador solar, fornecem as temperaturas com as quais é possível calcular o calor absorvido pelo fluido de trabalho. Além disso, de posse da temperatura medida pelos termopares T2 e T3 é possível calcular as perdas de calor que ocorrem no percurso entre a saída do concentrador solar e a chegada do fluido de trabalho na bancada de ensaio.

Todos os termopares são ligados a um seletor de canais, e este por sua vez é ligado a um multímetro com leitor de termopares, sendo possível assim monitorar as temperaturas do interior do LAGEPOT.

O objetivo em realizar testes do concentrador solar operando em um circuito aberto, está em quantificar a capacidade do concentrador solar em elevar a temperatura do fluido em um único passe. Desta forma também poderia verificar-se a possibilidade de transportar a energia acumulada pelo fluido de trabalho para o interior do LAGEPOT, pois assim todos os posteriores processos de troca de calor seriam realizados no interior do laboratório, bem como a montagem da estrutura necessária ao circuito fechado.

10.1.1. Análise do $\Delta T_{MÁX}$ do Circuito Aberto

Durante os testes com o concentrador solar operando em circuito aberto, conseguiu-se temperaturas na saída do tubo focal da ordem de 98°C, até um pico de 109°C, porém com valores de vazão bem reduzidos, da ordem de 1,25 mL/s, com esta vazão a variação máxima de temperatura, $\Delta T_{MÁX} = T2 - T1$, obtida foi de 82°C, neste momento a temperatura de entrada no concentrador solar foi 27°C.

Apesar do elevada variação de temperatura obtida na passagem do fluido de trabalho pelo concentrador solar, as temperaturas obtidas no interior do laboratório não foram satisfatórias.

Vale ressaltar que os primeiros testes foram realizados em janeiro de 2006, durante o verão, época esta, onde se obtém as maiores taxas de irradiação solar.

10.1.2. Testes do Tubo Focal

Um ponto importante foi o ajuste do espelho, pois durante os testes percebeu-se uma irregularidade na iluminação ao longo do tubo focal. Após análise descobriu-se que o perfil parabólico do espelho não condizia com o molde utilizado, logo foi necessário utilizar apoios abaixo do espelho para se chegar ao perfil desejado ou o mais próximo possível, conforme dito anteriormente, uma vez feitos os ajustes notou-se uma iluminação mais homogênea da parte inferior do tubo focal.

Na tentativa de aumentar o gradiente de temperatura entre a entrada e a saída do tubo focal, foram utilizadas várias técnicas visando aumentar a troca de calor e reduzir as perdas térmicas.

Todos os testes de avaliação do tubo focal foram realizados utilizando o concentrador solar operando em circuito aberto.

10.1.2.1. Teste do Tubo Focal sem Arame Interior

Nos primeiros testes realizados foi utilizado o tubo focal de cobre utilizando apenas uma cobertura de tinta preta fosca, conforme mostra a Figura 37, porém notou-se grande perda de calor por convecção, fato este, que será abordado posteriormente.

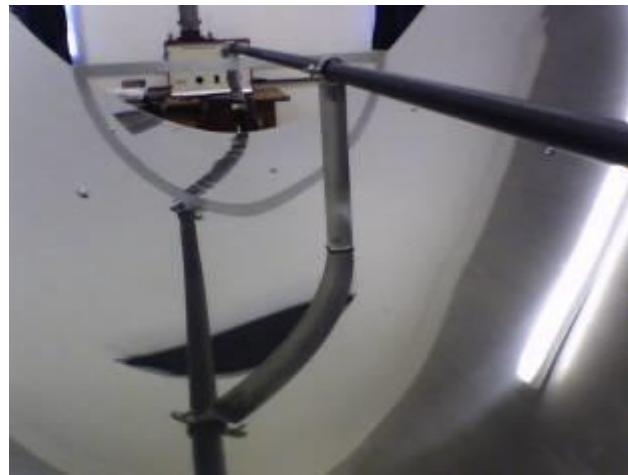


Figura 37 – Tubo focal recoberto com tinta preta fosca

10.1.2.2. *Teste do Tubo Focal com Arame Interior*

Uma técnica utilizada para aumentar a troca de calor, é aumentar a turbulência do escoamento inserindo um arame redobrado de forma irregular no interior do tubo focal (Figuras 38 e 39), visando simular o processo de pinagem de tubos utilizados em caldeiras.



Figura 38 – Arame utilizado para aumentar a troca de calor

Após os testes notou-se que a alta resistência térmica de contato entre o arame e a parede interna do tubo focal, aliada a pequena vazão, fato este que mantém o

escoamento em regime laminar devido a baixa velocidade do escoamento, que leva a número de Reynolds muito pequenos, tornam ineficaz a aplicação deste.



Figura 39 – Arame inserido no interior do tubo focal

Uma forma de reduzir a resistência de contato é inserir pinos ao longo do tubo, soldando-os, pois desta forma, funcionariam como aletas conduzindo calor da parede externa do tubo focal até o centro deste.

10.1.2.3. Tubo Focal com Arame Interior Envolto em Tubo de Vidro

Uma importante característica do processo, percebida durante os testes foi a grande perda de calor por convecção, ao redor do tubo focal. Essa característica já era esperada, e devido a isso a estrutura do concentrador solar foi projetada com um encaixe para a instalação e uma tampa de vidro, mas após uma melhor análise dos processos de reflexão e refração da luz, notou-se que a utilização de uma placa de vidro acarretaria em grandes perdas por reflexão para pequenas variações do ângulo de incidência. Após uma pesquisa na Internet a sites de pesquisadores de outros países, descobriu-se uma técnica de reduzir as perdas térmicas por convecção para o ambiente, a técnica sugerida por Perez (2005) consiste em inserir o tubo focal de cobre dentro de um tubo de vidro, conforme mostram as Figuras 40 e 41. A aplicação desta técnica foi muito eficaz, conforme será visto adiante.

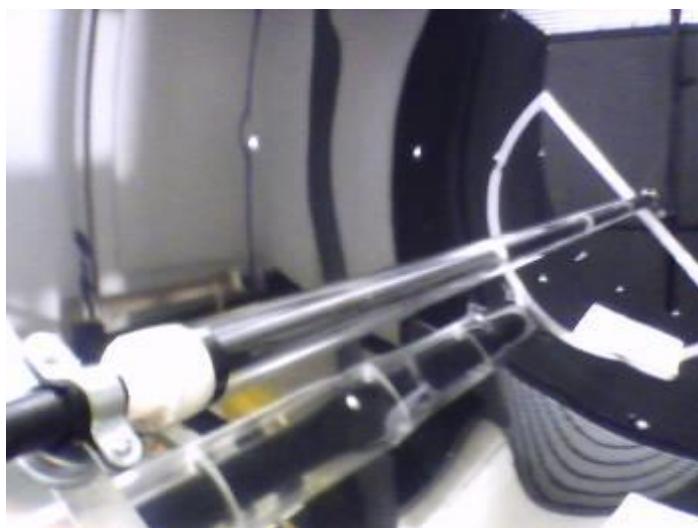


Figura 40 – Vista do tubo de cobre inserido no tubo de vidro

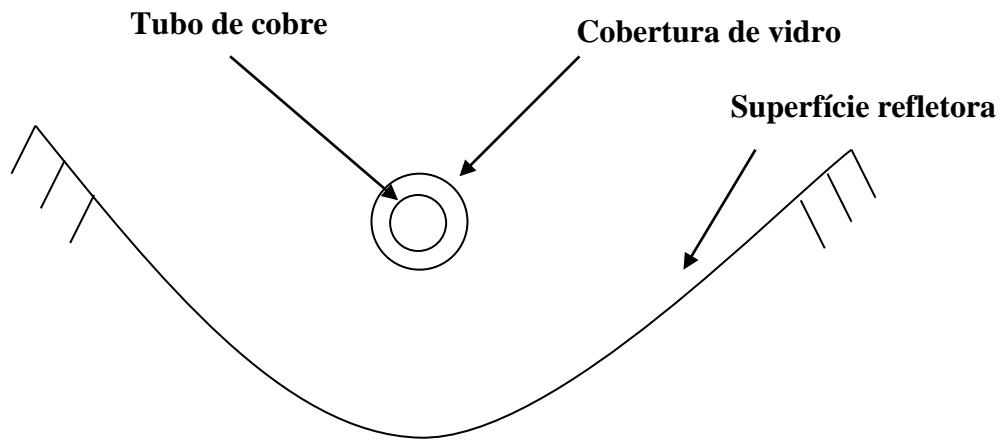


Figura 41 – Desenho esquemático

Como tubo de vidro foi utilizado uma lâmpada fluorescente de 2 metros de comprimento, espessura 1mm e diâmetros interno e externo com respectivamente 36 e 38 milímetros, pois além do baixíssimo custo, a mesma também possui boa Transmissividade, embora possua uma parede muito fina tornando muito frágil o tubo.

Devido o tubo de cobre fletir ou oscilar durante o transporte, danificando o tubo de vidro, foram confeccionados anéis de nylon, cujo projeto detalhado encontra-se no Anexo J, ao longo do tubo de cobre proporcionando maior rigidez durante o transporte. A Figura 42 mostra um destes anéis em detalhe.



Figura 42 – Anel de nylon instalado no tubo de cobre

10.1.2.4. Comparação de desempenho

Após o teste das várias técnicas visando o aumento da troca de calor, chegou-se ao gráfico mostrado na Figura 43, que mostra a variação da temperatura de saída do concentrador solar em relação ao tempo.

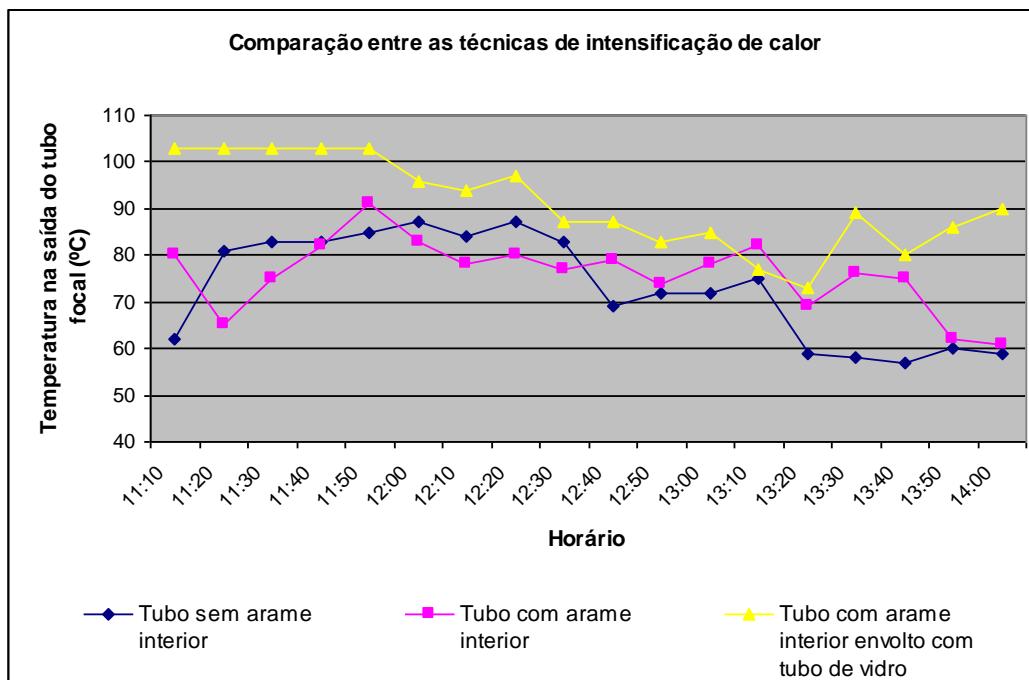


Figura 43 - Gráfico de comparação entre as técnicas de intensificação da transferência de calor

Como pode-se notar o arame no interior do tubo focal não afetou significantemente a troca de calor, mas o emprego do tubo de vidro proporcionou temperaturas significantemente mais altas.

De posse destes resultados é possível estimar a perda de calor por convecção, tendo em vista que os testes foram realizados em três dias consecutivos, dias 21, 22 e 23/04/06, e com condições atmosféricas muito semelhantes, céu limpo e predominância de radiação direta.

Devido a estes resultados optou-se por realizar todos os demais testes com o tubo focal com o arame de cobre em seu interior e protegido externamente com o tubo de vidro.

10.1.3. Análise da Influência de Sifão nas Extremidades do Tubo Focal

Conforme mencionado anteriormente nas extremidades do tubo focal, foram instalados sifões, com o objetivo de garantir o perfeito enchimento e ausência de bolsões de ar no interior do tubo, tendo em vista o ar possuir baixíssimo coeficiente de convecção.

Apesar de ser indispensável para o funcionamento do circuito fechado, a utilização de sifão durante os ensaios de circuito aberto não fazia-se necessária, uma vez que a bancada de ensaios encontrava-se no interior do LAGEPOT, local este que a mantinha mais elevada que o concentrador solar, garantindo o enchimento completo do tubo focal. A Figura 44 mostra as conexões do tubo focal para operação em circuito aberto.



Figura 44 – Conexão utilizada inicialmente nas extremidades do tubo focal

Sem fazer uso do sifão nas extremidades do tubo focal quando operando em circuito fechado, não seria possível garantir seu total enchimento e com isso a energia absorvida pelo fluido de trabalho seria muito menor. A Figura 45 mostra o sifão instalado em uma das extremidades.



Figura 45 – Sifão instalado na extremidade do tubo focal

10.1.4. Análise da Influência do Isolamento da Mangueira de Água Quente

Após avaliação do raio critico das mangueiras, o Anexo E traz as especificações das mangueiras e o Anexo F traz a avaliação do raio critico das mesmas, verificou-se a necessidade de isolar termicamente as mangueiras, tendo em vista a grande perda de calor por convecção ao longo do circuito de ensaio, seja ele aberto ou fechado.



Figura 46 – Mangueira de borracha recoberta com isolamento térmico

A perda de calor ao longo da mangueira de água quente (Figura 46), após a saída do concentrador, foi um dos fatores que levaram a construção do circuito fechado, pois as perdas aliadas às pequenas vazões tornaram impraticável utilizar o concentrador operando em circuito aberto.

Mesmo após a instalação do isolamento na mangueira do circuito aberto, não se conseguiu o resultado esperado, devido a pequena vazão, fato este que acarreta em grandes tempos térmicos.

Ainda sim, estimativas mostram uma redução da troca térmica pelas paredes da mangueira de 60 a 84%. E por essa razão o isolamento térmico foi mantido nas mangueiras do circuito fechado.

A Figura 47 mostra uma comparação entre a mangueira com isolamento (Cor Branca) e a mangueira sem isolamento.



Figura 47 – Vista da mangueira com isolamento e sem isolamento

A Figura 48 mostra o sistema aberto operando com a mangueira de água quente isolada, o Anexo G trás as especificações do isolamento térmico.



Figura 48 – Sistema aberto operando com mangueira isolada

10.2. CIRCUITO FECHADO

O circuito fechado (Figura 49) comprehende o sistema pelo qual uma determinada massa do fluido de trabalho escoa através do concentrador solar várias vezes. O escoamento do fluido de trabalho é proporcionado por uma bomba centrifuga de pequena potência.

O sistema é constituído de um reservatório termicamente isolado com volume interno de 30 litros, este por sua vez alimenta a bomba que trabalha afogada, e que tem sua vazão pré-controlada por uma válvula ligada em série com um rotâmetro, com o qual pode-se medir a vazão que circula pelo concentrador solar. Neste sistema foi fundamental a instalação de um sifão, tanto na entrada quanto na saída do concentrador solar, pois sem este, o tubo focal ficaria parcialmente ocupado com o fluido de trabalho, reduzindo o calor absorvido por este.

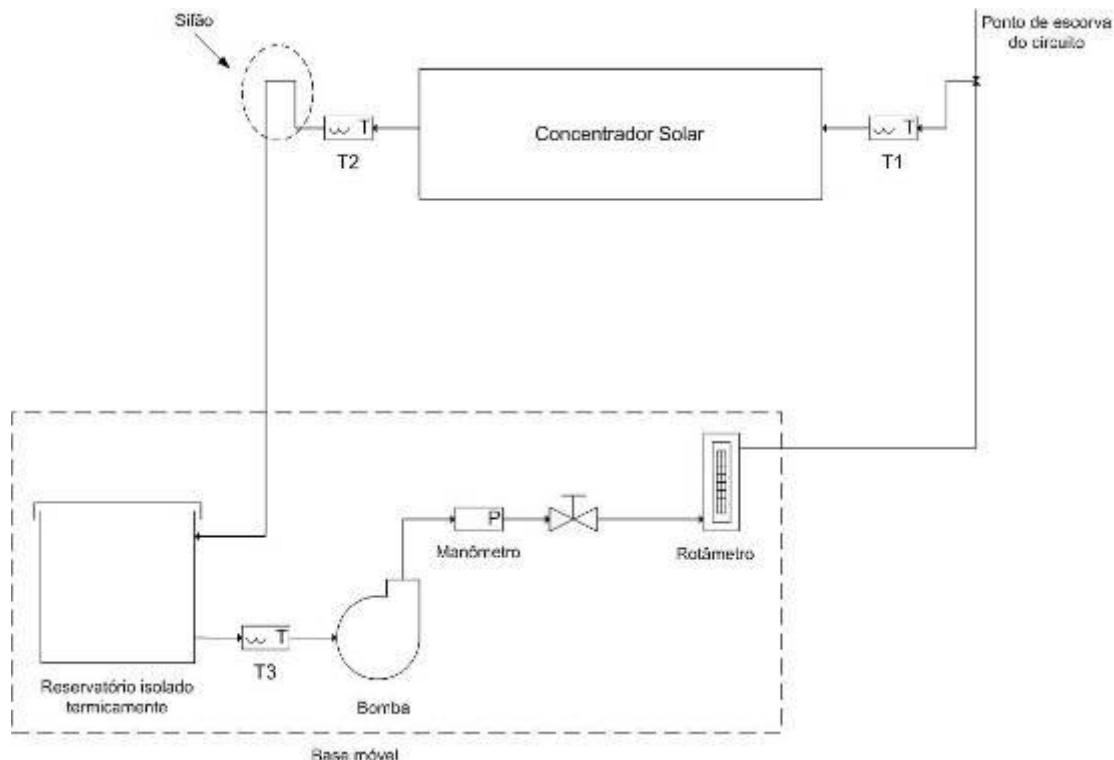


Figura 49 – Desenho esquemático do circuito fechado

Após escoar pelo interior do tubo focal recebendo energia na forma de calor sensível, o fluido de trabalho retorna ao reservatório, elevando a temperatura da massa de água contida em seu interior, com isso as temperaturas medida pelos termopares T1 e T3 aumentariam com o passar do tempo, proporcionando assim aumento da temperatura medida pelo termopar T2, considerando que a irradiação solar permaneça a mesma.

Uma base móvel, semelhante à utilizada pelo concentrador solar, foi construída para alocar equipamentos de ensaio, constituídos por: reservatório termicamente isolado, bomba, válvula e rotâmetro. O Anexo L traz o projeto detalhado desta base móvel.

A utilização desta base móvel proporcionou a redução do comprimento das mangueiras de alimentação e saída do tubo focal, e com isso redução das perdas térmicas ocasionadas durante o escoamento do fluido de trabalho pelo interior das mangueiras, bem como maior proximidade da bancada de ensaios em relação ao concentrador solar.

A Figura 50 mostra a bancada de ensaios do circuito fechado durante um teste.



Figura 50 – Bancada de ensaios do circuito fechado

10.2.1. Teste do concentrador operando em circuito fechado

Devido a condições climáticas desfavoráveis, só foi possível realizar um único teste do concentrador solar operando em circuito fechado.

O gráfico mostrado na Figura 51 mostra as temperaturas obtidas no teste em circuito fechado para uma vazão de 3,25 mL/s, fato este que já representa um ganho quando comparando com o circuito aberto, no qual a vazão era de 1,25 mL/s.

Também pode-se notar pela Figura 51 que diferenças entre as temperaturas do sistema tendem a diminuir com o tempo, comportamento este que já era esperado, uma vez que o fluido de trabalho armazenado no recipiente, isolado termicamente, tende a sofrer um aumento de temperatura.

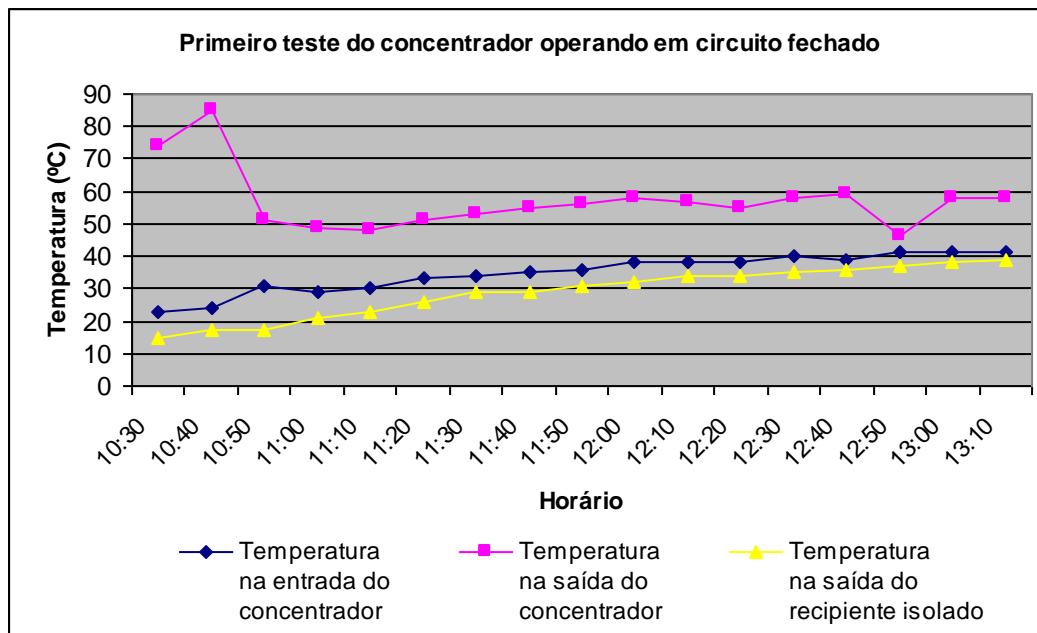


Figura 51 - Gráfico do resultado do teste do concentrador operando em circuito fechado

Porém, mais testes serão necessários para que se possa tirar maiores conclusões.

11. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dentre os principais resultados mensuráveis encontrados, está o aumento da eficiência do processo de troca de calor com a utilização de um arame retorcido no interior do tubo focal e a inserção do tubo focal em um tubo de vidro, com a finalidade de evitar as perdas de calor por convecção, e também aumentar a turbulência do escoamento.

Os experimentos mostram que o tubo de cobre envolto em tubo de vidro e com arame retorcido em seu interior apresentou um ganho na absorção de calor de 14,3% em relação ao tubo de cobre desprovido de qualquer mecanismo de intensificação de troca de calor, e de 8,4% em relação ao tubo de cobre utilizando unicamente arame retorcido em seu interior. A Figura 52 mostra um comparativo na eficiência média de absorção de calor.

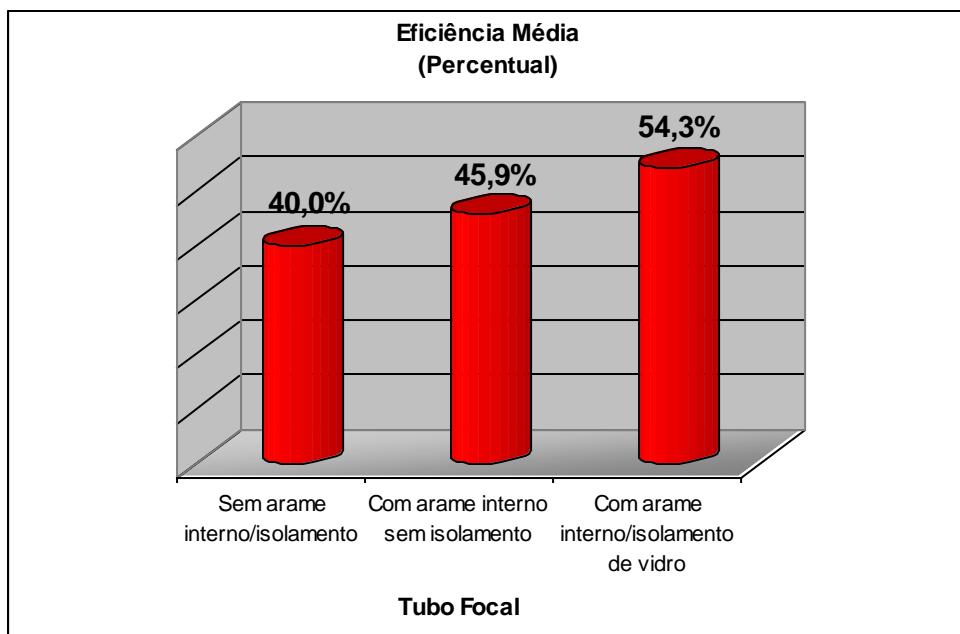


Figura 52 – Gráfico da eficiência média de absorção de calor

Vale ressaltar que os valores de eficiência apresentados no gráfico mostrado na Figura 52, foram obtidos através dos valores médios da energia concentrada e da energia absorvida, ao final dos dias de teste.

Os gráficos mostrados nas Figuras 53, 54 e 55 mostram o aproveitamento de energia para os três tubos utilizados.

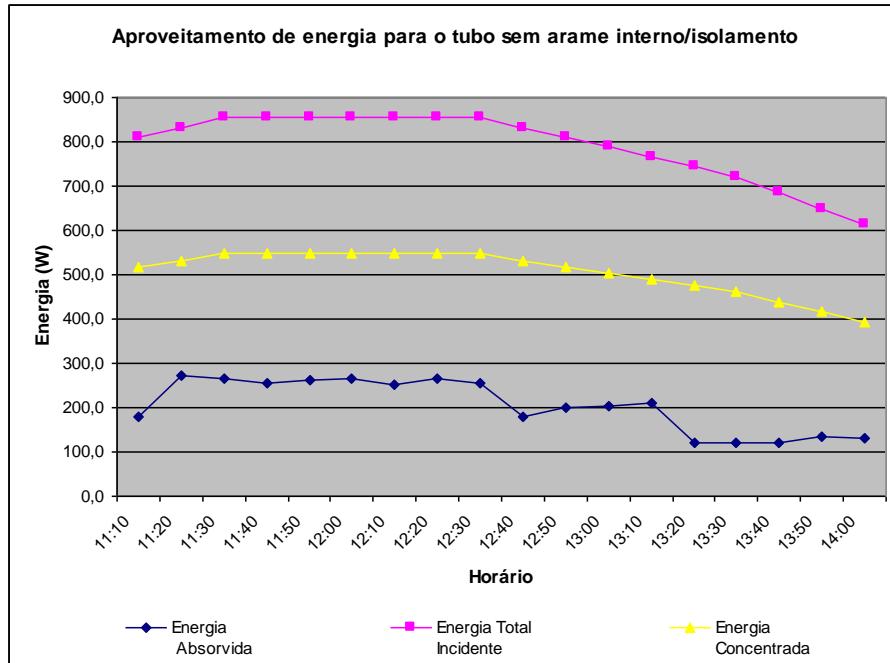


Figura 53 – Gráfico do aproveitamento de energia para o tubo de cobre sem arame interno / isolamento

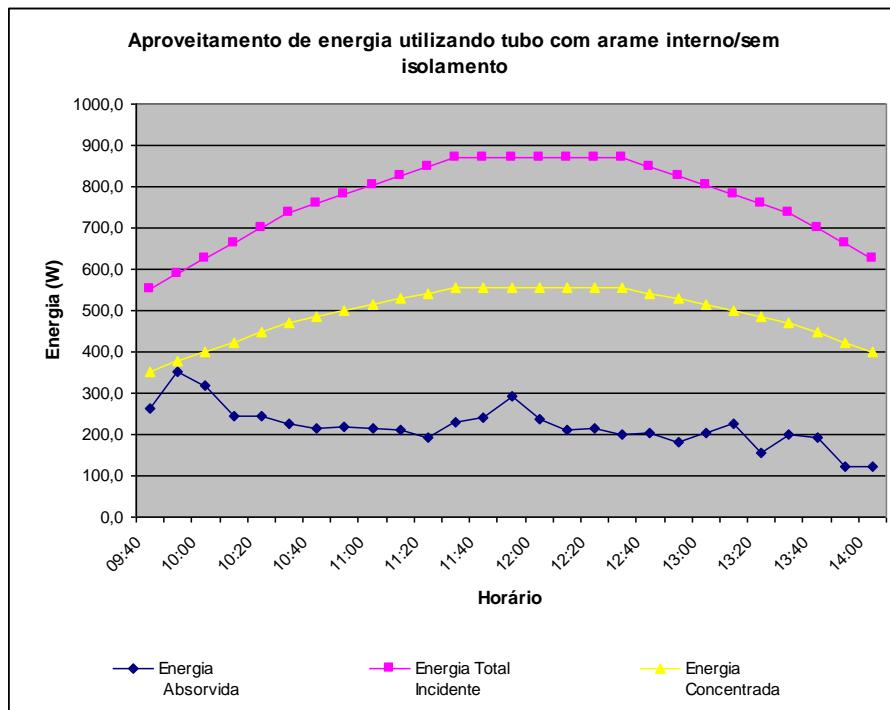


Figura 54 – Gráfico do aproveitamento de energia para o tubo de cobre com arame interno / sem isolamento

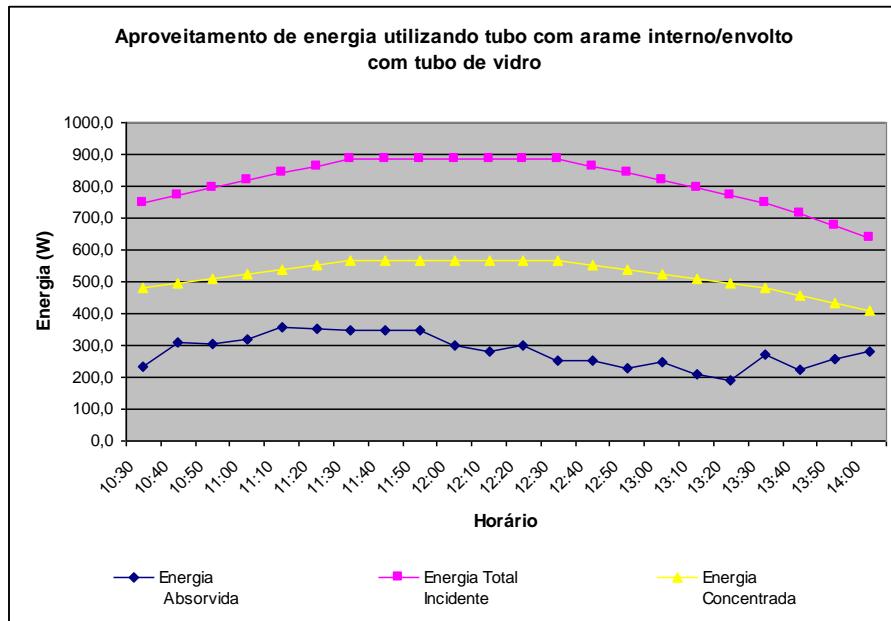


Figura 55 - Gráfico do aproveitamento de energia para o tubo de cobre com arame interno / isolado com tubo de vidro

É importante destacar que o valor das radiações, direta e difusa, é oriundo do software RADIASOL, fornecido pelo laboratório de energia solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), o qual traz os valores das radiações mencionadas para várias cidades do país, incluindo Vitória, para todos os dias do ano.

Porém estes dados são fornecidos para cada intervalo de 30 minutos, logo, fez-se necessário interpolá-los, para obter a radiação direta e difusa para cada intervalo de 10 minutos.

As Figuras 56 e 57 mostram uma comparação das radiações direta e difusa, durante os dias de teste.

Conforme pode ser visto nos gráficos mostrados nas Figuras 56 e 57, o período compreendido entre 11 h 20 min e 12 h 20 min, apresenta as maiores taxas de radiação direta e difusa, conforme já era esperado.

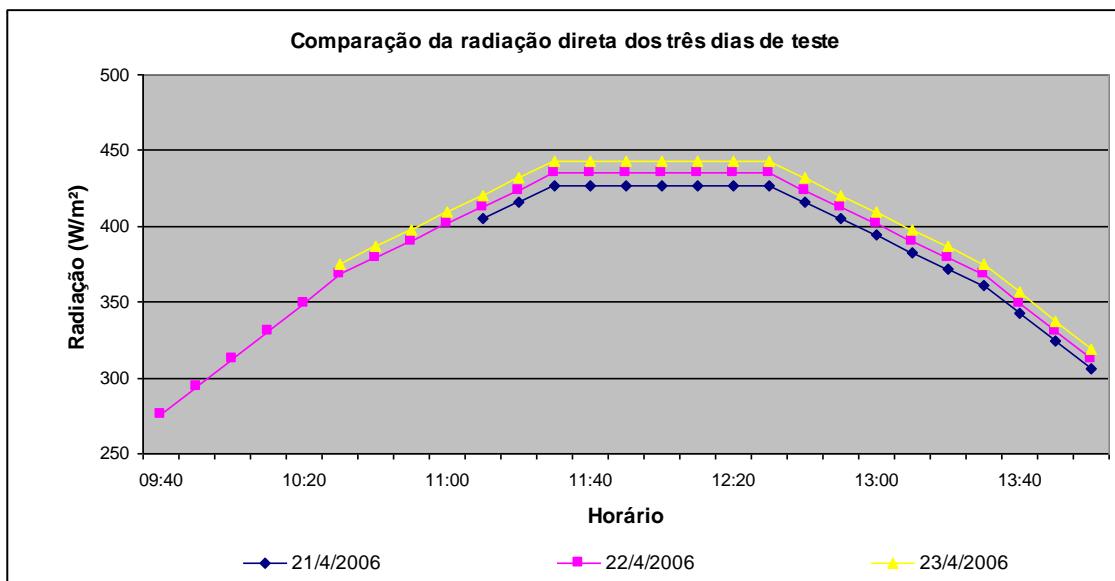


Figura 56 – Gráfico da comparação da variação da radiação direta para os três dias de teste

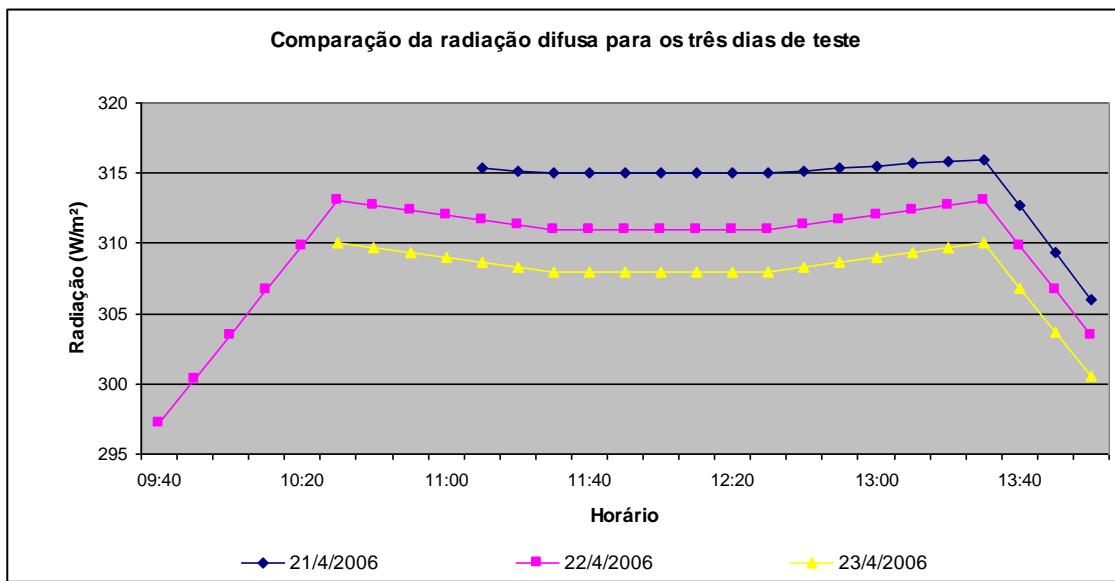


Figura 57 – Gráfico de comparação da variação da radiação difusa para os três dias de teste

Analizando o gráfico mostrado na Figura 56 também é possível notar que a radiação direta nos três dias de realização dos testes foi bem semelhante, devido a isso é possível realizar as comparações já citadas anteriormente sem que isso acarrete grandes erros nos resultados.

Apesar de maiores temperaturas terem sido encontradas com o concentrador operando em circuito aberto, pode-se atribuir isso ao fato dos testes com o concentrador solar operando em circuito aberto terem sido realizados no verão, em detrimento aos testes do circuito fechado, os quais foram realizados no outono, onde as taxas de irradiação solar são menores.

Logo acredita-se que utilizando os mecanismos de intensificação de troca de calor mostrados neste trabalho, os quais mostraram-se muito eficientes, e operando com o fluido de trabalho em circuito fechado, espera-se que temperaturas ainda maiores sejam obtidas.

12. TRABALHOS FUTUROS

Apesar dos resultados alcançados nesta fase do projeto, a qual se dedicou exclusivamente ao projeto e construção do concentrador solar e seus sistemas fluídicos, ainda há muito a ser feito, como por exemplo, realizar uma análise mais detalhada da troca de calor por radiação envolvida no processo, bem como quantificar as perdas de calor por convecção e por radiação.

Também vale ressaltar a importância de se avaliar com maior rigor o perfil parabólico, através da implementação de novas técnicas de montagem e modelagem da superfície refletora, pois grande parte da eficiência do concentrador solar está intimamente associada a este.

Faz-se necessário também a realização de mais testes com o concentrador solar operando em circuito fechado, assim como, realizar melhorias neste sistema, visando dentre outras coisas reduzir a influencia do aumento de temperatura que o fluido de trabalho sofre durante o bombeamento e o aumento da vazão.

Já encontra-se em andamento a segunda fase do projeto que compreende a automação dos movimentos de orientação do concentrador solar, e a instalação de um sistema de aquisição de dados. A automação visa aumentar a eficiência do concentrador e a aquisição de dados deverá facilitar análises posteriores.

Uma terceira fase consiste no projeto e construção do sistema de termo-acumulação, o trocador de calor propriamente dito, e do sistema de circulação de óleo. Com a implementação destes serão possíveis análises detalhadas sobre redução de viscosidade de óleos pesados utilizando energia solar através de termo-acumulação, principal objetivo do projeto. O circuito fechado e sua base móvel serão de grande utilidade nesta fase.

13. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora a perspectiva da utilização de energia solar em aplicações industriais ainda seja restrita, acreditamos que o surgimento de novas pesquisas e trabalhos acadêmicos nesta área, impulsiona o desenvolvimento de novas tecnologias capazes de promover sua viabilidade técnica e econômica em um futuro próximo, e com esta meta foi desenvolvido este trabalho.

Neste trabalho foram enfocados os aspectos construtivos do concentrador solar e mecanismos utilizados com o objetivo de intensificar as trocas de calor, assim como ensaios experimentais destes.

Após a conclusão do trabalho verificou-se a necessidade de maiores estudos na área de transferência de calor no que tange os fenômenos de radiação, bem como de uma análise estatística multivariada, tendo em vista o grande número de variáveis envolvidas no processo.

14. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acioli, José de Lima. *Fontes de Energia*, Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1994.

Cometta, Emilio. *Energia Solar: Utilização e Empregos Práticos*, São Paulo: Editora Hemus, 2004.

Incropera, F.; Dewitt, D. *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*, 4^a Ed., Rio de Janeiro: Editora LTC, 1998

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente. *Notas Sobre El Curso de Energía Solar*, Editora Tlaquepaque, Jalisco, Fevereiro de 1995.

Laboratório de Energia Solar da UFRGS. *Radiasol.EXE: Sistema Radiação Solar*. Versão 2, 2001

O Fim da Energia Barata, Estudo Exame/Energia, Revista Exame, São Paulo, Abril de 2006

Palz, Wolfgang. *Energia Solar e Fontes Alternativas*, São Paulo: Editora Hemus, 1981.

Pérez, M. *Aprovechamiento de La Energía Solar a Alta Temperatura a Solar a Alta Temperatura: Sistemas Termosolares de Concentración*, Grupo de Termodinámica y Energías Renovables, México, 2005.

Su, J.; Estefen, S.: *Thermal-Hydraulic Analysis of Heavy Oil Transportation in Heated Sandwich Pipelines*. In: *International conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 24 th, 2005, Halkidiki, Greece: Ed. ASME, 2005.

Trp, Anica.: An Experimental and Numerical Investigation of Heat Transfer During Technical Grade Paraffin Melting and Solidification in a Shell-and-Tube Latent Thermal Energy Storage Unit. Croatia: Faculty of Engineering, University of Rijeka, Vukovarska. Ed. Elsevier, 2005.

Wang, X.; Wang, R.; Wu, Jingyi.: Experimental Investigation of a New-Style Double-Tube Heat Exchanger for Heating Crude Oil Using Solar Hot Water. China: Institute of Refrigeration & Cryogenics, School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiaotong University. Ed. Elsevier, 2004.

ANEXOS

ANEXO A

Medidas do perfil parabólico

Domínio X (cm)	Divisão do Domínio em X (mm)	$Y = \frac{x^2}{0,8}$ (mm)
0	0	0
1	10	0,1
2	20	0,5
3	30	1,1
4	40	2,0
5	50	3,1
6	60	4,5
7	70	6,1
8	80	8,0
9	90	10,1
10	100	12,5
11	110	15,1
12	120	18,0
13	130	21,1
14	140	24,5
15	150	28,1
16	160	32,0
17	170	36,1
18	180	40,5
19	190	45,1
20	200	50,0
21	210	55,1
22	220	60,5
23	230	66,1
24	240	72,0
25	250	78,1
26	260	84,5
27	270	91,1
28	280	98,0
29	290	105,1
30	300	112,5
31	310	120,1
32	320	128,0
33	330	136,1
34	340	144,5
35	350	153,1
36	360	162,0
37	370	171,1
38	380	180,5
39	390	190,1
40	400	200,0

41	410	210,1
42	420	220,5
43	430	231,1
44	440	242,0
45	450	253,1
46	460	264,5
47	470	276,1
48	480	288,0
49	490	300,1
50	500	312,5

ANEXO B

Projeto dos principais componentes do concentrador solar

Devido a problemas de resolução, os desenhos encontram-se na pasta CAD

Devido a problemas de resolução, os desenhos encontram-se na pasta CAD

Devido a problemas de resolução, os desenhos encontram-se na pasta CAD

Devido a problemas de resolução, os desenhos encontram-se na pasta CAD

Devido a problemas de resolução, os desenhos encontram-se na pasta CAD

ANEXO C

Projeto da base móvel do concentrador solar

Devido a problemas de resolução, os desenhos encontram-se na pasta CAD

Devido a problemas de resolução, os desenhos encontram-se na pasta CAD

Devido a problemas de resolução, os desenhos encontram-se na pasta CAD

Devido a problemas de resolução, os desenhos encontram-se na pasta CAD

Devido a problemas de resolução, os desenhos encontram-se na pasta CAD

ANEXO D

Processo de aferição dos termopares

PROCESSO DE AFERIÇÃO DOS TERMOPARES

Para que se pudesse utilizar os termopares, fez-se necessário a calibração dos mesmos, para tanto foram realizados alguns experimentos de aferição. As figuras 01 e 02 abaixo ilustram o experimento de aferição dos termopares:

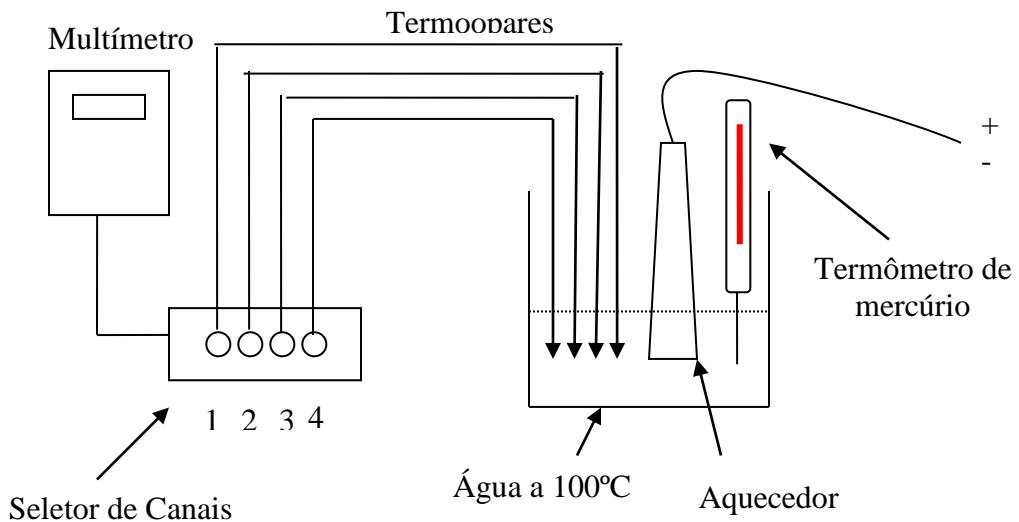


Figura 01 - Aferição dos termopares a 100 °C

Basicamente o experimento consistiu em medir temperaturas previamente conhecidas, no caso as temperaturas de fusão e ebulação da água, respectivamente 0 °C e 100 °C, utilizando como referência também um termômetro de mercúrio com resolução de 0,5 °C.

Primeiramente agrupou-se os termopares em grupos de quatro, de acordo com o comprimento do fio, mergulhando cada grupo em um Becker contendo água em ebulação, utilizando neste ponto o termômetro de mercúrio para confirmar a temperatura. Cada termopar é ligado a um terminal do seletor de canais e este por sua vez é conectado a um multímetro, medindo-se assim a temperatura da água no recipiente.

O mesmo procedimento foi realizado para medir a temperatura de uma mistura de água e gelo a 0°C, junta fria, novamente tendo como referência o termômetro de mercúrio.

A tabela mostra os resultados alcançados no experimento. Como pode-se notar os termopares mostraram-se satisfatórios para serem utilizados no projeto, devido a seu grau de precisão.

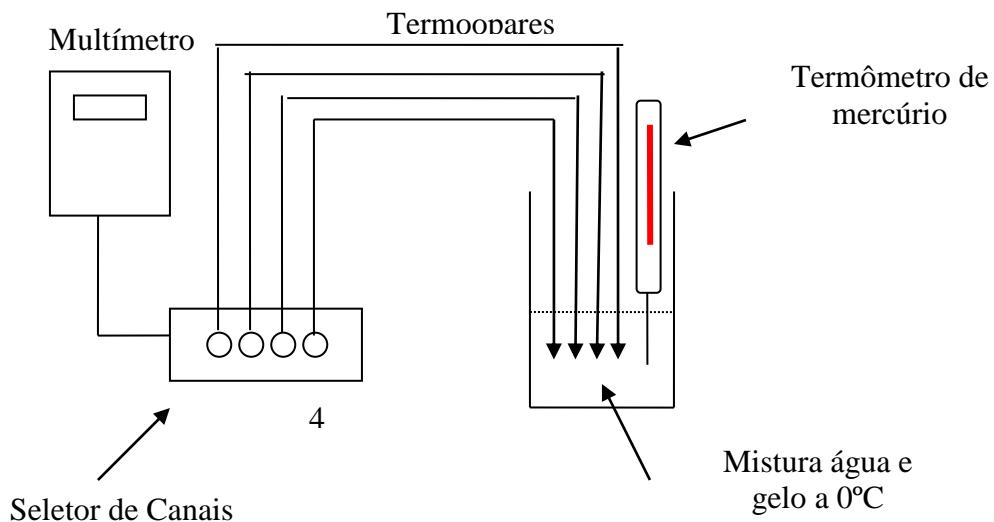


Figura 02 – Aferição dos termopares a 0 °C

Tabela 1 – Resultados obtidos no experimento de aferição dos termopares

Grupo 1 – 4 termopares de 3 m				
Temperatura de referência	T1	T2	T3	T4
101 °C	99°C	99°C	99°C	99°C
0 °C	0°C	0°C	0°C	0°C
Grupo 2 – 4 termopares de 3 m				
Temperatura de referência	T1	T2	T3	T4
101 °C	99°C	99°C	99°C	98°C
0 °C	0°C	0°C	0°C	0°C
Grupo 2 – 4 termopares de 3 m				
Temperatura de referência	T1	T2	T3	T4
100 °C	99°C	98°C	98°C	98°C
0 °C	0°C	0°C	0°C	0°C

ANEXO E

Especificação das mangueiras

FOLHA DE DADOS DA MANGUEIRA DE BORRACHA MARCA GATES (fonte: www.gatesbrasil.com.br)

4 Catálogo de Mangueiras Industriais e Mangotes Gates



MAA 300 - Ar/Água 300 psi

Aplicação: Recomendada para uma vasta gama de aplicações com ar comprimido em equipamentos pneumáticos em geral e para água, podendo apresentar teor alcalino e glicóis. Utilizada geralmente em indústrias, postos de serviços e manutenção em geral, onde se requer boa resistência ao calor, abrasão e intempéries. Não indicada para uso com óleo ou derivados de petróleo.



Construção:

Tubo Interno: Borracha Sintética EPDM.

Reforço: Uma trança de fios sintéticos.

Cobertura: Borracha Sintética EPDM na cor preta.

Temperatura de operação: -40 à +90° C.

Descrição	Diâmetro Interno		Diâmetro Externo	Pressão Máxima de Trabalho		Pressão Mínima de Ruptura		Peso
	pol	mm		psi	kg/cm ²	psi	kg/cm ²	
MAA300 1/4	1/4"	6,4	12,7	300	20	1200	80	0,133
MAA300 5/16	5/16"	7,9	14,5	300	20	1200	80	0,182
MAA300 3/8	3/8"	9,5	17,0	300	20	1200	80	0,194
MAA300 1/2	1/2"	12,7	20,6	300	20	1200	80	0,253
MAA300 5/8	5/8"	15,9	24,1	300	20	1200	80	0,319
MAA300 3/4	3/4"	19,1	28,2	300	20	1200	80	0,420
MAA300 1	1"	25,4	35,6	300	20	1200	80	0,598

Nota: Disponível também nas cores vermelha, verde e azul sob consulta.

ANEXO F

Avaliação do raio critico das mangueiras

MEMORIAL DE CÁLCULO DO ISOLAMENTO TÉRMICO DA MANGUEIRA DE BORRACHA

1) Objetivos:

Analisar a viabilidade técnica da aplicação de isolante térmico sobre a mangueira de borracha de água aquecida pelo concentrador solar.

Serão utilizados conceitos de transferência de calor por condução sob as seguintes hipóteses:

- a. Geometria cilíndrica
- b. Condução unidimensional na direção r
- c. Regime Permanente
- d. Propriedades termofísicas são consideradas constantes
- e. O conceito de Raio crítico é aplicável
- f. O conceito de Resistência Térmica é aplicável

2) Levantamento de dados:

2.1) Dados da Mangueira de Borracha: (folha de dados em anexo)

- Especificação: MAA 300 $\frac{3}{4}$ " (19,1mm) AR/ÁGUA - 300psi
- Fabricante: Gates (www.gatesbrasil.com.br)
- Diâmetro externo (De): 28,0mm
- Diâmetro interno (Di): 20,0mm
- Comprimento: 12m aprox.
- Espessura de Parede (e): 4,0mm
- Material: borracha sintética EPDM

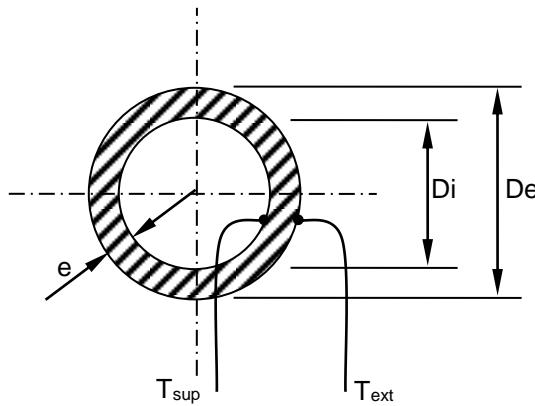


Figura 1 - Indicações das dimensões da mangueira de borracha e temperaturas

2.2) Estimativa da Condutividade Térmica de borracha vulcanizada (segundo Incropera e DeWitt)

- Borracha vulcanizada macia: $k = 0,13 \text{ W/m.K}$
- Borracha vulcanizada dura: $k = 0,16 \text{ W/m.K}$

2.3) Estimativa do coeficiente de convecção natural para a mangueira sobre solo gramado, sujeito a vento de baixa velocidade (< 1m/s):

- $h_{\min} = 5 \text{ W/m}^2.\text{K}$
- $h_{\max} = 20 \text{ W/m}^2.\text{K}$

2.4) Temperaturas de referência para avaliação da variação da troca térmica com a aplicação do isolamento:

- $T_{\text{sup}} = 100^{\circ}\text{C}$
- $T_{\infty} = 30^{\circ}\text{C}$

3) Avaliações da Resistência Térmica Total:

A avaliação das resistências térmicas será feita por cenários extremos, considerando-se as estimativas das propriedades termofísicas que levem ao cálculo das resistências térmicas máxima e mínima estimadas.

O circuito de resistências térmicas equivalentes correspondente a mangueira de borracha é visualizado na fig. 2, onde:

$$R'_{\text{cond1}} = \ln(r_{\text{ext}}/r_{\text{int}})/(2 \cdot \pi \cdot k_{\text{borracha}})$$

$$R'_{\text{conv}} = 1/(2 \cdot \pi \cdot h)$$

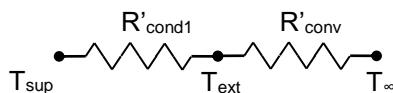


Figura 2 - Circuito de resistências térmicas equivalentes da mangueira de borracha

Assim, levando-se em consideração os dados do problema, as estimativas da resistência térmica total ficam quantificadas como:

$$R'_{\text{total}} = R'_{\text{cond1}} + R'_{\text{conv}}$$

3.1) Avaliação da Resistência Térmica Total Mínima:

$$\begin{aligned} \Rightarrow R'_{\text{total,min}} &= \ln(r_{\text{ext}}/r_{\text{int}})/(2\pi k_{\text{max}}) + 1/(2\pi h_{\text{max}}) \\ \Rightarrow R'_{\text{total,min}} &= \ln(14/10)/(2\pi 0,16) + 1/(2\pi 20) \\ \Rightarrow R'_{\text{total,min}} &= 0,33 + 0,008 \\ \Rightarrow \mathbf{R'_{\text{total,min}} = 0,34 \text{ K.m/W}} \end{aligned}$$

3.2) Avaliação da Resistência Térmica Total Máxima:

$$\begin{aligned} \Rightarrow R'_{\text{total,max}} &= \ln(r_{\text{ext}}/r_{\text{int}})/(2\pi k_{\text{min}}) + 1/(2\pi h_{\text{min}}) \\ \Rightarrow R'_{\text{total,max}} &= \ln(14/10)/(2\pi 0,13) + 1/(2\pi 5) \\ \Rightarrow R'_{\text{total,max}} &= 0,82 + 0,38 \\ \Rightarrow \mathbf{R'_{\text{total,max}} = 1,2 \text{ K.m/W}} \end{aligned}$$

4) Avaliações dos Fluxos de Calor:

O fluxo de calor trocado pela mangueira é estimado como:

$$Q' = (T_{\text{sup}} - T_{\infty}) / R'_{\text{total}}$$

Assim,

4.1) Avaliação do Fluxo de Calor Mínimo:

$$\begin{aligned} Q'_{\text{min}} &= (100-30) / R'_{\text{total,max}} \\ \Rightarrow Q'_{\text{min}} &= (100-30) / 1,2 \\ \Rightarrow \mathbf{Q'_{\text{min}} = 58,3 \text{ W/m}} \end{aligned}$$

4.2) Avaliação do Fluxo de Calor Máximo:

$$\begin{aligned}
 Q'_{\max} &= (100-30) / R'_{\text{total,min}} \\
 \Rightarrow Q'_{\max} &= (100-30) / 0,34 \\
 \Rightarrow Q'_{\max} &= \mathbf{205,9 \text{ W/m}}
 \end{aligned}$$

5) Avaliações do Raio Crítico

Tal como foi feito na estimativa da resistência térmica, também o Raio Crítico será avaliado em cenários extremos de mínimo e de máximo.

5.1) Avaliação do Raio Crítico Mínimo

$$\begin{aligned}
 R_{\text{crit,min}} &= k_{\text{menor}} / h_{\text{maior}} \\
 \Rightarrow R_{\text{crit,min}} &= 0,13 / 20 = 0,0065 \\
 \Rightarrow R_{\text{crit,min}} &= 6,5 \text{ mm} \\
 \Rightarrow D_{\text{crit,min}} &= \mathbf{13,0 \text{ mm}}
 \end{aligned}$$

5.2) Avaliação do Raio Crítico Máximo

$$\begin{aligned}
 R_{\text{crit,max}} &= k_{\text{maior}} / h_{\text{menor}} \\
 \Rightarrow R_{\text{crit,max}} &= 0,16 / 5 = 0,032 \\
 \Rightarrow R_{\text{crit,max}} &= 32,0 \text{ mm} \\
 \Rightarrow D_{\text{crit,max}} &= \mathbf{64,0 \text{ mm}}
 \end{aligned}$$

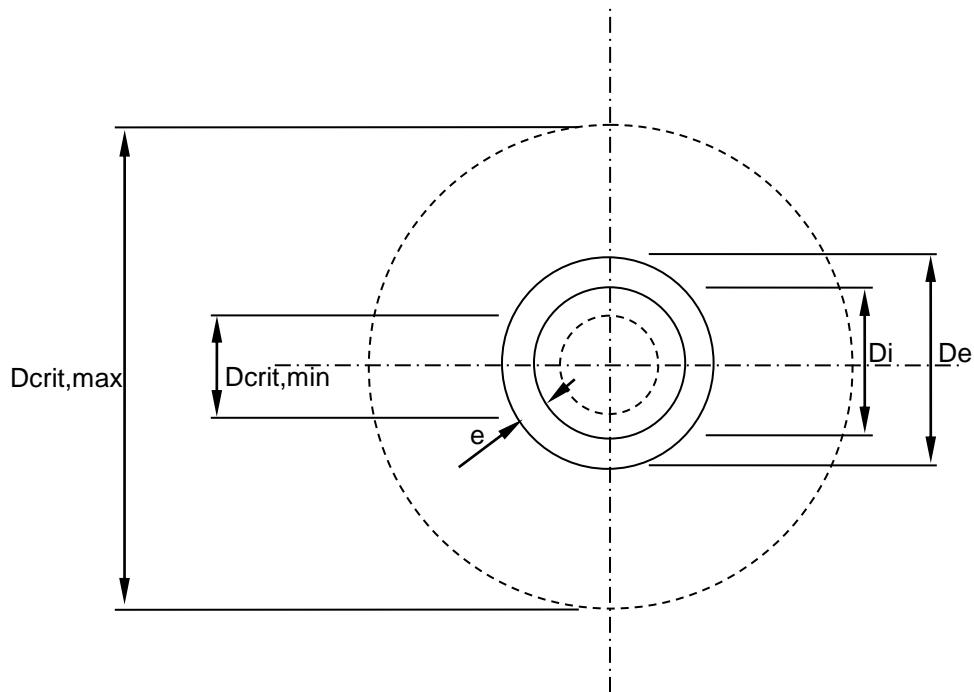


Figura 3 - Comparação das dimensões da mangueira com os diâmetros críticos máximo e mínimo estimados

6) Conclusão

Como os diâmetros interno e externo da mangueira de borracha aproximam-se das avaliações dos diâmetros críticos máximo e mínimo é então justificada a opção pela aplicação de isolamento externo à mangueira, tal como projetado na fig. 4.

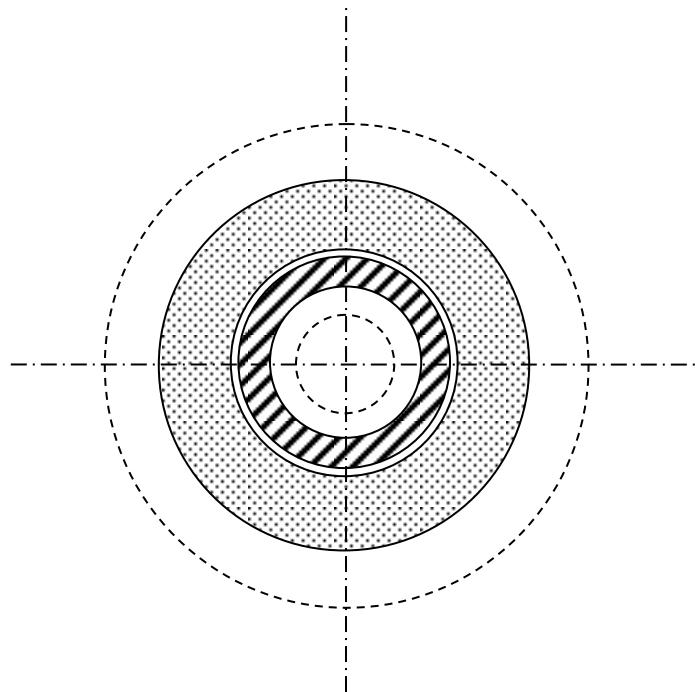


Figura 4 - Projeto de aplicação de isolamento térmico sobre a mangueira de borracha

A aplicação de isolamento térmico além de inserir mais uma resistência térmica de condução, devido a parede de material isolante propriamente dito, ainda insere resistências térmicas de condução devido a instalação da fita protetora do isolamento e duas resistências térmicas de contato devido às respectivas interfaces.

6.1) Dados do Isolante Térmico: (folha de dados em anexo)

- Especificação: Isolante térmico flexível de polietileno
- Fabricante: Polipex (www.polipex.com.br)
- Diâmetro externo (D₂): 48,0mm
- Diâmetro interno (D₃): 38,0mm
- Espessura de Parede (e): 10,0mm
- Material: Polietileno Expandido
- Condutividade Térmica: 0,035 W/m.K

6.2) Avaliações da Resistência Térmica Total da mangueira isolada:

O circuito de resistências térmicas equivalentes passa a ser, então, como mostrado na fig. 5.

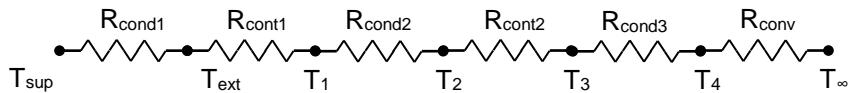


Figura 5 - Circuito térmico equivalente da mangueira isolada

Sendo que as resistências térmicas de contato (R_{cont}) foram estimadas como:

$$\begin{aligned}
 R''_{cont} &= 0,4 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \text{ (segundo Incropera & DeWitt)} \\
 \Rightarrow R'_{cont} &= 0,4 \times 10^{-4} \cdot (2 \cdot \pi \cdot r_{ext}) = 0,4 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 14 \times 10^{-3}) = 0,0035 \text{ m.K/W} \\
 \Rightarrow R'_{cont} &= 0,4 \times 10^{-4} \cdot (2 \cdot \pi \cdot 14 \times 10^{-3}) \\
 \Rightarrow R'_{cont} &= 0,35 \times 10^{-6} \text{ m.K/W}
 \end{aligned}$$

Como a estimativa de R'_{cont} se mostrou extremamente baixa em relação as outras resistências térmicas, será adotado o valor 0 (zero) para essa resistência.

A resistência térmica imposta pela fita plástica de proteção também será considerada 0 (zero), devido a sua pequena espessura (aprox. 0,1mm).

Então:

- $R'_{\text{cond1}} = \ln(r_{\text{ext}}/r_{\text{int}})/(2\pi k_{\text{borracha}})$
- $R'_{\text{cont1}} = 0, \text{ m.K/W}$
- $R'_{\text{cond2}} = \ln(r_2/r_{\text{ext}})/(2\pi k_{\text{isolante}})$
- $R'_{\text{cont2}} = 0, \text{ m.K/W}$
- $R'_{\text{cond3}} = \ln(r_3/r_2)/(2\pi k_{\text{fita protetora}})$
- $R'_{\text{conv}} = 1/(2\pi h)$

Assim, levando-se em consideração a proposta de aplicação de isolante térmico, as estimativas da resistência térmica total ficam quantificadas como:

$$R'_{\text{total isolada}} = R'_{\text{cond1}} + R'_{\text{cont1}} + R'_{\text{cond2}} + R'_{\text{cont2}} + R'_{\text{cond3}} + R'_{\text{conv}}$$

6.2.1) Avaliação da Resistência Térmica Total Mínima:

$$\begin{aligned} \Rightarrow R'_{\text{total isolada,min}} &= \ln(r_{\text{ext}}/r_{\text{int}})/(2\pi k_{\text{max}}) + R'_{\text{cont1}} + \ln(r_2/r_{\text{ext}})/(2\pi k_{\text{isolante}}) + \\ &\quad + R'_{\text{cont2}} + \ln(r_3/r_2)/(2\pi k_{\text{fita protetora}}) + 1/(2\pi h_{\text{max}}) \\ \Rightarrow R'_{\text{total isolada,min}} &= \ln(14/10)/(2\pi 0,16) + 0 + \ln(24/16)/(2\pi 0,035) + 0 + 0 + \\ &\quad + 1/(2\pi 0,20) \\ \Rightarrow R'_{\text{total isolada,min}} &= 0,33 + 1,84 + 0,008 \\ \Rightarrow \mathbf{R'_{\text{total isolada,min}} &= 2,18 \text{ K.m/W}} \end{aligned}$$

6.2.2) Avaliação da Resistência Térmica Total Máxima:

$$\begin{aligned} \Rightarrow R'_{\text{total isolada,max}} &= \ln(r_{\text{ext}}/r_{\text{int}})/(2\pi k_{\text{min}}) + R'_{\text{cont1}} + \ln(r_2/r_{\text{ext}})/(2\pi k_{\text{isolante}}) + \\ &\quad + R'_{\text{cont2}} + \ln(r_3/r_2)/(2\pi k_{\text{fita protetora}}) + 1/(2\pi h_{\text{min}}) \\ \Rightarrow R'_{\text{total isolada,max}} &= \ln(14/10)/(2\pi 0,13) + 0 + \ln(24/16)/(2\pi 0,035) + 0 + 0 + \\ &\quad + 1/(2\pi 0,5) \\ \Rightarrow R'_{\text{total isolada,max}} &= 0,82 + 1,84 + 0,38 \\ \Rightarrow \mathbf{R'_{\text{total isolada,max}} &= 3,04 \text{ K.m/W}} \end{aligned}$$

6.3) Avaliações dos Fluxos de Calor da mangueira isolada:

6.3.1) Avaliação do Fluxo de Calor Mínimo:

$$\begin{aligned} Q'_{\text{isolada,min}} &= (100-30) / R'_{\text{total isolada,max}} \\ \Rightarrow Q'_{\text{isolada,min}} &= (100-30) / 3,04 \\ \Rightarrow \mathbf{Q'_{\text{isolada,min}}} &= \mathbf{23,02 \text{ W/m}} \end{aligned}$$

6.3.2) Avaliação do Fluxo de Calor Máximo:

$$\begin{aligned} Q'_{\text{isolada,max}} &= (100-30) / R'_{\text{total isolada,min}} \\ \Rightarrow Q'_{\text{isolada,max}} &= (100-30) / 2,18 \\ \Rightarrow \mathbf{Q'_{\text{isolada,max}}} &= \mathbf{32,11 \text{ W/m}} \end{aligned}$$

6.4) Diferenças estimadas no Fluxo de Calor:

6.4.1) Estimativa Mínima de Redução do Fluxo de Calor:

$$\begin{aligned} \Delta Q_{\text{min}} &= (Q'_{\text{isolada,min}} - Q'_{\text{min}}) / Q'_{\text{min}} \times 100\% \\ \Delta Q_{\text{min}} &= (23,02 - 58,3) / 58,3 \\ \Delta Q_{\text{min}} &= \mathbf{0,60 = 60\%} \end{aligned}$$

6.4.2) Estimativa Máxima de Redução do Fluxo de Calor:

$$\begin{aligned} \Delta Q_{\text{max}} &= (Q'_{\text{isolada,max}} - Q'_{\text{min}}) / Q'_{\text{min}} \times 100\% \\ \Delta Q_{\text{max}} &= (32,11 - 205,9) / 205,9 \\ \Delta Q_{\text{max}} &= \mathbf{0,84 = 84\%} \end{aligned}$$

Conclusão: Levando-se em consideração as hipóteses adotadas, a troca térmica pela parede da mangueira deve ser reduzida entre 60 a 84% pela aplicação do isolante térmico de polietileno expandido.

ANEXO G

Especificações do isolamento térmico

**FOLHA DE DADOS DO TUBO ISOLANTE DE POLIETILENO EXPANDIDO MARCA
POLIPEX (fonte: www.polipex.com.br)**



Medidas padrão da linha de fabricação

Material	Polietileno expandido
Estrutura Celular	Fechada. Aproximadamente 400 células/cm ²
Densidade	35,0 ± 5,0 kg/m ³
Condutividade Térmica	0,035 W/mK ou 0,030 Kcal/mh a 20º C
Absorção da Água	< 0,4% em volume após 28 dias de imersão, conforme Norma DIN 53428
Difusão de Vapor d'água	0,902 g/m ² d p/15mm, conforme Norma DIN 53122
Contratividade Térmica	< 1% após 96 horas a 80º C
Faixa de Efetividade de Isolamento	- 70º C a + 90º C
Absorção de Ruídos	Conforme DIN 4109
Retardante à Chama	Conforme Normas NBR 11948/1992 e NBR 7358/1988 R2
Resistência a Tração Horizontal e Vertical	2,6 kg/cm ² com 24,5 kg/m ³ de densidade, conforme Norma ASTM-O-1623-78
Resistência ao ambiente	Inalterado, conforme Norma ASTM-G-23

Tolerâncias Dimensionais

Tubos		Mantas	
Comprimento	1,50%	Comprimento	Bobinas
Diâmetro Interno	+2mm	Largura	± 3%
Espessuras	± 1mm	Espessura	± 10%

As normas e especificações citadas são referências orientativas para ensaios



Medidas padrão da linha de fabricação

Tubos em barras de 2m						
mm	Diâmetros nominais		Espessuras			
	Polegadas		mm			
	cobre	ferro	5	10	15	20
6,5	1/4"			6,5x10		
8	5/16"			8x10		
10	3/8"	1/8"		10x10	10x15	
13	1/2"			13x10	13x15	
15	5/8"	1/4"	15x05	15x10	15x15	15x20
19	3/4"	3/8"		19x10	19x15	19x20
22	7/8"	1/2"	22x05	22x10	22x15	22x20
25	1"			25x10	25x15	25x20
28	11/8"	3/4"	28x05	28x10	28x15	28x20
32	11/4"			32x10	32x15	32x20
35	13/8"	1"		35x10	35x15	35x20
38	11/2"			38x10	38x15	38x20
42	15/8"	11/4"		42x10	42x15	42x20
48	17/8"	11/2"		48x10	48x15	48x20
51	2"			51x10	51x15	51x20
54	21/8"			54x10	54x15	54x20
66	25/8"	2"		66x10	66x15	66x20

ANEXO H

Processo de calibração do rotâmetro

CALIBRAÇÃO DO ROTÂMETRO

O rotâmetro é um instrumento de medição de vazão que se constitui de um tubo graduado em “mm”, contendo uma esfera de aço em seu interior. Ao fazer o fluido o passar no interior deste tubo a esfera tende a movimentar-se devido a força de arrasto, a medida que se aumenta a vazão aumenta-se consequentemente a força de arrasto fazendo a esfera alcançar maiores alturas. O experimento foi bem simples e consistiu em medir o tempo necessário para encher um Becker de 1000 ml em cada uma das posições ocupadas pela esfera, a medida que se abria o registro.

A tabela mostra a relação obtida entre a leitura do rotâmetro e a vazão:

Tabela – Correspondência entre a altura indicada pela esfera do rotâmetro e a vazão

Leitura do visor do rotâmetro (mm)	Vazão (ml/s)
10	1,25
20	3,25
30	5,00
40	7,09
50	9,17
60	11,23
70	13,33
80	15,38
90	17,24
100	19,23
110	20,00
120	22,22
130	25,00
140	27,02
150	29,41

ANEXO I

Variação da temperatura superficial com o tempo para os três tipos de superfície

VARIAÇÃO DA TEMPERATURA SUPERFICIAL COM O TEMPO PARA OS TRÊS TIPOS DE SUPERFÍCIES

Uma das dúvidas que surgiu durante o projeto era a da influencia da refletividade da superfície do tubo de cobre sobre a eficiência do concentrador, pois existiam três possíveis formas de utilizar o tubo: recoberto com uma camada de tinta preta fosca, com a superfície polida ou recoberta com sua camada natural de óxido. Para definir qual seria a melhor forma de utilizá-lo foi realizada uma experiência simples, que consistiu em expor dois pequenos pedaços do tubo ao sol, um recoberto com tinta preta fosca e outro possuindo metade de sua superfície lixada e a outra em seu estado natural recoberta com uma camada de óxido, desta forma fixou-se um termopar sobre cada um dos três tipos de superfícies e realizou-se tomadas de temperatura em determinados intervalos de tempo, conforme a tabela 1:

Tabela 1 – Variação da temperatura superficial com o tempo para os três tipos de superfícies

Tempo (minutos)	Superfície recoberta com tinta	Superfície natural do cobre	Superfície lixada
0	34 °C	34 °C	34 °C
10	42 °C	41 °C	39 °C
20	47 °C	43 °C	42 °C
30	50 °C	47 °C	44 °C

Como já era esperado a superfície recoberta com tinta preta fosca possui a menor refletividade, logo absorve melhor a energia luminosa.

ANEXO J

Projeto dos anéis de nylon

Devido a problemas de resolução, os desenhos encontram-se na pasta CAD

ANEXO L

Projeto da base móvel do circuito fechado

Devido a problemas de resolução, os desenhos encontram-se na pasta CAD

Devido a problemas de resolução, os desenhos encontram-se na pasta CAD

Devido a problemas de resolução, os desenhos encontram-se na pasta CAD

Devido a problemas de resolução, os desenhos encontram-se na pasta CAD

Devido a problemas de resolução, os desenhos encontram-se na pasta CAD

Devido a problemas de resolução, os desenhos encontram-se na pasta CAD