



**Universidade Federal da Paraíba**  
**Centro de Ciências e Tecnologia**  
**Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica**

**APLICAÇÃO DO HIDROGÊNIO ELETROLÍTICO PARA FINS DE  
AQUECIMENTO DE AMBIENTE ATRAVÉS DE UM TROCADOR DE  
CALOR CONVECTIVO.**

**FLÁVIO DE SOUSA PEQUENO**

Campina Grande, PB  
Julho de 1996

**FLÁVIO DE SOUSA PEQUENO**

**APLICAÇÃO DO HIDROGÊNIO ELETROLÍTICO PARA FINS DE  
AQUECIMENTO DE AMBIENTE ATRAVÉS DE UM TROCADOR DE  
CALOR CONVECTIVO.**

Dissertação apresentada no Curso de  
Mestrado em Engenharia Mecânica da  
Universidade Federal da Paraíba, em  
comprimento às exigências para a  
obtenção do grau de Mestre.

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROJETO DE PRODUTO MECÂNICO  
SUB-ÁREA: TÉRMICA E FLUÍDOS**

**PROF. KEPLER B. FRANÇA (Ph.D)**  
Orientador

**PROF. JÚLIO GOLDFARB (M.Sc.)**  
Co-orientador

Campina Grande, PB  
Julho de 1996



P425a Pequeno, Flávio de Sousa.  
Aplicação do hidrogênio eletrolítico para fins de aquecimento de ambiente através de um trocador de calor convectivo / Flávio de Sousa Pequeno. - Campina Grande, 1996.  
98 f.  
  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia.  
  
1. Engenharia Térmica. 2. Aquecimento de Ambiente. 3. Calor Convectivo. 4. Dissertação - Engenharia Mecânica. I. França, Kepler Borges. II. Goldfarb, Júlio. III. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). IV. Título

CDU 621.8(043)

APLICAÇÃO DO HIDROGÊNIO ELETROLÍTICO PARA FINS DE  
AQUECIMENTO DE AMBIENTE ATRAVÉS DE UM TROCADOR DE CALOR  
CONVECTIVO

FLÁVIO DE SOUSA PEQUENO

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 26 DE JULHO DE 1996



KEPLER BORGES FRANÇA (Dr.)  
ORIENTADOR



JÚLIO GOLDFARB (M.Sc.)  
CO-ORIENTADOR



EUDÉSIO OLIVEIRA VILAR (Dr.)  
MEMBRO



ANTONIO PRALON FERREIRA LEITE (Dr.)  
MEMBRO



JOSÉ WILSON LAGE NOGUEIRA (Dr.)  
MEMBRO

CAMPINA GRANDE - Pb  
JULHO DE 1996

## Dedicatória

Aos meus queridos pais e irmãos.  
A Paula Rejane.

## AGRADECIMENTOS

Ao amigo e orientador Prof. Dr. Kepler B. Franca, pela orientação, incentivo e desempenho ao desenvolvimento desse trabalho.

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

A Coordenação de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, na pessoa do Coordenador Dr. Natanael Victor de Oliveira e da secretária Lúcia Márcia Quirino, pelo apoio e incentivo.

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

Aos colegas do Mestrado em Eng. Mecânica, Alexandre, Naécio, Rafael, Williams, Valdemir, Catão, Felipe e demais pelo apoio e incentivo durante o mestrado.

Aos colegas de apoio do Mestrado em Eng. Química, Miriam Cleide Cavalcanti de Amorim, Maurício Alves da Motta Sobrinho, Francinaldo F. Pereira e Francisco Sérgio B. Gusmão pela amizade, colaboração e incentivo.

Ao Mestrado em Engenharia Química, funcionários, professores pela colaboração e incentivo à esta realização.

... e obviamente a Deus pela coragem, fé e dedicação que foram os principais vetores para realização deste trabalho.

## Resumo

Este trabalho tem como objetivo utilizar o hidrogênio eletrolítico como um combustível para aquecimento de ambientes. Um eletrolisador bipolar de 2 kWh foi utilizado como fonte de energia para estudar a performance de um trocador de calor convectivo adaptado para uso do hidrogênio.

O trocador de calor convectivo foi testado para estudar os perfis das curvas de temperatura durante o aquecimento de uma sala de 15,45 m<sup>3</sup> para os turnos; diurno e noturno. Em seguida o mesmo foi modificado, acoplando-se ao mesmo uma chaminé de forma que os gases de combustão antes de serem lançados para o meio externo pudessem trocar calor com o ambiente interno.

Para analisar a performance dos dois sistemas foram estudados os seguintes parâmetros; variação da temperatura interna e externa à sala, consumo de hidrogênio, consumo de energia elétrica, a razão entre as energias acumulada e consumida durante o processo de aquecimento.

Analisando e comparando os resultados dos dois sistemas observou-se que o trocador de calor convectivo com a chaminé apresentou melhores resultados. A eficiência energética do trocador de calor convectivo com a chaminé, durante o período diurno foi de 4,8% superior ao trocador de calor na sua forma original e 17,5% para o período noturno. Os resultados obtidos nesta pesquisa demonstram que o hidrogênio eletrolítico pode ser utilizado como um combustível em trocadores de calor para aquecimento de ambientes em substituição dos combustíveis de origem carbonáceas.

## Abstract

The objective of this work is to use electrolysically produced hydrogen as fuel to heat an environment. A bipolar electrolysiser of 2 kWh was used as a source of energy to study the performance of a convective heat exchanger adapted to use hydrogen.

The convective heat exchanger was tested for heating a room of 15,45 m<sup>3</sup> and the profile of the temperature curves during two different periods, day and night, were studied. After that the heat exchanger was connected to a chimney to use combustion gases to exchange the heat with the internal environment.

To analyse the performance of the two systems, the following parameters were studied: variation of the internal and external room temperature, hydrogen consumption, electrical energy consumption, the ratio between accumulated and absorbed energy during the heating process.

From the results of both systems, it was observed that the convective heat exchanger with chimney presented better performance. The energy efficiency during the night period was 4,8% greater than that obtained from the convective heat exchanger, which was 17,5% during the day period. The results obtained in this research showed that electrolysically produced hydrogen can be used as fuel for a heat exchanger to heat an environment and also to substitute the fuels from petroleum.

## ÍNDICE

1 - Introdução	01
2 - Fundamentos teóricos	03
2.1 - O hidrogênio	03
2.1.1 - Propriedades físicas e químicas	04
2.1.2 - Armazenamento e transporte	06
2.1.3 - Hidrogênio como combustível	07
2.1.4 - Processos de obtenção	07
2.2 - Geração do hidrogênio eletrolítico	08
2.2.1 - Princípios da eletrólise da água	08
2.2.2 - Reações na eletrólise da água	11
2.2.3 - Energia requerida na eletrólise	12
2.2.4 - Tensão em uma célula eletrolítica	14
2.2.5 - Sobretensões	16
2.2.6 - Densidade de corrente da célula	17
2.2.7 - Curvas de polarização	18
2.2.8 - Efeito da temperatura e da pressão	19
2.2.9 - Componentes básicos de uma célula eletrolítica	20
2.2.10 - Tipos básicos de eletrolisadores	23
2.3 - Considerações termodinâmicas	26
2.3.1 - Conceitos fundamentais	27
2.3.2 - A primeira lei da termodinâmica	27
2.3.3 - Entalpia	29
2.3.4 - Capacidade calorífica e calor específico	30
2.3.5 - Cálculo da energia térmica acumulada em um sistema fechado	31
3 - Materiais e métodos	34
3.1 - Material utilizado	34
3.1.1 - Eletrolisador bipolar	35
a) Reator eletrolítico bipolar	36
b) Reservatório de eletrólito	37
c) Sistema de refrigeração	38
d) Purgador	39
e) Selos controladores de chama	39
f) Fonte de alimentação	40
g) Pressostato	40
3.1.2 - Trocador de calor convectivo	40

3.2 - Instalação do sistema	42
3.3 - Operação com o sistema eletrolítico	42
3.4 - Operação com o trocador de calor convectivo	43
3.5 - Abastecimentos	43
3.6 - Consumo de energia	44
3.7 - Alteração realizada no trocador de calor convectivo	44
3.8 - Conjunto de tiragem	44
3.9 - Condições da sala	46
3.10 - Avaliação do trocador de calor convectivo	46
4 - Resultados e discussões	52
4.1 - Avaliação do trocador de calor convectivo sem a chaminé	52
4.2 - Avaliação do trocador de calor convectivo com a chaminé	63
4.3 - Comparação entre os dois sistemas: sem e com chaminé	74
5 - Conclusão	78
6 - Sugestões	80
Bibliografia	81
Apêndice A - Propriedades físicas do hidrogênio	84
Apêndice B - Principais processos de geração de hidrogênio	86
Apêndice C - Produção de hidrogênio e vazão da mistura $H_2/O_2$	87
Apêndice D - Tabelas	88
Apêndice E - Cálculo da energia térmica acumulada na sala	95
Apêndice F - Fotografia da máquina oxi-hidrogênica	97

## SIMBOLOGIA

- A - Área da célula ( $m^2$ ).
- A - Ampère, equação (2.15).
- Ac - Corrente alternada (A).
- $^{\circ}C$  - Grau centígrado.
- cm - Centímetro.
- $C_p$  - Capacidade calorífica a pressão constante (Btu/lb-mol R).
- $C_v$  - Capacidade calorífica a volume constante (Btu/lb-mol R).
- $c_p$  - Calor específico a pressão constante (Btu/lbm R).
- d - Diferencial.
- dm - Decímetro.
- DC - Corrente contínua (A).
- $E_c$  - Energia cinética (J).
- $E_p$  - Energia potencial (J).
- $E\%$  - Eficiência energética.
- $E_{AC}$  - Energia acumulada na sala (kwh).
- $E_C$  - Energia elétrica consumida (kwh).
- $E_n$  - Energia requerida na eletrólise (kwh).
- F - Constante de Faraday (96.489 Coulomb/eq. g)
- h - Hora.
- H - Entalpia (J)
- $H_z$  - Hertz.
- I - Corrente da célula em Ampère.
- J - Joule.
- J - Densidade de corrente ( $A/m^2$ ), equação (2.15)
- Kg - Quilograma.
- Kgf - Quilograma-força.
- Kcal - Quilocaloria.
- Kwh - Quilowatt-hora.
- l - Litro.
- m - Massa (kg).
- min - Minuto.
- mm - Milímetro.
- N - Condições normais de temperatura e pressão.
- n - Número de elétron transferido por molécula na reação.
- p - Pressão ( $N/m^2$ ).
- Q - Calor (J)
- R - Constante dos gases (1.986 Btu/lb-mol R)
- $R_o$  - Resistência ohmica (Ohm).

- $R_t$  - Rendimento térmico.
- $t$  - Tempo (min)
- $T$  - Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ).
- $U$  - Energia interna (J).
- $V$  - Volts.
- $V$  - Volume, equação (E.3)
- $W$  - Trabalho (J)
- $\Delta$  - Variação.
- $\rho$  - Densidade ( $\text{kg/ m}^3$ ).
- $\eta_a$  - Sobretensão anódica (V).
- $\eta_c$  - Sobretensão catódica (V).
- $\eta_t$  - Sobretensão total da célula (V).
- $\phi$  - Diâmetro (mm).

# CAPÍTULO 1

## Introdução

O meio ambiente é uma das preocupações fundamentais da presente geração. A humanidade vem crescendo e cada vez mais aumentando o consumo de combustíveis, em sua maioria fósseis, não renováveis e poluentes. Durante as primeiras décadas do século vindouro passaremos por uma fase de transição na qual as fontes alternativas com novos processos tenderão a substituir as tradicionais fontes de energia. O hidrogênio é um dos mais importantes candidatos para substituir os combustíveis de origem carbonácea.

A reação do hidrogênio com o oxigênio do ar para uso em trocador de calor e em células combustíveis produzirá somente vapor de água como sub-produto, não perturbando o sistema ecológico.

O grande volume de recursos despendidos por diversas nações, associado ao número de pesquisadores e técnicos atualmente envolvidos na pesquisa e desenvolvimento da tecnologia do hidrogênio, tem sido responsável pelos enormes avanços ocorridos nesta área, permitindo prever-se para breve novas aplicações e tecnologia de geração e utilização do hidrogênio (SILVA, 1991).

O Departamento de Engenharia Química do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba tem investido nos últimos cinco anos no desenvolvimento de eletrolisadores para produção de hidrogênio eletrolítico para diversos fins, tais como: corte e solda de metais e atualmente visa utilizá-lo para substituir alguns dos produtos derivados do petróleo que vem sendo usado para aquecimento de ambiente.

O presente trabalho tem como objetivo principal estudar o desempenho de um trocador de calor convectivo utilizando o hidrogênio eletrolítico como fonte de energia para aquecimento de ambiente.

Através desta tecnologia os pesquisadores do mencionado Departamento tem despertado um outro interesse para aplicação do hidrogênio eletrolítico em fornos de padaria, utilizando a energia solar fotovoltaica como fonte primária, evitando assim o desmatamento de forma desordenada das árvores e protegendo o meio ambiente.

Este método também está sendo estudado pelo Ministério da Marinha do Brasil para ser incorporado ao programa da Estação Antártica Comandante Ferraz, com objetivo de ampliar a matriz energética da Estação, a partir do uso das energias alternativas eólica e solar para produção de hidrogênio, tendo em vista o aquecimento de ambientes e outros fins. Como por exemplo uso em células combustíveis.

## CAPÍTULO 2

### Fundamentos teóricos

#### 2.1 - O hidrogênio

A descoberta do hidrogênio se deve provavelmente a Theophrastus Bombastus von Hcheinheim (Paracelsus) em 1500. Apresenta-se sob a forma gasosa, incolor, inodoro, sem sabor e não tóxico à temperatura ambiente; ou líquido abaixo de  $-235^{\circ}\text{C}$ , o que indica ser de difícil liquefação. Seu valor energético à pressão constante é de 34.000 kcal/kg contra 10.000 kcal/kg para um derivado de petróleo (PERRIER, 1980).

Como substituto ao petróleo muitos energéticos tem sido considerados como possíveis. Entre esses, o hidrogênio tem reunido uma quase unanimidade como um dos mais promissores e prováveis energéticos do futuro, devendo ocupar um lugar de destaque na matriz energética de diversas nações; imagina-se até que o hidrogênio, já no início do próximo século, poderá antecipar o final da era do petróleo, uma vez que apenas recentemente esta tecnologia vem sendo pesquisada de forma intensiva, o que possibilitará mesmo a curto prazo, descobertas e aperfeiçoamentos importantes, talvez suficientes para dar início a uma nova revolução nos meios e sistemas de utilização de energia.

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, 1991).

Todos os dias se tem um contato com algum produto em que o hidrogênio é utilizado na sua fabricação. Na alimentação temos sorvetes, pães e biscoitos que utilizam gorduras vegetais hidrogenadas, assim como na fabricação de sabão e sabonetes; na agricultura, utiliza-se fertilizantes nitrogenados, fabricados a partir da amônia que é sintetizada a partir do hidrogênio e do nitrogênio do ar.

#### 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 liquefeito (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 temperaturas 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 o superior 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<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>, 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.

Quimicamente o hidrogênio é pouco reativo a frio, a não ser quando na presença de catalisadores convencionais; porém em temperaturas elevadas torna-se bastante reativo. 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 (SILVA, 1991).

### 2.1.2 - Armazenamento e transporte

O hidrogênio pode ser armazenado no estado gasoso em botijões de aço ou gasômetro e no estado líquido, onde se requer uma temperatura bastante baixa e uma pressão considerável em depósitos criogênicos, como os que a NASA utiliza ou ainda pode ser armazenado utilizando-se hidretos metálicos, que o absorve e o libera quando aquecido.

O hidrogênio pode ser transportado em cilindros ou através de gasodutos, que são utilizados no estado do Texas nos Estados Unidos e na Alemanha. O transporte de hidrogênio através de gasodutos é cinco vezes menos dispendioso do que o da eletricidade para uma mesma energia transmitida e um mesmo percurso. Isto é válido para distâncias superiores a aproximadamente 4.000 km (PERRIER, 1980).

Recentes experimentos mostram que o carvão ativado pode absorver quantidades significativas de hidrogênio em condições ótimas de temperatura de  $-123^\circ\text{C}$  e pressão de 55 atm. Os materiais compostos, por este fato, podem ser considerados para o armazenamento de hidrogênio em aplicações quando o peso do reservatório de combustível for crítico (YOUNG, 1992).

### 2.1.3 - Hidrogênio como combustível

Diversos países da Europa como Alemanha, França e Suíça, utilizam o hidrogênio na rede doméstica como mistura ao gás natural. Em Paris, após modificação dos queimadores é utilizado numa proporção de 50 % na rede de gás da cidade e nas caldeiras (PERRIER, 1980).

O hidrogênio pode ser utilizado parcialmente em motores de ciclo diesel e totalmente em motores do ciclo-Otto. Em ambos os casos, o armazenamento de hidrogênio pode ser realizado na forma de hidreto, com a construção de um reservatório de liga de Fe-Ti e outro de liga de Mg-Ni (SILVA, 1991b).

A adição de somente 6% de hidrogênio, por massa de combustível, provoca uma redução significativa no consumo total de combustível na ordem de 15 a 20% associada a uma redução nos níveis de emissão de HC, CO e NO<sub>x</sub> (HACOHEN, 1991).

### 2.1.4 - Processos de obtenção

Existem muitos processos físicos e químicos através dos quais o hidrogênio é um dos produtos resultantes. Entre esses, no momento podem ser separados dois grupos de processos: os convencionais, com tecnologias já consolidadas e que vem sendo empregada a vários anos, e os avançados, cujas tecnologias ainda se encontram em desenvolvimento. No quadro do Apêndice B estão listados os principais processos de geração do hidrogênio, juntamente com os respectivos insumos básicos, fonte primária de energia utilizada e o atual estágio de desenvolvimento.

O hidrogênio pode ser obtido através dos seguintes processos:

**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**

- Decomposição Térmica da água
- Decomposição termoquímica da água
- Eletrodialise

**2.2 - Geração do hidrogênio eletrolítico**

**2.2.1 - Princípios da eletrólise da água**

A eletrólise da água consiste em decompô-la através de uma corrente elétrica contínua em seus elementos de formação: hidrogênio e oxigênio. Esta operação é realizada de maneira prática pela imersão de dois eletrodos condutores imersos num meio condutor líquido ou sólido. Aplicando-se uma diferença de potencial entre os eletrodos, o campo elétrico contínuo

resultante provoca a migração de íons  $H^+$  e  $OH^-$ , que vão se descarregar respectivamente no cátodo e ânodo.

Por razões práticas, na grande maioria dos casos o eletrólito constitui-se de uma solução básica forte, em geral hidróxido de potássio (KOH) 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. 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, dependendo do tipo de água consumida, substâncias estranhas, como precipitados de hidróxido de magnésio e carbonato de cálcio e outros, que são denominados de incrustantes, ou 'scaling', podem se aderir nas células, diminuindo a vida útil dos eletrodos através da corrosão e conseqüentemente diminuindo a performance de produção de hidrogênio, devido o aumento da resistividade da solução e o decréscimo da densidade de corrente durante o processo. Os elementos imersos no eletrólito não devem apresentar traços de substâncias orgânicas com o objetivo de evitar as possíveis reações de saponificação (MANUAL TERMOQUIP).

Em relação a conservação de recursos não renováveis, o processo é ideal, uma vez que a energia elétrica é renovável e pode ser gerada através de painéis solares, aerogeradores ou hidroelétricas. Na produção de hidrogênio eletrolítico, quando se faz uso somente do hidrogênio, o oxigênio pode ser armazenado ou liberado para a atmosfera sem causar nenhum dano ao meio ambiente.

A Alemanha tem dois grandes projetos de produção de hidrogênio a partir da eletrólise da água, utilizando a energia solar através de painéis solares. O SWB (Solar - Wasserstoff - Bayern), que é um projeto industrial e o HYSOLAR, que é um projeto de pesquisa junto com a Arábia Saudita.

Existem vários sistemas onde a eletrólise da água pode ser desenvolvida, diferenciando 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:

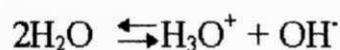


O processo de produção de hidrogênio através da eletrólise da água é utilizado há mais de cinquenta anos, porém o desenvolvimento praticamente diminuiu em decorrência da disponibilidade maciça de hidrocarbonetos de baixo custo permitindo uma alternativa à produção de hidrogênio por eletrólise.

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. É notório 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 (1985), 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

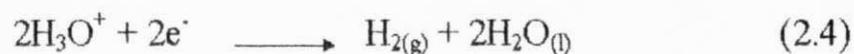


A produção do hidrogênio eletrolítico é gerado a partir de uma diferença de potencial aplicada nos eletrodos, gerando assim um campo elétrico no meio eletrolítico, produzindo um fluxo iônico direcionado; os íons de cargas positivas se dirigem para o cátodo e as negativas para o ânodo. Para ocorrer as reações nos eletrodos se faz necessário atingir o potencial mínimo de eletrólise (SILVA, 1991).

Para os eletrólitos ácido, neutro ou alcalino, as reações eletródicas são as seguintes:

### 1) Reações catódicas

a) em eletrólito ácido

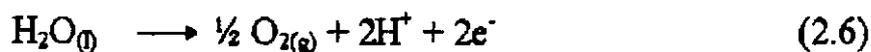


b) em eletrólito neutro ou alcalino

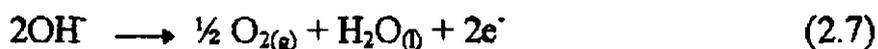


## 2) Reações anódicas

a) em soluções ácidas e neutras



b) em soluções alcalinas



### 2.2.3 - Energia requerida na eletrólise

Durante a 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  $\text{H}_2$ , a partir da água pela eletrólise é  $nF$ , onde  $n$  é o número de elétrons transferidos por moléculas e  $F$  é a constante de Faraday (96.489 Coulomb/eq.g). 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:

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

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 (2.8) (CASPER, 1978).

Para uma célula de eletrólise da água, pode-se calcular que a voltagem correspondente a mudança de entalpia, ou calor de combustão do hidrogênio é 1,47 volts a 25°C, enquanto a voltagem correspondente a mudança da energia livre é somente 1,23 volts. No caso ideal, 1,47 volts aplicados para a eletrólise da água, por célula, a 25°C, deveria gerar hidrogênio e oxigênio isotermicamente, isto com uma eficiência térmica de 100% onde o calor produzido não seria desperdiçado. Entretanto, uma voltagem tão baixa como 1,23 volts deveria, assim mesmo, gerar hidrogênio e oxigênio mas a célula deveria absorver calor de suas vizinhanças.

A energia elétrica requerida para o processo é somente 83,7% da energia de combustão do hidrogênio; os outros 16,3% são fornecidos como energia térmica. As células, na prática operam a voltagens maiores do que 1,47 volts e liberam calor por causa da perda de eficiência que ocorre nas células. O calor requerido para suprir a entropia de reação é então absorvido da soma destes calores desperdiçados.

A energia despendida no processo para manter uma produção de 1 Nm<sup>3</sup>/h pode ser obtida através da seguinte equação:

$$E_n = 2,393 \times V \left( \frac{\text{kWh}}{\text{Nm}^3 \text{H}_2} \right) \quad (2.9)$$

onde V é a tensão aplicada à célula (volts).

Tomando como exemplo, numa célula perfeitamente eficiente, 3,517 kWh de energia elétrica são consumidos para cada 1,0 m<sup>3</sup> de hidrogênio produzido.

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, 1985).

#### 2.2.4 - Tensão em uma célula eletrolítica

A aplicação da Teoria Termodinâmica ao processo conduz aos seguintes resultados:

$$E_{rev} = -\frac{\Delta G}{nF}$$

voltagem mínima (reversível) para o desenvolvimento das reações. (2.10)

$$E_t = \frac{\Delta H}{nF}$$

voltagem termoneutra, onde não há troca de calor entre o sistema químico e o meio ambiente. (2.11)

Onde:

$n$ - número de elétrons transferidos na reação

$F$ - constante de Faraday (96.489 coulomb/eq.g)

$\Delta H$ - variação da entalpia da reação (kcal)

Tanto  $E_{rev}$  como  $E_t$  são funções diretas da temperatura em que se desenvolve o processo. Esses resultados implicam nas seguintes conclusões:

- A eletrólise da água não ocorre para tensões, fornecidas ao sistema químico, abaixo do valor mínimo de  $E_{rev}$ .

- Para tensões entre  $E_{rev}$  e  $E_t$  a eletrólise ocorre desde que o calor seja fornecido ao sistema (processo endotérmico).

- Para tensões acima da voltagem termoneutra  $E_t$ , o calor é transferido ao meio ambiente (processo exotérmico).

As conclusões acima e as variações de  $E_{rev}$  e  $E_t$  com a temperatura estão mostradas na Figura 2.1.

Na prática, os sistemas químicos descritos, conhecidos como células eletrolíticas, operam todos na Região C, com uma tensão aplicada acima do limite inferior determinada pela termodinâmica.

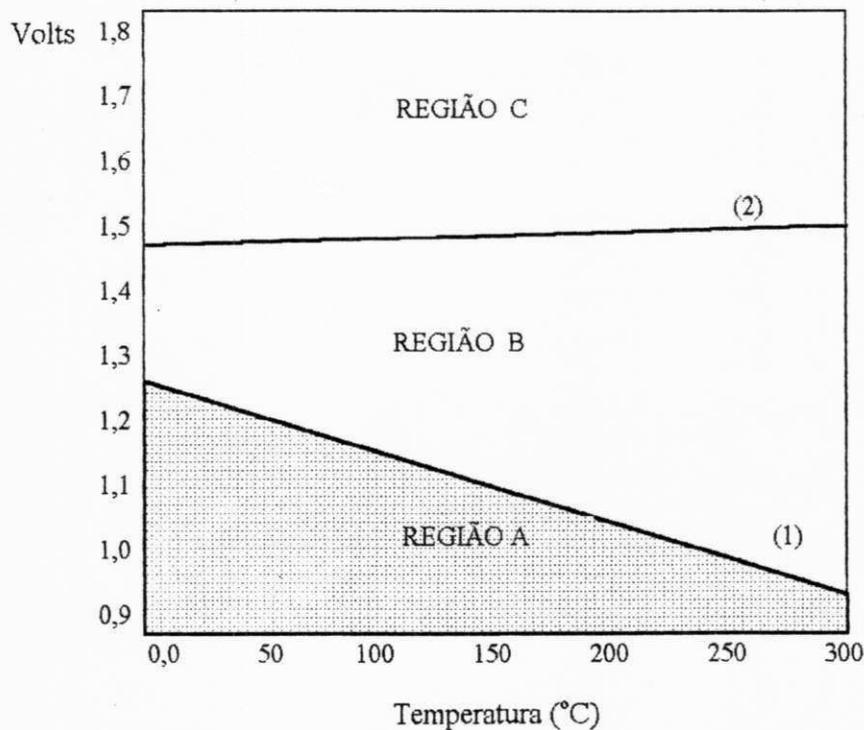


Figura 2.1- Curvas de voltagem em função da temperatura para a eletrólise da água (SILVA,1991)

Região A: Impossível a geração de  $H_2$

Região B: Geração de  $H_2$  através de calor e eletricidade

Região C: Geração de  $H_2$  e calor através de eletricidade

Curva (1): Voltagem Reversível

Curva (2): Voltagem Termoneutra.

### 2.2.5 - 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:

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

Onde:

E - voltagem teórica requerida (volts)

V - voltagem real ou de operação (volts)

A sobretensão total da célula pode ser subdividida em diferentes tipos. Para o sistema  $H_2/O_2$  destacam-se as sobretensões anódica ( $\eta_a$ ) e catódica ( $\eta_c$ ) e de resistência ( $R_o$ ), sendo a voltagem real de operação da célula (V), e levando-se em conta os fatores de sobretensões de uma célula eletrolítica, então:

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

Os fatores que provocam as sobretensões são inúmeros e variam de acordo com o tipo de sistema eletroquímico utilizado. As sobretensões Anódicas e catódicas dependem do uso de material apropriado e de superfícies que possam inclusive incluir efeitos catalíticos. Dependem também do pH do meio e da corrente elétrica. Diminuir a corrente elétrica implica em comprometer a produção dos gases 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-cátodo 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 ( $R_t$ ), é dado pela Equação (2.14).

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

A equação acima mostra que o rendimento térmico depende da voltagem real de operação da célula.

#### 2.2.6 - Densidade de corrente da célula

A densidade de corrente é um parâmetro eletroquímico que depende da área efetiva dos eletrodos, da concentração do eletrólito e o potencial aplicado ao meio. A produção do hidrogênio eletrolítico é diretamente proporcional a corrente que passa através de uma célula eletrolítica durante o processo, quanto menor seu valor significa que a resistência do meio se encontra aumentando durante o processo, acarretando um maior consumo de energia e conseqüentemente pode causar efeitos de polarização.

Na prática a densidade de corrente pode ser obtida através da seguinte equação:

$$J = \frac{I}{A} \quad (2.15)$$

Onde:

J - Densidade de corrente ( $A/m^2$ )

I - Corrente que passa por uma célula (A)

A- Área da célula ( $m^2$ )

### 2.2.7 - Curvas de polarização

O desempenho de uma célula eletrolítica é realizada através do levantamento de sua curva de polarização, que relaciona a tensão e a respectiva densidade de corrente.

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.

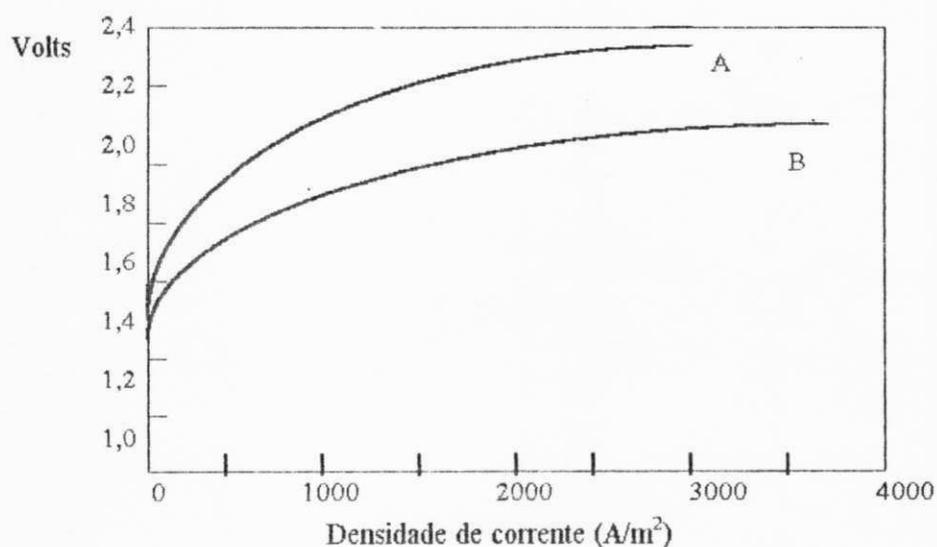


Figura 2.2- Curvas típicas de voltagem em função da densidade de corrente para células eletrolíticas (SILVA,1991).

### 2.2.8 - Efeito da temperatura e da pressão

Vários estudos mostram que o potencial aplicado nas células reduzem quase que linearmente com a temperatura, para densidades de corrente constantes. Por outro lado, o aumento da temperatura provoca uma maior evaporação da água do eletrólito, tornando assim uma fonte de corrosão e diminui a resistência dos materiais utilizados na construção das células, reduzindo desta maneira sua vida útil. As células comerciais convencionais operam na faixa de temperatura de 70 a 120°C. Entretanto, com o aumento da temperatura necessita-se pressurizar a célula para evitar a perda excessiva da água por evaporação e até mesmo em alguns casos a ebulição do eletrólito. A pressurização das células aumenta o consumo de energia. Em compensação aumenta a eficiência da célula, devido à diminuição do tamanho das bolhas de gás junto aos eletrodos.

Alguns pesquisadores observaram que a performance das células eletrolíticas melhora com o aumento da pressão. As pressões mais altas porém, podem causar dificuldade na separação e contenção dos gases pressurizados, bem como problemas nos materiais como a fragilização pelo hidrogênio. Assim o aumento de 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).

### 2.2.9 - Componentes básicos de uma célula eletrolítica

Uma célula eletrolítica, na sua forma construtiva mais simples consta de eletrólito, eletrodos, reservatório e separador.

#### - 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 a 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.

## - 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 aço ou mesmo o níquel.

## - Reservatório

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.

do gás produzido incluindo purificação, secagem e compressão (TICIANELLI, 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 2 volts).

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 ânodo em uma célula e a outra serve como cátodo 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 células pela tensão de cada célula, 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 pesquisas. 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 semelhante 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,1980).

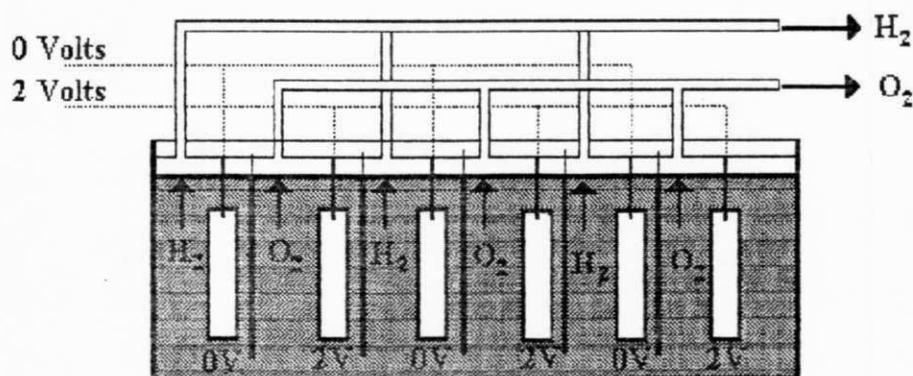


Figura 2.3 - Esquema de arranjo de eletrolisadores unipolares para células eletrolíticas convencionais.

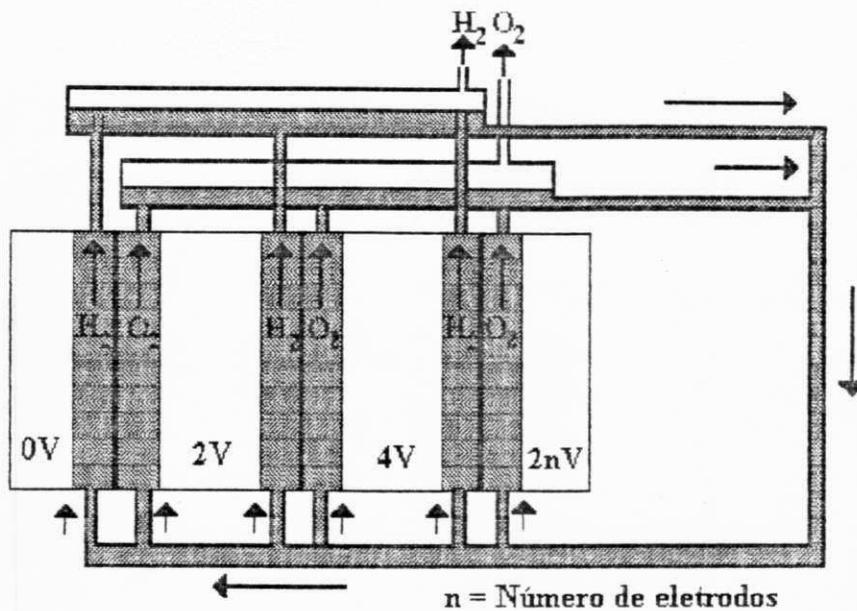


Figura - 2.4 - Esquema de arranjo de eletrolisadores bipolares para células eletrolíticas convencionais.

### 2.3 - Considerações termodinâmicas

A palavra termodinâmica tem o sentido de força ou potência térmica, ou de força desenvolvida às custas do calor. Há muito tempo, porém, que esta limitação de significado desapareceu. No sentido mais amplo, a termodinâmica é a ciência que trata das transformações de energia de quaisquer espécies, umas nas outras. As restrições gerais em que estas transformações ocorrem são conhecidas como primeira e segunda lei da termodinâmica. Estas leis não se demonstram no sentido matemático. A validade de ambas fundamenta-se, ao contrário, na experiência (SMITH & VAN NESS, 1980).

### 2.3.1 - Conceitos fundamentais

Entre 1840 e 1878 Joule realizou várias experiências sobre a natureza do calor e do trabalho. Nessas experiências ele mostrou que há uma relação quantitativa entre calor e trabalho e que o calor é uma forma de energia.

A energia interna de um corpo se refere à energia das moléculas que constituem o corpo, é a energia cinética das moléculas proveniente dos movimentos de translação, rotação e vibração das mesmas. Quando adicionamos calor, aumenta-se a atividade molecular e conseqüentemente a energia interna. Além da energia cinética, as moléculas possuem energia potencial em virtude das interações dos respectivos campos de força.

### 2.3.2 - A primeira Lei da termodinâmica

A generalização da lei da conservação da energia para incluir o calor e a energia interna ( $U$ ), além da energia potencial ( $E_p$ ) e cinética externas ( $E_c$ ) e o trabalho, podendo ainda serem incluídas outras formas de energia como a elétrica e a magnética, nos conduz a uma formulação ao modo de um postulado; inúmeras observações, feitas desde 1850, suportam-na sem exceção (vale ressaltar que os processos que envolvem reações nucleares não estão incluídos). Por isso, acabou por adquirir o status de lei e é conhecida como a primeira lei da termodinâmica, que pode ser enunciada da seguinte maneira: Embora a energia assuma diversas formas, a quantidade total de energia é constante e, quando a energia desaparece em uma forma, ela reaparece simultaneamente em outras formas.

Podemos dividir o processo a ser estudado em sistema e vizinhança, e assim escrever:

$$\Delta (\text{energia do sistema}) + \Delta(\text{energia da vizinhança}) = 0 \quad (2.16)$$

Diz-se que um sistema é isolado quando não há transferência de matéria entre o sistema e as vizinhanças, só o calor (Q) e o trabalho (W) podem ser transferidos. Então a energia da vizinhança em um sistema fechado só sofre variação se houver transferência de calor ou trabalho e deste modo pode-se escrever da seguinte forma:

$$\Delta (\text{energia da vizinhança}) = \pm Q \pm W \quad (2.17)$$

Podemos desenvolver a primeira parcela do primeiro termo da Equação 2.16, mostrando as variações de energia cinética, potencial e interna, já que são as únicas que irão variar devido a massa do sistema ser constante.

$$\Delta (\text{energia do sistema}) = \Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p \quad (2.18)$$

Substituindo as Equações 2.17 e 2.18 na Equação 2.16 e utilizando a convenção que considera positivo o calor transferido das vizinhanças para o sistema e negativo a quantidade de trabalho transferido das vizinhanças para o sistema e rearranjando a equação, temos:

$$\Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p = Q - W \quad (2.19)$$

Os sistemas isolados sofrem, frequentemente, processos que não provocam modificações das energias potencial ou cinética externas, mas apenas alterações da energia interna (SMITH & VAN NESS, 1980).

Sendo assim obtemos:

$$\Delta U = Q - W \quad (2.20)$$

Ou, na forma diferencial

$$dU = dQ - dW \quad (2.21)$$

### 2.3.3 - Entalpia

Além da energia interna, a entalpia é outra função termodinâmica de grande importância prática que é definida pela seguinte expressão matemática:

$$H = U + PV \quad (2.22)$$

onde:

H = entalpia (N.m = joule)

U = energia interna (N.m = joule)

P = pressão absoluta (N/m<sup>2</sup>)

V = volume (m<sup>3</sup>)

ou na forma diferencial

$$dH = dU + d(PV) \quad (2.23)$$

#### 2.3.4 - Capacidade calorífica e calor específico

Para elevar de um grau a temperatura de uma dada massa de qualquer material, é necessária uma certa quantidade de calor. Esta quantidade de calor é a capacidade calorífica da substância.

De acordo com os resultados das observações experimentais, o calor específico (ou capacidade térmica) depende da natureza do material, da temperatura e da pressão (AGUIRRE, 1971).

Quando se trabalha com a unidade de massa como base da capacidade calorífica, a equação que relaciona o calor transferido a um corpo e a temperatura do corpo fica  $dQ = m c dT$ , onde  $m$  é a massa e  $c$  é a capacidade calorífica por unidade de massa ou calor específico (SMITH & VAN NESS, 1980).

Para processos a volumes constantes, de acordo com a definição de capacidade calorífica podemos escrever

$$dQ = C_v dT \quad (2.24)$$

e para processos a pressão constante

$$dQ = C_p dT \quad (2.25)$$

### 2.3.5 - Cálculo da energia térmica acumulada em um sistema fechado

Considerando um sistema fechado, como uma sala aquecida por um trocador de calor e tomando a primeira Lei da termodinâmica, pode-se escrever:

$$dU = dQ \quad (2.26)$$

Como a sala possui um volume constante, pode-se utilizar a definição de capacidade calorífica a volume constante e escrever,

$$dQ = C_v dT \quad (2.27)$$

integrando-se,

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} C_v dT \quad (2.28)$$

A capacidade calorífica a volume e pressão constantes se relacionam da seguinte maneira,

$$C_v = C_p - R/J \quad (2.29)$$

onde : J = constante de Joule (equivalente mecânico da caloria, 778

lbf·ft/Btu ou 427 kgf·m/kcal)

O valor de R/J para o ar obtido a partir da Tabela (A1) é 0,06855 (FAIRES, 1966).

Os gases reais a baixa pressão comportam-se de maneira muito semelhante aos gases perfeitos. Esta “baixa” pressão, para gases de ponto de ebulição baixo, como O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> podem ser de dezenas de atmosferas (ou centenas de psi), conforme a aproximação desejada (FAIRES, 1966).

Desta maneira pode-se utilizar a Equação 2.29 para calcular a capacidade calorífica a volume constante, partindo-se da capacidade calorífica a pressão constante para o ar que se encontra no interior da sala.

A equação para o cálculo do calor específico a pressão constante segundo Faires:

$$c_p = 0,219 + 0,342 \times 10^{-4}T - 0,293 \times 10^{-8}T^2 \quad (2.30)$$

Onde T é a temperatura em Rankine e o valor de c<sub>p</sub> é dado em Btu/lbR ou kJ/KgK. Combinando a Equação 2.30 com a Equação 2.29, multiplicando pela massa e substituindo na Equação 2.28, obtém-se.

$$Q = m \int_{T_1}^{T_2} ((0,219 + 0,342 \times 10^{-4}T - 0,293 \times 10^{-8}T^2) - 0,06855) dT \quad (2.31)$$

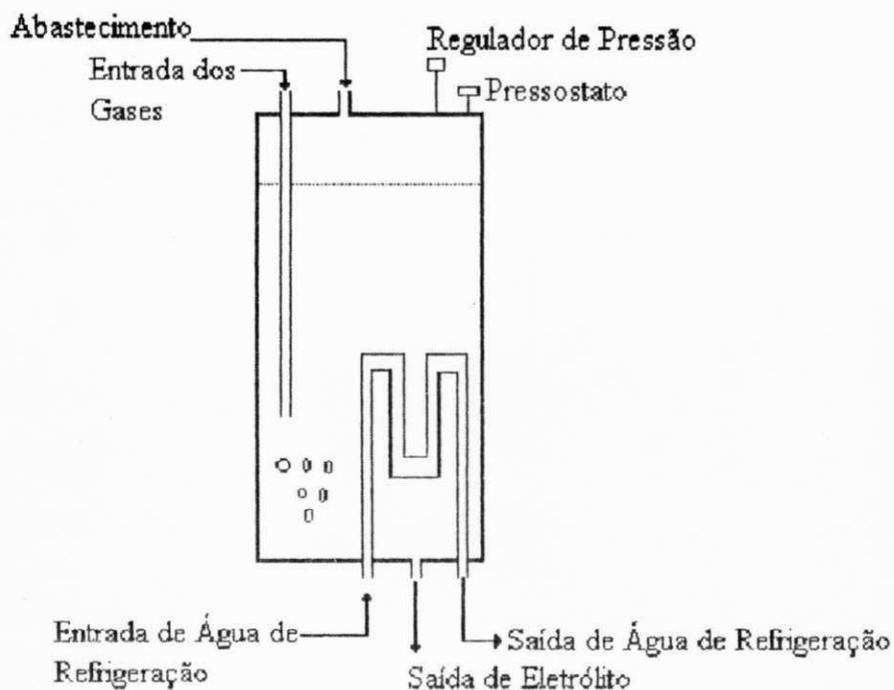
integrando e agrupando os termos em comum, têm-se:

$$Q = m [0,15045T + 0,171 \times 10^{-4}T^2 - 0,0976 \times 10^{-8}T^3]_{T_1}^{T_2} \quad (2.32)$$

A massa (m), expressa em kg, pode ser calculada a partir do volume da sala e da densidade média do ar.

Sendo assim, pode-se substituir os valores da temperatura e multiplicar pela massa para se obter o calor acumulado na sala em quilo joule (kJ). Para se obter em kcal basta dividir este valor pelo fator de conversão 4,18676.

para possibilitar a pré-remoção do eletrólito arrastado pelos gases. O reservatório é mostrado na Figura 3.3 pela qual pode-se observar que além da abertura de saída do eletrólito, o reservatório possui a abertura de reabastecimento. O reabastecimento é feito com água destilada que garante autonomia ao sistema.



**Figura 3.3 - Reservatório de Eletrólito e Sistema de Refrigeração.**

### c) Sistema de refrigeração

De acordo com a Figura 3.3, 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.

#### d) Purgador

Este é um tubo cilíndrico constituído de aço, com 90 mm de diâmetro e 290 mm 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.

#### e) Selos controladores de chama

O gás purificado após sair do purgador, é borbulhado através de um fluido orgânico controlador de chama, que tem como objetivo evitar o retrocesso da chama, produzir uma chama mais branda e diminuir 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 a mais de 2000°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°C, e um formato menos pontual (mais aberto). A Figura 3.4 mostra um selo controlador de chama (ALVES, 1992).

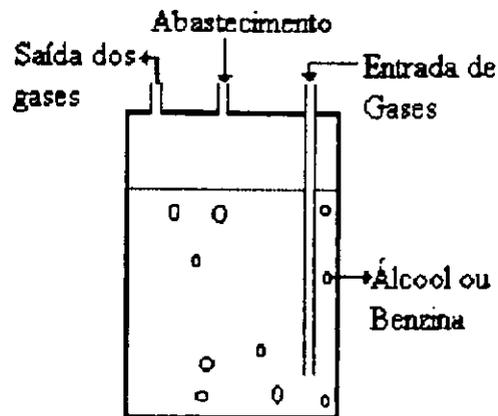


Figura 3.4 - Selo controlador de Chama.

#### f) Fonte de alimentação

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

#### g) Pressostato

Foi utilizado um pressostato da marca Fligor, para controlar a pressão do sistema entre 0,3 e 0,5 kgf/cm<sup>2</sup>, durante a operação da máquina, com a finalidade de controlar o processo através da pressão dos gases.

### 3.1.2 - Trocador de calor convectivo

Este trocador foi adquirido da Morganti S.A., e adaptado para o uso do hidrogênio, uma vez que foi projetado para uso dos gases butano e natural. A Figura 3.5 mostra um esquema deste trocador, onde, durante a

combustão do hidrogênio, o vapor de água produzido irá trocar calor diretamente com o ar do ambiente que desejamos aquecer.

Este trocador tem as seguintes referências:

Aquecedor de Ambientes de Fluxo Balanceado(AFB - 2000)

Combustíveis; GLP ou Gás Natural

Eficiência: 80%

Potência Nominal: 2000 Kcal/h

Potência Efetiva: 1600 kcal/h

Consumo GLP: 0,18 Kg/h

Consumo de Gás Natural; 0,21 m<sup>3</sup>/h

Pressão de Funcionamento do Queimador:

GLP	280 mm C.A.
-----	-------------

Gás Natural	200 mm C.A.
-------------	-------------

Dimensões: altura - 630 mm

comprimento - 270 mm

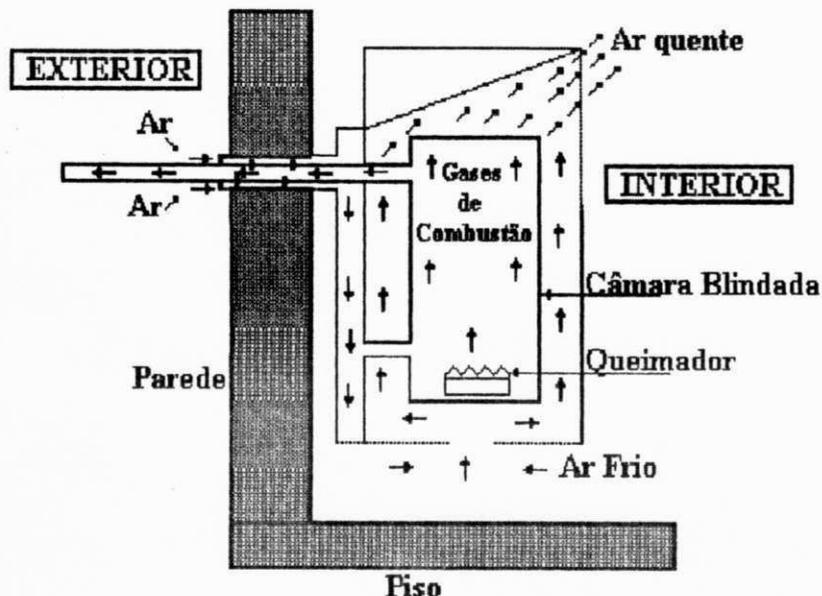
espessura - 130 mm

E as principais características são:

- Não queima oxigênio do ambiente
- Joga para o exterior os gases da combustão
- Aquece predominantemente por convecção

O funcionamento do trocador de calor convectivo ocorre da seguinte forma: A mistura dos gases hidrogênio e oxigênio proveniente do eletrolisador é conduzida para o trocador de calor convectivo através de um tubo plástico flexível  $\phi_{\text{interno}} = 10\text{mm}$  e  $\phi_{\text{externo}} = 15\text{mm}$ . Sendo estes gases queimados na câmara blindada, onde o vapor de água gerado troca calor

através da parede da câmara de combustão com o ar do ambiente a ser aquecido.



**Figura 3.5 - Trocador de Calor Convectivo**

### 3.2 - 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 30A.

### 3.3 - Operação com o sistema eletrolítico

Inicialmente observa-se no painel traseiro, todos os registros, tampões de abastecimentos se estão fechados, e aciona-se o sistema de

refrigeração. Em seguida toma-se a leitura no medidor de energia, liga-se a chave disjuntora, posiciona-se a chave seletora no máximo em 19,0A e aguarda-se até o desligamento automático da máquina, (neste instante a amperagem cai a zero), isto ocorre quando os gases atingem a pressão de trabalho.

Durante toda a operação da máquina, deve-se observar e controlar a pressão entre 0,3 a 0,5 Kgf/cm<sup>2</sup>.

### 3.4 - Operação com o trocador de calor convectivo

No presente trabalho utilizamos a chama que sai do lado da benzina, que é mais espalhada e proporciona melhor distribuição de calor. Quando o sistema se encontra em condições adequadas de trabalho, a válvula reguladora de gás do trocador é aberta, e logo após acionar a chave de ignição do trocador de calor, esta produzirá uma faísca sobre a mistura dos gases advindos do eletrolisador, a qual entrará em combustão.

Ao final dos testes para desligar o trocador, basta fechar a válvula reguladora de gás e depois despressurizar o sistema.

### 3.5 - Abastecimentos

Sempre que os visores de nível, da água e/ou da benzina, indicarem o nível mínimo, estes devem ser completados. O consumo de benzina é da ordem de 0,05 l / Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub> / O<sub>2</sub> . O reabastecimento deve ser realizado com a máquina desligada. Abre-se completamente a passagem do gás e aguarda-se

que a pressão caia a zero, em seguida abre-se o tampão para o reabastecimento.

### 3.6 - 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 consumo de energia foi obtido o volume de gás hidrogênio produzido durante o tempo de aquecimento.

### 3.7 - Alteração realizada no trocador de calor convectivo

A princípio o trocador de calor convectivo foi projetado para ser usado com o gás butano munido de uma válvula reguladora de pressão, mas foi modificado para o uso do hidrogênio eletrolítico. Para isso foi necessário alterar a entrada da câmara de combustão, sendo necessário adaptar um sistema de forma que o hidrogênio pudesse ser consumido sem que houvesse recuo de chama. Neste caso foi reduzida a entrada de ar na câmara de combustão, complementando a sua entrada com cola durepox e introduzindo a este complemento pequenos orifícios.

### 3.8 - Conjunto de tiragem

Segundo o manual do fabricante (Morganti S/A, Indústria e Comércio) o conjunto de tiragem consiste em dois dutos, um de maior

diâmetro, duto de ar, e outro de menor diâmetro para saída dos gases de combustão, conforme mostram as Figuras 3.6.

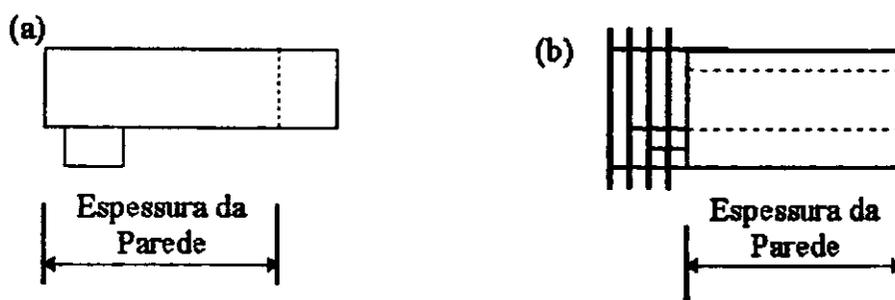


Figura 3.6- Representação do duto de tiragem (a) e duto de ar (b).

As primeiras experiências foram realizadas na sua forma original, em que os gases de combustão eram expulsos, através do duto de tiragem e lançado no exterior, conforme mostra a Figura 3.5.

Durante as bateladas foi observado que no interior do duto de tiragem a temperatura registrou aproximadamente 150°C. Em função dos dados obtidos, percebeu-se que a forma que o duto de tiragem foi projetado pelo fabricante estava sendo uma fonte de perda de calor para o meio externo. A partir deste ponto o mesmo foi modificado com o objetivo de aproveitar estas perdas, dissipando-as para o meio interno (sala). Para isso foi acoplado um tubo longo tipo chaminé de comprimento 2200 mm, diâmetro 78 mm, conforme mostra a Figura 3.7.

O conjunto de tiragem é composto de 8 peças sendo fabricadas de chapa zincada (galvanizada), bitola 26, espessura 0,5 mm, peso 4,0 kg/m<sup>2</sup>. Para a fabricação de todo o conjunto foram usados 1,4 m<sup>2</sup> de chapa. As operações necessárias para a fabricação foram: corte, calandragem e

soldagem. O desenvolvimento das chapas para a fabricação das peças de 1 a 7 estão nas Figuras 3.8 a 3.10.

### 3.9 - Condições da sala

A sala possui um volume de  $15,45 \text{ m}^3$ , apresentando 3 paredes de tijolo cerâmico e uma de madeira constituída com uma porta, onde todas as paredes foram revestidas internamente com uma camada de isopropileno expandido (conhecido comercialmente como isopor) de 10 mm. Na parte superior a mesma possui uma laje de concreto, também revestida com o mesmo material. A posição dos termopares bem como do trocador de calor convectivo estão na figura 3.6 (c).

### 3.10 - Avaliação do trocador de calor convectivo

A eficiência energética do sistema foi analisada em função do consumo de energia elétrica e a energia térmica acumulada no ambiente. As temperaturas foram tomadas através de termopares no interior e exterior da sala em função do tempo. Um outro parâmetro observado foi o consumo de energia que foi registrado diretamente através de um medidor de energia elétrica, ambos lidos em intervalos de 10 minutos para um período de 180 minutos.

As bateladas foram realizadas durante os dois turnos, diurno e noturno, com o objetivo de comparar os resultados, haja vista que durante o período diurno a temperatura externa também passou a ser uma fonte de

energia para aquecer a sala. As bateladas diurnas foram realizadas a partir das 07:00 horas e as noturnas a partir das 19:00 horas.

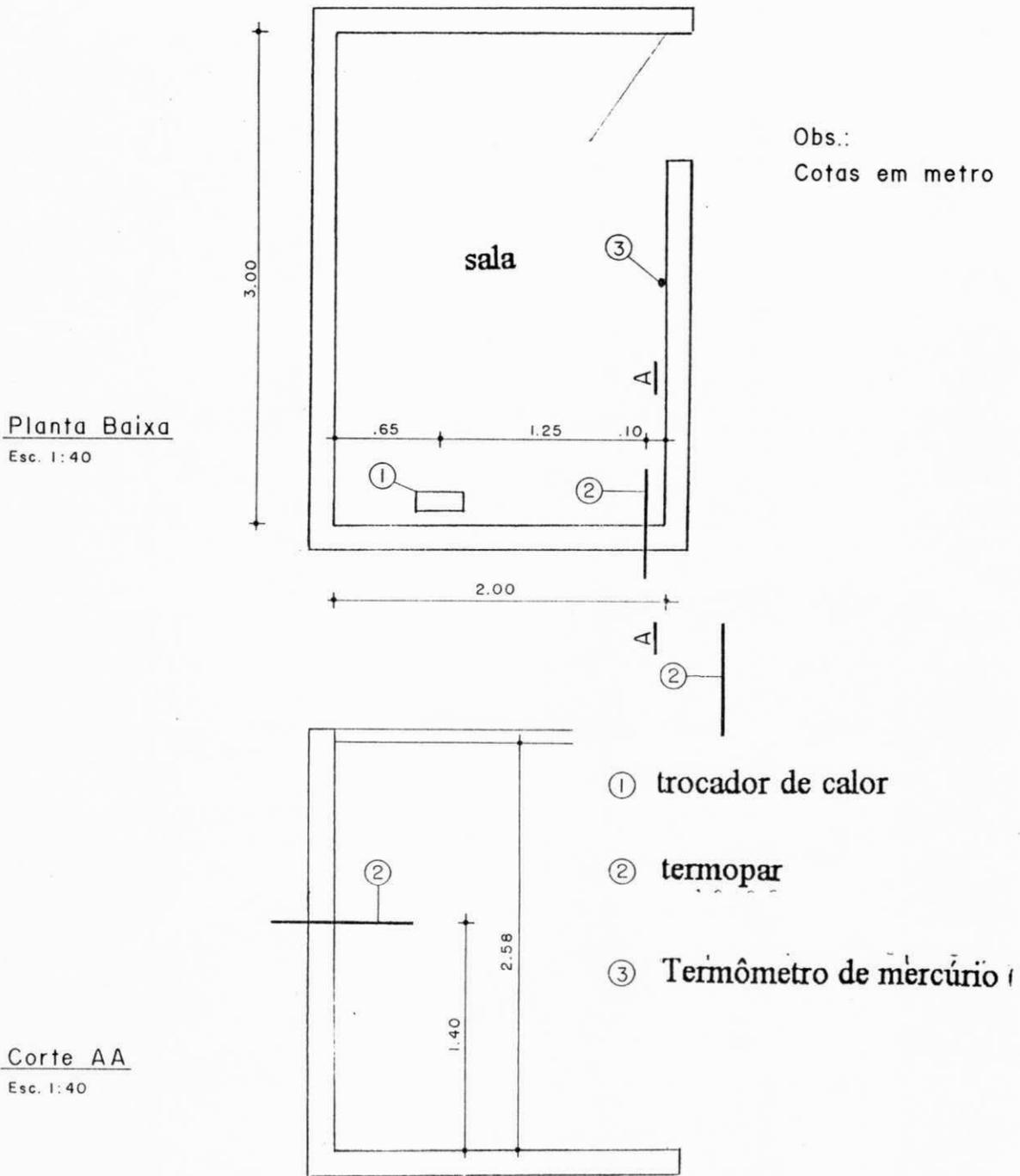
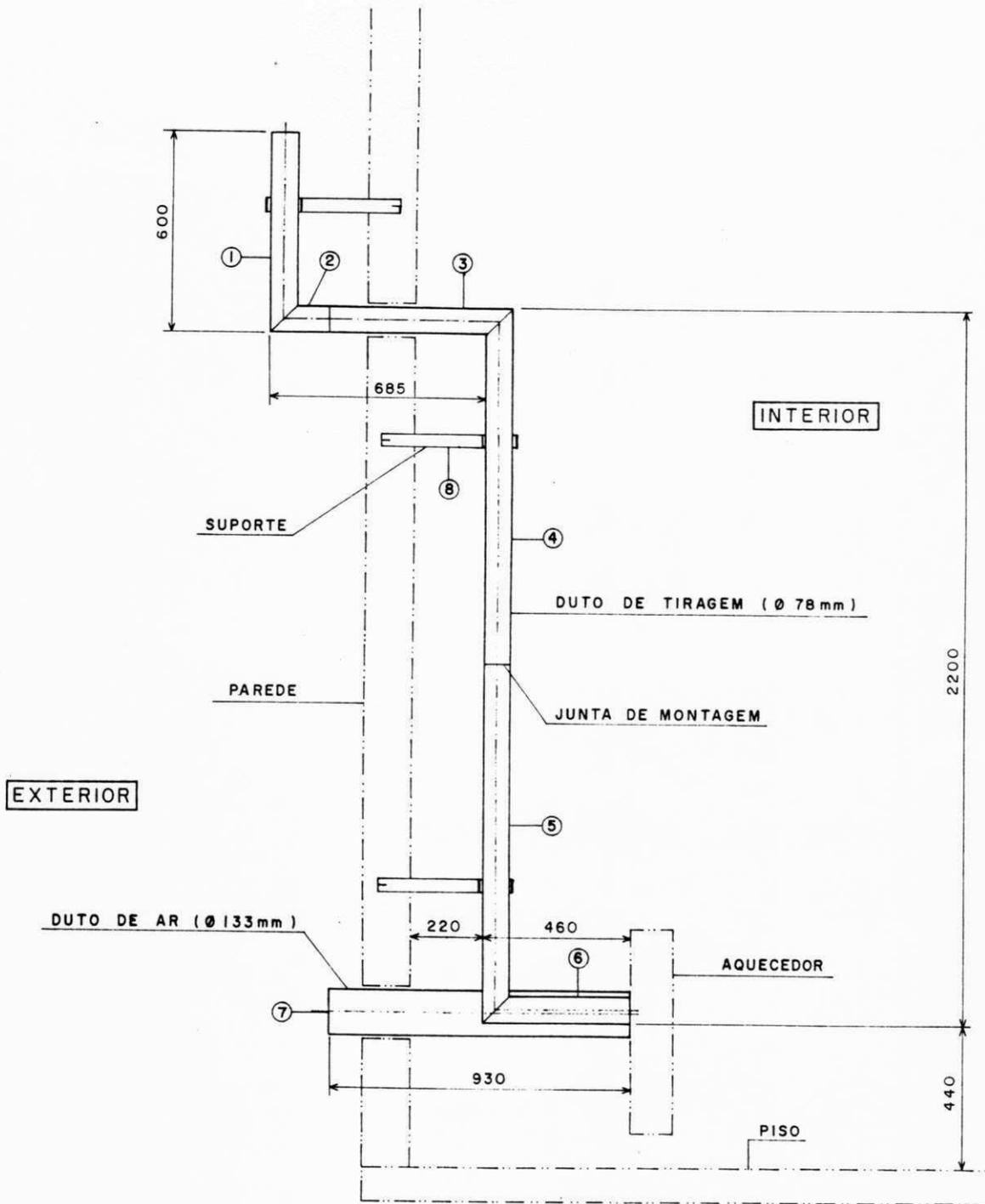


Figura 3.6 (c). A posição dos termopares bem como do trocador de calor

# CHAMINÉ

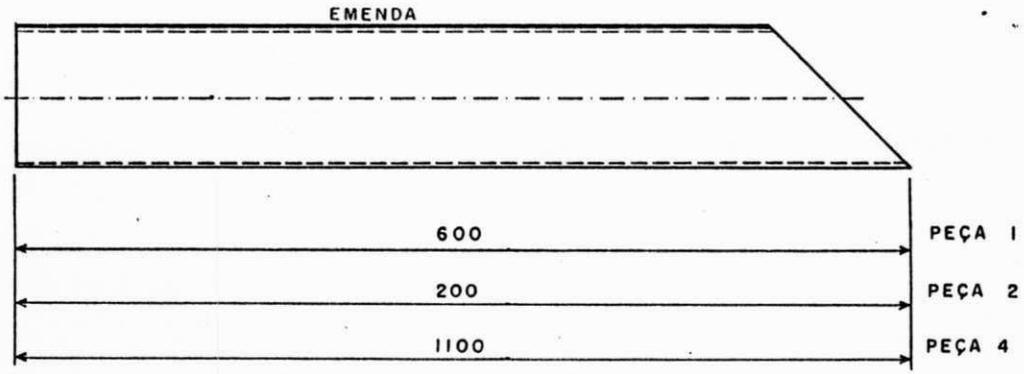


ESQUEMA DO CONJUNTO DE TIRAGEM

ESCALA 1:20

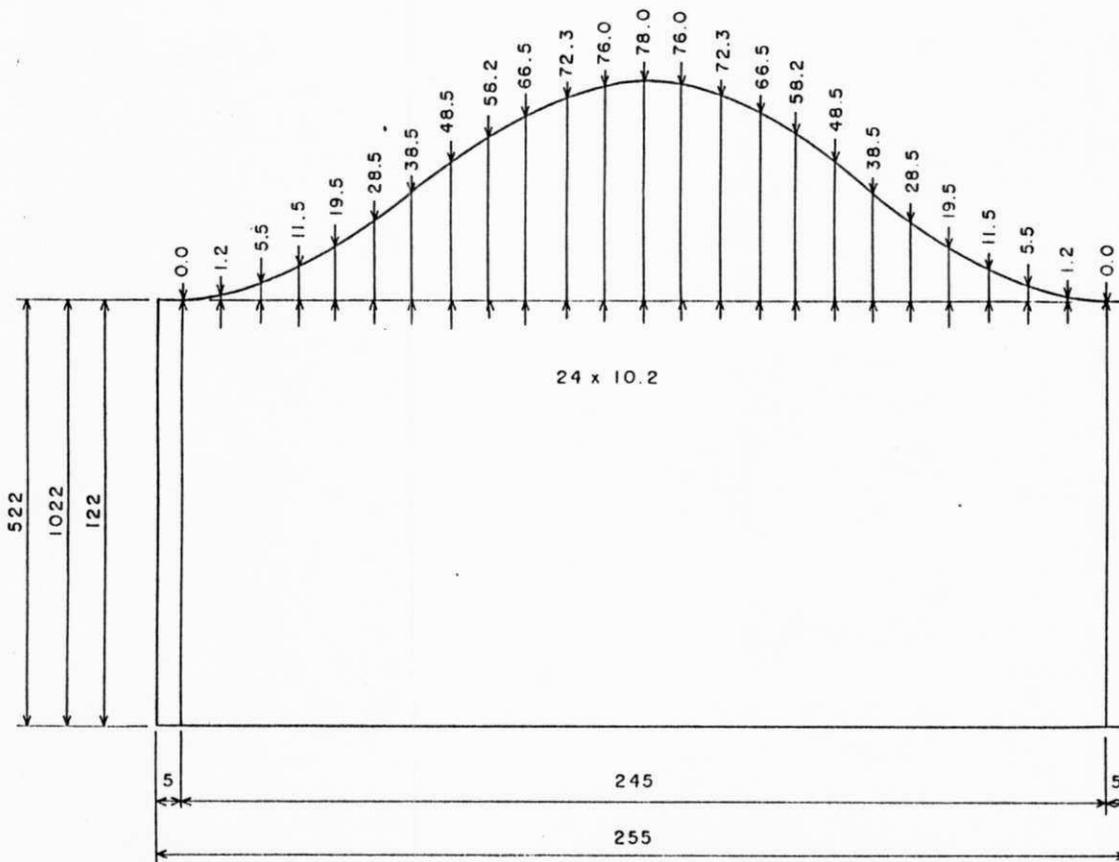
Figura 3.7

# CHAMINÉ



**PEÇA 1, 2 e 4**

S/ ESC.

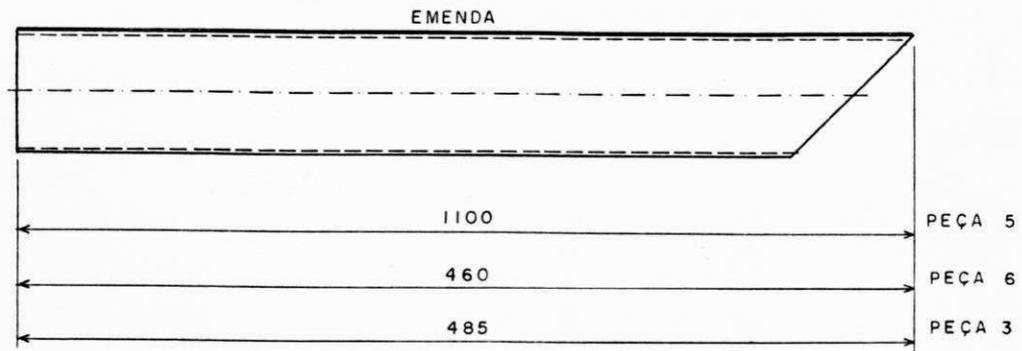


**CHAPA DESENVOLVIDA**

S/ ESC.

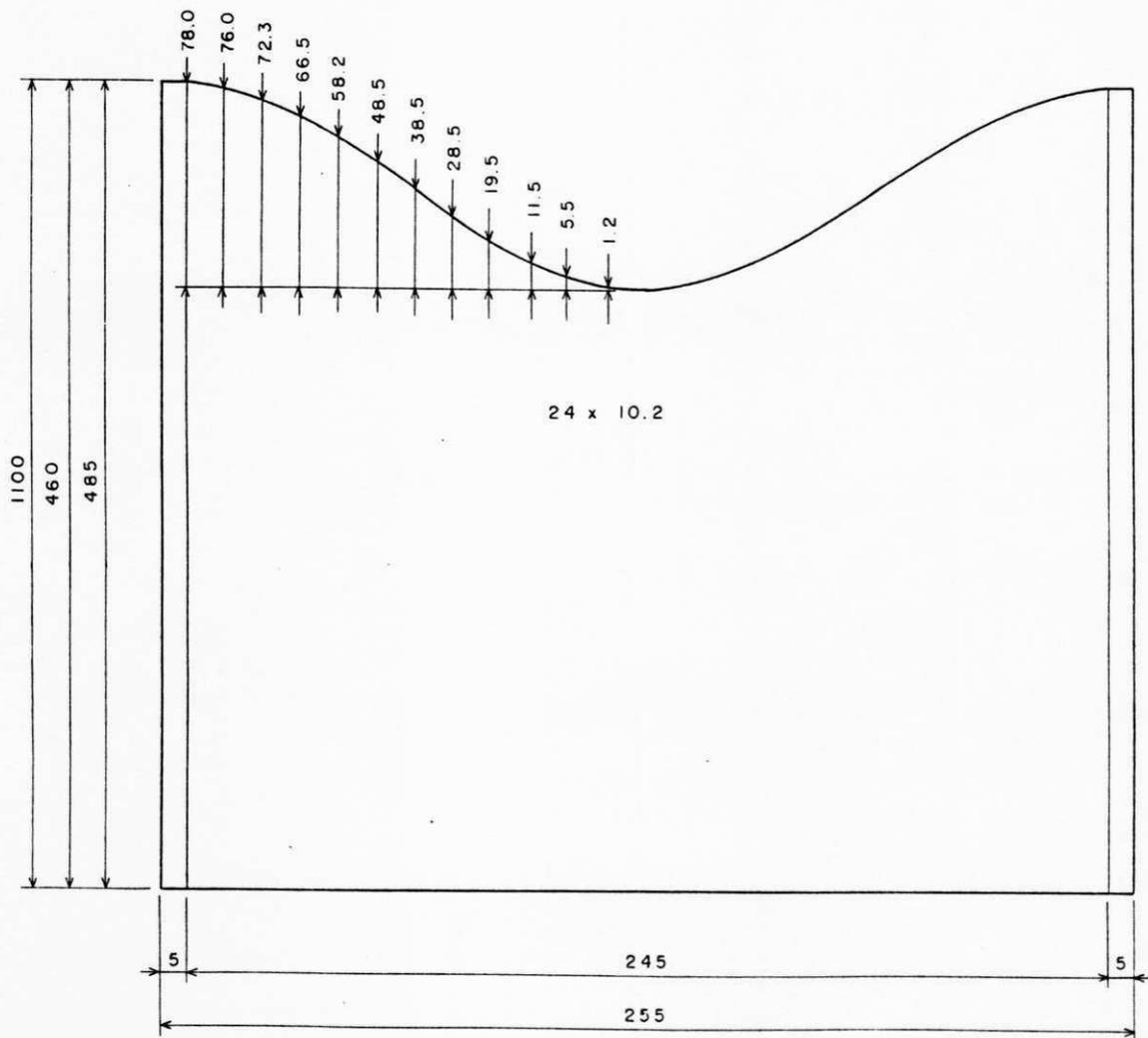
Figura 3.8

# CHAMINÉ



## PEÇA 3, 5 e 6

S/ ESC.

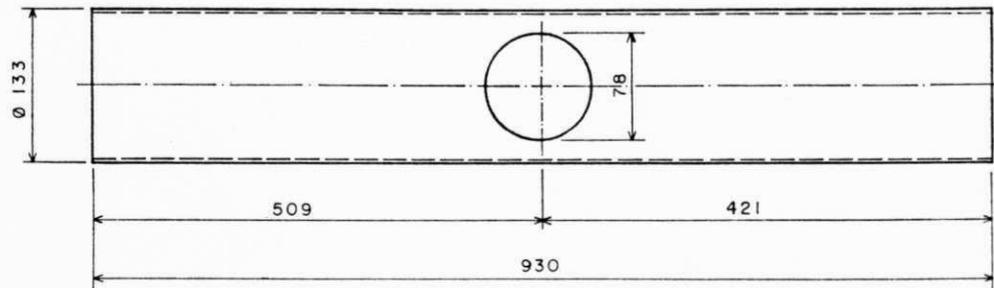


## CHAPA DESENVOLVIDA

S/ ESC.

Figura 3.9

# CHAMINÉ



**PEÇA 7**

S/ESC.

Figura 3.10

## CAPÍTULO 4

### Resultados e discussões

Os dados apresentados neste capítulo se referem as bateladas realizadas com o trocador de calor convectivo na sua forma original (sem a chaminé) e modificado (com a chaminé). Todas as experiências foram realizadas durante o período de fevereiro a março de 1996. As figuras se encontram no corpo do capítulo e as tabelas referentes as mesmas se encontram no Apêndice D.

#### 4.1 - Avaliação do trocador de calor convectivo sem a chaminé

As Figuras 4.1 a 4.4 mostram a variação da temperatura no interior da sala (T.sala), do exterior (T.externa) e o consumo de energia em função do tempo durante o período **diurno**. A temperatura externa foi considerada aquela no interior do galpão, onde fica situada a sala de trabalho. Observa-se que o comportamento para estes três parâmetros nas figuras mencionadas acima foram semelhantes. Com o objetivo de melhor interpretação foi calculada a média aritmética da temperatura da sala para as quatro bateladas e construído um gráfico com esses valores, conforme mostra a Figura 4.5 e a Tabela D.5., onde (Méd. Sala) representa a temperatura média no interior da sala, (Méd. Ext.) representa a temperatura média externa e (Méd. Rel.) representa o consumo médio de energia. Observa-se que a variação da temperatura no interior sala apresentou três fases; a primeira fase a temperatura aumentou durante os primeiros 20 minutos de forma

linear; a segunda denominada fase de transição decorreu durante mais 20 minutos e após este intervalo tende atingir um regime de estabilização.

A Figura 4.6 mostra o comportamento da variação da temperatura no interior da sala para os primeiros 20 minutos de forma linear. Apresentando uma taxa de elevação de temperatura de 0,48 °C/min., que correspondeu a um acréscimo de temperatura da ordem de 39,55%, em relação a temperatura inicial, conforme mostra a Equação 4.1.

$$T = 24,267 + 0,480 t \quad (4.1)$$

Onde: T - temperatura média da sala (°C)

t - tempo (min.)

Observou-se que após o período de transição a temperatura da sala aumentou, apesar do sistema se encontrar operando nas mesmas condições exposta inicialmente, a temperatura interna da sala aumentou lentamente chegando no final de 180 minutos a 36,80°C, que corresponde a um percentual de 50,20% com respeito a temperatura inicial.

A variação de temperatura no meio externo está representada no gráfico com um comportamento linear apresentando uma pequena elevação contando a partir do tempo inicial atingiu uma elevação de 3,3°C em média. Através desta curva foi possível estudar o efeito da temperatura externa sobre a taxa de elevação no interior da sala.

Quanto ao consumo de energia para os primeiros 40 minutos foi de 1kWh e para os 180 minutos de 4,7kwh, isso pode ser observado através da curva que representa o consumo médio de energia em função do tempo, conforme mostra a Figura 4.5.

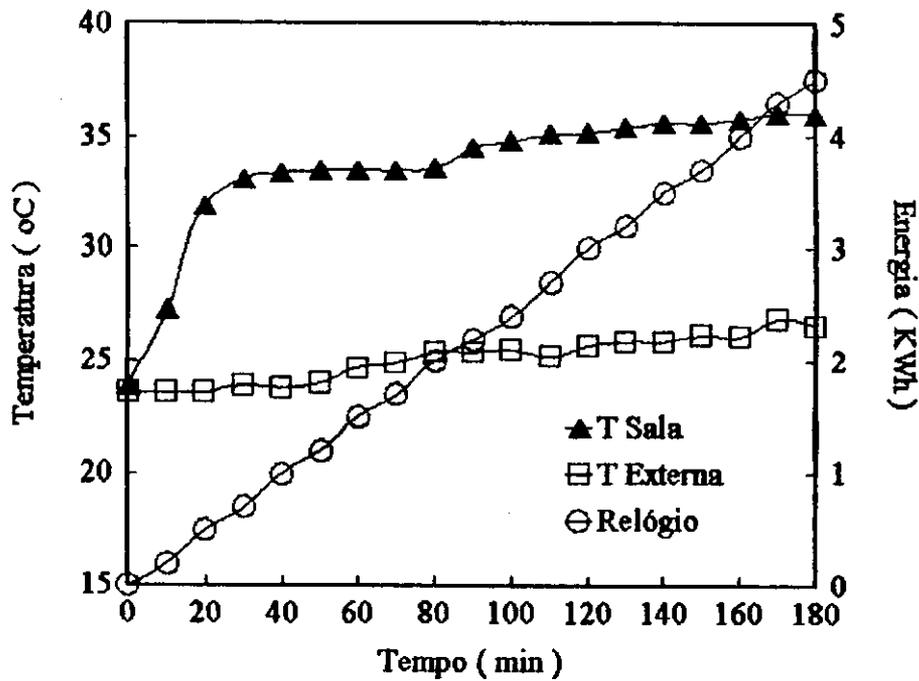


Figura 4.1- Temperatura no interior da sala (T.sala), do exterior (T.ext.) e energia consumida (relógio) em função do tempo, para o trocador de calor sem a chaminé, durante o período diurno. (17/02/96)

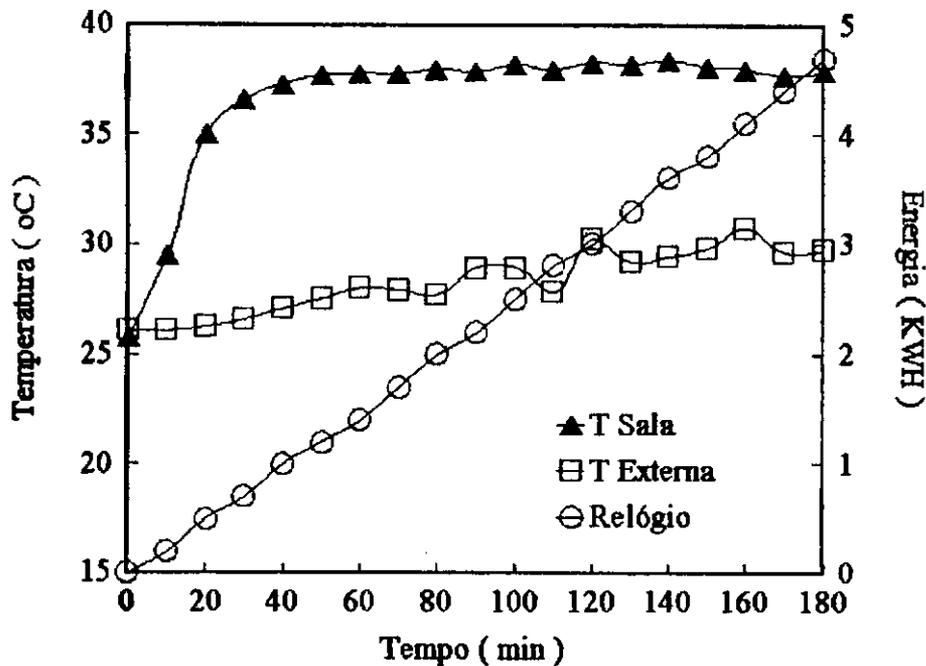


Figura 4.2- Temperatura no interior da sala (T.sala), do exterior (T.ext.) e energia consumida (relógio) em função do tempo, para o trocador de calor sem a chaminé, durante o período diurno. (18/02/96)

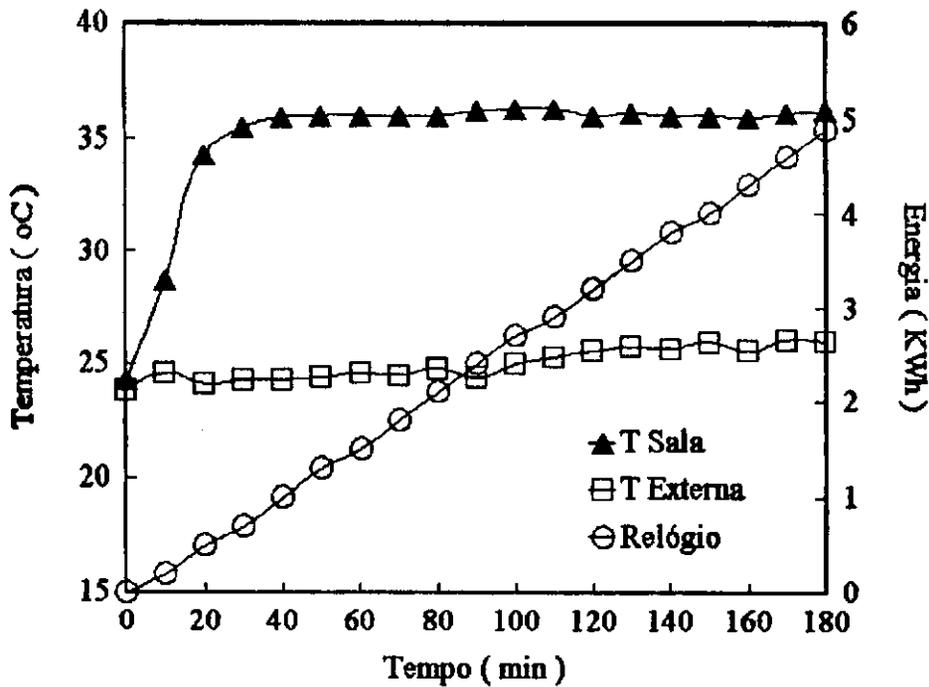


Figura 4.3- Temperatura no interior da sala (T.sala), do exterior (T.ext.) e energia consumida (relógio) em função do tempo, para o trocador de calor sem a chaminé, durante o período diurno. (19/02/96)

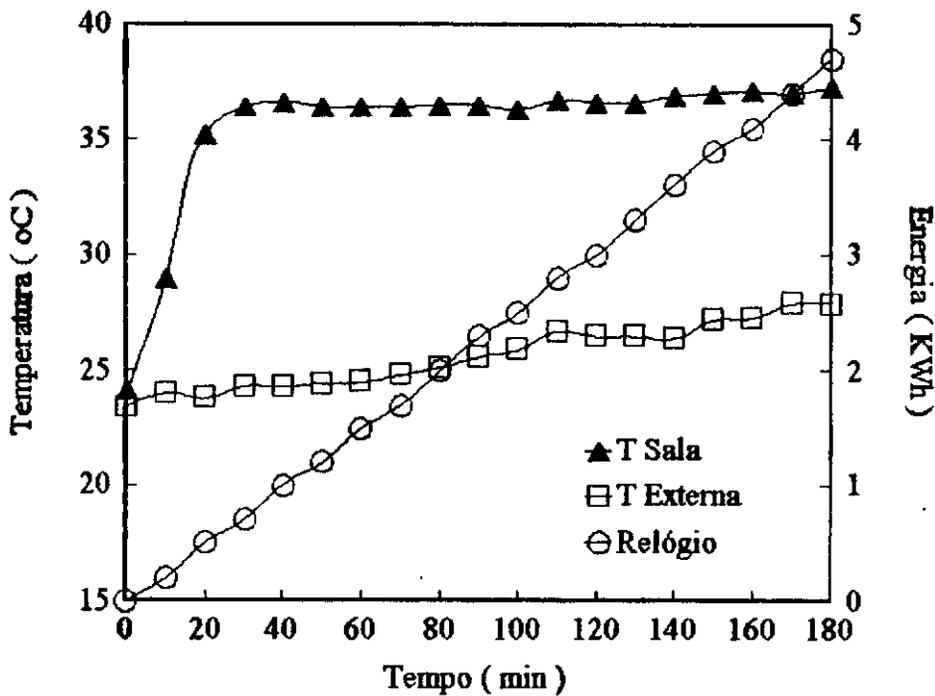


Figura 4.4- Temperatura no interior da sala (T.sala), do exterior (T.ext.) e energia consumida (relógio) em função do tempo, para o trocador de calor sem a chaminé, durante o período diurno. (20/02/96)

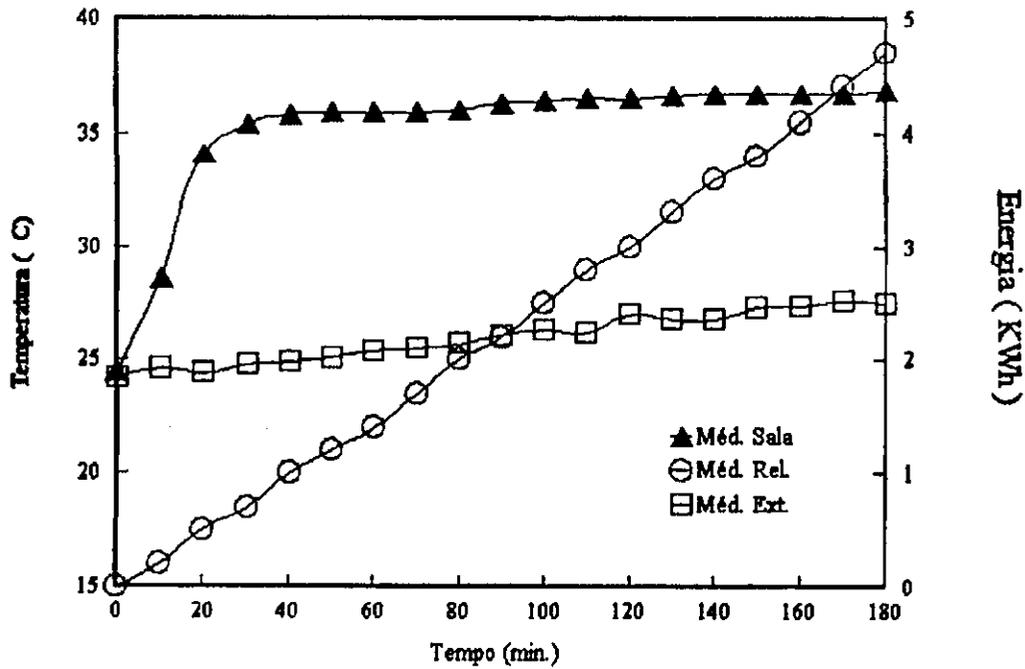


Figura 4.5- Temperatura média no interior da sala (Méd.sala), do exterior (Méd.ext) e consumo médio de energia (Méd.rel.) em função do tempo. (Estes dados são referentes as bateladas 4.1,4.2,4.3 e 4.4).

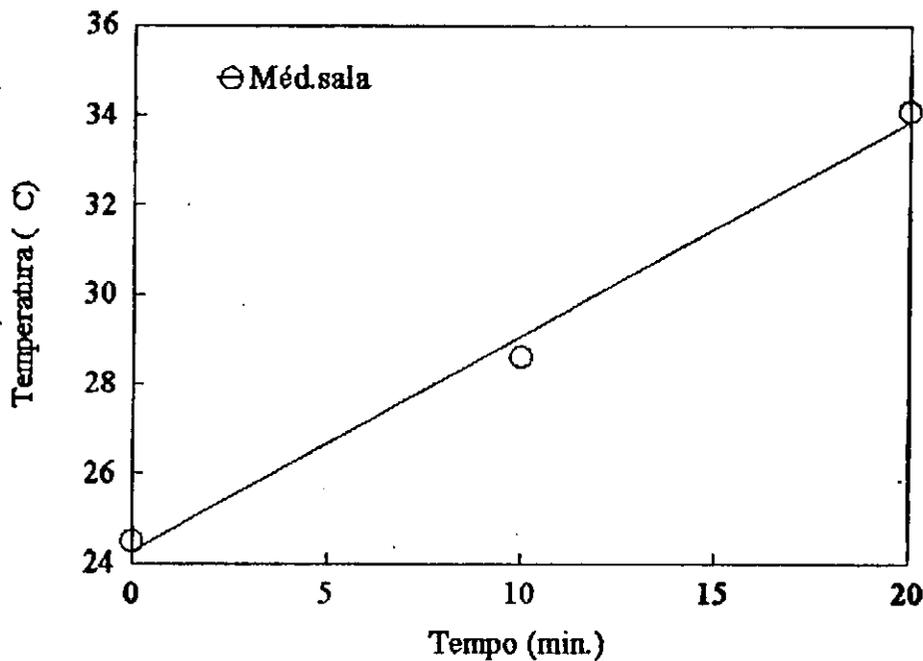


Figura 4.6- Linearização para os primeiros 20 minutos, dados obtidos a partir da Figura 4.5.

As Figuras 4.7 a 4.10 referentes as Tabelas D.7 a D.10, foram as bateladas realizadas durante o período noturno. Esse período apresentou para a temperatura inicial da sala valores superiores as temperaturas iniciais das diurnas. Este fato se deve as condições físicas expostas pela sala por apresentar um sistema de revestimento acumulando energia durante o dia. Apesar desta diferença observa-se através da Figura 4.11 que o comportamento das curvas foram semelhantes as bateladas diurnas. A Figura 4.12 apresenta os valores médios obtidos, quando a temperatura ascendia linearmente durante os primeiros 20 minutos. A equação que representa este segmento de reta é a seguinte:

$$T = 29,55 + 0,615t \quad (4.2)$$

Onde: T- temperatura da sala (°C)

t- tempo (min).

Observou-se que a taxa de elevação de temperatura foi 0,615 °C/min., que elevou um acréscimo de 41,6%, apresentando uma pequena diferença de 2,05% em relação ao período diurno. Ao atingir os 180 minutos a temperatura da sala se encontrava a 39,9°C, que corresponde a um percentual de 35,25% com respeito a temperatura inicial, mostrando uma diferença de temperatura em relação as bateladas diurnas de 3,1°C. Apesar da taxa de elevação de temperatura ser superior a das bateladas diurnas, a temperatura da sala decresceu lentamente a partir dos 40 minutos, isso foi devido a temperatura do exterior apresentar uma taxa de decréscimo de temperatura da ordem de  $7,78 \times 10^{-3}$  °C/min., a qual foi significativa durante

os 180 minutos, conforme pode-se observar na Figura 4.11. A equação que representa a curva da temperatura externa é a seguinte:

$$T = 28,570 - 7,780 \times 10^{-3}t \quad (4.3)$$

Onde: T- temperatura da sala (°C)

t- tempo (min)

A diferença de temperatura da sala a partir do instante inicial até os 180 minutos foi de 10,4°C. Observou-se que o consumo médio de energia para os dois períodos foi o mesmo, conforme mostram as Tabelas D.5 e D.11.

A Figura 4.13 e Tabela D.13 apresentam a diferença entre a temperatura média da sala e a temperatura média do meio externo para os dois períodos. O perfil de temperatura para ambas as curvas é semelhante ao perfil de elevação de temperatura da sala. O resultado desta diferença apresenta o efeito da temperatura externa sobre a temperatura interna da sala, ou seja como a temperatura externa pode contribuir na elevação e/ou decréscimo da temperatura da sala. Observa-se que a elevação de temperatura para o período noturno foi superior ao diurno. O gradiente de temperatura para o final dos 180 minutos foi de 9,3°C para o período diurno e 12,6°C para o período noturno. Isso significa que a temperatura da sala ao iniciar a batelada durante o período noturno se encontrava mais elevada do que a do período diurno, devido o acúmulo de calor no interior da sala.

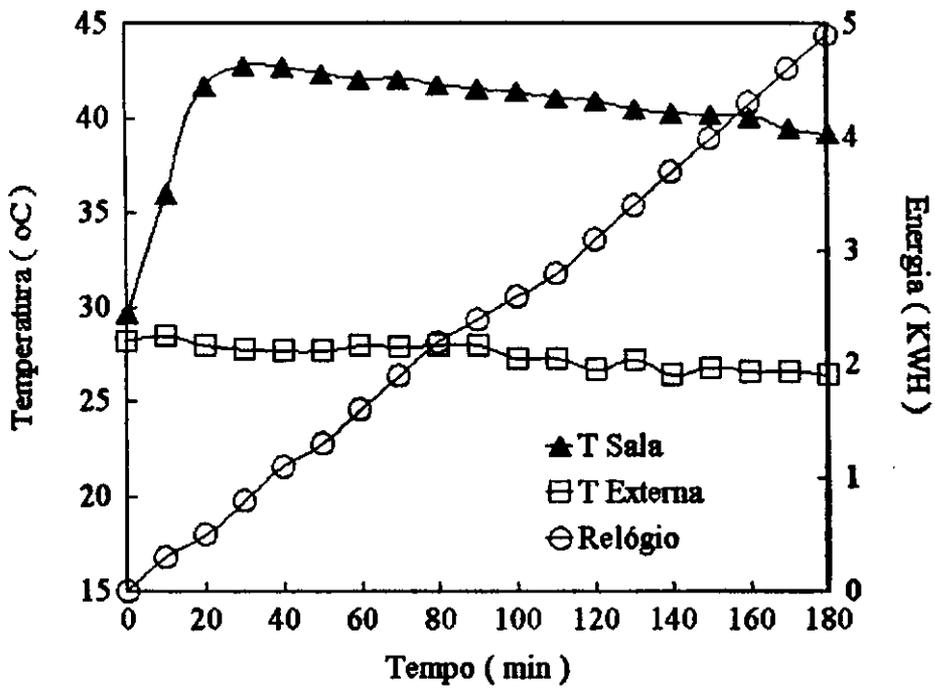


Figura 4.7- Temperatura no interior da sala (T.sala), do exterior (T.ext.) e energia consumida (relógio) em função do tempo, para o trocador de calor sem a chaminé, durante o período noturno. (17/02/96)

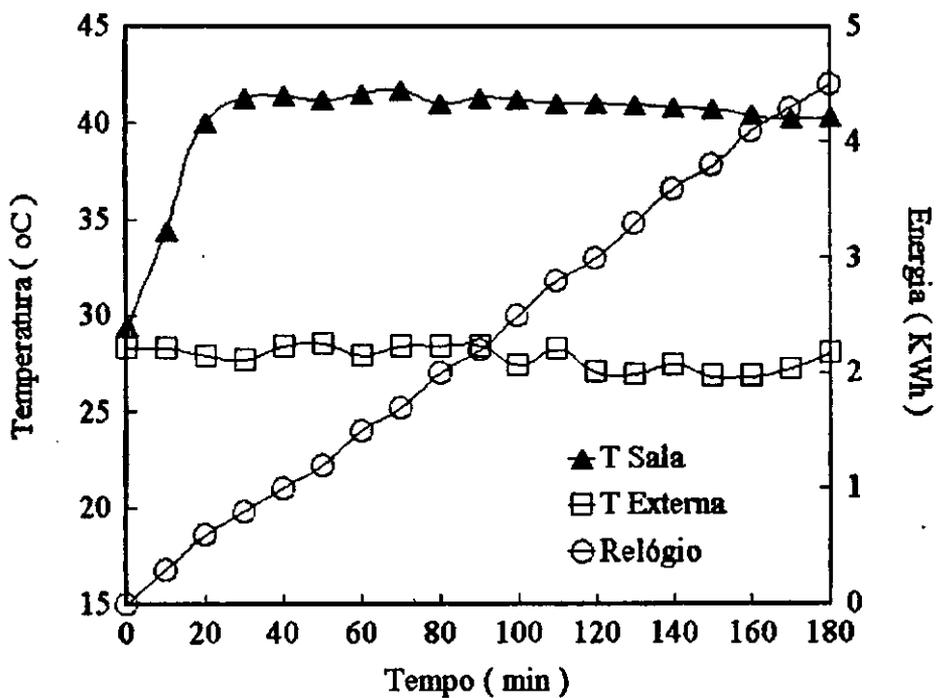


Figura 4.8 - Temperatura no interior da sala (T.sala), do exterior (T.ext.) e energia consumida (relógio) em função do tempo, para o trocador de calor sem a chaminé, durante o período noturno. (18/02/96)

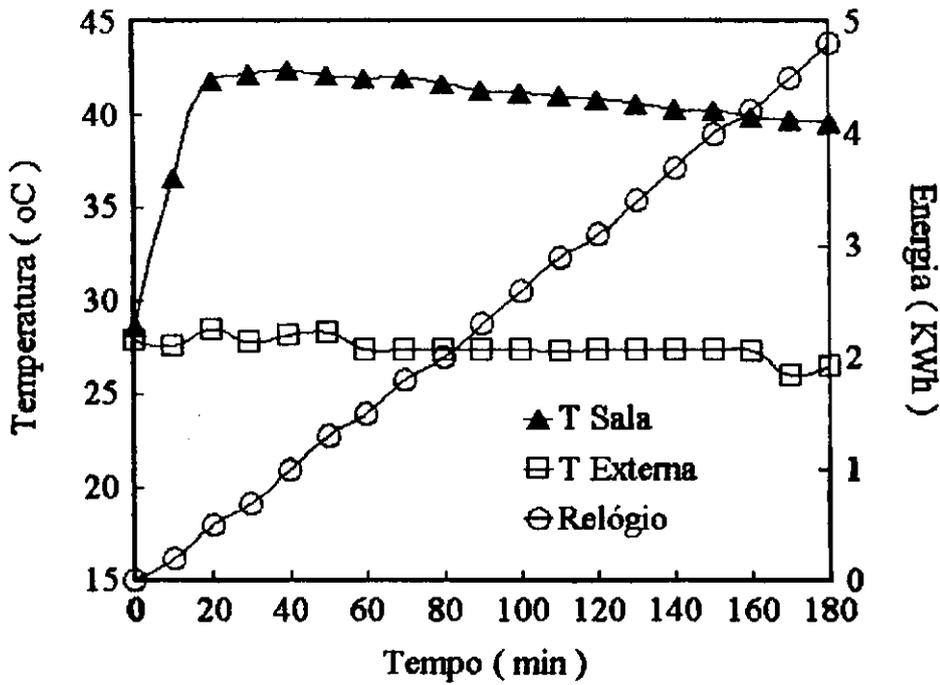


Figura 4.9 - Temperatura no interior da sala (T.sala), do exterior (T.ext.) e energia consumida (relógio) em função do tempo, para o trocador de calor sem a chaminé, durante o período noturno. (19/02/96)

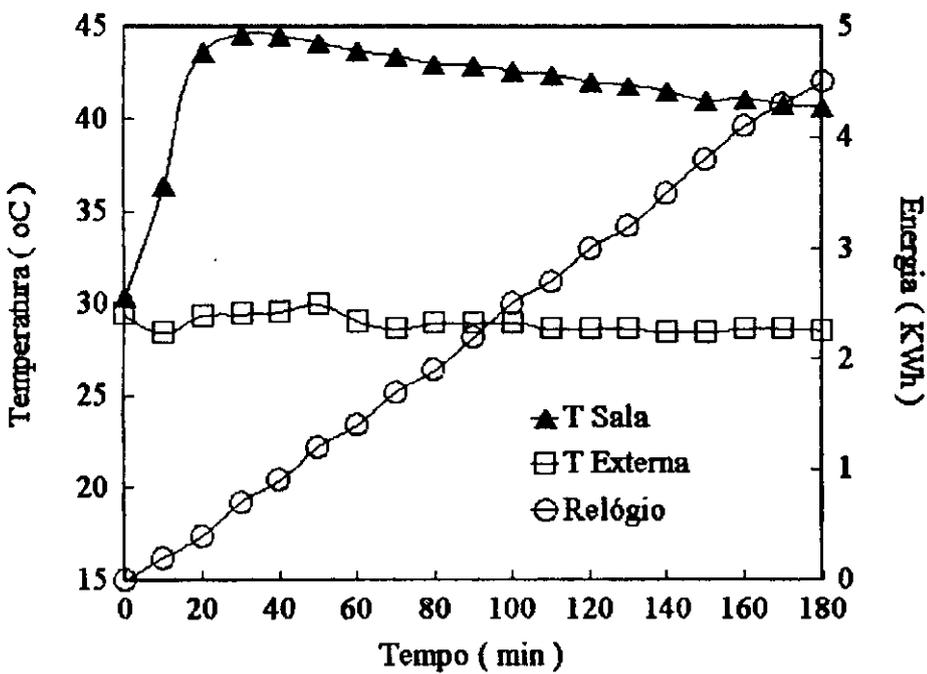


Figura 4.10 - Temperatura no interior da sala (T.sala), do exterior (T.ext.) e energia consumida (relógio) em função do tempo, para o trocador de calor sem a chaminé, durante o período noturno. (20/02/96)

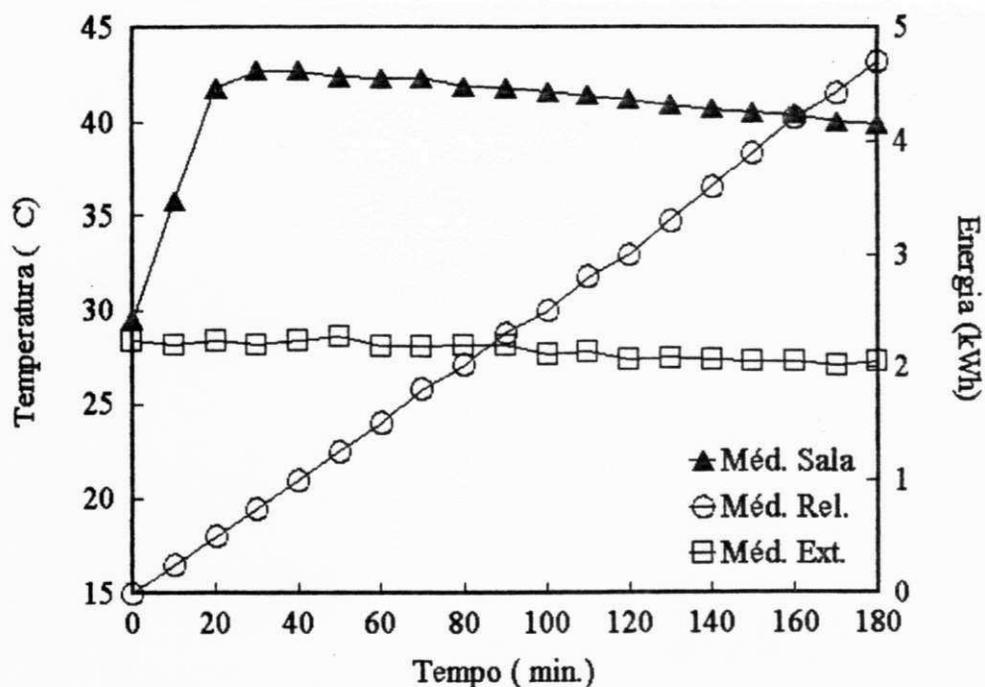


Figura 4.11- Apresentação do perfil de temperatura média da sala, exterior e consumo de energia, em função do tempo (noturno).

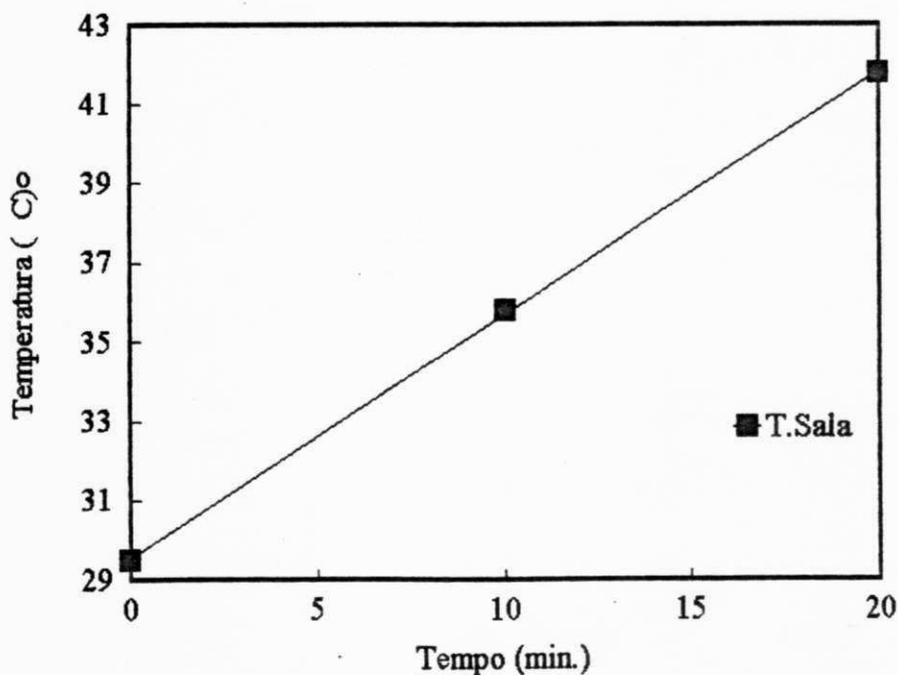


Figura 4.12- Linearização para os primeiros 20 minutos, dados obtidos a partir da Figura 4.11.

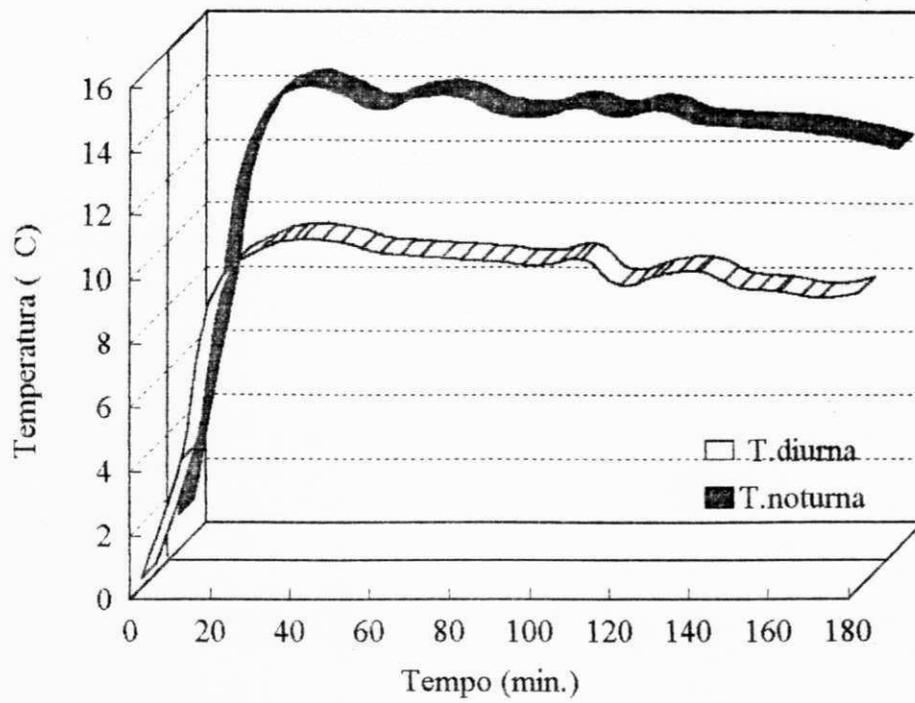


Figura 4.13- Diferença entre temperatura média da sala (Méd.sala) e a temperatura média externa (Méd.ext.) em função do tempo para os dois períodos.

## 4.2 - Avaliação do trocador de calor convectivo com a chaminé

A partir deste ponto o trocador de calor convectivo sofreu uma modificação conforme mencionado no Capítulo 3, passando a possuir uma chaminé com o propósito de melhorar o rendimento térmico do mesmo.

As Figuras 4.14 a 4.17 mostram a variação da temperatura no interior da sala (T Sala), do exterior (T externa) e o consumo de energia elétrica (Relógio) em função do tempo, para o período diurno. Os dados destas bateladas se encontram nas Tabelas D.14 a D.17.

A Figura 4.18 apresenta os valores médios da temperatura da sala, temperatura externa e o consumo de energia, os quais foram obtidos a partir das Tabelas D.14 a D.17. Observa-se que a curva da temperatura média do exterior apresentou uma elevação de temperatura e a curva da temperatura média da sala apresentou um perfil já conhecido. A Figura 4.19 mostra o comportamento da variação no interior da sala. Fazendo o mesmo raciocínio aplicado para os casos anteriores foi determinado que para os primeiros 20 minutos a taxa de elevação de temperatura foi de  $0,545^{\circ}\text{C}/\text{min.}$ , que corresponde a um acréscimo de 43,63% em relação a temperatura inicial, conforme mostra a Equação 4.4.

$$T = 24,983 + 0,545 t \quad (4.4)$$

Onde: T- temperatura média da sala ( $^{\circ}\text{C}$ )

t- tempo (min.)

A temperatura da sala no final da batelada foi de 37,9 °C que corresponde a um percentual de 52,82% com respeito a temperatura inicial. Enquanto que a temperatura externa sofreu um acréscimo de 3,6 °C em média. O consumo de energia para formar esse gradiente de temperatura no interior da sala foi o mesmo obtido para o sistema sem a chaminé durante o período diurno, conforme mostram as Tabelas D.5 e D.18.

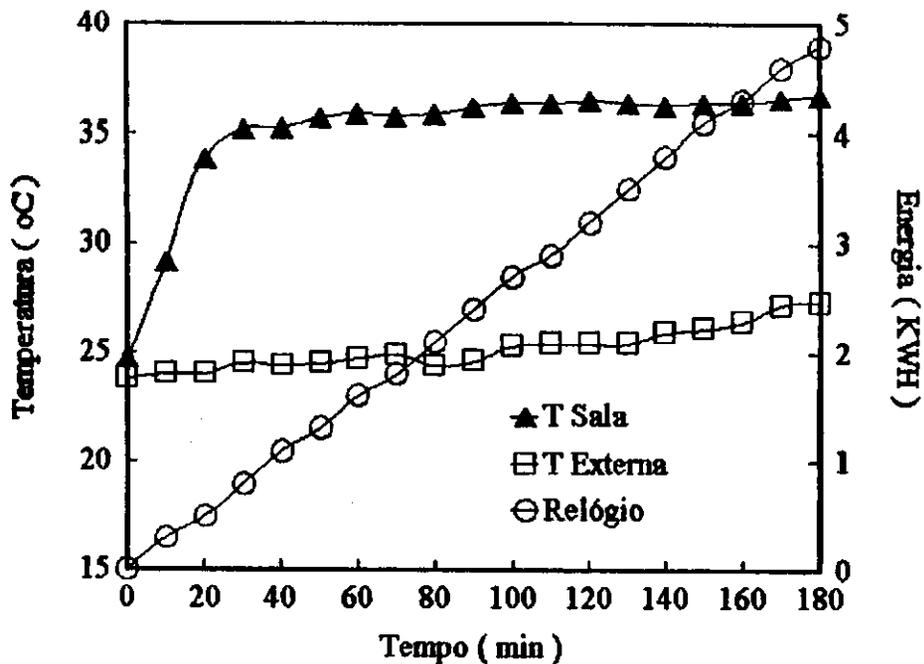


Figura 4.14- Temperatura no interior da sala (T.sala), do exterior (T.ext.) e energia consumida (relógio) em função do tempo, para o trocador de calor com a chaminé, durante o período diurno. ( 03/03/96 )

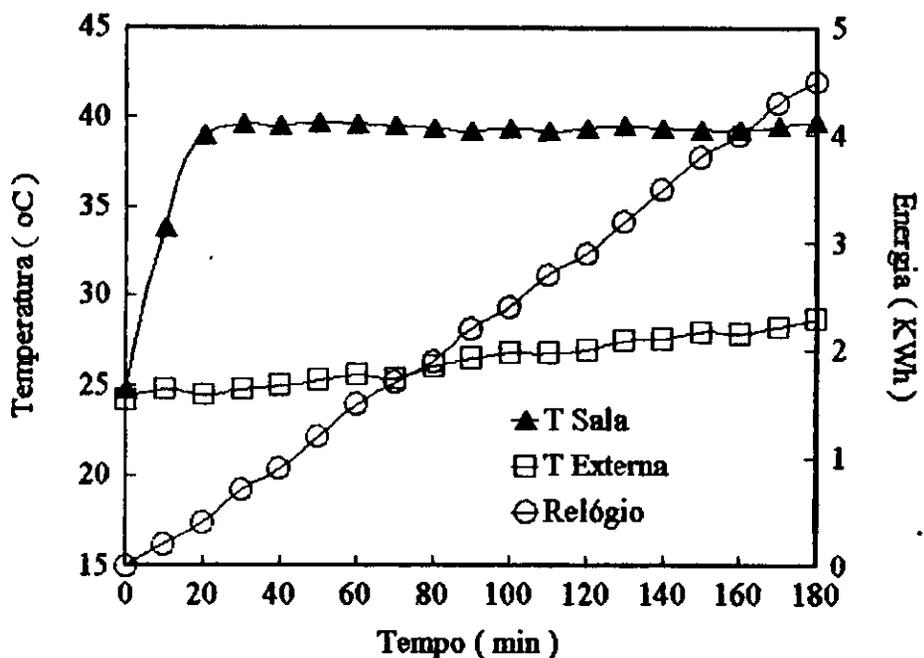


Figura 4.15- Temperatura no interior da sala (T.sala), do exterior (T.ext.) e energia consumida (relógio) em função do tempo, para o trocador de calor com a chaminé, durante o período diurno. ( 04/03/96 )

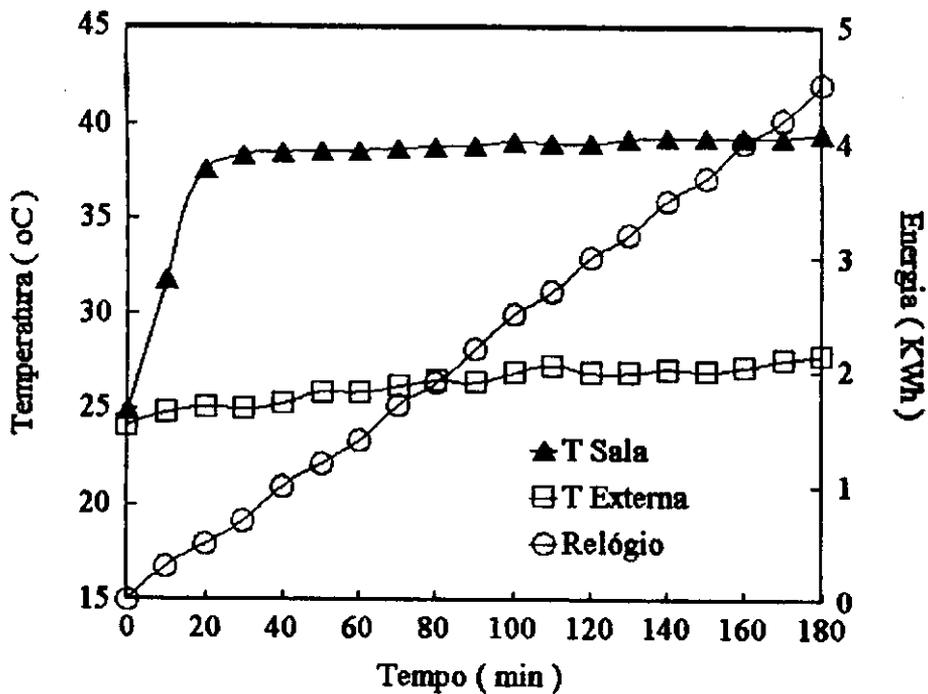


Figura 4.16 - Temperatura no interior da sala (T.sala), do exterior (T.ext.) e energia consumida (relógio) em função do tempo, para o trocador de calor com a chaminé, durante o período diurno. (05/03/96)

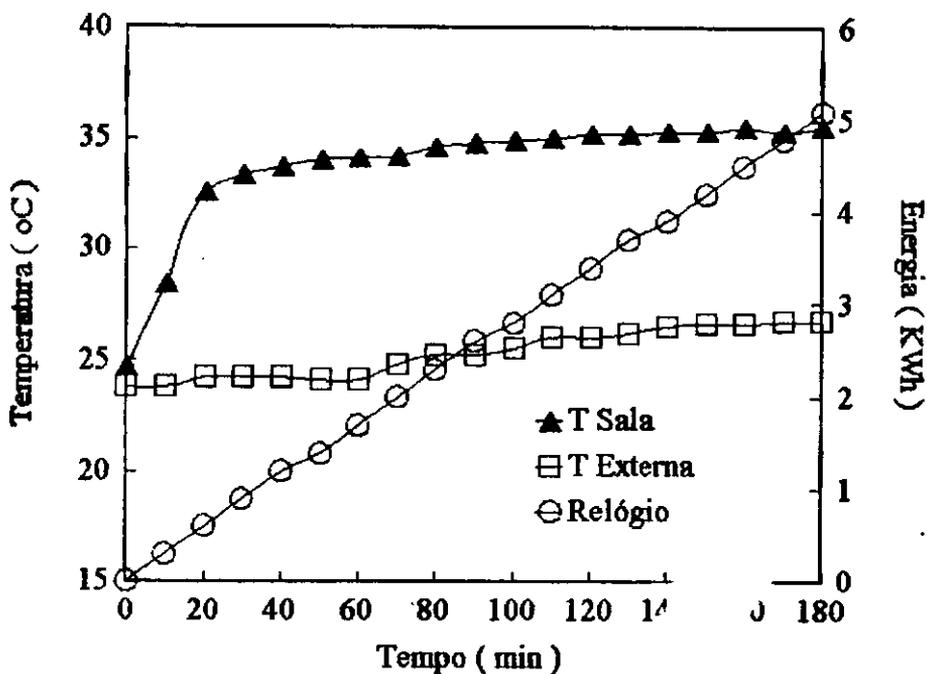


Figura 4.17- Temperatura no interior da sala (T.sala), do exterior (T.ext.) e energia consumida (relógio) em função do tempo, para o trocador de calor com a chaminé, durante o período diurno. (06/03/96)

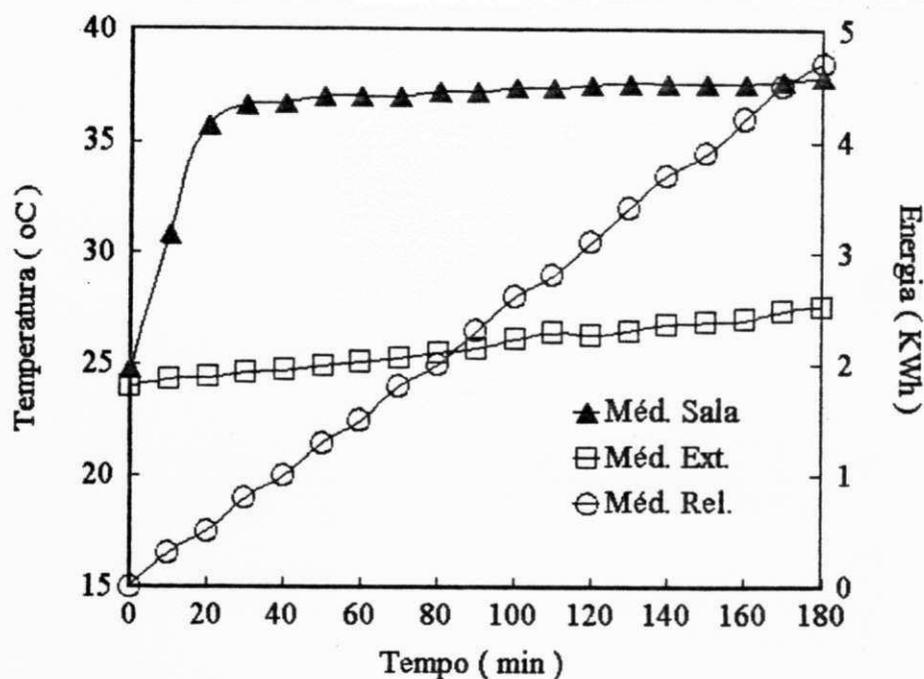


Figura 4.18- Temperatura média no interior da sala (Méd.sala), do exterior (Méd.ext) e consumo médio de energia(Méd.rel.) em função do tempo.(Estes dados são referentes as bateladas 4.14 a 4.17)

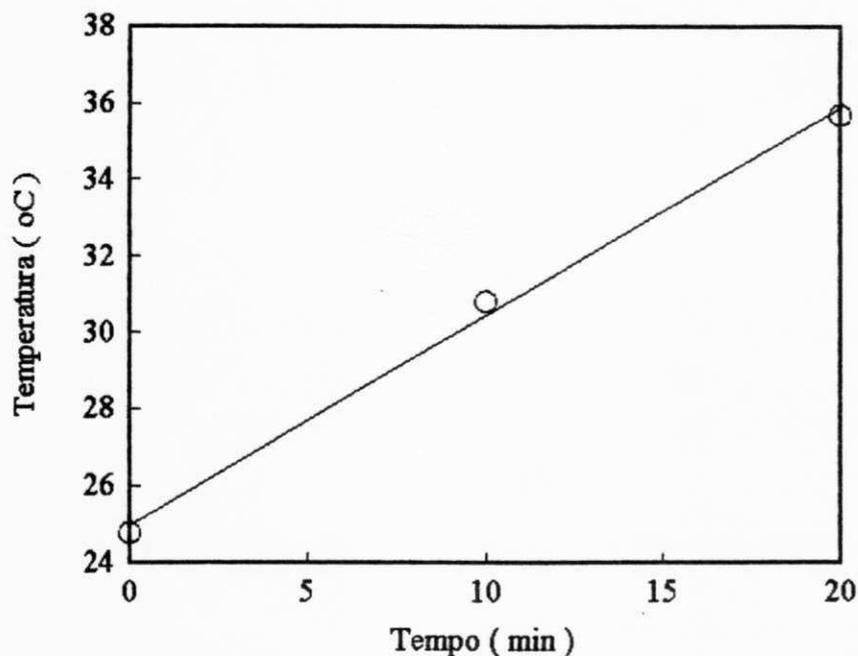


Figura 4.19- Linearização para os dados dos primeiros 20 minutos, obtidos a partir da Figura 4.18.

As Figuras 4.20 a 4.23 e as Tabelas D.20 a D.23, mostram a variação da temperatura no interior da sala (T Sala), do exterior (T Externa) e o consumo de energia elétrica (Relógio) em função do tempo, durante o período noturno. A Figura 4.24 e a Tabela D.24 apresentam os valores médios das bateladas referentes as figuras mencionadas acima. Considerando o mesmo raciocínio dado para os casos anteriores, a Figura 4.25 apresenta o comportamento da variação da temperatura no interior da sala para os 20 minutos iniciais. A taxa de elevação da temperatura da sala foi de 0,650°C/min., conforme mostra a Equação abaixo:

$$T = 27,567 + 0,650 t \quad (4.5)$$

Onde: T - temperatura da sala (°C)

t - tempo (min.)

A taxa de elevação de temperatura para esse caso foi superior as demais. A partir dos 40 minutos a temperatura da sala decresceu lentamente, isso significa que ocorreu um decréscimo de temperatura externa durante este período, esse fato pode ser observado através dos dados na Tabela D.24. Para esse intervalo de tempo foi consumido 0,9 kWh e para os 180 minutos foi de 4,5 kWh, isso pode ser observado através da curva que representa o consumo médio de energia em função do tempo, conforme mostra a Figura 4.24.

A Figura 4.26 representa a diferença de temperatura média entre a sala e o meio externo para os dois turnos, fazendo o uso do trocador de calor convectivo com a chaminé. Observa-se que o sistema durante o

período noturno apresentou melhor performance, chegando a apresentar um gradiente final de temperatura de  $14,5^{\circ}\text{C}$ , enquanto que  $10,3^{\circ}\text{C}$  para o período diurno. Além da temperatura durante o período diurno se mostrar inferior a noturna apresentou uma taxa decrescente, esse fato se deve a temperatura externa se encontrar aumentando gradativamente.

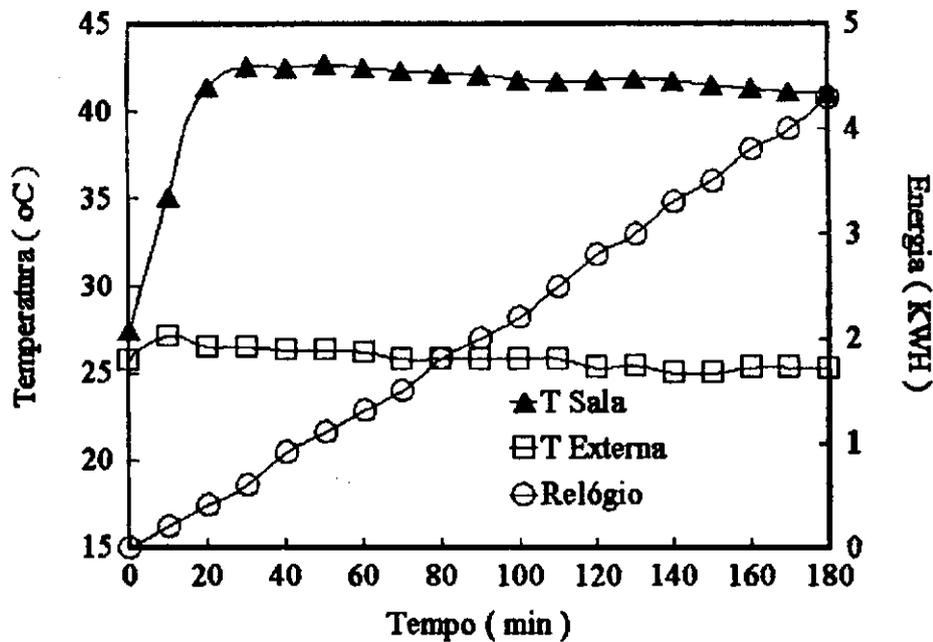


Figura 4.20- Temperatura no interior da sala (T.sala), do exterior (T.ext.) e energia consumida (relógio) em função do tempo, para o trocador de calor com a chaminé, durante o período noturno. (02/03/96)

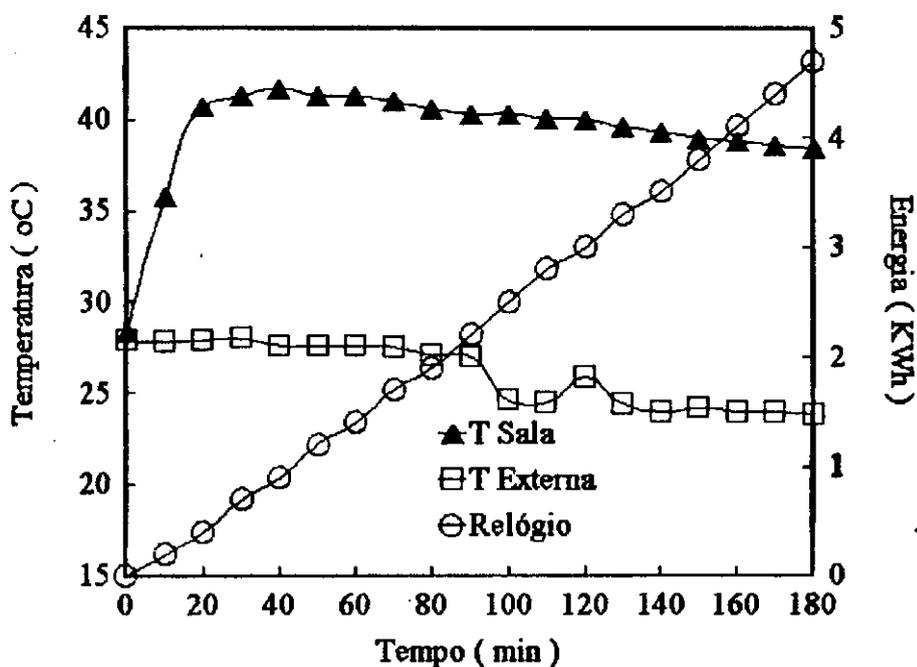


Figura 4.21- Temperatura no interior da sala (T.sala), do exterior (T.ext.) e energia consumida (relógio) em função do tempo, para o trocador de calor com a chaminé, durante o período noturno. (03/03/96)

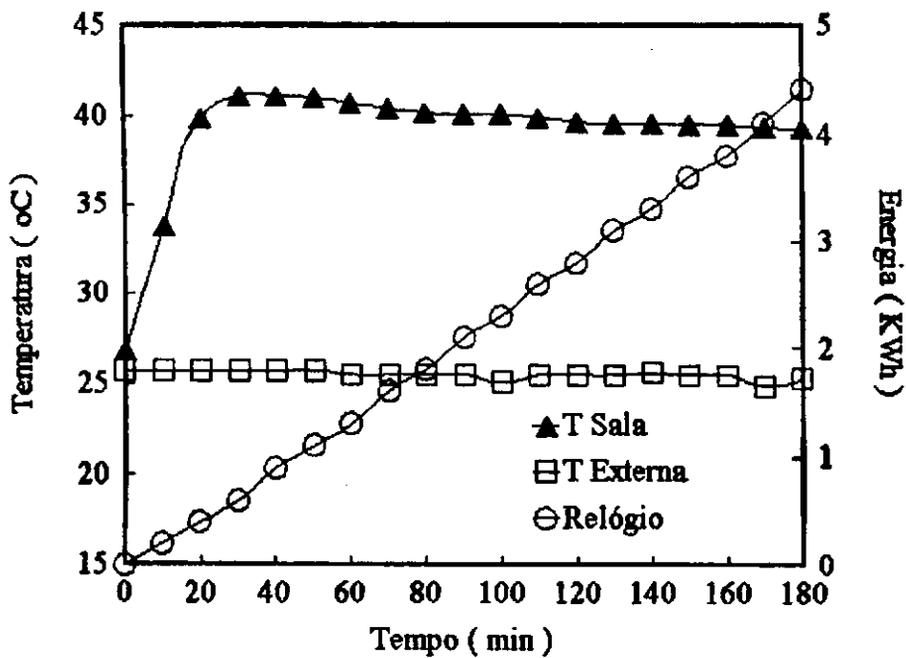


Figura 4.22- Temperatura no interior da sala (T.sala), do exterior (T.ext.) e energia consumida (relógio) em função do tempo, para o trocador de calor com a chaminé, durante o período noturno. (04/03/96)

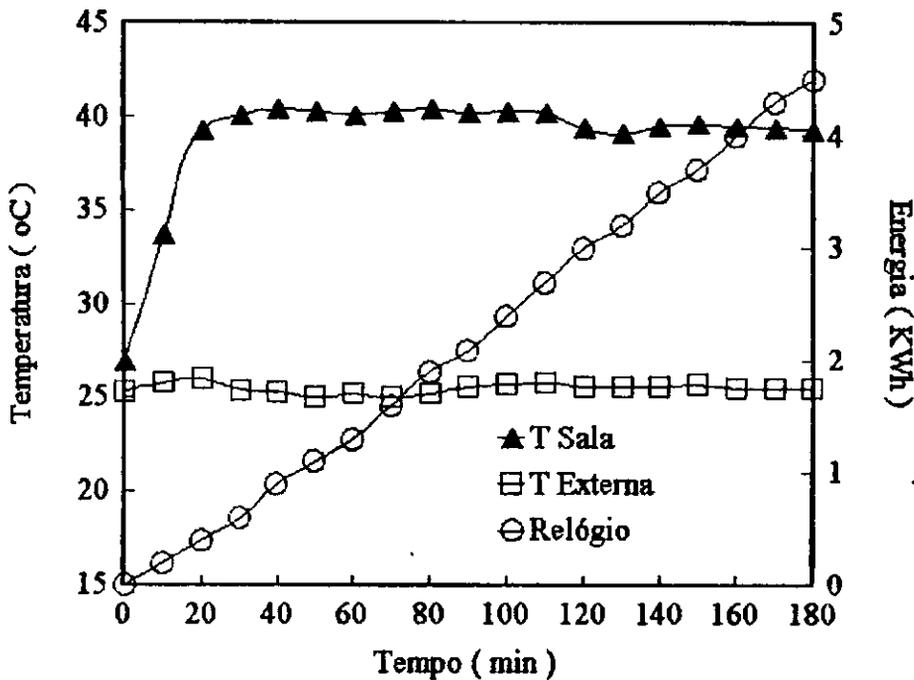


Figura 4.23- Temperatura no interior da sala (T.sala), do exterior (T.ext.) e energia consumida (relógio) em função do tempo, para o trocador de calor com a chaminé, durante o período noturno. (05/03/96)

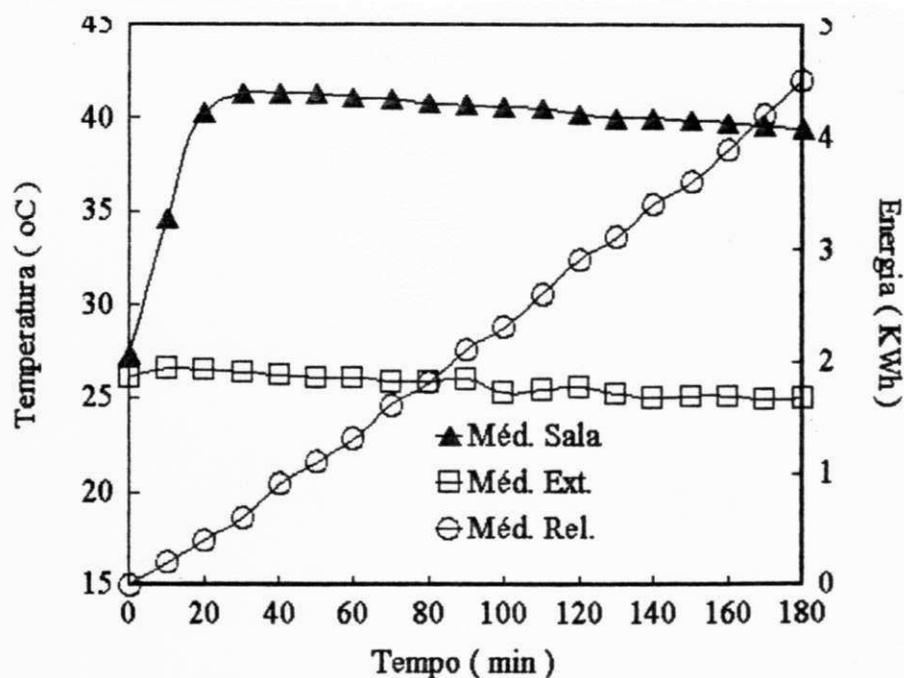


Figura 4.24- Temperatura média no interior da sala (Méd.sala), do exterior (Méd.ext.) e consumo médio de energia(Méd.rel.) em função do tempo.(Estes dados são referentes as bateladas 4.20 a 4.23)

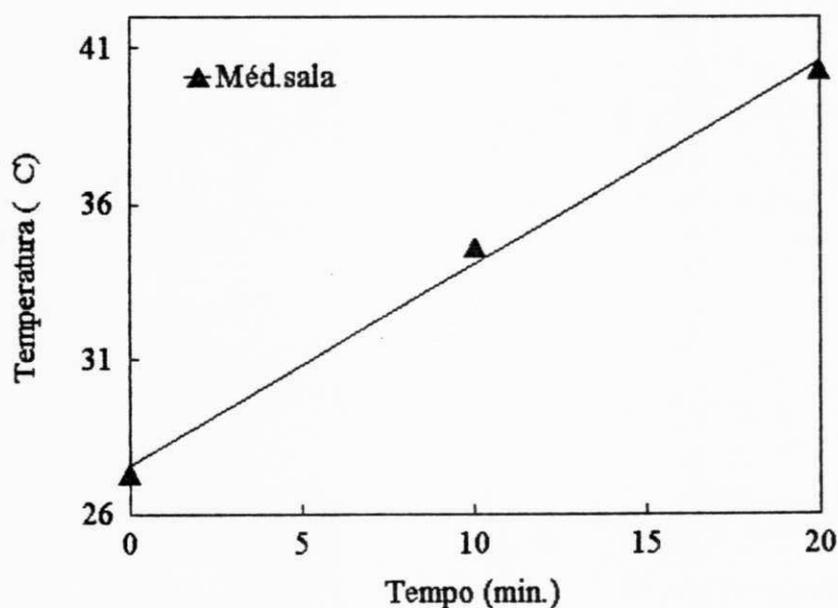


Figura 4.25- Linearização para os primeiros 20 minutos, dados obtidos a partir da Figura 4.24.

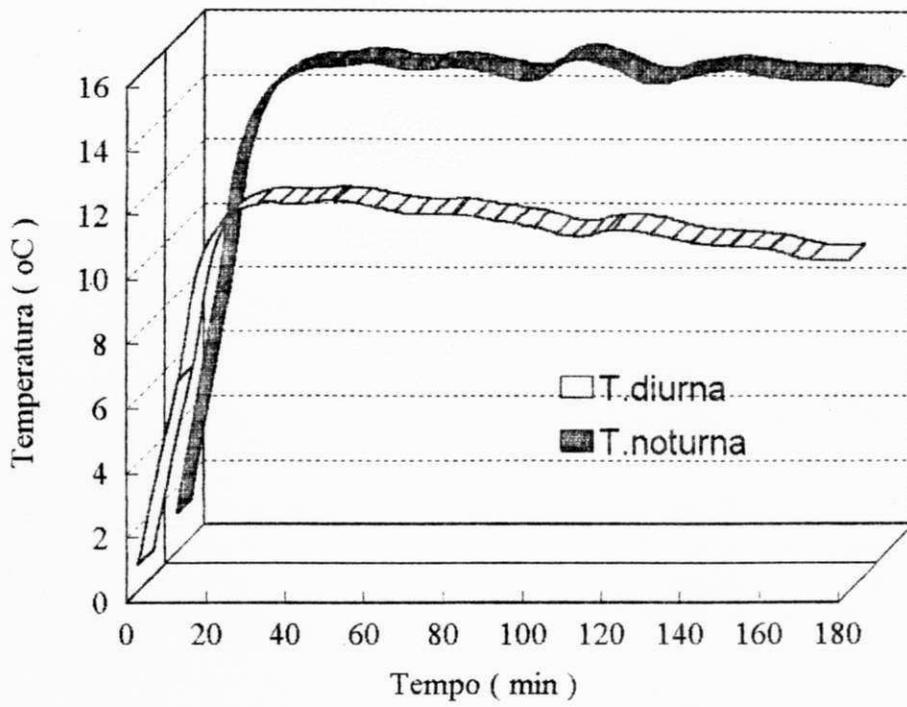


Figura 4.26- Diferença entre temperatura média da sala (M.sala) e a temperatura média externa (Méd.ext.) em função do tempo para os dois períodos.

#### 4.3 - Comparação entre os dois sistemas: sem e com chaminé

As Tabelas A e B apresentam um resumo dos dados pertinentes ao trocador de calor sem e com a chaminé respectivamente. Observando na Tabela A a maior elevação de temperatura ocorreu para o turno diurno, apesar da taxa de elevação para os primeiros 20 minutos ter sido superior para o turno noturno. O fato da temperatura do turno noturno diminuir foi devido a temperatura do meio exterior diminuir e conseqüentemente retirar calor da sala. Este fato também foi observado para o turno noturno com trocador de calor com a chaminé, conforme mostra a Tabela B.

Tabela A - Resumo da Avaliação do Trocador de Calor Sem Chaminé.

Período	Elevação de Temperatura da Sala (°C) (entre 0 a 180 minutos)	Diferença de Temperatura (Int. - Ext.) (°C)	Taxa de Elevação nos 20 min. Iniciais (°C / min)	Energia Consumida (kWh) (entre 0 a 180 minutos)	Calor Acumulado (kCal)	E % $E_{AC}/E_C$
<b>Diurno</b>	12,4	9,3	0,485	4,7	15,74	0,39
<b>Noturno</b>	10,4	12,6	0,615	4,7	13,39	0,33

Tabela B - Resumo da Avaliação do Trocador de Calor Com a Chaminé.

Período	Elevação de Temperatura da Sala (°C) (entre 0 a 180 minutos)	Diferença de Temperatura (Int. - Ext.) (°C)	Taxa de Elevação nos 20 min. Iniciais (°C / min)	Energia Consumida (kWh) (entre 0 a 180 minutos)	Calor Acumulado (kCal)	E % $E_{AC}/E_C$
<b>Diurno</b>	13,1	10,3	0,545	4,7	16,68	0,41
<b>Noturno</b>	12,2	14,5	0,65	4,5	15,64	0,40

Quanto ao consumo de energia para ambos os sistemas foi de aproximadamente o mesmo, com exceção para o turno noturno com a chaminé, o consumo de energia caiu de 4.4%. Quanto a energia térmica acumulada na sala; conforme mostra o Apêndice E; observa-se que a energia térmica acumulada para o período diurno foi superior ao noturno para ambos os sistemas. O sistema com a chaminé apresentou um calor acumulado superior ao sistema sem a chaminé. A energia térmica acumulada no interior da sala é um dos parâmetros que pode explicar porque a elevação de temperatura da sala durante o período diurno foi superior. Obviamente durante esse período existe duas fontes de calor que vem contribuir para o aquecimento da sala; a temperatura externa e a temperatura proveniente do trocador de calor.

O trocador de calor convectivo com a chaminé apresentou em termos de elevação de temperatura 17,5 % a mais que o trocador sem a chaminé para o período noturno, e 5,6 % para o período diurno.

A relação entre a energia térmica acumulada e a energia elétrica é definida como eficiência energética ( $E\%$ ). Ou seja a energia térmica acumulada na sala em kJoule foi convertido em kWh com o objetivo de relacioná-lo com o consumo de energia durante a eletrólise. O consumo de energia elétrica foi registrado através do medidor de energia (relógio), conforme comentado no Capítulo 3. Comparando as eficiências, observa-se que o sistema com a chaminé apresentou melhor rendimento. Obviamente essa eficiência poderia aumentar se a sala fosse melhor revestida termicamente, ou seja a perda de calor fosse reduzida.

Uma outra comparação da evolução de temperatura para os sistemas foi feita a partir dos 40 minutos de experiência, conforme mostra a Figura 4.27 e Tabela D.27. A figura mostra a linearização dos pontos referentes aos

valores médios de temperatura dos turnos diurno e noturno, obtidos da Tabela D.26 e D.13.

A partir destas curvas pode-se mostrar como a taxa de temperatura varia em função do tempo para o trocador de calor com e sem chaminé, esses dados se encontram na Tabela C.

Tabela C - Apresenta as equações das curvas que representam a variação da temperatura para os dois sistemas (com e sem chaminé)

Turno	$T = a - b.t$
diurno-s/c	$T = 11,322 - 0,012 t$
noturno-s/c	$T = 14,679 - 0,010 t$
diurno-c/c	$T = 12,659 - 0,013 t$
noturno-c/c	$T = 15,297 - 0,003 t$

Os valores das taxas de temperatura revelam como a temperatura da sala variou durante os experimentos. Comparando o sistema sem chaminé versus com chaminé para o turno diurno, nota-se que o sistema sem chaminé a perda de calor foi mais lenta, mas essa diferença não foi significativa. Deve-se considerar que o sistema com chaminé para o turno diurno, aos 40 minutos, a temperatura se encontrava com uma diferença superior a um grau Celcius em relação a temperatura do turno diurno sem chaminé. Para o turno noturno com a chaminé o sistema apresentou melhor resultado, conforme pode-se observar através do valor apresentado pela taxa de temperatura, que foi muito baixa em relação as demais.

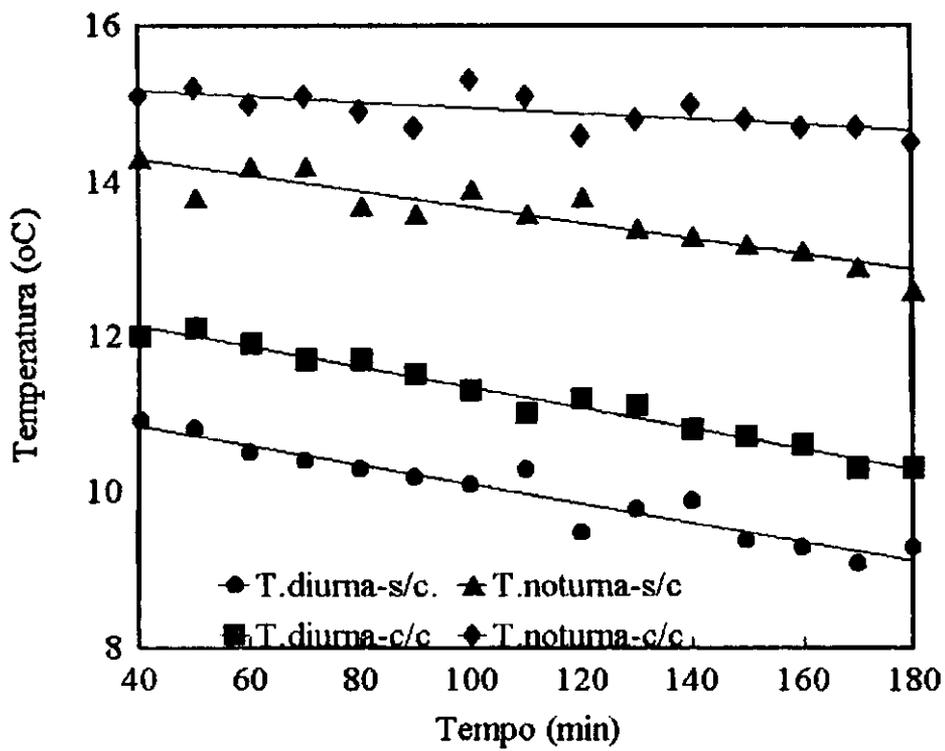


Figura 4.27 - Representação da taxa média de temperatura a partir da diferença de temperatura da sala e o meio externo. (s/c, sem chaminé; c/c, com chaminé).

## CAPÍTULO 5

### Conclusão

A partir da avaliação experimental dos sistemas de aquecimento estudados, conclui-se que:

1 - O trocador de calor convectivo sem a chaminé para o turno noturno apresentou uma diferença de temperatura em relação ao turno diurno de  $3,40^{\circ}\text{C}$  que corresponde um percentual de 31,70%, aos 40 minutos de bateladas, tomando como referência as equações mostradas na Tabela C.

2 - O trocador de calor convectivo com a chaminé para o turno noturno, para o mesmo tempo atribuído para o item 1, apresentou uma diferença de temperatura em relação ao turno diurno de  $3,04^{\circ}\text{C}$  que corresponde um percentual de 25%, tomando como referência as equações mostradas na Tabela C.

3 - Comparando os resultados dos sistemas com e sem a chaminé para os dois turnos conclui-se que o durante o turno noturno o sistema com chaminé apresentou melhor desempenho, conforme mostra a Figura 4.27, as taxas a partir dos 40 minutos se apresentam mais elevadas. Este fato se deve a contribuição da troca térmica entre o duto de tiragem (ou chaminé) e a sala.

4 - Os resultados comprovam que a variação de temperatura externa influenciam na variação da temperatura da sala independentemente do sistema com ou sem chaminé.

5 - A Figura 4.24 demonstra que a taxa da temperatura externa foi de 0,0094 °C/min. e taxa de temperatura da sala entre 40 e 180 minutos foi de 0,0135°C/min.. Os dados apresentados demonstram que existe uma relação intrínseca entre a variação da temperatura externa em relação a da sala. Esta informação está relacionada com as perdas de calor durante o processo de aquecimento da sala.

6 - O consumo médio de energia para produzir 0,559 m<sup>3</sup>/h da mistura de hidrogênio e oxigênio foi de 4,7 kWh. Com exceção para o trocador de calor com chaminé durante o turno noturno, que somente foi consumindo 4,5 kWh de energia para produzir 0,53m<sup>3</sup>/h da mistura de hidrogênio e oxigênio. Este fato está relacionado com a contribuição de calor oferecida pela diferença de temperatura entre o turno diurno e noturno.

## CAPÍTULO 6

### Sugestões

1. - Tomar amostra de temperatura em diversos pontos das sala com o objetivo de obter maior homogeneidade de informação possível em termos de dissipação de calor.
2. - Estudar através de um balanço térmico o fluxo de calor dissipado pelo sistema e suas perdas.
3. - Implantar um sistema de automação para controlar a temperatura da sala.
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 associados a baterias que liberariam a energia para o eletrolisador.
5. - Simular à partir dos resultados obtidos associados à dados climatológicos, uma situação onde a temperatura externa é inferior a  $0^{\circ}\text{C}$ , já que os estudos realizados foram orientados para a climatização da estação Comandante Ferraz situada no polo - sul.

## Referências bibliográficas

- AGUIRRE ODE, F., Termodinâmica del Equilíbrio, Interamericana, Cidade do México, México, 1977.
- ALVES, J. J. N. , Avaliação de Parâmetros de Combustão  $H_2/O_2$  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.
- AMORIM, M. C. C. , Avaliação de um Sistema de Aquecimento fazendo uso de Hidrogênio Eletrolítico como fonte de energia (tese de mestrado) DEQ/UFPB/Campina Grande - PB, 1995.
- BOCKRIS, J. O'M. , Energy the Solar - Hydrogen Alternative. The Architectural Press Ltda, London, 1976.
- BENNET, C. O. & MYERS, J.E. , Fenômenos de Transporte, Editora McGraw Hill do Brasil, São Paulo, SP, 1978.
- CAMPOS, R. F., Tecnologia Brasileira na Produção de Hidrogênio. Equipamentos Villares, 1985.
- CASPER, M. S., Hydrogen Manufacture by Eletrolisis, Thermal Decomposition and Unusual Techniques, Noyes Data Corporation, Park Ridge, New jersey, U.S.A. , 1978.
- CHEN, D. Z., WENG., WENG, Z. M. & LI, X. H., Theoretical Performace Evaluation of Hydrogen Flames. International Journal of Hydrogen Energy, vol. 13, N° 11, 1988.

- COELHO, J.A., Utilização de Hidrogênio Eletrolítico como combustível, vol. VI, 1994.
- FAIRES, V.M., Termodinâmica, 4ª Edição, Ao Livro Técnico S.A., Rio de Janeiro, RJ, 1966.
- HACOHEN, J., PINHASI, G., PUTERMAN, Y., SHER, E., Driving eye simulation of a vehicle motored by a SI engine fueled with H<sub>2</sub>-enriched gasoline, International Journal of Hydrogen Energy, V. 16, Nº 10, p 675-702, 1991.
- HOLMAN, J.R., Transferência de Calor, Editora MacGraw Hill do Brasil Ltda, São Paulo, SP, 1983.
- KREITH, F., Princípios da Transmissão de Calor. Editora Edgard Blucher Ltda., São Paulo, SP, 1973.
- KERN, D.Q., Processos de Transmissão de Calor, Editora Guanabara, Rio de Janeiro, RJ, 1987.
- 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.
- OZISIK, M.N., Transferência de Calor, Editora Guanabara, Rio de Janeiro, 1980.
- PERRIER, J.L., Energia Solar e Hidrogênio. Editorial Presença, Lisboa, Portugal, 1980.
- SILVA, E.P., Automobile Industry in Expanding Countries. In: Proceedings of the Society of Automotive Engineers, SAE, Warrendale, PA, EUA, 1991b. p 73-81.

- 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.
- SMITH, J.M. & VAN NESS, H.C., Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química, Editora Guanabara Dois, Rio de Janeiro, RJ, 1980.
- SOBRINHO, M.A.N., Estudo de Sistemas de Aquecimento de Ambiente utilizando Hidrogênio Eletrolítico como Combustível (tese de mestrado) DEQ/UFPB/Campina Grande, PB, 1995.
- 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.
- WILLIAMSON, J.R., Engineering Heat Transfer, Ed. John Wiley & Sons, New York, 1978.
- YOUNG, K.S., Advanced Composites Storage Containment for Hydrogen, International Journal of Hydrogen Energy, V. 17, Nº 07, jul, p 505-507, 1992.

## APÊNDICE A

### 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 760mmHg (0 °C)	-252,78
Calor Específico (C <sub>p</sub> ) cal/molK	
C <sub>p</sub> = a + b (T) + c (T <sup>2</sup> )	a = 6,24 b = 0,1039 x 10 <sup>-2</sup> c = -0,0078 x 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 o Oxigênio	450 °C
Temperatura de Ignição com o ar	510 °C
Umidade do gás Saturado a 760mHg	
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> + 1/2 O <sub>2</sub> → H <sub>2</sub> O <sub>(g)</sub>	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
$C_p / C_v$ 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

## APÊNDICE B

### 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 do carvão	Uso Industrial
Termoquímica	Água	Calor gerado por usinas nucleares	Em desenvolvimento
Quebra de Água a alta temperaturas		Calor gerado por usinas nucleares	Em desenvolvimento
Eletrólise Fotovoltaica	Água	Radiação Solar	Em desenvolvimento

SILVA, 1991

## APÊNDICE C

### Produção de Hidrogênio e Vazão da Mistura H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>.

A tensão prática aplicado à célula é de aproximadamente 1,75 volts e a energia dispendida no processo eletrolítico para manter uma produção de 1 Nm<sup>3</sup>/h de hidrogênio é:

$$E_n = 2,393 \times V \left( \frac{\text{kWh}}{\text{Nm}^3 \text{H}_2} \right) \quad (2.18)$$

$$E_n = 4,18 \text{ kWh} / \text{Nm}^3 \text{H}_2$$

De acordo com os dados experimentais do consumo de energia, em 3 horas de produção do gás são consumidos 4,7 kWh, então:

$$4,18 \text{ kWh} \rightarrow 1 \text{ m}^3 \text{H}_2$$

$$4,7 \text{ kWh} \rightarrow X (\text{m}^3 \text{H}_2)$$

$$X = 1,12 \text{ m}^3 \text{H}_2 \text{ em } 180 \text{ minutos}$$

Então: 1,12 m<sup>3</sup> H<sub>2</sub> é o total de hidrogênio utilizado durante 180 min. ou 3 hs. ou 0,373 m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>/h.

Temos: 2 partes H<sub>2</sub> para 1 parte O<sub>2</sub>

$$0,373 \text{ m}^3 \text{H}_2/\text{h}$$

$$0,186 \text{ m}^3 \text{O}_2/\text{h}$$

O que significa uma vazão de gás de :

$$Q = 0,559 \text{ m}^3 \text{H}_2/\text{O}_2/\text{h}$$

Para o consumo médio de energia de 4,5 kWh, durante os 180 minutos, os cálculos seguem a mesma ordem.

## APÊNDICE D

Tabela D.1 - Dados relativos a Figura 4.1 .

Tempo	T Sala	T Externa	Relógio
0	23,9	23,6	0
10	27,3	23,6	0,2
20	31,9	23,6	0,5
30	33,1	23,9	0,7
40	33,4	23,8	1
50	33,5	24	1,2
60	33,5	24,7	1,5
70	33,5	24,9	1,7
80	33,6	25,4	2
90	34,5	25,4	2,2
100	34,8	25,5	2,4
110	35,1	25,2	2,7
120	35,2	25,7	3
130	35,4	25,9	3,2
140	35,6	25,9	3,5
150	35,6	26,2	3,7
160	35,8	26,1	4
170	36	26,9	4,3
180	36	26,6	4,5

Tabela D.2 - Dados relativos a Figura 4.2 .

Tempo	T Sala	T Externa	Relógio
0	25,8	26,1	0
10	29,5	26,1	0,2
20	35	26,3	0,5
30	36,6	26,6	0,7
40	37,3	27,1	1
50	37,7	27,5	1,2
60	37,8	28	1,4
70	37,8	27,9	1,7
80	38	27,7	2
90	37,9	28,9	2,2
100	38,2	28,9	2,5
110	38	27,8	2,8
120	38,3	30,2	3
130	38,2	29,2	3,3
140	38,4	29,4	3,6
150	38,1	29,8	3,8
160	38	30,7	4,1
170	37,7	29,6	4,4
180	37,9	29,7	4,7

Tabela D.3 - Dados relativos a Figura 4.3 .

Tempo	T Sala	T Externa	Relógio
0	24,3	23,8	0
10	28,7	24,6	0,2
20	34,3	24,1	0,5
30	35,5	24,3	0,7
40	35,9	24,3	1
50	36	24,4	1,3
60	36	24,6	1,5
70	36	24,5	1,8
80	36	24,8	2,1
90	36,2	24,4	2,4
100	36,3	25	2,7
110	36,3	25,3	2,9
120	36	25,6	3,2
130	36,1	25,8	3,5
140	36	25,7	3,8
150	36	26	4
160	35,9	25,6	4,3
170	36,1	26,1	4,6
180	36,2	26	4,9

Tabela D.4 - Dados relativos a Figura 4.4 .

Tempo	T Sala	T Externa	Relógio
0	24,1	23,4	0
10	29	24	0,2
20	35,2	23,8	0,5
30	36,4	24,3	0,7
40	36,6	24,3	1
50	36,4	24,4	1,2
60	36,4	24,5	1,5
70	36,4	24,8	1,7
80	36,5	25,1	2
90	36,5	25,6	2,3
100	36,3	25,9	2,5
110	36,7	26,7	2,8
120	36,6	26,5	3
130	36,6	26,5	3,3
140	36,9	26,4	3,6
150	37	27,2	3,9
160	37,1	27,3	4,1
170	37	27,9	4,4
180	37,3	27,9	4,7

Tabela D.5 - Dados relativos a Figura 4.5 .

Tempo	Méd. Sala	Méd. Rel.	Méd. Ext.
0	24,5	0	24,2
10	28,6	0,2	24,6
20	34,1	0,5	24,4
30	35,4	0,7	24,8
40	35,8	1	24,9
50	35,9	1,2	25,1
60	35,9	1,45	25,4
70	35,9	1,7	25,5
80	36	2	25,7
90	36,3	2,25	26,1
100	36,4	2,5	26,3
110	36,5	2,8	26,2
120	36,5	3	27
130	36,6	3,3	26,8
140	36,7	3,6	26,8
150	36,7	3,8	27,3
160	36,7	4,1	27,4
170	36,7	4,4	27,6
180	36,8	4,7	27,5

Tabela D.6 - Dados relativos a Figura 4.6 .

Tempo	Reta
0	24,5
10	28,6
20	34,1

Tabela D.7 - Dados relativos a Figura 4.7 .

Tempo	T Sala	T Externa	Relógio
0	29,7	28,2	0
10	36	28,5	0,3
20	41,7	28	0,5
30	42,8	27,8	0,8
40	42,7	27,7	1,1
50	42,4	27,7	1,3
60	42,1	28	1,6
70	42,1	27,9	1,9
80	41,8	28	2,2
90	41,6	28	2,4
100	41,4	27,3	2,6
110	41,1	27,3	2,8
120	40,9	26,7	3,1
130	40,5	27,2	3,4
140	40,3	26,4	3,7
150	40,2	26,8	4
160	40,1	26,6	4,3
170	39,5	26,6	4,6
180	39,2	26,4	4,9

Tabela D.8 - Dados relativos a Figura 4.8 .

Tempo	T Sala	T Externa	Relógio
0	29,4	28,3	0
10	34,4	28,3	0,3
20	40	27,9	0,6
30	41,3	27,7	0,8
40	41,4	28,4	1
50	41,2	28,5	1,2
60	41,5	27,9	1,5
70	41,7	28,4	1,7
80	41	28,4	2
90	41,3	28,4	2,2
100	41,2	27,4	2,5
110	41	28,2	2,8
120	41	27	3
130	40,9	26,9	3,3
140	40,8	27,4	3,6
150	40,7	26,8	3,8
160	40,4	26,8	4,1
170	40,2	27,2	4,3
180	40,3	28	4,5

Tabela D.9 - Dados relativos a Figura 4.9.

Tempo	T Sala	T Externa	Relógio
0	28,6	27,9	0,0
10	36,6	27,6	0,2
20	41,8	28,5	0,5
30	42,2	27,8	0,7
40	42,4	28,2	1,0
50	42,1	28,3	1,3
60	42,0	27,4	1,5
70	42,0	27,4	1,8
80	41,7	27,4	2,0
90	41,3	27,4	2,3
100	41,2	27,4	2,6
110	41,0	27,3	2,9
120	40,8	27,4	3,1
130	40,6	27,4	3,4
140	40,3	27,4	3,7
150	40,2	27,4	4,0
160	39,9	27,3	4,2
170	39,7	26	4,5
180	39,6	26,5	4,8

Tabela D.10 - Dados relativos a Figura 4.10.

Tempo	T Sala	T Externa	Relógio
0	30,3	29,4	0,0
10	36,4	28,4	0,2
20	43,6	29,3	0,4
30	44,6	29,4	0,7
40	44,5	29,5	0,9
50	44,1	29,9	1,2
60	43,7	29,0	1,4
70	43,4	28,6	1,7
80	43	28,9	1,9
90	42,9	28,9	2,2
100	42,6	28,9	2,5
110	42,4	28,6	2,7
120	42,0	28,6	3,0
130	41,8	28,6	3,2
140	41,5	28,4	3,5
150	41,0	28,4	3,8
160	41,1	28,6	4,1
170	40,8	28,6	4,3
180	40,6	28,5	4,5

Tabela D.11 - Dados relativos a Figura 4.11.

Tempo	Méd. Sala	Méd. Rel.	Méd. Ext.
0	29,5	0,0	28,4
10	35,8	0,25	28,2
20	41,8	0,5	28,4
30	42,7	0,75	28,2
40	42,7	1,0	28,4
50	42,4	1,25	28,6
60	42,3	1,5	28,1
70	42,3	1,8	28,1
80	41,9	2,02	28,2
90	41,8	2,3	28,2
100	41,6	2,5	27,7
110	41,4	2,8	27,8
120	41,2	3,0	27,4
130	40,9	3,3	27,5
140	40,7	3,6	27,4
150	40,5	3,9	27,3
160	40,4	4,2	27,3
170	40,0	4,42	27,1
180	39,9	4,7	27,3

Tabela D.12 - Dados relativos a Figura 4.12.

Tempo	Reta
0	29,5
10	35,8
20	41,8

Tabela D.13 - Dados relativos a Figura 4.13 .

Tempo	M. Sala - M.Ext.	M. Sala - M.Ext.
0	0,3	1,1
10	4,0	7,6
20	9,7	13,4
30	10,6	14,5
40	10,9	14,3
50	10,8	13,8
60	10,5	14,2
70	10,4	14,2
80	10,3	13,7
90	10,2	13,6
100	10,1	13,9
110	10,3	13,6
120	9,5	13,8
130	9,8	13,4
140	9,9	13,3
150	9,4	13,2
160	9,3	13,1
170	9,1	12,9
180	9,3	12,6

Tabela D.14 - Dados relativos a Figura 4.14 .

Tempo	T Sala	T Externa	Relógio
0	24,7	23,8	0,0
10	29,2	24,0	0,3
20	33,9	24,0	0,5
30	35,2	24,5	0,8
40	35,3	24,4	1,1
50	35,7	24,5	1,3
60	35,9	24,7	1,6
70	35,8	24,9	1,8
80	35,9	24,4	2,1
90	36,2	24,6	2,4
100	36,4	25,3	2,7
110	36,4	25,4	2,9
120	36,5	25,4	3,2
130	36,4	25,4	3,5
140	36,3	25,9	3,8
150	36,4	26,1	4,1
160	36,4	26,4	4,3
170	36,6	27,2	4,6
180	36,7	27,3	4,8

Tabela D.15 - Dados relativos a Figura 4.15 .

Tempo	T Sala	T Externa	Relógio
0	24,8	24,2	0,0
10	33,8	24,8	0,2
20	39,0	24,5	0,4
30	39,6	24,8	0,7
40	39,5	25,0	0,9
50	39,7	25,3	1,2
60	39,6	25,6	1,5
70	39,5	25,4	1,7
80	39,4	26,1	1,9
90	39,2	26,5	2,2
100	39,4	26,8	2,4
110	39,2	26,8	2,7
120	39,4	27,0	2,9
130	39,5	27,5	3,2
140	39,4	27,6	3,5
150	39,3	28,0	3,8
160	39,3	27,9	4,0
170	39,5	28,3	4,3
180	39,8	28,7	4,5

Tabela D.16 - Dados relativos a Figura 4.16 .

Tempo	T Sala	T Externa	Relógio
0	24,9	24,1	0,0
10	31,8	24,8	0,3
20	37,6	25,1	0,5
30	38,4	25,0	0,7
40	38,5	25,3	1,0
50	38,6	25,9	1,2
60	38,6	25,9	1,4
70	38,7	26,2	1,7
80	38,8	26,5	1,9
90	38,9	26,4	2,2
100	39,1	26,9	2,5
110	39,0	27,3	2,7
120	39,0	26,9	3,0
130	39,2	26,9	3,2
140	39,3	27,1	3,5
150	39,3	27	3,7
160	39,3	27,2	4,0
170	39,3	27,6	4,2
180	39,5	27,8	4,5

Tabela D.17 - Dados relativos a Figura 4.17 .

Tempo	T Sala	T Externa	Relógio
0	24,7	23,8	0,0
10	28,4	23,8	0,3
20	32,5	24,2	0,6
30	33,3	24,2	0,9
40	33,7	24,2	1,2
50	34,0	24,1	1,4
60	34,1	24,1	1,7
70	34,2	24,8	2,0
80	34,6	25,2	2,3
90	34,8	25,2	2,6
100	34,9	25,5	2,8
110	35,0	26,0	3,1
120	35,2	26,0	3,4
130	35,2	26,2	3,7
140	35,3	26,5	3,9
150	35,3	26,6	4,2
160	35,5	26,6	4,5
170	35,3	26,7	4,8
180	35,6	26,7	5,1

Tabela D.18 - Dados relativos a Figura 4.18 .

Tempo	Méd. Sala	Méd. Rel.	Méd. Ext.
0	24,8	0,0	24,0
10	30,8	0,3	24,3
20	35,7	0,5	24,4
30	36,6	0,8	24,6
40	36,7	1,0	24,7
50	37,0	1,3	24,9
60	37,0	1,5	25,1
70	37,0	1,8	25,3
80	37,2	2,0	25,5
90	37,2	2,3	25,7
100	37,4	2,6	26,1
110	37,4	2,8	26,4
120	37,5	3,1	26,3
130	37,6	3,4	26,5
140	37,6	3,7	26,8
150	37,6	3,9	26,9
160	37,6	4,2	27,0
170	37,7	4,5	24,4
180	37,9	4,7	27,6

Tabela D.19 - Dados relativos a Figura 4.19 .

Tempo	Reta
0	24,8
10	30,8
20	35,7

Tabela D.20 - Dados relativos a Figura 4.20 .

Tempo	T Sala	T Externa	Relógio
0	27,4	25,7	0,0
10	35,1	27,1	0,2
20	41,4	26,5	0,4
30	42,6	26,5	0,6
40	42,5	26,3	0,9
50	42,7	26,3	1,1
60	42,5	26,2	1,3
70	42,3	25,8	1,5
80	42,2	25,8	1,8
90	42,1	25,8	2,0
100	41,8	25,8	2,2
110	41,7	25,8	2,5
120	41,8	25,3	2,8
130	41,9	25,4	3,0
140	41,7	25,0	3,3
150	41,5	25,0	3,5
160	41,3	25,3	3,8
170	41,1	25,3	4,0
180	41,0	25,3	4,3

Tabela D.21 - Dados relativos a Figura 4.21 .

Tempo	T Sala	T Externa	Relógio
0	28,3	27,9	0,0
10	35,8	27,8	0,2
20	40,7	27,9	0,4
30	41,3	28,0	0,7
40	41,7	27,6	0,9
50	41,3	27,6	1,2
60	41,3	27,6	1,4
70	41,0	27,5	1,7
80	40,6	27,1	1,9
90	40,3	27,0	2,2
100	40,3	24,6	2,5
110	40,1	24,5	2,8
120	40,0	25,9	3,0
130	39,6	24,4	3,3
140	39,3	24	3,5
150	39,0	24,2	3,8
160	38,8	24,0	4,1
170	38,6	24,0	4,4
180	38,4	23,8	4,7

Tabela D.22 - Dados relativos a Figura 4.22 .

Tempo	T Sala	T Externa	Relógio
0	26,8	25,7	0,0
10	33,8	25,7	0,2
20	39,9	25,7	0,4
30	41,1	25,7	0,6
40	41,1	25,7	0,9
50	41,0	25,7	1,1
60	40,7	25,5	1,3
70	40,4	25,5	1,6
80	40,2	25,5	1,8
90	40,1	25,5	2,1
100	40,1	25,1	2,3
110	39,9	25,5	2,6
120	39,7	25,5	2,8
130	39,6	25,5	3,1
140	39,6	25,6	3,3
150	39,5	25,5	3,6
160	39,5	25,5	3,8
170	39,4	24,9	4,1
180	39,3	25,3	4,4

Tabela D.23 - Dados relativos a Figura 4.23 .

Tempo	T Sala	T Externa	Relógio
0	26,9	25,3	0,0
10	33,7	25,8	0,2
20	39,3	26,0	0,4
30	40,1	25,4	0,6
40	40,4	25,3	0,9
50	40,3	25,0	1,1
60	40,1	25,2	1,3
70	40,3	25,0	1,6
80	40,4	25,2	1,9
90	40,2	25,6	2,1
100	40,3	25,7	2,4
110	40,2	25,8	2,7
120	39,4	25,6	3,0
130	39,1	25,6	3,2
140	39,5	25,6	3,5
150	39,6	25,7	3,7
160	39,5	25,5	4,0
170	39,4	25,5	4,3
180	39,3	25,5	4,5

Tabela D.24 - Dados relativos a Figura 4.24 .

Tempo	Méd. Sala	Méd. Rel.	Méd. Ext.
0	27,3	0,0	26,1
10	24,6	0,2	26,6
20	40,3	0,4	26,5
30	41,3	0,6	2,64
40	41,3	0,9	2,62
50	41,3	1,1	2,61
60	41,1	1,3	26,1
70	41,0	1,6	25,9
80	40,8	1,8	25,9
90	40,7	2,1	26,0
100	40,6	2,3	25,3
110	40,5	2,6	25,4
120	40,2	2,9	25,6
130	40,0	3,1	25,2
140	40,0	3,4	25,0
150	39,9	3,6	25,1
160	39,8	3,9	25,1
170	39,6	4,2	24,9
180	39,5	4,5	25,0

## APÊNDICE E

Para o cálculo da energia térmica acumulada utilizando-se o trocador de calor convectivo sem a chaminé durante o período diurno, utilizaremos a equação 2.35, que fornece o calor em kJ/Kg.

$$Q = [0,15045T + 0,171 \times 10^{-4}T^2 - 0,0976 \times 10^{-8}T^3]_{T_1}^{T_2} \quad (2.35)$$

Esta equação exige que as temperaturas estejam em graus Rankine, então:

$$\begin{aligned} T_1 &= 24,1 \text{ }^\circ\text{C} = 75,38 \text{ }^\circ\text{F} = 535,05 \text{ R} \\ T_2 &= 36,5 \text{ }^\circ\text{C} = 97,7 \text{ }^\circ\text{F} = 557,37 \text{ R} \\ (T_2 - T_1) &= 22,32 \text{ R} \end{aligned}$$

Calculando o calor a partir da equação 2.35 temos:

$$Q = 0,15045 (T_2 - T_1) + 0,171 \times 10^{-4} (T_2 - T_1)^2 - 0,0976 \times 10^{-8} (T_2 - T_1)^3 \quad (E.1)$$

substituindo o valor da diferença  $(T_2 - T_1)$ , temos:

$$Q = 0,15045 \times 22,32 + 0,171 \times 10^{-4} \times (22,32)^2 - 0,0976 \times 10^{-8} (22,32)^3 \quad (E.2)$$

$$Q = 3,366521 \text{ kJ/Kg}$$

Para obtermos o calor independente da massa de ar, devemos calcular esta massa de ar (M) que existe na sala através da densidade ( $\rho$ ) e do volume da sala (V), através da equação E.3

$$M = \rho \times V \quad (E.3)$$

A densidade do ar é função da temperatura, utilizaremos aqui a temperatura média, ou seja, a média aritmética entre a temperatura inicial ( $T_1$ ) e a temperatura final ( $T_2$ ), cujo valor resultante é  $86,54^\circ\text{F}$ . Os seguintes dados são conhecidos para a densidade do ar:

$$\begin{array}{l} 100 \text{ }^\circ\text{F} \text{-----} 1,2976 \text{ Kg/m}^3 \\ 32 \text{ }^\circ\text{F} \text{-----} 1,13742 \text{ Kg/m}^3 \end{array}$$

Interpolando, encontramos o valor de 1,2658938 kg/m<sup>3</sup> para a densidade do ar a 86,54 °F e o volume da sala é de 15,45 m<sup>3</sup>.

Substituindo estes valores na equação E.3, encontramos um valor para a massa de ar na sala de 19,558059 Kg.

Multiplicando o valor do calor (Q) pela massa de ar calculada

$$Q = 3,3665521 \text{ kJ/Kg} \times 19,558059 \text{ kg}$$

$$Q = 65,843225 \text{ kJ}$$

Multiplicando por  $2,7754 \times 10^{-4}$ , obtemos o calor em kwh

$$Q = 1,822741 \times 10^{-2} \text{ kWh}$$

Multiplicando o valor em KJ por 0,239 , obtemos em kcal

$$Q = 15,736531 \text{ kCal}$$

O cálculo para as demais situações se procede da mesma forma acima.

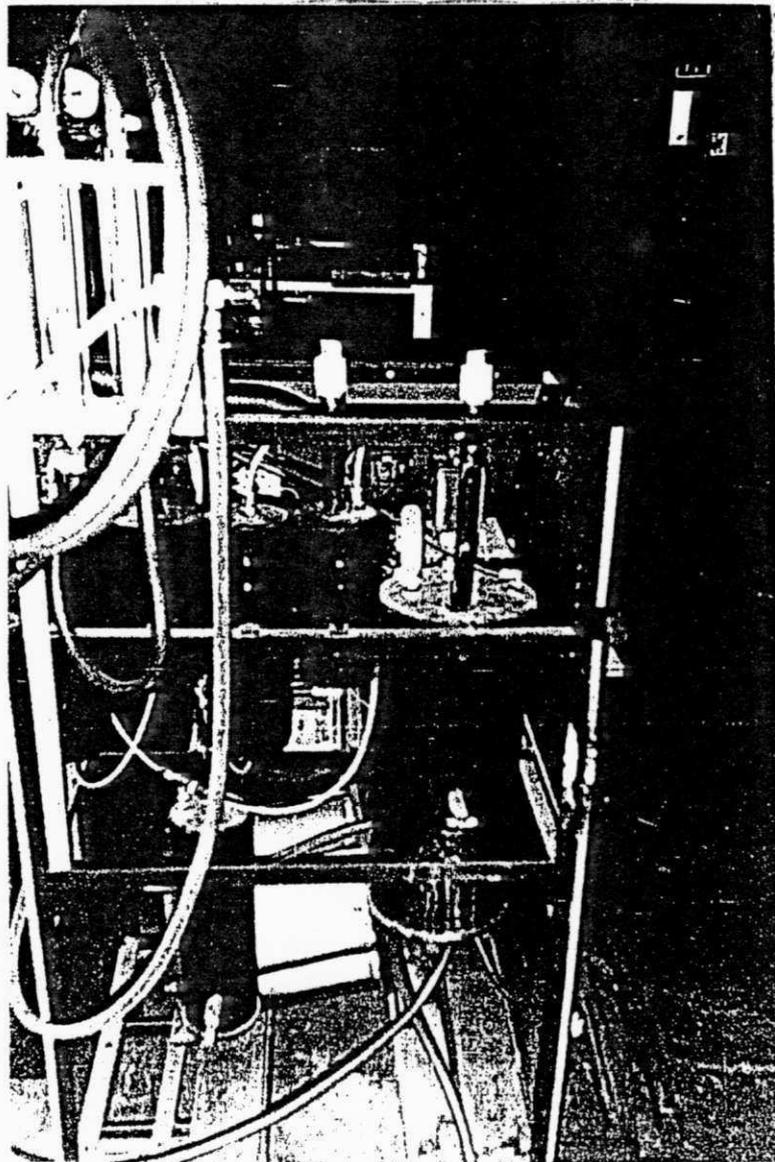


Figura F.2 - Fotografia da máquina oxi - hidrogênica vista de trás.