



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

**ESTUDO DE SISTEMAS DE AQUECIMENTO DE AMBIENTE
UTILIZANDO HIDROGÊNIO ELETROLÍTICO COMO COMBUSTÍVEL.**

MAURÍCIO ALVES DA MOTTA SOBRINHO

Campina Grande
Dezembro de 1995

MAURÍCIO ALVES DA MOTTA SOBRINHO

ESTUDO DE SISTEMAS DE AQUECIMENTO DE AMBIENTE
UTILIZANDO HIDROGÊNIO ELETROLÍTICO COMO COMBUSTÍVEL.

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado
em Engenharia Química da Universidade Federal
da Paraíba, em cumprimento às exigências para
obtenção do Grau de Mestre.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO : OPERAÇÕES E PROCESSOS

Prof. KEPLER BORGES FRANÇA (Ph.D)
Orientador

Prof. JÚLIO GOLDFARB (M.Sc)
Co-orientador

Campina Grande
Dezembro de 1995



S677e Motta Sobrinho, Maurício Alves da.
Estudo de sistemas de aquecimento de ambiente utilizando hidrogênio eletrolítico como combustível / Maurício Alves da Motta Sobrinho. - Campina Grande, 1995.
92 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1995.

Referências.
"Orientação : Prof. Dr. Kepler Borges França, Prof. M.Sc. Júlio Goldfarb".


1. Hidrogênio. 2. Hidrogênio Eletrolítico. 3. Combustível. 4. Dissertação - Engenharia Química. I. França, Kepler Borges. II. Goldfarb, Júlio. III. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). IV. Título

CDU 661.96(043)

ESTUDO DE SISTEMAS DE AQUECIMENTO DE AMBIENTE
UTILIZANDO HIDROGÊNIO ELETROLÍTICO COMO COMBUSTÍVEL.

MAURÍCIO ALVES DA MOTTA SOBRINHO

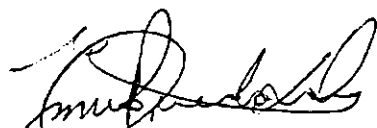
DISSERTAÇÃO APROVADA EM 22/12/95



Prof. KEPLER BORGES FRANÇA (Dr.)
Orientador



Prof. JÚLIO GOLDFARB (M.Sc.)
Co-orientador



Prof. ENNIO PERES DA SILVA (Dr.)
Componente da Banca



Prof. MICHEL FRANÇOIS FOSSY (Dr.)
Componente da Banca

Campina Grande
Dezembro de 1995

DEDICATÓRIA

A meus pais, Mauricy e Sylvia, meus irmãos, Cristiana (in memoriam), Sylvio e Mauricy Filho, meus avós, Newton (in memoriam) e Carmelita e Lourenço (in memoriam) e Virgilina.

AGRADECIMENTOS

Aos Professores Kepler Borges França e Júlio Goldfarb, pela sua amizade e orientação, dedicação, apoio e incentivo no desenvolvimento deste trabalho.

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

Ao Departamento de Engenharia Química do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba por ter cedido suas instalações, possibilitando a realização deste trabalho.

A Miriam Cleide Cavalcanti de Amorim, pela amizade, colaboração e incentivo.

A Maria José B. Cavalcanti e Maricé P. da Silva, pela amizade, dedicação e colaboração no curso de Pós-Graduação em Engenharia Química.

Aos demais integrantes do grupo de hidrogênio, Francisco Sérgio B. Gusmão, Flávio Pequeno e Francinaldo F. Pereira pela colaboração, sugestões e discussões.

Ao Professor Nagel A. Costa e aos mestrandos Oswaldo Soares, Wilton Walter Batista, Carlos Alberto Leal da Silva e Itamar S. Régis pela amizade e colaboração prestada.

Resumo

Este trabalho visa mostrar a viabilidade técnica do hidrogênio eletrolítico como fonte de energia para aquecimento de ambientes. Um sistema gerador de hidrogênio eletrolítico foi utilizado como fonte de energia para testar dois tipos de trocadores de calor: um tubular, construído na própria Universidade, e outro convectivo adaptado para o uso do hidrogênio.

Inicialmente o trocador de calor convectivo foi testado com o gás butano e logo após modificado para uso do hidrogênio. A partir dos resultados, observou-se que o gás butano apresentou uma taxa de aquecimento superior na ordem de 30% a do gás hidrogênio.

Para analisar a performance dos dois trocadores foram estudados os seguintes parâmetros: variação da temperatura interna da sala e externa em função do tempo, consumo de hidrogênio, a razão entre as energias acumulada e consumida durante o processo de aquecimento. Observou-se que o trocador de calor convectivo apresentou uma eficiência energética de 50% superior ao do trocador de calor tubular.

Os resultados obtidos são promissores e mostram amplas possibilidades de emprego do hidrogênio eletrolítico para aquecimento de ambientes.

Abstract

This work intends to show the technical viability to use the eletrodialytic hydrogen as source of energy to heating environment. A generator of hydrogen eletrolytic was used as source of energy to test two types of heat exchangers: One tubular which was made in the University and other convective type adapted to use hydrogen.

Inicialy the convective exchange heat was tested with butane gas and after that it was adapted to use hydrogen. From the results the heating rate of butane gas was 30% higher than hydrogen rate.

To analyse the performance of both exchangers were studyed fowolloging parameters: Variation the internal and external temperature room as function of time, hydrogen consumption, the ratio between acumulated and consumption of energy during the heating process. The convective exchange heat presented an energy efficiency of 50% superior than tubular exchange heat.

The results obtained showed that there are great possibility to use the eletrolytic hydrogen for heating environment.

Simbologia

A = Área

A = Ampére

Ac = Corrente alternada

°C = Grau centígrado

cm = centímetro

C_p = Capacidade calorífica a volume constante

C_v = Capacidade calorífica a pressão constante

c_p = Calor específico a pressão constante

c_v = Calor específico a volume constante

d = diferencial

Dc = Corrente alternada

dm = Decímetro

E_c = Energia cinética

E_p = Energia potencial

e⁻ = Elétrons

g = Aceleração da gravidade

G_r = Número de Grashoff

h = Coeficiente pelicular médio

h = Hora

Hz = Hertz

kgf = Quilograma-força

kg = Quilograma

kCal = Quilocaloria

kWh = quilowatt-hora

kJ = Quilojoule

K = Condutividade térmica

I = Litro

L = Comprimento

m = Massa

min = Minuto

mmCa = Milímetro de coluna de água

N = Condições normais de temperatura e pressão

P = Pressão

q = Densidade de fluxo de calor

Q = Fluxo de calor

r = Raio

R = Resistência térmica

R_o = Número de Reynolds

t = Tempo

T = Temperatura

T_s = Temperatura na superfície

T_∞ = Temperatura do ambiente

U = Energia interna

v = Velocidade

V = Volts

V = Volume

W = Watt

W = Trabalho

x,y,z = Coordenadas cartesianas

β = Coeficiente de expansão volumétrica

Δ = Variação

ε = Comprimento

μ = Viscosidade dinâmica

ν = Viscosidade cinemática

ρ = Densidade

σ = Constante de Stefan-Boltzmann

Índice

1.0 - Introdução	01
2.0 - Fundamentos Teóricos	02
2.1 - O Hidrogênio	02
2.1.1 - Propriedades Físicas do Hidrogênio	02
2.1.2 - Fabricação do Hidrogênio	03
2.1.3 - Vantagens da Eletrólise	05
2.1.4 - Armazenamento e Transporte	06
2.1.5 - Hidrogênio como Combustível	07
2.2 - A Eletrólise	07
2.2.1 - A Eletrólise da Água	07
2.2.2 - Componentes Básicos de uma Célula Eletrolítica	09
2.2.3 - Tipos Básicos de Eletrolisadores	11
2.3 - O Fluxo de Calor	14
2.3.1 - Condução	15
2.3.2 - Radiação	19
2.3.3 - Convecção	20
2.4 - Considerações Termodinâmicas	23
2.4.1 - Conceitos Fundamentais	24
2.4.2 - A Primeira Lei da Termodinâmica	24
2.4.3 - Entalpia	26
2.4.4 - Capacidade Calorífica e Calor Específico	26
2.4.5 - Cálculo do calor Acumulado em um sistema Fechado	27

3.0 - Material e Métodos	30
3.1 - Material Utilizado	30
3.1.1 - Eletrolisador Bipolar	30
a) Reator Eletrolítico	32
b) Reservatório de Eletrólito	33
c) Sistema de Refrigeração	34
d) Purgador	34
e) Selos Controladores de Chama	35
f) Fonte de Alimentação	36
g) Pressostato	36
3.1.2 - Trocador de Calor Tubular	37
3.1.3 - Trocador de Calor Convectivo	38
3.1.4 - Fluido Térmico	40
3.2 - Operação dos Sistemas	40
3.2.1 - Operação do Sistema Eletrolítico	40
3.2.2 - Operação do Trocador de Calor Tubular	41
3.2.3 - Operação do Trocador de Calor Convectivo	42
3.3 - Metodologia	42
3.3.1 - Comparação entre Combustíveis no Trocador de Calor Convectivo	43
3.3.2 - Avaliação do Trocador de Calor Tubular	43
3.3.3 - Avaliação do Trocador de Calor Convectivo	44
4.0 - Resultados e Discussões	45
4.1 - Comparação entre Combustíveis no Trocador de Calor Convectivo	45
4.2 - Avaliação do Trocador de Calor Tubular	53
4.3 - Avaliação do Trocador de Calor Convectivo	62
4.4 - Comparação entre os Trocadores de Calor	68
5.0 - Conclusão	70

6.0 - Perspectivas	71
Bibliografia	72
Apêndice A	76
Apêndice B	78
Apêndice C	79
Apêndice D	80
Apêndice E	88
Apêndice F	90

1.0 - Introdução

A humanidade vem crescendo rapidamente aumentando o consumo de combustíveis, em sua maioria fósseis, não renováveis e poluentes.

Após a crise do petróleo em 1973 a humanidade vem investindo em ciência e tecnologia com o objetivo de introduzir as energias renováveis, tais como solar, eólica e hidrogênio em sua matriz energética. O hidrogênio é um vetor energético secundário que pode ser obtido a partir das energias primárias, solar e eólica.

A reação do hidrogênio com o oxigênio do ar para uso em trocador de calor e em células combustíveis produzirá somente água, não perturbando o sistema ecológico. O obstáculo para o uso extensivo das energias eólica e solar tem sido a intermitência, oscilação e conseqüentemente a necessidade de estocagem. O uso do hidrogênio demonstra na prática ser um dos modos de acumulação mais adequados das energias alternativas.

Com este intuito o Departamento de Engenharia Química do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, vem desenvolvendo um sistema de aquecimento de ambientes movido a hidrogênio eletrolítico, que visa substituir os já existentes que utilizam combustíveis carbonáceos que liberam gás carbônico e outros gases provenientes da queima incompleta. O objetivo principal desse trabalho é apresentar uma nova opção para aquecimentos de ambientes.

2.0 - Fundamentos Teóricos

2.1 - O Hidrogênio

O hidrogênio é um elemento conhecido há mais de 400 anos. Atribui-se a Paracelso a sua descoberta. Hoje em dia todos nós temos um contato diário 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 que utilizamos na nossa higiene pessoal ; na agricultura, utilizamos fertilizantes nitrogenados, fabricados a partir da amônia que é sintetizada a partir do hidrogênio e do nitrogênio do ar.

2.1.1 - Propriedades Físicas do Hidrogênio

O hidrogênio é um elemento gasoso que em temperatura ambiente e a pressão atmosférica apresenta-se sem cor , odor ou sabor e não é tóxico. É inflamável, com limites de inflamabilidade de misturas H_2 / O_2 e H_2 / Ar dependendo da pressão e temperatura iniciais e de umidade. Em ar seco à pressão atmosférica, o limite inferior é de 4,1% e superior de 74,2% de hidrogênio em volume. Em oxigênio seco à pressão atmosférica o limite inferior é de 4,7% e o superior de 93,9% de hidrogênio em volume. Sua combustão com o oxigênio do ar apresenta uma chama azul muito pálida, quase invisível. A temperatura de ignição das misturas H_2 / O_2 e H_2 / Ar variam com a composição, temperatura inicial, pressão e umidade. O hidrogênio é o gás mais leve existente apresentando uma densidade em relação ao ar de 0,0655. É encontrado em altitude normal em concentrações de 1 a 2 ppm (MOURA,1980).

O hidrogênio, em virtude de apresentar um ponto de ebulição próximo ao zero absoluto (-253 °C) é de difícil e onerosa liquefação e quando liquefeito é incolor, inodoro e não é muito corrosivo.

O seu valor energético a pressão constante é de 34.000 kCal/kg (Poder Calorífico Superior) contra 10.000 kCal/kg para um derivado do petróleo e possui uma condutividade térmica sete vezes maior que do ar, sendo assim utilizado para arrefecimento dos alternadores de grande dimensões (PERRIER,1980).

O hidrogênio, juntamente com o hélio, apresentam a particularidade de se aquecer ao sofrer uma expansão. Em virtude disto, vazamentos de hidrogênio provocam incêndios.

Por possuir uma estrutura molecular muito pequena com apenas dois núcleos e dois elétrons, pode vazar em sistemas bem vedados para outros gases, além de se difundir rapidamente em materiais porosos e através de alguns metais aquecidos ao rubro. O hidrogênio é fundamentalmente um redutor e como tal é muito aplicado na indústria química. No apêndice A encontra-se algumas outras propriedades do hidrogênio.

2.1.2 - Fabricação do Hidrogênio

Existem vários processos para se gerar hidrogênio, a opção por um deles vai depender de vários fatores, tais como (MOURA,1980):

- Volume de hidrogênio a ser produzido
- Usos do hidrogênio
- Natureza de outras plantas e equipamentos
- Pureza do hidrogênio

Nos processos existentes mostrados abaixo, o hidrogênio pode ser gerado como produto principal ou como subproduto.

- Processo ferro esponja + vapor
- Processo carvão em coque + vapor
- Reforma vapor com hidrocarbonetos leves
- Craqueamento de hidrocarbonetos
- Eletrólise da água
- Reação do alumínio com soda cáustica

(PERRIER,1980), cita ainda,

- Decomposição termoquímica
- Biossíntese
- Fotossíntese artificial
- Produção por radiólise com um laser
- Produção de hidrogênio por "Cracking" do amoníaco
- Separação dos gases dos fornos metalúrgicos

Na produção de hidróxido de sódio e cloro via eletrólise o hidrogênio aparece como subproduto. O emprego energético do hidrogênio é ainda bastante reduzido, devendo-se situar abaixo dos 20% de sua produção total. Mais de 80% é consumido como insumo químico em processos industriais. Do total produzido atualmente, estima-se ainda que 80% do hidrogênio provenha de fontes primárias não renováveis de energia (carvão, gás natural e petróleo) sendo os 20% restantes oriundos principalmente da biomassa (madeira) e eletricidade, grande parte desta última na forma de subproduto industrial (SILVA,1991 a).

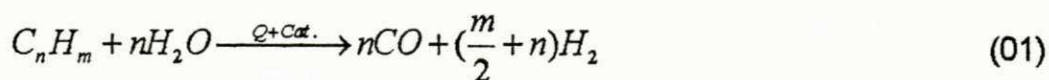
O Apêndice B mostra os principais processos de geração do hidrogênio, com os insumos básicos, fonte primária de energia e o atual estágio de desenvolvimento.

2.1.3 - Vantagens da Eletrólise

Os processos mais usuais de geração de hidrogênio podem ser divididos em dois grupos :

- Processos termoquímicos
- Eletrólise

Nos processos termoquímicos a água é decomposta a alta temperatura com auxílio de catalisadores. Para uma comparação com a eletrólise, a reforma vapor de um hidrocarboneto é um exemplo deste processo, conforme mostram as Equações 01 e 02 (SHREVE,1980):



O produto desta reação é bastante impuro, requerendo processos de adsorção e/ou absorção. Do ponto de vista da conservação de recursos não renováveis os processos termoquímicos são bastante discutíveis pois incluem processos de combustão para gerarem calor necessário à reação. Do ponto de vista ambiental, como em toda queima de combustíveis carbonáceos, libera-se gás carbônico para a atmosfera, além de produtos de reações secundárias.

Na eletrólise da água, o processo ocorre a baixas temperaturas por ação de uma corrente elétrica. Como na eletrólise há um transporte de massa, devido a migração dos íons e do movimento convectivo gerado pelo calor, os produtos da reação são automaticamente separados e obtidos assim com grande pureza. A Equação 03 apresenta a dissociação da água durante a eletrólise.



Observa-se que, o oxigênio é o único subproduto da reação e se for liberado para o ambiente, caso não se deseje armazenar, só trará benefícios do ponto de vista ambiental. Em relação a conservação de recursos não renováveis, o processo é ideal, uma vez que a energia elétrica é renovável, dependendo da fonte primária, e pode ser gerada através de painéis solares, aerogeradores ou hidroelétricas.

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.

2.1.4 - 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 (PERRIER,1980). Isto é válido para distâncias superiores a aproximadamente 4.000 km.

Recentes experimentos mostram que o carvão ativado pode absorver quantidades significativas de hidrogênio em condições ótimas de temperatura de - 123 °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).

2.1.5 - Hidrogênio como Combustível

O campo de aplicação do hidrogênio é muito grande. Diversos países da Europa como Alemanha, França e Suíça, utilizam o hidrogênio na rede doméstica 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 FeTi e outro de liga de Mg-Ni (SILVA,1991 b).

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_x (HACOHEN,1991).

2.2 - A Eletrólise

Eletrólise é uma reação de decomposição de substâncias por efeito de uma corrente elétrica. Tal reação se processa a temperatura e pressão constantes em um reator denominado célula eletrolítica. Esta é uma reação "forçada", pois só se realiza mediante o consumo de trabalho elétrico útil, que é então armazenado na forma de energia livre de Gibbs (PILLA,1980).

2.2.1 - A Eletrólise da Água

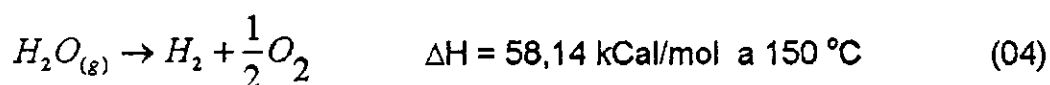
Em 1800, Nicholson e Carlisle produziram pela primeira vez o hidrogênio a partir da eletrólise da água. Todavia, o primeiro eletrolisador de água comercial só foi instalado em 1902 pela Oerlikon Engineering Company.

Oerlikon entregou mais de 400 eletrolisadores filtro-prensa entre 1902 e 1920. O primeiro grande eletrolisador Norte Americano tipo tanque ($> 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$) foi localizado na Cominco Ltd, Trail, British Columbia em 1939. Esta planta foi construída originalmente para produzir oxigênio; mais tarde foi convertida para suprir hidrogênio para produção de fertilizantes. Um grande eletrolisador tipo tanque foi instalado na Noruega em 1927, esta planta produzia originalmente menos que $10^4 \text{ m}^3/\text{h}$, foi aumentada em 1965 para a capacidade de $90.000 \text{ m}^3/\text{h}$ (COX & WILLIAMSON, 1977).

Nos anos de 1920 a 1930, várias plantas para a produção comercial de hidrogênio foram construídas, visando principalmente a produção de amônia. Após a Segunda Guerra Mundial havia muita disponibilidade de hidrocarbonetos de baixo custo, fazendo com que o desenvolvimento de eletrolisadores de água praticamente parassem. Somente da década de 70, é que o interesse ressurgiu devido a crise do petróleo.

A produção de hidrogênio pela eletrólise da água é em princípio, muito simples. Uma célula eletrolítica básica é constituída de um par de eletrodos imersos em um eletrólito condutor dissolvido em água. A corrente elétrica passa através da célula de um eletrodo para o outro e o hidrogênio evolui em um eletrodo (cátodo) e o oxigênio no outro eletrodo (ânodo). A água consumida deve ser repostada continuamente. Na prática, a célula eletrolítica é mais complicada, contendo vários componentes que lhe permitem trabalhar eficiente e economicamente.

A reação de decomposição da água é uma reação endotérmica, a qual pode ser representada pela seguinte equação (BOCKRIS, 1976).



e a correspondente variação da energia livre de Gibbs a $150 \text{ }^\circ\text{C}$ é $52,99 \text{ kCal/mol}$.

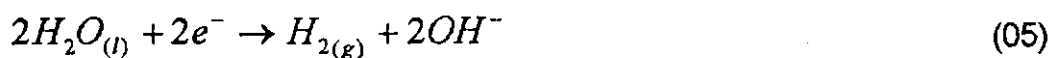
2.2.2 - Componentes Básicos de uma Célula Eletrolítica

A água é um mau condutor iônico, por isso faz-se necessário a adição de um eletrólito condutor à água. O eletrólito deve apresentar as seguintes características: ter alta condutividade iônica; resistente a altas voltagens, não se decompor; não apresentar uma volatilidade alta, resistir a variações de pH, uma vez que a concentração de íons hidrogênio varia nos eletrodos.

Para a maioria das aplicações práticas, estes critérios podem ser satisfeitos pelo uso de um ácido ou base forte. Os eletrólitos ácidos não são vantajosos pois apresentam problemas com corrosão severa e evaporação. Por esta razão, a maioria dos eletrolisadores comerciais operam com um eletrólito alcalino. No caso da utilização do hidróxido de potássio, a condutividade máxima é próxima a uma concentração de 30%. Nesse sentido esta concentração é geralmente escolhida (CASPER,1978).

A decomposição da água em escala industrial utiliza uma solução de hidróxido de potássio na faixa de 25 a 50%, usando eletrodos de revestidos de níquel e operando em uma faixa de temperatura de 80 a 260 °C (ISMAIL,1989). O hidróxido de sódio não é utilizado como eletrólito por apresentar certas desvantagens em relação ao hidróxido de potássio, como por exemplo, menor condutividade e estabilidade, ser mais sujeito à variação de pH, além da maior possibilidade da ocorrência de reações de saponificação, por ser de mais fácil degradação. Por estas razões é mais conveniente o uso de um eletrólito básico em especial o KOH. As reações que ocorrem nos eletrodos são:

No cátodo



No ânodo



Qualquer impureza contida na água ou no hidróxido irá se acumular nas células, podendo aumentar a resistividade do eletrólito, ocasionando maior consumo de eletricidade para a mesma produção de gases, e/ou atacar os componentes da célula, tal como ocorre com íons cloretos e sulfatos que corroem os eletrodos. Desta forma, o KOH a ser utilizado deve satisfazer condições mínimas de qualidade (grau de pureza) e a água fornecida ao eletrolisador deve ser deionizada e/ou destilada, mantendo-se a resistividade elétrica inferior a 10^6 ohm/cm. Conforme se trabalha com temperaturas e pressões mais elevadas, maior deve ser a pureza do eletrólito (SILVA, 1991 a).

Uma exceção no uso de eletrólitos alcalinos é o uso de um material sólido polimérico de troca iônica que também apresenta boa condutividade iônica onde o maior êxito foi obtido utilizando-se polímero ácido flúor poliestireno sulfônico.

Além do eletrólito já mencionado, são ainda componentes básicos de uma célula eletrolítica o reservatório de eletrólito, o separador de gases, gacheta e os eletrodos.

Os eletrodos devem ter as seguintes características: superfície catalítica apropriada para a descarga dos íons hidrogênio e hidroxila, para isso, utiliza-se geralmente o níquel no caso de eletrólitos alcalinos; prover uma grande área interfacial entre o catalisador e o eletrólito; apresentar sítios adequados a nucleação de bolhas de gás e um meio razoável para facilitar o desprendimento das bolhas de gás.

A forma dos eletrodos varia conforme o tipo de desenho da célula e da reação. Para apresentar uma grande área superficial, se utilizam estruturas sinterizadas, como juntas finas, pratos perfurados e planos com superfície eletroquímica rugosa.

Para o caso de eletrodos de ácido polimérico, a maioria dos eletrodos são feitos de materiais quimicamente mais resistentes que aço ou níquel. Platina e paládio tem sido os mais usados.

Uma gacheta é colocada entre os dois eletrodos a fim de evitar que os dois entrem em contato, provocando um curto circuito. Uma placa de amianto é colocada com a função de impedir a mistura dos gases hidrogênio e oxigênio dentro da célula e permitir a passagem da corrente elétrica. Para que isto ocorra o separador de gases deve ser um diafragma poroso, através do qual a solução de eletrólito passe proporcionando uma condução dos íons de um compartimento da célula para o outro. A fim de evitar a passagem dos gases, o que acarretaria na mistura dos mesmos, estes poros devem permanecer cheio de líquido.

O material do separador deve apresentar as seguintes características: ser resistente a corrosão do eletrólito na presença de gases, ter uma boa longevidade assegurada através de uma estrutura que impeça que os poros não se fechem com o tempo e que seja estável. O asbesto é comumente usado na confecção dos separadores das células alcalinas. A resina sólida polimérica de troca iônica do tipo Nafion é simultaneamente eletrólito e separador de gases.

2.2.3 - Tipos Básicos de Eletrolisadores

Os eletrolisadores podem ser classificados em: convencionais, modernos e avançados (Bockris, 1976).

Os eletrolisadores convencionais se caracterizam por utilizarem uma solução eletrolítica como meio condutor iônico e distinguem-se essencialmente por suas maiores dimensões e menores densidades de corrente (SILVA 1980).

Os eletrolisadores modernos diferem dos modelos convencionais, por apresentarem coberturas especiais nos eletrodos, com a disposição de catalisadores e superfícies rugosas.

Já os eletrolisadores avançados caracterizam-se por operarem com altas densidades de corrente, utilizarem catalisadores e metais nobres, além de terem um pequeno volume. O mais conhecido é um da configuração bipolar, chamado de eletrolisador polimérico sólido (SPE). Ele emprega uma membrana polimérica sólida, com estrutura semelhante ao Teflon, chamada de Nafion.

Quanto a configuração dos eletrodos os eletrolisadores podem ser: unipolar ou bipolar. Na configuração unipolar, conforme mostra a Figura 2.1, os eletrodos de mesma polaridade da célula eletrolítica são associados eletricamente em paralelo, fazendo com que a voltagem total da célula seja a mesma de um par de célula, aproximadamente 2,0 volts. São conhecidos também como eletrolisadores tipo tanque. Em função deste tipo de arranjo, ambas as faces do eletrodo tem a mesma polaridade, de modo que ocorre apenas uma única reação no eletrodo, a reação de evolução do hidrogênio (REH) ou a reação de evolução do oxigênio (REO).

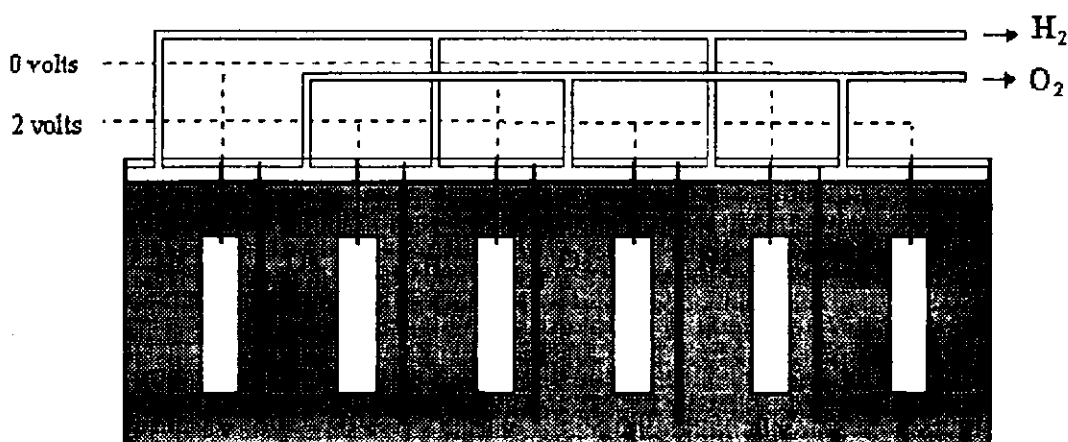


Figura 2.1 - Esquema de um eletrolisador unipolar

O isolamento elétrico se torna relativamente simples, devido à baixa voltagem, e a corrente pode ser aumentada progressivamente na medida que se

aumenta o número de células no interior de um mesmo tanque (TICIANELLI,1985). As principais vantagens deste tipo de célula é que eles são de construção simples, possuem um custo por unidade de área da célula menor e são de fácil manutenção, podendo inclusive se isolar células individuais para reparo ou substituição e o eletrolisador continuar funcionando, porém apresentam as desvantagem de alto custo dos retificadores de corrente, não poder operar em altas temperaturas e são maiores que outros eletrolisadores, ocupando maior espaço físico (CASPER,1978).

A Figura 2.2 apresenta o eletrolisado tipo filtro prensa ou bipolar, onde os eletrodos são ligados eletricamente em série. A voltagem total da célula é dada pelo número de células multiplicada pela voltagem de cada célula. Desta forma tem-se uma alta voltagem e uma baixa amperagem. Este tipo de arranjo faz com que cada lado do eletrodo tenha uma polaridade diferente em relação aos eletrodos vizinhos, ocorrendo a reação de evolução do hidrogênio em uma face e a reação de evolução do oxigênio na outra.

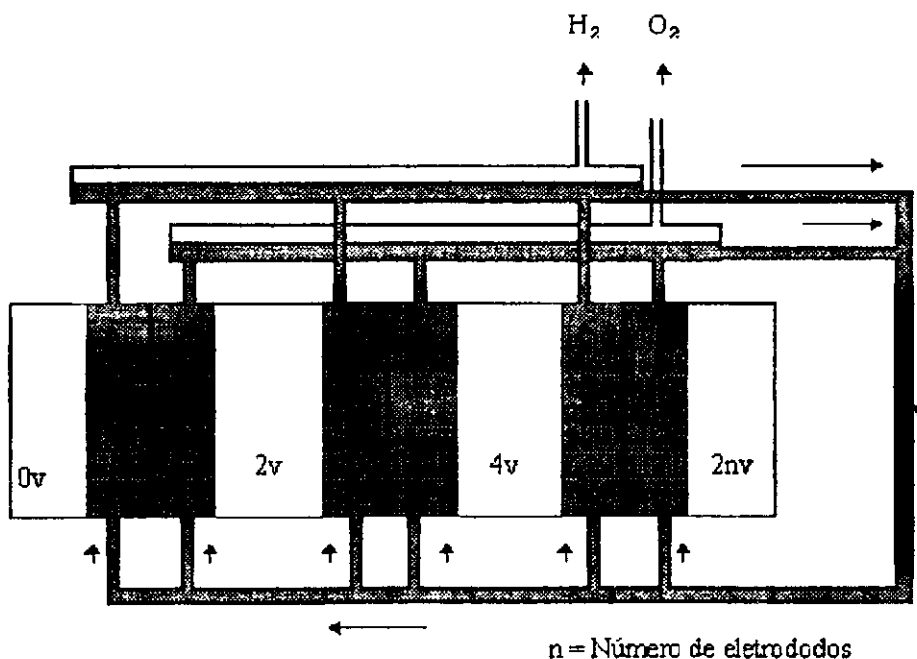


Figura 2.2 - Esquema de um eletrolisador bipolar

Uma das características físicas do eletrolisador é ocupar menor espaço, apresentar maior rendimento elétrico em virtude da baixa amperagem, operar a alta temperatura e pressão; por outro lado apresenta maior frequência de manutenção e problema de vedação.

A eletrólise como todo processo irreversível, dissipa energia, na forma de calor que deve ser removido, a fim de não prejudicar o equipamento, o que é feito, no caso dos eletrolisadores unipolares mediante o resfriamento do próprio tanque, ou então, do eletrólito, circulando-se água fria em uma camisa externa ao tanque ou em uma serpentina interna. Nos eletrolisadores bipolares, devido ao menor volume contido, faz-se circular o eletrólito, recolhendo o que é arrastado junto com os produtos que saem no topo das células, fazendo-o passar por um trocador de calor, geralmente resfriado por água, por um filtro e reinjetando-se por gravidade ou com auxílio de bombas no fundo das células (CAMPOS,1985).

No estágio atual de desenvolvimento não há diferenças marcantes de consumo energético que favoreça uma outra configuração. Ambas giram ao redor de 4,3 a 4,6 kWh/m³H₂ (TICIANELLI,1985).

2.3 - O Fluxo de Calor

Através de um gradiente de temperatura entre corpos materiais ocorrerá uma transferência de energia entre eles. Esta energia em trânsito é chamada de calor e o processo pelo qual esta energia é transportada é denominado de transmissão de calor.

A termodinâmica é o ramo da ciência que trata das relações entre calor e outras formas de energia e todos os processos de transmissão de calor envolvem a transferência e a conversão de energia. Dessa forma, a transmissão de calor deve obedecer as leis termodinâmicas.

A transferência de calor suplementa o primeiro e segundo princípios da termodinâmica, fornecendo regras experimentais adicionais que podem ser

empregadas para estabelecer as taxas de transferência de energia (HOLMAN,1983).

A literatura geralmente reconhece três modos distintos de transmissão de calor : condução , radiação e convecção. Estritamente falando, apenas a condução e a radiação devem ser classificadas como processos de transmissão de calor, pois somente esses dois mecanismos dependem, para sua operação, da existência de uma diferença de temperatura. O último dos três, a convecção, não concorda estritamente com a definição de transmissão de calor, pois também depende, para sua operação, do transporte mecânico de massa. Mas, como a convecção também efetua a transmissão de energia de regiões de maior temperatura para as de menor, o termo "transmissão de calor por convecção" tornou-se geralmente aceito (KREITH,1973).

2.3.1 - Condução

A condução é um processo pelo qual o calor flui de uma região de temperatura mais elevada para uma de temperatura mais baixa, em um meio ou entre meios diferentes em contato direto. Neste processo, o transporte de energia dá-se por transferência de energia cinética de uma molécula para a outra, sem expressiva movimentação das moléculas.

Quando as moléculas em uma região adquirem uma energia cinética média maior do que a das moléculas da região vizinha, o que pode ser notado por uma diferença de temperatura, as moléculas possuidoras de maior energia transmitirão parte de sua energia para as moléculas da região de temperatura mais baixa.

A equação básica para a transferência de calor por condução é atribuída à J.B.J. Fourier, em 1822. Ela estabelece que o fluxo de calor, calor transmitido por unidade de tempo, condutivo é proporcional a área e ao gradiente de temperatura, que é a força motriz. A constante de proporcionalidade é

denominada de condutividade térmica, a qual é dependente do tipo de material, da temperatura e da pressão.

$$\frac{Q}{A} = -k \frac{\Delta T}{\varepsilon} \quad (05)$$

onde : Q = fluxo de calor (Kcal / h)

A = área da seção transversal através da qual o calor flui (m²)

k = condutividade térmica (Kcal / h m °C)

ΔT = variação de temperatura (°C)

ε = distância na direção do fluxo (m)

Geralmente trabalha-se com o fluxo de calor por unidade de área, densidade de fluxo de calor, assim a Equação 5, passa a ser escrita da seguinte forma, para coordenadas cartesianas, no eixo dos x :

$$q_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (06)$$

ou de maneira genérica, a forma tridimensional da lei de Fourier é

$$q = -k \cdot \nabla T \quad (07)$$

A condutividade térmica dos materiais são determinadas experimentalmente. A variação da condutividade calorífica em função da temperatura e da pressão e métodos para predição das mesmas, para gases, líquidos e sólidos são descritas por (BIRD,1978).

As condutividades térmicas dos sólidos apresentam um grande intervalo de valores numéricos dependendo do sólido ser um bom condutor de calor

como um metal ou um condutor pobre como o asbesto. Estes últimos podem ser usados como isolantes (KERN,1987).

Os sólidos possuem uma condutividade térmica maior que a dos líquidos e estes possuem uma condutividade maior que os gases, isso deve-se a menor distância das moléculas nos sólidos, um pouco maior nos líquido e bem maior nos gases.

O sinal de menos é inserido para satisfazer o segundo princípio da termodinâmica, ou seja, o calor deve fluir no sentido da temperatura decrescente (HOLMANN,1983).

Para o fluxo de calor através de uma parede plana, onde o gradiente de temperatura e o fluxo de calor não variam com o tempo (regime permanente), e a área da seção transversal no caminho do fluxo é uniforme. Integrando a Equação 06 por separação de variáveis

$$\frac{Q}{A} \int_0^L dx = - \int_{T_{quente}}^{T_{fria}} k dt \quad (08)$$

se k for independente de T, obteremos

$$Q = \frac{Ak}{L} (T_{quente} - T_{fria}) = \frac{\Delta T}{L/Ak} \quad (09)$$

Na Equação 09, ΔT é a diferença de temperatura, que é o potencial que causa a transmissão de calor. L/Ak é equivalente a uma resistência térmica R_k que a parede oferece a transmissão de calor por condução, assim

$$R_k = \frac{L}{Ak} \quad (10)$$

Substituindo a Equação 10 na Equação 09, obtemos

$$Q = \frac{\Delta T}{R_k} \quad (11)$$

Em numerosos sistemas envolvendo escoamentos, tais como fluxo de calor, o escoamento de um fluido ou o escoamento da eletricidade, observou-se que a quantidade que flui é diretamente proporcional ao potencial da força motriz e inversamente proporcional às resistências que se aplicam ao sistema (KERN,1987).

Para paredes composta em série, teremos a soma das resistências para cada camada, ou seja,

$$Q = \frac{\Delta T}{R_{k1} + R_{k2} + R_{k3}} = \frac{\Delta T}{(L_1 / K_1 A) + (L_2 / K_2 A) + (L_3 / K_3 A)} \quad (12)$$

Para o caso de cilindros ocos, a melhor solução é empregarmos a lei de Fourier em coordenadas cilíndricas, sendo assim, para o eixo r temos

$$Q = -k 2r\pi .L \frac{dT}{dr} \quad (13)$$

integrando-a por partes

$$Q \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = -2\pi .Lk \int_{T_2}^{T_1} dT \quad (14)$$

chegamos a

$$Q = \frac{2\pi .Lk (T_1 - T_2)}{\ln(r_2 / r_1)} \quad (15)$$

e a resistência ao fluxo de calor é

$$R_k = \frac{\ln(r_2 / r_1)}{2\pi \cdot Lk} \quad (16)$$

Caso o cilindro oco seja composto, como no caso de uma tubulação isolada, o fluxo é dado pelo potencial dividido pela soma das resistências, conforme a Equação 17.

$$Q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{\ln(r_2 / r_1)}{2\pi \cdot Lk_1} + \frac{\ln(r_3 / r_2)}{2\pi \cdot Lk_2}} \quad (17)$$

2.3.2 - Radiação

O transporte de calor por irradiação ocorre devido ao transporte de energia por radiação eletromagnética, ou fótons, com uma certa faixa de comprimento de onda. Por conseguinte, as mesmas leis que regem a faixa especial de comprimentos de onda, que chamamos de luz visível, regem também as radiações denominadas de calor. Embora ocorra transporte de energia por radiação através de gases, líquidos e sólidos, estes meios absorvem alguma ou toda energia e, portanto, esta energia é irradiada mais eficientemente através do espaço vazio (BENNETT,1978).

Considerações termodinâmicas mostram que um radiador ideal, ou corpo negro, emite energia numa taxa proporcional à quarta potência da temperatura absoluta do corpo. Quando dois corpos trocam calor, a troca líquida é proporcional à diferença em T à quarta potência, conforme a Equação 18, onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann que vale $5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ (HOLMANN,1983).

$$Q = \sigma \cdot A (T_1^4 - T_2^4) \quad (18)$$

A Equação 18 só é válida para corpos negros e para radiações térmicas, e é conhecida como lei de Stefan-Boltzmann. Para corpos cinzentos, não negros, existe um fator denominado emissividade que relaciona a radiação de uma superfície "cinzenta" com a de uma superfície negra ideal.

2.3.3 - Convecção

Isaac Newton, em 1701, propôs a seguinte equação para se determinar a transmissão de calor por convecção (KREITH,1973)

$$Q_c = \bar{h}_c A \cdot \Delta T \quad (18)$$

onde : Q_c = fluxo de calor através da superfície do fluido (kCal / h)

A = área de transferência de calor (m^2)

ΔT = diferença de temperaturas entre a superfície e o fluido. ($^{\circ}C$)

\bar{h}_c = coeficiente pelicular médio ou coeficiente de transferência de calor convectivo. (kCal / h m^2 $^{\circ}C$)

Em um tubo que se resfria sob efeito do ar, existe uma diferença de temperatura entre a temperatura do tubo e a temperatura média do ar a uma certa distância do tubo, como não se sabe o valor desta distância não pode-se utilizar a expressão ($R = L / kA$), usando-se k para o ar, logo deve-se calcular a resistência, ou o seu inverso que é o coeficiente pelicular médio, medindo-se a temperatura na superfície do tubo, a temperatura do ar e o calor transferido e substituindo-se estes valores na Equação 18, equação do resfriamento de Newton, que é na realidade a definição do coeficiente pelicular médio e que irá

ser função da geometria do sistema, do escoamento e das propriedades físicas do fluido e da diferença de temperatura .

A convecção pode ser classificada em livre ou natural e forçada. Na convecção forçada, utiliza-se agitadores mecânicos para aumentar o movimento do fluido, com isso ela torna-se mais rápida, sendo assim a mais utilizada.

A convecção ocorre associada a condução e radiação, sendo esta última geralmente desprezada. Pode-se citar como exemplo a troca de calor entre um tubo aquecido e o ar do ambiente, onde as partículas mais próximas a superfície do tubo trocam calor por condução, com isso sua densidade diminui, fazendo com que a mesma se afaste da superfície, dando lugar a outras partículas que irão assim, resfriar o tubo.

No caso de um fluido quente a uma temperatura t_i no interior de um tubo que fica exposto ao ar livre a uma temperatura t_e , teremos um coeficiente pelicular interno h_i e um coeficiente pelicular externo h_e ao se aplicar uma equação ao estado estacionário, obtemos :

$$Q = A_i (t_i - t_{pi}) h_i = A_e (t_{pe} - t_e) h_e \quad (19)$$

onde A_i é a área da superfície interna do tubo que se encontra a uma temperatura t_{pi} e A_e a área da superfície externa do tubo que se encontra a uma temperatura t_{pe} .

Visto que o coeficiente pelicular é uma medida do fluxo de calor por unidade de superfície e unidade de diferença de temperatura, isto indica a taxa ou velocidade de transmissão de calor do fluido que possui uma variedade de propriedades físicas e está sob vários graus de agitação (KERN,1987).

Quer o mecanismo de transporte de calor seja natural ou forçado, a movimentação fluida pode ser analisada pela mecânica dos fluidos. Em baixas velocidades o fluxo é laminar através do sistema; em altas velocidades é geralmente visto como laminar nas proximidades da superfície aquecedora e turbulento a alguma distância. Apesar das velocidades do fluido serem mais baixas na convecção natural que na convecção forçada, é incorreto pensar que

a convecção natural ocasiona apenas escoamento laminar; a turbulência ocorrerá quando o número de Reynolds crítico for ultrapassado (BENNETT,1978).

O empuxo provocado pelo gradiente de temperatura é a força motriz para o movimento do fluido no escoamento natural, esta força por unidade de volume para um corpo, com parede mantida a uma temperatura constante, é :

$$\rho g \beta (T_s - T_\infty) \quad (20)$$

onde: T_s é a temperatura na superfície ($^{\circ}\text{K}$)

T_∞ a temperatura do ambiente ($^{\circ}\text{K}$)

β o coeficiente de expansão volumétrica ($^{\circ}\text{K}^{-1}$)

ρ a densidade (Kg/m^3) e

g a aceleração da gravidade (m/s^2)

O número de Grashoff dá a relação entre esta força e a força viscosa.

$$G_r = \frac{\rho g \beta (T_s - T_\infty) L^3}{\rho \gamma^2} \quad (21)$$

onde : γ é a viscosidade cinemática (m^2/h) e

L o comprimento (m)

Na convecção forçada o número de Reynolds desempenha a mesma função, pois relaciona a força de inércia com a força viscosa, isto é :

$$\text{Re}_L^2 = \left(\frac{V_\infty L}{\gamma} \right)^2 \quad (22)$$

onde : V_{∞} é a velocidade média do fluido (m/s)

γ é a viscosidade cinemática (m²/h) e

L o comprimento (m)

Os três casos possíveis de convecção são (SISSOM,1974):

1. $Gr \gg Re_L^2$, convecção livre.
2. $Gr \ll Re_L^2$, convecção forçada.
3. $Gr \cong Re_L^2$, mistura de convecção livre e forçada.

O perfil de temperaturas, em um dado ponto do sistema de escoamento, sofre influência do perfil de velocidades. Esta influência é indicada pela presença de termos de velocidade no balanço diferencial de energia. Entretanto não é inteiramente óbvio que o perfil de temperaturas influencie também o perfil de velocidades. A equação de Navier-Stokes, Equação 23, não contém explicitamente a temperatura, mas contém termos dependentes da temperatura, principalmente, aqueles que incluem a viscosidade. Conseqüentemente, o perfil de velocidades em um sistema isotérmico pode diferir substancialmente do perfil de velocidades em um sistema no qual ocorra transporte de calor (BENNET,1978).

$$\rho \frac{Dv_x}{Dt} = \rho X - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{3} \mu \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \quad (23)$$

Equação de Navier-Stokes para a direção x.

2.4 - 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 ocorram 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).

2.4.1 - 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.

2.4.2 - 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 incluídas). 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:

$$\Delta (\text{energia do sistema}) + \Delta (\text{energia da vizinhança}) = 0 \quad (24)$$

Diz-se que um sistema é fechado 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:

$$\Delta (\text{energia da vizinhança}) = \pm Q \pm W \quad (25)$$

Podemos desenvolver a primeira parcela do primeiro termo da Equação 24, mostrando as variações de energia cinética potencial e interna, já que são as únicas que irão variar devido a massa do sistema ser constante.

$$\Delta (\text{energia do sistema}) = \Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p \quad (26)$$

Substituindo as Equações 25 e 26 na Equação 24 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 :

$$\Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p = Q - W \quad (27)$$

Os sistemas fechados 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

$$\Delta U = Q - W \quad (28)$$

Ou, na forma diferencial

$$dU = dQ - dW \quad (29)$$

2.4.3 - Entalpia

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

$$H = U + PV \quad (30)$$

onde : H = entalpia (N.m = joule)

U = energia interna (N.m = joule)

P = pressão absoluta (N/m²)

V = volume (m³)

ou na forma diferencial

$$dH = dU + d(PV) \quad (31)$$

2.4.4 - 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

$$dQ = C_v dT \quad (32)$$

e para processos a pressão constante

$$dQ = C_p dT \quad (33)$$

onde, Q é expresso por unidade de massa.

2.4.5 - Cálculo do Calor Acumulado 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:

$$dU = dQ \quad (34)$$

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

$$dQ = C_v dT \quad (35)$$

integrando-se,

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} C_v dT \quad (36)$$

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

$$C_v = C_p - R/J \quad (37)$$

onde: J = mol do gás

O valor de R/J para o ar obtido da Tabela A1 de Faires é 0,06855.

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 O₂, H₂ e CO₂ podem ser de dezenas de atmosferas (ou centenas de psi), conforme a aproximação desejada, (FAIRES, 1966).

Desta maneira pode-se utilizar a Equação 37 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:

$$c_p = 0,219 + 0,342 \times 10^{-4} T - 0,293 \times 10^{-8} T^2 \quad (38)$$

onde T é a temperatura em Rankine e o valor de c_p é dado em Btu / lb °R ou kJ / kg °K. Combinando a Equação 38 com a Equação 37, multiplicando pela massa e substituindo na Equação 36, obtém-se :

$$Q = m \int_{T_1}^{T_2} ((0,219 + 0,342 \times 10^{-4} T - 0,293 \times 10^{-8} T^2) - 0,06855) dT \quad (39)$$

integrando e agrupando os termos em comum, chega-se a

$$Q = m [0,15045T + 0,171 \times 10^{-4} T^2 - 0,0976 \times 10^{-8} T^3]_{T_1}^{T_2} \quad (40)$$

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 quilojoule (kJ). Para se obter em Kcal basta dividir este valor pelo fator de conversão 4,18676.

3.0 - Materiais e Métodos

3.1 - Material Utilizado

Para a realização do trabalho foram utilizados os seguintes equipamentos e reagentes:

- * Eletrolisador Bipolar
- * Trocador de Calor Tubular
- * Trocador de Calor Convectivo
- * Produtos Químicos :
 - Hidróxido de Potássio P.A. (em solução a 28%)
 - Benzina Retificada
 - Óleo Orgânico Sintético Dowtherm *G, cedido pela Dow Produtos Químicos SA
- * Água Destilada
- * Asbesto em cordão (para isolamento)
- * Rotâmetro para mistura de gases (66% H₂ + 33% O₂) da Gemu Indústria de Plásticos LTDA., com escala de 0,0 a 1,0 Nm³/h.
- * Termômetro Digital TH 1200C com 2 termopares
- * Termômetro de Mercúrio (escala de 0 -100 °C)
- * Relógio Medidor de Energia

3.1.1 - Eletrolisador Bipolar

O eletrolisador bipolar é constituído das seguintes unidades: um reator eletrolítico, um reservatório de eletrólito, um trocador de calor para resfriar o

eletrólito, purgadores que evitam o arraste do eletrólito, selos controladores de chama para evitar que a chama retorne (evitar que a máquina possa engolir a chama), fonte de alimentação, maçarico além de um pressostato, um regulador de pressão e um manômetro. Faz parte ainda do sistema duas válvulas anti-chama, uma válvula seca que fica logo após a saída dos selos controladores de chama e outra no maçarico.

Este sistema possui as seguintes características:

Tipo : Bipolar

Potência Máxima : 2700 W

Tensão da rede : 220 V Ac

Corrente máxima : 18 A

Frequência da rede : 60 Hz

Densidade de corrente : 15 A / dm²

Pressões de trabalho : 1 Kgf/cm² para o trocador tubular

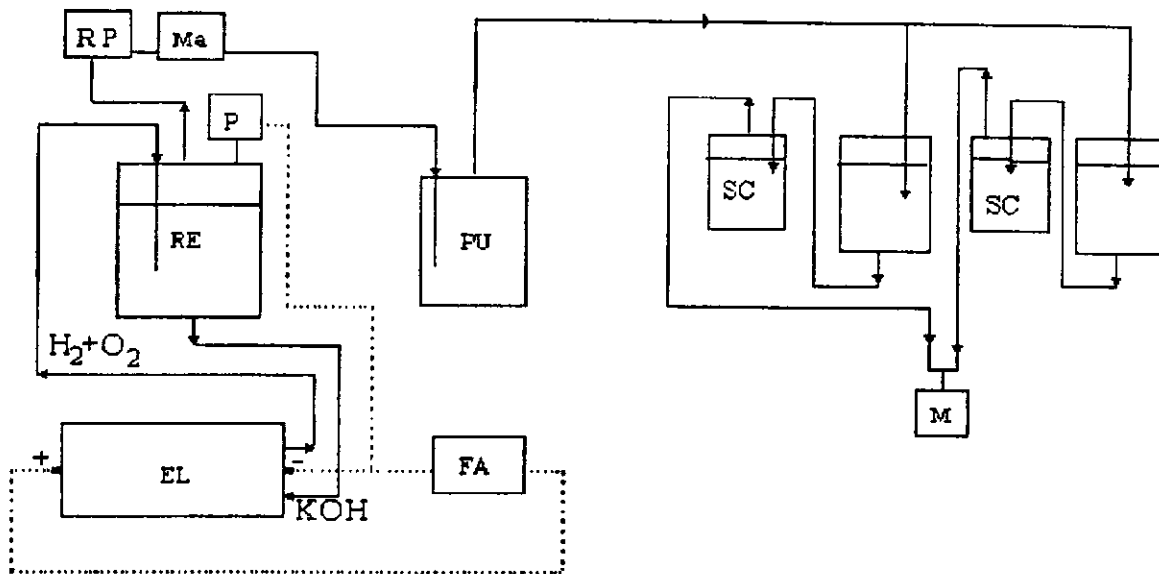
0,3 Kgf/cm² para o trocador convectivo

Produção dos gases : até 1 m³ / h

Relação da mistura : 33% O₂ + 66% H₂

Temperatura máxima de chama : 2800 °C

O fluxograma no interior do sistema eletrolítico, mostrado na Figura 3.1, é o seguinte : a solução de KOH a 28% desce do reservatório para o reator eletrolítico, por gravidade, onde os gases hidrogênio e oxigênio são produzidos. Estes retornam ao eletrolisador para deixar o excesso de eletrólito, passam pelo regulador de pressão, que irá controlar a vazão dos gases e manômetro, que indica a pressão de saída dos gases, em seguida pelos purgadores, selos controladores de chama e saindo pelo maçarico.



reator eletrolítico (EL), reservatório de eletrólito (RE), purgador (PU), selos controladores de chama (SC), pressostato (P), regulador de pressão (RP), manômetro (Ma), maçarico (M) e fonte de alimentação (FA).

Figura 3.1 - Fluxograma do processo eletrolítico

Os principais componentes do sistema eletrolítico são :

a) Reator Eletrolítico Bipolar

O reator eletrolítico, Figura 3.2, é formado por cinquenta células ligadas em série, cada célula opera com uma diferença de potencial de 1,75 volts. As extremidades do reator são formadas por dois cabeçotes, um em cada extremidade, de 30,0 cm de diâmetro onde são fixados 6 parafusos. Entre os cabeçotes situam-se os eletrodos feitos com placas de aço 1020 niqueladas de 0,1 cm de espessura e vinte centímetros de diâmetro, que são separadas entre si por um anel PVC de 0,2 cm de espessura com 26,0 cm de diâmetro. O mesmo possui uma inclinação de doze graus para que os gases formados

saiam com mais facilidade, pelo tubo de coleta dos gases que se encontra no cabeçote mais alto, no qual temos também o tubo para a entrada do eletrólito.

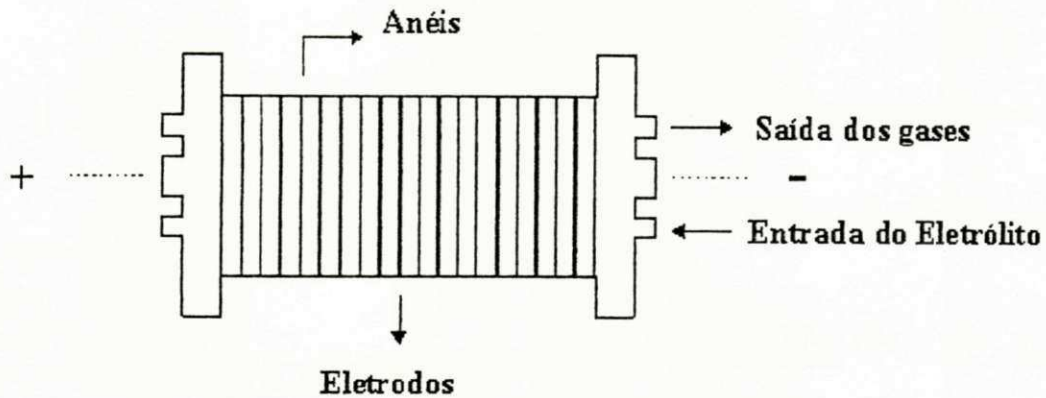


Figura 3.2 - Reator Eletrolítico

O eletrolisador é totalmente imerso de eletrólito. Esta configuração, muito importante, faz com que a mistura $H_2 + O_2$ seja liberada no reservatório do eletrólito, eliminando a possibilidade de recuo de chama em direção ao eletrolisador e permite a condensação do eletrólito arrastado no reservatório de eletrólito (ANDRADE, 1993).

b) Reservatório de Eletrólito

O reservatório de eletrólito, Figura 3.3, tem a função de armazenar a solução eletrolítica que irá abastecer o reator eletrolítico, garantindo assim a autonomia do sistema durante um certo tempo e separar a mistura gás-eletrólito.

O reservatório é um cilindro de aço com 18,0 cm centímetros de diâmetro e 40,0 cm centímetros de altura, com uma abertura na parte superior por onde se faz o reabastecimento da solução eletrolítica e outra para a entrada da emulsão gás-eletrólito e uma abertura inferior por onde o eletrólito é conduzido, por gravidade, para o reator.

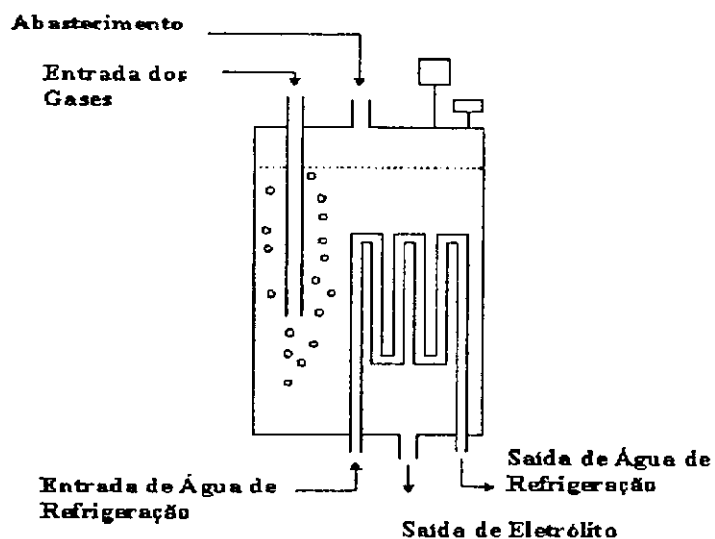


Figura 3.3 - Reservatório de Eletrólito e Sistema de Refrigeração

c) Sistema de Refrigeração

No interior do reservatório de eletrólito existe uma serpentina, na qual circula água no seu interior, que irá resfriar a emulsão gás-eletrólito que sai do reator eletrolítico, mantendo a temperatura no eletrolisador na faixa de 65 a 75 °C, facilitando a separação dos vapores de água, minimizando assim o arraste de eletrólito para os reservatórios de benzina e álcool.

d) Purgador

Tem a finalidade de retirar a umidade residual e traços de KOH, isto ocorre quando a mistura entra no purgador, que é um cilindro de aço com 9,0 cm de diâmetro e 29,0 cm de altura, os gases sofrem uma expansão e o eletrólito, a parte mais pesada da mistura, se condensa e os gases hidrogênio e

oxigênio são conduzidos para os selos controladores de chama. Na saída dos gases colocou-se um T para encaminhar os gases para os vasos de álcool ou benzina . A Figura 3.4 mostra um esquema do purgador.

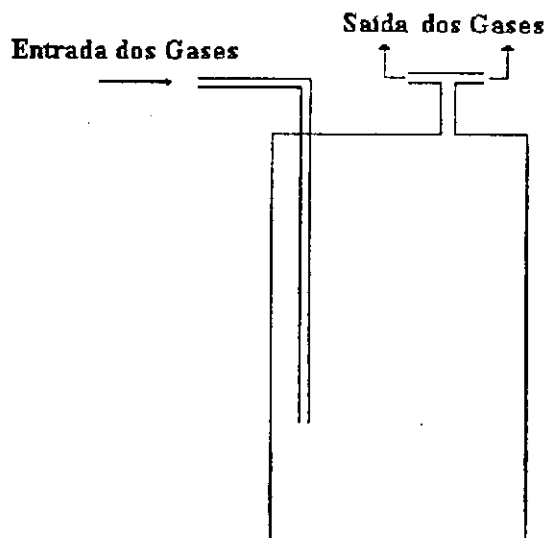


Figura 3.4 - Purgador

e) Selos Controladores de Chama

A Figura 3.5 mostra os selos de álcool e benzina, controladores de chama. Esta unidade agrega vapores de álcool e benzina à mistura hidrogênio-oxigênio, com a finalidade de evitar o retrocesso da chama, diminuindo a velocidade de queima do hidrogênio e conseqüentemente o caráter explosivo. Os controladores são cilindros de aço com 9,0 cm de diâmetro e 18,0 cm de altura.

A benzina abranda a chama, permitindo a queima controlada, mantendo a temperatura da chama do maçarico entre 600 e 1200 °C, dando um formato aberto à chama. O álcool atribui uma propriedade de chama com temperatura mais alta que a benzina, a mais de 2000 °C, e um formato pontual (ALVES, 1992).

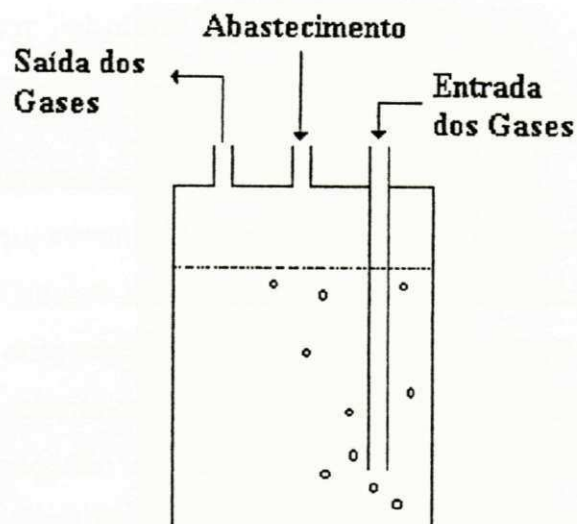


Figura 3.5 - Selo Controlador de Chama

f) Fonte de Alimentação

A fonte de alimentação corresponde ao conjunto: um transformador monofásico de 220 V AC para 110 V AC, fabricada pela Waltec e um sistema retificador de corrente AC-DC com diodos. O sistema elétrico é constituído ainda por um disjuntor de segurança contra altas amperagens de 30 A, um voltímetro e um amperímetro.

g) Pressostato

Para controlar a pressão dos gases entre 1,0 e 1,5 Kgf/cm² é utilizado um pressostato da marca Fligor.

3.1.2 Trocador de Calor Tubular

A Figura 3.6, mostra o trocador de calor tubular o qual é dividido em duas partes: unidade de aquecimento e unidade de dissipação.

A unidade de aquecimento denominada cetilha, apresenta-se como uma fonte inicial de calor a qual é alimentada pela chama oriunda do maçarico. A mesma é formada por dois tubos concêntricos de 2,54 e 5,10 cm de diâmetro, ambos com 50 cm de comprimento e 0,32 cm de espessura. O tubo interno recebe a chama do maçarico a qual aquece o fluido térmico, óleo orgânico sintético Dowtherm *G, que se encontra no tubo externo. O tubo interno está ligado diretamente com a chaminé para a saída dos gases de combustão, constituídos basicamente de vapor de água. Ainda junto com a unidade de aquecimento tem-se, um tubo de alimentação para o fluido térmico de 1,27 cm de diâmetro e 50 cm de altura. As tubulações desta unidade são de ferro galvanizado e isoladas termicamente através de um cordão de amianto.

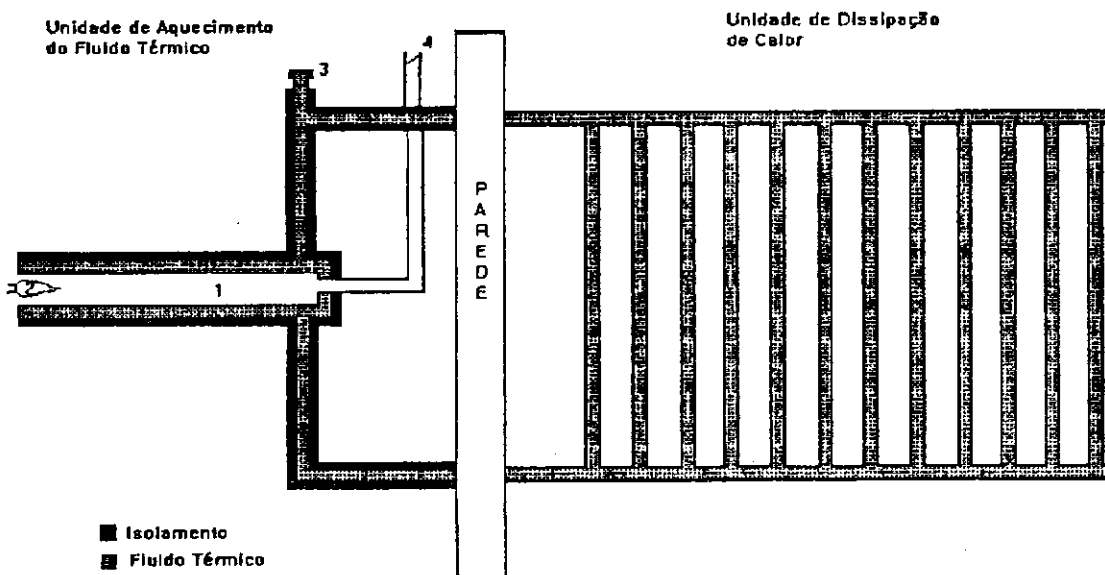


Figura 3.6 - Trocador de Calor Tubular: Cetilha (1), chama do maçarico (2), entrada para alimentação de fluido térmico (3) e chaminé com uma válvula para controlar a saída dos gases (4).

A unidade de dissipação é construída por doze tubos de 80 cm de comprimento e 1,27 cm de diâmetro, dispostos verticalmente e separados por uma distância de 6,0 cm de centro a centro, e conectados a dois tubos horizontais de 2,54 cm de diâmetro (AMORIM, 1995).

O processo ocorre da seguinte maneira: o maçarico é posto na entrada da cetilha do tubo interior ; o calor em seguida é transmitido para o fluido, que se encontra entre os tubos externo e interno; por convecção natural fluido irá se mover rumo a unidade de dissipação, onde o calor será transferido para o ambiente.

3.1.3 - 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 3.7 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 m³/h

Pressão de Funcionamento do Queimador :

GLP 280 mm C.A.

Gás Natural 200 mm C.A.

Dimensões : altura - 63,0 cm
comprimento - 27,0 cm
espessura - 13,0 cm

E as principais características são:

- Não queima oxigênio do ambiente
- Joga para o exterior os gases da combustão
- Aquece 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 uma mangueira. Sendo estes gases queimados na câmara blindada, onde o vapor de água gerado troca calor com o ar do ambiente a ser aquecido.

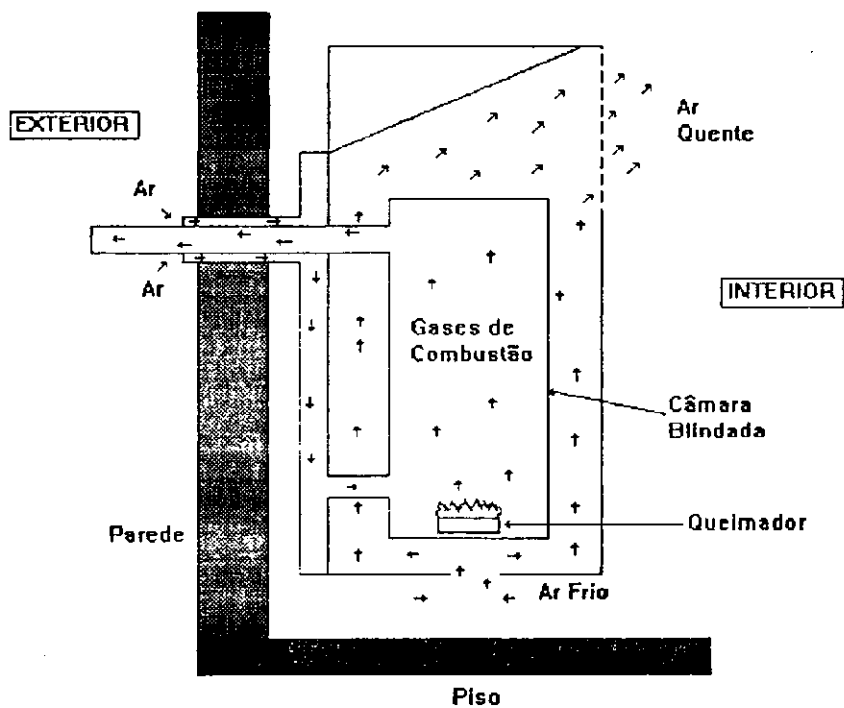


Figura 3.7 - Trocador de calor convectivo

3.1.4 - Fluido Térmico

A escolha de um fluido para transferência de calor abaixo de 180 °C e acima de 430 °C é hoje em dia bem definida e conhecida. Água e vapor são usados abaixo de 180 °C como melhor opção. Sais orgânicos e certos metais liquefeitos atendem à faixa acima de 430 °C, como praticamente únicas opções. Entre essas temperaturas, no entanto, a escolha exige avaliação de alguns fluidos orgânicos existentes hoje no mercado.

Estes fluidos se dividem em duas categorias: os derivados do petróleo, chamados de "Óleos Mineral"; e os fluidos orgânicos sintéticos.

As cinco características principais que devem ser analisadas para se escolher um fluido térmico são: o estado físico de trabalho, vapor ou líquido, a temperatura máxima do processo deve ser inferior a temperatura máxima que o fluido pode atingir sem se degradar (370 °C), a temperatura mínima, para que o fluido possa escoar (-7 °C) , pressão vapor e estabilidade térmica.

Após uma análise que levou em conta todos estes itens optou-se pelo Óleo orgânico sintético Dowtherm *G, cujas características encontram-se relacionadas no apêndice C. Este óleo apresenta vantagens sobre os óleos minerais, tais como : maior estabilidade térmica, devido a sua composição aromática; alta eficiência térmica, devido a sua menor viscosidade, maior calor específico e maior condutividade, os custos de aquecimento são minimizados; vida útil mais longa, por causa de sua baixíssima degradação; etc.

3.2 - Operação dos Sistemas

3.2.1 - Operação do Sistema Eletrolítico

O primeiro passo a ser dado é observar os níveis de água e benzina, verificar se as torneiras do painel traseiro, tampões de abastecimento e maçarico

estão fechados e ligar o sistema de refrigeração (abrindo-se a torneira de água). Em seguida ligar a chave disjuntora e com a chave seletora, posicionar a corrente no máximo de 18 ampères e aguardar o desligamento automático da máquina (significando que os gases já estão na pressão de trabalho).

Se os níveis de água ou benzina estiverem baixos, faz-se o reabastecimento dos mesmos. Isto é feito com o eletrolisador desligado, tomando-se a precaução de despressurizar o sistema antes de abrir os tampões de abastecimento.

3.2.2 - Operação do Trocador de Calor Tubular

Inicialmente, tem-se que abastecer o trocador de calor tubular com óleo orgânico sintético Dowtherm *G, para tal é necessário que o mesmo esteja inclinado para facilitar a saída do ar do sistema. Após ser alimentado, retorna-se o trocador para a posição horizontal e se aquece um pouco o sistema para retirar as bolhas. Conecta-se o bujão com a mangueira no tubo de alimentação, que receberá o óleo expandido.

Alguns testes foram realizados para identificar o melhor posicionamento da chama ainda em fase de construção da cetilha. Foi observado que quanto mais próximo do tubo estiver o bico do maçarico, maior a faixa de altas temperaturas na região central do tubo mais interno. Porém deve ser mantida uma distância mínima de 1,5 a 2,0 cm da ponta do maçarico para a entrada da cetilha, devido a falta de espaço para a entrada do ar e também para se evitar maiores perdas do calor dos gases da combustão do hidrogênio (AMORIN, 1995 a).

A vazão dos gases no maçarico deve ser regulada de modo a potência não exceda 2,4 kW. Esta precaução é tomada para não ultrapassar os limites de segurança do eletrolisador e transformador.

Após ser realizado o experimento, deve-se primeiramente apagar a chama do maçarico, abrindo-se mais a válvula do maçarico, que descolará a

chama do maçarico apagando-a, e logo em seguida fecha-se o maçarico rapidamente. O próximo passo é reduzir a amperagem até zero, através da chave seletora, desliga-se a chave disjuntora, e abre-se o maçarico para despressurizar a máquina eliminando os gases remanescentes.

3.2.3 - Operação com o Trocador de Calor Convectivo

O trocador de calor convectivo é de operação mais simples que o tubular pois não utiliza o maçarico, o hidrogênio é alimentado através de uma mangueira conectada na válvula reguladora de gases (dial de temperatura).

Para iniciar a operação basta abrir a válvula reguladora de gás do trocador e apertar o botão do acendimento automático rapidamente, observando pelo visor se a chama acendeu. Esta é a fase mais delicada na operação com este trocador pois se o queimador não acender, devemos desligar a entrada de gás logo e esperar um pouco; este procedimento evita o acúmulo de gases e diminui os riscos de explosão.

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

3.3 - Metodologia

3.3.1 Comparação entre Combustíveis no Trocador de Calor Convectivo.

Inicialmente o trocador de calor convectivo foi testado com o gás butano e logo após modificado para uso do hidrogênio eletrolítico. O butano utilizado foi oriundo de um botijão de gás de cozinha com uma válvula reguladora de pressão e o hidrogênio do eletrolisador bipolar. A alteração do trocador de calor convectivo se deu na entrada da câmara de combustão, sendo necessário adaptar o sistema de forma que o hidrogênio pudesse ser consumido sem que

houvesse recuo de chama. Para isso foi reduzida a entrada de ar através de uma pequena tubulação contendo pequenos orifícios.

A performance do sistema foi avaliada através da variação da temperatura da sala e do ambiente externo e do consumo dos gases. Os dados foram obtidos com auxílio de um termômetro digital com dois termopares e um medidor de fluxo de gás específico para proporção da mistura hidrogênio e oxigênio, 66% e 33% respectivamente. As tomadas de temperatura foram realizadas em intervalos de 10 minutos em um período total de 180 minutos. A temperatura do interior da sala foi medida utilizando-se um termopar fixado na parede, aproximadamente centro, e para temperatura do ambiente externo foi utilizado um termômetro de mercúrio fixado no exterior da sala, porém no interior do galpão.

Foram realizadas duas séries de quatro bateladas para cada combustível. Depois foi tirada uma média dos dados obtidos a partir das bateladas para cada combustível e analisou-se a performance do sistema.

3.3.2 - Avaliação do Trocador de Calor Tubular

A eficiência energética do sistema foi analisada em função do consumo de energia elétrica e o calor acumulado no ambiente. Foram tomadas as temperaturas do interior da sala e do exterior, através de um termômetro digital e um par de termopares, e o consumo de energia, através do relógio medidor de energia elétrica, em intervalos de 10 minutos durante 180 minutos. A temperatura do interior da sala foi medida da mesma maneira que no teste anterior, já para a temperatura do exterior da sala utilizou-se outro termopar.

Os experimentos foram realizados durante os períodos noturno e diurno com objetivo de se analisar a influência da temperatura externa no aquecimento da sala.

Alguns testes foram realizados com o objetivo de comparar a performance do sistema em duas condições diferentes: (a) a entrada da alimentação do fluido

térmico aberta, permitindo livre expansão e operando nas condições atmosféricas e (b) a entrada da alimentação fechada e desta forma operando sob pressão.

3.3.3 - Avaliação do Trocador de Calor Convectivo.

O procedimento dos experimentos atribuído para o trocador de calor convectivo foi praticamente semelhante ao do trocador de calor tubular. Com apenas uma diferença os gases foram conduzidos através de uma mangueira diretamente ao trocador de calor, ou seja, sem a utilização de um maçarico.

4.0 - Resultados e Discussões

Neste capítulo serão apresentados somente as figuras, as tabelas pertinentes se encontram no Apêndice D. As mesmas seguem a mesma ordem de apresentação das figuras.

4.1 - Comparação entre Combustíveis no Trocador de Calor Convectivo.

Inicialmente o trocador de calor convectivo foi testado com dois tipos de combustível; butano e hidrogênio eletrolítico para fins de comparação.

As Figuras 4.1 a 4.4 e 4.5 a 4.8 representam o comportamento da variação da temperatura interna da sala (T_{Sala}) e externa ($T_{Externa}$) em função do tempo utilizando o gás butano e o hidrogênio respectivamente.

Analisando o comportamento das curvas para ambos combustíveis observa-se o seguinte: Durante os primeiros 20 minutos ocorreu uma acentuada elevação de temperatura da sala. No intervalo de 20 a 30 minutos o comportamento da curva de temperatura da sala, aparentemente apresenta uma fase de transição, onde a elevação de temperatura se dá em menor proporção. Após esta fase o sistema atinge um regime estabelecido.

Com o objetivo de comparar os sistemas foram calculadas as médias aritméticas dos dados experimentais das duas séries de 4 bateladas, conforme mencionado no Capítulo 3.0, item 3.3.1.

A Figura 4.9 representa as temperaturas médias interna da sala e externa para o hidrogênio (Méd. Sala H) e (Méd Ext H) e para o Butano (Méd Sala B) e (Méd Ext B) respectivamente.

Esta figura mostra que o butano aquece o ambiente mais rapidamente que o hidrogênio, apesar da temperatura externa ser maior para este último.

A partir da Tabela D.9 a qual se encontra no Apendice D, foram calculadas as taxas de aquecimento de temperatura da sala.

A taxa de aquecimento inicial com o butano é da ordem de 0,24 °C/min enquanto que com o hidrogênio é de 0,18 °C/min. Na faixa de transição os dois combustíveis apresentaram comportamento semelhante, sendo a taxa de elevação de temperatura do butano cerca de 0,095 °C/min e 0,096 °C/min para o hidrogênio.

Analisando com mais detalhe a elevação de temperatura da sala, aplicou-se uma linearização para os dois combustíveis. Conforme mencionado anteriormente o butano apresenta a taxa de aquecimento foi superior a do hidrogênio. Neste sentido a análise desta taxa foi feita para o hidrogênio para um intervalo de 30 a 180 minutos, já para o butano foi dividida em duas partes de intervalo de tempo de 30 a 110 minutos e 120 a 180 minutos. A Figura 4.10 mostra as retas obtidas a partir da linearização dos dados de temperatura da sala na faixa de regime estabelecido. As equações destas retas são:

$$\text{para o hidrogênio : } T = 25,28 + 0,0235 t \quad (41)$$

$$\text{para o butano : } T = 25,31 + 0,03979 t \quad (\text{primeira parte}) \quad (42)$$

$$\text{e } T = 27,28 + 0,02178 t \quad (\text{segunda parte}) \quad (43)$$

onde : T é a Temperatura da sala (°C) e
t o tempo (min)

Tomando-se a média aritmética entre as taxas da primeira e segunda partes do butano e comparando-se com a do hidrogênio, observa-se que a taxa do butano é aproximadamente 30% maior que a do hidrogênio.

Considerando para ambos os sistemas que as condições da sala não foram isoladas, o hidrogênio apresenta em função do seu coeficiente angular uma taxa de elevação de temperatura superior ao do butano após os 120 minutos.

A vazão do gás butano com a válvula comum de um butijão de gás foi de 0,145 kg/h, fornecida pela empresa fabricante do trocador de calor. Como os testes tiveram uma duração de 180 minutos, foram consumidos 0,435 Kg de Butano. Como o poder calorífico do butano é 11000 kCal/kg, logo foram consumidos 4785 Kcal.

O rotâmetro indicou para a mistura dos gases, hidrogênio e oxigênio, a vazão medida foi de 0,85 Nm³/h. Como a relação é de 2 partes de hidrogênio para 1 parte de oxigênio, as vazões serão 0,566 Nm³/h e 0,283 Nm³/h respectivamente. Como os testes duraram 180 minutos, o total de hidrogênio utilizado foi de 1,698 Nm³ e considerando o poder calorífico do hidrogênio de 2700 Kcal/m³, teremos assim 4544 Kcal consumidas.

Comparando o consumo de energia entre o gases, constata-se que o butano consumiu 4,53% a mais de energia que o hidrogênio, entretanto, proporcionou uma elevação da temperatura da sala (diferença entre a temperatura final e a inicial) 26% acima.

É importante salientar que a temperatura externa do meio ambiente praticamente para as bateladas acima não apresentou uma diferença significativa. Entretanto para as bateladas posteriores com o hidrogênio/oxigênio a variação da temperatura externa será levada em consideração.

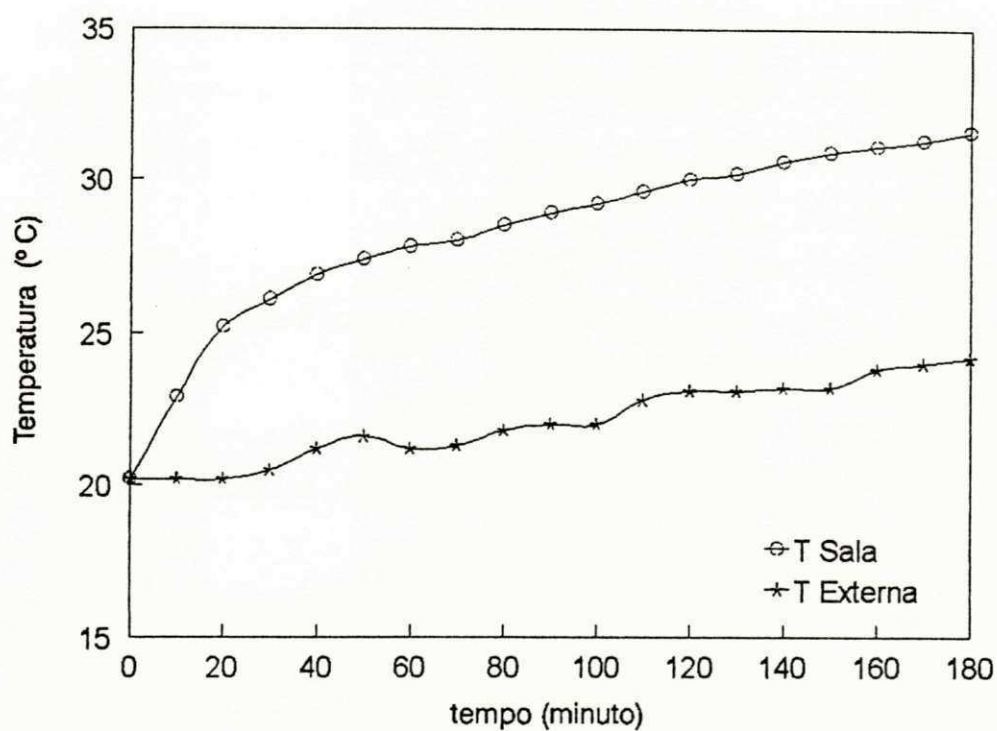


Figura 4.1 - Temperatura no interior da sala (T Sala) e externa (T Externa) em função do tempo, no trocador de calor convectivo, utilizando Butano como combustível.

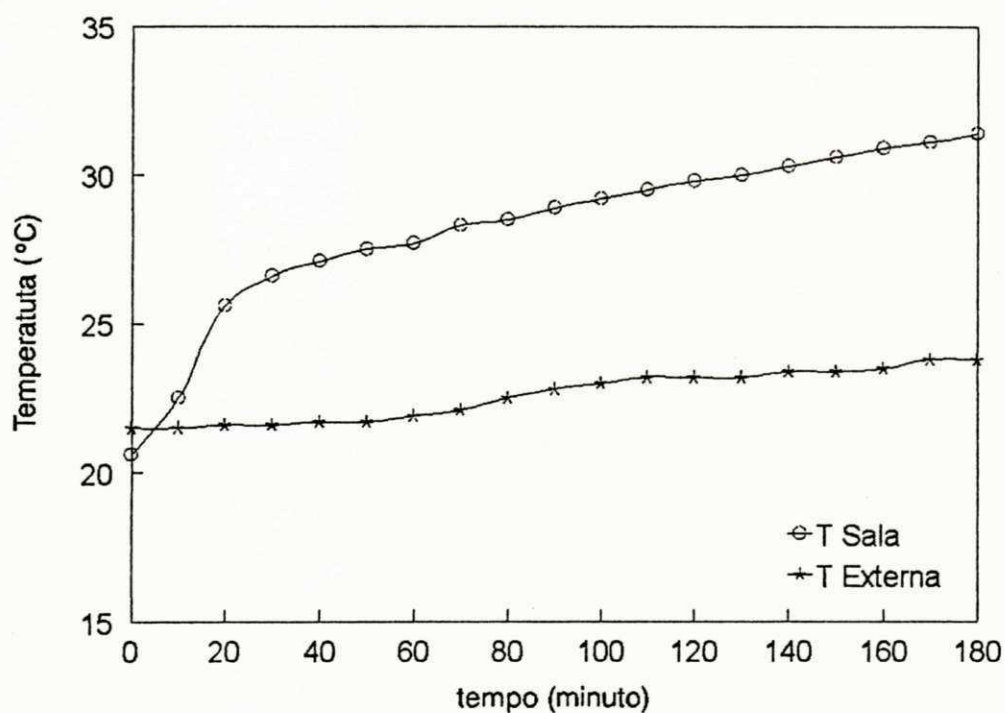


Figura 4.2 - Temperatura no interior da sala (T Sala) e externa (T Externa) em função do tempo, no trocador de calor convectivo, utilizando Butano como combustível.

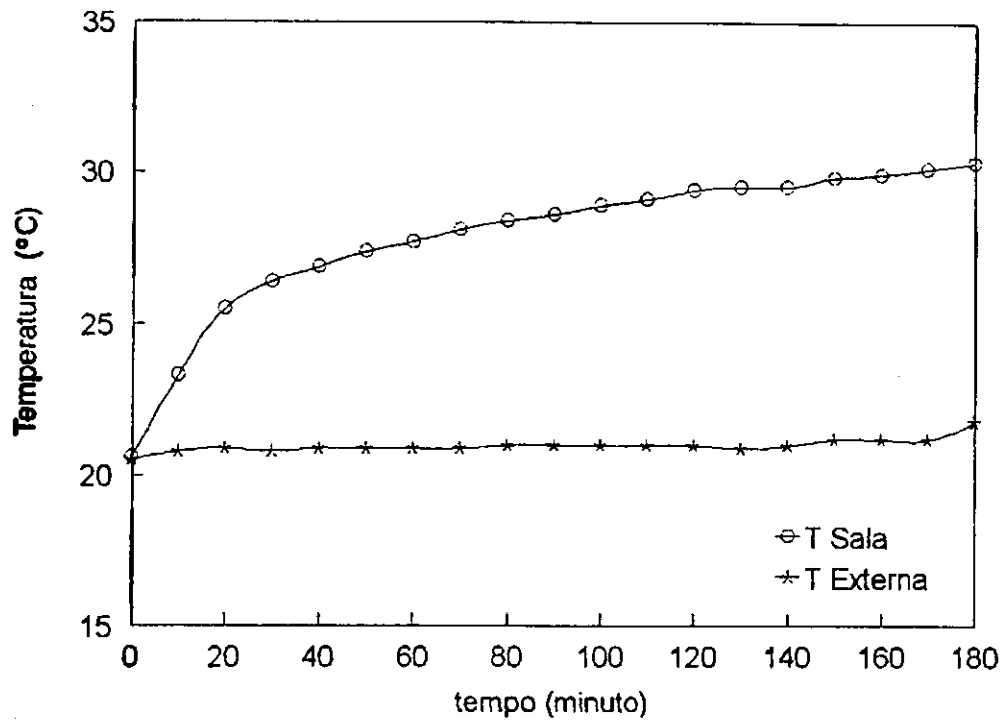


Figura 4.3 - Temperatura no interior da sala (T Sala) e externa (T Externa) em função do tempo, no trocador de calor convectivo, utilizando Butano como combustível.

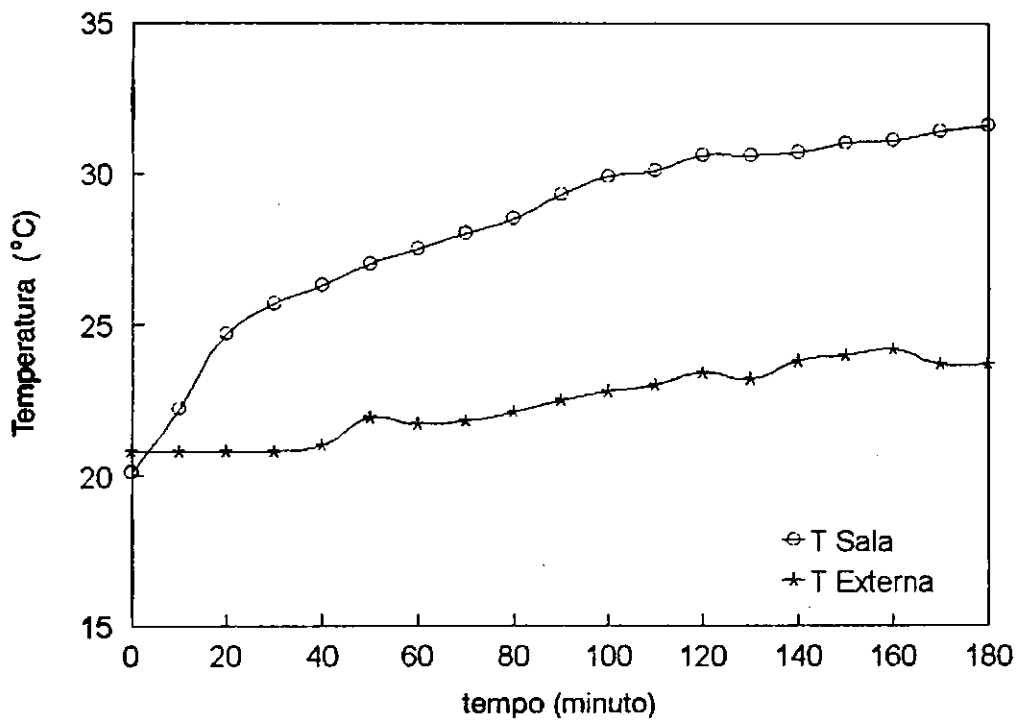


Figura 4.4 - Temperatura no interior da sala (T Sala) e externa (T Externa) em função do tempo, no trocador de calor convectivo, utilizando Butano como combustível.

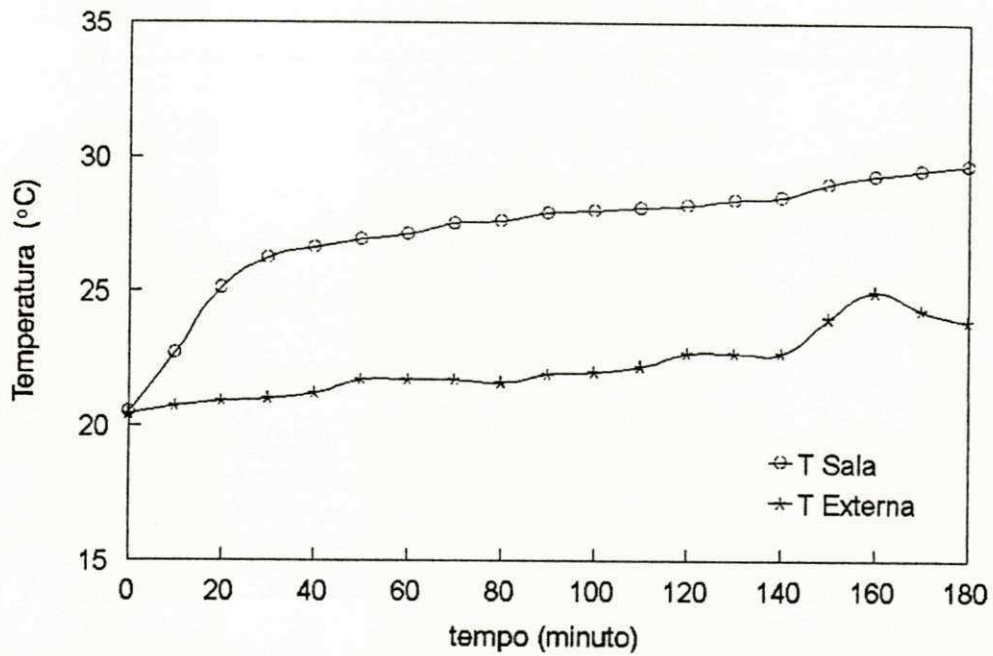


Figura 4.5 - Temperatura no interior da sala (T Sala) e externa (T Externa) em função do tempo, no trocador de calor convectivo, utilizando Hidrogênio Eletrolítico como combustível.

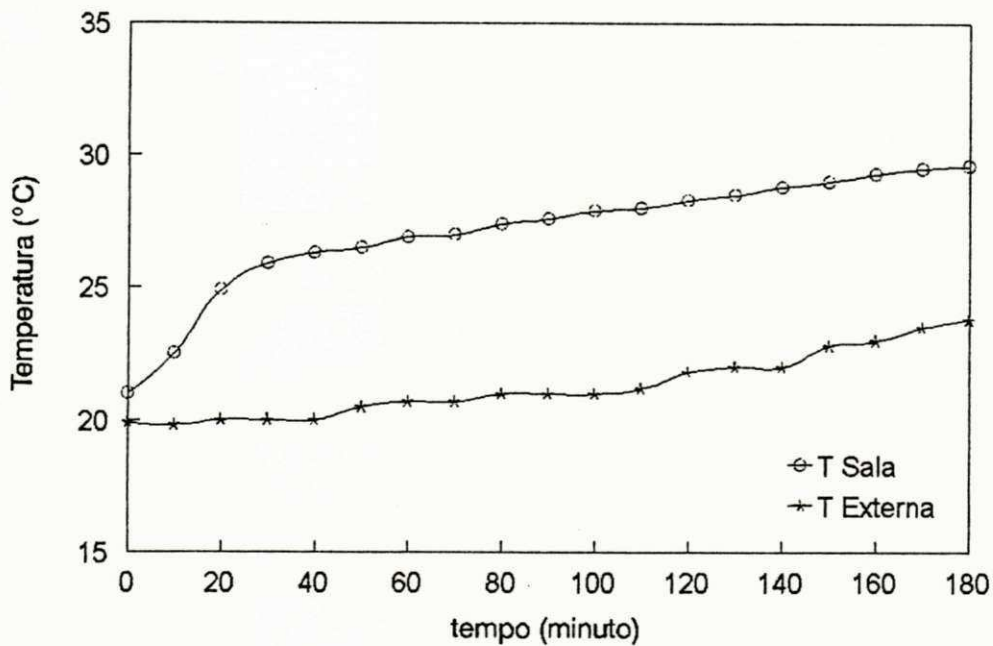


Figura 4.6 - Temperatura no interior da sala (T Sala) e externa (T Externa) em função do tempo, no trocador de calor convectivo, utilizando Hidrogênio Eletrolítico como combustível.

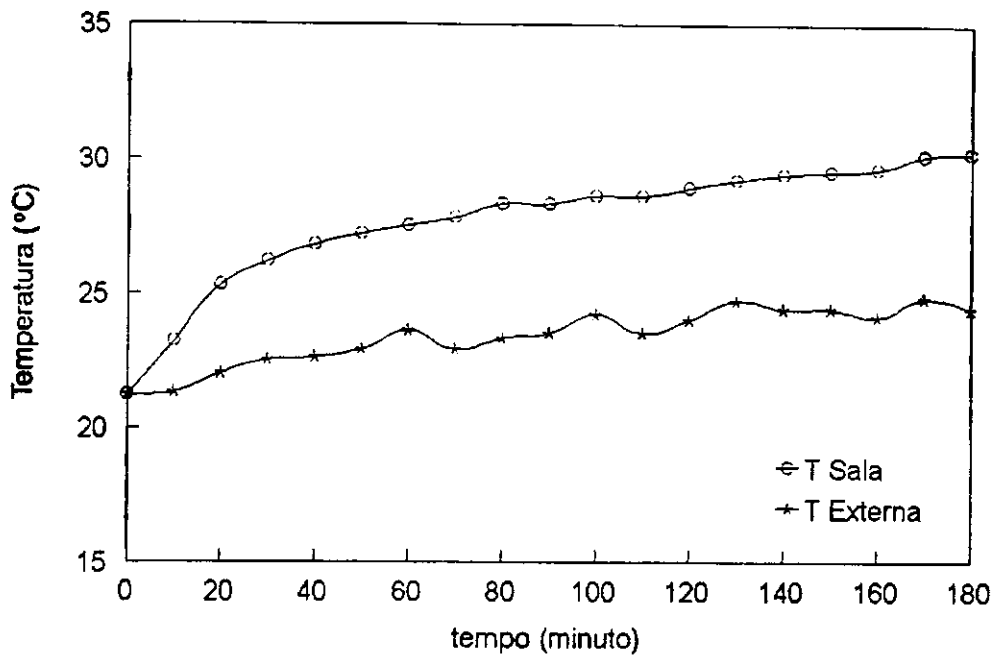


Figura 4.7 - Temperatura no interior da sala (T Sala) e externa (T Externa) em função do tempo, no trocador de calor convectivo, utilizando Hidrogênio Eletrolítico como combustível.

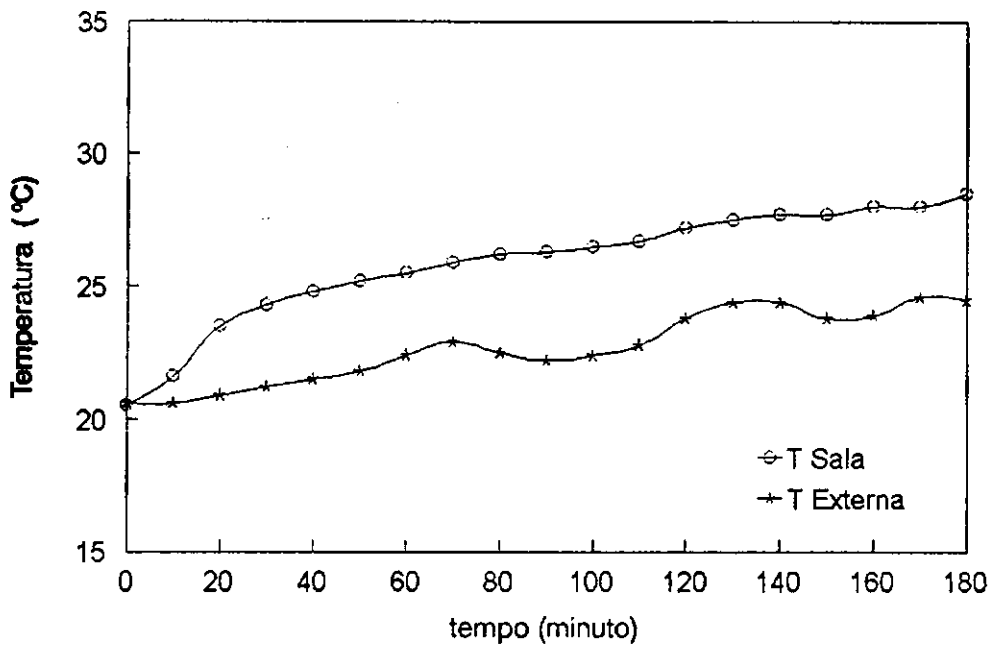


Figura 4.8 - Temperatura no interior da sala (T Sala) e externa (T Externa) em função do tempo, no trocador de calor convectivo, utilizando Hidrogênio Eletrolítico como combustível.

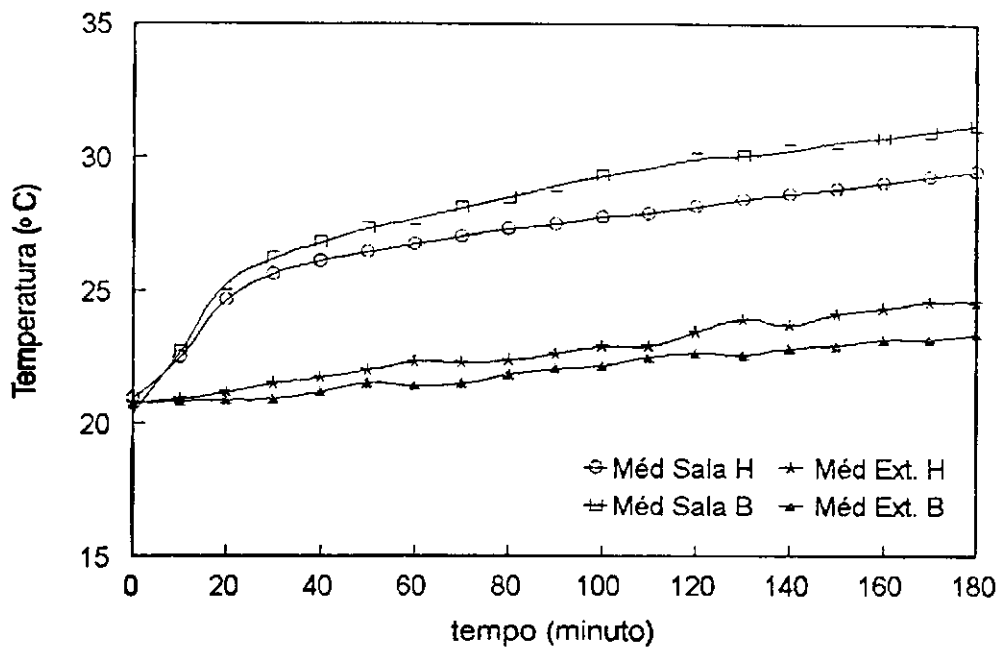


Figura 4.9 - Temperaturas médias no interior da sala (Méd Sala H) e externa (Méd Ext. H) utilizando hidrogênio eletrolítico e no interior da sala (Méd Sala B) e externa (Méd Ext. B) utilizando butano em função do tempo, no trocador de calor convectivo.

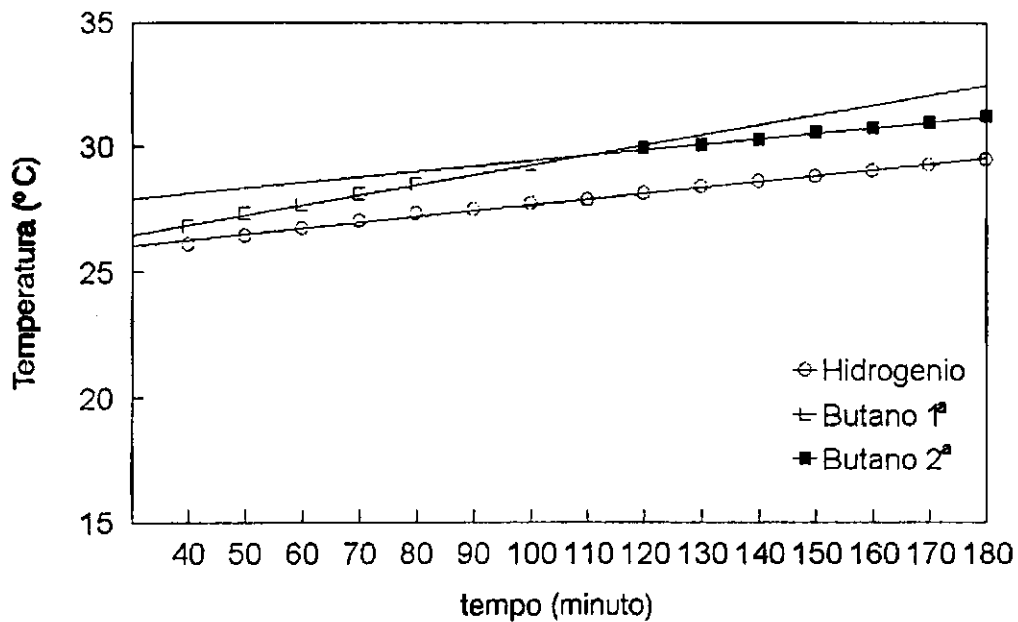


Figura 4.10 - Retas das curvas de aquecimento da sala, utilizando hidrogênio eletrolítico (Hidrogênio) e Butano na primeira (Butano 1ª) e segunda (Butano 2ª) partes na faixa de regime estabelecido em função do tempo.

4.2 - Avaliação do Trocador de Calor Tubular

A Figura 4.11 a 4.20 mostram a variação da temperatura no interior da sala (T Sala) e do exterior (T Externa) e o consumo de energia elétrica (Relógio) em função do tempo.

As Figuras 4.11 a 4.15 mostram os testes realizados com a temperatura externa mais baixa, procurando assim encontrar a diferença máxima entre a temperatura da sala e a externa. A primeira delas foi realizada no período diurno, pela manhã, só que estava chovendo e a temperatura externa registrava em torno de 22 °C e as quatro restantes no período noturno. Nestas figuras observa-se que ocorre uma estabilização da temperatura próximo aos 90 minutos. Neste ponto o sistema entra em equilíbrio não elevando mais a temperatura do ambiente, podendo mesmo esta temperatura começar decrescer devido a perda de calor para o exterior, que aumenta com a diminuição da temperatura do exterior.

A média da diferença de temperatura entre a sala e o ambiente externo no início do período de estabilização, em torno de 90 minutos, é aproximadamente 10 °C. Este foi o valor máximo atingido entre a temperatura da sala e a externa para o trocador de calor tubular. A energia elétrica consumida para alcançar esta diferença de temperatura foi de aproximadamente 2,9 kWh (média da energia consumida até os 90 minutos).

As Figuras 4.14 e 4.15, assim como as Figuras 4.17 ou 4.19 e 4.18, quando comparadas mostram que o sistema fechado ou aberto (bujão do tubo de alimentação do óleo sintético com mangueira) não apresentaram alterações significativas no rendimento do trocador de calor tubular.

A Figura 4.22 mostra a média da temperatura da sala (Méd. Sala) e do consumo de energia (Méd. Rel.) para as bateladas correspondentes as Figuras 4.16 a 4.21.

O regime estabelecido que se inicia aos 50 minutos e vai até o final foi dividido em duas partes, uma que vai dos 50 aos 90 minutos e outra dos 90 ao

180 minutos. Esta divisão é feita devido a taxa de elevação da temperatura na primeira fase foi aproximadamente o dobro da segunda. As retas obtida a partir dos pontos da temperatura da sala nesta faixa são representadas através das Equações 37 e 38 e apresentadas na Figura 4.23.

$$\text{Primeira fase } T = 27,96 + 0,042 t \quad (44)$$

$$\text{Segunda fase } T = 29,92 + 0,020 t \quad (45)$$

onde : T é a temperatura da sala ($^{\circ}\text{C}$) e
 t o tempo (min)

Ainda observando a Figura 4.22 a faixa de aquecimento inicial vai até os 50 minutos, onde primeiramente o óleo é aquecido para depois transferir o calor para o ambiente. Observa-se que nos primeiros 10 minutos a curva da temperatura da sala ascendeu lentamente para em seguida tomar um procedimento mais rápido. O consumo de energia foi da ordem de 0,0357 kWh/min e como as bateladas tem duração de 180 minutos, gastou-se 6,42 Kwh para elevar a temperatura da sala em 9,42 $^{\circ}\text{C}$ e uma diferença em relação ao ambiente externo de 6,7 $^{\circ}\text{C}$.

No período noturno, o consumo foi da ordem de 0,0332 kWh/min, com um consumo total de 4,98 kWh para elevar a temperatura da sala em 6,46 $^{\circ}\text{C}$ e uma diferença para o ambiente de 10,44 $^{\circ}\text{C}$.

O calor acumulado na sala durante o período diurno, baseado na média dos testes referentes as Figuras 4.16 a 4.20, foi de 49,7264 kJ ou 11,88460 kCal. O cálculo foi realizado utilizando-se a Equação 40 e encontra-se no apêndice E.

Podemos expressar este calor acumulado em kWh, para isso basta multiplicar o valor em kJ por $2,777 \times 10^{-4}$. Fazendo isso obtem-se Q igual a $1,3809 \times 10^{-2}$ kWh.

Analisando este valor com o da energia gasta, observa-se que aproximadamente só 0,2% desta energia ficou acumulada na sala, aquecendo-a em 9,38 °C.

Observou-se a partir da figuras mencionadas acima que o efeito da temperatura externa contribuiu para o aquecimento da sala durante os experimentos realizados no período diurno. Enquanto que, àquelas realizadas a noite a temperatura externa absorveu a energia interna da sala, fazendo com que a temperatura da sala se estabilizasse a partir dos 90 minutos e oferecendo uma diferença de aproximadamente de 10 °C.

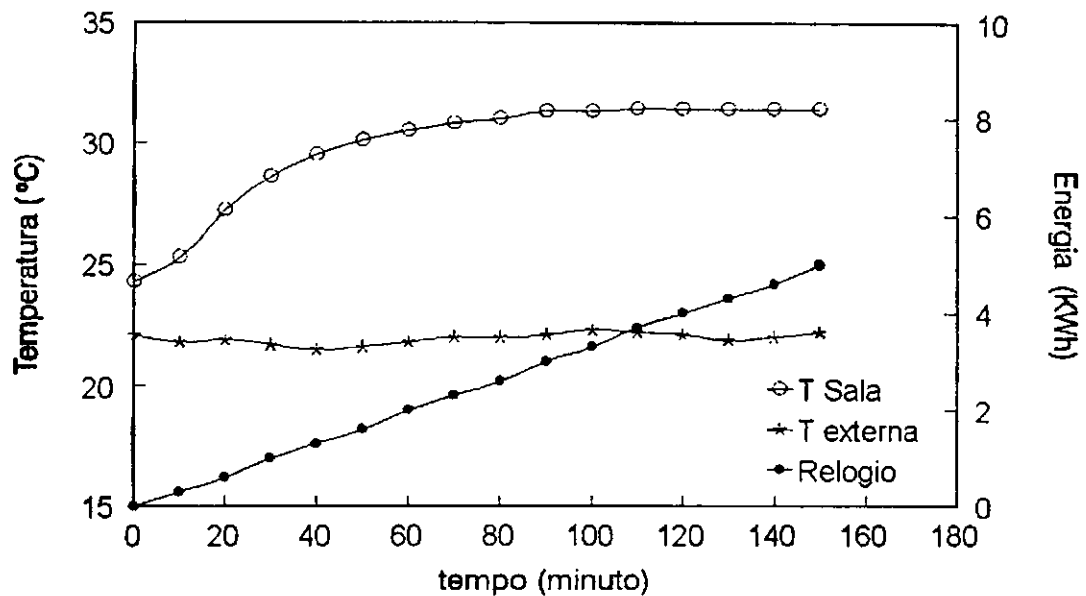


Figura 4.11 - Temperatura do interior da sala (T Sala), do exterior (T Externa) e energia consumida (Relógio) em função do tempo no trocador de calor tubular com as seguintes condições : bujão do tubo de alimentação aberto e período diurno.

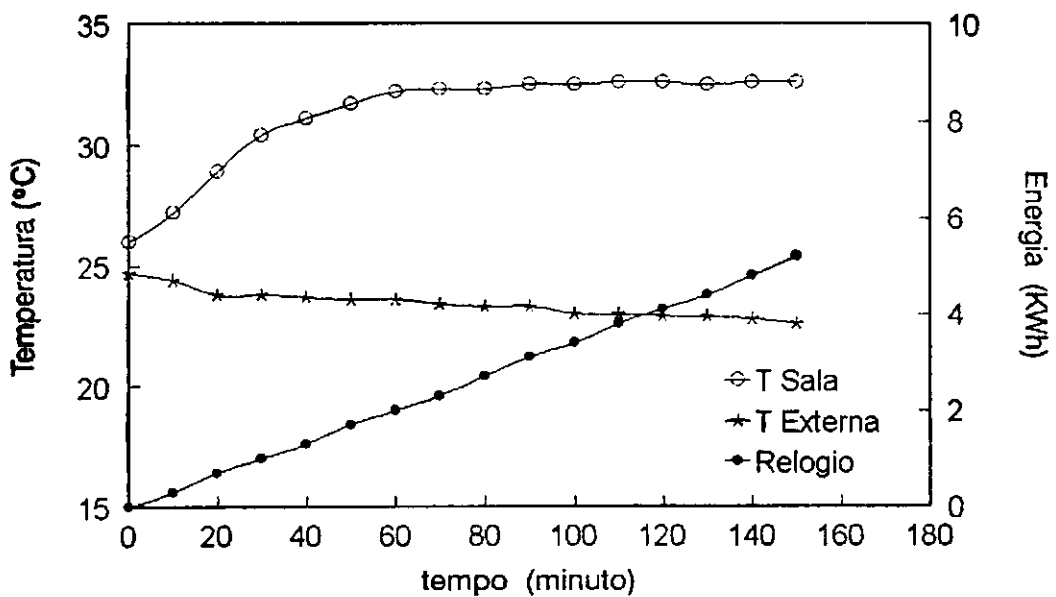


Figura 4.12 - Temperatura do interior da sala (T Sala), do exterior (T Externa) e energia consumida (Relógio) em função do tempo no trocador de calor tubular com as seguintes condições : bujão do tubo de alimentação aberto e período noturno.

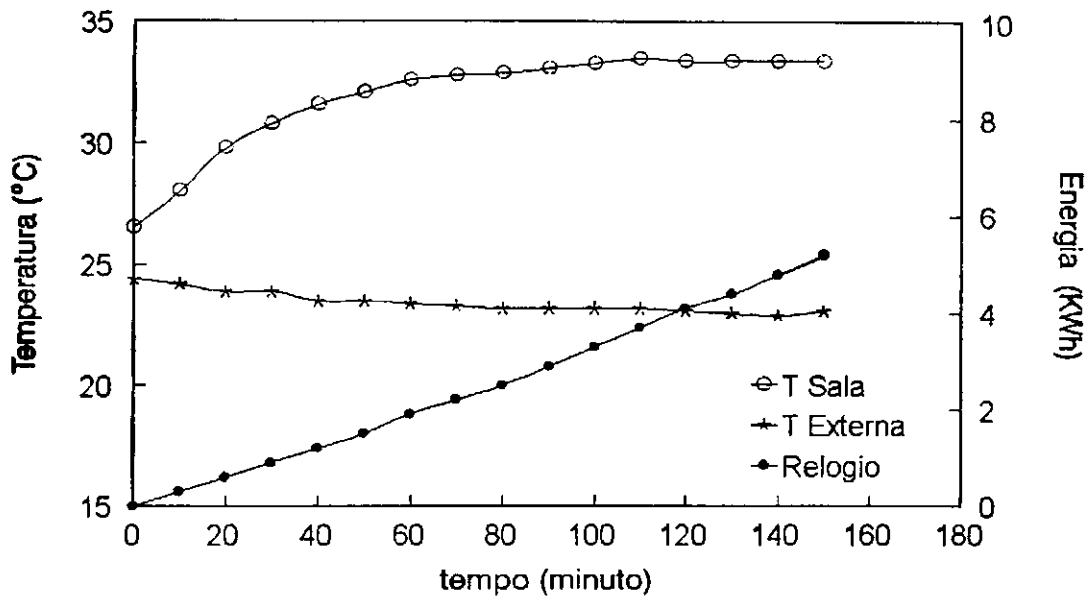


Figura 4.13 - Temperatura do interior da sala (T Sala), do exterior (T Externa) e energia consumida (Relógio) em função do tempo no trocador de calor tubular com as seguintes condições : bujão do tubo de alimentação aberto e período noturno.

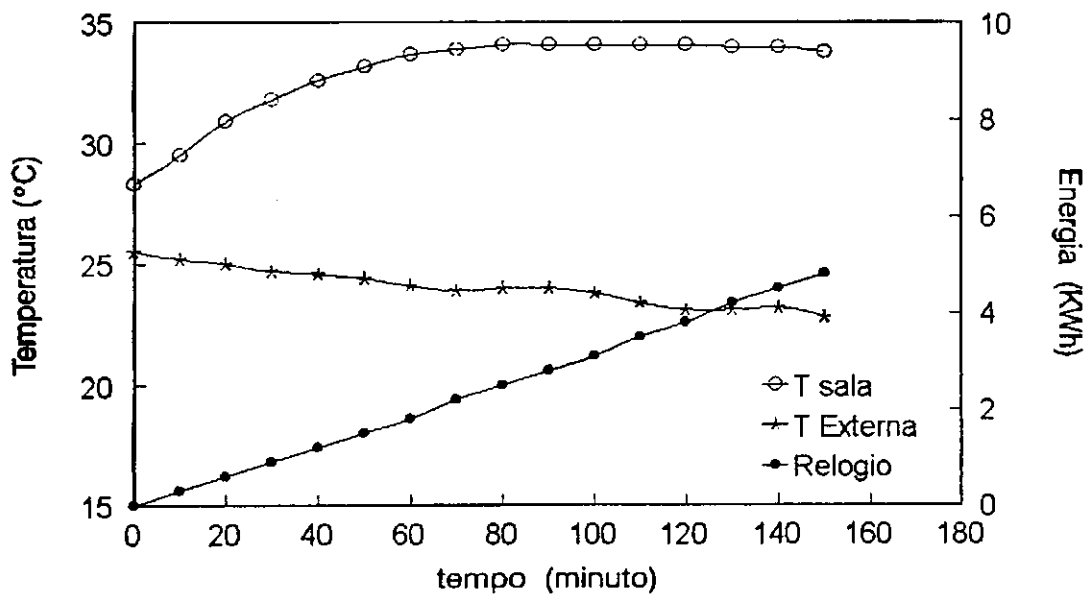


Figura 4.14 - Temperatura do interior da sala (T Sala), do exterior (T Externa) e energia consumida (Relógio) em função do tempo no trocador de calor tubular com as seguintes condições : bujão do tubo de alimentação aberto e período noturno.

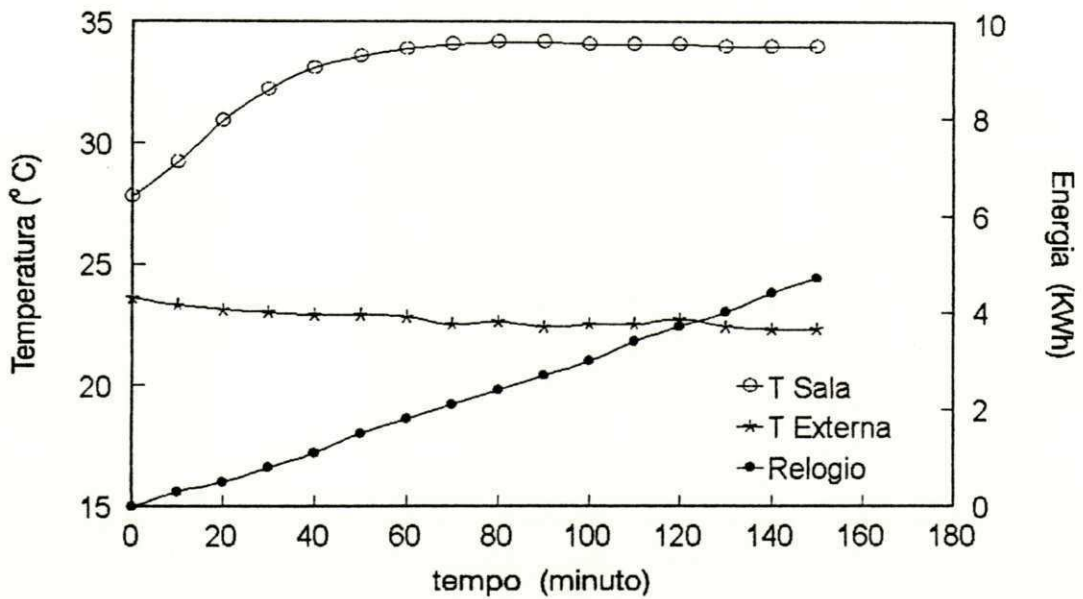


Figura 4.15 - Temperatura do interior da sala (T Sala), do exterior (T Externa) e energia consumida (Relógio) em função do tempo no trocador de calor tubular com as seguintes condições : bujão do tubo de alimentação fechado e período noturno.

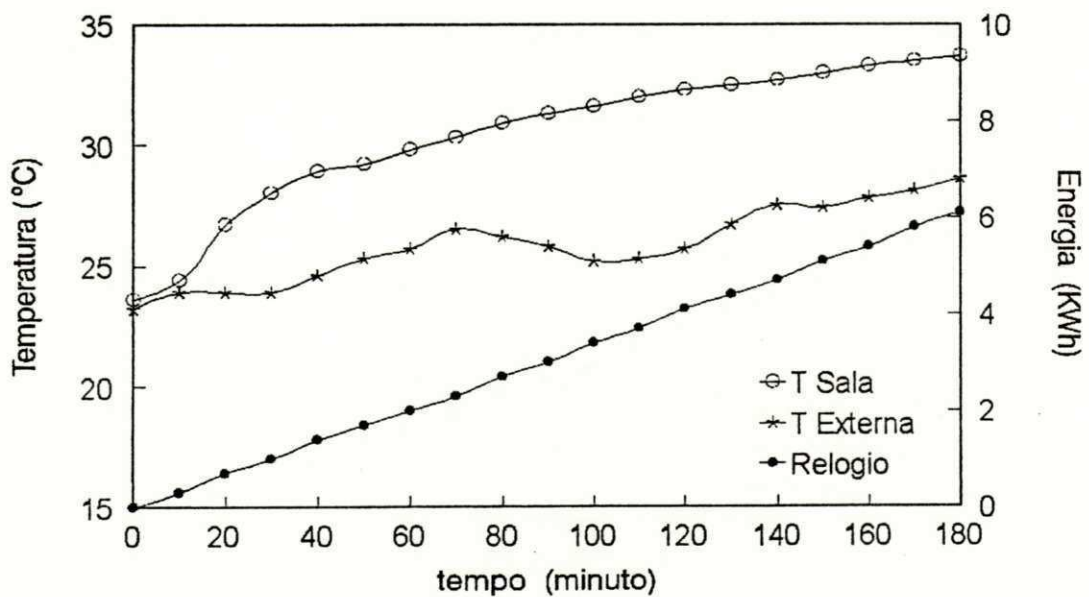


Figura 4.16 - Temperatura do interior da sala (T Sala), do exterior (T Externa) e energia consumida (Relógio) em função do tempo no trocador de calor tubular com as seguintes condições : bujão do tubo de alimentação fechado e período diurno.

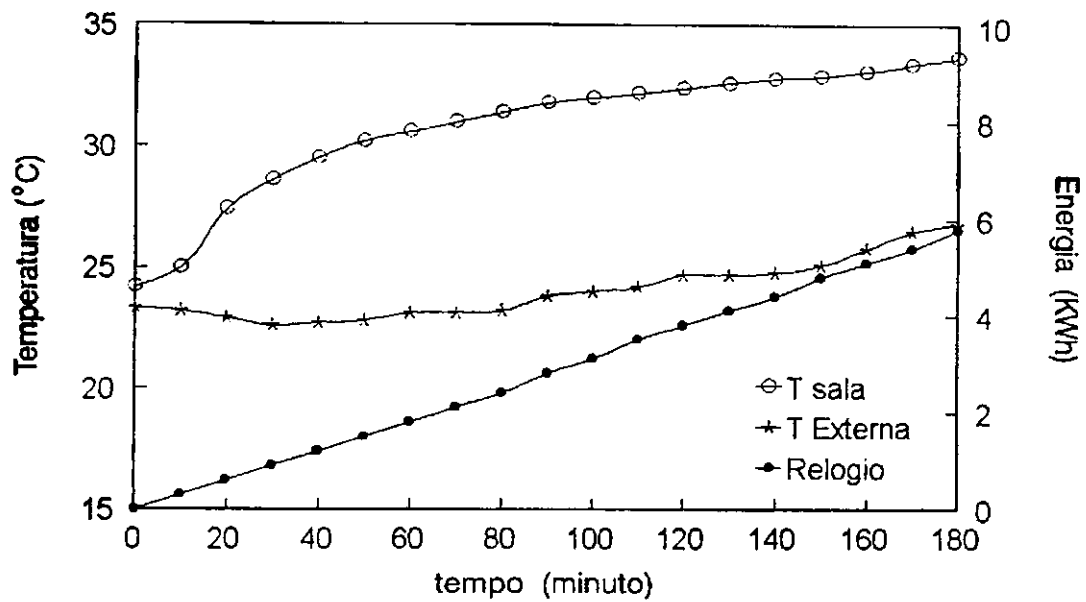


Figura 4.17 - Temperatura do interior da sala (T Sala), do exterior (T Externa) e energia consumida (Relógio) em função do tempo no trocador de calor tubular com as seguintes condições : bujão do tubo de alimentação aberto e período diurno.

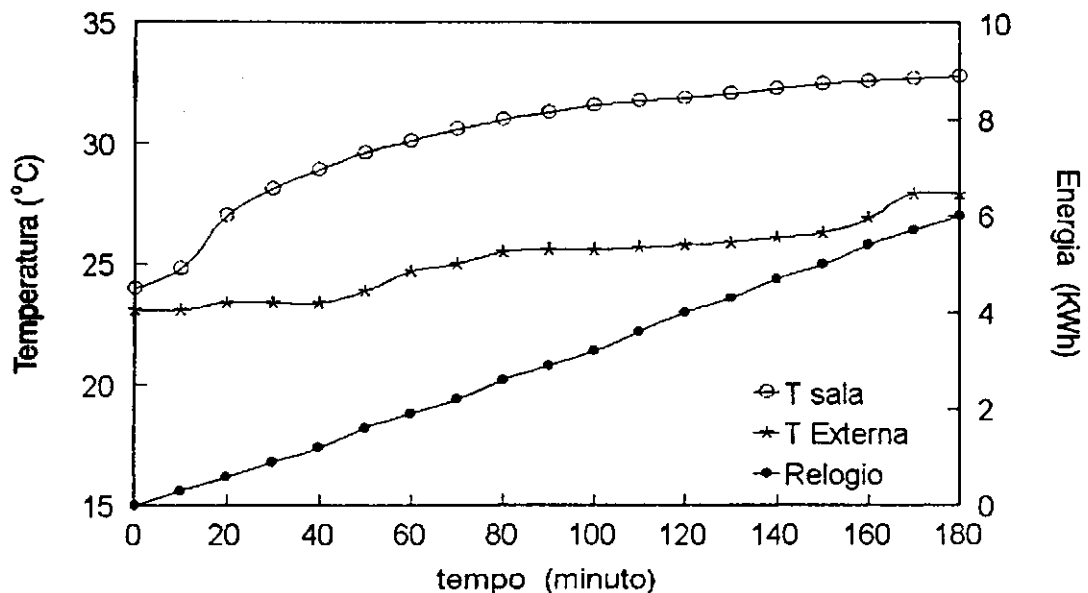


Figura 4.18 - Temperatura do interior da sala (T Sala), do exterior (T Externa) e energia consumida (Relógio) em função do tempo no trocador de calor tubular com as seguintes condições : bujão do tubo de alimentação fechado e período diurno.

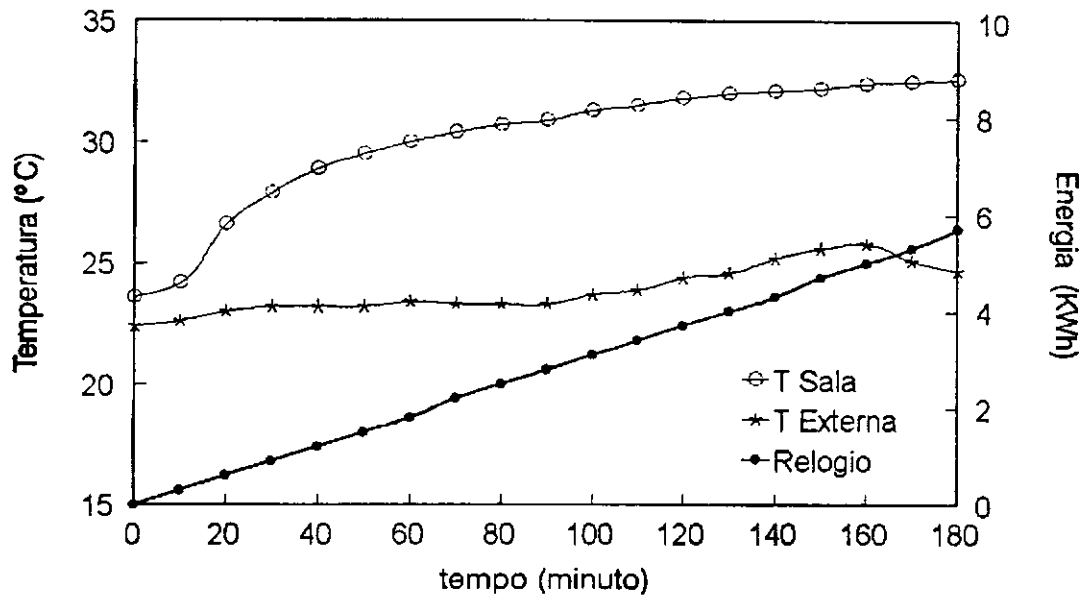


Figura 4.19 - Temperatura do interior da sala (T Sala), do exterior (T Externa) e energia consumida (Relógio) em função do tempo no trocador de calor tubular com as seguintes condições : bocal do tubo de alimentação aberto e período diurno.

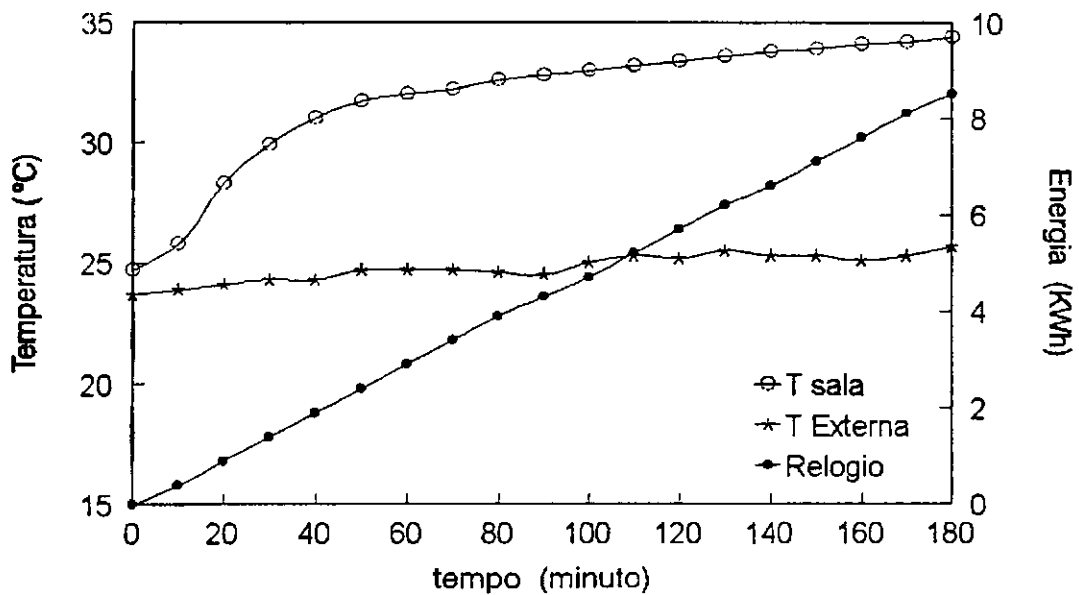


Figura 4.20 - Temperatura do interior da sala (T Sala), do exterior (T Externa) e energia consumida (Relógio) em função do tempo no trocador de calor tubular com as seguintes condições : bocal do tubo de alimentação aberto e período diurno.

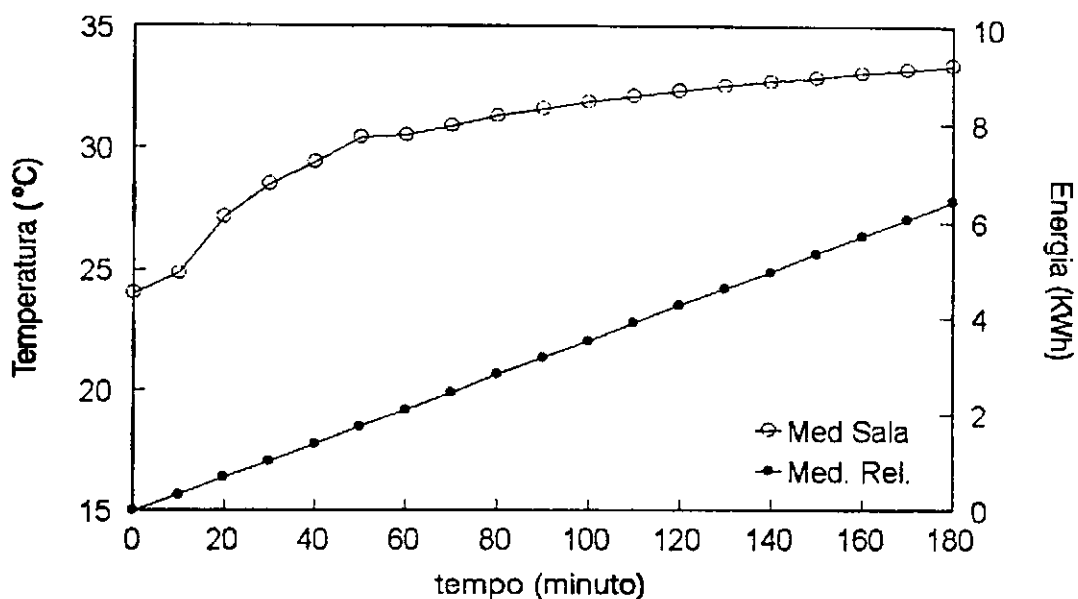


Figura 4.21 - Temperatura média do interior da sala (Méd. Sala) e consumo médio de energia (Méd. Rel.) em função do tempo para os testes referentes as Figuras 4.16 a 4.20.

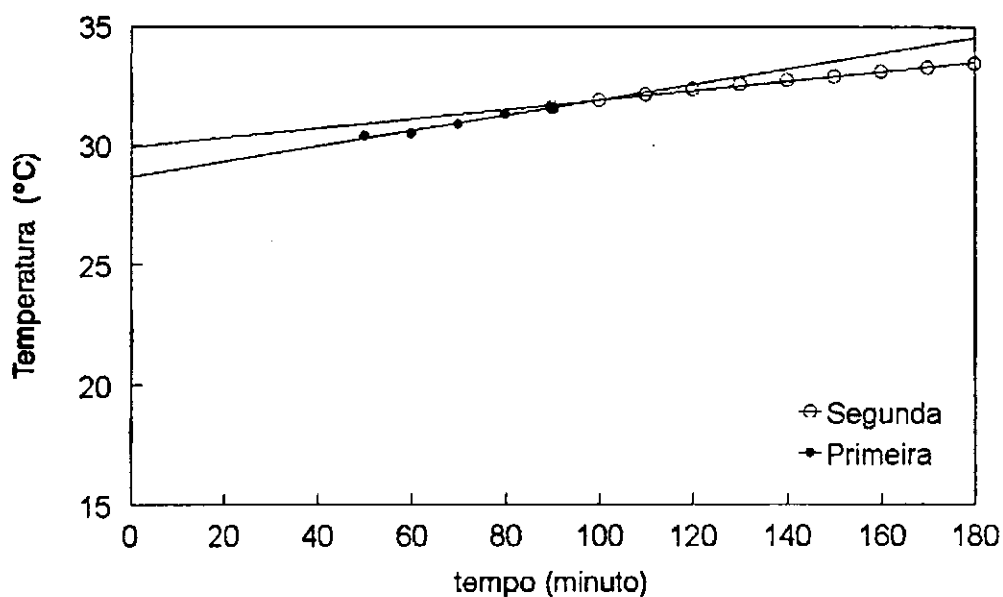


Figura 4.22 - Retas obtidas a partir da linearização dos dados da temperatura média da sala entre 50 e 180 minutos, para a primeira (Primeira) e segunda (Segunda) parte em função do tempo nos testes referentes as Figuras 4.16 a 4.20.

4.3 - Avaliação do Trocador de Calor Convectivo

O consumo de energia elétrica (Relógio) e as temperaturas no interior (T Sala) e no exterior (T Externa) da sala são mostrados nas Figuras 4.23 a 4.28 em função do tempo. As Figuras 4.23 a 4.25 se referem aos testes para o período noturno e as Figuras 4.26 a 4.28 ao período diurno. Os testes noturnos procuraram estimar a diferença máxima de temperatura entre o interior da sala e o exterior.

Assim como no trocador tubular, as bateladas noturnas no convectivo se encerraram aos 150 minutos, devido a temperatura no interior da sala ter entrado em equilíbrio.

Este equilíbrio é alcançado por volta dos 60 minutos, fazendo com que a temperatura não mais se eleve. O gradiente de temperatura (externa-interna) foi 10,5 °C e com uma elevação de temperatura da sala de 5,67 °C. O consumo total de energia ao longo dos 150 minutos foi 3,43 kWh.

O desempenho em termos de taxa de elevação de temperatura e o calor acumulado na sala foram calculados utilizando-se a média dos resultados das bateladas diurnas, mostrada na Figura 4.29, onde (Med. Sala) representa a temperatura média no interior da sala e (Med. Rel.) o consumo médio de energia. Através desta figura podemos observar que até os 20 minutos temos o aquecimento inicial, onde a taxa de aquecimento é de 0,185 °C/min e dos 40 minutos em diante temos o regime estabelecido que apresenta a seguinte equação :

$$T = 26,75 + 0,02807 t \quad (46)$$

onde : T é a Temperatura da sala (°C) e
t o tempo (min)

Entre os 20 e os 40 minutos tem-se uma fase de transição, onde a taxa de elevação de temperatura decresce. Foram consumidos 4,36 kWh para elevar a temperatura da sala em 9,03 °C com uma diferença de temperatura em relação ao exterior de 4,7 °C, no período diurno. Utilizou-se a Equação 40 para calcular o calor acumulado no interior da sala (vide Apêndice E), cujo resultado foi de 47,41 kJ ou 11,32 kcal. 0,3 % da energia elétrica consumida permaneceu no interior da sala a qual corresponde a $1,3157 \times 10^{-2}$ Kwh.

A Figura 4.30 mostra o comportamento da linearização obtida a partir dos dados da temperatura média da sala entre 40 e 180 minutos.

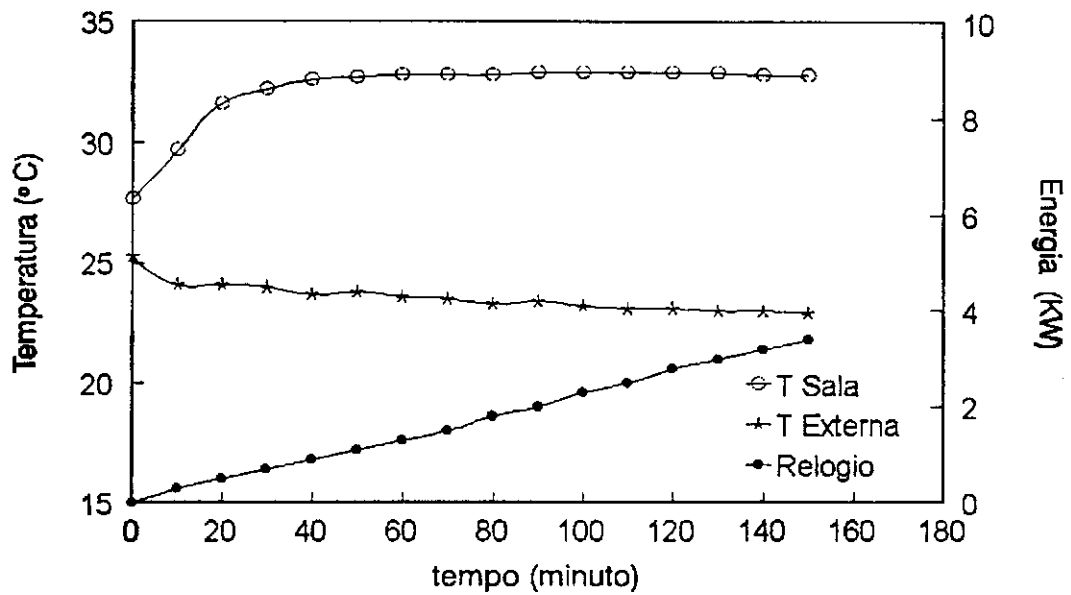


Figura 4.23 - Temperatura do interior da sala (T Sala), do exterior (T Externa) e energia consumida (Relógio) em função do tempo no trocador de calor convectivo no período noturno.

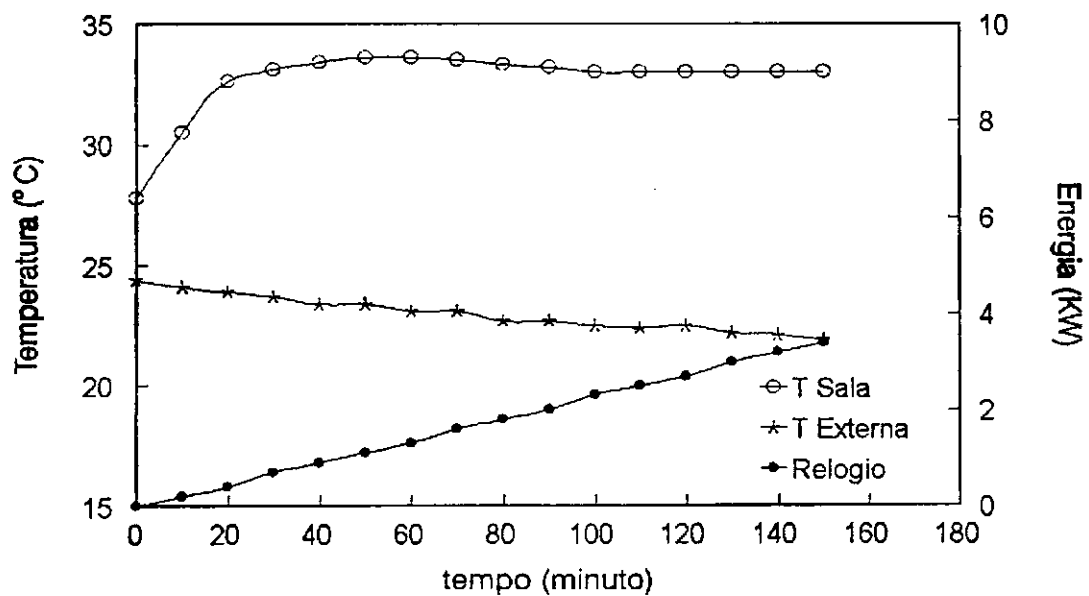


Figura 4.24 - Temperatura do interior da sala (T Sala), do exterior (T Externa) e energia consumida (Relógio) em função do tempo no trocador de calor convectivo no período noturno.

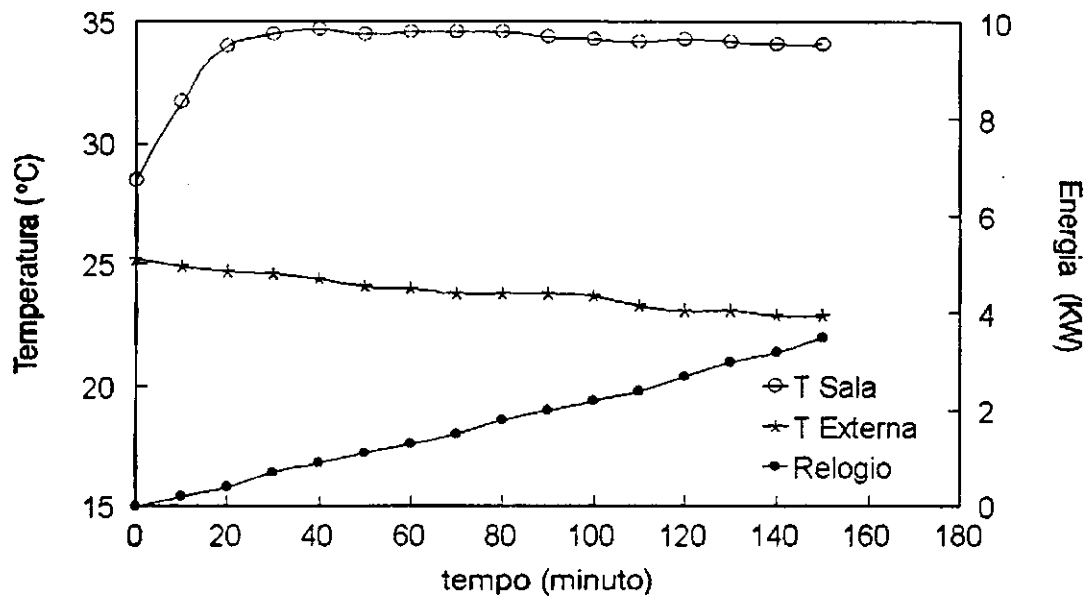


Figura 4.25 - Temperatura do interior da sala (T Sala), do exterior (T Externa) e energia consumida (Relógio) em função do tempo no trocador de calor convectivo no período noturno.

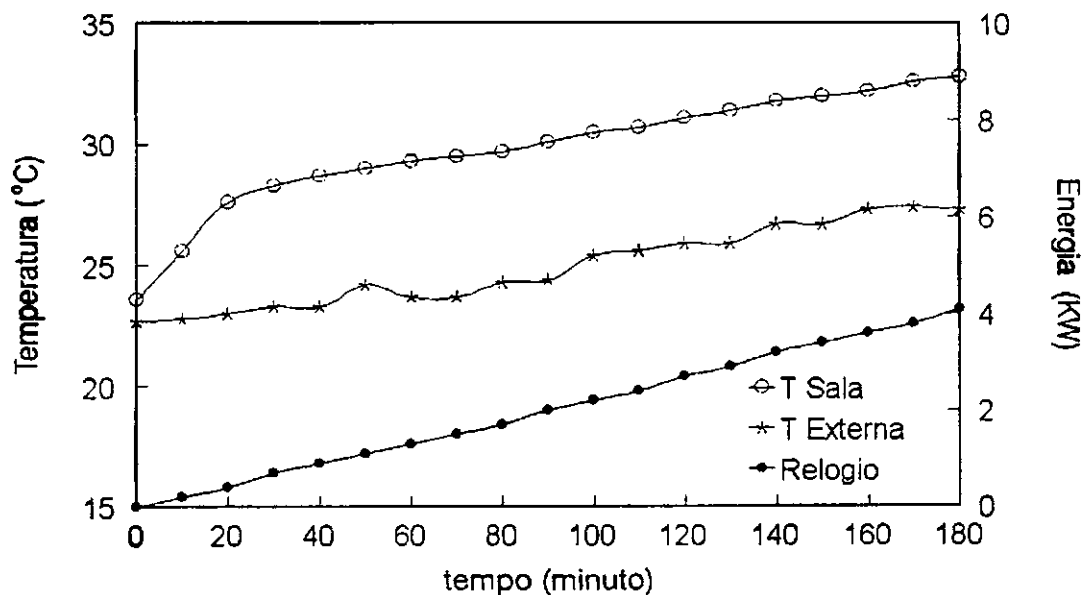


Figura 4.26 - Temperatura do interior da sala (T Sala), do exterior (T Externa) e energia consumida (Relógio) em função do tempo no trocador de calor convectivo no período diurno.

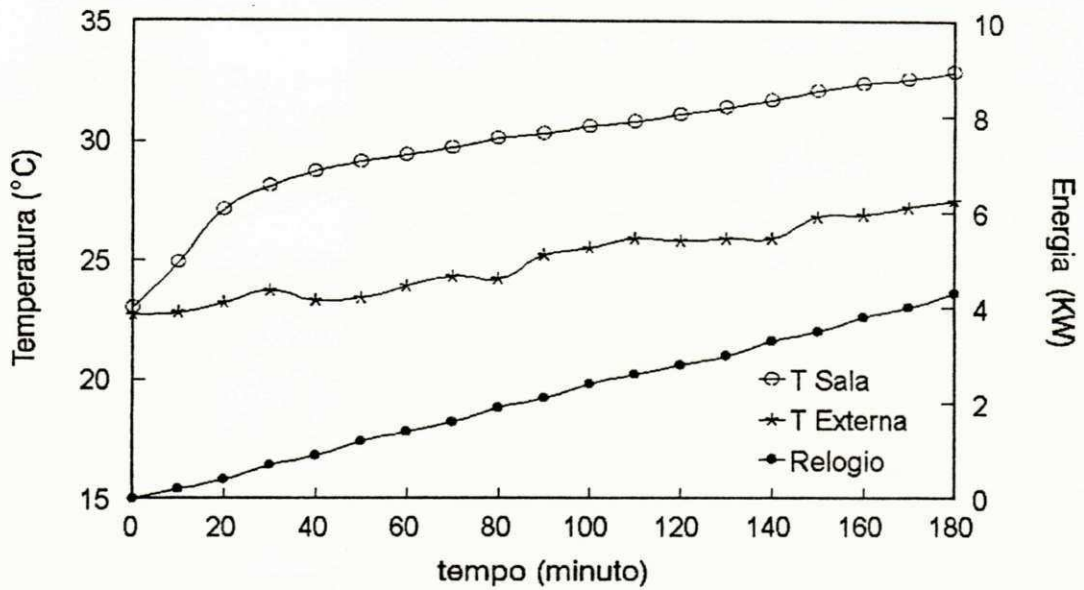


Figura 4.27 - Temperatura do interior da sala (T Sala), do exterior (T Externa) e energia consumida (Relógio) em função do tempo no trocador de calor convectivo no período diurno.

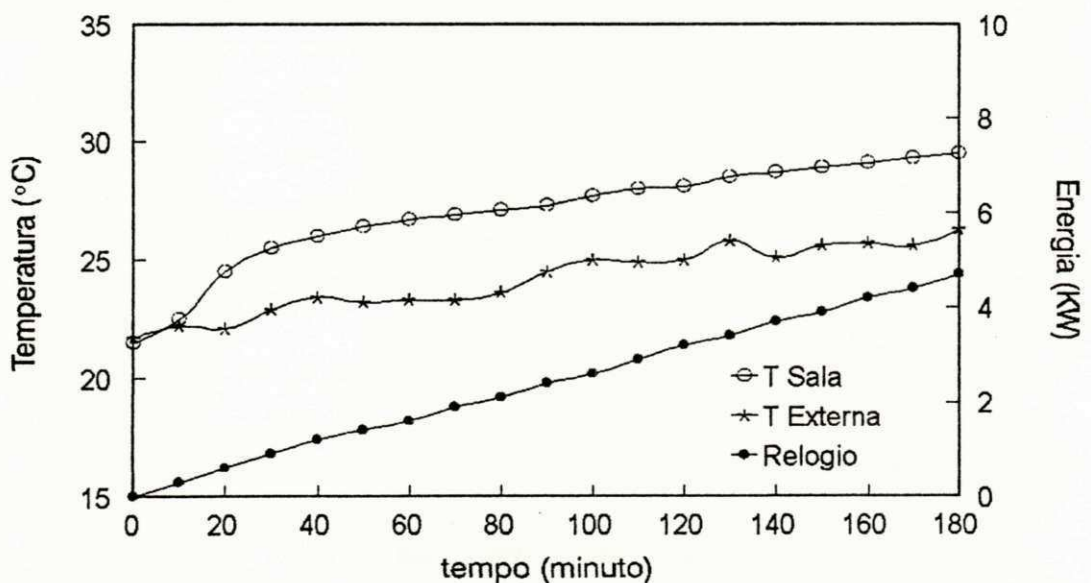


Figura 4.28 - Temperatura do interior da sala (T Sala), do exterior (T Externa) e energia consumida (Relógio) em função do tempo no trocador de calor convectivo no período diurno.

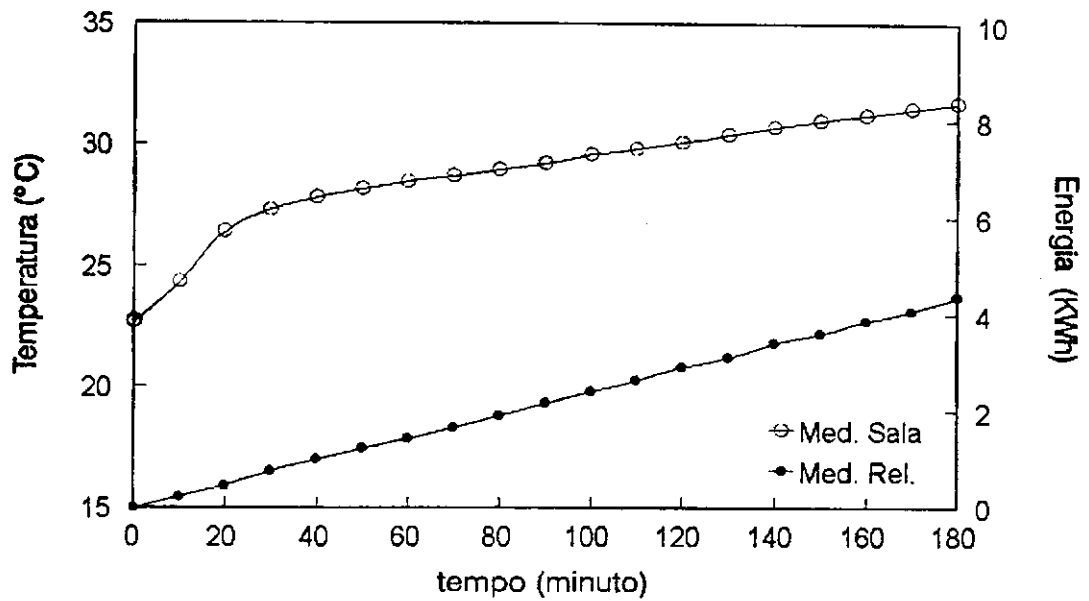


Figura 4.29 - Temperatura média do interior da sala (Med. Sala) e média da energia consumida (Med.Rel.) em função do tempo no trocador de calor convectivo para as bateladas do período diurno.

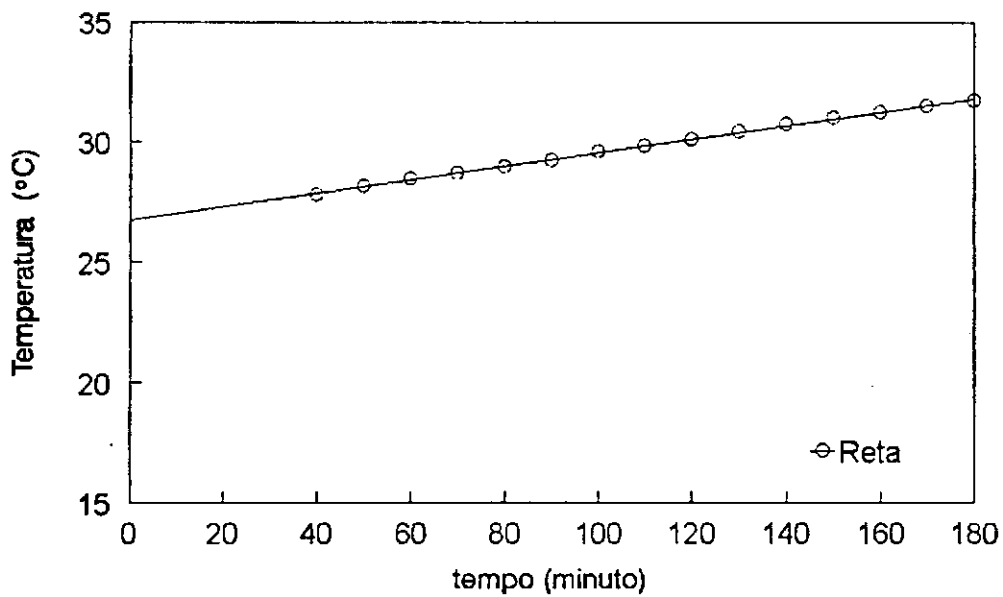


Figura 4.30 - Reta obtida a partir da linearização dos dados da temperatura média no interior da sala na região de regime estabelecido .

4.4 - Comparação entre os Trocadores de Calor

As Tabelas A e B mostram um resumo dos principais resultados das avaliações dos trocadores de calor.

Na Tabela A mostra a relação entre o gradiente de temperatura atingido na sala com o consumo de energia elétrica, realizados no período noturno. Observa-se que os trocadores apresentam resultados semelhantes em termos de diferença de temperatura, porém ao se levar em conta o consumo de energia elétrica, torna-se evidente a superioridade do trocador convectivo, uma vez que o trocador tubular consumiu 45 % a mais de energia. Deve ser considerado a influência da temperatura externa na variação da temperatura interna da sala em função do isolamento da mesma.

Tabela A - Resumo da Avaliação dos Trocadores no Período Noturno.

Trocador de Calor	Diferença de Temp. (externa-interna) ° C	Energia Consumida kWh
Tubular	10,4	4,98
Convectivo	10,5	3,43

Na Tabela B apresenta os testes diurnos referentes a elevação de temperatura do interior da sala e o calor nela acumulado. Nota-se que o trocador de calor tubular apresentou em termos de elevação de temperatura 5,4% a mais do que o convectivo. Em relação ao calor acumulado o mesmo, apresentou um percentual de 4,9% acima do convectivo. Já para o consumo de energia elétrica o trocador de calor tubular apresentou 47,2% superior, mostrando assim que o trocador de calor convectivo apresentou melhor performance.

A eficiência energética (E %), foi obtida a partir da relação entre o calor acumulado e a energia elétrica consumida. Observando os dados da Tabela B,

a eficiência energética do trocador de calor convectivo em relação ao tubular foi na ordem de 50% superior.

Tabela B - Resumo da Avaliação dos Trocadores no Período Diurno

Trocador de Calor	Elevação de Temp. ° C	Calor Acumulado kCal	Energia Consumida KWh	E % Eac / Ec
Tubular	9,42	11,88	4,98	0,2
Convectivo	9,03	11,32	3,43	0,3

obs: Eac. e Ec., correspondem a energia acumulada na sala e energia elétrica consumida.

5.0 - Conclusão

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

1 - O trocador de calor convectivo utilizando o gás butano apresentou uma taxa de aquecimento superior ao do hidrogênio. Considerando que o trocador de calor inicialmente foi projetado para o gás butano e o poder calorífico deste ser inferior ao do hidrogênio os resultados mostraram que a taxa de elevação de temperatura da sala foi 30% superior a do gás hidrogênio.

2 - Em função da média aritmética a partir das Equações 41 a 43 observa-se que o hidrogênio torna-se um combustível mais viável a partir dos 120 minutos.

3 - O gradiente de temperatura da sala para o exterior foi aproximadamente de 10° C para ambos os trocadores de calor. Observou-se que a temperatura externa tem uma influência na variação da temperatura interna da sala em função do horário de teste (noturno ou diurno).

4 - Em função dos resultados obtidos observou-se que a resposta do trocador de calor tubular foi mais lenta do que o trocador de calor convectivo.

5 - O trocador de calor tubular apresentou melhor performance tanto em termos de calor acumulado no interior da sala.

6 - O trocador de calor convectivo apresentou um rendimento energético 50% superior ao tubular para as mesmas condições de trabalho.

6.0 - Perspectivas

Em função dos resultados obtidos onde fez-se o uso do hidrogênio eletrolítico como fonte secundária de energia, se propõe as seguintes sugestões:

- 1 - Testar o sistema de aquecimento com outros tipos de fluidos a título de comparação.
- 2 - Introduzir um sistema de recuperação parcial da carga térmica do vapor efluente do trocador de calor convectivo.
- 3 - Realizar um balanço de energia a partir de dados experimentais a serem obtidos com o consumo de hidrogênio e do fluxo do fluido térmico no interior de trocador de calor tubular.
- 4 - Implantar um sistema de automação no sistema para controlar os níveis de temperatura da sala e consumo de energia.
- 5 - Introduzir painéis fotovoltaicos para a produção de hidrogênio eletrolítico para ser utilizado em sistema de aquecimento.

Bibliografia

- AGUIRRE ODE, F., *Termodinâmica del Equilíbrio*, Interamericana, Ciudad do México, México, 1971.
- ALVES, J. J., *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, 1982.
- 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 a
- AMORIM, M.C.C., MOTTA Sob., M.A., GOLDFARB, J., FRANÇA, K. B., *Estudo de um Sistema de Aquecimento Movido a Hidrogênio Eletrolítico Utilizando como Fluido Térmico Óleo Orgânico Sintético Dowtherm *G*, XXXV Congresso Brasileiro de Química, Salvador, BA, Set. 1995 b
- ANDRADE, N.C., *Avaliação de uma Soldadora Oxi-Hidrogénica com Adição de Oxigênio* (Tese de Mestrado) DEQ/UFPB/Campina Grande - PB, 1993.
- BENNET, C.O. & Myers, J.E., *Fenômenos de Transporte*, Editora McGraw Hill do Brasil, São Paulo, SP, 1978.
- BIRD, R.B., STEWART, W.E., LIGHTFOOT, E.N., *Fenómenos de Transporte*, Editorial Reverté S.A., Barcelona, Espanha, 1978.

- BOCKRIS, J. O'M., Energy, *The Solar - Hydrogen Alternative*. The Architectural Press Ltd., London, 1976.
- CAMPOS, R. F., *Tecnologia Brasileira na Produção de Hidrogênio*. Equipamentos Villares, 1985.
- CASPER, M. S., *Hydrogen Manufacture by Electrolisis*, Thermal Decompositional Unusual Techniniques, Noyes Data Corporation, Park Ridje, New Jersey, U.S.A., 1978.
- CHAPMAN, A . J., *Transmision Del Calor*, 3º Edicion, Editorial Blume, Madri, Espanha, 1974.
- COX,K.E. & Williamson, Jr.K.D., *Hydrogen: It's Technology and Implications*, vol. 1, CRC Press, Cleveland,EUA,1977.
- FAIRES, V.M., *Termodinâmica*, 4º Edição, Ao Livro Técnico S.A., Rio de Janeiro, RJ, 1966.
- FICKETT, A.P., KALHAMMER, F.R., *Water Electrolysis*. In: COX, K.E., WILLIAMSON, K.D., *Hidrogen : Its Technology and Implications*, CRC Press, Ohio, EUA, 1977.
- GOLFARB, J., FRANÇA, K., PALOMINO, G.N., ALVES, J.J.N., *Opção Alternativa para produção de Energia em Alta Escala no Nordeste*, IV Encontro Regional de Química, Aracajú, SE, Novembro, 1989.
- HACOHEN, J., PINHASI, G., PUTERMAN, Y., SHER, E., *Driving cycle simulation of a vehicle motored by a SI engine fueled with H₂ - enriched gasoline*, International Journal of Hidrogen Energy, V. 16, Nº 10, 1991. p 675-702.

- HOLMAN, J. R., *Transferência de Calor*, Editora Macgraw-Hill do Brasil Ltda, São Paulo, SP, 1983.
- ISMAIL, M.I., McLARNON, E.J., CAIRNS, E.J., *Introduction to Electrochemical Reactors*. In: *Electrochemical Reactors*, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Holanda, 1989. V.1 .
- KERN, D. Q., *Processos de Transmissão de Calor*, Editora Guanabara, Rio de Janeiro, RJ, 1987.
- KREITH, F., *Princípios de Transmissão de Calor*. Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo, SP, 1973.
- MOURA, J. C., *Manual de Segurança para o Hidrogênio*. CODETEC, UNICAMP, Campinas, SP, 1980.
- PERRIER, J. L., *Energia Solar e Hidrogênio*. Editorial Presença, Lisboa, Portugal, 1980.
- PERRY, R. H. & CHILTON, C. H., *Manual de Engenharia Química*, quinta edição, Editora Guanabara Dois, Rio de Janeiro, RJ, 1986.
- PILLA, L., *Físico Química*, volume 2, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, RJ, 1980. V.2 .
- SHREVE, R.N. & BRINK JR., J.A., *Indústria de Processos Químicos*, quarta edição, Editora Guanabara Dois, Rio de Janeiro, RJ, 1980.
- SILVA, E.P., *Introdução à Tecnologia e Economia do Hidrogênio*, Editora da Unicamp, Campinas, SP, 1991 a.

-
- SILVA, E.P., *Automobile Industry in Expanding Countries*. In: Proceedings of the Society of Automotive Engineers, SAE, Warrendale, PA, EUA, 1991 b. p 73-81.

 - SISSOM, L. E., & PITTS, D. R., *Fenômenos de Transporte*, Editora Guanabara S.A., Rio de Janeiro,RJ, 1974.

 - SMITH, J.M. & VAN NESS, H.C., *Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química*, Editora Guanabara Dois, Rio de Janeiro, RJ, 1980.

 - TICIANELLI,E.A., *Sistemas Eletrquímicos de Geração e Aproveitamento de Hidrogênio, Eletrolisadores e Células Combustíveis*. In : Alternativas de Energia, Projeto FINEP/PNUD/UNESCO, Brsil, 1985.

 - WELTY, J. R., *Engineering Heat Transfer*, Ed. John Wiley & Sons, New York, EUA, 1974.

 - YOUNG, K.S., *Advanced composites storage containment for hydrogen*, International Journal of Hydrogen Energy, V. 17, N° 7, Jul. 1992. p 505-507.

Apêndice A

Propriedades Físicas do Hidrogênio

Símbolo Químico.....	H ₂
Peso Molecular.....	2,016
Estado de agregação CNTP (0°C, 760mmHg).....	gás incolor
Massa específica kg/Nm ³	0,08987
Ponto de ebulição a 760 mmHg (°C)	- 252,78
Calor específico (C _p) cal/mol °K	
C _p = a + b(T) + c (T ²)	a = 6,424
	b = 0,1039 × 10 ⁻²
	c = - 0,0078 × 10 ⁻⁵
Limites de inflamabilidade	95% H ₂ + 5% O ₂
Limites de inflamabilidade com o ar	4,1 a 75% H ₂
Temperatura de ignição com oxigênio	450 °C
Temperatura de ignição com ar	510 °C
Umidade do gás saturado a 760 mmHg	
g H ₂ O/Nm ³ gás seco	32 °C
	40 g H ₂ O/Nm ³
	25 °C
	26,64 g H ₂ O/ Nm ³
Calor de combustão H ₂ + ½ O ₂ → H ₂ O _(g)	a 25 °C
	- 241,8 kJ/mol
Massa específica do H ₂ líq. (- 253°C, 1 atm.)	0,0708 g/ cm ³
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 ³
Solubilidade em água (0°C)	0,0214 v/v H ₂ O
Solubilidade em água (15°C)	0,019 v/v H ₂ 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 de carvão	Uso Industrial
Termoquímica	Água	Calor gerado por usinas nucleares	Em desenvolvimento
Quebra da Água a alta temperaturas	Água	Calor gerado por usinas nucleares	Em desenvolvimento
Eletrólise Fotovoltaica	Água	Radiação Solar	Em desenvolvimento

SILVA, 1991 a.

Apêndice C

Propriedades Físicas do Fluido Dowtherm *G

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

Apêndice D

Tabela D.1 - Dados referente a Figura 4.1.

Tempo	T Sala	T Externa
0	20,2	20,2
10	22,9	20,2
20	25,2	20,2
30	26,1	20,5
40	26,9	21,2
50	27,4	21,6
60	27,8	21,2
70	28,0	21,3
80	28,5	21,8
90	28,9	22,0
100	29,2	22,0
110	29,6	22,8
120	30,0	23,1
130	30,2	23,1
140	30,6	23,2
150	30,9	23,2
160	31,1	23,8
170	31,3	24,0
180	31,6	24,2

Tabela D.2 - Dados referentes a Figura 4.2

Tempo	T Sala	T Externa
0	20,6	21,5
10	22,5	21,5
20	25,6	21,6
30	26,6	21,6
40	27,1	21,7
50	27,5	21,7
60	27,7	21,9
70	28,3	22,1
80	28,5	22,5
90	28,9	22,8
100	29,2	23,0
110	29,5	23,2
120	29,8	23,2
130	30,0	23,2
140	30,3	23,4
150	30,6	23,4
160	30,9	23,5
170	31,1	23,8
180	31,4	23,8

Tabela D.3 - Dados referentes a Figura 4.3

Tempo	T Sala	T Externa
0	20,6	20,5
10	23,3	20,8
20	25,5	20,9
30	26,4	20,8
40	26,9	20,9
50	27,4	20,9
60	27,7	20,9
70	28,1	20,9
80	28,4	21,0
90	28,6	21,0
100	28,9	21,0
110	29,1	21,0
120	29,4	21,0
130	29,5	20,9
140	29,5	21,0
150	29,8	21,2
160	29,9	21,2
170	30,1	21,2
180	30,3	21,8

Tabela D.4 - Dados referentes a Figura 4.4

Tempo	T Sala	T Externa
0	20,1	20,8
10	22,2	20,8
20	24,7	20,8
30	25,7	20,8
40	26,3	21,0
50	27,0	21,9
60	27,5	21,7
70	28,0	21,8
80	28,5	22,1
90	29,3	22,5
100	29,9	22,8
110	30,1	23,0
120	30,6	23,4
130	30,6	23,2
140	30,7	23,8
150	31,0	24,0
160	31,1	24,2
170	31,4	23,7
180	31,6	23,7

Tabela D.5 - Dados relativos a Figura 4.5.

Tempo	T Sala	T Externa
0	20,5	20,4
10	22,7	20,7
20	25,1	20,9
30	26,2	21,0
40	26,6	21,2
50	26,9	21,7
60	27,1	21,7
70	27,5	21,7
80	27,6	21,6
90	27,9	21,9
100	28,0	22,0
110	28,1	22,2
120	28,2	22,7
130	28,4	22,7
140	28,5	22,7
150	29,0	24,0
160	29,3	25,0
170	29,5	24,3
180	29,7	23,9

Tabela D.6- Dados relativos a Figura 4.6

Tempo	T Sala	T Externa
0	21,0	19,9
10	22,5	19,8
20	24,9	20,0
30	25,9	20,0
40	26,3	20,0
50	26,5	20,5
60	26,9	20,7
70	27,0	20,7
80	27,4	21,0
90	27,6	21,0
100	27,9	21,0
110	28,0	21,2
120	28,3	21,8
130	28,5	22,0
140	28,8	22,0
150	29,0	22,8
160	29,3	23,0
170	29,5	23,5
180	29,6	23,8

Tabela D.7- Dados relativos a Figura 4.7

Tempo	T Sala	T Externa
0	21,2	21,2
10	23,2	21,3
20	25,3	22,0
30	26,2	22,5
40	26,8	22,6
50	27,2	22,9
60	27,5	23,6
70	27,8	22,9
80	28,3	23,3
90	28,3	23,5
100	28,6	24,2
110	28,6	23,5
120	28,9	24,0
130	29,2	24,7
140	29,4	24,4
150	29,5	24,4
160	29,6	24,1
170	30,1	24,8
180	30,2	24,4

Tabela D.8- Dados relativos a Figura 4.8

Tempo	T Sala	T Externa
0	20,5	20,6
10	21,6	20,6
20	23,5	20,9
30	24,3	21,2
40	24,8	21,5
50	25,2	21,8
60	25,5	22,4
70	25,9	22,9
80	26,2	22,5
90	26,3	22,2
100	26,5	22,4
110	26,7	22,8
120	27,2	23,8
130	27,5	24,4
140	27,7	24,4
150	27,7	23,8
160	28,0	23,9
170	28,0	24,6
180	28,5	24,5

Tabela D.9 - Dados relativos a Figura 4.9

Tempo	Méd Sala H	Méd Ext. H	Méd Sala B	Méd Ext. B
0	20,94	20,76	20,38	20,75
10	22,50	20,92	22,73	20,83
20	24,66	21,18	25,25	20,88
30	25,62	21,52	26,20	20,93
40	26,10	21,74	26,80	21,20
50	26,44	22,02	27,33	21,53
60	26,74	22,34	27,68	21,43
70	27,02	22,30	28,10	21,53
80	27,32	22,40	28,48	21,85
90	27,48	22,62	28,93	22,08
100	27,74	22,92	29,30	22,20
110	27,88	22,92	29,58	22,50
120	28,14	23,46	29,95	22,68
130	28,42	23,92	30,08	22,60
140	28,62	23,72	30,28	22,85
150	28,82	24,12	30,58	22,95
160	29,06	24,34	30,75	23,18
170	29,28	24,56	30,98	23,18
180	29,50	24,58	31,23	23,38

Tabela D.10 - Dados relativos a Figura 4.10

Tempo	Hidrogenio	Butano 1	Butano 2
40	26,10	26,80	
50	26,44	27,33	
60	26,74	27,68	
70	27,02	28,10	
80	27,32	28,48	
90	27,48	28,93	
100	27,74	29,30	
110	27,88	29,58	
120	28,14		29,95
130	28,42		30,08
140	28,62		30,28
150	28,82		30,58
160	29,06		30,75
170	29,28		30,98
180	29,50		31,23

Tabela D.11 - Dados relativos a Figura 4.11.

Tempo	T Sala	T Externa	Relogio
0	24,3	22,1	0,0
10	25,3	21,8	0,3
20	27,2	21,9	0,6
30	28,6	21,7	1,0
40	29,5	21,5	1,3
50	30,1	21,6	1,6
60	30,5	21,8	2,0
70	30,8	22,0	2,3
80	31,0	22,0	2,6
90	31,3	22,1	3,0
100	31,3	22,3	3,3
110	31,4	22,2	3,7
120	31,4	22,1	4,0
130	31,4	21,9	4,3
140	31,4	22,0	4,6
150	31,4	22,2	5,0

Tabela D.12 - Dados relativos a Figura 4.12.

Tempo	T Sala	T Externa	Relogio
0	26,0	24,7	0,0
10	27,2	24,4	0,3
20	28,9	23,8	0,7
30	30,4	23,8	1,0
40	31,1	23,7	1,3
50	31,7	23,6	1,7
60	32,2	23,6	2,0
70	32,3	23,4	2,3
80	32,3	23,3	2,7
90	32,5	23,3	3,1
100	32,5	23,0	3,4
110	32,6	23,0	3,8
120	32,6	22,9	4,1
130	32,5	22,9	4,4
140	32,6	22,8	4,8
150	32,6	22,6	5,2

Tabela D.13 - Dados relativos a Figura 4.13.

Tempo	T Sala	T Externa	Relogio
0	26,5	24,4	0,0
10	28,0	24,2	0,3
20	29,8	23,9	0,6
30	30,8	23,9	0,9
40	31,6	23,5	1,2
50	32,1	23,5	1,5
60	32,6	23,4	1,9
70	32,8	23,3	2,2
80	32,9	23,2	2,5
90	33,1	23,2	2,9
100	33,3	23,2	3,3
110	33,5	23,2	3,7
120	33,4	23,1	4,1
130	33,4	23,0	4,4
140	33,4	22,9	4,8
150	33,4	23,1	5,2

Tabela D.14 - Dados relativos a Figura 4.14.

Tempo	T Sala	T Externa	Relogio
0	28,3	25,5	0,0
10	29,5	25,2	0,3
20	30,9	25,0	0,6
30	31,8	24,7	0,9
40	32,6	24,6	1,2
50	33,2	24,4	1,5
60	33,7	24,1	1,8
70	33,9	23,9	2,2
80	34,1	24,0	2,5
90	34,1	24,0	2,8
100	34,1	23,8	3,1
110	34,1	23,4	3,5
120	34,1	23,1	3,8
130	34,0	23,1	4,2
140	34,0	23,2	4,5
150	33,8	22,8	4,8

Tabela D.15 - Dados relativos a Figura 4.15.

Tempo	T Sala	T Externa	Relogio
0	27,8	23,6	0,0
10	29,2	23,3	0,3
20	30,9	23,1	0,5
30	32,2	23,0	0,8
40	33,1	22,9	1,1
50	33,6	22,9	1,5
60	33,9	22,8	1,8
70	34,1	22,5	2,1
80	34,2	22,6	2,4
90	34,2	22,4	2,7
100	34,1	22,5	3,0
110	34,1	22,5	3,4
120	34,1	22,7	3,7
130	34,0	22,4	4,0
140	34,0	22,3	4,4
150	34,0	22,3	4,7

Tabela D.16 - Dados relativos a Figura 4.16.

Tempo	T Sala	T Externa	Relogio
0	24,2	23,3	0,0
10	25,0	23,2	0,3
20	27,4	22,9	0,6
30	28,6	22,6	0,9
40	28,5	22,7	1,2
50	30,2	22,8	1,5
60	30,6	23,1	1,8
70	31,0	23,1	2,1
80	31,4	23,2	2,4
90	31,8	23,8	2,8
100	32,0	24,0	3,1
110	32,2	24,2	3,5
120	32,4	24,7	3,8
130	32,6	24,7	4,1
140	32,8	24,8	4,4
150	32,9	25,1	4,8
160	33,1	25,8	5,1
170	33,4	26,5	5,4
180	33,7	26,8	5,8

Tabela D.17 - Dados relativos a Figura 4.17.

Tempo	T Sala	T Externa	Relogio
0	23,6	23,2	0,0
10	24,4	23,9	0,3
20	26,7	23,9	0,7
30	28,0	23,9	1,0
40	28,9	24,6	1,4
50	29,2	25,3	1,7
60	29,8	25,7	2,0
70	30,3	26,5	2,3
80	30,9	26,2	2,7
90	31,3	25,8	3,0
100	31,6	25,2	3,4
110	32,0	25,3	3,7
120	32,3	25,7	4,1
130	32,5	26,7	4,4
140	32,7	27,5	4,7
150	33,0	27,4	5,1
160	33,3	27,8	5,4
170	33,5	28,1	5,8
180	33,7	28,6	6,1

Tabela D.18 - Dados relativos a Figura 4.18.

Tempo	T Sala	T Externa	Relogio
0	24,0	23,1	0,0
10	24,8	23,1	0,3
20	27,0	23,4	0,6
30	28,1	23,4	0,9
40	28,9	23,4	1,2
50	29,6	23,9	1,6
60	30,1	24,7	1,9
70	30,6	25,0	2,2
80	31,0	25,5	2,6
90	31,3	25,6	2,9
100	31,6	25,6	3,2
110	31,8	25,7	3,6
120	31,9	25,8	4,0
130	32,1	25,9	4,3
140	32,3	26,1	4,7
150	32,5	26,3	5,0
160	32,6	26,9	5,4
170	32,7	27,9	5,7
180	32,8	27,9	6,0

Tabela D.19 - Dados relativos a Figura 4.19.

Tempo	T Sala	T Externa	Relogio
0	23,6	22,4	0,0
10	24,2	22,6	0,3
20	26,6	23,0	0,6
30	27,9	23,2	0,9
40	28,9	23,2	1,2
50	29,5	23,2	1,5
60	30,0	23,4	1,8
70	30,4	23,3	2,2
80	30,7	23,3	2,5
90	30,9	23,3	2,8
100	31,3	23,7	3,1
110	31,5	23,9	3,4
120	31,8	24,4	3,7
130	32,0	24,6	4,0
140	32,1	25,2	4,3
150	32,2	25,6	4,7
160	32,4	25,8	5,0
170	32,5	25,1	5,3
180	32,6	24,7	5,7

Tabela D.20 - Dados relativos a Figura 4.20.

Tempo	T sala	T Externa	Relogio
0	24,7	23,7	0,0
10	25,8	23,9	0,4
20	28,3	24,1	0,9
30	29,9	24,3	1,4
40	31,0	24,3	1,9
50	31,7	24,7	2,4
60	32,0	24,7	2,9
70	32,2	24,7	3,4
80	32,6	24,6	3,9
90	32,8	24,5	4,3
100	33,0	25,0	4,7
110	33,2	25,3	5,2
120	33,4	25,2	5,7
130	33,6	25,5	6,2
140	33,8	25,3	6,6
150	33,9	25,3	7,1
160	34,1	25,1	7,6
170	34,2	25,3	8,1
180	34,4	25,7	8,5

Tabela D.21 - Dados relativos a Figura 4.21.

Tempo	Med Sala	Med. Rel.
0	24,02	0,00
10	24,84	0,32
20	27,20	0,68
30	28,50	1,02
40	29,40	1,38
50	30,40	1,74
60	30,50	2,08
70	30,90	2,44
80	31,32	2,82
90	31,62	3,16
100	31,90	3,50
110	32,14	3,88
120	32,36	4,26
130	32,56	4,60
140	32,74	4,94
150	32,90	5,34
160	33,10	5,70
170	33,26	6,06
180	33,44	6,42

Tabela D.22 - Dados relativos a Figura 4.22.

Tempo	Segunda	Primeira
0		
10		
20		
30		
40		
50		30,40
60		30,50
70		30,90
80		31,32
90	31,62	31,62
100	31,90	
110	32,14	
120	32,36	
130	32,56	
140	32,74	
150	32,90	
160	33,10	
170	33,26	
180	33,44	

Tabela D.23 - Dados relativos a Figura 4.23.

Tempo	T Sala	T Externa	Relógio
0	27,7	25,3	0,0
10	29,7	24,1	0,3
20	31,6	24,1	0,5
30	32,2	24,0	0,7
40	32,6	23,7	0,9
50	32,7	23,8	1,1
60	32,8	23,6	1,3
70	32,8	23,5	1,5
80	32,8	23,3	1,8
90	32,9	23,4	2,0
100	32,9	23,2	2,3
110	32,9	23,1	2,5
120	32,9	23,1	2,8
130	32,9	23,0	3,0
140	32,8	23,0	3,2
150	32,8	22,9	3,4

Tabela D.24 - Dados relativos a Figura 4.24.

Tempo	T Sala	T Externa	Relógio
0	27,8	24,4	0,0
10	30,5	24,1	0,2
20	32,6	23,9	0,4
30	33,1	23,7	0,7
40	33,4	23,4	0,9
50	33,6	23,4	1,1
60	33,6	23,1	1,3
70	33,5	23,1	1,6
80	33,3	22,7	1,8
90	33,2	22,7	2,0
100	33,0	22,5	2,3
110	33,0	22,4	2,5
120	33,0	22,5	2,7
130	33,0	22,2	3,0
140	33,0	22,1	3,2
150	33,0	21,9	3,4

Tabela D.25 - Dados relativos a Figura 4.25.

Tempo	T Sala	T Externa	Relógio
0	28,5	25,2	0,0
10	31,7	24,9	0,2
20	34,0	24,7	0,4
30	34,5	24,6	0,7
40	34,7	24,4	0,9
50	34,5	24,1	1,1
60	34,6	24,0	1,3
70	34,6	23,8	1,5
80	34,6	23,8	1,8
90	34,4	23,8	2,0
100	34,3	23,7	2,2
110	34,2	23,3	2,4
120	34,3	23,1	2,7
130	34,2	23,1	3,0
140	34,1	22,9	3,2
150	34,1	22,9	3,5

Tabela D.26 - Dados relativos a Figura 4.26.

Tempo	T Sala	T Externa	Relógio
0	23,6	22,7	0,0
10	25,6	22,8	0,2
20	27,6	23,0	0,4
30	28,3	23,3	0,7
40	28,7	23,3	0,9
50	29,0	24,2	1,1
60	29,3	23,7	1,3
70	29,5	23,7	1,5
80	29,7	24,3	1,7
90	30,1	24,4	2,0
100	30,5	25,4	2,2
110	30,7	25,6	2,4
120	31,1	25,9	2,7
130	31,4	25,9	2,9
140	31,8	26,7	3,2
150	32,0	26,7	3,4
160	32,2	27,3	3,6
170	32,6	27,4	3,8
180	32,8	27,3	4,1

Tabela D.27 - Dados relativos a Figura 4.27.

Tempo	T Sala	T Externa	Relogio
0	23,0	22,7	0,0
10	24,9	22,8	0,2
20	27,1	23,2	0,4
30	28,1	23,7	0,7
40	28,7	23,3	0,9
50	29,1	23,4	1,2
60	29,4	23,9	1,4
70	29,7	24,3	1,6
80	30,1	24,2	1,9
90	30,3	25,2	2,1
100	30,6	25,5	2,4
110	30,8	25,9	2,6
120	31,1	25,8	2,8
130	31,4	25,9	3,0
140	31,7	25,9	3,3
150	32,1	26,8	3,5
160	32,4	26,9	3,8
170	32,6	27,2	4,0
180	32,9	27,5	4,3

Tabela D.28 - Dados relativos a Figura 4.28.

Tempo	T Sala	T Externa	Relogio
0	21,5	21,7	0,0
10	22,5	22,2	0,3
20	24,5	22,1	0,6
30	25,5	22,9	0,9
40	26,0	23,4	1,2
50	26,4	23,2	1,4
60	26,7	23,3	1,6
70	26,9	23,3	1,9
80	27,1	23,6	2,1
90	27,3	24,5	2,4
100	27,7	25,0	2,6
110	28,0	24,9	2,9
120	28,1	25,0	3,2
130	28,5	25,8	3,4
140	28,7	25,1	3,7
150	28,9	25,6	3,9
160	29,1	25,7	4,2
170	29,3	25,6	4,4
180	29,5	26,3	4,7

Tabela D.29 - Dados relativos a Figura 4.29.

Tempo	Med. Sala	Med. Rel.
0	22,70	0,00
10	24,33	0,23
20	26,40	0,46
30	27,30	0,76
40	27,80	1,00
50	28,16	1,23
60	28,46	1,43
70	28,70	1,66
80	28,96	1,90
90	29,23	2,16
100	29,60	2,40
110	29,83	2,63
120	30,10	2,90
130	30,43	3,10
140	30,73	3,40
150	31,00	3,60
160	31,23	3,86
170	31,50	4,06
180	31,73	4,36

Tabela D.30 - Dados relativos a Figura 4.30.

Tempo	Reta
0	
10	
20	
30	
40	27,80
50	28,16
60	28,46
70	28,70
80	28,96
90	29,23
100	29,60
110	29,83
120	30,10
130	30,43
140	30,73
150	31,00
160	31,23
170	31,50
180	31,73

Apêndice E

Para o cálculo do calor acumulado utilizando-se o trocador de calor tubular, utilizaremos a Equação 40, que fornece o calor em KJ/Kg.

$$Q = [0,15045T + 0,171 \times 10^{-4} T^2 - 0,0976 \times 10^{-8} T^3]_{T_1}^{T_2} \quad (40)$$

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

$$T_1 = 24,02 \text{ } ^\circ\text{C} = 75,236 \text{ } ^\circ\text{F} = 536,906 \text{ } ^\circ\text{R}$$

$$T_2 = 33,44 \text{ } ^\circ\text{C} = 92,192 \text{ } ^\circ\text{F} = 551,862 \text{ } ^\circ\text{R}$$

$$(T_1 - T_2) = 16,956 \text{ } ^\circ\text{R}$$

Calculando o calor a partir da Equação 40, temos :

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

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

$$Q = 0,15045 \times 16,956 + 0,171 \times 10^{-4} (16,956)^2 - 0,0976 \times 10^{-8} (16,956)^3 \quad (\text{E.2})$$

$$Q = 2,5559418 \text{ KJ} / \text{Kg}$$

Para obtermos o calor independente da massa de ar, devemos calcular esta massa de ar (m) existe na sala através da densidade (ρ) e do volume da sala (V), através da Equação E.3.

$$m = \rho \cdot V \quad (E.3)$$

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 83,714 °F. Os seguintes dados são conhecidos para a densidade do ar:

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

Interpolando, encontramos o valor de 1,2592369 Kg/m³ para a densidade do ar a 83,714 °F e o volume da sala é de 15,45 m³.

Substituindo estes na Equação E.1, encontramos um valor para a massa de ar na sala de 19,45521 Kg.

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

$$Q = 2,5559418 \text{ KJ/Kg} \times 19,45521 \text{ Kg} \quad (E.4)$$

$$Q = 49,726384 \text{ KJ}$$

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

$$Q = 1,3809 \times 10^{-2} \text{ KWh}$$

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

$$Q = 11,884606 \text{ Kcal}$$

Para o cálculo no trocador convectivo, segue-se os mesmos passos.

Apêndice F

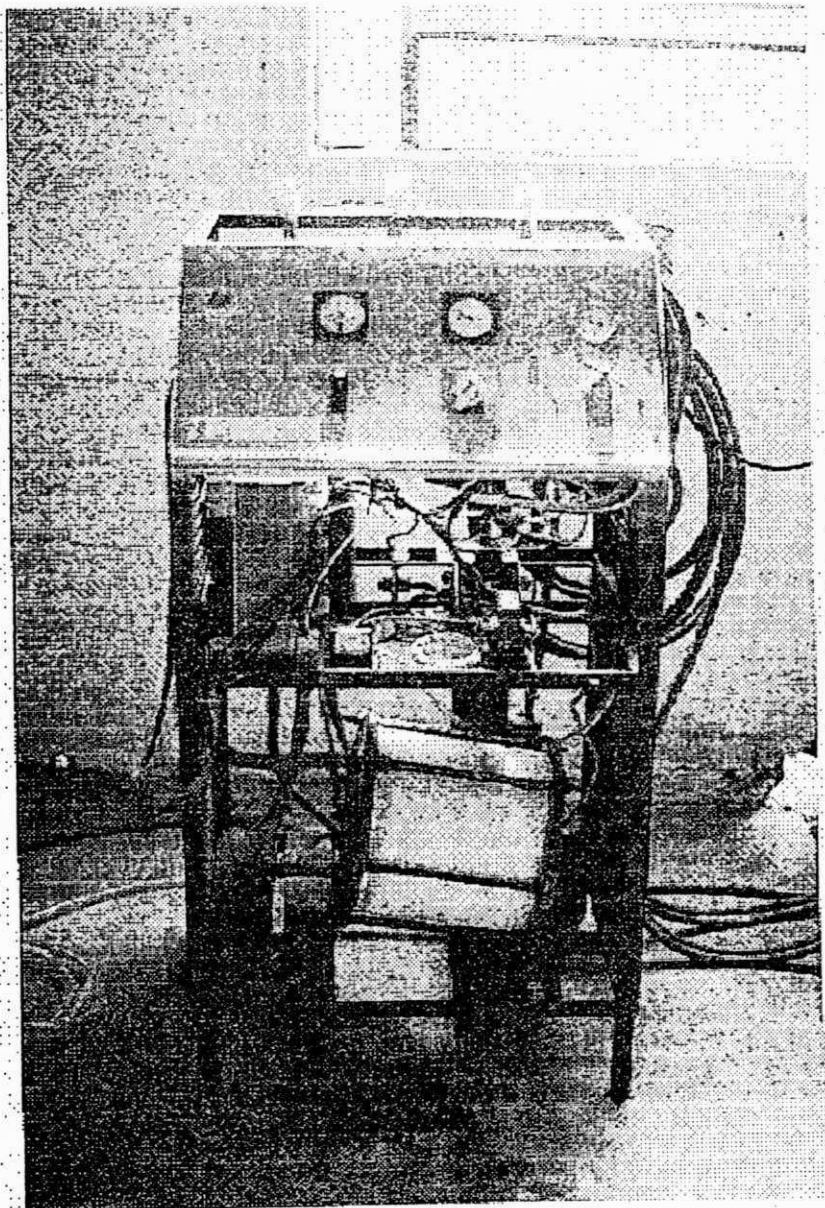


Figura F.1 - Vista frontal do eletrolisador bipolar

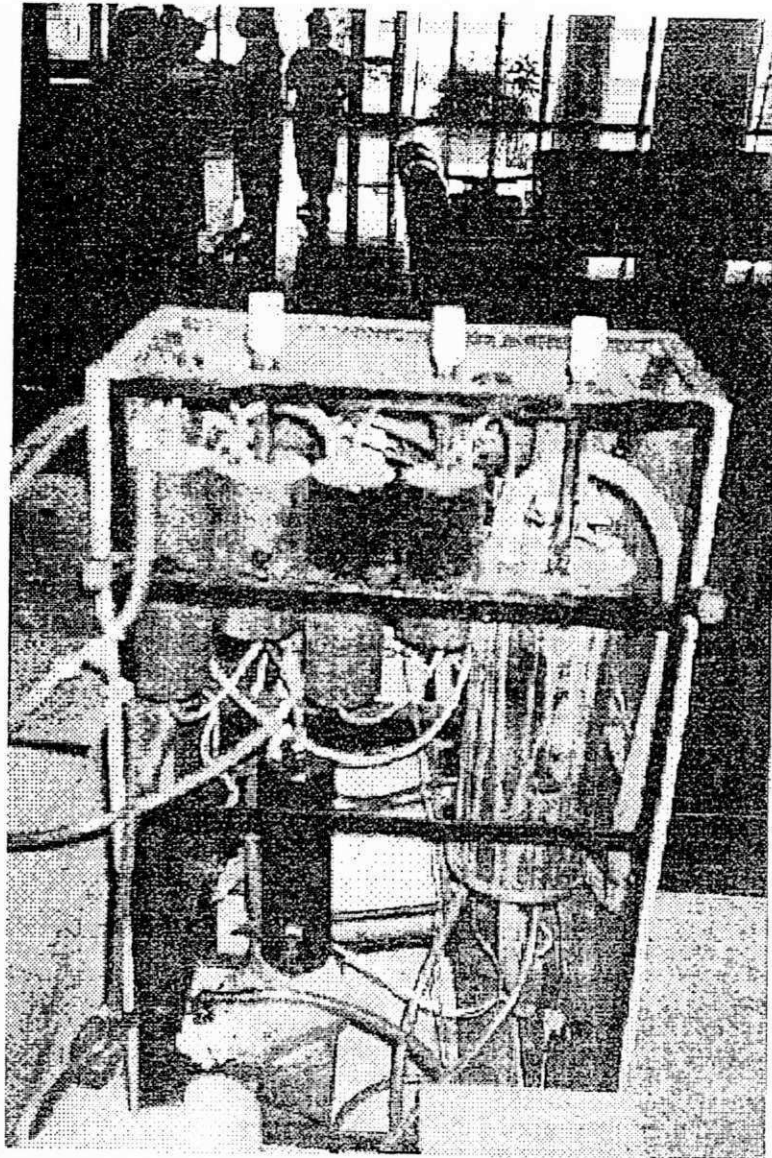


Figura F.2 - Vista posterior do eletrolisador.

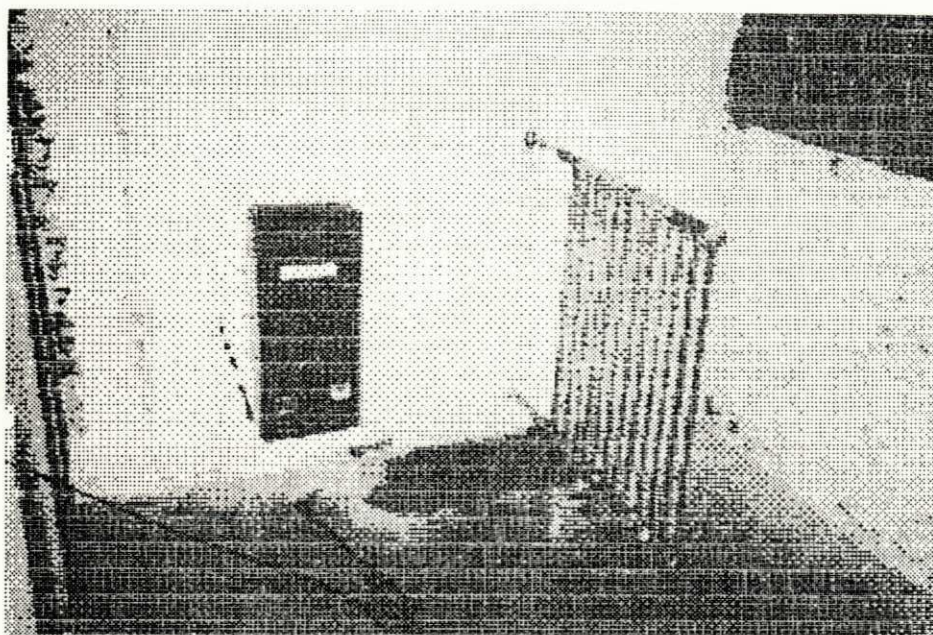


Figura F.3 - Vista dos Trocadores de calor tubular e convectivo no interior da sala de testes.

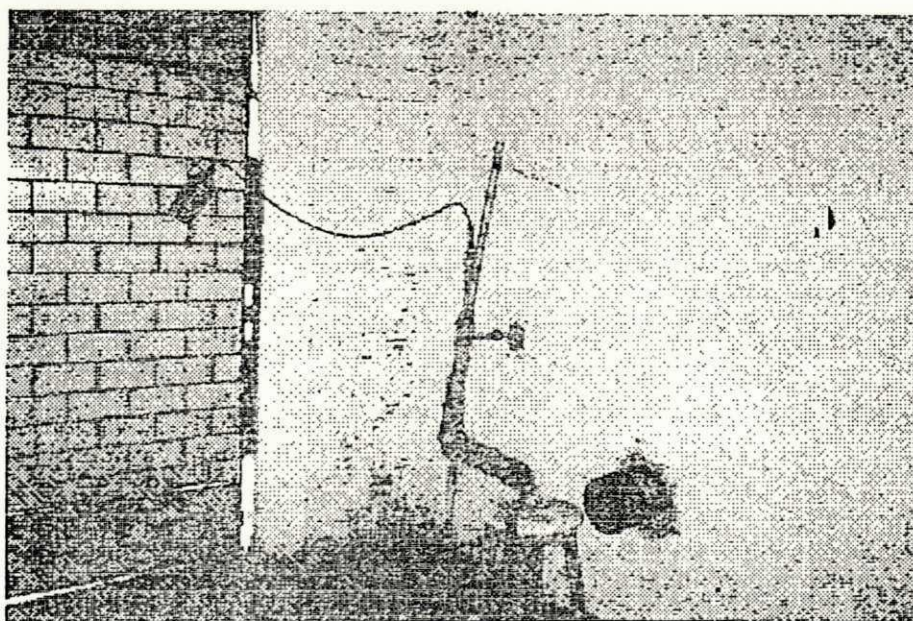


Figura F.4 - Vista da unidade de aquecimento do trocador tubular e do tubo de saída dos gases do convectivo.