

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE AQUECIMENTO FAZENDO USO DE  
HIDROGÊNIO ELETROLÍTICO COMO FONTE DE ENERGIA**

**MIRIAM CLEIDE CAVALCANTE DE AMORIM**

---

**Campina Grande - PB**

**Agosto de 1995**

---

MIRIAM CLEIDE CAVALCANTE DE AMORIM

**AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE AQUECIMENTO FAZENDO USO DE  
HIDROGÊNIO ELETROLÍTICO COMO FONTE DE ENERGIA**

*Dissertação apresentada no curso de  
mestrado em Engenharia Química da  
Universidade Federal da Paraíba, em  
cumprimento as exigências para obtenção  
do grau de Mestre (M.Sc.)*

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: OPERAÇÕES E PROCESSOS

ORIENTADOR: KEPLER BORGES FRANÇA (Ph. D)

CO - ORIENTADOR: JÚLIO GOLDFARB (M.Sc.)

Campina Grande - PB

1995

75-55-55 1888



A524a Amorim, Miriam Cleide Cavalcante de  
Avaliacao de um sistema de aquecimento fazendo uso de hidrogenio eletrolitico como fonte de energia / Miriam Cleide Cavalcante de Amorim. - Campina Grande, 1995.  
89 f. : il.

Dissertacao (Mestrado em Engenharia Quimica) - Universidade Federal da Paraiba, Centro de Ciencias e Tecnologia.

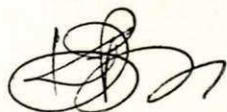
1. Hidrogenio Eletrolitico 2. Sistema de Aquecimento 3. Fonte de Energia 4. Dissertacao I. Franca, Kepler Borges, Dr. II. Goldfarb, Julio, M.Sc. III. Universidade Federal da Paraiba - Campina Grande (PB)

CDU 661.96(043)

**AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE AQUECIMENTO FAZENDO USO DE  
HIDROGÊNIO ELETROLÍTICO COMO FONTE DE ENERGIA**

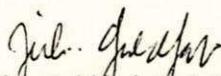
Dissertação aprovada em 11/08/1995

**BANCA EXAMINADORA:**



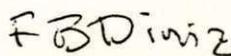
**Kepler Borges França (Ph. D)**

**Orientador**



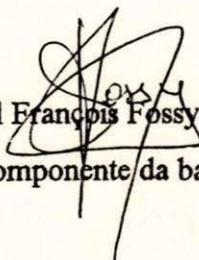
**Júlio Goldfarb (M. Sc.)**

**Co-orientador**



**Flamarion Borges Diniz (Ph. D)**

**Componente da banca**



**Michel François Fossy (Ph. D)**

**Componente da banca**

## DEDICATÓRIA

A meus queridos pais e irmãos

A Luiz Júnior

A Maria de Fátima Sousa

## AGRADECIMENTOS

Ao amigo e orientador Kepler Borges França, pela orientação, incentivo e desempenho no desenvolvimento desse trabalho.

Ao co-orientador professor Júlio Goldfarb, pela atenção, apoio e dedicação na construção do sistema e elaboração desse trabalho.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro.

As Empresas Dow Produtos Químicos Ltda na pessoa do Sr. José Portinho Júnior, pela doação do fluido térmico.

Aos funcionários do NERG (Núcleo de Energia) em especial Fransisco S. B. de Gusmão e Gervásio Gomes, pelo apoio na construção do equipamento.

A Maria José B. Cavalcanti, pela dedicação à organização do curso e colaboração na confecção final das figuras.

Aos mestrandos Oswaldo Soares, Maurício Motta e Flávio Pequeno pela colaboração prestada.

Ao Departamento de Engenharia Química, funcionários professores e amigos pela colaboração e incentivo à esta realização.

## RESUMO

Este trabalho tem por objetivo a viabilização do hidrogênio obtido a partir da eletrólise da água como fonte de energia para aquecimento de ambientes, visando a substituição dos combustíveis carbonáceos poluentes. Através da combustão do hidrogênio obtido de um eletrolisador bipolar de 2 kw/h, foi utilizado um dissipador de calor para estudar a performance de dois fluidos térmicos: água e óleo orgânico Dowtherm \*G.

Foram realizados diversos testes para dois ambientes de volumes diferentes, utilizando inicialmente água e em seguida o óleo orgânico como fluidos térmicos. Observou-se que o sistema apresentou desempenhos diferenciados para os dois ambientes em estudo. Em função dos resultados foi observado que o fluido óleo orgânico Dowtherm \*G ofereceu melhores resultados quando comparados com aqueles obtidos com a água.

Os resultados obtidos são promissores e mostram amplas possibilidades de emprego do hidrogênio eletrolítico utilizado em trocadores de calor especialmente projetados para aquecimento de ambientes.

## ABSTRACT

The objective this work is to evaluate the application of hydrogen obtained from electrolyse of the water as source of energy to indoors heating as an alternative to carbonous poluents fuels. A electrodiaser of 2 KWh was used with two different thermic fluids: water and organic oil Dowtherm \*G.

Several testes were performed at two different volumes rooms using both thermic fluids. It was observed that the fluid Dowtherm \*G presented better results than the system operating with water.

## SIMBOLOGIA

A	- Área da célula
AC	- Corrente Alternada
DC	- Corrente Contínua
E	- Voltagem mínima ou teórica para que possa ocorrer a eletrólise
$e^-$	- Elétron
$E_o$	- Tensão reversível da célula
$E_n$	- Energia requerida na eletrólise
F	- Constante de Faraday
I	- Corrente da célula em Ampère
J	- Joule
j	- Densidade de corrente
kA	- Quilo Ampère
kAh	- Quilo Ampère hora
$n_o$	- Número de moles
N	- Normais
n	- Número de elétrons transferidos por molécula na reação
P	- Potência consumida em kwh
$P_1$	- Pressão inicial dos gases
$P_2$	- Pressão final dos gases
ppm	- Partes por milhão
R	- Constante dos gases
$R_G$	- Taxa de geração de hidrogênio
$R_o$	- Resistência Ohmica
$R_t$	- Rendimento térmico
$T_a$	- Temperatura do ambiente interno
$T_{ai}$	- Temperatura do ambiente interno inicial
$T_{af}$	- Temperatura do ambiente interno final
$T_{e1}^a$	- Temperatura de entrada no início do dissipador utilizando água

$T_{e2}^a$	- Temperatura de entrada ao final do dissipador utilizando água
$T_{e1}^o$	- Temperatura de entrada no início do dissipador utilizando óleo
$T_{e2}^o$	- Temperatura de entrada ao final do dissipador utilizando óleo
$T_{ext}$	- Temperatura do ambiente externo
$T_{extf}$	- Temperatura do ambiente externo final
$T_{s1}^a$	- Temperatura de saída ao final do dissipador utilizando água
$T_{s2}^a$	- Temperatura de saída no início do dissipador utilizando água
$T_{s1}^o$	- Temperatura de saída ao final do dissipador utilizando óleo
$T_{s2}^o$	- Temperatura de saída no início do dissipador utilizando óleo
$\bar{T}$	- Média das temperaturas
V	- Tensão real ou prática aplicada à célula

#### Letras Gregas

$\Delta E$	- Aumento mínimo da voltagem
$\Delta G$	- Variação da energia Livre de Gibbs
$\Delta H$	- Variação de entropia
$\Delta Q_i$	- Calor irreversível dissipado dentro da célula
$\Delta Q_r$	- Calor endotérmico reversível requerido na reação de eletrólise
$\Delta T_a^o$	- Diferença entre as temperaturas do ambiente interno finais e iniciais, utilizando óleo orgânico Dowtherm *G.
$\Delta T_{ext}^o$	- Diferença entre as temperaturas do ambiente externo finais e iniciais, utilizando óleo orgânico Dowtherm *G.
$\eta_a$	- Sobretenção anódica
$\eta_c$	- Sobretenção catódica
$\eta_t$	- Sobretenção total da célula

# ÍNDICE

Capítulo I - Introdução .....	01
Capítulo II - Fundamentos Teóricos	
2.1 - Hidrogênio .....	02
2.2.1 - Propriedades Físicas e Químicas .....	03
2.1.2 - Processos de Obtenção .....	04
2.2 - Geração do Hidrogênio Eletrolítico .....	05
2.2.1 - Princípios da Eletrólise da Água .....	05
2.2.2 - Reações na Eletrólise da Água .....	06
2.2.3 - Tensão em uma Célula Eletrolítica .....	07
2.2.4 - Sobretensões .....	10
2.2.5 - Densidade de Corrente da Célula .....	11
2.2.6 - Curvas de Polarização .....	11
2.2.7 - Efeito da Temperatura e da Pressão .....	12
2.2.8 - Energia Requerida na Eletrólise .....	13
2.2.9 - Componentes Básicos de uma Célula Eletrolítica .....	15
2.2.10 - Tipos Básicos de Eletrolisadores .....	17
2.3 - Transporte de Calor .....	20
2.3.1 - Sistemas com Fluidos Térmicos .....	20
2.3.2 - Fluidos orgânicos Sintéticos .....	21
Capítulo III - Materiais e Métodos	
3.1 - Objetivos .....	22
3.2 - Material Utilizado .....	22
3.3 - Sistema de Produção de Hidrogênio/Oxigênio .....	24

3.4 - Sistema Térmico .....	29
3.5 - Metodologia .....	33
3.5.1 - Instalação do Sistema .....	33
3.5.2 - Operação com os Sistemas Eletrolítico e Térmico .....	33
3.5.3 - Regulagem da Chama e Posicionamento do Maçarico .....	34
3.5.4 - Fluidos Térmicos Utilizados .....	34
3.5.5 - Obtenção do Dados .....	35
3.5.6 - Finalização de Operação .....	36
3.5.7 - Abastecimentos .....	37
3.5.8 - Consumo de Energia .....	37

#### Capítulo IV - Resultados e Discussões

4.1 - Variação da Temperatura em Função do Tempo para os Fluidos: Água e Óleo Dowtherm *G.....	38
4.2 - Perfil de Temperatura ao Longo do Dissipador de Calor.....	49
4.3 - Variação da Temperatura em Função do Volume do Ambiente.....	53
4.4 - Consumo de energia e Produção de Hidrogênio.....	62

Capítulo V - Conclusões.....	65
------------------------------	----

Capítulo VI - Sugestões.....	66
------------------------------	----

Bibliografia .....	67
Apêndice A .....	70
Apêndice B .....	72
Apêndice C .....	73
Apêndice D.....	75
Apêndice E.....	89

## CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

A questão ambiental é uma das preocupações fundamentais da presente geração. Atualmente o petróleo é a fonte básica de produção de combustíveis, os quais trazem consequências nocivas ao meio ambiente. Pesquisadores já comprovaram o esgotamento da quantidade de petróleo e a impossibilidade de ser repostos. A certeza da extinção das reservas petrolíferas e os danos causados ao meio ambiente incitou as pesquisas de novas fontes energéticas. Como substituto aos combustíveis derivados do petróleo muitos energéticos têm sido considerados como possíveis, e entre esses o hidrogênio é o mais promissor e provável combustível do futuro uma vez que, é um combustível não poluente, tanto na sua queima como na sua produção, desde que sejam tomadas as devidas precauções.

O hidrogênio, apesar de conhecido desde o século XVI, só a partir do desenvolvimento do processo de síntese da amônia em 1913 e da primeira Guerra Mundial (1914-1919), passou a apresentar um interesse industrial, sendo produzido em maior quantidade. Entretanto, apenas a partir da Segunda Guerra Mundial (1939-1945), através da redução de custos devido ao desenvolvimento tecnológico e aos baixos preços do gás natural é que passou a ser produzido e utilizado em larga escala (SILVA,1991). O grande volume de recursos dispendidos por diversas nações, associado ao número de pesquisadores e técnicos atualmente envolvidos na pesquisa e desenvolvimento da tecnologia do hidrogênio, tem sido responsável pelos avanços ocorridos nesta área, permitindo-se prever-se para breve novas aplicações e tecnologias de geração e utilização do hidrogênio.

O Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal da Paraíba-UFPB, juntamente com o Núcleo de Energia, tem desenvolvido desde 1980 pesquisas na área de geração de Hidrogênio eletrolítico e a partir de fontes alternativas eólicas e solar, como também na aplicação do hidrogênio e oxigênio eletrolíticos em máquinas de solda e corte.

O trabalho aqui apresentado trata da aplicação do hidrogênio eletrolítico como fonte de calor para aquecer pequenos ambientes. A pesquisa tem como finalidade dar início a viabilização do uso do hidrogênio, obtido a partir da eletrólise bipolar da água, como fonte de energia em substituição aos combustíveis carbonáceos poluentes.

## CAPÍTULO II - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1- HIDROGÊNIO

A descoberta do hidrogênio se deve provavelmente a Theophrastus Bombastus von Hoheinheim (Paracelsus) em 1500.

Apresenta-se sob a forma gasosa, incolor, inodoro, sem sabor e não tóxico à temperatura ambiente; ou líquido abaixo de  $-235\text{ }^{\circ}\text{C}$  à pressão normal, o que indica ser de difícil liquefação. Seu valor energético à pressão constante é de 34000 kcal/kg contra 10000 kcal/kg para um derivado de petróleo (PERRIER, 1980).

O hidrogênio possui três isótopos, dos quais, dois estáveis (hidrogênio comum ou prótio e o hidrogênio pesado ou deutério) e um terceiro instável (trítio). O comum massa 1, forma 99,98% do elemento natural; o deutério, massa 2, forma 0,02%; e o trítio, massa 3, ocorre em quantidades desprezíveis na natureza. Pode ser encontrado em estado natural na atmosfera, em quantidades inferiores a 1 ppm, e associados a gases vulcânicos e ao gás natural. Combinado com outros elementos, constitui-se no terceiro elemento mais abundante da terra, e o primeiro no Universo, onde estima-se que represente 90% do total de átomos existentes.

O hidrogênio não é uma fonte primária de energia; não sendo encontrado em minas ou jazidas, e nem é produzido em grandes quantidades, através de processos naturais espontâneos. Por outro lado, pode ser gerado por meio de um grande número de processos artificiais envolvendo diversas fontes primárias, tais como o carvão, o petróleo, energia solar, eólica, nuclear, etc. Reciprocamente o hidrogênio pode ser reconvertido em muitos casos na fonte primária original, ou em outra forma de energia, ou ainda outro energético (SILVA, 1992).

### 2.1.1 - PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS

O hidrogênio comum tem peso atômico 1,00797, peso molecular 2,01594, valência 1 e estrutura cristalina cúbica. Seu átomo possui um potencial de ionização de 13,54 volts.

É pouco solúvel na água (0,0214 volumes/volume de água à 0°C), apresentando maior solubilidade em solventes orgânicos (0,078 volumes/volume de etanol à 25°C). Depois do hélio é o gás que apresenta maior dificuldade para ser liqüefeito (SILVA, 1991). Tem viscosidade menor que o ar e condutividade térmica sete vezes maior que o ar (PERRIER, 1980).

O hidrogênio queima em ar com uma chama azul muito pálida quase invisível. A temperatura de ignição de misturas hidrogênio/ar e hidrogênio/oxigênio varia de acordo com a composição, pressão, umidade e temperatura inicial. À pressão atmosférica a temperatura de ignição dessas misturas encontra-se na faixa de 565 a 579° C. Os limites de inflamabilidade de misturas hidrogênio/ar e hidrogênio/oxigênio dependem da pressão e temperatura iniciais e da umidade. Em ar seco à pressão atmosférica o limite inferior é 4,1% de hidrogênio e o superior 74,2% de hidrogênio em volume. Em oxigênio seco à pressão atmosférica o limite inferior é 4,7% de hidrogênio e 93,9% de hidrogênio em volume. O hidrogênio líquido possui coeficiente de expansão térmica alto quando comparado com outros líquidos criogênicos .

Contrariamente a muitos gases, os mais comuns  $O_2$  ,  $N_2$  , e  $CO_2$  o hidrogênio aquece se sua expansão for muito rápida (MANUAL CODETEC). O apêndice A relaciona as principais propriedades físicas do hidrogênio.

É o elemento químico mais leve que se conhece (15 vezes menos pesado que o ar: densidade de 0,0695 em relação ao ar) produz evacuação rápida de fugas eventuais, e portanto, menor risco ( PERRIER,1980). Possui atividade química muito grande e é muito inflamável na presença de oxigênio e ar. Produz ácidos por combinação direta com os halogênios, forma hidretos estáveis quando reage com os não metais (exceto gases inertes) e forma hidretos instáveis a reação com alguns metais.

Normalmente o hidrogênio se apresenta na forma molecular diatômica, dissociando-se a altas temperaturas, em átomos livres de acordo com a reação (2.1), cujo calor de dissociação é de 104,2 kcal/mol à 25°C (SILVA,1987).



Na sua forma atômica apresenta-se como forte agente redutor, mesmo em temperaturas ordinárias, reagindo com óxidos e cloretos de metais. Como maior constituinte dos compostos orgânicos forma com estes um grande número de reações sendo particularmente importante as de “craking” de compostos orgânicos, de redução de compostos insaturados e de hidrogenação, onde o hidrogênio é introduzido nos compostos quase sempre na presença de catalisadores como níquel e outros (SILVA, 1991).

### 2.1.2 - PROCESSOS DE OBTENÇÃO

Os processos de produção do hidrogênio são inúmeros. Alguns possuem uma tecnologia já consolidada e vem sendo empregada a vários anos. Estes processos são denominados convencionais. Outros denominados avançados, são utilizados a pouco tempo e necessitam ainda de algum desenvolvimento tecnológico. Existem ainda vários processos sendo estudados ou experimentados em protótipos ou escala de laboratório. No quadro do Apêndice B estão listados os principais processos de geração do hidrogênio, juntamente com o (s) respectivo (s) insumo (s) básicos (s), fonte primária de energia utilizada e o atual estágio de desenvolvimento.

Os mais importantes processos nos quais o hidrogênio é obtido são:

#### 1) Eletrólise Da Água

- Convencional
- Avançada

#### 2) Gaseificação de Combustíveis Fósseis e Biomassa

- Gaseificação do carvão
- Reforma-vapor de hidrocarbonetos leves

- Oxidação parcial de hidrocarbonetos pesados
- Gaseificação de madeira e resíduos agrícola
- Reforma do metanol e etanol

### 3) Outros Processos

- Ciclo Termoquímico
- Fotoelétrico Catalítico
- Fotobiológico

## 2.2 - GERAÇÃO DO HIDROGÊNIO ELETROLÍTICO

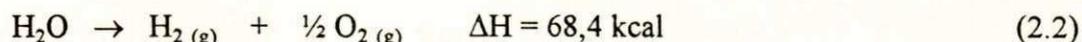
### 2.2.1 - PRINCÍPIOS DA ELETRÓLISE DA ÁGUA

O processo de eletrólise da água consiste em decompô-la através de uma corrente elétrica contínua em seus elementos de formação: hidrogênio e oxigênio. Uma célula básica de eletrólise é formada por um par de eletrodos condutores imersos num meio condutor, que pode ser líquido ou sólido. Uma corrente contínua passa através da célula de um eletrodo a outro. O hidrogênio e o oxigênio evoluem nos eletrodos, catodo e anodo respectivamente, durante o consumo da água na solução de hidróxido de potássio.

Por razões práticas, geralmente utiliza-se o hidróxido de potássio dissolvido em água destilada, sob algumas condições mínimas de pureza; é necessário para tornar o meio entre os eletrodos condutor uma vez que, a condutividade da água é muito baixa. Para esse fim, pode-se empregar outras bases fortes, ácidos inorgânicos, membranas de ácidos sólidos e óxidos cerâmicos (ítrio e zircônio) (SILVA,1991).

Cuidados especiais devem ser tomados para garantir alta pureza da água utilizada na eletrólise, pois sendo a água consumida, substâncias estranhas podem ir se acumulando na célula e permitir o desenvolvimento de processos corrosivos do eletrodo e queda de eficiência devido a desativação dos eletrodos e aumento da resistividade da solução. Os elementos imersos no eletrólito devem estar isentos de contaminação como gordura ou graxa, evitando assim a formação de espuma devido as condições próprias para promover as reações de saponificação (MANUAL TERMOQUIP).

As células eletrolíticas são mais complexas, podendo ser classificadas em convencionais e avançadas diferenciando-se entre si basicamente, pelo tipo do condutor iônico utilizado. De qualquer forma, em todos eles a reação final é a de decomposição da água em seus elementos constituintes, como segue:



(SILVA, 1991).

O processo de produção de hidrogênio através da eletrólise da água é utilizado há mais de cinquenta anos, porém os desenvolvimentos praticamente cessaram em decorrência da disponibilidade maciça de hidrocarbonetos de baixo custo permitindo uma alternativa à produção de hidrogênio por eletrólise.

Nos últimos dez anos o interesse pelo hidrogênio reapareceu como decorrência da atual crise do petróleo de maneira que, tecnologias para produção em larga escala do hidrogênio eletrolítico estão sendo desenvolvidas em vários países, inclusive no Brasil. Está claro que em alguns países do mundo, como por exemplo o Brasil, o hidrogênio obtido via eletrólise competirá em curto prazo com o hidrogênio fóssil. O fator determinante é o grande potencial hidroelétrico (TICIANELLI, 1985).

### 2.2.2 - REAÇÕES NA ELETRÓLISE DA ÁGUA

Segundo Campos (1990), em qualquer solução aquosa, ocorre auto ionização da água fazendo com que existam sempre os íons  $\text{H}_3\text{O}^+$  e  $\text{OH}^-$  segundo o equilíbrio a seguir:



ou

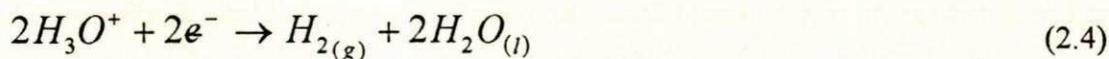


Durante o processo eletrolítico ao se aplicar um tensão na célula, cria-se uma diferença de potencial entre os eletrodos, produzindo entre os mesmos um campo elétrico, através do eletrólito, que provoca a concentração de íons positivos junto aos catodos (eletrodos negativos) e de íons negativos junto aos anodos (eletrodos positivos). Atingindo-

se o potencial mínimo de eletrólise, iniciam-se as reações nos eletrodos. Para o caso dos eletrólitos ácido, neutro ou alcalino, as seguintes reações ocorrem nos eletrodos:

### 1) Reações Catódicas

a) em eletrólito ácido



b) em eletrólito neutro ou alcalino



### 2) Reações Anódicas

a) em eletrólito ácido e neutro



b) em eletrólito alcalino



## 2.2.3 - TENSÃO EM UMA CÉLULA ELETROLÍTICA

Em eletrólise apenas a energia livre de reação,  $\Delta G$  pode ser permutada com a energia elétrica a temperatura e pressão constante. A quantidade de carga elétrica correspondente a quantidade molar, indicada no balanço químico da equação de produção do  $H_2$ , a partir da água pela eletrólise é  $nF$ , onde  $n$  é o número de elétrons transferidos por molécula e  $F$  é a constante de Faraday. Se esta quantidade de carga elétrica é transportada através de uma diferença de potencial de  $E$  volts, a quantidade de trabalho requerido é dado por  $nFE$ . Devido a essa variação de energia elétrica não envolver trabalho pressão-volume e ser realizada isotermicamente, a variação na energia livre de Gibbs é dada por:

$$\Delta G = - nFE \quad (2.8)$$

onde  $E$  é a voltagem mínima ou teórica para que possa ocorrer a eletrólise, que por convenção é tida como positiva (CASPER,1978). Como  $\Delta G$  é negativo para uma dada reação espontânea na célula e  $E$  é tido como positivo para uma descarga espontânea da célula, isto resulta um sinal negativo na Equação (2.7).

Como com qualquer reação química, a variação da quantidade de calor,  $\Delta H$  está associada à reação de eletrólise da água. Para uma pressão constante, o processo isotérmico como a eletrólise da água,  $\Delta G$  está relacionado com  $\Delta H$  como:

$$\Delta G = \Delta H - \Delta Q_r \quad (2.9)$$

onde  $\Delta Q_r = T \cdot \Delta S$  é o calor que deve ser trocado com o meio se a reação da célula conduzida reversivelmente permanecer na temperatura constante;  $T$  é a temperatura da célula; e  $\Delta S$  é a variação de entropia para a reação de eletrólise. Para ocorrer a decomposição da água, a tensão ou voltagem ( $V$ ) aplicada à célula deve exceder a tensão reversível da célula ( $E_o$ ). A diferença ( $V - E_o$ ) é necessário para vencer as resistências ( elétricas e polarização) associadas ao processo de eletrólise; a energia correspondente é eventualmente dissipada dentro da célula como calor irreversível ( $\Delta Q_i$ ) de acordo com:

$$V - E = \Delta Q_i / nF \quad (2.10)$$

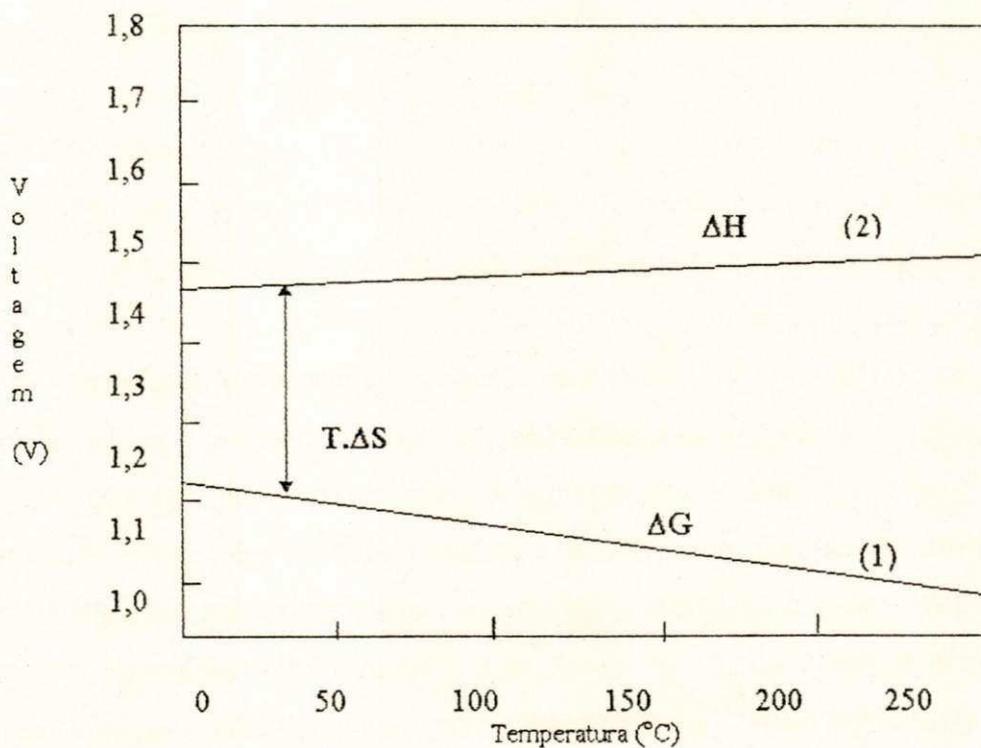
Rescrevendo a Equação (2.10) utilizando as Equações (2.8) e (2.9) tem-se:

$$V = - (\Delta H - \Delta Q_r + \Delta Q_i) / nF \quad (2.11)$$

A Equação (2.11) afirma que o calor endotérmico reversível requerido ( $\Delta Q_r$ ), da reação de eletrólise é exatamente balanceado com o calor irreversível ( $\Delta Q_i$ ) liberado devido a ineficiência da célula quando a tensão aplicada a célula iguala-se a ( $-\Delta H / nF$ ), às vezes chamada de voltagem,  $\Delta H$ . Desde que, nestas condições nenhum calor seja trocado com o meio da célula, a tensão  $\Delta H$  é também chamada de "tensão termoneutra". As células eletrolíticas operadas com voltagens entre  $E_o$  e  $\Delta G$  devem ser abastecidas de calor de uma fonte externa para manter a operação em temperatura constante de interesse prático; as células operadas acima da voltagem  $\Delta H$  devem ser resfriadas.

A Figura 2.1 descreve  $\Delta G$  e  $\Delta H$  como função da temperatura. É claro que a voltagem da eletrólise diminui substancialmente com o aumento da temperatura; por outro lado a voltagem termoneutra aumenta um pouco com a temperatura. Isto significa que, com o aumento da temperatura, uma força de avanço maior ( $V - E$ ) fica disponível para operação da célula a voltagem termoneutra isto é, esta condição de operação desejável torna-se possível em temperaturas mais altas. Podem ser identificadas três situações de acordo com a Figura 2.1:

- A eletrólise da água não ocorre para tensões, fornecidas ao sistema químico, abaixo da voltagem reversível (curva 1);
- Para tensões entre voltagem reversível (curva 1) e a voltagem termoneutra (curva 2), a eletrólise ocorre desde que o calor seja fornecido ao sistema ( processo endotérmico).
- Para tensões acima da voltagem termoneutra (curva 2), a eletrólise ocorre e o calor é transferido ao meio ambiente (processo exotérmico).



Curva (1): voltagem reversível

Curva (2): voltagem termoneutra

Figura 2.1 - Curvas de voltagem em função da temperatura para a eletrólise da água (CASPER, 1978).

### 2.2.4 - SOBRETENSÕES

A diferença entre a tensão necessária para a operação de uma célula, a uma determinada pressão e temperatura (voltagem real), e a tensão mínima estabelecida termodinamicamente para as mesmas condições de operação (voltagem teórica) é denominada de sobretensão da célula e pode ser escrita como:

$$\eta_{\text{total}} = V - E \quad (2.12)$$

onde: E é a voltagem teórica requerida

V é a voltagem real ou de operação

A sobretensão total da célula pode ser subdividida em diferentes tipos. Para o sistema  $\text{H}_2/\text{O}_2$  destacam-se as sobretensões anódica ( $\eta_a$ ) e catódica ( $\eta_c$ ) e de resistência ( $R_o$ ), sendo a voltagem real de operação da célula, a soma destas contribuições:

$$V = E + \eta_a + \eta_c + IR_o \quad (2.13)$$

Os fatores que provocam as sobretensões são inúmeros e variam de acordo com o tipo de sistema eletroquímico utilizado. As sobretensões anódica e catódica dependem do uso de material apropriado e de superfícies que possam inclusive incluir efeitos catalíticos. Dependem também do pH e da corrente elétrica. Diminuir a corrente elétrica implica em comprometer a produção que é proporcional à corrente elétrica. Alterar o pH é possível, mas implica em introduzir novos conceitos de operação e construção da célula. A resistência da célula depende da distância anodo-catodo e da condutividade da solução.

Os efeitos produzidos pela sobretensão na célula caracterizam-se por um processo irreversível, onde a energia é dissipada na forma de calor. Um maior objetivo dos programas de desenvolvimento da eletrólise é minimizar os termos  $\eta_a$ ,  $\eta_c$  e  $IR_o$  com o propósito de obter elevada eficiência, uma vez que o rendimento térmico é dado pela seguinte equação:

$$R_t = \frac{|\Delta H|}{nFV} \quad (2.14)$$

assim qualquer aumento de rendimento depende de diminuir  $\eta_a$ ,  $\eta_c$  e  $R_o$  (MANUAL TERMOQUIP).

### 2.2.5 - DENSIDADE DE CORRENTE DA CÉLULA

A taxa de geração de hidrogênio é proporcional à corrente que passa através de uma célula eletrolítica de acordo com:

$$R_G = 4,4 \cdot 10^{-4} \times I \quad (2.15)$$

Dividindo ambos os lados da Equação (2.15) pela área da célula ( $A$ ), resulta numa relação correspondente entre a taxa de produção de Hidrogênio por unidade de área de célula e a densidade de corrente:

$$\frac{R_G}{A} = 4,4 \cdot 10^{-4} \times j \quad (2.16)$$

onde,  $A$  é a área da célula ( $m^2$ ) e  $j$  é a densidade de corrente ( $Ampère/m^2$ ).

O custo de um módulo de eletrólise,  $C_{cm}$ , é inversamente proporcional a  $R_G/A$  e diretamente proporcional ao custo por unidade de área,  $C_f$ . Por isso a densidade de corrente torna-se um parâmetro econômico muito significativo quando:

$$C_{cm} = k \frac{C_f}{j} \quad (2.17)$$

onde  $k$  representa a constante de proporcionalidade (COX & WILLIAMSON, Jr., 1977).

### 2.2.6 - CURVAS DE POLARIZAÇÃO

Desde que a voltagem na célula e a densidade de corrente sejam muito importantes quando da otimização da célula eletrolítica ou do sistema, a relação desses parâmetros é especialmente significativa. A esta relação dá-se o nome de "Curva de Polarização"

(WILLIAMS, 1975). Através dela faz-se o estudo do funcionamento e do desempenho de uma célula eletrolítica.

De acordo com a Figura 2.2 pode-se observar que para densidades de corrente muito pequenas a tensão de operação se aproxima da voltagem mínima termodinâmica. Ao contrário, com o aumento da densidade de corrente, ocorre uma maior contribuição dos termos  $\eta_a$ ,  $\eta_c$  e  $IR_o$ . Pode-se observar ainda que a curva A refere-se a uma célula de menor eficiência, enquanto a curva B mostra uma célula mais eficiente.

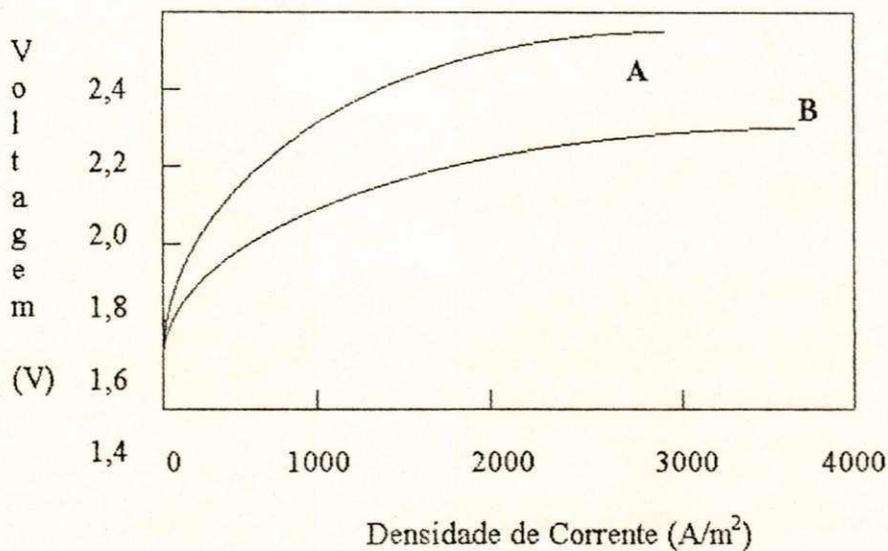


Figura 2.2 - Curvas típicas de voltagem em função da densidade de corrente para células eletrolíticas (COX & WILLIAMSON, JR., 1977).

### 2.2.7 - EFEITO DA TEMPERATURA E DA PRESSÃO

De acordo com a Figura 2.1 as tensões termodinâmicas estão relacionadas com a temperatura. Nos casos práticos, os termos  $\eta_a$ ,  $\eta_c$  e  $IR_o$  reduzem-se consideravelmente com o aumento da temperatura. Desse modo as curvas de polarização de todas as células melhoram com o aumento da temperatura.

Diversos estudos mostram que as voltagens das células reduzem-se através de um comportamento linear com a temperatura, para densidades de correntes constantes. Na prática as células comerciais convencionais operam na faixa de temperatura de 70 a 120°C.

O aumento da temperatura, além da faixa de operação prática da eletrólise provoca uma maior evaporação da água do eletrólito e em alguns casos a ebulição dos mesmos.

Com o propósito de reduzir os efeitos do aumento da temperatura além da faixa de operação torna-se necessário a pressurização das células causando um aumento na energia gasta no processo, mas em compensação aumenta a eficiência da célula, devido a diminuição do tamanho das bolhas de gás junto aos eletrodos. A energia mínima teórica exigida na pressurização dos produtos da reação da eletrólise, no caso de um processo reversível é dada por:

$$\Delta E = \frac{3RT}{4F} \times \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \quad (2.18)$$

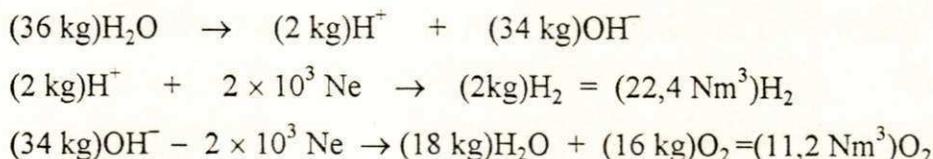
onde,  $\Delta E$  é o aumento mínimo da voltagem;  $F$  é o número de Faraday;  $T$  é a temperatura;  $R$  é a constante dos gases;  $P_1$  é a pressão inicial dos gases e  $P_2$  é a pressão final dos gases (SILVA,1991).

Alguns pesquisadores observaram que a performance das células eletrolíticas melhora com o aumento da pressão. As pressões mais altas porém, podem causar dificuldades na separação e contenção dos gases pressurizados, bem como problemas nos materiais como a fragilização pelo hidrogênio. Assim o aumento da pressão acarreta um aumento na difusão dos gases através do diafragma, provocando o aumento da contaminação de oxigênio no hidrogênio, e vice-versa, aumentando as perdas de gás, que podem chegar até 10% do hidrogênio gerado (WILLIAMSON,1978).

### 2.2.8 - ENERGIA REQUERIDA NA ELETRÓLISE

A energia elétrica entra na célula na forma de potência (produto da tensão pela corrente), e cada processo eletrolítico tem uma voltagem teórica correspondente a energia necessária para a reação se proceder.

Para fazer a eletrólise de 1 kg mol (18 kg) de água, teremos:



onde,  $N = 6,023 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$  é o número de Avogrado;  $e = 1,6021 \times 10^{-19} \text{ C}$  é a carga do elétron. Assim a quantidade  $10^3 \text{ Ne} = 96494 \times 10^3 \text{ C}$  é a quantidade de eletricidade movimentada para realizar o processo. Ela pode também ser expressa por:

$$\text{Ne} \times 10^3 / 3600 \times 10^3 = 26,80 \text{ kAh}$$

Logo, para produzir  $22,4 \text{ Nm}^3$  de  $\text{H}_2$  e  $11,2 \text{ Nm}^3$  de  $\text{O}_2$  nas CNTP, são necessários 18 kg de água e deve-se transportar  $2 \times 26,80 \text{ kAh} = 53,608 \text{ kAh}$  de eletricidade. Para produzir  $1 \text{ Nm}^3/\text{h}$  de  $\text{H}_2$  e  $0,5 \text{ Nm}^3/\text{h}$  de  $\text{O}_2$ , nas CNTP uma célula de eletrólise deverá ser atravessada por uma corrente elétrica de 2,393 kA ( $53,608 \div 22,4$ ) e consumirá  $0,803 \text{ kg/h}$  ( $18 \div 22,4$ ) de água. Do mesmo modo uma corrente de 1 kA produzirá  $0,418 \text{ Nm}^3 / \text{kAh}$  ( $1 \div 2,393$ ). Então a energia dispendida no processo para manter uma produção de  $1 \text{ Nm}^3/\text{h}$  será:

$$E_n = 2,393 \times V \text{ (kwh/Nm}^3 \text{ H}_2) \quad (2.19)$$

onde  $V$  é a tensão aplicada à célula.

Reduzindo-se  $V$  reduz-se o consumo de energia da célula, e para esse propósito emprega-se hidróxido de potássio ou de sódio que aumenta a condutividade elétrica da água (CAMPOS,1990).

Numa célula perfeitamente eficiente, 3,547 kwh de energia elétrica são consumidos para cada  $1,0 \text{ m}^3$  de hidrogênio produzido. A energia elétrica requerida para o processo é somente 84% da energia de combustão do hidrogênio; os outros 16% é fornecido como calor. Assim destes 3,547 kwh, somente 2,979 são fornecidos como energia elétrica, o restante é fornecido como calor. Pode-se calcular que a voltagem correspondente a mudança de entalpia, ou calor da combustão do hidrogênio, é 1,47 volts a  $25^\circ\text{C}$ , enquanto a voltagem correspondente a mudança de energia livre é somente 1,23volts.

Na prática porém, as células operam a voltagens maiores do que 1,47 volts e liberam calor por causa da perda de eficiência que ocorre nas células.

## 2.2.9 - COMPONENTES BÁSICOS DE UMA CÉLULA ELETROLÍTICA

Uma célula eletrolítica, na sua forma construtiva mais simples consta de um reservatório que contém a solução eletrolítica ou eletrólito; eletrodos nos quais ocorre a evolução dos gases e diafragma ou separadores posicionados entre os eletrodos.

### - Reservatório

Serve para comportar o eletrólito. Em algumas células, é um tanque de aço com níquel e platina provido de uma tampa, que possui a entrada de água e a saída para os produtos de eletrólise. Em outras células o reservatório não é necessário, pois as chapas do metal sólido são interpostas entre os eletrodos, que são empilhados juntamente com as gachetas na periferia, usados para lacrar as bordas externas.

### - Eletrólito

O eletrólito constitui-se de uma solução aquosa de um sal ou outro composto de boa condutividade elétrica quando em solução. O eletrólito deve possuir alta condutividade iônica; não pode decompor-se quimicamente por maior que seja a diferença de potencial aplicada à célula (somente a água deve decompor-se); não pode ser volátil a ponto de ser removido facilmente junto com os gases de saída; deve apresentar uma alta resistência a mudanças instantâneas de pH, isto é deve ser uma solução tampão, uma vez que as concentrações de íons hidrogênio mudam de forma contínua e rapidamente na superfície dos eletrodos. Estas características são conseguidas com o uso de um ácido forte, como o ácido sulfúrico, ou de uma base forte, como hidróxido de potássio. A maior parte dos sais apresentam a tendência de decompor-se quimicamente quando submetidos a altas tensões nas células, o que impossibilita seu uso. Os eletrólitos ácidos apresentam sérios problemas de corrosão. Assim a maioria dos eletrolisadores comerciais operam com um eletrólito alcalino. Uma exceção ao uso de eletrólitos alcalinos, é o uso de um material sólido polimérico de troca iônica que também apresenta boa condutividade iônica. O maior êxito

em trabalho com eletrólito sólido de troca iônica, tem utilizado polímero ácido flúor poliestireno sulfônico.

#### **- Eletrodos**

Os eletrodos são os pólos onde ocorrem as reações de oxidação e redução. Devem ser condutores elétricos; devem ter uma superfície catalítica adequada para a descarga dos íons hidrogênio e hidroxila sendo, em células alcalinas, o níquel mais comumente utilizado como catalisador de superfície. Devem ter uma grande área de interface com o eletrólito a qual pode ser obtida pelo uso de diversas estruturas sinterizadas, como juntas finas, telas, pratos perfurados e planos com superfície eletroquímica rugosa e mais recentemente eletrodos volumétricos tipo esponjas. Devem também, ter sítios adequados para nucleação de bolhas de gás.

No caso de eletrólito ácido polimérico, os eletrodos devem ser feitos com materiais quimicamente mais resistentes do que o aço ou mesmo o níquel.

#### **- Separador**

Os separadores estão posicionados entre os dois eletrodos a fim de evitar o contato de um com o outro, evitando curto circuito e impedir a mistura dos gases oxigênio e hidrogênio dentro da célula. Com o propósito de cumprir sua função satisfatoriamente, o separador deve ser feito de um diafragma poroso através do qual a solução de eletrólito possa passar proporcionando a condução dos íons de um compartimento da célula para o outro. Estes poros devem permanecer cheios de líquido, de forma que o gás não possa penetrar neles. O material do separador deve resistir a corrosão pelo eletrólito na presença de gases hidrogênio e oxigênio, e deve ter uma estrutura estável para uma longa vida de operação, como também para que os poros não se fechem com o tempo.

É feito usualmente na forma de chapas, cuja espessura é determinada pelo esforço mecânico e limitações de mistura dos gases, para manter uma resistência a passagem de íons a menor possível. O material usado em casos de células alcalinas tem sido asbesto. No caso de resina ácida polimérica de troca iônica, este material atua como próprio separador. E nos

casos em que não se precisa separar os gases os separadores são desnecessários (CASPER,1978). Além dos componentes citados anteriormente, o sistema eletrolítico deve conter uma grande variedade de componentes. Alguns deles são: fonte de alimentação, incluindo transformadores e retificadores de corrente de AC para DC; sistema de refrigeração; sistemas auxiliares para condicionamento do gás produzido incluindo purificação, secagem e compressão (TICIANELI,1985).

## 2.2.10 - TIPOS BÁSICOS DE ELETROLISADORES

De acordo com Bockris (1976), pode se dizer que existem três categorias de eletrolisadores: clássicos, também conhecidos como convencionais; modernos e avançados.

### - Eletrolisadores Convencionais

Os eletrolisadores convencionais, utilizam uma solução eletrolítica, em geral hidróxido de potássio dissolvido em água deionizada, como meio condutor iônico e distinguem-se essencialmente por suas maiores dimensões e menores densidades de corrente. Em geral operam a uma temperatura entre 70 e 80°C e classificam-se de acordo com a disposição dos eletrodos em *unipolares e bipolares*. A principal diferença entre os dois tipos é que na configuração unipolar, células individuais são agrupadas em paralelo e dividem um eletrólito comum, enquanto na configuração bipolar, as células estão conectadas em série e cada célula tem seu próprio eletrólito.

De acordo com a Figura 2.3, no eletrolisador convencional unipolar, também conhecido como tipo tanque, cada um de seus eletrodos tem a mesma polaridade em ambas as faces de modo que nela, ocorre apenas uma única reação ou seja, há evolução de hidrogênio ou de oxigênio. Devido a ligação em paralelo dos eletrodos de mesma polaridade, a voltagem total da célula é equivalente a de um par anodo-catodo (aproximadamente 2volts). O eletrolisador é formado por um número suficiente de células ligadas em paralelo, de modo a fornecer a quantidade de gás desejada. A maior desvantagem da configuração unipolar é que cada célula requer altas amperagens e baixas voltagens devido ao número de

células conectadas em paralelo, o que implica em custos mais elevados (devido aos retificadores, barras condutoras caras e elevados volumes). Entretanto são de construção mais simples, estanques e manutenção mais fácil, possuindo menor custo por unidade de área da célula (SILVA, 1991).

Os arranjos bipolares algumas vezes são chamados de filtro prensa pois camadas alternadas de eletrodos e diafragmas estão fixadas umas as outras. Cada lado do eletrodo tem polaridade diferente, de modo que uma face serve como anodo em uma célula e a outra serve como catodo a célula adjacente. Todos os eletrodos estão isolados eletricamente de seus vizinhos e um par sucessivo juntamente com um diafragma de separação formam uma célula, como pode ser observado na Figura 2.4. A tensão global é o produto do número de pares de células multiplicado por 2volts; isto implica em maior tensão global e menor amperagem. Os eletrolisadores bipolares apresentam a vantagem de menores custos com a célula e fonte retificadora de menores volumes e a desvantagem do projeto da célula ser mais complexo e o eletrolisador sujeito a vazamentos. A configuração bipolar é atualmente adotada pela maior parte dos fabricantes e laboratórios de pesquisa. Embora não haja diferenças marcantes de consumo energético que favoreça uma ou outra configuração. Ambas geram em torno de 4,3 a 4,6 kWh/Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub> (TICIANELLI,1985).

#### **- Eletrolisadores Modernos e Avançados**

Os eletrolisadores modernos são bastante semelhantes aos modelos convencionais, porém apresentam coberturas especiais nos eletrodos, com a disposição de catalisadores e superfícies rugosas. Alguns modelos utilizam membranas separadoras à base de teflon ou outros materiais, permitindo a operação do eletrolisador em temperaturas mais elevadas, 80 e 120°C e, conseqüentemente sob pressão.

Os eletrolisadores avançados caracterizam-se basicamente por serem compactos, com altas densidades de corrente e uso de catalisadores e metais nobres. O mais conhecido é um tipo especial da configuração bipolar, chamado de eletrolisador de eletrólito polimérico sólido (SPE), cuja principal característica é o emprego de uma membrana polimérica sólida com estrutura similar ao teflon, denominada Nafion, que também atua como membrana

separadora, permitindo uma grande proximidade dos eletrodos, além de necessitar apenas de circulação de água deionizada no interior da célula, que fornece água para a eletrólise, umedece a membrana, retira os gases e resfria a célula (SILVA, 1991 & CASPER, 1978).

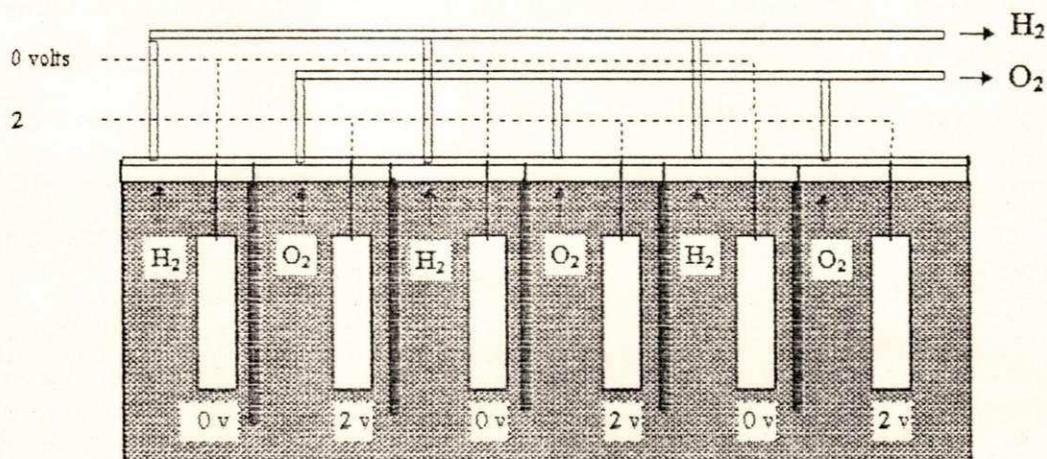


Figura 2.3 - Esquema de arranjo de eletrolisadores unipolares para células eletrolíticas convencionais.

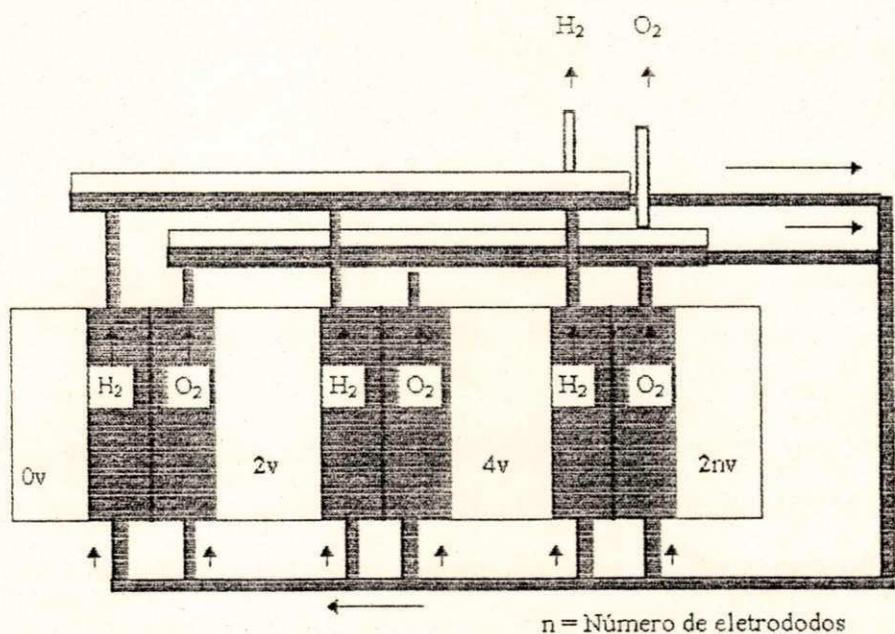


Figura 2.4 - Esquema de arranjo de eletrolisadores bipolares para células eletrolíticas convencionais.

## 2.3 - TRANSPORTE DE CALOR

O calor é uma modalidade de energia em trânsito que se transfere espontaneamente do corpo de temperatura mais elevada para o corpo de temperatura mais baixa tendendo a um equilíbrio térmico com a igualdade das temperaturas. Líquidos e vapores são usados para transportar calor e cedê-lo aos materiais do processo. Materiais sólidos também são usados para o transporte de calor, porém nunca atingiram a importância dos líquidos e vapores, principalmente pela dificuldade de deslocar partículas sólidas através de tubos pequenos ou de tubos curvos.

Os fluidos devem ter uma combinação única de propriedades. Seus elevados pontos de ebulição e suas pressões baixas diminuem os riscos e permitem modelos econômicos, enquanto suas elevadas capacidades caloríficas melhoram a capacidade de transportar calor e espalhá-lo igualmente pelo sistema.

### 2.4.1 - SISTEMAS COM FLUIDOS TÉRMICOS

Os fluidos térmicos usados para aquecimento podem estar no estado líquido, ou no de vapor, ou numa combinação de ambos. Na faixa de 0 até 160 °C a água é o fluido térmico mais amplamente utilizado. Os sistemas a água quente são estáveis, com equipamentos simples e fácil de controlar, e quando o ar é excluído a corrosão é mínima. Os sistemas a vapor possui suas limitações básicas em suas elevadas pressões de vapor e baixos pontos críticos. Estão sujeitos a ação de substâncias corrosivas (ácidos em solução ou gases dissolvidos como dióxido de carbono, oxigênio, sulfato de hidrogênio ou amônia) e formadoras de incrustações.

Sistemas que operam com faixas de temperaturas mais elevadas, de 135 até 380 °C, utilizam os seguintes fluidos: o mercúrio, a mistura NaK, os fluidos orgânicos sintéticos, os silicones, fluidos a base de glicol, misturas de sais fundidos e óleos minerais e parafínicos. Os mais comumente utilizados são os orgânicos sintéticos, os silicones e os óleos minerais e parafínicos. O Apêndice C relaciona as propriedades físicas dos fluidos mais comumente utilizados para transportar calor. O uso de um fluido para uma aplicação específica deve

atender considerações cuidadosas de fatores como, faixa de temperatura de operação, estabilidade térmica, pressão de vapor, capacidade de bombeamento e vida útil. De acordo com John Cuthbert (1994), duas regras devem ser observadas na seleção do fluido operante, afim de se obter vida útil prolongada e sem degradação. A primeira delas é não utilizar o fluido em sistemas com temperaturas acima da faixa de temperatura de uso recomendada pelo fabricante; e a segunda é que, se um sistema requer fluido em fase vapor, deve-se usar apenas fluidos adequados para uso em fase vapor.

#### **2.4.2 - FLUIDOS ORGÂNICOS SINTÉTICOS**

Estes são compostos orgânicos de elevada estabilidade térmica e incluem os aromáticos alquilados, as misturas de óxido de difenila mais difenila, misturas de di e tri éteres, difenil alquilados e outros.

Devido a suas características aromáticas oferecem excepcional estabilidade térmica. São especialmente efetivos em sistemas que requer altas temperaturas, pois oferece ampla faixa de temperatura de operação (-88 até 380 °C) e baixa pressão de vapor. Também proporciona ótima economia de operação e alguns deles podem ser usados tanto na fase vapor como na fase líquida.

## CAPÍTULO III - MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 - OBJETIVOS

Este trabalho de pesquisa foi desenvolvido no âmbito do Núcleo de energia da Universidade Federal da Paraíba do Centro de Tecnologia junto com os pesquisadores do Departamento de Engenharia Química - DEQ, e propõe a utilização do hidrogênio, obtido a partir da eletrólise bipolar, como fonte de energia, tendo como objetivo verificar sua aplicabilidade para fins de aquecimento de pequenos ambientes, analisando entre outros parâmetros, a variação da temperatura do ambiente com o tempo de aquecimento, a quantidade de calor fornecida e o consumo de energia.

A pesquisa tem o propósito de viabilizar o uso do hidrogênio como fonte de energia em substituição aos combustíveis carbonáceos poluentes.

### 3.2 - MATERIAL UTILIZADO

O sistema de aquecimento via hidrogênio eletrolítico encontra-se esquematizado conforme mostra a Figura 3.1. Este é dividido em duas partes: (I) - Sistema de produção de  $H_2/O_2$  eletrolíticos; (II) - Sistema Térmico.

Ao sistema (I) está acoplado um medidor de energia. O sistema (II) é formado por uma unidade de aquecimento de fluido térmico e uma unidade de dissipação de calor.

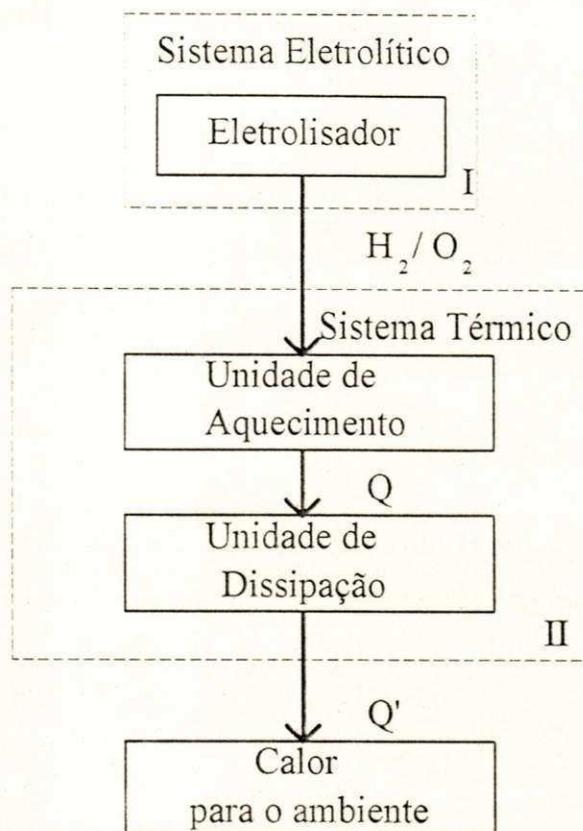


Figura 3.1 - Diagrama de blocos do Sistema de Aquecimento Via Hidrogênio Eletrolítico

Os materiais utilizados foram:

a - Produtos Químicos:

- Uma solução de Hidróxido de Potássio a 28% foi preparada com (KOH) P.A da MERCK -Ind. Brasileira
- Benzina Retificada de D. Rodrigues S/A
- Óleo Orgânico Sintético: Dowtherm \*G - Dow Chemical, Indústrias Químicas

b - Água destilada

c - Material isolante: amianto

A instrumentação utilizada foi:

- Dois termômetros digitais modelo TH 1200C, com quatro termopares fabricados pela Instrutherm Instrumentos e Medições Ltda, São Paulo-SP;
- Dois termômetros de mercúrio
- Um medidor de energia

### 3.3 - SISTEMA DE PRODUÇÃO DE H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>

Este sistema é formado por um reator eletrolítico, um reservatório de eletrólito, um sistema de refrigeração, um purgador, selos controladores de chama além de quatro periféricos: um pressostato, um manômetro, um maçarico e uma fonte de alimentação. O fluxograma é mostrado na Figura 3.2.

#### - Reator Eletrolítico

O reator eletrolítico utilizado para produção de H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> é formado por 55 células (placas) de 2volts cada uma, dando um total de 110 volts. O reator é mostrado na Figura 3.3 e as suas características técnicas são as seguintes:

Potência: 2700W

Tensão da Rede: 220V Ac

Densidade de Corrente: 15 A/dm<sup>2</sup>

Produção dos Gases: 0 - 1000 l/h

Pressão de trabalho: 1 atm

Temperatura máxima de chama: 2800° C

Tipo : bipolar

O reator possui uma inclinação de 10° em relação a horizontal, para direcionar as bolhas de gases formadas para o tubo de coleta (tubo de saída) dos gases. Nas placas fixam-se seis parafusos em dois cabeçotes; no cabeçote situado na parte superior da inclinação existem duas entradas, uma inferior para receber o eletrólito e outra superior para saída dos gases gerados e eletrólito arrastado. As placas que formam as células são fabricadas em aço 1020 niqueladas com 1,0 cm de espessura com 20 cm de diâmetro. As placas são separadas entre si por um anel de plástico de 2mm de espessura de 26 cm de diâmetro. A Figura 3.4 mostra a geometria dos anéis.

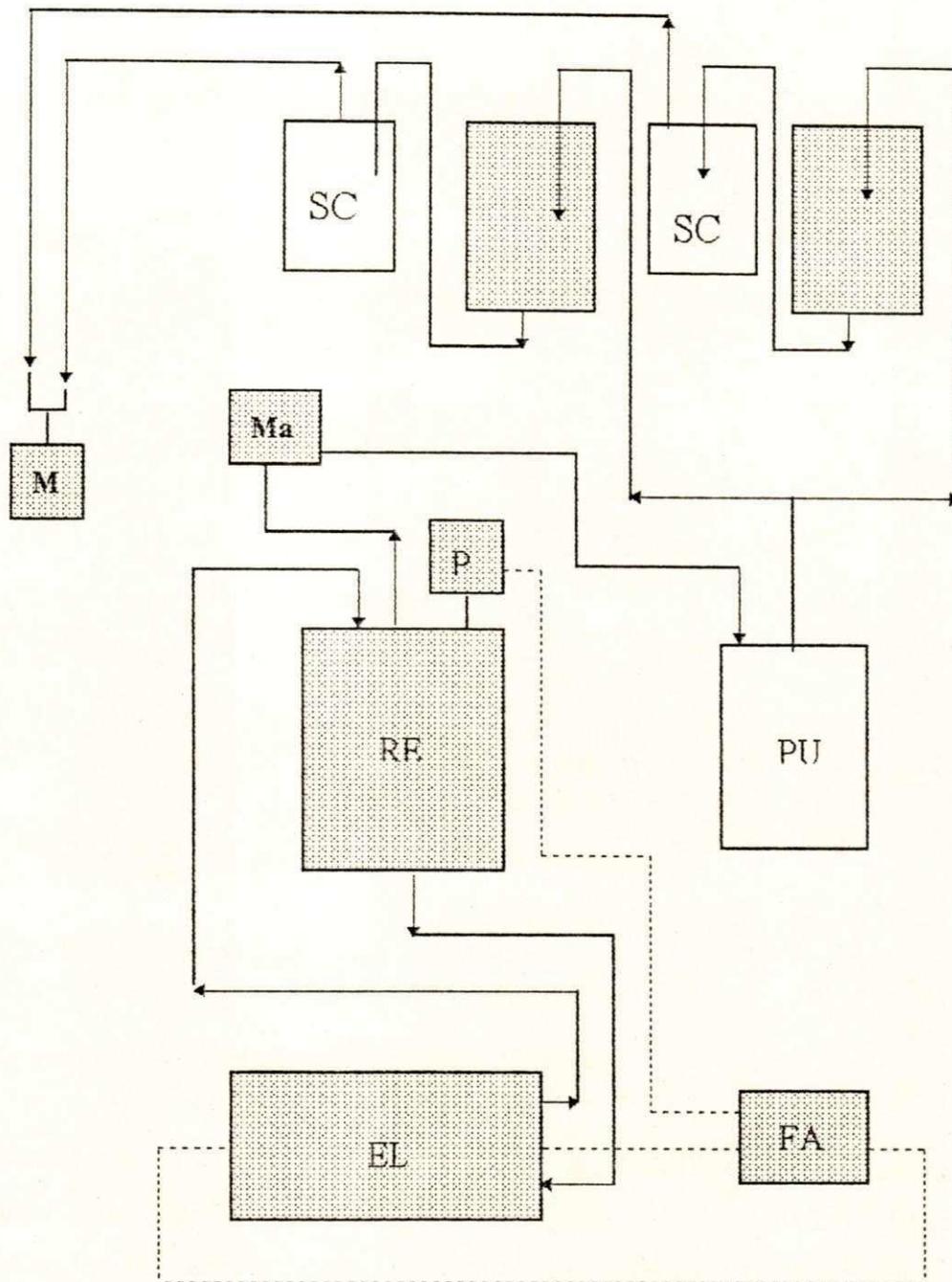


Figura 3.2 - Fluxograma do Processo Eletrolítico. EL-Reator eletrolítico (Eletrolisador), RE- Reservatório de Eletrólito, PU-Purgador, SC- controladores de chama, P-Pressostato, MA-Manômetro, M-Maçarico, FA-Fonte de Alimentação.

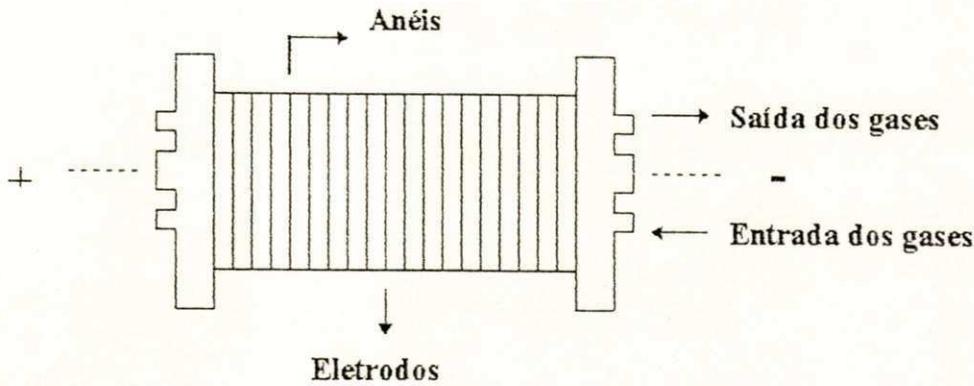


Figura 3.3 - Reator eletrolítico do tipo Bipolar

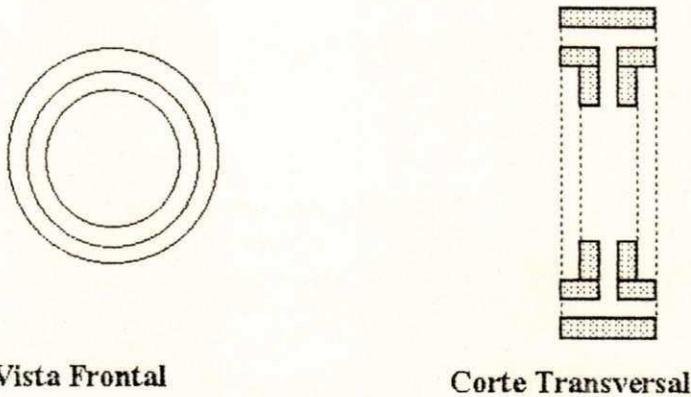


Figura 3.4 - Anéis do eletrolisador

#### - Reservatório de Eletrólito

Os gases que são gerados no reator eletrolítico são conduzidos para o reservatório de eletrólito. Este é constituído de um cilindro em aço com 18 cm de diâmetro e 40 cm de altura. O eletrólito sai da parte inferior do reservatório, alimenta o reator continuamente enquanto os gases produzidos são jateados na superfície do eletrólito contido no reservatório para possibilitar a pré-remoção do eletrólito arrastado pelos gases. O reservatório é mostrado na Figura 3.5 pela qual pode-se observar que além da abertura de saída do eletrólito, o reservatório possui a abertura de reabastecimento e uma outra, que serve como dispositivo de controle de nível máximo ou purgador do reservatório. O reabastecimento é feito com água destilada que garante autonomia ao sistema.

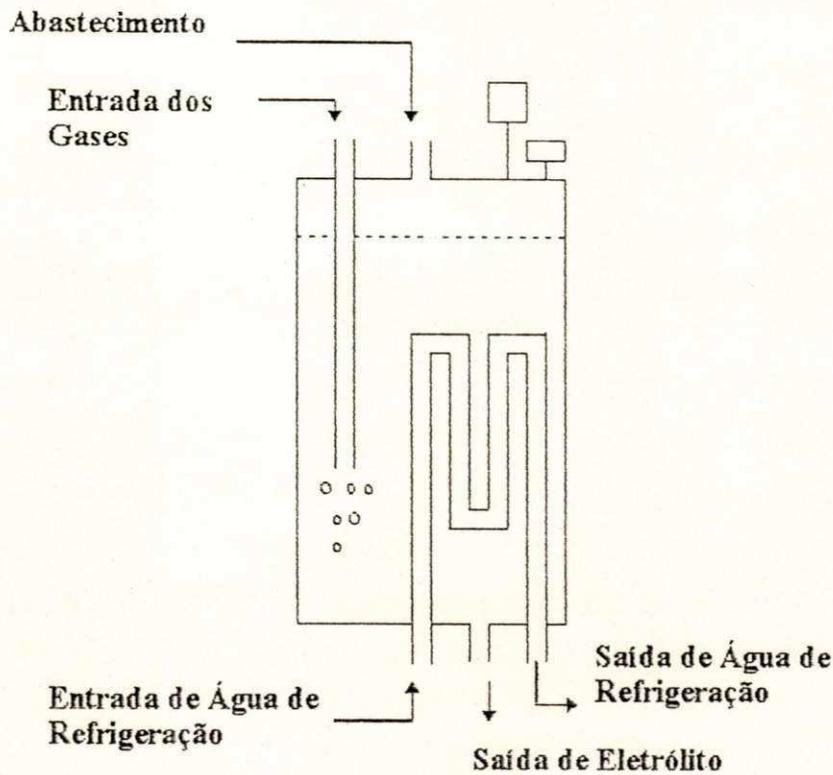


Figura 3.5 - Reservatório de Eletrólito e Sistema de Refrigeração

#### - Sistema de Refrigeração

De acordo com a Figura 3.5, existe no interior do reservatório de eletrólito, uma serpentina na qual circula água. Esta atua como trocador de calor, cuja função é baixar a temperatura da emulsão, gás-eletrólito que sai do reator eletrolítico, facilitando a condensação do eletrólito arrastado, minimizando assim, o arraste para os selos controladores de chama.

#### - Purgador

Este é um tubo cilíndrico constituído de aço, com 9,0 cm de diâmetro e 29,0 cm de altura, onde o gás com alguma quantidade de eletrólito entra na parte superior, e sofrendo uma expansão, o eletrólito parte mais pesada da mistura gás-eletrólito é condensada e os

gases são conduzidos para os selos controladores de chama em sentido contrário ao gás que alimenta o purgador.

#### - Selos Controladores de Chama

O gás purificado após sair do purgador, é borbulhado através de um fluido orgânico controlador de chama, que confere a propriedade de evitar o retrocesso de chama, chama mais branda e diminui o caráter explosivo. O álcool e a benzina são dois fluidos orgânicos que atendem tais características, da mesma forma que a acetona é misturada ao acetileno.

O álcool abranda a chama, permitindo a queima controlada, mantendo a temperatura da chama no maçarico a mais de  $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , dando um formato pontual à chama. A benzina atribui uma propriedade de chama com temperatura mais baixa que o álcool, entre  $600$  e  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , e um formato menos pontual (mais aberto). A Figura 3.6 mostra um selo controlador de chama (ALVES,1992).

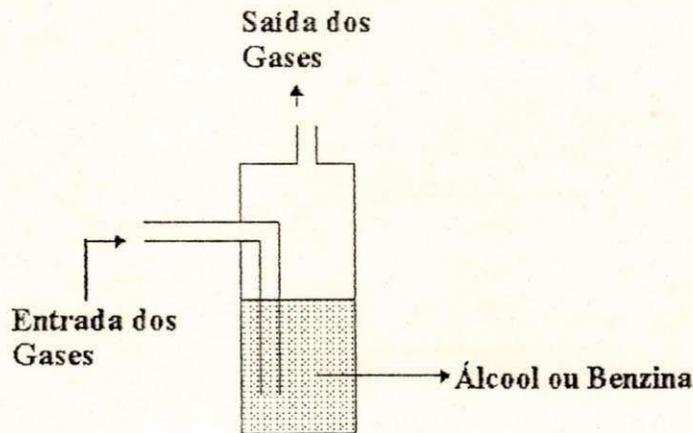


Figura 3.6 - Selo Controlador de Chama.

#### - Fonte de Alimentação

A fonte de alimentação corresponde ao conjunto: transformador monofásico de  $220\text{V}$  Ac para  $110\text{V}$  Ac, fabricada pela Waltec, Blumenau-Sc, retificador de corrente e disjuntor de segurança contra altas amperagens.

### - Pressostato

Foi utilizado um pressostato da marca Fligor, para controlar a pressão do sistema entre 1 e 1,5 kgf/cm<sup>2</sup> durante a operação da máquina, com a finalidade de controlar o processo através da pressão dos gases.

### 3.4 - SISTEMA TÉRMICO

O fluxograma do sistema térmico encontra-se esquematizado na Figura 3.7, e constitui-se de um dissipador de calor, uma unidade de aquecimento (cetilha), fonte de energia (chama do hidrogênio), alimentação de fluido térmico e unidade de registro (termopares). O sistema foi desenvolvido para aquecer um fluido e este transferir calor para um ambiente, utilizando a chama do hidrogênio eletrolítico como fonte de energia, simulando as situações de aquecimento de pequenos ambientes que utilizam aquecedores com fontes térmicas convencionais.

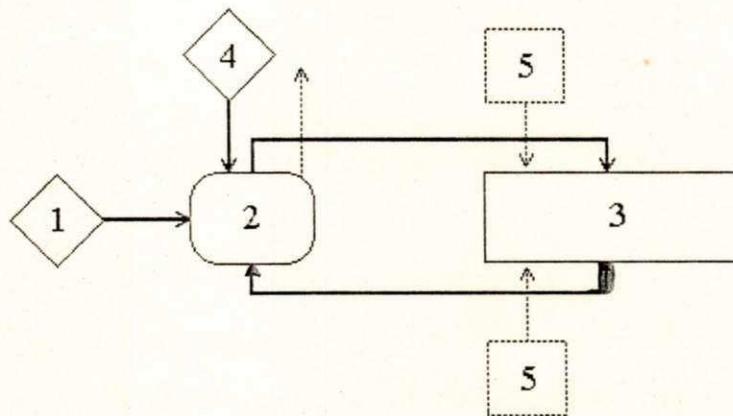


Figura 3.7 - Fluxograma do Sistema Térmico

- (1) Chama do Hidrogênio;
- (2) Unidade de Aquecimento;
- (3) Unidade de Dissipação;
- (4) Alimentação do Fluido Térmico;
- (5) Termopares.

### **- Unidade de Aquecimento do Fluido Térmico - Cetilha**

Através da Figura 3.8 observa-se que a unidade de aquecimento consta de dois cilindros concêntricos com 2,54 e 5,1 cm de diâmetro, ambos com 50 cm de comprimento e 0,32 cm de espessura; uma chaminé para saída dos gases da combustão do hidrogênio (vapor d'água) e um tubo de alimentação de fluido de 1,27 cm de diâmetro e 50 cm de altura. É construída em ferro galvanizado e o cilindro externo é isolado termicamente do ambiente com cordão de amianto.

Na extremidade esquerda do cilindro interno encontra-se a chama do hidrogênio saindo do maçarico, acoplado ao eletrolisador, que fornece calor para o fluido. Devido ao gradiente de temperatura (termosifão), o fluido mover-se-á na direção da unidade de dissipação de calor, saindo da cetilha através do orifício da saída situado na parte superior da mesma e retornando através do orifício de entrada localizado na parte inferior da cetilha. O tubo de alimentação é adaptado a um reservatório que atua como controlador de nível e de dilatação térmica do fluido.

### **- Unidade de Dissipação de Calor - Dissipador**

Esta possui forma retangular, e é construída por doze cilindros com 80 cm de comprimento e 1,27 cm de diâmetro, dispostos verticalmente e separados por uma distância de 6,0 cm de centro a centro, e conectados a dois tubos horizontais de 2,54 cm de diâmetro, conforme mostra a Figura 3.9.

O fluido aquecido saindo da cetilha, entra no dissipador que, se distribui nos tubos verticais, dissipa seu calor para o ambiente e retorna a unidade de aquecimento, mantendo-se sob efeito de um ciclo contínuo durante todo o processo de aquecimento. Após um certo tempo estabilizam-se as temperaturas de entrada (saída da cetilha) e saída do dissipador (entrada da cetilha). A Figura 3.10 mostra o sistema térmico completo.

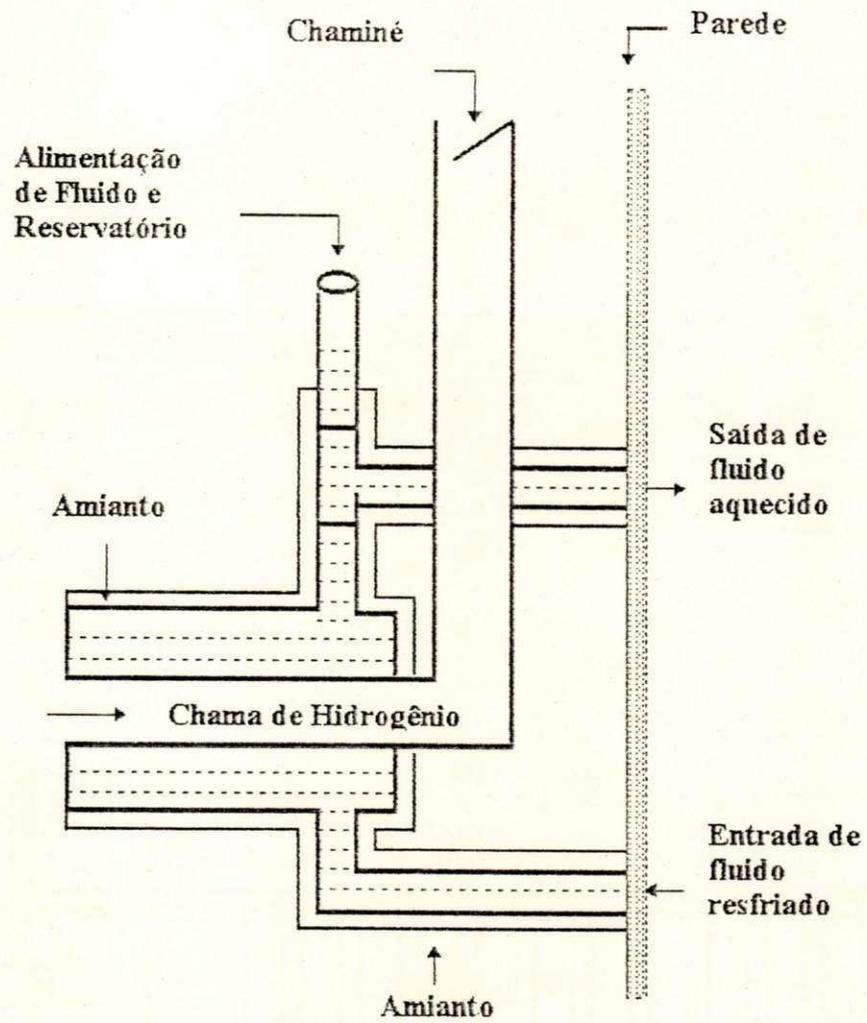


Figura 3.8 - Unidade de Aquecimento

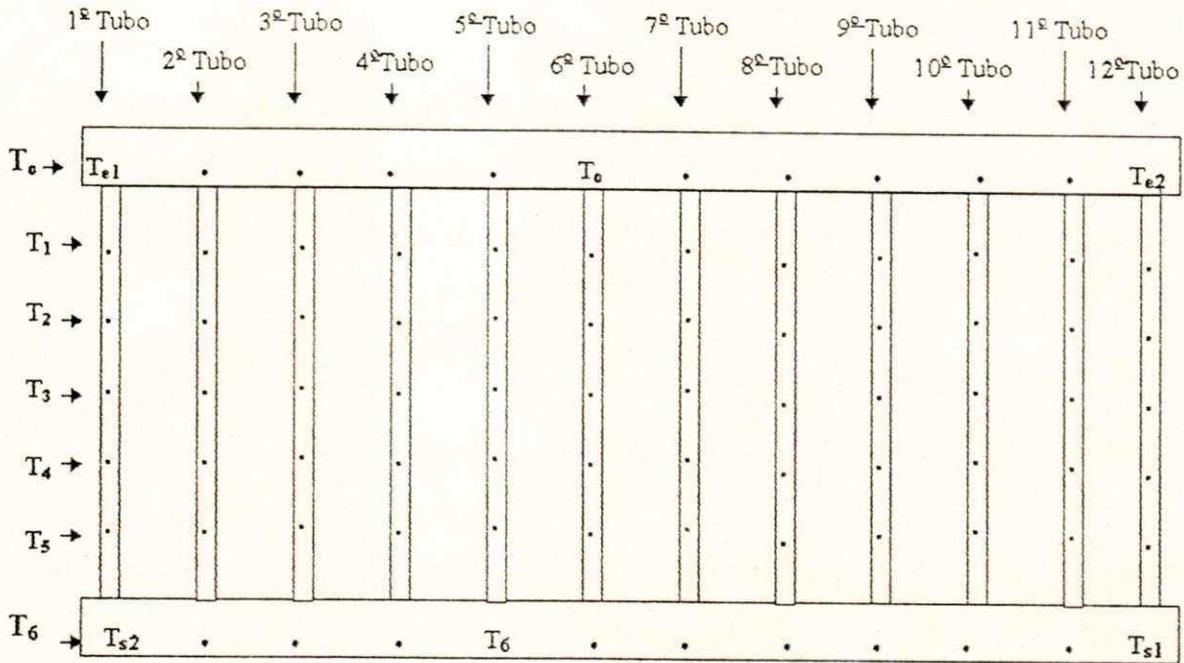


Figura 3.9 - Dissipador de Calor e a distribuição dos pontos, nos quais foram conectados os termopares.

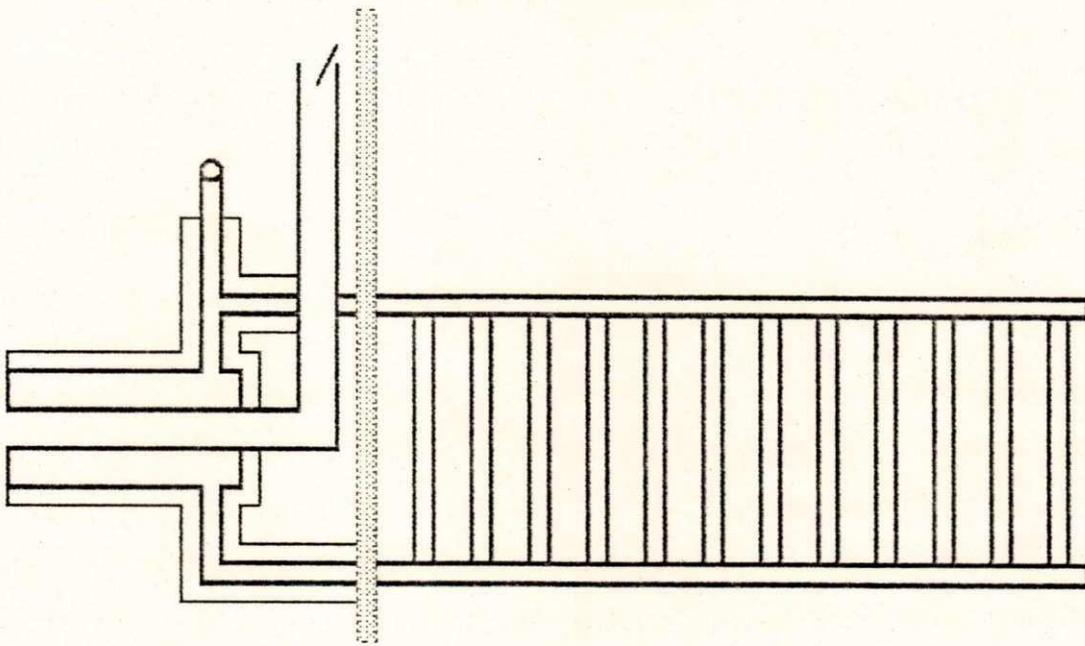


Figura 3.10 - Sistema Térmico

### 3.5 - METODOLOGIA

Uma vez construído e testado o sistema, os dados foram obtidos em função do fluido térmico, do posicionamento da chama do hidrogênio, do volume do ambiente utilizado para os testes e do consumo de energia.

Partindo destes princípios a performance do sistema foi estudada em termos de: variação da temperatura nos ambientes interno e externo com o tempo, consumo de hidrogênio (energia) e quantidade de calor fornecida.

#### 3.5.1 - INSTALAÇÃO DO SISTEMA

O sistema eletrolítico foi instalado em local seco, e em plano horizontal. Deve-se evitar ambientes fechados para que não haja o acúmulo dos gases produzidos e assim evitar riscos de incêndios ou mesmo explosões. A instalação elétrica deve estar preparada para suportar uma corrente de pico de até 30 A. O sistema de aquecimento foi instalado em plano horizontal, próximo ao sistema eletrolítico, ao alcance do maçarico. A unidade de aquecimento do fluido localizou-se no ambiente externo ao ambiente da unidade de dissipação de calor, e ao abrigo de chuvas, ventos ou outros inconvenientes.

#### 3.5.2 - OPERAÇÃO COM OS SISTEMAS ELETROLÍTICO E TÉRMICO

##### - Sistema Eletrolítico

Inicialmente verifica-se se todas as torneiras do painel traseiro, tampões de abastecimentos e válvulas do maçarico estão fechados e liga-se o sistema de refrigeração. Em seguida faz-se a leitura do medidor de energia, liga-se a chave disjuntora, posiciona-se a chave seletora no máximo de 18A e aguarda-se até o desligamento automático da máquina, (a amperagem cai a zero), isto é quando os gases atingem a pressão de trabalho.

Durante toda a operação da máquina, deve-se observar e controlar a pressão em aproximadamente  $1\text{kgf/cm}^2$ .

### - Sistema Térmico

Deve-se ter o cuidado de retirar todo o ar que possa existir dentro do dissipador, para evitar erros de medida de temperatura, devido a formação de bolhas de ar. A retirada do ar é feita através do tubo de alimentação e com o óleo um pouco aquecido. Após iniciado o aquecimento, deve-se controlar a saída dos gases na chaminé através da válvula de controle, afim de se obter boa eficiência durante o aquecimento.

### 3.5.3 - REGULAGEM DA CHAMA E POSICIONAMENTO DO MAÇARICO

Os gases  $H_2/O_2$  produzidos pelo eletrolisador são gerados misturados, o que permite acender o fogo em qualquer um dos registros do maçarico. No presente trabalho utilizamos a chama que sai do lado da benzina, que é mais espalhada e proporciona melhor distribuição de calor no interior da cetilha. A regulagem da chama deve ser feita de maneira a deixar um penacho azul de aproximadamente 1,0 cm e evitar que a chama esteja soprando muito.

Alguns testes foram realizados para identificar o melhor posicionamento da chama ainda na fase de construção da cetilha. Foi observado que quanto mais próximo do tubo estiver o bico do maçarico, maior a faixa de altas temperaturas na região central do tubo mais interno. Porém deve ser mantida uma distância mínima de 1,5 a 2,0 cm da ponta do maçarico para a entrada da cetilha, devido a falta de espaço para entrada de ar e também para se evitar maiores perdas do calor dos gases da combustão do hidrogênio.

### 3.5.4 - FLUIDOS TÉRMICOS UTILIZADOS

Inicialmente foi utilizada a água pura avaliando-se apenas a variação de temperaturas da superfície na entrada e saída do dissipador e do meio ambiente em função do tempo. Realizados alguns testes, a pesquisa seguiu com o uso de um óleo orgânico sintético, comercialmente chamado de DOWTHERM \*G, doado e fabricado pela Dow Produtos Químicos Ltda, São Paulo-SP. Pode ser usado como meio líquido de transferência de calor até 370 °C, e é não corrosivo aos metais comuns, mesmo a altas temperaturas. O Apêndice C

apresenta suas características e propriedades físicas (MANUAL FLUIDOS TÉRMICOS DOW- EMPRESAS DOW).

### 3.5.5 - OBTENÇÃO DOS DADOS

Os dados obtidos foram as temperaturas em função do tempo para os ambientes interno (sala), externo e para a superfície de entrada e saída do dissipador, e o consumo de energia para produção do hidrogênio.

Para a realização das experiências foram utilizados dois ambientes. Inicialmente, uma sala construída com tijolo cerâmico e coberta com lage, tendo  $31,0 \text{ m}^3$  de volume. A sala possui uma porta de madeira e uma janela de vidro com dimensões de  $2,7 \times 1,0 \text{ m}$  coberta com uma camada de  $1,0 \text{ cm}$  de isopor.

Realizado um número suficiente de testes, a sala foi reduzida para metade de seu volume, através de uma divisória de madeira com  $2,0 \text{ cm}$  de espessura revestida internamente com uma camada de  $1,0 \text{ cm}$  de isopor.

Um termômetro de mercúrio foi localizado no centro da sala e outro na parede externa da sala ao ar livre.

À superfície dos tubos do dissipador foram conectados termopares em pontos de tomada de medida definidos, de acordo com a Figura 3.9, como segue:

$T_{e1}^a$  - Temperatura na superfície de entrada no início do dissipador utilizando água como fluido térmico;

$T_{e2}^a$  - Temperatura na superfície de entrada ao final do dissipador utilizando água como fluido térmico;

$T_{s1}^a$  - Temperatura na superfície de saída no final do dissipador utilizando água como fluido térmico;

$T_{s2}^a$  - Temperatura na superfície de saída no início do dissipador utilizando água como fluido térmico;

$T_{e1}^o$  - Temperatura na superfície de entrada no início do dissipador utilizando óleo como fluido térmico;

$T_{e2}^{\circ}$  - Temperatura na superfície de entrada ao final do dissipador utilizando óleo como fluido térmico;

$T_{s1}^{\circ}$  - Temperatura na superfície de saída no final do dissipador utilizando óleo como fluido térmico;

$T_{s2}^{\circ}$  - Temperatura na superfície de saída no início do dissipador utilizando óleo como fluido térmico;

$T_i$  - Temperatura nos pontos distribuídos verticalmente ao longo de cada tubo do dissipador, distantes 16,0 cm um do outro, com "i" variando de 1 a 5.

$T_a^a$  - Temperatura do ambiente interno utilizando água como fluido térmico;

$T_a^{\circ}$  - Temperatura do ambiente interno utilizando óleo como fluido térmico;

$T_{ext}$  - Temperatura do ambiente externo;

$T_{extf}$  - Temperatura do ambiente externo final;

$T_{exti}$  - Temperatura do ambiente externo inicial;

$T_{af}^a$  - Temperatura do ambiente interno final utilizando água como fluido térmico;

$T_{af}^{\circ}$  - Temperatura do ambiente interno final utilizando óleo como fluido térmico;

Os dados de temperatura foram obtidos em intervalos de 10 minutos, durante uma faixa de 180 a 240 minutos.

### 3.5.6 - FINALIZAÇÃO DE OPERAÇÃO

Ao término do período de cada experiência a finalização da operação inicia-se pelo apagamento da chama, seguido do desligamento da chave seletora de amperagens e do desligamento da energia.

A maneira mais segura de apagar a chama é abrir totalmente a válvula do maçarico do lado da benzina e fechá-la rapidamente. Esta técnica pode ser utilizada pois a válvula do maçarico do lado do álcool mantém-se fechada neste trabalho. Após o desligamento da máquina as válvulas do maçarico devem ser mantidas abertas, para permitir a depressurização da máquina, evitando possíveis acidentes.

### 3.5.7 - ABASTECIMENTOS

Sempre que os visores de nível da água e/ou fluidos controladores de chama (benzina) e fluido térmico indicarem “mínimo” deve-se proceder a reposição do líquido correspondente. O consumo de benzina é da ordem de  $0,05 \text{ l/Nm}^3 \text{ H}_2/\text{O}_2$ . O reabastecimento deve ser realizado com a máquina desligada. Abre-se completamente o maçarico e aguarda-se que a pressão caia a zero, em seguida abre-se o tampão de reabastecimento e coloca-se a quantidade de líquido faltante.

### 3.5.8 - CONSUMO DE ENERGIA

Para se obter a energia consumida em kwh em cada teste de aquecimento, instalou-se no sistema eletrolítico um medidor de energia elétrica. Foi medida a quantidade de energia consumida na produção de um certo volume de gás para um determinado tempo de aquecimento.

Através da obtenção do valor da energia consumida foi obtido o volume de gás hidrogênio produzido durante o tempo de aquecimento e a quantidade de calor em kcal fornecida ao sistema para o mesmo tempo.

## CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES

A performance do sistema foi estudada através de dois tipos de fluidos térmicos, água e óleo orgânico sintético Dowtherm \*G, da seguinte forma: Variação da temperatura na superfície do dissipador em função do tempo; Variação da temperatura do ambiente em função do tempo e do volume do ambiente de testes; Consumo de energia.

As Tabelas relativas aos dados experimentais encontram-se no Apêndice D.

### 4.1 - VARIAÇÃO DA TEMPERATURA EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA OS FLUIDOS: ÁGUA E ÓLEO DOWTHERM \*G

As Figuras 4.1 a 4.3 representam o comportamento da variação da temperatura na superfície do dissipador na entrada ( $T_e$ ) e na saída ( $T_s$ ), utilizando-se água como fluido térmico. As Figuras 4.4 a 4.6 são os dados relativos ao uso do óleo orgânico sintético Dowtherm \*G como fluido térmico. Esses dados foram obtidos conforme mencionado no Capítulo III, através de termopares conectados à superfície do dissipador de calor.

As Figuras mencionadas acima para ambos os fluidos apresentam um comportamento similar. Observou-se que, tanto para a água como o óleo, a variação de temperatura a superfície do dissipador na entrada e na saída aumenta em função do tempo. Observou-se que próximo aos 80 minutos para ambos os fluidos, as temperaturas de entrada e saída iniciaram um comportamento constante, que denominamos de regime de estabilização. No caso da água a faixa de temperatura de estabilização foi de 98 a 103 °C, enquanto que a do óleo foi de 113 a 125 °C. Comparando as temperaturas de entrada para os dois fluidos observa-se que  $T_e^o$  atingiu um valor superior a  $T_e^a$ . Este fato deve-se a diferença do ponto de ebulição de ambos os fluidos.

A Tabela D.6a (vide Apêndice D) apresenta a diferença da média das temperaturas na superfície de entrada e saída do dissipador de calor, em função do tempo para três bateladas utilizando água (Figuras 4.1 a 4.3) e três utilizando óleo Dowtherm \*G (Figuras 4.4 a 4.6), estes valores estão apresentados na Figura 4.6a. Observa-se que durante os

primeiros 15 minutos a diferença cresce rápido e linearmente tanto para água como o óleo. A partir deste ponto começam a apresentar um comportamento diferenciado. A diferença para água caiu bruscamente neste ponto, enquanto o óleo cresceu até os vinte minutos e começou a decrescer. Esta queda da diferença das temperaturas ocorre devido a elevação da temperatura de saída. Para ambos os fluidos a diferença caiu até próximo dos 50 minutos e a partir daí o sistema iniciou o regime de estabilização que se completou, como já observado anteriormente, próximo dos 80 minutos. A maior diferença das médias das temperaturas de entrada e saída, ocorreu para o óleo Dowtherm \*G, em torno de 50°C. A diferença das médias das temperaturas de estabilização para a água ocorreu em torno de 24°C. Esse fato demonstra que a maior transferência de energia do fluido para o ambiente ocorre com o uso do óleo orgânico sintético Dowtherm \*G.

As Figuras 4.7 a 4.9 representam os dados da variação da temperatura do ambiente interno e externo para três bateladas utilizando água e as Figuras 4.10 a 4.12, para três bateladas utilizando o óleo Dowtherm \*G, ambas em função do tempo. Os dados encontram-se nas Tabelas D.7 a D.12 e representados na Tabela 4.1, a qual mostra as temperaturas iniciais e finais do ambiente interno e externo e a diferença entre elas, para água e o óleo Dowtherm \*G.

Tabela 4.1 - Dados experimentais das temperaturas iniciais e finais do ambiente interno e externo para Água ( $T_{ai}^a$ ,  $T_{af}^a$  e  $T_{extf}^a$ ) e Óleo Dowtherm \*G ( $T_{ai}^o$ ,  $T_{af}^o$  e  $T_{extf}^o$ ) relativos as Figuras 4.7 a 4.12, para sala com volume original.

AGUA					ÓLEO DOWTHERM *G				
Batel.	$T_{ai}^a$ (°C)	$T_{af}^a$ (°C)	$T_{extf}^a$ (°C)	$T_{af}^a - T_{extf}^a$ (°C)	Batel.	$T_{ai}^o$ (°C)	$T_{af}^o$ (°C)	$T_{extf}^o$ (°C)	$T_{af}^o - T_{extf}^o$ (°C)
01	24	28	25	3	04*	28	32,5	25	7,5
02	24	29	25	4	05	24	29,8	25	4,8
03	25	29	26	3	06*	28	31	25	6,0

\*Na Tabela acima somente as bateladas 04 e 06 foram realizadas no período noturno.

Analisando as diferenças entre as temperaturas final e inicial da sala não se percebe variação significativa com o uso do óleo ( $T_{af}^o - T_{ai}^o$ ), ou da água ( $T_{af}^a - T_{ai}^a$ ); porém, analisando as diferenças entre as **temperaturas finais da sala e do ambiente** externo verifica-se que as diferenças com o uso do óleo são maiores que com o uso da água. Este fato indica que a taxa de elevação da temperatura utilizando óleo Dowtherm \*G como fluido térmico, é mais elevada apresentando assim melhores condições de aquecimento do meio ambiente.

A partir dos dados experimentais das temperaturas do ambiente interno em função do tempo, utilizando água e óleo Dowtherm \*G como fluidos térmicos foram obtidas as médias das temperaturas para três bateladas utilizando água (Tabelas D.7 a D.9) e três bateladas utilizando óleo (Tabela D.10 a D.12). As temperaturas médias encontram-se representadas na Figura 4.12a, e os dados na Tabela D.12a.

Para a variação das médias das temperaturas da sala para os dois fluidos em função do tempo, as curvas apresentaram as seguintes equações:

$$T_a^a = 0,0223.t + 24,95 \quad (4.1)$$

$$T_a^o = 0,0225.t + 27,17 \quad (4.2)$$

A partir das Equações (4.1) e (4.2) têm-se uma relação clara do efeito de aquecimento para os dois fluidos. Para o caso do óleo a temperatura inicial apresenta-se superior e sua elevação se dá mais rápida. Isso pode apresentar que, para aquecimento de um meio ambiente onde a temperatura externa é abaixo de 25 °C (conforme mostram as Tabelas D.10 a D.12), o óleo por apresentar um poder calorífico superior, oferece em termos econômicos melhor performance. Em função dos dados da Tabela D12.a, o óleo apresentou uma taxa de elevação da temperatura do ambiente interno da sala na ordem de 8,5% em relação a água.

Considerando os resultados observados e o fato de que, durante a realização dos testes utilizando a água foi necessário reabastecer o sistema ao final de cada batelada, enquanto para o óleo fez-se apenas o abastecimento inicial, os resultados apresentados a seguir foram obtidos com o uso do óleo Dowtherm \*G.

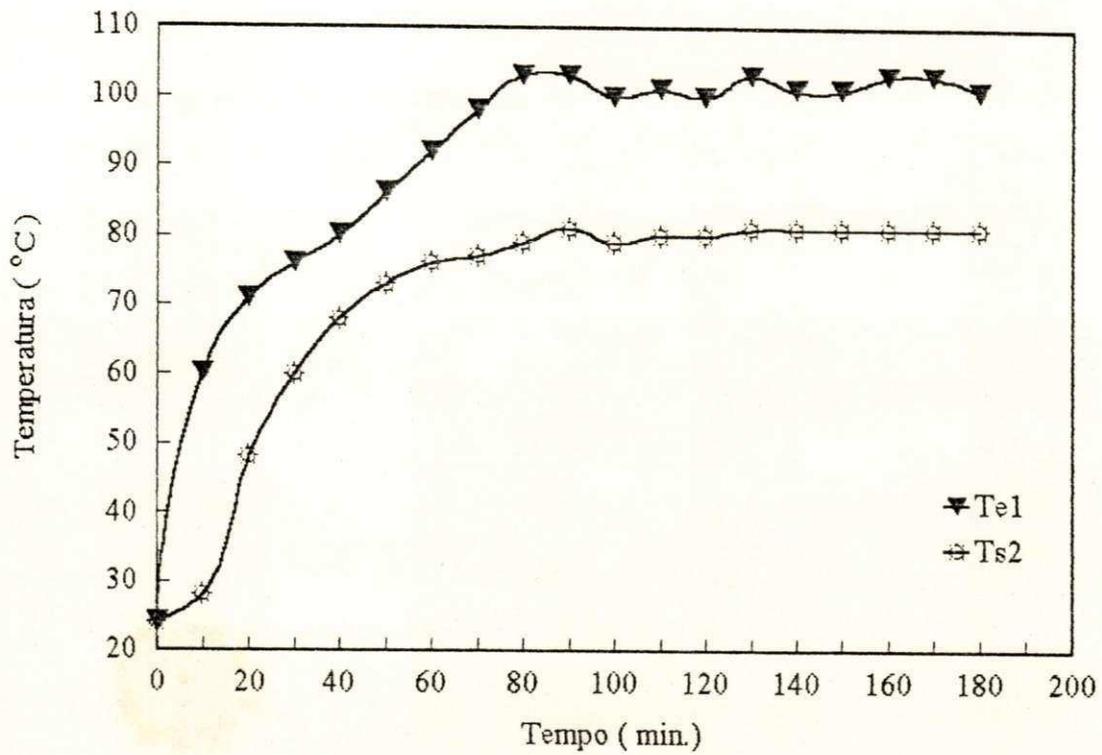


Figura 4.1 - Variação da Temperatura de entrada e saída em função do tempo, utilizando água.

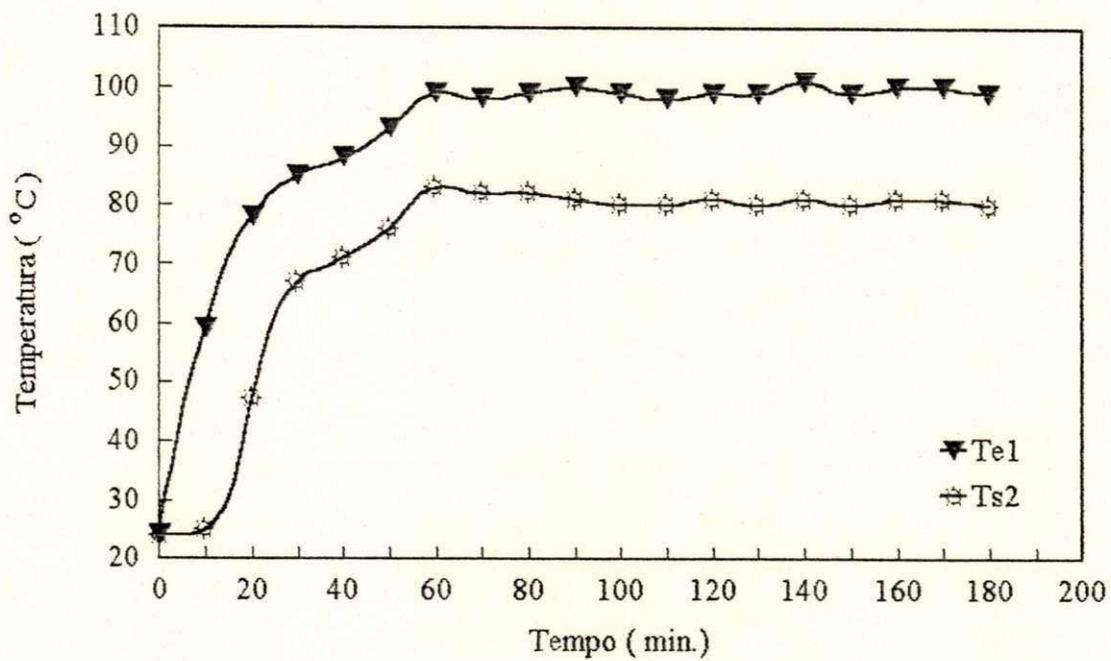


Figura 4.2 - Variação da Temperatura de entrada e saída em função do tempo, utilizando água.

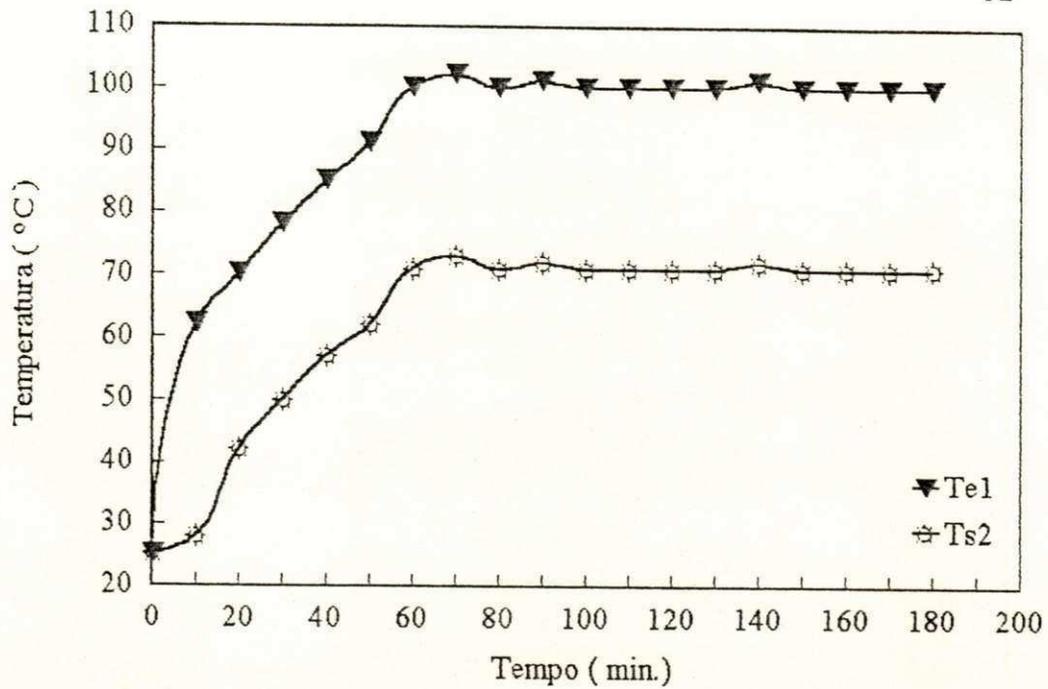


Figura 4.3 - Variação da Temperatura de entrada e saída em função do tempo, utilizando água.

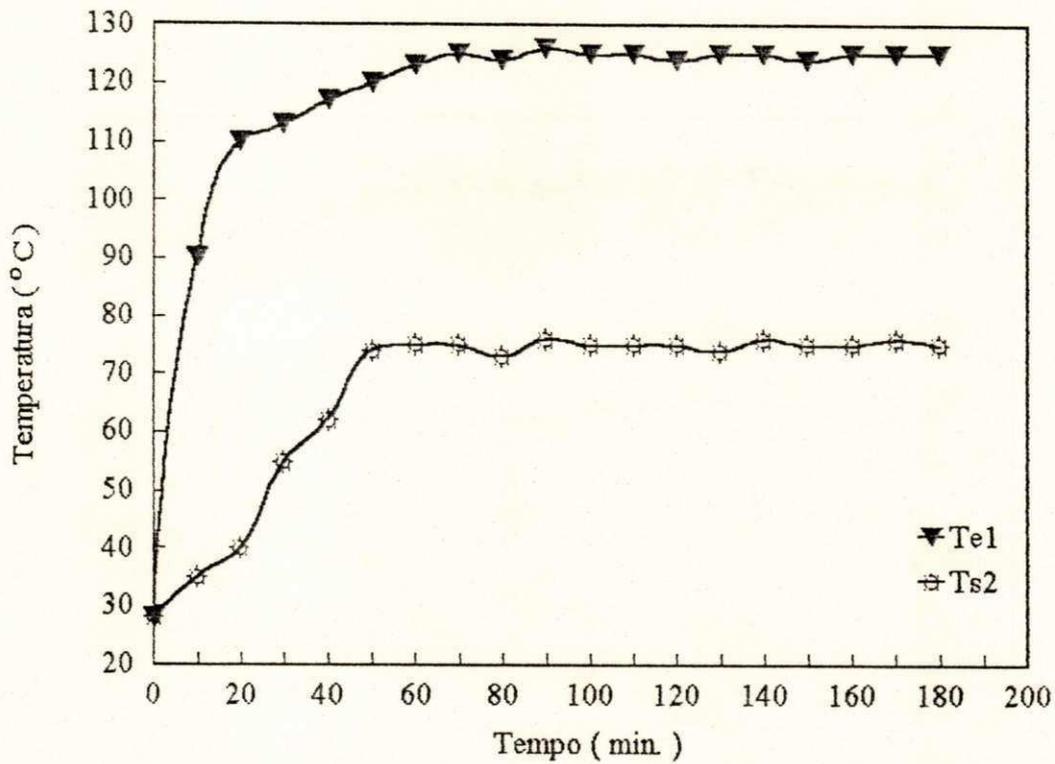


Figura 4.4 - Variação da Temperatura de entrada e saída em função do tempo, utilizando óleo Dowtherm \*G

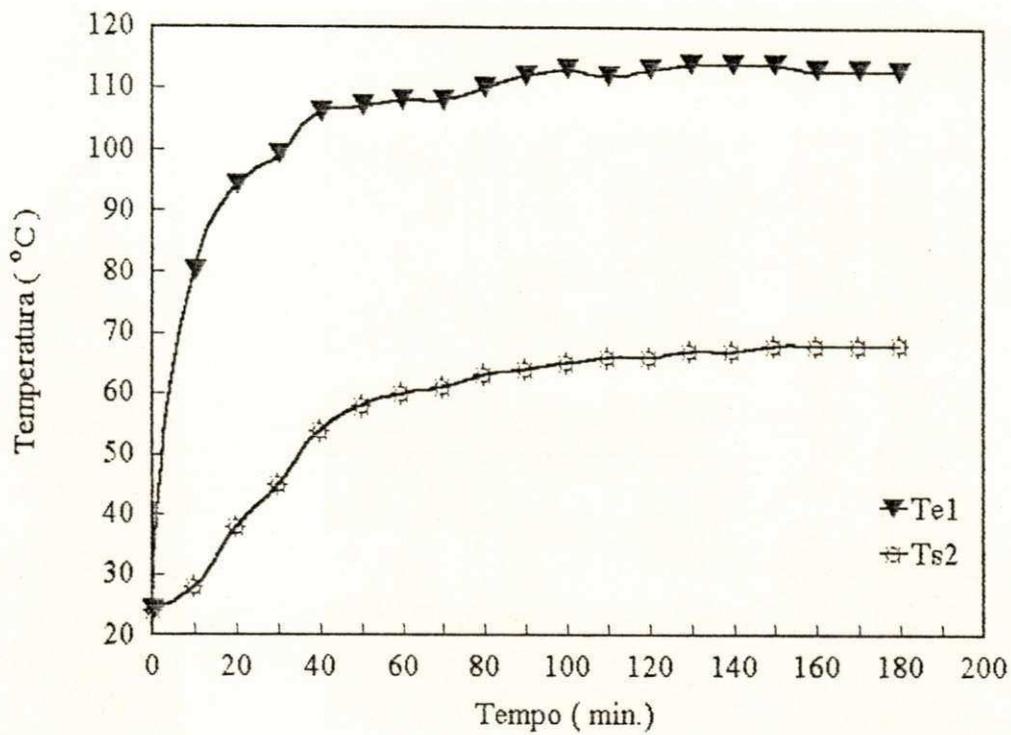


Figura 4.5 - Variação da temperatura de entrada e saída em função do tempo, utilizando óleo Dowtherm \*G

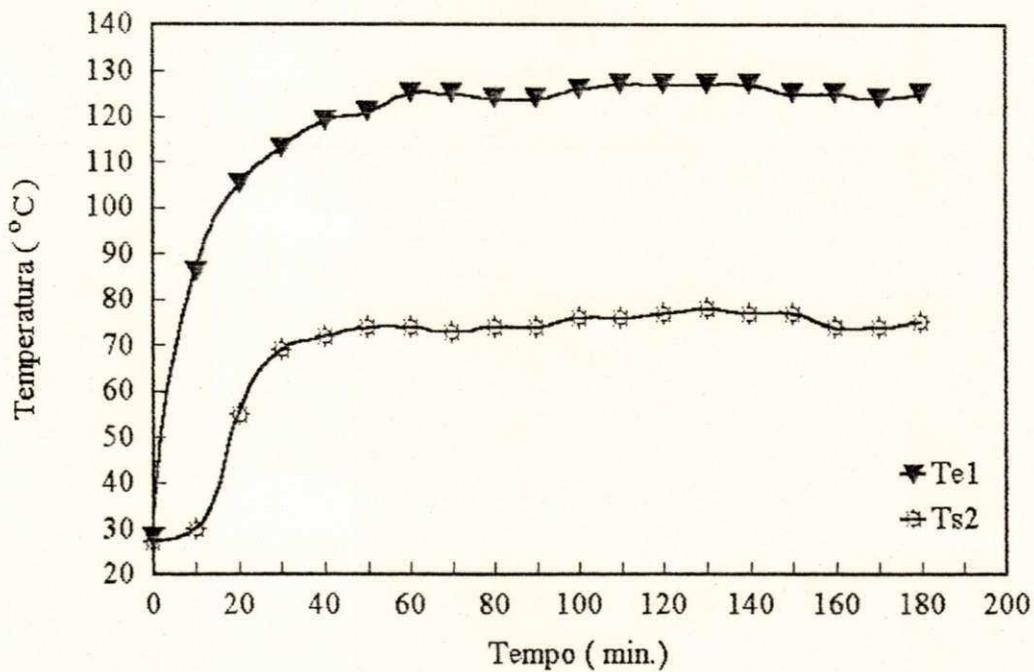


Figura 4.6 - Variação da Temperatura de entrada e saída em função do tempo, utilizando óleo Dowtherm \*G.

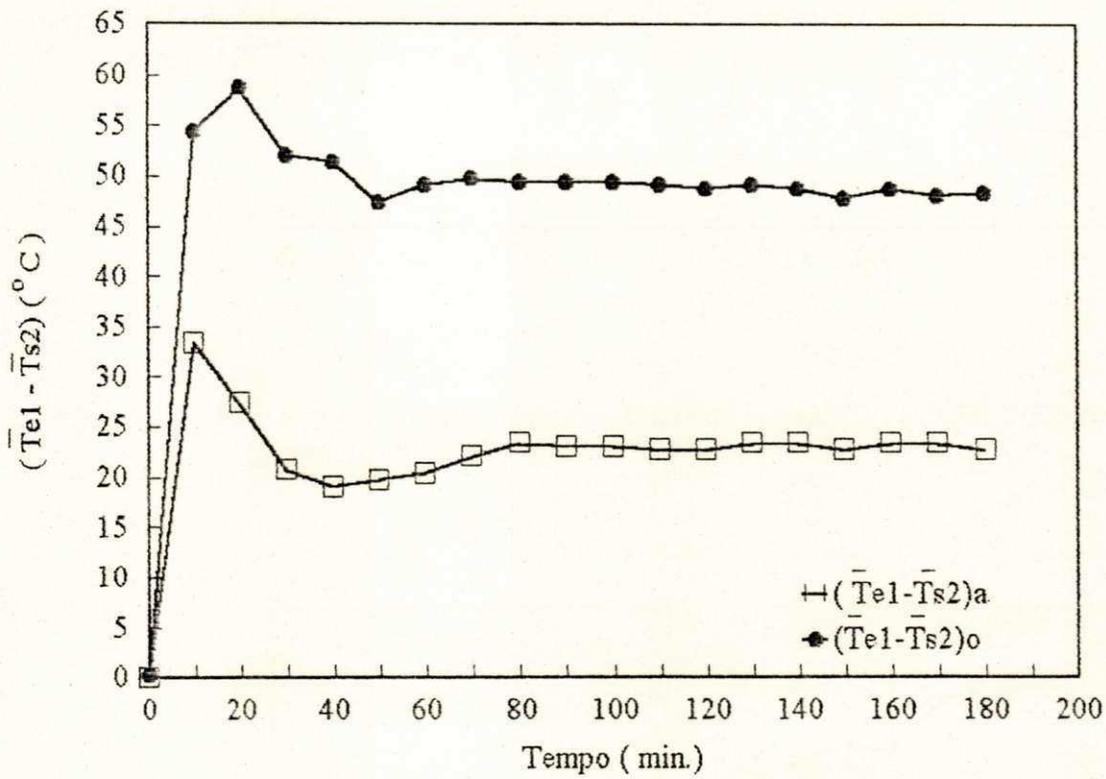


Figura 4.6a - Diferença entre as médias das temperaturas de entrada ( $\bar{T}_{e1}$ ) e saída ( $\bar{T}_{s2}$ ) em função do tempo, utilizando água e óleo Dowtherm \*G.

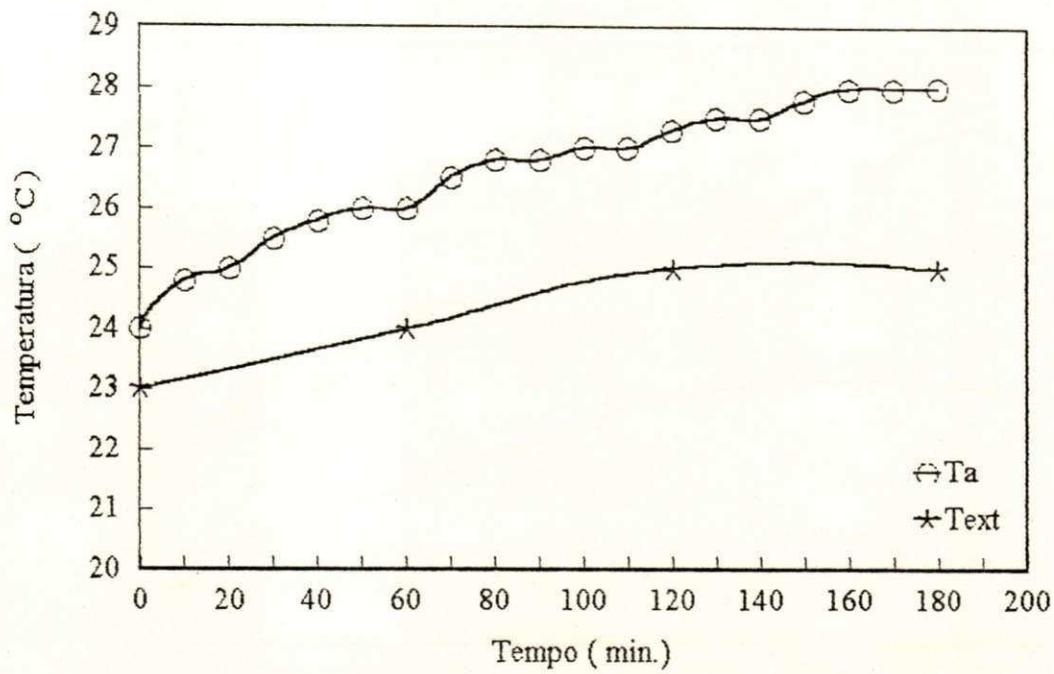


Figura 4.7 - Temperaturas do ambiente interno (Ta) e externo (Text) em função do tempo, utilizando água.

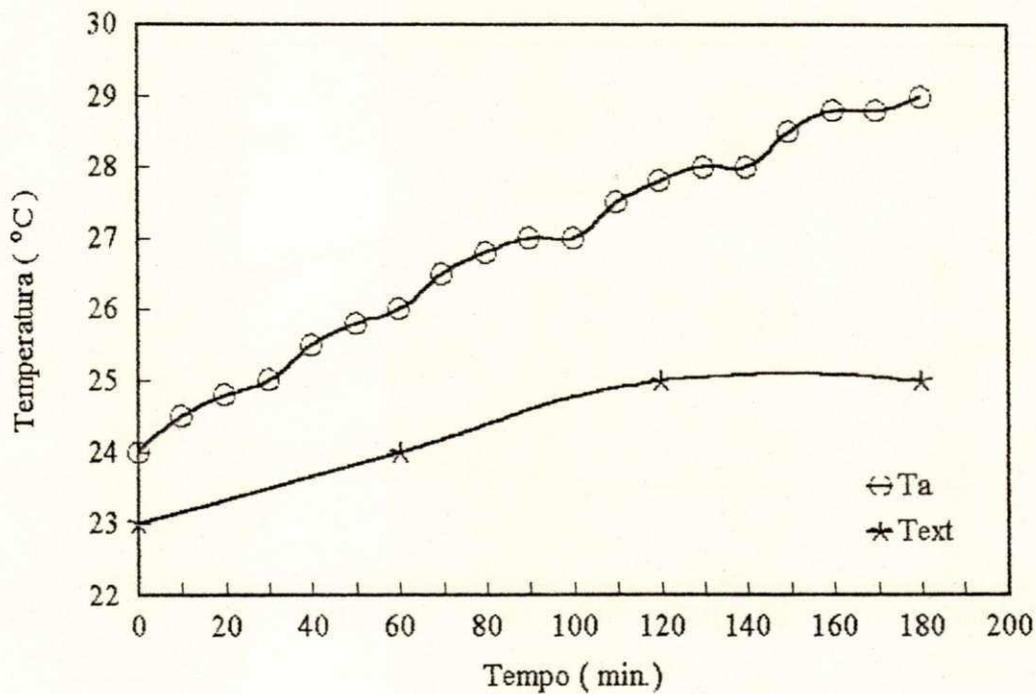


Figura 4.8 - Temperaturas do ambiente interno (Ta) e externo (Text) em função do tempo, utilizando água.

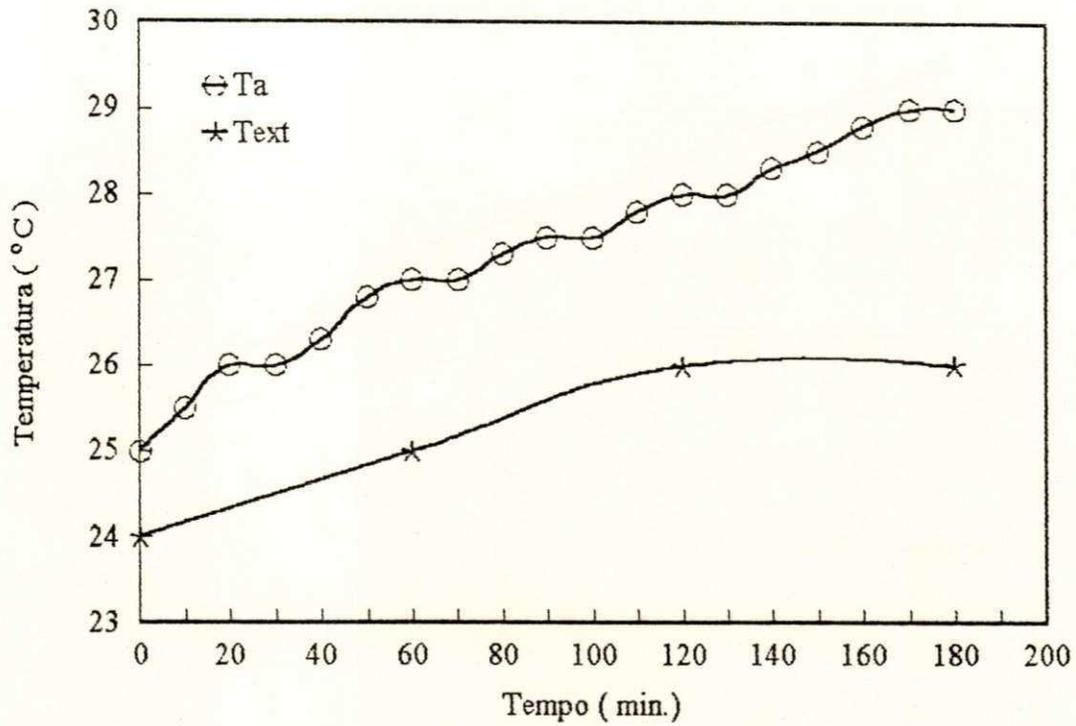


Figura 4.9 - Temperaturas do ambiente interno (Ta) e externo (Text) em função do tempo, utilizando água.

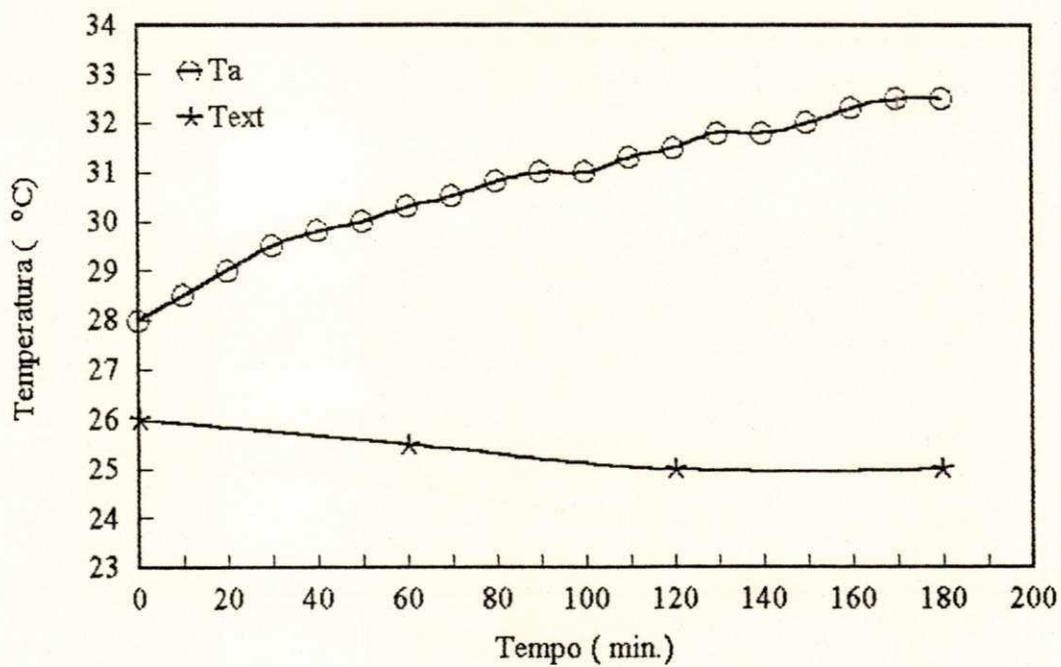


Figura 4.10 - Temperaturas do ambiente interno (Ta) e externo (Text) em função do tempo, utilizando óleo Dowtherm \*G.

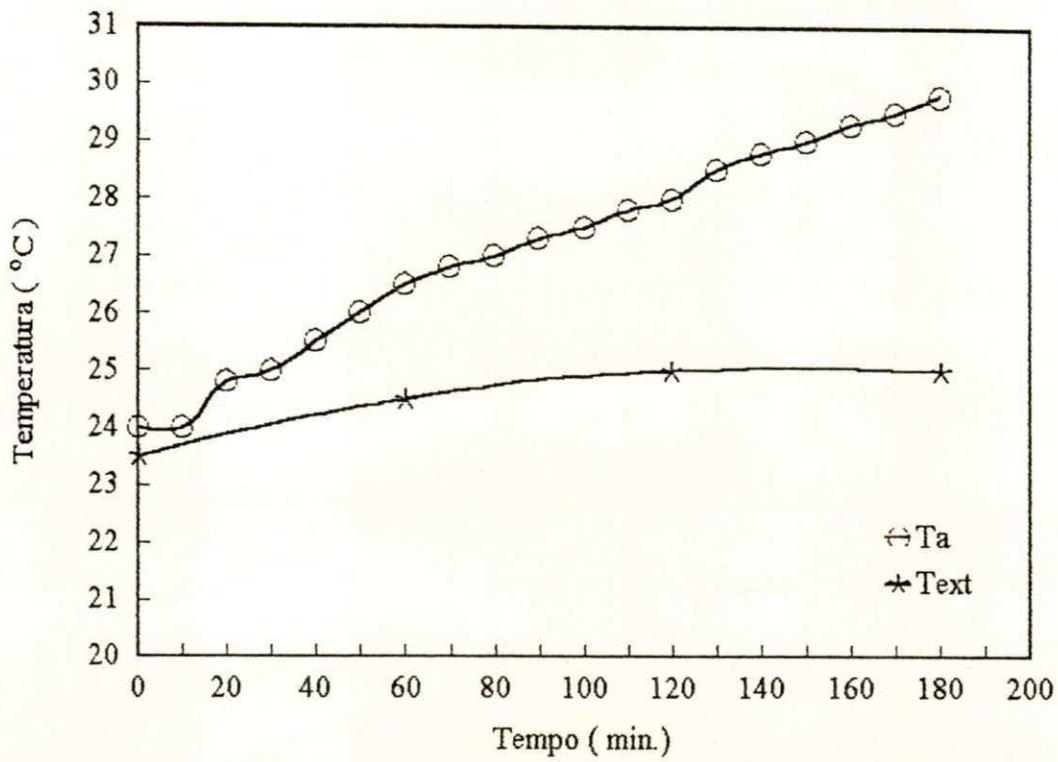


Figura 4.11 - Temperaturas do ambiente interno (Ta) e externo (Text) em função do tempo, utilizando óleo Dowtherm \*G.

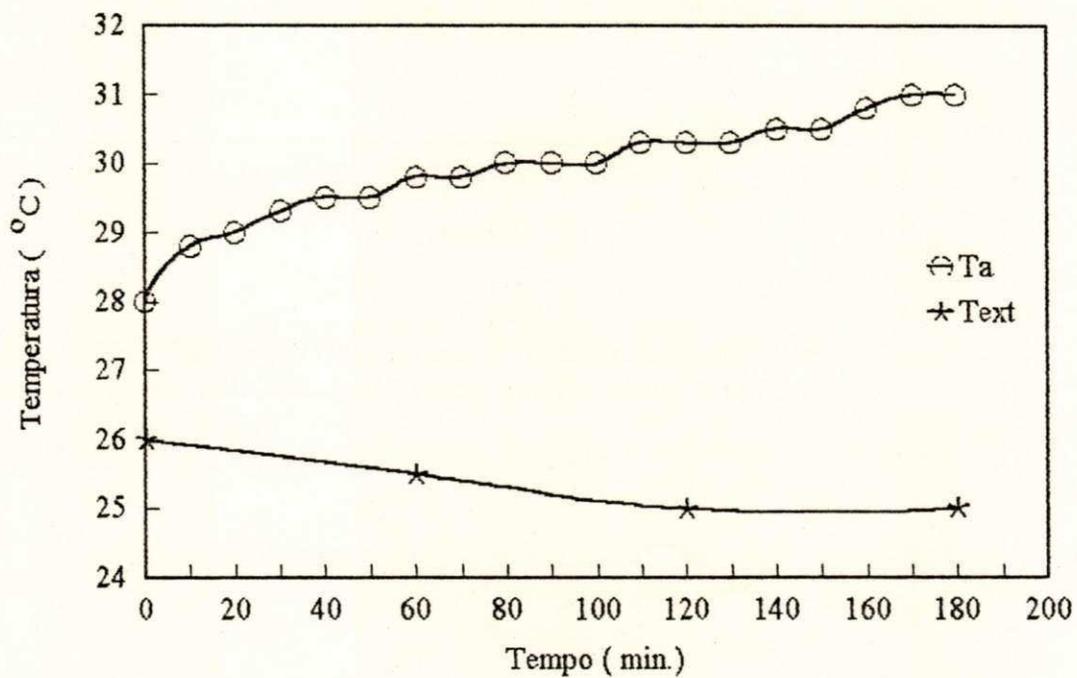


Figura 4.12 - Temperaturas do ambiente interno (Ta) e externo (Text) em função do tempo, utilizando óleo Dowtherm \*G.

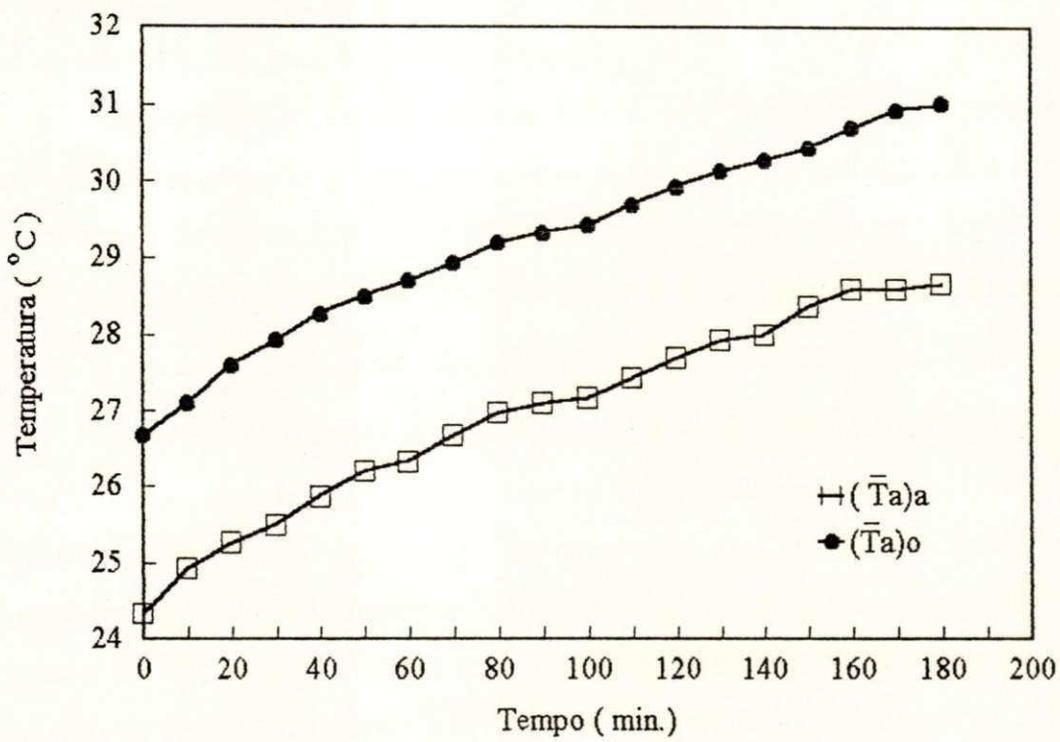


Figura 4.12a - Médias das temperaturas do ambiente interno ( $T_a$ ) em função do tempo, utilizando água ( $T_a$ )a e óleo Dowtherm \*G ( $T_a$ )o.

## 4.2 - PERFIL DE TEMPERATURA AO LONGO DO DISSIPADOR DE CALOR

O perfil de temperatura ao longo do dissipador foi estudado com o óleo Dowtherm \*G, conforme mostra a Figura 3.9, mencionada no Capítulo III. Duas situações de análise foram estabelecidas:

- Foram obtidas as temperaturas nas superfícies de entrada ( $T_{e1}$  e  $T_{e2}$ ) e saída ( $T_{s1}$  e  $T_{s2}$ ) do dissipador em função do tempo, conforme mostram as Figuras 4.13 a 4.16;
- Tomando a média de três bateladas (4.14, 4.15, 4.16) foram obtidas as temperaturas em cinco pontos ao longo do dissipador conforme mostra a Figura 3.9. Esses dados encontram-se apresentados na Figura 4.17.

Para o primeiro caso as Figuras 4.13 a 4.16 apresentaram um comportamento semelhante (ascendente) nos primeiros vinte minutos, e em seguida tende a estabilização conforme já observado. Em alguns casos a temperatura na entrada no início do dissipador ( $T_{e1}$ ) mantém-se muito próxima e/ou igual a temperatura na entrada ao final do dissipador ( $T_{e2}$ ). O mesmo comportamento foi observado para as duas temperaturas de saída ( $T_{s1}$  e  $T_{s2}$ ). Isto pode ocorrer devido a capacidade do fluido de apresentar condições de oferecer uma homogeneidade no transporte de calor ao longo do sistema.

A Tabela 4.2 mostra o perfil de temperatura para os 12 tubos do dissipador. As temperaturas  $T_0$  e  $T_6$  representam as temperaturas ao longo dos tubos horizontais superior e inferior em 12 pontos. Observa-se que ao longo do tubo horizontal, a temperatura mantém-se na faixa de 124,05 °C mínimo a 125,44 °C máximo para o tubo superior e, 76,33 °C a 79,81 °C para o tubo inferior. A diferença entre as temperaturas máxima e mínima para o tubo superior é de 1,39 °C e o tubo inferior de 3,48 °C, apresentando assim, uma pequena variação na temperatura ou uma distribuição uniforme da temperatura ao longo dos dois tubos, confirmando o comportamento observado nas Figuras 4.13 a 4.16.

Analisando a temperatura no ponto  $T_1$  para os 12 tubos verticais, verifica-se que ocorrem variações maiores que as observadas para os tubos horizontais. A temperatura varia entre 100,67 °C mínimo e 113,33 °C máximo, com uma diferença de 12,66 °C. Estudando essa variação para os pontos  $T_3$  e  $T_5$  nos tubos verticais têm-se uma diferença

entre as temperaturas máximas e mínimas de 12,00 e 12,33 °C respectivamente. Comparando esses valores para os tubos horizontais, conclui-se que no sentido vertical do dissipador a distribuição de calor não apresentou uma homogeneidade considerável. Esse fato pode ser explicado pelo seguinte: a velocidade do fluido no interior dos tubos horizontais é diferente a dos tubos verticais, aparentemente conforme os dados apresentados, apresenta-se inferior devido a sua trajetória, apresentando assim pontos de temperatura diferentes. Um outro aspecto importante é a forma como o fluido está sendo aquecido desde a alimentação do dissipador e seu caminho durante o processo. Existe uma tendência de resfriamento natural através das perdas de cima para baixo. Esse comportamento encontra-se ilustrado através da Figura 4.17.

Tabela 4.2 - Médias do perfil de temperatura (°C) dos doze tubos do dissipador, para três bateladas utilizando óleo orgânico sintético Dowtherm \*G, nos pontos definidos conforme Figura 3.9 mencionada no Capítulo III.

Tubos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Temp.												
T <sub>0</sub> (°C)	<u>125,44</u>	125,31	125,19	125,06	124,93	124,81	124,88	124,56	124,43	124,30	124,18	<u>124,05</u>
T <sub>1</sub> (°C)	100,67	102,00	103,67	107,67	104,00	113,33	102,66	105,33	106,00	106,33	110,67	102,33
T <sub>2</sub> (°C)	103,33	92,33	96,33	96,00	97,00	89,33	93,33	101,33	98,33	95,67	96,33	102,33
T <sub>3</sub> (°C)	97,00	86,33	94,67	91,67	89,67	88,67	87,67	90,33	91,33	88,00	94,33	98,33
T <sub>4</sub> (°C)	92,67	79,00	83,00	80,33	86,00	80,33	82,67	85,00	82,00	80,33	94,00	82,67
T <sub>5</sub> (°C)	83,67	80,67	76,33	71,67	77,33	74,33	78,33	78,67	77,67	80,00	81,67	84,00
T <sub>6</sub> (°C)	79,33	79,09	<u>79,81</u>	78,53	78,26	77,98	77,71	77,44	77,15	76,88	76,60	<u>76,33</u>

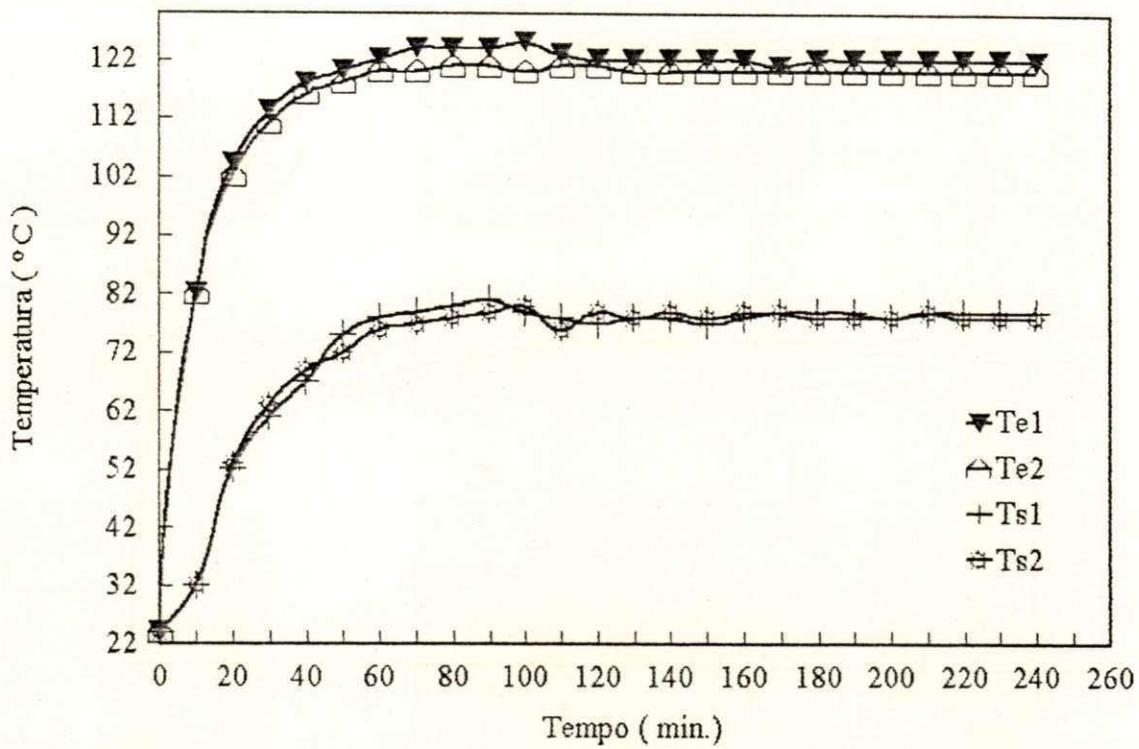


Figura 4.13- Temperaturas de entrada (Te) e saída (Ts) em função do tempo, utilizando óleo Dowtherm \*G.

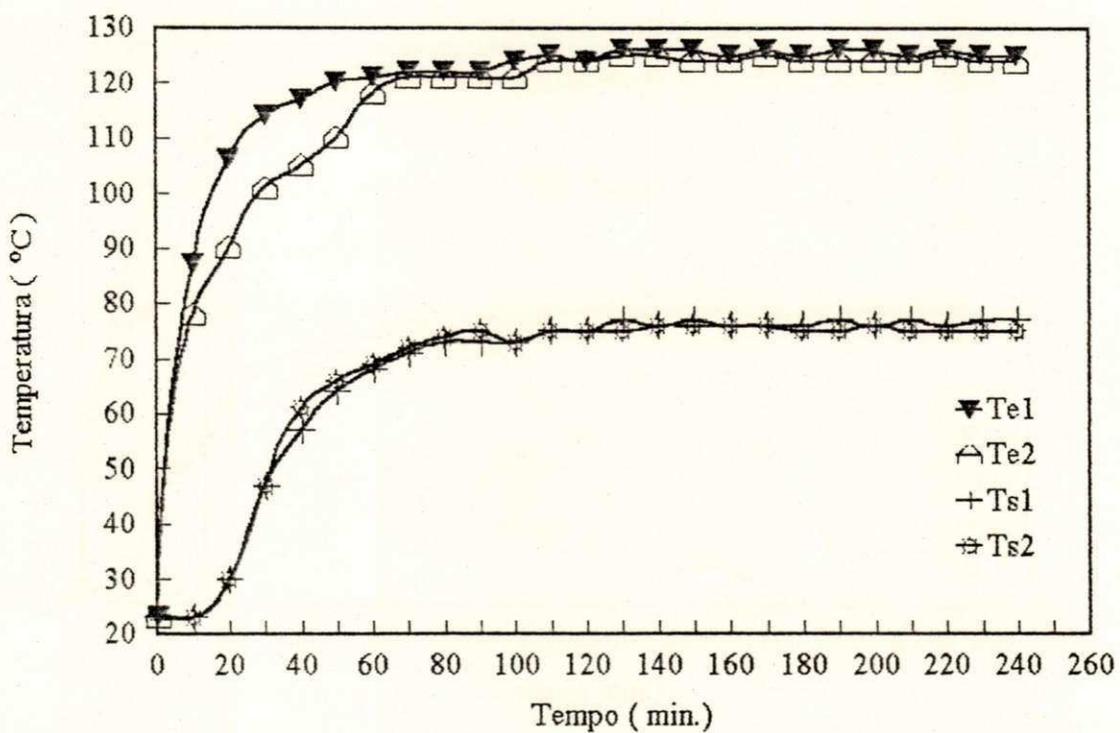


Figura 4.14 - Temperaturas de entrada (Te) e saída (Ts) em função do tempo, utilizando óleo Dowtherm \*G.

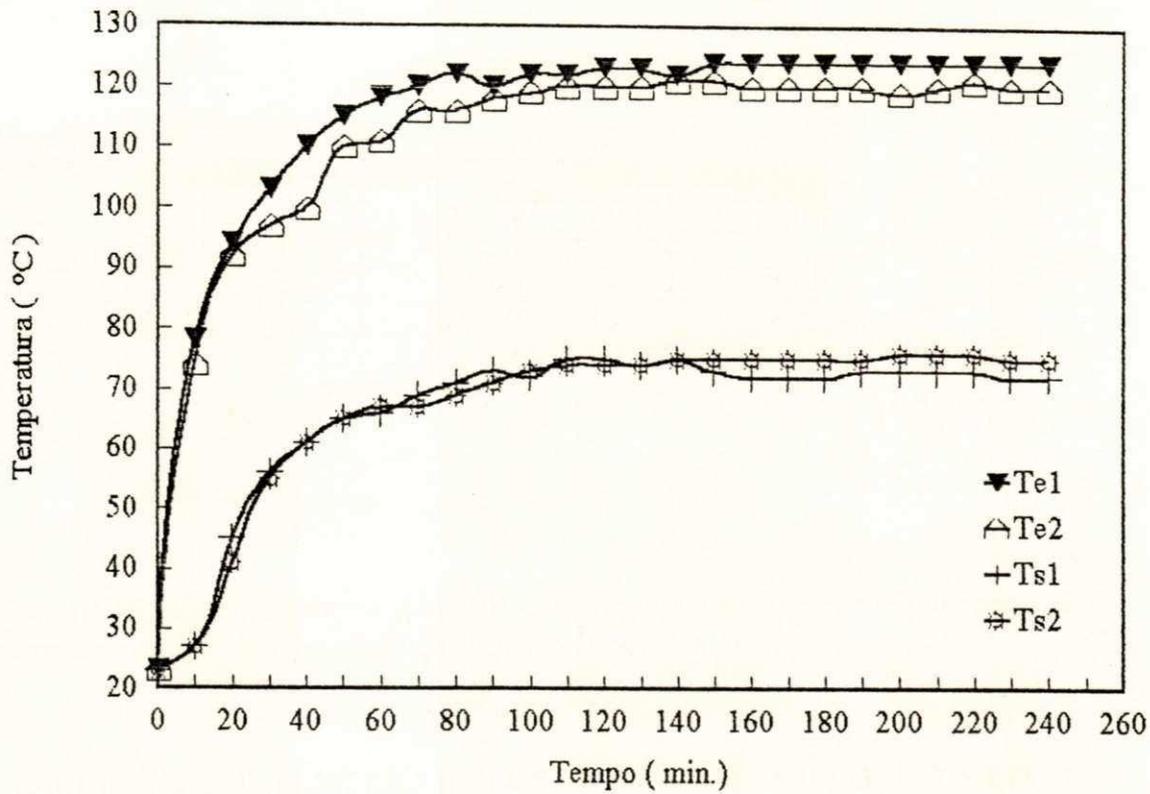


Figura 4.15 - Temperaturas de entrada (Te) e saída (Ts) em função do tempo, utilizando óleo Dowtherm \*G.

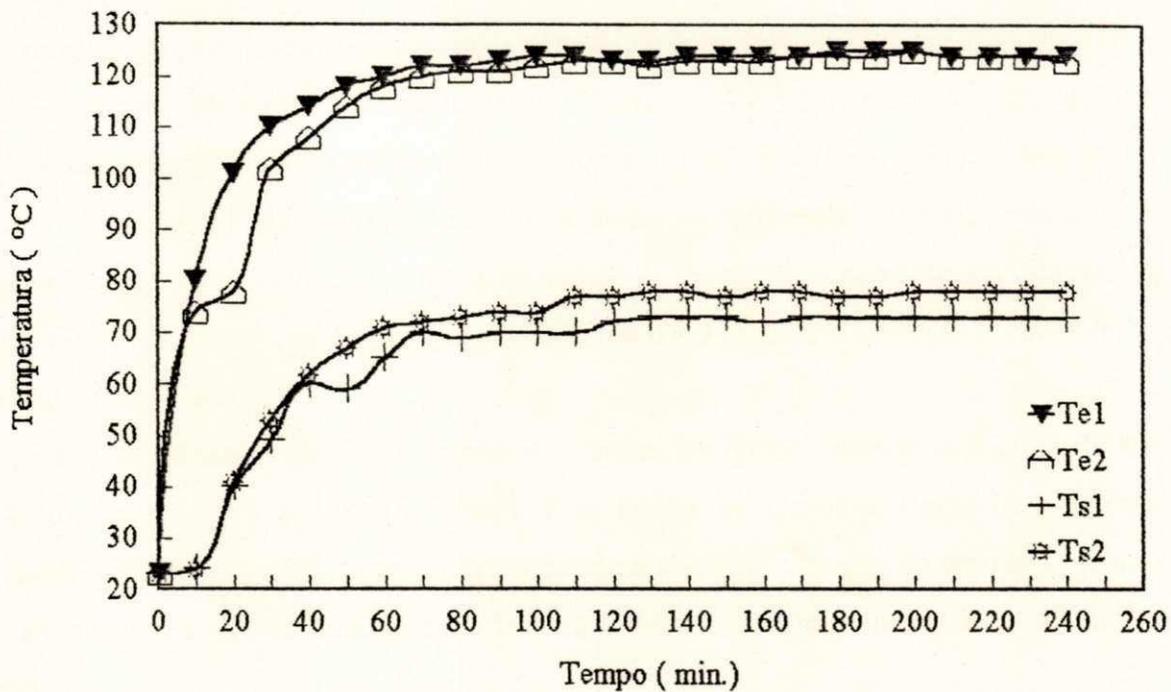


Figura 4.16 - Temperaturas de entrada (Te) e saída (Ts) em função do tempo, utilizando óleo Dowtherm \*G.

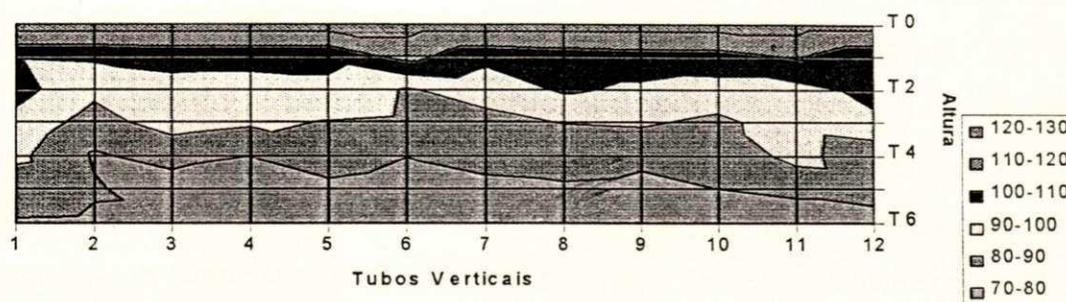


Figura 4.17 - Comportamento do perfil das temperaturas ao longo do dissipador de calor fazendo uso do óleo orgânico sintético Dowtherm \*G.

#### 4.3 - VARIAÇÃO DA TEMPERATURA EM FUNÇÃO DO VOLUME DO AMBIENTE

Conforme mencionado no Capítulo III, o sistema foi analisado em função de dois ambientes. Foram realizadas seis bateladas para a sala com volume  $31,0 \text{ m}^3$ , Figuras 4.18 a 4.23 e seis bateladas com o volume  $15,45 \text{ m}^3$ , Figuras 4.24 a 4.29. O tempo de duração de cada batelada foi de 180 a 240 minutos e o fluido térmico utilizado foi o óleo Dowtherm \*G. Analisando o perfil da variação da temperatura no ambiente interno, nota-se um comportamento semelhante para ambos os casos. A temperatura aumenta em função do tempo e a partir dos 90 minutos cresce rapidamente e em seguida o aumento torna-se lento tendendo a estabilização.

Foram realizadas bateladas diurnas e noturnas, conforme mostram as Figuras 4.18 a 4.24 (diurnas) e 4.25 a 4.29 (noturnas). Para ambos os turnos a temperatura interna apresentou o mesmo comportamento, a temperatura cresce em função do tempo, enquanto que a temperatura externa durante o dia tende a aumentar e no expediente da noite tende a diminuir.

A título de estudar com mais detalhe a variação dessas temperaturas para ambas as salas a Tabela 4.3 apresenta os acréscimos da temperatura do ambiente interno em função dos intervalos de 0 a 90 e 90 a 180 minutos. Para as bateladas 07 a 12 pertinentes ao volume menor apresentou maior acréscimo na temperatura do ambiente interno no intervalo de 0 a 90 minutos, enquanto que para as bateladas 01 a 06, apenas a batelada 04 não apresentou o mesmo comportamento. Para a sala de maior volume o acréscimo da temperatura interna foi superior à da sala de menor volume no intervalo de 90 a 180 minutos. Essas diferenças do acréscimo de temperatura podem ser explicadas pelo seguinte: a temperatura nos primeiros 90 minutos ascende mais rápido no ambiente de menor volume, enquanto que, para esse mesmo intervalo de tempo, o de maior volume oferece maior área de expansão desfavorecendo assim a taxa de transferência de calor. Analisando, ainda em função do volume do meio ambiente, para intervalos superior a 90 minutos, na sala de menor volume a temperatura interna tende a entrar em regime de estabilização para as experiências realizadas no período noturno enquanto a temperatura externa diminui, conforme mostram as Figuras 4.25 a 4.29. Isso leva a crer que a temperatura externa pelo fato de está diminuindo, influencia no rendimento do dissipador de calor. Já para as experiências realizadas nos períodos diurnos para o ambiente de maior volume ocorre o contrário, a temperatura externa de certa forma contribui no aumento da temperatura interna do ambiente. Fazendo uma análise global dos casos, deve ser considerado o seguinte: a heterogeneidade de materiais que formam o meio, e a ausência de isolamento das paredes.

A Tabela 4.4 apresenta como ocorre a diferença entre as temperaturas iniciais e finais do ambiente interno e externo. Tomando os valores médios das temperaturas, com o dissipador operando no ambiente de  $31,0 \text{ m}^3$  a diferença da temperatura do ambiente interno ( $\Delta T_a^\circ$ ) foi de 0,9 % acima àquela obtida para o ambiente de  $15,45 \text{ m}^3$ . Já para a diferença de temperatura externa esse último apresentou um percentual de 0,6 % superior a do ambiente de  $31,0 \text{ m}^3$ . Esse quadro mais uma vez mostra de outro ângulo a influência da temperatura externa na temperatura do ambiente interno. Os valores negativos da diferença da temperatura externa, deve-se ao fato da temperatura externa diminuir durante as bateladas realizadas no período noturno.

Tabela 4.3 - Acréscimo da Temperatura do ambiente interno ( $T_{ai}^{\circ}$ ) para os intervalos de 0 - 90 e 90 - 180 minutos, para sala com volume reduzido.

Volume da sala = 31,0 m <sup>3</sup>			Volume da sala = 15,45 m <sup>3</sup>		
Batelada *	Intervalo de Tempo (min.)	Acréscimo da $T_{ai}^{\circ}$ (°C)	Batelada	Intervalo de Tempo (min.)	Acréscimo da $T_{ai}^{\circ}$ (°C)
01	0 - 90	+ 3,5	07	0 - 90	+ 6,3
	90 - 180	+ 2,5		90 - 180	+ 2,2
02	0 - 90	+ 2,8	08	0 - 90	+ 4,0
	90 - 180	+ 2,7		90 - 180	+ 0,8
03	0 - 90	+ 4,0	09	0 - 90	+ 5,0
	90 - 180	+ 2,3		90 - 180	+ 2,0
04	0 - 90	+ 2,3	10	0 - 90	+ 4,5
	90 - 180	+ 2,7		90 - 180	+ 0,5
05	0 - 90	+ 4,5	11	0 - 90	+ 4,5
	90 - 180	+ 2,5		90 - 180	+ 1,0
06	0 - 90	+ 3,8	12	0 - 90	+ 4,5
	90 - 180	+ 2,0		90 - 180	+ 1,0

Tabela 4.4 - Temperaturas iniciais e finais (°C) para os ambientes interno e externo na sala com volume 31,0 m<sup>3</sup> e 15,45 m<sup>3</sup> utilizando óleo Dowtherm \*G.

Volume da Sala = 31,0 m <sup>3</sup>							Volume da Sala = 15,45 m <sup>3</sup>						
Bat.	$T_{ai}^{\circ}$	$T_{af}^{\circ}$	$T_{exti}^{\circ}$	$T_{extf}^{\circ}$	$\Delta T_a^{\circ}$	$\Delta T_{ext}^{\circ}$	Bat.	$T_{ai}^{\circ}$	$T_{af}^{\circ}$	$T_{exti}^{\circ}$	$T_{extf}^{\circ}$	$\Delta T_a^{\circ}$	$\Delta T_{ext}^{\circ}$
01	24,0	30,0	24,0	25,0	6,0	1,0	07	24,0	32,5	23,0	25,0	8,5	2,0
02	24,5	30,0	23,5	25,0	5,5	1,5	08	28,0	32,8	24,0	22,0	4,8	-2,0
03	25,0	31,0	24,0	25,0	6,0	1,0	09	26,0	32,0	24,0	22,0	6,0	-2,0
04	25,0	30,0	24,5	25,0	5,0	0,5	10	27,0	32,0	24,0	22,0	5,0	-2,0
05	25,0	32,0	24,0	26,0	7,0	2,0	11	26,0	31,5	23,0	21,0	5,5	-2,0
06	25,0	31,0	24,0	25,0	6,0	1,0	12	23,5	29,0	21,5	20,0	5,5	-1,5
<b>Méd</b>	<b>24,8</b>	<b>30,7</b>	<b>24,0</b>	<b>25,2</b>	<b>5,9</b>	<b>1,2</b>	<b>Méd</b>	<b>25,7</b>	<b>31,6</b>	<b>23,2</b>	<b>22,0</b>	<b>5,9</b>	<b>-1,3</b>

\* As bateladas 01 a 06 correspondem às Tabelas D.18 a D.23 e as 07 a 12 às Tabelas D.24 a D.29.

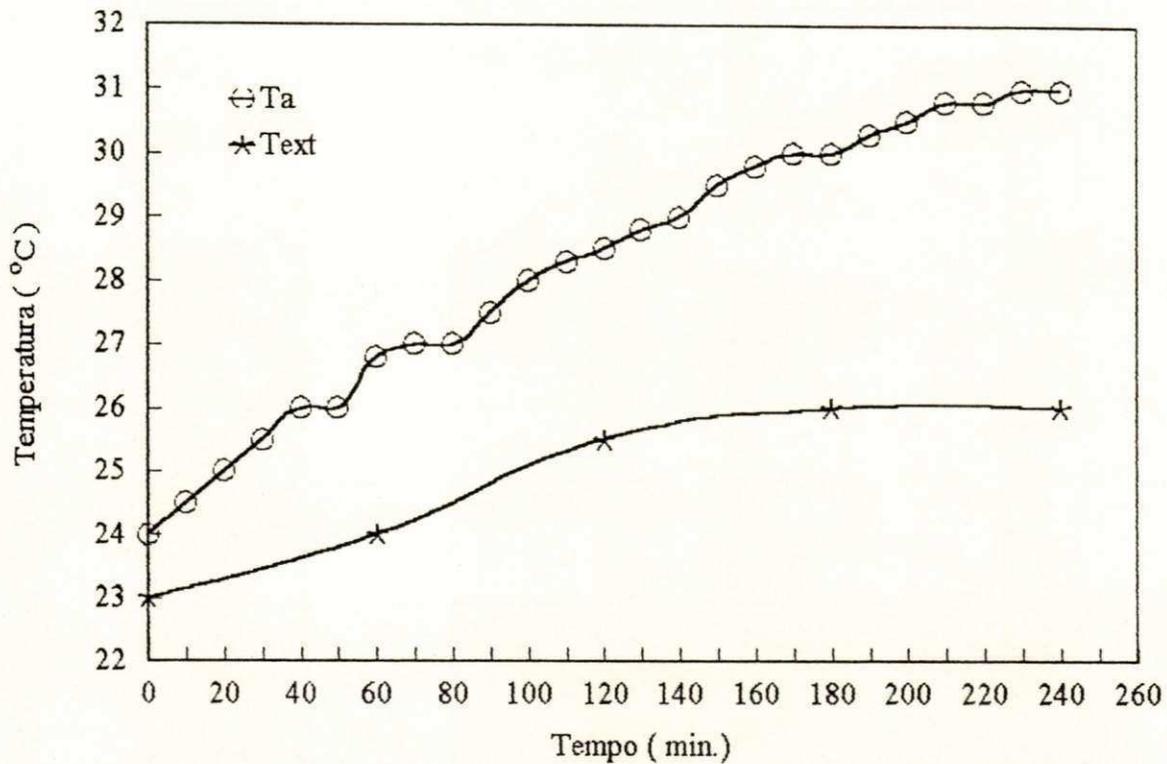


Figura 4.18 - Temperaturas dos ambientes interno (Ta) e externo (Text), em função do tempo, para sala com volume original e utilizando óleo Dowtherm \*G (Experiência realizada no período diurno).

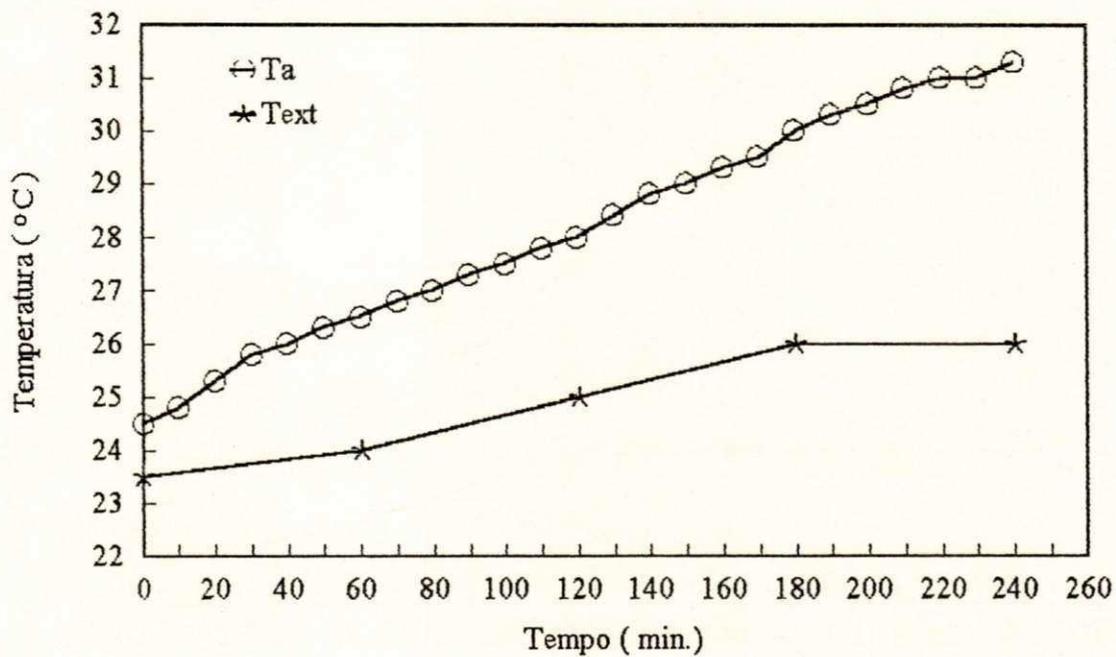


Figura 4.19 - Temperaturas do ambiente interno (Ta) e externo (Text), em função do tempo, para sala com volume original e utilizando óleo Dowtherm \*G (Experiência realizada no período diurno).

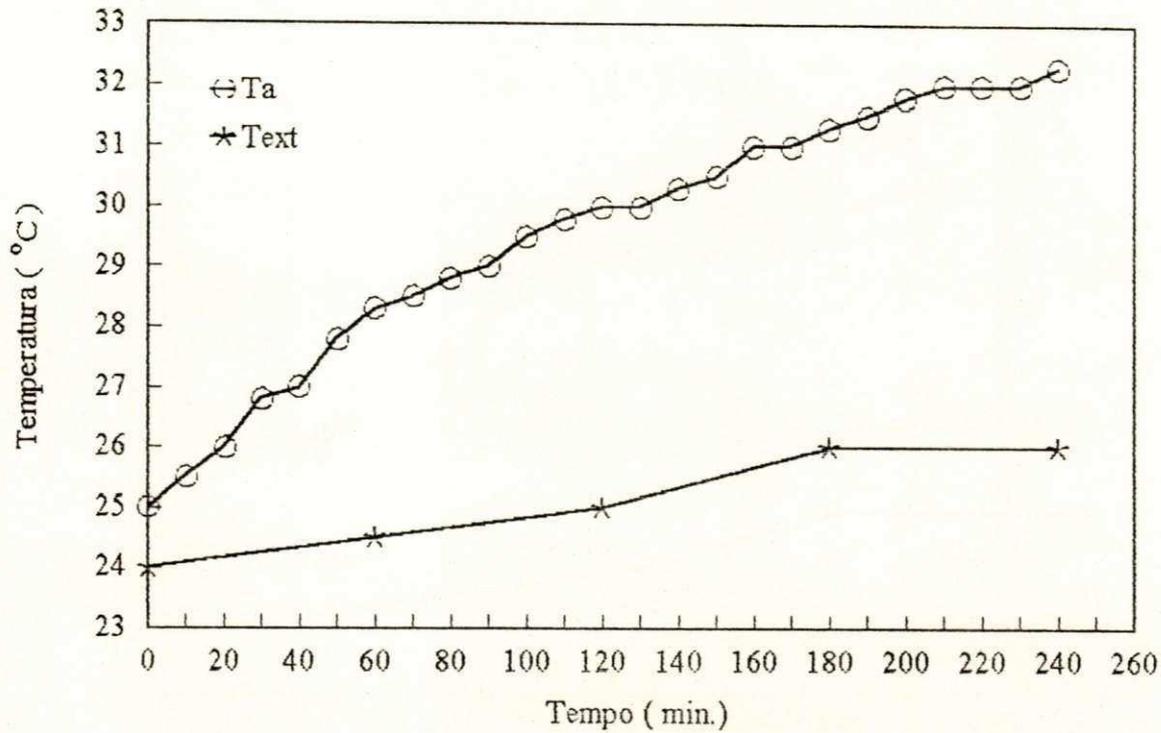


Figura 4.20 - Temperaturas dos ambientes interno (Ta) e externo (Text), em função do tempo, para a sala com volume original e utilizando óleo Dowtherm \*G (Experiência realizada no período diurno).

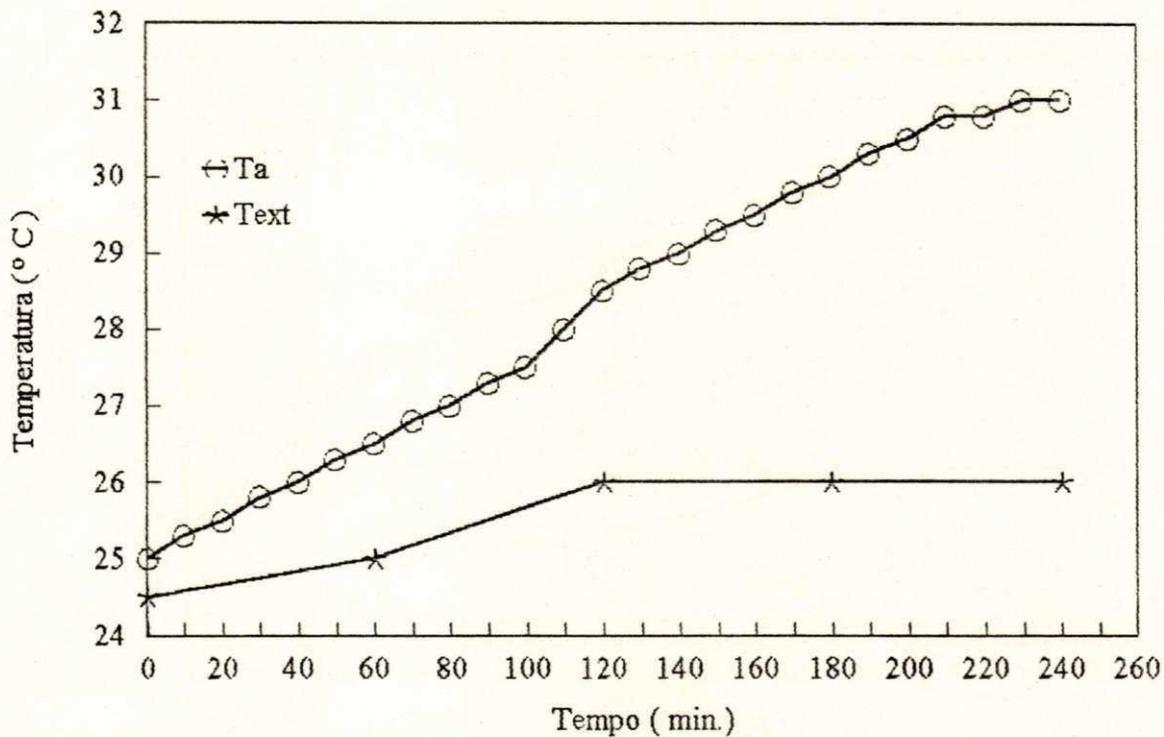


Figura 2.21 - Temperaturas dos ambientes interno (Ta) e externo (Text), em função do tempo, para a sala com volume original e utilizando óleo Dowtherm \*G (Experiência realizada no período diurno).

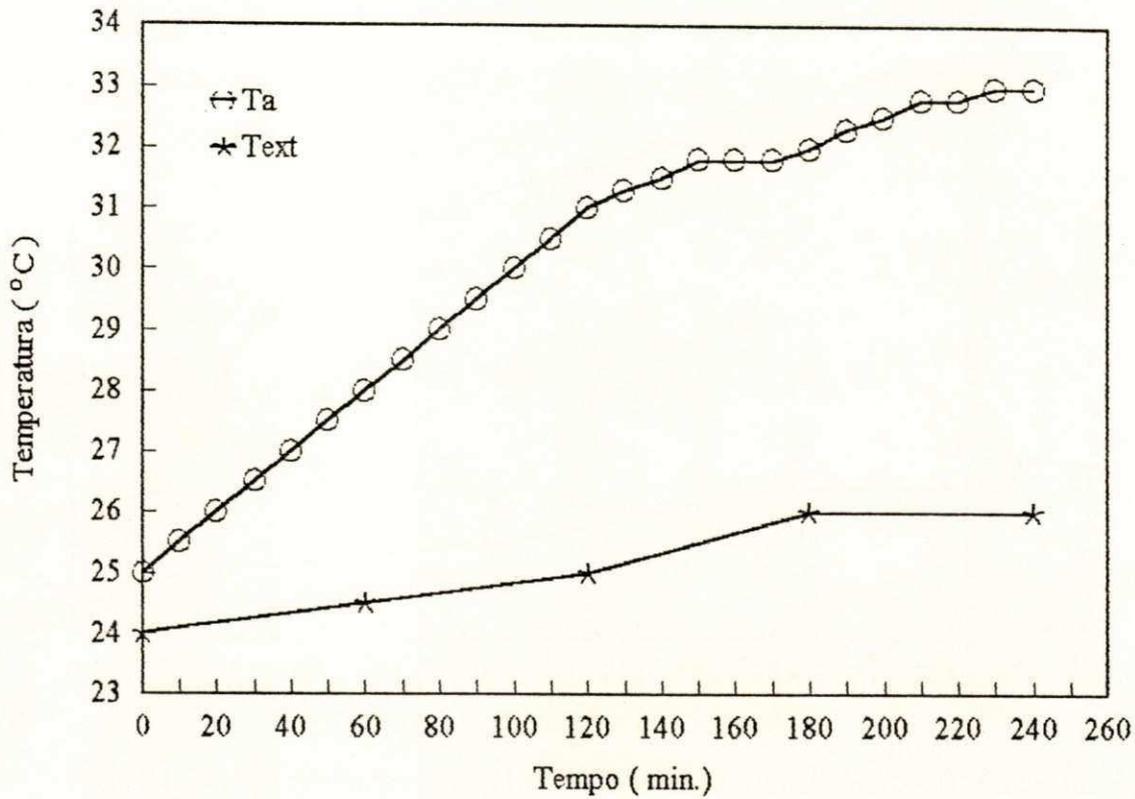


Figura 4.22- Temperaturas dos ambientes interno ( $T_a$ ) e externo ( $T_{ext}$ ), em função do tempo, para a sala com volume original e utilizando óleo Dowtherm \*G (Experiência realizada no período diurno).

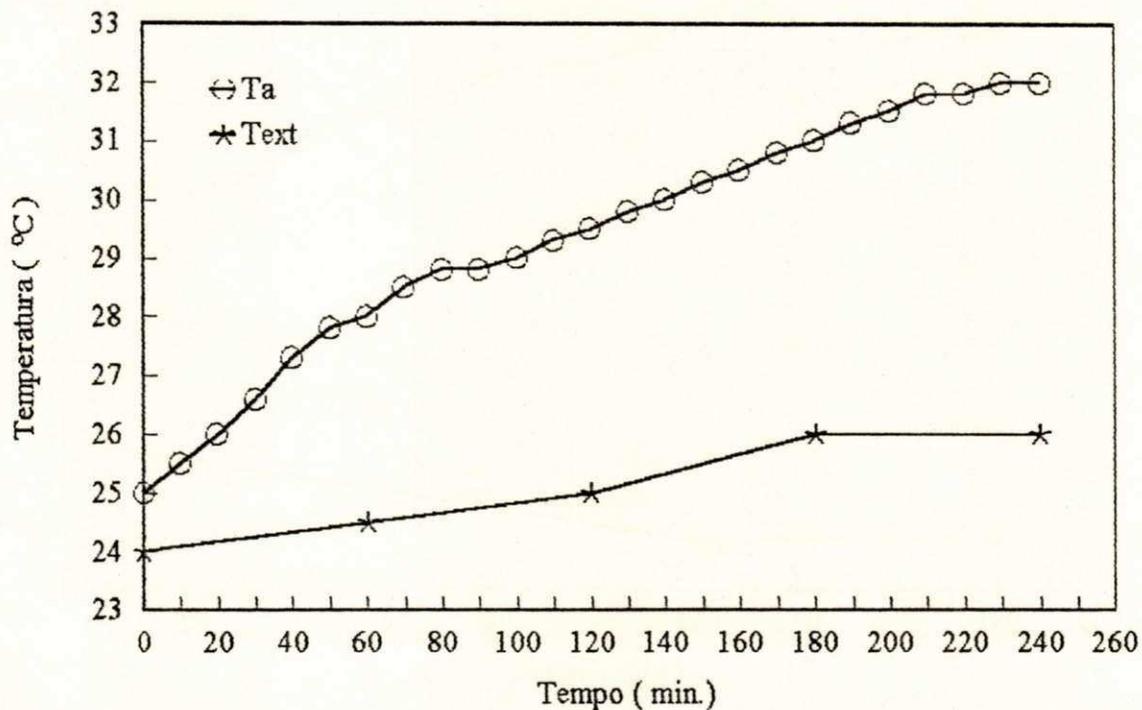


Figura 4.23- Temperaturas dos ambientes interno ( $T_a$ ) e externo ( $T_{ext}$ ), em função do tempo, para sala com volume original e utilizando óleo Dowtherm \*G (Experiência realizada no período diurno).

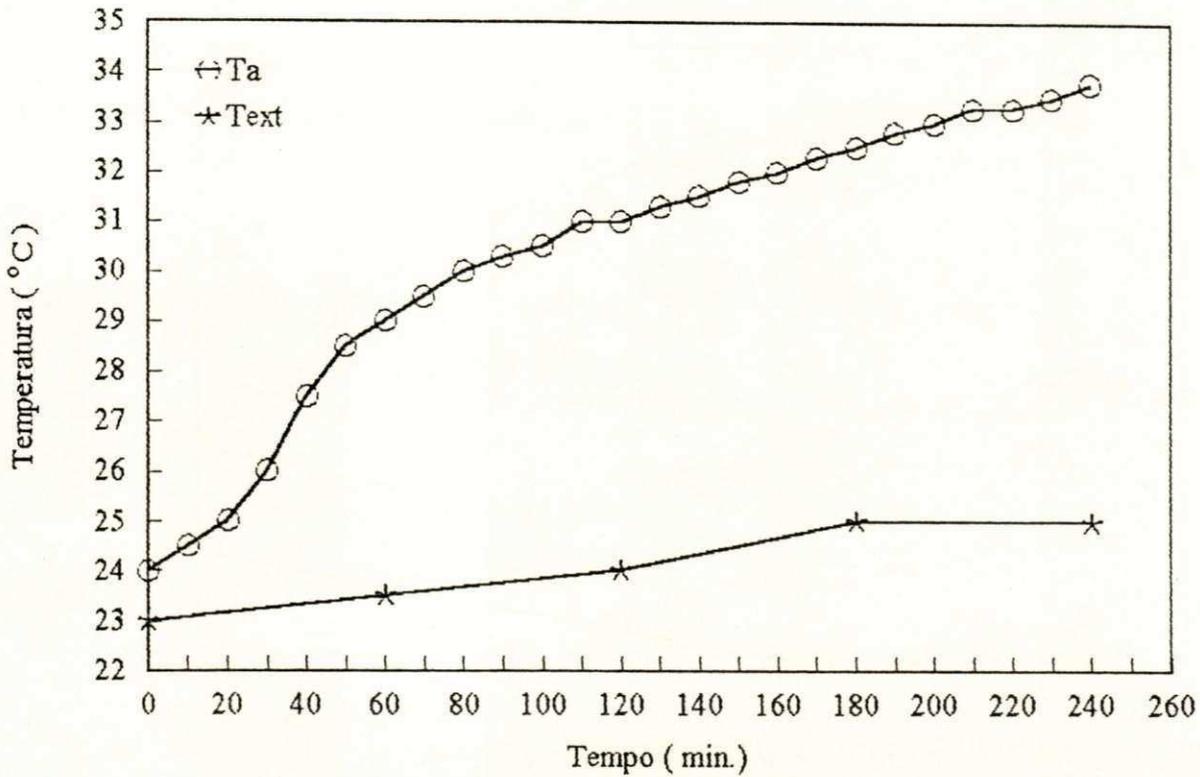


Figura 4.24 - Temperaturas dos ambientes interno (Ta) e externo (Text), em função do tempo, para sala com volume reduzido e utilizando óleo Dowtherm \*G (Experiência realizada no período diurno).

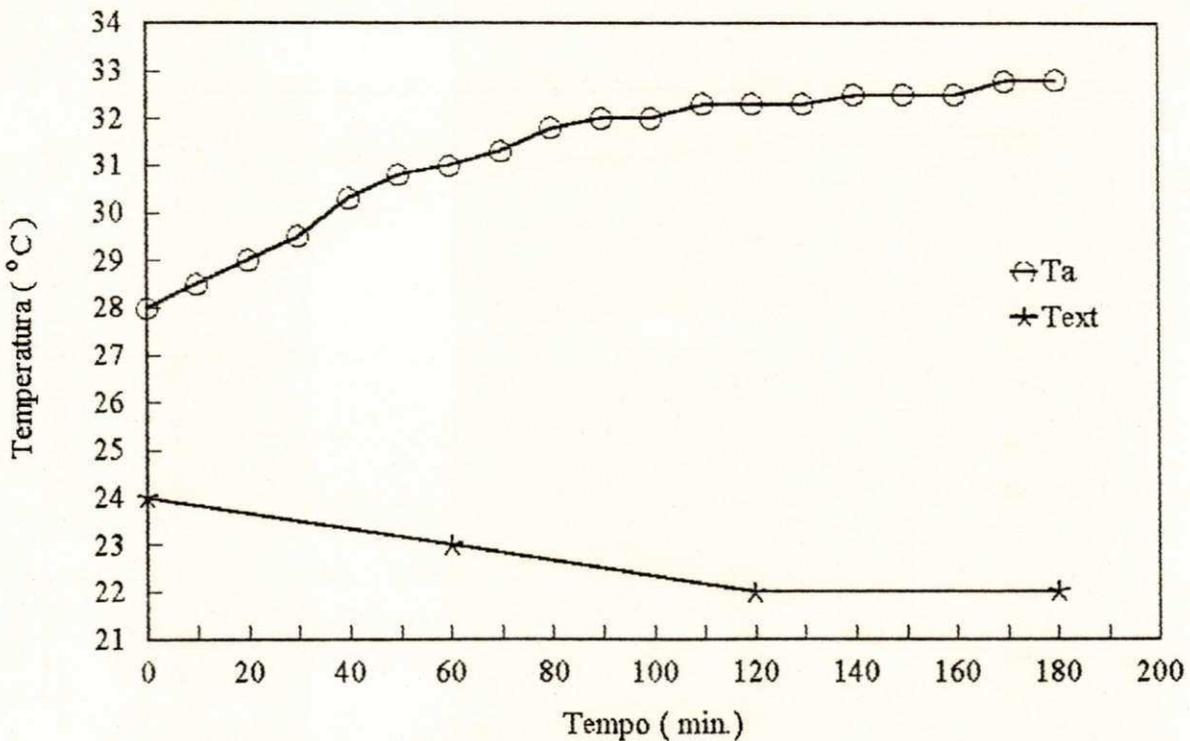


Figura 4.25 - Temperaturas dos ambientes interno (Ta) e externo (Text), em função do tempo, para sala com volume reduzido e utilizando óleo Dowtherm \*G (Experiência realizada no período noturno).

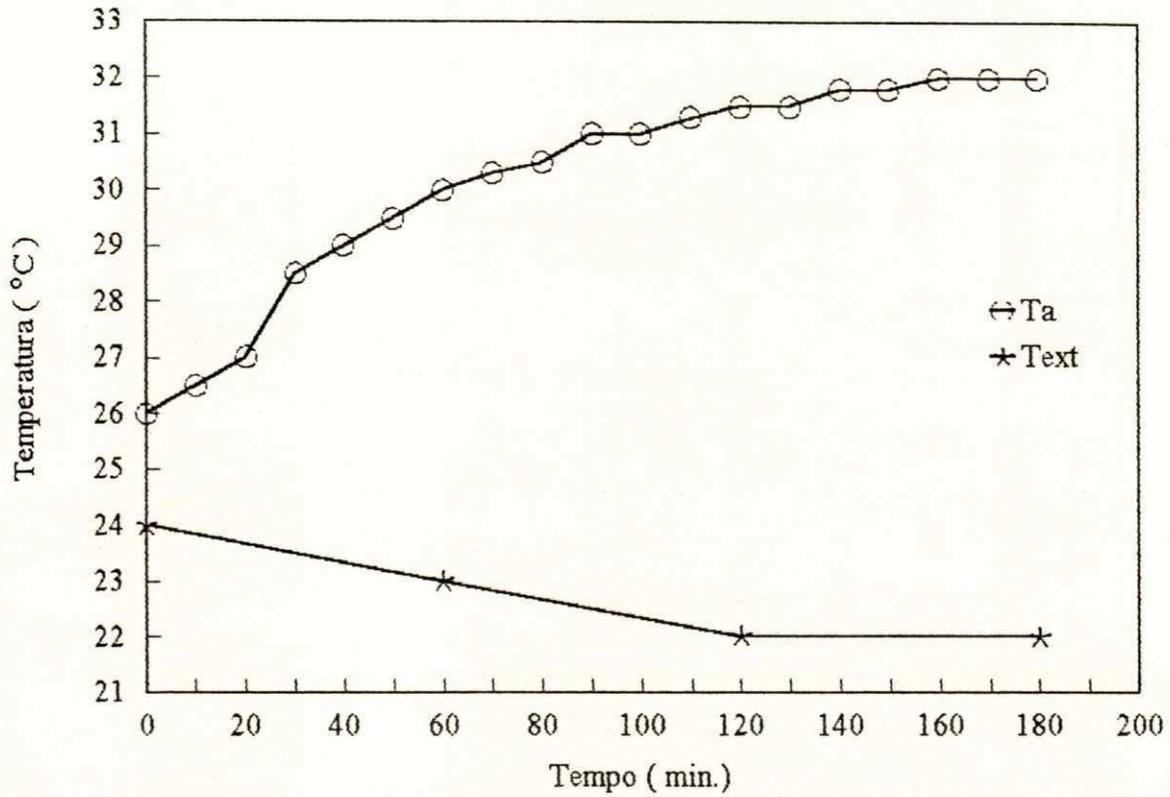


Figura 4.26 - Temperaturas dos ambientes interno (Ta) e externo (Text), em função do tempo, para a sala com volume reduzido e utilizando óleo Dowtherm \*G (Experiência realizada no período noturno).

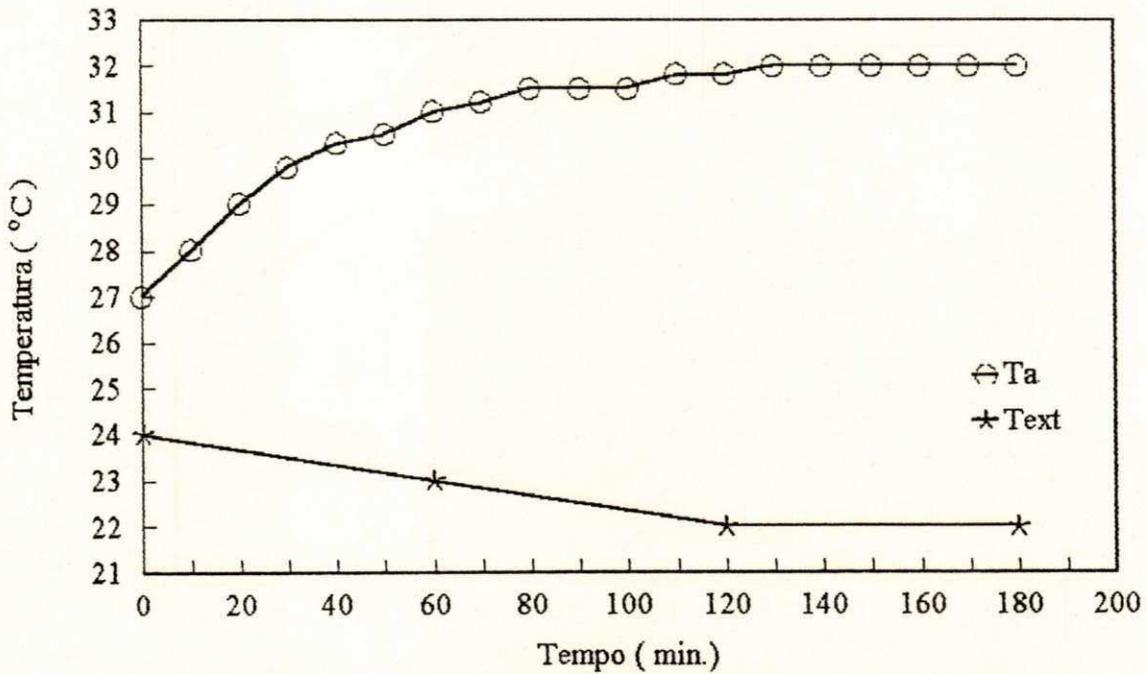


Figura 4.27- Temperaturas dos ambientes interno (Ta) e externo (Text), em função do tempo, para a sala com volume reduzido e utilizando óleo Dowtherm \*G (Experiência realizada no período noturno).

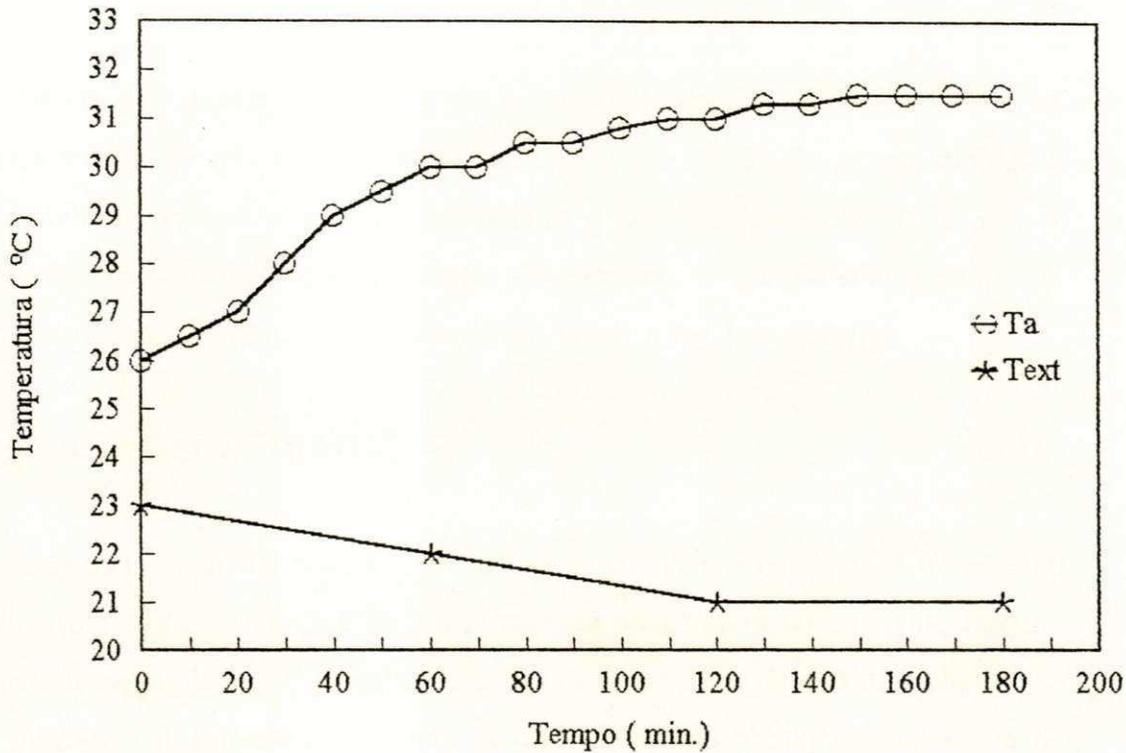


Figura 4.28 - Temperaturas dos ambientes interno (Ta) e externo (Text), em função do tempo, para a sala com volume reduzido e utilizando óleo Dowtherm \*G (Experiência realizada no período noturno).

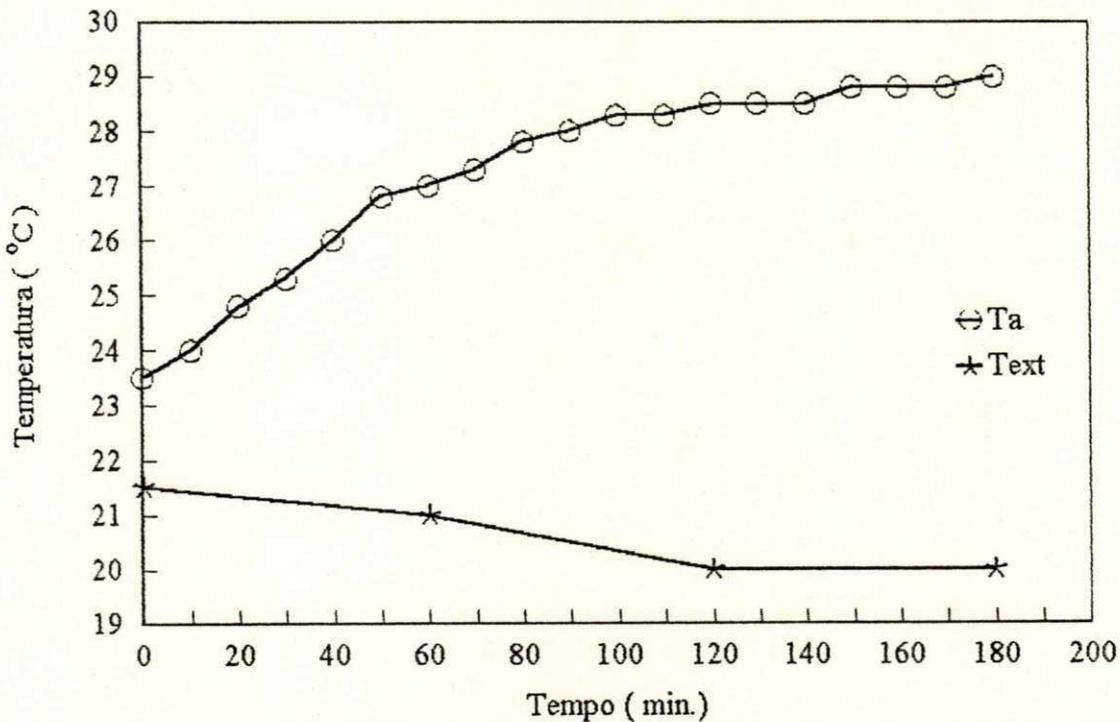


Figura 4.29 - Temperaturas dos ambientes interno (Ta) e externo (Text), em função do tempo, para sala com volume reduzido e utilizando óleo Dowtherm \*G (Experiência realizada no período noturno).

#### 4.4 - CONSUMO DE ENERGIA E PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO

A Tabela 4.5 apresenta os dados do consumo de energia (CE) em kwh e as temperaturas médias da sala e do meio externo ambos em função do tempo, obtidos a partir das bateladas representadas nas Tabelas D.24 a D.29 para sala com 15,45 m<sup>3</sup>. A Figura 4.30 mostra como ocorre essa variação do consumo de energia com o tempo. A curva apresentou um comportamento linear, apresentando a seguinte equação:

$$CE = 0,0333.t + 0,0412 \quad (4.3)$$

Através da Equação 4.3 têm-se um consumo médio de energia de 6,0 Kwh em 180 minutos para um aumento de 22,8 % em termos de temperatura do ambiente interno. Portanto para se elevar de 1,0 °C a temperatura da sala foram necessários 1,02 kwh.

O Apêndice E apresenta o volume de gás hidrogênio obtido em uma hora de aquecimento nas CNTP. A produção de hidrogênio gasoso calculada foi de 0,46 Nm<sup>3</sup>/h, sendo consumidos 2 kwh. Desse modo para se obter a diferença de 5,88 °C em 180 minutos (Tabela 4.5) foram necessários 1,38 Nm<sup>3</sup> H<sub>2(g)</sub>.

Tabela 4.5 - Dados experimentais do consumo de energia em função do tempo.

t (min.)	Cons. de Energia (kwh)	$\bar{T}_a$ (°C)	$\bar{T}_{ext}$ (°C)
0	0	25,75	23,25
10	0,4	26,33	-
20	0,7	26,97	-
30	1,0	27,85	-
40	1,4	28,58	-
50	1,7	29,27	-
60	2,0	29,67	22,58
70	2,4	29,93	-
80	2,7	30,35	-
90	3,0	30,55	-
100	3,4	30,68	-
110	3,7	30,95	-
120	4,0	31,02	21,83
130	4,4	31,15	-
140	4,7	31,27	-
150	5,0	31,40	-
160	5,4	31,47	-
170	5,7	31,57	-
180	6,0	31,63	22,00

\*  $\bar{T}_a$  e  $\bar{T}_{ext}$  temperaturas médias dos ambientes interno e externo para os dados das Tabelas D.24 a D.29.

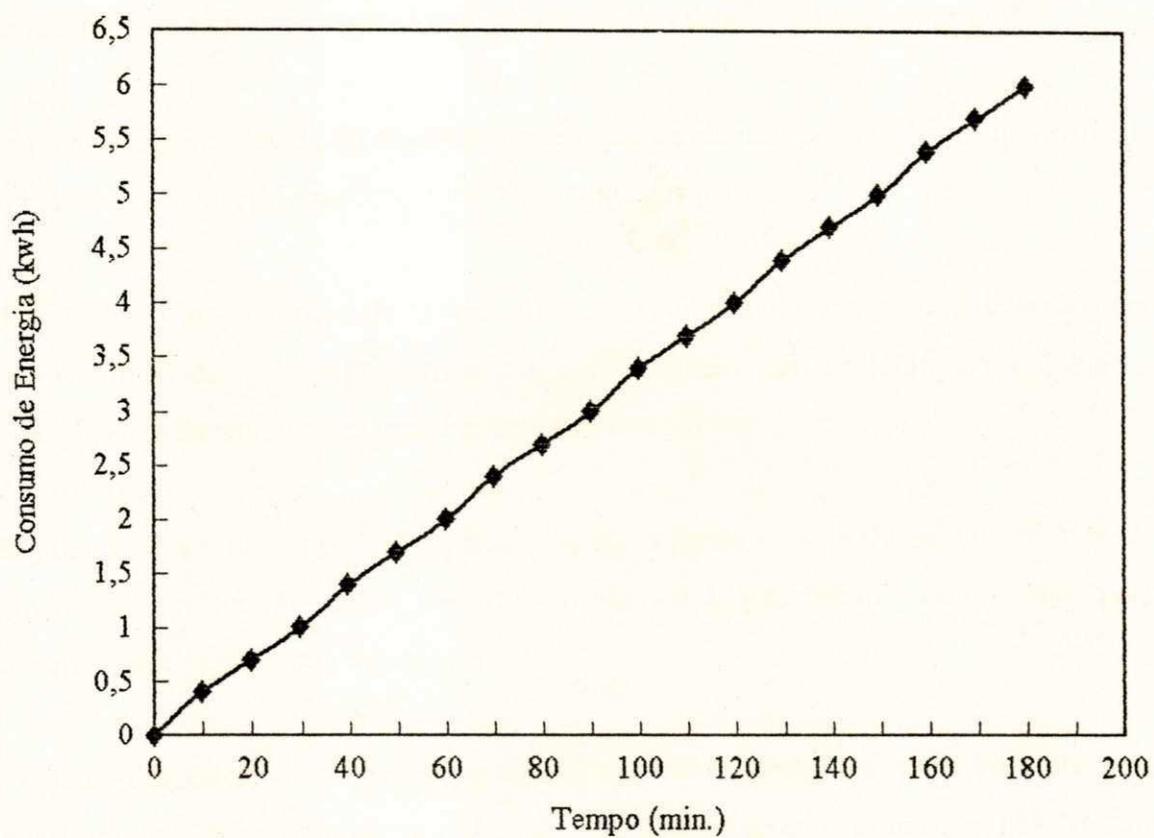


Figura 4.30 - Consumo de energia em função do tempo, para os dados das Tabelas D.24 a D.29.

## CAPÍTULO V - CONCLUSÕES

Considerando a importância do uso do hidrogênio eletrolítico como uma fonte de combustível para aquecimento de meio ambiente a partir desse trabalho, conclui-se o seguinte:

1. A melhor performance do dissipador de calor foi apresentada para o uso do óleo orgânico sintético Dowtherm \*G, como fluido térmico quando comparado com o da água. Esse fato deve-se a razão da água se apresentar em duas fases, líquida e vapor úmido.
2. Em função dos resultados foi observado que a sala de menor volume ofereceu ao sistema condições mais rápida de aquecimento independente das perdas.
3. Comparando as variações de temperatura do ambiente interno com a externa, nas condições oferecidas pelo meio, percebe-se que o aumento da temperatura do ambiente interno depende da temperatura externa, para ambos volumes.
4. Em função dos resultados obtidos percebe-se que a forma como o fluido é distribuído ao longo do dissipador de calor constitui-se num dos parâmetros responsáveis pela uniformidade de temperatura no mesmo.
5. A partir dos cálculos realizados percebe-se que o consumo de energia para elevar a temperatura de 1 °C encontra-se na ordem de 1,02 kwh para um consumo de 0,23 Nm<sup>3</sup> de hidrogênio gasoso nas CNTP.

## CAPÍTULO VI - SUGESTÕES

Em função dos resultados obtidos pelo trabalho onde fez-se uso do hidrogênio eletrolítico como fonte secundária de energia, é proposto as seguintes sugestões:

1. Um melhor dimensionamento para o dissipador de calor, acoplando um fluxômetro de gás para o consumo de hidrogênio e outro para avaliar a vazão mássica do fluido. Com esses elementos pode-se direcionar o estudo através de balanço de energia com o objetivo de determinar o rendimento real do sistema.
2. Implantar um sistema de automação com o objetivo de manter a temperatura do meio constante.
3. Comparar o sistema com outros tipos de trocadores de calor, utilizando também outro tipo de fluido térmico.
4. Esse estudo também pode ser dirigido para outras aplicações térmicas como seja, uso em fornos de padarias, alimentando-se o sistema com painéis fotovoltaicos que liberariam a energia para o eletrolisador.

## BIBLIOGRAFIA

- ALVES, J. J. N., "*Avaliação de Parâmetros de Combustão H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> Obtidos a partir de um Reator Eletroquímico Bipolar*" (Tese de Mestrado), DEQ/UFPB/Campina Grande-Pb, 1992.
- ANDRADE, N. C., "*Avaliação de uma Soldadora Oxi-Hidrogênica com Adição de Oxigênio*" (Tese de Mestrado), DEQ/UFPB/Campina Grande-Pb, 1993.
- BOCKRIS, J.O'M., *Energy The Solar-Hydrogen Alternative*. The Architectural Press Ltda, London, 1976.
- CAMPOS, R. F., *Tecnologia Brasileira na Produção de Hidrogênio*. Equipamentos Villares, 1985.
- CASPER, M. S., *Hydrogen Manufacture by Electrolisis, Thermal Decomposition and Unusual Techniques*, Noyes Data Corporation, Park Ridge, New Jersey, U.S.A., 1978.
- CHEN, D. Z., WENG, Z. M. & LI, X. H., *Theoretical Performance Evaluation of Hydrogen Flames*. International Journal of Hydrogen Energy, vol. 13, Nº 11, 1988.
- COELHO, J. A., *Utilização de Hidrogênio Eletrolítico como combustível*, vol. VI, 1984.
- CUTHBERT, J., *Chemical Engineering Progress*, Oficial Publication of the American Institute of Chemical Engineers, New York, 1994.
- ECKERT, E. R. G. & DRAKE, R. M. J., *Heat and Mass Transfer*, Second Edition, McGraw-Hill Book Company, Ltd, New York, 1959.

- GOLDFARB, J., FRANÇA, K. B., PALOMINO, G. N. & ALVES, J. J. N.,  
*Opção Alternativa para produção de Energia em Alta escala no Nordeste*. IV Encontro Regional de Química, Aracajú, SE, Novembro, 1989.
  
- GREGORY, D. P., "A Hydrogen- Energy System", Report L 21173, American Gas Association, 1973.
  
- KREITH, F., *Princípios de Transmissão de Calor*. Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo, 1973.
  
- MARQUES, J. N., *Termodinâmica Técnica*. Quarta Edição. Editora Científica, São Paulo, 1965.
  
- MOORE, W. J., "*Físico - Química*", vol. 2, 4ª Edição, Ed. Edgard Blücher, São Paulo, 1976.
  
- MORALES, F. N. B., "*Alguns Aspectos do Projeto de Reatores Eletroquímicos para a Produção de Gases*". (Tese de Mestrado), Campina Grande - PB, 1982.
  
- MOURA, J. C., *Manual de Segurança para o Hidrogênio*. CODETEC, UNICAMP, São Paulo, 1980.
  
- NASCIMENTO, J. B., "*Características de Corte e Solda de Uma Máquina Oxi-Hidrogênica*" (Tese de Mestrado), DEM/UFPB/Campina Grande/Pb, 1994.
  
- ÖZISIK, M. N., *Transferência de Calor*, Editora Guanabara, Rio de Janeiro, 1980.
  
- PERRIER, J. L., *Energia Solar e Hidrogênio*. Editorial Presença, Lisboa, Portugal, 1980.
  
- PERRY, R. H. & CHILTON, C.H., *Manual de Engenharia Química*, 5ª Edição,

Editora Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1986.

- ROY, L. R., *Hydrogen Production by the Electrolysis of Water*, Seminário Brasil-Canadá de Alternativas Energéticas, São Paulo-SP, 1984.
- SILVA, E. P., *Introdução à Tecnologia e Economia do Hidrogênio*, Editora UNICAMP, Campinas, SP, 1991.
- SILVA, E. P., *Fontes Energéticas Brasileiras-Hidrogênio*, vol.1, CHESF/BRASAP ENG. Ltda., Rio de Janeiro, RJ, 1987.
- TICIANELLI, E. A., *Sistemas Eletroquímicos de Geração e Aproveitamento de Hidrogênio, Eletrolisadores e Células Combustíveis*. Fontes Alternativas de Energia, Projeto FINEP/PNUD/UNESCO, Brasil, 1985.
- WELTY, J. R., *Engineering Heat Transfer*, Ed. John Wiley & Sons, New York, 1974.
- WILLIAMSON, Jr. K. D. & COX, K.E., *Hydrogen: It's Technology and Implications*, vol. 1, CRC Press, Clereland, 1977.

## Propriedades Físicas do Hidrogênio

Símbolo Químico.....	H <sub>2</sub>
Peso Molecular.....	2,016
Estado de agregação CNTP (0°C, 760mmHg).....	gás incolor
Massa específica kg/Nm <sup>3</sup> .....	0,08987
Ponto de ebulição a 760 mmHg (°C) .....	- 252,78
Calor específico (C <sub>p</sub> ) cal/mol °K	
C <sub>p</sub> = a + b(T) + c (T <sup>2</sup> ) .....	a = 6,424
	b = 0,1039 × 10 <sup>-2</sup>
	c = - 0,0078 × 10 <sup>-5</sup>
Limites de inflamabilidade .....	95% H <sub>2</sub> + 5% O <sub>2</sub>
Limites de inflamabilidade com o ar .....	4,1 a 75% H <sub>2</sub>
Temperatura de ignição com oxigênio .....	450 °C
Temperatura de ignição com ar .....	510 °C
Umidade do gás saturado a 760 mmHg	
g H <sub>2</sub> O/Nm <sup>3</sup> gás seco .....	32 °C
	40 g H <sub>2</sub> O/Nm <sup>3</sup>
	25 °C
	26,64 g H <sub>2</sub> O/ Nm <sup>3</sup>
Calor de combustão H <sub>2</sub> + ½ O <sub>2</sub> → H <sub>2</sub> O <sub>(g)</sub> .....	a 25 °C
	- 241,8 kJ/mol
Massa específica do H <sub>2</sub> líq. (- 253°C, 1 atm.) .....	0,0708 g/ cm <sup>3</sup>
Calor de vaporização (- 253°C, 1 atm.) .....	107,0 cal/g
Calor de fusão (- 259,21°C, 1 atm.) .....	14,0 cal/g
C <sub>p</sub> /C <sub>v</sub> a 21°C .....	1,41
Temperatura crítica .....	- 240,0 °C

Pressão crítica .....	12,8 atm.
Densidade crítica .....	0,0301 g/cm <sup>3</sup>
Solubilidade em água (0°C) .....	0,0214 v/v H <sub>2</sub> O
Solubilidade em água (15°C) .....	0,019 v/v H <sub>2</sub> O

MANUAL COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO

## Principais Processos de Geração de Hidrogênio

Processo	Insumos Básicos	Fonte Primária de Energia	Atual Estágio de Desenvolvimento
Eletrólise Convencional	Água	Eletricidade	Uso Industrial
Eletrólise Avançada	Água	Eletricidade	Pequenas células operando em laboratórios
Reforma-vapor de hidrocarbonetos	Hidrocarbonetos Leves (Metano, Nafta) + Água	Calor gerado pela queima de hidrocarbonetos	Uso Industrial Petroquímica
Oxidação parcial de óleos pesados	Hidrocarbonetos pesados + Água	Calor gerado pela queima de hidrocarbonetos	Uso Industrial Petroquímica
Oxidação parcial de carvão	Carvão + Água	Calor gerado pela queima de carvão	Uso Industrial
Termoquímica	Água	Calor gerado por usinas nucleares	Em desenvolvimento
Quebra da Água a alta temperaturas	Água	Calor gerado por usinas nucleares	Em desenvolvimento
Eletrólise Fotovoltaica	Água	Radiação Solar	Em desenvolvimento

## Apêndice C

## Propriedades Físicas dos Fluidos Térmicos mais Comumente Utilizados

Fluido	Água	Oxido de Difenila mais difenila	Ortodicloro-benzeno	Sal fundido	Mercúrio	NaK
Propriedade						
Fórmula Química	H <sub>2</sub> O	(C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>2</sub> O (C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>2</sub>	C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> Cl	NaNO <sub>2</sub> NaNO <sub>3</sub> KNO <sub>3</sub>	Hg	44 wt% K
Massa molecular	18	165	147	92	200	.....
Densidade Relativa a 212°F	0,958	0,997	1,181	1,98 (300 °F)	13,35	0,84 (600 °F)
Ponto de fusão, °F	32,0	53,6	- 6,7	288	- 38,2	65
Ponto de ebulição, °F (1 atm.)	212,0	495,8	352,0	.....	674,4	1518,0
Ponto de Fulgor, C.O.C, °F	.....	255	155	.....	.....	.....
Calor específico do líquido, BTU/lb °F	1,005 (212 °F)	0,526 (496 °F)	0,412 (352 °F)	0,373 (300 °F)	0,033 (212°F)	0,25 (600 °F)
Calor de vaporização, BTU/lb	970,2	125,0	119,0	.....	117,0	.....
Calor de fusão, BTU/lb	143,3	64,0	38,0	35,0	5,1	.....
Coeficiente de expansão cúbica	0,0024	0,00043	.....	0,0002	0,000101	.....
Visc. abs. do líquido, cps	0,284 (212°F)	0,30 (600°F)	0,30 (400 °F)	1,70 (800 °F)	1,23 (200 °F)	0,24 (600 °F)
Tensão superficial ao ar, cm	72,8	43,0	37,0	.....	487	105

## Propriedades Físicas do Fluido Dowtherm \*G

Composição .....	Mistura de Di e Tri-Aril Éteres
Cor .....	Âmbar claro e marrom
Temperatura de trabalho, °C .....	- 7 a 370°C
Condutividade Térmica, kcal/h m <sup>2</sup> °C .....	a -7°C 0,1176 a 370°C 0,0818
Calor específico (líq.), kcal/kg °C .....	a -7°C 0,36 a 370°C 0,57
Viscosidade (líq.), cps .....	a -7°C 147,00 a 370°C 0,21
Densidade (líq.), g/cm <sup>3</sup> .....	a -7°C 1,10 a 370°C 0,82 a 25°C 1,099
Temperatura de bombeamento mínima, °C.....	- 7,0
Ponto de Fulgor, C.O.C., °C.....	141,00
Ponto de combustão, C.O.C., °C .....	146,00
Temp. de Auto-Ignição °C, ASTM .....	584,00
Constantes pseudo-críticas:	
T <sub>c</sub> , °C .....	542
P <sub>c</sub> , atm. ....	26
V <sub>c</sub> , cm <sup>3</sup> /g .....	3,013

\* Manual Fluidos Térmicos Dow - Empresas Dow

## Apêndice D

As Tabelas abaixo representam os dados experimentais das temperaturas ( $^{\circ}\text{C}$ ) na superfície do dissipador na entrada ( $T_{e1}$ ) e saída ( $T_{s2}$ ), e das temperaturas ( $^{\circ}\text{C}$ ) do ambiente interno ( $T_a$ ) e externo ( $T_{ext}$ ), utilizando água e óleo Dowtherm \*G como fluido térmico .

Tabela D.1 - Dados relativos à Figura 4.1

Tabela D.2 - Dados relativos à Figura 4.2

t(min)	$T_{e1}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{s2}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	t(min)	$T_{e1}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{s2}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
0	24	24	0	24	24
10	60	28	10	59	25
20	71	48	20	78	47
30	76	60	30	85	67
40	80	68	40	88	71
50	86	73	50	93	76
60	92	76	60	99	83
70	98	77	70	98	82
80	103	79	80	99	82
90	103	81	90	100	81
100	100	79	100	99	80
110	101	80	110	98	80
120	100	80	120	99	81
130	103	81	130	99	80
140	101	81	140	101	81
150	101	81	150	99	80
160	103	81	160	100	81
170	103	81	170	100	81
180	101	81	180	99	80
* Fluido Térmico: água			*Fluido Térmico: água		

Tabela D.3 - Dados relativos à Figura 4.3

Tabela D.4 - Dados relativos à Figura 4.4

t(min)	T <sub>e1</sub> (°C)	T <sub>s2</sub> (°C)	t(min)	T <sub>e1</sub> (°C)	T <sub>s2</sub> (°C)
0	25	25	0	28	28
10	62	28	10	90	35
20	70	42	20	110	40
30	78	50	30	113	55
40	85	57	40	117	62
50	91	62	50	120	74
60	100	71	60	123	75
70	102	73	70	125	75
80	100	71	80	124	73
90	101	72	90	126	76
100	100	71	100	125	75
110	100	71	110	125	75
120	100	71	120	124	75
130	100	71	130	125	74
140	101	72	140	125	76
150	100	71	150	124	75
160	100	71	160	125	75
170	100	71	170	125	76
180	100	71	180	125	75
* Fluido Térmico: água			*Fluido Térmico:Dowtherm *G		

Tabela D.5 - Dados relativos à Figura 4.5

Tabela D.6 - Dados relativos à Figura 4.6

t(min)	T <sub>e1</sub> (°C)	T <sub>s2</sub> (°C)	t(min)	T <sub>e1</sub> (°C)	T <sub>s2</sub> (°C)
0	24	24	0	28	27
10	80	28	10	86	30
20	94	38	20	105	55
30	99	45	30	113	69
40	106	54	40	119	72
50	107	58	50	121	74
60	108	60	60	125	74
70	108	61	70	125	73
80	110	63	80	124	74
90	112	64	90	124	74
100	113	65	100	126	76
110	112	66	110	127	76
120	113	66	120	127	77
130	114	67	130	127	78
140	114	67	140	127	77
150	114	68	150	125	77
160	113	68	160	125	74
170	113	68	170	124	74
180	113	68	180	125	75
* Fluido Térmico:Dowtherm *G			*Fluido Térmico:Dowtherm *G		

Tabela D.6a - Dados relativos a Figura 4.6a

Dados experimentais utilizando água como fluido térmico				Dados experimentais utilizando óleo orgânico Dowtherm *G como fluido térmico.			
t (min)	$\bar{T}_{e1}^a$	$\bar{T}_{s2}^a$	$\bar{T}_{e1}^a - \bar{T}_{s2}^a$	t (min)	$\bar{T}_{e1}^o$	$\bar{T}_{s2}^o$	$\bar{T}_{e1}^o - \bar{T}_{s2}^o$
0	24,33	42,33	0	0	26,67	26,33	0,34
10	60,33	27,00	33,33	10	85,33	31,00	54,33
20	73,00	45,67	27,33	20	103,00	44,33	58,67
30	79,67	59,00	20,67	30	108,33	56,33	52,00
40	84,33	65,33	19,00	40	114,00	62,67	51,33
50	90,00	70,33	19,67	50	116,00	68,67	47,33
60	97,00	76,67	20,33	60	118,67	69,67	49,00
70	99,33	77,33	22	70	119,33	69,67	49,66
80	100,67	77,33	23,34	80	119,33	70,00	49,33
90	101,33	78,33	23,00	90	120,67	71,33	49,34
100	99,67	76,67	23,00	100	121,33	72,00	49,33
110	99,67	77,00	22,67	110	121,33	72,33	49,00
120	100,00	77,33	22,67	120	121,33	72,67	48,66
130	100,67	77,33	23,34	130	122,00	73,00	49,00
140	101,00	77,67	23,33	140	122,00	73,33	48,67
150	100,00	77,33	22,67	150	121,00	73,33	47,67
160	101,00	77,67	23,33	160	121,00	72,33	48,67
170	101,00	77,67	23,33	170	120,67	72,67	48,00
180	100,00	77,33	22,67	180	121,00	72,67	48,33

As Tabelas abaixo representam os dados experimentais das temperaturas ( $^{\circ}\text{C}$ ) do ambiente interno ( $T_a$ ) e externo ( $T_{ext}$ ), utilizando água e óleo como fluido térmico .

Tabela D.7 - Dados relativos à Figura 4.7.

Tabela D.8 - Dados relativos à Figura 4.8

t(min)	$T_a$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{ext}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	t(min)	$T_a$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{ext}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
0	24	23	0	24,0	23,0
10	24,8	-	10	24,5	-
20	25,0	-	20	24,8	-
30	25,5	-	30	25,0	-
40	25,8	-	40	25,5	-
50	26,0	-	50	25,8	-
60	26,0	24,0	60	26,0	24,0
70	26,5	-	70	26,5	-
80	26,8	-	80	26,8	-
90	26,8	-	90	27,0	-
100	27,0	-	100	27,0	-
110	27,0	-	110	27,5	-
120	27,3	25	120	27,8	25,0
130	27,5	-	130	28,0	-
140	27,5	-	140	28,0	-
150	27,8	-	150	28,5	-
160	28,0	-	160	28,8	-
170	28,0	-	170	28,8	-
180	28,0	25	180	29,0	25,0
* Fluido Térmico: água			* Fluido Térmico: água		

Tabela D.9 - Dados relativos à Figura 4.9.

Tabela D.10 - Dados relativos à Figura 4.10.

t(min)	T <sub>a</sub> (°C)	T <sub>ext</sub> (°C)	t(min)	T <sub>a</sub> (°C)	T <sub>ext</sub> (°C)
0	25,0	24,0	0	28,0	26,0
10	25,5	-	10	28,5	-
20	26,0	-	20	29,0	-
30	26,0	-	30	29,5	-
40	26,3	-	40	29,8	-
50	26,8	-	50	30,0	-
60	27,0	25,0	60	30,3	25,5
70	27,0	-	70	30,5	-
80	27,3	-	80	30,8	-
90	27,5	-	90	31,0	-
100	27,5	-	100	31,0	-
110	27,8	-	110	31,3	-
120	28,0	26,0	120	31,5	25,0
130	28,0	-	130	31,8	-
140	28,3	-	140	31,8	-
150	28,5	-	150	32,0	-
160	28,8	-	160	32,3	-
170	29,0	-	170	32,5	-
180	29,0	26,0	180	32,5	25,0
* Fluido Térmico: água			*Fluido Térmico:Dowtherm *G		

Tabela D.11 - Dados relativos à Figura 4.11.

Tabela D.12 - Dados relativos à Figura 4.12.

t(min)	T <sub>a</sub> (°C)	T <sub>ext</sub> (°C)	t(min)	T <sub>a</sub> (°C)	T <sub>ext</sub> (°C)
0	24,0	23,5	0	28,0	26,0
10	24,0	-	10	28,8	-
20	24,8	-	20	29,0	-
30	25,0	-	30	29,3	-
40	25,5	-	40	29,5	-
50	26,0	-	50	29,5	-
60	26,5	24,5	60	29,8	25,5
70	26,8	-	70	29,8	-
80	27,0	-	80	30,0	-
90	27,3	-	90	30,0	-
100	27,5	-	100	30,0	-
110	27,8	-	110	30,3	-
120	28,0	25,0	120	30,3	25,0
130	28,5	-	130	30,3	-
140	28,8	-	140	30,5	-
150	29,0	-	150	30,5	-
160	29,3	-	160	30,8	-
170	29,5	-	170	31,0	-
180	29,8	25,0	180	31,0	25,0
* Fluido Térmico:Dowtherm *G			*Fluido Térmico:Dowtherm *G		

Tabela D.12a - Temperaturas média do ambiente interno para três bateladas utilizando água como fluido térmico ( $\bar{T}_a^a$ ), e para três bateladas utilizando óleo Dowtherm\*G como fluido térmico ( $\bar{T}_a^o$ ) ambas em função do tempo, e relativas às Tabelas D.7 a D.12 e à Figura 4.12a.

t (min)	$\bar{T}_a^a$	$\bar{T}_a^o$
0	24,33	26,67
10	24,93	27,10
20	25,27	27,60
30	25,5	27,93
40	25,87	28,27
50	26,20	28,50
60	26,33	28,70
70	26,67	28,93
80	26,97	29,20
90	27,10	29,33
100	27,17	29,43
110	27,43	29,70
120	27,70	29,93
130	27,93	30,13
140	28,00	30,27
150	28,37	30,43
160	28,60	30,70
170	28,60	30,93
180	28,67	31,00

As Tabelas abaixo representam os dados experimentais das temperaturas da superfície do dissipador na entrada ( $T_e$ ) e na saída ( $T_s$ ) em função do tempo, utilizando óleo Dowtherm

\*G como fluido térmico.

Tabela D.13 - Dados relativos à Figura 4.13. Tabela D.14 - Dados relativos à Figura 4.14.

t (min)	$T_{e1}$ (°C)	$T_{e2}$ (°C)	$T_{s3}$ (°C)	$T_{s4}$ (°C)	t(min)	$T_{e1}$ (°C)	$T_{e2}$ (°C)	$T_{s3}$ (°C)	$T_{s4}$ (°C)
0	24	24	24	24	0	23	23	23	23
10	82	82	32	32	10	87	78	23	24
20	104	102	52	53	20	106	90	30	30
30	113	111	61	63	30	114	101	47	47
40	118	116	67	69	40	117	105	57	61
50	120	118	75	72	50	120	110	64	66
60	122	120	78	76	60	121	118	68	69
70	124	120	79	77	70	122	121	71	72
80	124	121	80	78	80	122	121	73	74
90	124	121	81	79	90	122	121	73	75
100	125	120	79	80	100	124	121	73	73
110	123	121	78	76	110	125	124	75	75
120	122	121	77	79	120	124	124	75	75
130	122	120	78	78	130	126	125	77	75
140	122	120	78	79	140	126	125	76	76
150	122	120	77	78	150	126	124	77	76
160	122	120	78	79	160	125	124	76	76
170	121	120	79	79	170	126	125	76	76
180	122	120	79	78	180	125	124	76	75
190	122	120	79	78	190	126	124	77	75
200	122	120	78	78	200	126	124	76	76
210	122	120	79	79	210	125	124	77	75
220	122	120	79	78	220	126	125	76	75
230	122	120	79	78	230	125	124	77	75
240	122	120	79	78	240	125	124	77	75

Tabela D.15 - Dados relativos à Figura 4.15. Tabela D.16 - Dados relativos à Figura 4.16.

t (min)	T <sub>e1</sub> (°C)	T <sub>e2</sub> (°C)	T <sub>s3</sub> (°C)	T <sub>s4</sub> (°C)	t(min)	T <sub>e1</sub> (°C)	T <sub>e2</sub> (°C)	T <sub>s3</sub> (°C)	T <sub>s4</sub> (°C)
0	23	23	23	23	0	23	23	23	23
10	78	74	27	27	10	80	74	24	24
20	94	92	45	41	20	101	78	40	41
30	103	97	56	55	30	110	102	49	53
40	110	100	61	61	40	114	108	60	62
50	115	110	65	65	50	118	114	59	67
60	118	111	66	67	60	120	118	65	71
70	120	116	69	67	70	122	120	70	72
80	122	116	71	69	80	122	121	69	73
90	120	118	73	71	90	123	121	70	74
100	122	119	72	73	100	124	122	70	74
110	122	120	75	74	110	124	123	70	77
120	123	120	75	74	120	123	123	72	77
130	123	120	74	74	130	123	122	73	78
140	122	121	75	75	140	124	123	73	78
150	124	121	73	75	150	124	123	73	77
160	124	120	72	75	160	124	123	72	78
170	124	120	72	75	170	124	124	73	78
180	124	120	72	75	180	125	124	73	77
190	124	120	73	75	190	125	124	73	77
200	124	119	73	76	200	125	125	73	78
210	124	120	73	76	210	124	124	73	78
220	124	121	73	76	220	124	124	73	78
230	124	120	72	75	230	124	124	73	78
240	124	120	72	75	240	124	123	73	78

Tabela D.17 - Médias do perfil de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) dos doze tubos do dissipador, para três bateladas utilizando óleo orgânico sintético Dowtherm \*G, nos pontos definidos conforme Figura 3.9 mencionada no Capítulo III.

Tubos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Temp.												
$T_0(^{\circ}\text{C})$	<u>125,44</u>	125,31	125,19	125,06	124,93	124,81	124,88	124,56	124,43	124,30	124,18	<u>124,05</u>
$T_1(^{\circ}\text{C})$	100,67	102,00	103,67	107,67	104,00	113,33	102,66	105,33	106,00	106,33	110,67	102,33
$T_2(^{\circ}\text{C})$	103,33	92,33	96,33	96,00	97,00	89,33	93,33	101,33	98,33	95,67	96,33	102,33
$T_3(^{\circ}\text{C})$	97,00	86,33	94,67	91,67	89,67	88,67	87,67	90,33	91,33	88,00	94,33	98,33
$T_4(^{\circ}\text{C})$	92,67	79,00	83,00	80,33	86,00	80,33	82,67	85,00	82,00	80,33	94,00	82,67
$T_5(^{\circ}\text{C})$	83,67	80,67	76,33	71,67	77,33	74,33	78,33	78,67	77,67	80,00	81,67	84,00
$T_6(^{\circ}\text{C})$	79,33	79,09	<u>79,81</u>	78,53	78,26	77,98	77,71	77,44	77,15	76,88	76,60	<u>76,33</u>

As Tabelas abaixo representam os dados experimentais das temperaturas do ambiente interno ( $T_a$ ) e externo ( $T_{ext}$ ) em função do tempo, com a sala em seu volume original, utilizando óleo Dowtherm \*G.

Tabela D.18 - Dados relativos à Figura 4.18. Tabela D.19- Dados relativos à Figura 4.19

t(min)	$T_a$ (°C)	$T_{ext}$ (°C)		t(min)	$T_a$ (°C)	$T_{ext}$ (°C)
0	24,0	24,5		0	24,5	23,5
10	24,5	-		10	24,8	-
20	25,0	-		20	25,3	-
30	25,5	-		30	25,8	-
40	26,0	-		40	26,0	-
50	26,0	-		50	26,3	-
60	26,8	24,5		60	26,5	24,0
70	27,0	-		70	26,8	-
80	27,0	-		80	27,0	-
90	27,5	-		90	27,3	-
100	28,0	-		100	27,5	-
110	28,3	-		110	27,8	-
120	28,5	25,0		120	28,0	25,0
130	28,8	-		130	28,4	-
140	29,0	-		140	28,8	-
150	29,5	-		150	29,0	-
160	29,8	-		160	29,3	-
170	30,0	-		170	29,5	-
180	30,0	25,0		180	30,0	25,0
190	30,3	-		190	30,3	-
200	30,5	-		200	30,5	-
210	30,8	-		210	30,8	-
220	30,8	-		220	31,0	-
230	31,0	-		230	31,0	-
240	31,0	25,0		240	31,3	25,0
*Sala com volume original				*Sala com volume original		

Tabela D.20 - Dados relativos à Figura 4.20. Tabela D.21 - Dados relativos à Figura 4.21.

t(min)	T <sub>a</sub> (°C)	T <sub>ext</sub> (°C)		t(min)	T <sub>a</sub> (°C)	T <sub>ext</sub> (°C)
0	25,0	24,0		0	25,0	24,5
10	25,5	-		10	25,3	-
20	26,0	-		20	25,5	-
30	26,8	-		30	25,8	-
40	27,0	-		40	26,0	-
50	27,8	-		50	26,3	-
60	28,3	24,5		60	26,5	25,0
70	28,5	-		70	26,8	-
80	28,8	-		80	27,0	-
90	29,0	-		90	27,3	-
100	29,5	-		100	27,5	-
110	29,8	-		110	28,0	-
120	30,0	25,0		120	28,5	25,0
130	30,0	-		130	28,8	-
140	30,3	-		140	29,0	-
150	30,5	-		150	29,3	-
160	31,0	-		160	29,5	-
170	31,0	-		170	29,8	-
180	31,3	25,0		180	30,0	25,0
190	31,5	-		190	30,3	-
200	31,8	-		200	30,5	-
210	32,0	-		210	30,8	-
220	32,0	-		220	30,8	-
230	32,0	-		230	31,0	-
240	32,3	25,0		240	31,0	25,0
*Sala com volume original				*Sala com volume original		

Tabela D.22 -Dados relativos à Figura 4.22      Tabela D.23-Dados relativos à Figura 4.23

t(min)	T <sub>a</sub> (°C)	T <sub>ext</sub> (°C)		t(min)	T <sub>a</sub> (°C)	T <sub>ext</sub> (°C)
0	25,0	24,0		0	25,0	24,0
10	25,5	-		10	25,5	-
20	26,0	-		20	26,0	-
30	26,5	-		30	26,6	-
40	27,0	-		40	27,3	-
50	27,5	-		50	27,8	-
60	28,0	24,5		60	28,0	24,5
70	28,5	-		70	28,5	-
80	29,0	-		80	28,8	-
90	29,5	-		90	28,8	-
100	30,0	-		100	29,0	-
110	30,5	-		110	29,3	-
120	31,0	25,0		120	29,5	25,0
130	31,3	-		130	29,8	-
140	31,5	-		140	30,0	-
150	31,8	-		150	30,3	-
160	31,8	-		160	30,5	-
170	31,8	-		170	30,8	-
180	32,0	26,0		180	31,0	25,0
190	32,3	-		190	31,3	-
200	32,5	-		200	31,5	-
210	32,8	-		210	31,8	-
220	32,8	-		220	31,8	-
230	33,0	-		230	32,0	-
240	33,0	26,0		240	32,0	25,0
*Sala com volume original				*Sala com volume original		

As Tabelas abaixo representam os dados experimentais das temperaturas do ambiente interno ( $T_a$ ) e externo ( $T_{ext}$ ) em função do tempo, utilizando óleo Dowtherm \*G e com o volume da sala reduzido.

Tabela D.24 - Dados relativos à Figura 4.24. Tabela D.25 - Dados relativos à Figura 4.25.

t(min)	$T_a$ (°C)	$T_{ext}$ (°C)		t(min)	$T_a$ (°C)	$T_{ext}$ (°C)
0	24,0	23,0		0	28,0	24,0
10	24,5	-		10	28,5	-
20	25,0	-		20	29,0	-
30	26,0	-		30	29,5	-
40	27,5	-		40	30,3	-
50	28,5	-		50	30,8	-
60	29,0	23,5		60	31,0	23,0
70	29,5	-		70	31,3	-
80	30,0	-		80	31,8	-
90	30,3	-		90	32,0	-
100	30,5	-		100	32,0	-
110	31,0	-		110	32,3	-
120	31,0	24,0		120	32,3	22,0
130	31,3	-		130	32,3	-
140	31,5	-		140	32,5	-
150	31,8	-		150	32,5	-
160	32,0	-		160	32,5	-
170	32,3	-		170	32,8	-
180	32,5	25,0		180	32,8	22,0
190	32,8	-		190	-	-
200	33,0	-		200	-	-
210	33,3	-		210	-	-
220	33,3	-		220	-	-
230	33,5	-		230	-	-
240	33,8	25,0		240	-	-
*Sala com volume reduzido				*Sala com volume reduzido		

Tabela D.26 - Dados relativos à Figura 4.26. Tabela D.27 - Dados relativos à Figura 4.27.

t(min)	T <sub>a</sub> (°C)	T <sub>ext</sub> (°C)		t(min)	T <sub>a</sub> (°C)	T <sub>ext</sub> (°C)
0	26,0	24,0		0	27,0	24,0
10	26,5	-		10	28,0	-
20	27,0	-		20	29,0	-
30	28,5	-		30	29,8	-
40	29,0	-		40	30,3	-
50	29,5	-		50	30,5	-
60	30,0	23,0		60	31,0	23,0
70	30,3	-		70	31,2	-
80	30,5	-		80	31,5	-
90	31,0	-		90	31,5	-
100	31,0	-		100	31,5	-
110	31,3	-		110	31,8	-
120	31,5	22,0		120	31,8	22,0
130	31,5	-		130	32,0	-
140	31,8	-		140	32,0	-
150	31,8	-		150	32,0	-
160	32,0	-		160	32,0	-
170	32,0	-		170	32,0	-
180	32,0	22,0		180	32,0	22,0
*Sala com volume reduzido				*Sala com volume reduzido		

Tabela D.28 - Dados relativos à Figura 4.28. Tabela D.29 - Dados relativos à Figura 4.29.

t(min)	T <sub>a</sub> (°C)	T <sub>ext</sub> (°C)		t(min)	T <sub>a</sub> (°C)	T <sub>ext</sub> (°C)
0	26,0	23,0		0	23,5	21,5
10	26,5	-		10	24,0	-
20	27,0	-		20	24,8	-
30	28,0	-		30	25,3	-
40	29,0	-		40	26,0	-
50	29,5	-		50	26,8	-
60	30,0	22,0		60	27,0	21,0
70	30,0	-		70	27,3	-
80	30,5	-		80	27,8	-
90	30,5	-		90	28,0	-
100	30,8	-		100	28,3	-
110	31,0	-		110	28,3	-
120	31,0	21,0		120	28,5	20,0
130	31,3	-		130	28,5	-
140	31,3	-		140	28,5	-
150	31,5	-		150	28,8	-
160	31,5	-		160	28,8	-
170	31,5	-		170	28,8	-
180	31,5	21,0		180	29,0	20,0
*Sala com volume reduzido				*Sala com volume reduzido		

## Apêndice E

Quantidade de Calorias Fornecida pela Combustão do  $H_2/O_2$ 

A tensão prática aplicada à célula é de aproximadamente 1,8 volts e a energia dispendida no processo eletrolítico para manter uma produção de 1  $Nm^3/h$  de hidrogênio é:

$$E_n = 2,393 \times 1,8 = 4,4 \text{ kwh}/Nm^3 H_2 \quad (E.1)$$

De acordo com os dados experimentais do consumo de energia, em quatro horas de produção do gás são consumidos 8 kwh, logo são produzidos 1,82  $Nm^3$  de hidrogênio ou 0,46  $Nm^3 H_2/h$ . Para este volume de gás nas CNTP de acordo com a lei dos gases são produzidos 74,43 moles de hidrogênio em quatro horas, e sendo o calor de combustão do hidrogênio da ordem de 68317cal/mol, então são fornecidos 5084,8 kcal ou 1271 kcal/h e 2764 kcal/ $Nm^3 H_{2(g)}$ .