

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CARACTERÍSTICAS DE CORTE E SOLDA DE  
UMA MÁQUINA OXI-HIDROGÊNICA

JAQUELINE BARBOSA DO NASCIMENTO

CAMPINA GRANDE - PB

1994

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CARACTERÍSTICAS DE CORTE E SOLDA DE  
UMA MÁQUINA OXI-HIDROGÊNICA

JAUQUELINE BARBOSA DO NASCIMENTO

CAMPINA GRANDE

1994

CARACTERÍSTICAS DE CORTE E SOLDA DE UMA  
MÁQUINA OXI-HIDROGÊNICA

JAQUELINE BARBOSA DO NASCIMENTO

CARACTERÍSTICAS DE CORTE E SOLDA DE UMA  
MÁQUINA OXI-HIDROGÊNICA

Dissertação apresentada ao curso de  
mestrado em Engenharia Mecânica da  
Universidade Federal da Paraíba, em  
cumprimento as exigências para  
obtenção do Grau de Mestre.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROJETO DO PRODUTO MECÂNICO  
SUB-ÁREA: TÉRMICA E FLUIDOS  
ORIENTADOR: Prof. KEPLER BORGES FRANÇA (Ph.D.)  
CO-ORIENTADOR: Prof. JÚLIO GOLDFARB (M.Sc.)

Campina Grande

1994

DIS  
N.º 11. 730/94  
N2410



N244c Nascimento, Jaqueline Barbosa do  
Características de corte e solda de uma máquina oxihidrogenica / Jaqueline Barbosa do Nascimento. - Campina Grande, 1994.  
85 f.

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

1. Soldas 2. Máquina Oxihidrogenica 3. Dissertação I. Franca, Kepler Borges, Dr. II. Goldfarb, Julio, M.Sc. III. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB)

CDU 621.791.053(043)

CARACTERÍSTICAS DE CORTE E SOLDA DE UMA MÁQUINA OXI-HIDROGÊNICA

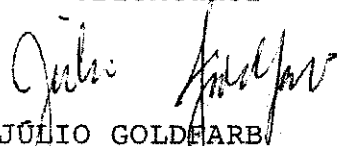
JAQUELINE BARBOSA DO NASCIMENTO

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 25 DE JANEIRO DE 1994



KEPLER BORGES FRANÇA

Orientador



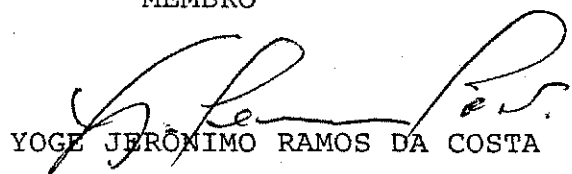
JÚLIO GOLDFARB

Co-Orientador



SANDOVAL FARIAS DA MATA

MEMBRO



YOGÉ JERÔNIMO RAMOS DA COSTA

MEMBRO

CAMPINA GRANDE

JANEIRO/ 1994

DEDICATÓRIA

Aos professores KEPLER B. FRANÇA e  
JULIO GOLDFARB, com grande  
admiração.

## AGRADECIMENTOS

Ao orientador Professor Kepler Borges França, para quem o trabalho é o mais importante, pela sua disposição em dividir seus conhecimentos, experiência e saber e pelo exemplo que tem dado como pesquisador, mesmo num momento tão difícil em nosso país.

Ao Co-orientador Professor Júlio Goldfarb por ter me ajudado num momento tão difícil da minha vida acadêmica, pelo seu incansável esforço, dedicação e incentivo na elaboração deste trabalho.

Ao Co-orientador José Jailson N. Alves por suas importantes e decisivas sugestões, pela atenção e enorme paciência dispensada.

Ao Núcleo de Energia - NERG, na pessoa do seu coordenador Professor Edgar R. B. Filho, pelo acolhimento, apoio, materiais e serviços, essenciais para realização deste trabalho.

Aos funcionários do NERG, especialmente Jorge E. Serey, F. Sérgio Buarque de Gusmão e Adalberto pela dedicação e contribuição para realização deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa - CNPq, pelo apoio financeiro.

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

Ao Departamento de Engenharia Mecânica, funcionários, professores e amigos que me incentivaram sempre nos momentos mais difíceis.

Ao Laboratório de Térmica e Fluidos, na pessoa dos professores Yoge Jerônimo, Manoel C. Barros e Celso Rosendo por todo apoio material dispensado a minha pessoa e por nossa sincera amizade.



## RESUMO

Foi modificada uma máquina de solda oxi-hidrogênica introduzindo-se separadores de polietileno entre os eletrodos a fim de evitar o curto-circuito com conseqüências de explosão e incêndio. A massa de polietileno diminuiu a quantidade de eletrólito e dificultou a passagem das bolhas de gases, aumentando a resistência ôhmica do sistema, denominada sobretensão de solução. Isto ocasionou uma diminuição da condutividade e fez baixar o rendimento do sistema.

Foram realizados inúmeros testes com diferentes concentrações de eletrólito, entre 4% e 13% de hidróxido de potássio, sendo observado um aumento do rendimento proporcional ao aumento da concentração. Nas condições do reator que não contém membrana separadora de gases o sistema não suporta concentrações acima de 15% de hidróxido de potássio (KOH).

## ABSTRACT

It was changed a oxy-hydrogen welding machine inserting polyethylene splitters between electrodes in order to avoid short-circuit with consequences of explosion and fire. The polyethylene mass decreased aggregate of electrolyte and made difficult a way of gas bubble, increasing ohmic resistance of system, called solution overstrain. This took down conductivity and made reducing system yield.

It was realized several tests with different electrolyte concentration, between 4 per cent and 13 per cent of potassium hydroxide, being noticed an increase of yield proportional to increase of concentration. In the conditions of reactor what doesn't contain splitter membrane of gases, the system doesn't withstand concentrations over 15 per cent.

## ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1- Visão geral da geração do hidrogênio	4
2.2- Eletrólise da água	6
2.2.1- Eletrolisador: O processo e seu balanço	6
2.2.2- Tensão na célula	8
2.2.3- Densidade de corrente da célula	11
2.2.4- Curvas de Polarização	12
2.2.5- Efeitos da temperatura sobre a eletrólise da água	13
2.2.6- Efeitos da pressão na eletrólise da água	14
2.3- O projeto do eletrolisador: seus aspectos	16
2.3.1- Tipos genéricos de sistemas eletrolisadores de água	16
2.3.1.1- Eletrolisadores Convencionais	16
2.3.1.1.1- Eletrolisador Unipolar	16
2.3.1.1.2- Eletrolisador Bipolar	18
2.3.1.2- Eletrolisador Avançado	18
2.3.2- Componentes básicos de um sistema eletrolítico e suas características	19
2.3.2.1- Eletrólito	19
2.3.2.2- Eletrodos	20
2.3.2.3- Reservatório	20
2.3.2.4- Separador	21

2.4-	Fenômeno da Combustão e da Chama	22
2.4.1-	A química da combustão	22
2.4.1.1-	A reação hidrogênio-oxigênio	23
2.4.2-	Queima de gases	23
2.4.2.1-	Principais propriedades e características de um gás	25
2.4.2.1.1-	Densidade relativa	25
2.4.2.1.2-	Poder calorífico	25
2.4.2.1.3-	Velocidade da chama	25
2.4.2.1.4-	Temperatura de chama	28
2.4.2.1.5-	Limites de Inflamabilidade	29
2.4.2.1.6-	Número de Wobbe	30
2.4.2.1.7-	Número de aeração	31
2.4.2.2-	Diagrama de Combustão	32
2.4.3-	Estudo da Chama	33
2.4.3.1-	Combustíveis e comburentes	33
2.4.3.2-	Fenômenos típicos que ocorrem com a chama de gás em queimadores	33
2.4.4-	Estabilização das chamas nos queimadores	38
2.5-	O processo de soldagem	38
2.5.1-	Classificação dos processos de soldagem	40
2.5.1.1-	Soldagem a gás	40
2.5.1.2-	Solda autógena oxi-hidrogênio	41
2.5.2-	Solda e Corte por laser a CO <sub>2</sub>	41
2.5.2.1-	Corte com o laser a CO <sub>2</sub>	41

2.5.2.2- Solda com o laser a CO <sub>2</sub>	42
2.5.3- Fontes de corrente de soldagem	42
3. METODOLOGIA E TRABALHO EXPERIMENTAL	43
3.1- Descrição do equipamento	44
3.2- Descrição do sistema	46
3.2.1- Reator Eletrolítico	46
3.2.2- Reservatório de Eletrólito	48
3.2.3- Trocador de Calor	50
3.2.4- Sistema de purificação	50
3.2.4.1- Vaso de tomada de medidas	50
3.2.4.2- Selo de óleo	53
3.2.5- Selos Controladores da Chama	53
3.2.5.1- Selo de álcool	55
3.2.5.2- Selo de Benzina	55
3.2.6- Pressostato	55
3.2.7- Fonte de alimentação	55
3.2.8- Disposição espacial do sistema	57
3.3- Operação com a máquina oxi-hidrogênica	57
3.3.1- Instalação	57
3.3.2- Procedimento para partida	57
3.3.3- Acendimento e regulagem da chama	59
3.3.4- Apagamento da chama e procedimento de parada	60
3.4- Manutenção	60
3.4.1- Água de alimentação	60
3.4.2- Álcool e benzina	61
3.4.3- Limpeza interna	61

3.5- Segurança	61
3.6- Material utilizado	62
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
4.1- Curva de Polarização	64
4.1.1- Efeito da concentração	73
4.2- Consumo de energia elétrica e rendimento do sistema	73
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	82
5.1- Conclusões	83
5.2- Recomendações	84
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA	PÁGINA	IDENTIFICAÇÃO
2.1	12	Voltagem teórica de eletrólise x Temperatura
2.2	15	Curvas de Polarização típicas
2.3	17	Tipos de módulos de eletrólise
2.4	24	Limite de explosão para reação hidrogênio-oxigênio em função da temperatura e da pressão
2.5	34	Esquemática de duas chamas mostrando o efeito de queima dos gases com variação do número de aeração sob idênticas condições
2.6	35	Diagrama de combustão
2.7	39	Processos comuns de soldagem
3.1	45	Fluxograma do processo
3.2	47	Reator eletrolítico do tipo bipolar ou filtro prensa constituído de 55 placas paralelas
3.3	49	Tela de polietileno para separação das placas
3.4	49	Placas do reator eletrolítico
3.5	51	Reservatório do eletrólito e Trocador de calor
3.6	52	Vaso de tomada de medidas
3.7	54	Selo de óleo
3.8	56	Selos controladores de chama
3.9	58	Visão espacial do sistema
4.1	66	Curva de polarização (4% de KOH em peso)
4.2	68	Curva de polarização (7% de KOH em peso)
4.3	70	Curva de polarização (10% de KOH em peso)

4.4	72	Curva de polarização (13% de KOH em peso)
4.5	76	Curva de Rendimento do Sistema
4.6	77	Consumo de Energia elétrica (4% de KOH em peso)
4.7	78	Consumo de Energia elétrica (7% de KOH em peso)
4.8	79	Consumo de Energia elétrica (10% de KOH em peso)
4.9	80	Consumo de Energia elétrica (13% de KOH em peso)
4.10	81	Consumo de Energia elétrica (para 4%, 7%, 10% e 13% de KOH em peso) comparativamente.



## LISTA DE TABELAS

TABELA	PÁGINA	IDENTIFICAÇÃO
2.1	27	Poderes caloríficos
2.2	28	Temperatura de chama de alguns gases
2.3	29	Temperatura média das chamas com diferentes combinações de gases
2.4	30	Límites de inflamabilidade
4.1	65	Dados experimentais de Tensão x Corrente à temperatura de 70 C (para 4% de KOH).
4.2	67	Dados experimentais de Tensão x Corrente à temperatura de 70 C (para 7% de KOH).
4.3	69	Dados experimentais de Tensão x Corrente à temperatura de 70 C (para 10% de KOH).
4.4	71	Dados experimentais de Tensão x Corrente à temperatura de 70 C (para 13% de KOH).
4.5	74	Dados teóricos e reais de produção de gases em função da potência calculada

## SIMBOLOGIA

A	- Ampere
AC	- Corrente Alternada
atm	- Atmosfera
C	- Carbono
°C	- Grau centígrado
Cal	- Caloria
CC	- Corrente Contínua
CO	- Monóxido de Carbono
CO <sub>2</sub>	- Dióxido de Carbono
cm	- Centímetro
cm <sup>2</sup>	- Centímetro quadrado
CNTP	- Condições normais de temperatura e pressão
dm <sup>2</sup>	- Decímetro quadrado
E	- Voltagem real de operação da célula
e <sup>-</sup>	- Eletron
E <sub>0</sub>	- Tensão de decomposição nas CNTP
E <sub>p</sub>	- Tensão mínima para a eletrólise
E <sub>rev</sub>	- Voltagem da célula reversível
F	- Constante de Faraday
g	- Grama
GLP	- Gás liquefeito do petróleo
H	- Hidrogênio
h	- Hora

$H_2$	- Gás Hidrogênio
$H^+$	- íon hidrogênio
$H_2O$	- Água
$I$	- Corrente da célula
kcal	- Quilo-caloria
Kg	- Quilograma
Kgf	- Quilograma-força
KOH	- Hidróxido de Potássio
Kw	- Quilowatts
Kwh	- Quilowatts-hora
l	- Litro
m	- Metro
$m^2$	- Metro quadrado
$m^3$	- Metro cúbico
ml	- Mililitro
mm	- Milímetro
$N_2$	- Gás Nitrogênio
$Nm^3$	- Normal metro cúbico (metro cúbico nas condições normais de temperatura e pressão)
n	- Número de eletrons transferidos na reação
$O_2$	- Gás Oxigênio
$OH^-$	- íon hidroxila
P	- Pressão de operação do eletrolisador
ppm	- Parte por milhão
$P_r$	- Potência real
$P_t$	- Potência teórica
s	- Segundo

t	- Tempo
ton	- Tonelada
V	- Volume
v	- Volts
z	- Número de elétrons
W	- Watts
$\eta$	- Rendimento do Sistema
$\Delta G$	- Variação da Energia livre de Gibbs para a reação

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

---

## 1. Introdução

A partir de 1983, quando o engenheiro suíço E. Spirig inventou a máquina de solda oxi-hidrogênica muitos progressos foram feitos (1). No Brasil, a partir de 1988 desenvolve-se algumas indústrias com "know-how" desenvolvido pelos grupos de eletroquímica das universidades. No Rio Grande do Sul, ligadas ao Departamento de Engenharia Química, UFRS, surgem duas fábricas. Em São Carlos, a UFSCAR transfere o "know-how" para a firma EDG- Equipamentos e Controles Ltda. No Rio de Janeiro, ligados à COPPE, surge a máquina de solda DAKOTA. Posteriormente, em 1990, em Joinville, é fabricada a ACQUA-SOLDA pela indústria FORZA. Com problemas de recuo de chama e má qualidade da solda, as indústrias citadas deixam de fabricar as máquinas de solda oxi-hidrogênicas. A partir de 1990 a DAKOTA aperfeiçoou o sistema e é a única existente no mercado.

A presente pesquisa tem por objetivo propor soluções para melhorar a qualidade da solda e a segurança nas máquinas de solda oxi-hidrogênicas. Observou-se que uma injeção de oxigênio complementar corrige e permite soldas adequadas.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---





## GASEIFICAÇÃO DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS E BIOMASSA:

Gaseificação de carvão

Reforma-vapor de hidrocarbonetos pesados

Oxidação parcial de hidrocarbonetos pesados

Gaseificação de madeira e resíduos agrícolas

Reforma do etanol e do metanol

## OUTROS PROCESSOS:

Decomposição termoquímica da água

Decomposição térmica da água

A partir da energia eólica

A partir da energia fotovoltaica

Teoricamente, a produção de hidrogênio por eletrólise da água é bastante simples. Uma célula básica de eletrólise consiste de um par de eletrodos imersos numa solução de um eletrólito dissolvido em água. Uma corrente contínua passa através da célula de um eletrodo a outro. O hidrogênio evolui em um eletrodo, o oxigênio no outro enquanto a água pura alimenta continuamente a célula eletrolítica, enquanto os gases  $H_2$  e  $O_2$  são continuamente obtidos nos eletrodos.

Na prática, porém, as células eletrolíticas são mais complicadas, devendo conter outros componentes para funcionarem de maneira eficiente e econômica. (ALVES, 1992)

Tecnologias para produção em larga escala de hidrogênio por eletrólise estão sendo desenvolvidas em vários países, inclusive no Brasil. Está claro que em alguns países do mundo, como por exemplo o Brasil, o hidrogênio eletrolítico competirá em curto prazo com o hidrogênio fóssil. O fator determinante é o potencial hidroelétrico apresentado. (TICCIANELLI, 1985)

O uso industrial de hidrogênio como combustível envolve a

sua queima nas operações de corte e solda, por exemplo. Usa-se também para a solda de alumínio, magnésio e chumbo. A combustão do hidrogênio é usada também em operações de corte de metais sob água, em grandes profundidades. A chama de combustão do hidrogênio com oxigênio é usada também na fabricação de quartzo e vidro. (MOURA,1982)

## 2.2 - ELETRÓLISE DA ÁGUA

### 2.2.1 - Eletrolisador: O processo e seu balanço

Denomina-se processo eletrolítico todo aquele em que reações químicas são desencadeadas, a partir de uma fonte eletromotriz externa ao sistema químico. Em geral, o fornecimento de tensão e corrente é feito através de eletrodos entre os quais existe um meio condutor iônico, que pode ser líquido (solução eletrolítica, sal fundido) ou sólidos (membranas de ácidos sólidos, cerâmicas, permiônicas).

Um processo eletrolítico particular que utiliza eletrodos inertes e meio condutor ácido ou básico, aquoso, em que os produtos das reações envolvidas são apenas o hidrogênio e o oxigênio, ou seja, cujo balanço das reações químicas resulta unicamente na decomposição da água, é denominado eletrólise da água. (SILVA,1991)

De acordo com CAMPOS (1990) a água quimicamente pura dissocia-se reversivelmente segundo o seguinte equilíbrio:

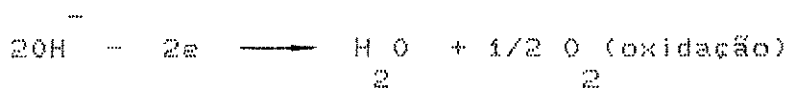


Esta propriedade permite que o elemento seja decomposto e seus constituintes, com uma fonte de corrente contínua.

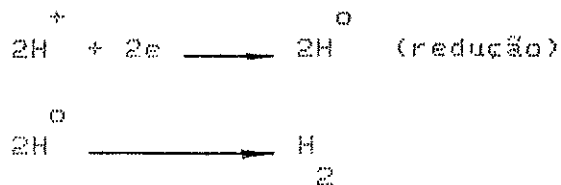
Se em um recipiente contendo água pura imergirmos duas placas condutoras e as ligarmos aos terminais de um gerador de

corrente contínua, de modo a que se estabeleça entre elas uma diferença de potencial elétrico, teremos entre as mesmas um campo elétrico, sob cuja influência os íons se deslocarão no sentido das placas de polaridade oposta. Quando os íons alcançam as placas ocorrem as seguintes reações químicas:

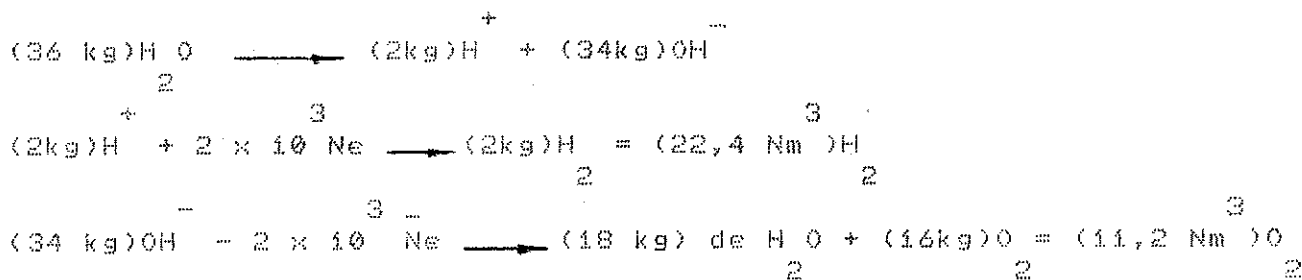
a) Na placa positiva ou anodo.



b) Na placa negativa ou catodo



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



onde:  $N = 6,023 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$  (número de avogadro)  
 $e = 1,6021 \times 10^{-19} \text{ C}$  (carga do elétron)

A quantidade  $10^3 \text{ Ne} = 96494 \times 10^3 \text{ C}$  é a quantidade de eletricidade movimentada para realizar o processo. Ela pode também ser expressa por:

$$96494 \times 10^3 / 10^3 \times 3600 = 26,80 \text{ kWh}$$

Assim para produzir  $22,4 \text{ Nm}$  de  $\overset{3}{\text{H}}$  e  $11,2 \text{ Nm}$  de  $\overset{3}{\text{O}}$  são

necessários 18 kg de água e deve-se transportar  $2 \times 26,804 = 53,608$  kWh de eletricidade.

Para produzir  $1 \text{ Nm}^3/\text{h}$  de  $\text{H}_2$  e  $0,5 \text{ Nm}^3/\text{h}$  de  $\text{O}_2$  uma célula de eletrólise deverá ser atravessada por uma corrente elétrica de:

$$53,608/22,4 = 2,393 \text{ kA e consumirá}$$

$$18/22,4 = 0,80 \text{ kg/h de água. Do mesmo modo uma corrente de 1kA produzirá } 1/2,393 = 0,418 \text{ Nm}^3/\text{kAh}$$

Seja  $V$  a tensão aplicada à célula para manter uma produção de  $1 \text{ Nm}^3/\text{h}$ . A energia dispendida será então:

$$E = 2,393 \times V (\text{kWh}/\text{Nm}^3 \text{ H}_2)$$

Como a água quimicamente pura apresenta uma condutividade elétrica muito baixa, na eletrólise industrial acrescenta-se um eletrólito, que por sua natureza não participa das reações, apenas servindo para aumentar a condutividade. Usualmente, emprega-se hidróxido de sódio ou hidróxido de potássio. Isso é feito com o objetivo de reduzir  $V$  e, conseqüentemente, o consumo de energia. (CAMPOS, 1990)

### 2.2.2 - TENSÃO NA CÉLULA

A tensão teórica mínima, ou reversível, ( $E$ ) na célula eletrolítica é determinada pela energia elétrica mínima que pode ser aplicada à célula para a eletrólise ocorrer. Esta energia, por sua vez, é dada pela diminuição da energia livre,  $\Delta G$ , necessária para decompor a água em seus elementos. Escrevendo em quantidades molares da reação da célula:

$$E = -\Delta G / nF \dots\dots\dots(1), \text{ onde } n \text{ e } F \text{ representam o}$$

número de elétrons transferidos na reação e a constante de Faraday,

respectivamente.

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

$$\Delta G = \Delta H - \frac{\Delta Q_r}{r} \dots\dots(2), \text{ onde } \frac{\Delta Q_r}{r} = T\Delta S \text{ e}$$

$\frac{\Delta Q_r}{r}$  = calor que deve ser trocado com o meio se a reação da célula conduzida reversivelmente permanecer na temperatura constante

T = Temperatura da célula

$\Delta S$  = mudança da entropia para reação de eletrólise

Para eletrólise ocorrer com taxas práticas, a tensão ou voltagem (V) aplicada a célula deve exceder a tensão reversível da célula ( $E_0$ ). A diferença  $V - E_0$  é necessária para vencer as resistências (elétrica e polarização) associadas ao processo de eletrólise; a energia correspondente é eventualmente dissipada dentro da célula como calor irreversível ( $\Delta Q_i$ ) de acordo com:

$$V - E = \Delta Q_i / nF \dots\dots\dots(3)$$

Reescrevendo a Equação (3) usando as Equações (1) e (2) tem-se:

$$V = - (\Delta H - \Delta Q_r + \Delta Q_i) / nF \dots\dots\dots(4)$$

A Equação (4) afirma que o calor endotérmico reversível requerido ( $\Delta Q_r$ ), da reação de eletrólise é exatamente balanceado com o calor irreversível ( $\Delta Q_i$ ) liberado devido a ineficiência da célula

quando a tensão aplicada na célula iguala-se a  $-\Delta H/nF$ , às vezes chamada de voltagem,  $\Delta H$ . Desde que nestas condições nenhum calor seja trocado com o meio da célula, a tensão  $\Delta H$  é também chamada de "tensão termoneutra". As células eletrolíticas operadas com voltagens entre E e  $\Delta H$  devem ser abastecidas de calor de uma fonte externa para manter a operação em temperatura constante de interesse prático; as células operadas acima da voltagem  $\Delta H$  devem ser resfriadas.

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

A eficiência térmica de uma célula eletrolítica é comumente definida como a relação da quantidade de calor do produto do hidrogênio com a entrada de energia na eletrólise:

$$\eta \text{ (\%)} = \frac{\Delta H}{nFV} \times 100 = \frac{\text{voltagem } \Delta H}{\text{voltagem de operação}} \times 100 \quad \dots\dots\dots(5)$$

Desde que a água seja eletrolizada à voltagens acima de E mas abaixo da voltagem  $\Delta H$ , as eficiências acima de 100% são possíveis; sob tais condições, a energia é conservada através da absorção de calor do meio da célula. Porém, no momento, todos os eletrolisadores práticos operam com voltagens acima da voltagem  $\Delta H$  (e, assim, com eficiências abaixo de 100%), o que torna necessário o resfriamento .

A voltagem de uma célula em operação pode ser representada como segue:

$$V = E + (N_c + N_a + IR_o) \dots\dots\dots(6), \text{ onde}$$

E = voltagem teórica da célula

N<sub>c</sub> = supervoltagem do catodo

N<sub>a</sub> = supervoltagem do anodo

I = corrente da célula

R = resistência da célula

o

### 2.2.3 - DENSIDADE DE CORRENTE DA CÉLULA

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

$$R = 4,4 \times 10^{-4} I \dots\dots\dots(7)$$

G

Dividindo ambos os lados da Equação (7) pela área de célula resulta numa relação correspondente entre a taxa de produção de hidrogênio por unidade de área da célula e a densidade de corrente:

$$R/A = 4,4 \times 10^{-4} J \dots\dots\dots(8), \text{ onde}$$

G

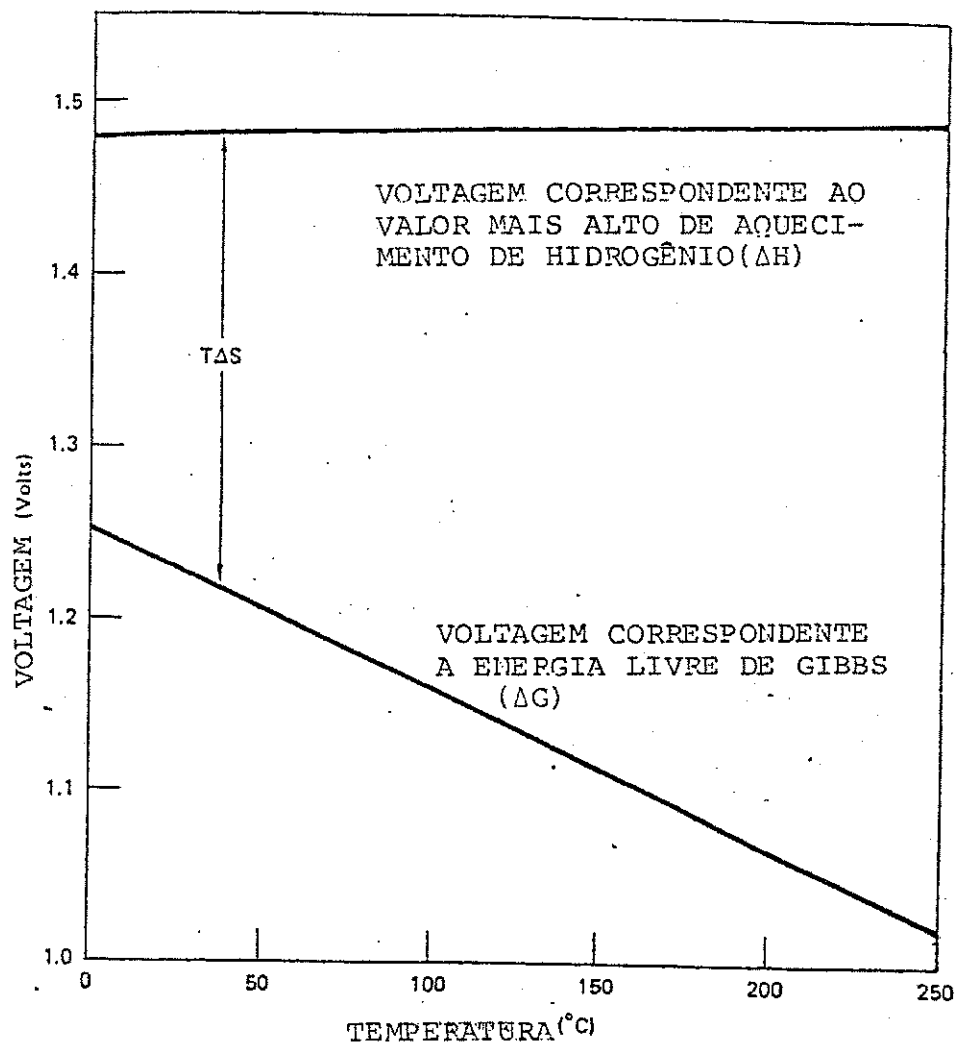
R = taxa de geração de hidrogênio (m<sup>3</sup> /h) (supondo nenhuma recombinação dentro da célula)

A = área da célula (m<sup>2</sup>)

J = densidade de corrente (Amp/m<sup>2</sup>)

O custo de um módulo de eletrólise, C<sub>m</sub>, é inversamente proporcional a R/A e diretamente proporcional ao custo por unidade de área, C<sub>f</sub>. Por isso a densidade de corrente torna-se um parâmetro econômico muito significante quando:

Figura 2.1 - Voltagem teórica de eletrólise x Temperatura



K.E. COX e K.D. WILLIAMSON, Jr., 1977



$$E_{em} = \frac{KC}{fJ} \dots\dots\dots(9)$$
, onde K representa a constante de proporcionalidade

#### 2.2.4 - CURVAS DE POLARIZAÇÃO

Desde que a voltagem na célula e a densidade de corrente sejam muito importantes quando da otimização da célula eletrolítica ou do sistema, a relação desses parâmetros é especialmente significativa. Esta relação, chamada de "Curva de Polarização", está mostrada esquematicamente na Figura 2.2. A voltagem de operação de uma célula eletrolítica aproxima-se da voltagem mínima teórica, E, apenas em densidades de corrente muito pequenas. Quando J aumenta, Nc, Na e os termos de polarização IR (JR') tornam-se os maiores contribuintes para a voltagem de operação.

#### 2.2.5 - EFEITOS DA TEMPERATURA SOBRE A ELETRÓLISE DA ÁGUA

Conforme mostra a Figura 2.1, aumentando-se a temperatura diminui-se a voltagem teórica requerida para eletrólise da água. Por outro lado, a voltagem correspondente a  $\Delta H$  aumenta levemente com o aumento da temperatura. Por isso, enquanto um pouco mais de energia total é necessária à temperaturas mais altas, a necessidade mínima teórica de energia elétrica é mais baixa.

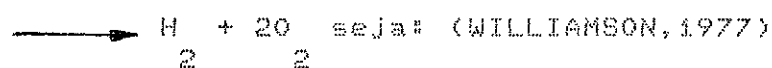
Apesar de mais importante na prática, os termos de perda-de-voltagem Na, Nc e IR são reduzidos consideravelmente com o aumento da temperatura. Como resultado, as curvas de polarização de quase todas as células eletrolíticas melhoram com o aumento da temperatura. Diversos pesquisadores mostraram que (na densidade de corrente) a voltagem da célula diminui quase linearmente com a temperatura.

Muitos eletrolisadores comerciais operam entre 70 C e 90 C. Quando a temperatura é elevada acima deste nível, os problemas de

compatibilidade do material (corrosão) começam a limitar a sua vida útil. Além disso torna-se necessário pressurizar o sistema para reduzir a perda d'água por evaporação.

### 2.2.6 - EFEITOS DA PRESSÃO NA ELETRÓLISE DA ÁGUA

Uma vantagem da eletrólise é que os gases hidrogênio e oxigênio podem ser liberados com pressão com pouca perda de energia. Supondo que termodinamicamente reversível, a energia teórica mínima requerida para pressurização dos gases produzidos da reação  $2H_2O$



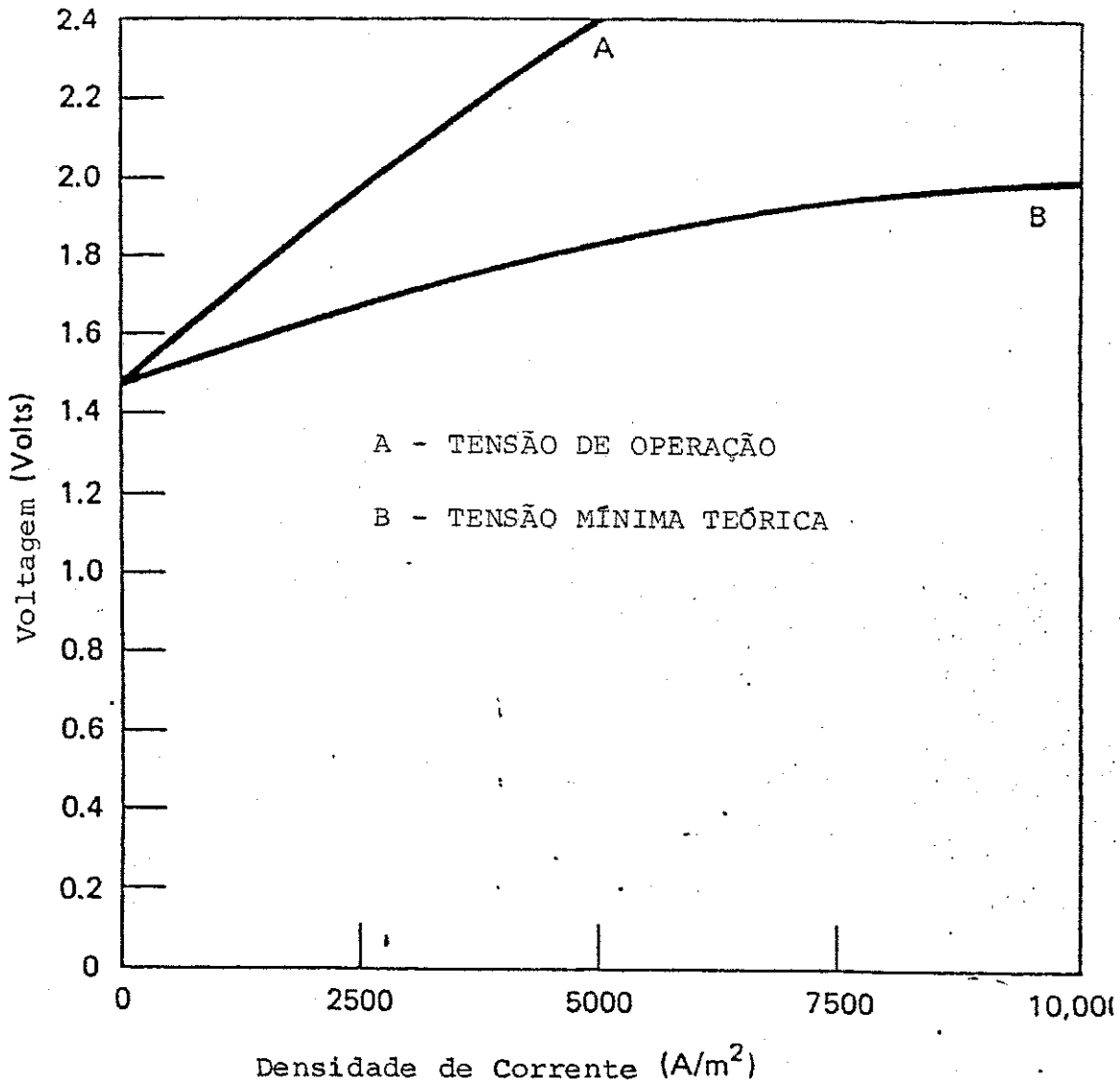
$$\Delta E = 3RT/4F \times \ln P \dots\dots\dots(10), \text{ onde}$$

- R = constante do gás
- T = temperatura ( em graus Kelvin)
- F = constante de Faraday
- P = pressão

A equação (8) ocorre essencialmente para pressurização apenas do hidrogênio. Depois, o volume de bolhas do gás envolvente é reduzido quando a pressão é aumentada. Desde que as bolhas envolventes possam levar a um aumento da resistência de eletrólitos aquosos, a redução do volume de gás diminui significativamente o termo  $IR_{10}$ . De acordo com este conceito, alguns pesquisadores observaram que a performance da célula eletrolítica aumenta com o aumento da pressão.

As pressões mais altas, porém podem causar dificuldades na separação e contenção de gases pressurizados, bem como problemas nos materiais como a fragilização pelo hidrogênio. Também, em altas pressões, o hidrogênio e o oxigênio difundir-se-ão mais rapidamente

Figura 2.2 - Curvas de Polarização Típicas



K.E. COX e K.D. WILLIAMSON, Jr., 1977

através do diafragma e recombinar-se-ão antes que eles deixem o sistema. Isto leva a uma taxa visível de geração de hidrogênio menor do que aquela calculada pela equação (8). À pressões e temperaturas altas, essa ineficiência de corrente pode causar perdas significantes (1 a 100%) do hidrogênio gerado (45).

## 2.3 - O PROJETO DO ELETROLISADOR: SEUS ASPECTOS

### 2.3.1- TIPOS GENÉRICOS DE SISTEMAS ELETROLISADORES DE ÁGUA

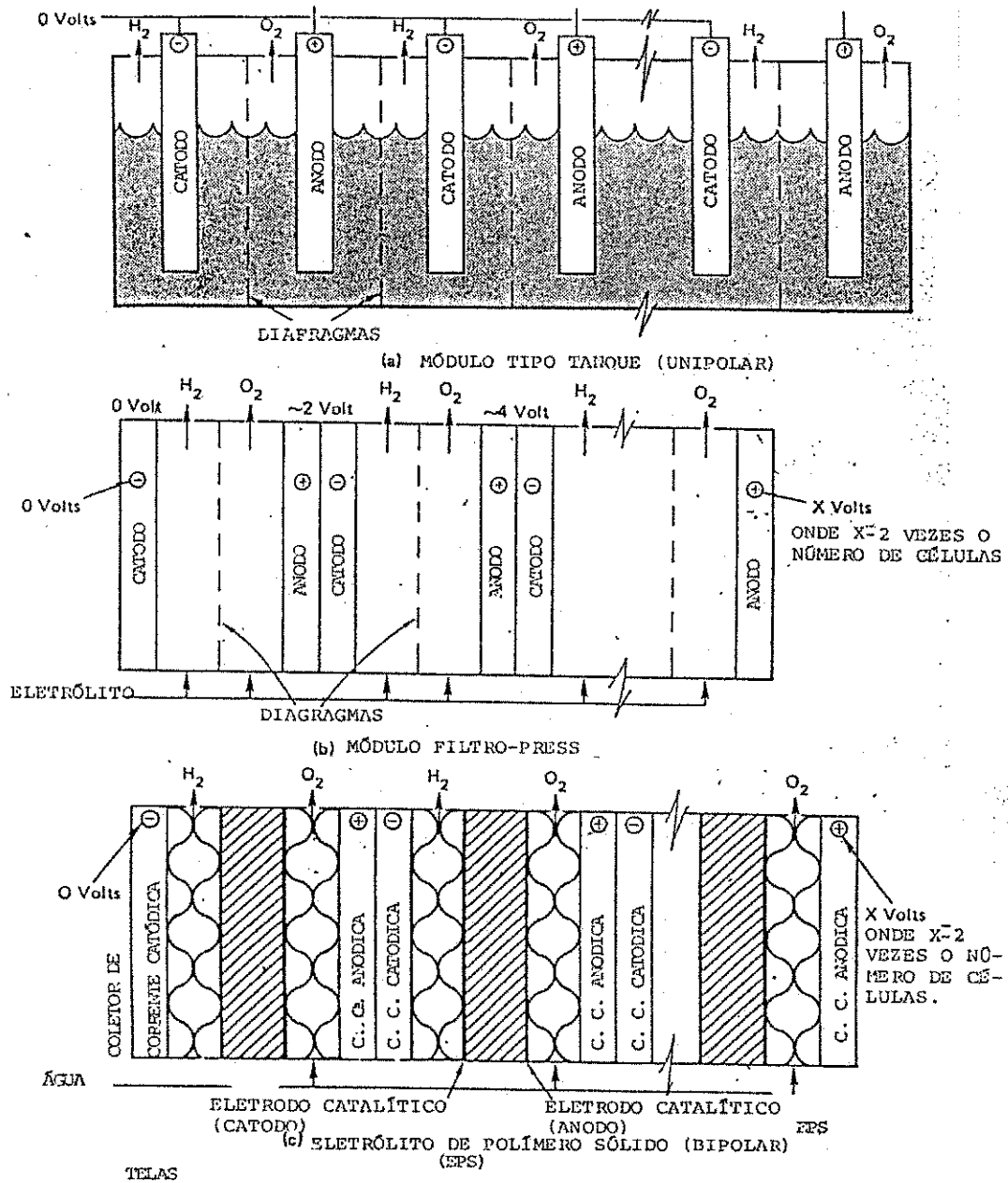
Os dois tipos básicos de eletrolisadores são o UNIPOLAR (tipo tanque) e bipolar. A principal diferença entre os dois tipos é que no UNIPOLAR as células individuais são agrupadas em paralelo e dividem um eletrólito comum, enquanto no BIPOLAR, as células são conectadas em série e cada uma tem o seu próprio eletrólito. As versões comerciais de ambos os tipos usam 25 a 35% de hidróxido de potássio como eletrólito e operam com temperatura na faixa de 70 a 85 °C (Figura 2.3).

#### 2.3.1.1 - Eletrolisadores Convencionais

##### 2.3.1.1.1 - Eletrolisador Unipolar

Um diagrama esquemático de um eletrolisador unipolar está mostrado na Figura 2.3(a). A construção do eletrolisador tanque é muito simples. As células individuais são colocadas num tanque eletrolítico comum. Cada tanque é chamado "módulo". Todos os anodos e catodos são conectados em paralelos. Por isso, a voltagem do módulo total é a mesma voltagem de uma única célula. Os eletrodos alternados são cercados por diafragmas os quais evitam que o hidrogênio e o oxigênio se misturem. Os módulos são conectados em série para alcançar a

FIGURA 2.3 - Tipos de módulos de eletrolise



K.E. COX e K.D. WILLIAMSON, 1977

capacidade de produção do hidrogênio desejada.

A principal desvantagem deste tipo é que cada módulo requer correntes muito altas com voltagem baixas devido ao grande número de células conectadas em paralelo.

#### 2.3.1.1.2 - Eletrolisador Bipolar

Neste tipo de eletrolisador, mostrado na Figura 2.3(b), um eletrodo serve como catodo para uma célula e como anodo para a célula adjacente. Desde que as células estejam em série, a voltagem aumenta na proporção do número de células na pilha. Por exemplo, um módulo de 100 células teria que ter uma voltagem total de mais ou menos 200Vdc. Na configuração bipolar, cada célula deve conter o seu próprio eletrólito. A pureza e a concentração do eletrólito são controlados pela circulação contínua que remove o calor inculco no sistema. (WILLIAMSON E COX, 1977)

#### 2.3.1.2 - Eletrolisador avançado

Embora muitos avanços tenham sido feitos nos últimos anos na área da eletrólise da água, ainda não estão disponíveis no mercado sistemas avançados destinados à produção de grandes massas de hidrogênio [Figura 2.3 (c)]. Atualmente a tecnologia que mais se desenvolveu nesse sentido foi a da General Electric Company, que trabalha desde 1966 na área e que já produz células avançadas para pequenas demandas com membranas separadoras de polímero sólido, conhecido como Nafion (marca Du Pont). Além das células da GE se destacam os trabalhos desenvolvidos no Japão e na Bélgica., que aparentemente vem conseguindo bons resultados, mas que ainda se encontram em escala de laboratório ou em estágio inicial de comercialização. Todas as células testadas operam à médias

temperaturas e pressões mas diferem uma das outras em vários aspectos tais como: separadores, eletrólitos e eletrodos. (SILVA,1987)

### 2.3.2 - Componentes básicos de um sistema eletrolítico e suas características

#### 2.3.2.1 - Eletrólito

Segundo GOLDFARB (5), esta é uma solução aquosa de um sal ou outro composto de boa condutividade elétrica quando em solução. A seleção do eletrólito é muito importante, pelo fato deste ter que apresentar as seguintes características: deve ter uma alta condutividade iônica; não pode decompor-se quimicamente por maior que seja a diferença de potencial aplicada à célula (somente a água deve decompor-se); não pode ser volátil a ponto de ser removido facilmente junto com os gases de saída.

Nas aplicações práticas, estes critérios são conseguidos com o uso de um ácido forte, como o ácido sulfúrico, ou o hidróxido de potássio (KOH). A maior parte dos sais apresentam a tendência de decompor-se quimicamente quando submetidos a altas tensões nas células, o que praticamente impossibilita o seu uso. Os eletrólitos ácidos apresentam sérios problemas de corrosão e por isso não são usualmente selecionados para serem utilizados nos eletrolisadores. Assim, a maioria dos eletrolisadores comerciais operam com eletrólito alcalino. A máxima condutividade ocorre em soluções de KOH numa concentração de 30% em peso, e esta é a concentração normalmente utilizada nos eletrolisadores comerciais.

Há uma notável excessão ao uso de eletrólitos alcalinos, que é o uso de um material sólido polimérico de troca iônica que também apresenta uma boa condutividade iônica. As resinas de troca iônica que

têm íons negativos móveis (resina de troca iônica alcalina) são notoriamente sensíveis à degradação química a altas temperaturas, e isto limita a escolha a sistemas ácidos de troca iônica. O trabalho de maior sucesso que utiliza eletrólito sólido de troca iônica, tem utilizado polímero ácido fluor poliestireno sulfônico.

#### 2.3.2.2 - Eletrodos -

De acordo com ALVES (5), os eletrodos devem ter as seguintes características: devem ser condutores elétricos; devem ter uma superfície catalítica adequada para descarga dos íons hidrogênio e hidroxila; devem ter uma grande área de interface com o eletrólito; devem ter sítios adequados para nucleação das bolhas de gás.

A forma dos eletrodos varia consideravelmente do projeto de uma célula para outro. Grandes áreas de contato com o eletrólito são obtidas pelo uso de diversas estruturas sinterizadas, como juntas finas, telas, pratos perfurados e planos com superfícies eletroquímicas rugosas e mais recentemente, eletrodos volumétricos tipo esponjas.

Em células alcalinas, o níquel é mais comumente usado como catalisador de superfície. Visto que eletrodos de níquel puro é caro, então aço recoberto com platina-níquel é mais frequentemente utilizado. A aplicação de metais preciosos como catalisadores, tais como platina, melhora consideravelmente o processo no eletrodo, permitindo que este se processe mais rapidamente do que com o níquel, mas o custo extra do metal precioso não justifica a sua aplicação. (GOLDFARB, 1992)

#### 2.3.2.3 - Reservatório -

Serve para comportar o eletrólito. Em algumas células, um



tanque de aço com níquel e platina com uma tampa é usado, enquanto em outros, as chapas do metal sólido são interpostas entre os eletrodos, que são então empilhados juntamente com as gachetas na periferia, usados para lacrar as bordas externas. Desta maneira, o reservatório não é necessário e a corrente passa de um eletrodo ao próximo através da solução de eletrólito. (GOLDFARB,1992)

#### 2.3.2.4 - Separador -

Segundo ALVES (5), o separador é colocado entre os dois eletrodos, este serve para: evitar que dois eletrodos toquem um com o outro, evitando o curto-circuito e impedir mistura dos gases hidrogênio e oxigênio dentro da célula. Para cumprir sua função satisfatoriamente, o separador deve ser feito de um diafragma poroso através do qual a solução de eletrólito pode passar, proporcionando a condução de íons de um compartimento da célula para outro. Estes poros devem permanecer cheios de líquidos, de forma que o gás não possa penetrar neles. Além disto, o material do separador não deve ser corroído pelo eletrólito na presença dos gases hidrogênio ou oxigênio, e deve ter uma estrutura estável para uma longa vida de operação da célula, como também para que os poros não se fechem com o tempo. Para manter uma resistência à passagem de íons a menor possível, o separador é feito usualmente na forma de chapas, cuja espessura é determinada pelo esforço mecânico e limitações de mistura dos gases. No caso de células alcalinas, asbestos têm sido comumente usados como material separador. Tranças de tecidos de asbestos são bastante utilizados em células comerciais. Alguns materiais experimentais, incluindo titanato de potássio, têm sido empregados em outras células. No caso da resina ácida polimérica de troca iônica, este

material atua como próprio separador, não sendo necessário, portanto, um material adicional. Existem também casos onde os gases não precisam ser separados como é o caso das máquinas de corte e solda, onde os separadores são desnecessários.

Além dos componentes citados anteriormente, os quais correspondem ao eletrolisador propriamente dito, o sistema completo requer outros componentes. Estes incluem fonte de tensão, o qual envolve transformador, retificador de corrente de AC para DC; dutos para conduzir os gases; sistema de separação do eletrólito arrastado; sistema de remoção de calor gerado na célula e sistemas de secagem e purificação dos gases hidrogênio e oxigênio, depois que tiverem sido gerados, de acordo com a necessidade.

## 2.4 - FENÔMENO DA COMBUSTÃO E DA CHAMA

O fenômeno da combustão provém da interação de processos químicos e físicos e a aplicação prática de tais fenômenos envolve não apenas física e química mas também ciências aplicadas de aerodinâmica, tecnologia de combustível e engenharia mecânica.

### 2.4.1 - A Química da Combustão

O fenômeno de combustão ocorre porque toda reação química é exotérmica; porém a natureza e o caráter do fenômeno dependem de alguma forma dos detalhes das reações envolvidas e do mecanismo da reação. Embora as reações de cadeias ramificadas não sejam essenciais para propagação das chamas, as reações envolvidas são necessariamente rápidas e geralmente envolve processos de cadeias de algum tipo.

Segundo BRADLEY (6), devido muitas oxidações envolverem dois componentes, o combustível e o oxidante, as reações unimoleculares são

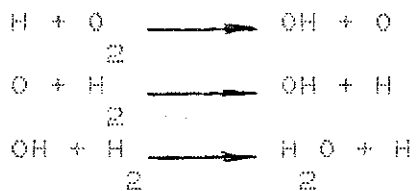
importantes normalmente apenas para um número limitado de reações de autodecomposição.

#### 2.4.1.1 - A Reação Hidrogênio-Oxigênio

As chamas pré-misturadas de hidrogênio no oxigênio ou ar são bem típicas exceto que elas mostram pouca ou nenhuma radiação, sendo a quantidade, que é observada, devido a traços de impurezas.

Em sistemas estáticos, nenhuma reação ocorre abaixo de 450° C sem que a mistura seja inflamada, enquanto que acima de 600° C a explosão ocorre espontaneamente em todas as pressões. Entre essas duas temperaturas, três limites de explosão separados podem ser identificados, o primeiro limite ocorrendo a poucos milímetros de pressão e o segundo até pressões de 200mmHg. (Figura 2.4)

A sequência básica da cadeia é composta de três reações: (BRADLEY, 1969)

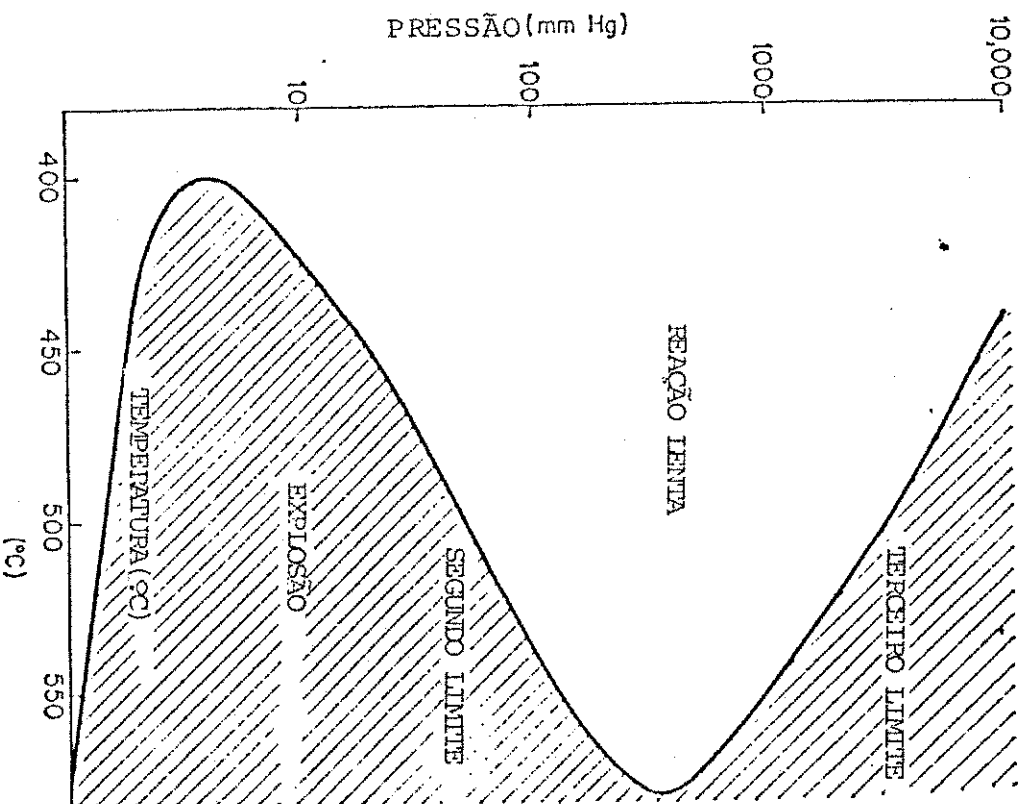


#### 2.4.2 - Queima de Gases

As características de combustão ou de queima de um gás fornecido a um sistema de distribuição devem ser observadas para que sua aplicação seja segura.

Os equipamentos devem ser projetados e ajustados para dar um comportamento satisfatório no que se refere à queima do gás.

FIGURA 2.4 - LIMITE DE EXPLOSAO PARA A REACAO HIDROGENIO-OXIGENIO EM FUNCAO DA TEMPERATURA E DA PRESSAO.



BRADLEY, J.N., 1968

#### 2.4.2.1 - Principais Propriedades e Características de Um Gás

As propriedades do gás que afetam o comportamento de sua queima em um equipamento são conhecidas pelo termo geral "CARACTERÍSTICAS GERAIS DE COMBUSTÃO". (CARDOSO, 1982)

Segundo CARDOSO (7), observam-se alterações na performance da queima de um gás quando ocorrer fatos como:

- Ao equipamento está sendo fornecido gás insuficiente ou em excesso provocando falta de calor ou desperdício.
- Os queimadores aerados apresentam "retorno de chama" ou excesso de barulho.
- Os queimadores apresentam "deslocamento de chama" ou "lift".
- A combustão incompleta poderá ocorrer produzindo monóxidos de carbono, aldeídos e fuligem como produtos de combustão.

2.4.2.1.1 - Densidade Relativa - é a relação entre a massa do gás e a massa de igual volume de ar atmosféricos nas mesmas condições de temperatura e pressão ou a relação entre a densidade absoluta de um gás e a densidade absoluta do ar nas mesmas condições de temperatura e pressão.

2.4.2.1.2 - Poder Calorífico - é a quantidade de calor desenvolvida pela combustão completa da unidade de volume (ou massa) deste gás combustível, estando este e o comburente nas condições normais de temperatura e pressão e sendo os produtos da combustão trazidos às mesmas condições.

2.4.2.1.3 - Velocidade da Chama - é a velocidade na qual a chama atravessa um mistura de gás. é também chamada de Velocidade de Queima e algumas vezes de velocidade de ignição. As velocidades de

queima variam de acordo com o tipo de gás. Assim, por exemplo, o hidrogênio queima muito rápido, ou seja, à razão de 9,3 pés/seg (3,0 m/seg). É importante frisar que a quantidade de ar na mistura ar-gás influi na velocidade de chama da mistura.

De acordo com Cardoso (7), outro fator que influi na velocidade de chama é a temperatura da mistura, ou seja, a velocidade aumenta com o aumento da temperatura da mistura. A velocidade de chama de um gás é normalmente dada em cm/seg ou pelo índice de Weaver, ou também chamado Fator S. Esse índice de Weaver ou Fator S é determinado pela expressão:

$$S = aFa + bFb + cFc + \dots / A + 5Z - 18,8\theta + 1 \dots\dots\dots(11)$$

onde:

a,b,c = fração molar de cada componente do gás

Fa,Fb,Fc = coeficiente para cada componente do gás (6)

A = quantidade de ar necessário para combustão de um pé cúbico de gás.

Z = fração molar dos componentes inertes do gás, CO e N<sub>2</sub>

θ = fração do oxigênio no gás

Calculado desta maneira, o índice de Weaver ou Fator S representa, numericamente, a relação, em termos percentuais, da máxima velocidade de chama de um gás no ar e a máxima velocidade de chama do hidrogênio no ar.

O fato de nos fixarmos no índice de Weaver, prende-se ao uso deste índice no Diagrama de Combustão. Para efeito prático do uso da velocidade de chama de gases em quaisquer aplicações temos:

- O hidrogênio com uma alta velocidade de chama.
- Os hidrocarbonetos com baixa velocidade de chama.
- O monóxido de carbono com baixa velocidade de chama.

A velocidade de chama de um gás que é queimado num equipamento, influi no comportamento de chama, que deve atender as necessidades para as quais foi projetado o equipamento.

TABELA 2.1 - PODERES CALORÍFICOS

Gás	Poder Calorífico BTU/SCPT	Densidade	Ar necessário (A)	F
Monóxido de				
Carbono	315,3	0,97	2,39	0,61
Hidrogênio	310,5	0,07	2,39	339
Metano	994,1	0,55	9,55	148
Etano	1757	1,04	16,71	301
Propano	2535	1,56	23,87	398
Butano	3330	2,09	31,03	513
Propileno	2337	1,45	21,48	674
Etileno	1572	0,97	14,32	454
Butileno	3132	2,00	28,64	890
Acetileno	1464	0,91	11,93	776
Benzeno	3700	2,70	35,79	920
Dióxido de				
Carbono	-	1,53	-	-
Oxigênio	-	1,11	(-4,78)	-
Hidrogênio	-	0,97	-	-

CARDOSO, A.J.C., 1982

#### 2.4.2.1.4 - Temperatura de Chama

Entende-se por temperatura de chama a temperatura a que seriam levados os produtos de combustão, se toda a energia térmica desenvolvida pela reação fosse utilizada para aquecê-los. Trata-se, então, da temperatura teórica máxima alcançada pelos produtos de combustão em condições adiabáticas. (CARDOSO, 1982)

Segundo CARDOSO (7), na prática estas temperaturas máximas teóricas são obtidas em virtude de não se conseguir condições adiabáticas perfeitas, da existência de reações simultâneas que ocorrem durante a combustão, da dissociação de  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  que ocorrem a partir de  $1200^\circ\text{C}$ , da presença de  $\text{N}_2$  (nitrogênio) no gás combustível, do excesso de oxigênio ( $\text{O}_2$ ), de erros de leitura, etc. Assim, na prática, a combustão se efetua em concomitância com as perdas de calor. A temperatura de chama pode ser calculada teoricamente e verificada com boa aproximação por leitura com pirômetro óptico ou termopar.

TABELA 2.2 - TEMPERATURA DE CHAMA DE ALGUNS GASES

Tipo	Com Ar $^\circ\text{C}$	Com $\text{O}_2$ $^\circ\text{C}$
Gás Natural	1.920	2.700
Gás Nafta (COMGÁS)	1.980	2.700
Gás de Carvão	1.950	2.660
GLP	1.930	2.720

CARDOSO, A.J.C , 1982



TABELA 2.3 -TEMPERATURA MÉDIA DAS CHAMAS COM DIFERENTES COMBINAÇÕES DE GASES

Oxigênio - acetileno	3200 C
Oxigênio - propano	2500 C
Oxigênio - hidrogênio	2370 C
Oxigênio - gás carbono	2200 C
Ar - acetileno	2460 C
Ar - gás carbono	1870 C
Ar - propano	1750 C

UTP Brasileira de Soldas Ltda. - 32 edição, 1982

#### 2.4.2.1.5 - Limites de Inflamabilidade

A combustão de um gás somente é possível com a presença de oxigênio ou ar atmosférico. O primeiro é chamado combustível, enquanto o segundo é chamado comburente. Existem determinadas proporções na mistura ar-gás ou oxigênio-gás nas quais a combustão é possível. Estas proporções variam para cada tipo de gás e não são um valor fixo, mas sim uma faixa de proporção. Esta faixa é conhecida para cada gás como Escala de Inflamabilidade e os pontos extremos são conhecidos como limites de inflamabilidade.

2.4.2.1.5.1 - Limite Inferior de Inflamabilidade - é a condição de mistura abaixo da qual existe um excesso de ar que impede o desenvolvimento da combustão. Nestas condições pode-se dizer que a mistura é pobre (em gás).

2.4.2.1.5.2 - Limite superior de inflamabilidade - é a condição de mistura acima da qual existe ar em quantidade insuficiente para que a combustão possa se desenvolver. Nestas condições pode-se

dizer que a mistura é rica (em gás).

TABELA 2.4 - LIMITES DE INFLAMABILIDADE

Tipo de gás	% Gás na Mistura	
	Inferior	Superior
Gás Natural	5	15
Gás Nafta (COMGÁS)	4	40
G.L.P.	7	21

CARDOSO, A.J.C., 1982

#### 2.4.2.1.6 - Número de Wobbe (W)

O poder calorífico de um gás não é, como muitas vezes se pensa, o único elemento que serve para medir a quantidade de calor a ser fornecida por um queimador. A densidade, também chamada por alguns de densidade específica ou densidade relativa do ar, afeta também a quantidade de calor a ser fornecida por um queimador já que tem influência sobre a vazão pelo orifício do queimador e, portanto, a quantidade de gás liberada pelo mesmo na unidade de tempo.

De acordo com CARDOSO (7) um gás com baixa densidade flui em maior quantidade através de um orifício do que um gás com densidade mais elevada. Assim, se a densidade decresce o calor liberado pelo queimador aumenta. Estas variações são importantes e devem ser consideradas quando se estuda a intercambiabilidade de sistemas de queima. Na prática, a quantidade de calor fornecido é inversamente proporcional à raiz quadrada da densidade e diretamente proporcional ao poder calorífico de um gás combustível à pressão constante. Pode ser expresso pela fórmula:

$$W = \text{Poder Calorífico} / \sqrt{\text{densidade relativa}} \dots\dots(11)$$

Esta expressão é conhecida como Número de Wobbe, índice de Wobbe ou índice de Wobbe da Quantidade de Calor Fornecido. Ela representa o calor fornecido quando um gás é queimado a uma pressão constante. O calor fornecido é então diretamente proporcional à área do orifício e ao Número de Wobbe. A quantidade de calor desenvolvida por um queimador de gás, em dado tempo é determinada por quatro fatores:

1. O tamanho do orifício que limita a saída do gás.
2. A pressão diferencial através do orifício.
3. O poder calorífico do gás.
4. A densidade específica do gás.

O número de Wobbe é definido para pressões constantes, porém em certas circunstâncias é necessário considerar variações de pressão. Neste caso é necessário incluir um fator relacionado com a pressão na fórmula do número de Wobbe. Assim, a fórmula de Wobbe modificada fica sendo:

$$W = \text{Poder calorífico} \times \sqrt{\text{pressão do gás}} / \sqrt{\text{densidade relativa}} \dots(12)$$

#### 2.4.2.1.7 - Número de Aeração

Um queimador pre-aerado tem um cone de chama interno frio circundado externamente por um quente. A forma e o tamanho de ambos os cones são influenciados pelo ar necessário e pela velocidade de chama, a qual depende da composição do gás. A altura do cone interno depende do ar necessário e da velocidade de queima do gás.

De acordo com CARDOSO (7), as variações na velocidade de

queima do gás afetam o tamanho do cone interno. Exemplificando: o hidrogênio tem uma velocidade máxima de chama aproximadamente sete vezes maior do que o metano. O hidrogênio propicia uma chama curta enquanto o metano tem uma chama mais longa.

Para se comparar as características de diferentes gases em termos de número de aeracção, foi desenvolvido um queimador de teste de aeracção que é o padrão de medição. Este, em princípio, queima o gás em um queimador aerado e tem um pequeno injetor na base com uma passagem de ar primário ajustável. Com uma pressão fixada, a passagem de ar é ajustada até que o topo do cone atinja 19mm acima do topo do queimador. O grau de abertura do ar é medido e expressa o número de aeracção.

Mais alto o número de aeracção do gás, maior será o ar primário necessário para manter o mesmo tamanho do cone. A Figura 2.5 mostra um queimador de teste de aeracção. Se um gás com baixo número de aeracção é fornecido ao queimador, e este não é reajustado, isto faz com que a mesma quantidade de ar seja arrastada, mas como o gás requer menos ar primário do que o arrastado, o tamanho do cone será menor. De modo inverso, se o número de aeracção baixo for colocado para um gás com um alto número de aeracção, o cone será comprido.

#### 2.4.2.2 - Diagrama de Combustão

Reúne-se neste diagrama (Figura 2.6) as características fundamentais como número de Wobbe e o Fator "S" de velocidade de chama de um gás. Estabelece-se para um determinado gás um triângulo formado pela intersecção das curvas de combustão incompleta, retorno de chama e desprendimento de chama. A determinação destas curvas é feita em laboratórios com equipamentos sofisticados e grande quantidade de

experimentos definindo-se, assim, para cada gás um tipo de Diagrama de Combustão. Sua função é determinar se os gases podem ou não ser intercambiáveis num sistema de distribuição ou na queima num equipamento. (CARDOSO, 1982)

#### 2.4.3 - Estudo da Chama

2.4.3.1 - Combustíveis e comburentes - combustíveis são os materiais que reagem facilmente com o oxigênio (comburente) do ar, produzindo grande quantidade de calor. Devem preencher requisitos técnicos-econômicos como segurança no armazenamento, transporte e utilização, além do baixo preço de obtenção.

O ar atmosférico é constituído de oxigênio, nitrogênio, vapor d'água e quantidades menos importantes de gases raros,  $CO_2$  e impurezas. Para cálculos técnicos de combustão, considera-se 20% de  $O_2$  e 80% N, em volume.

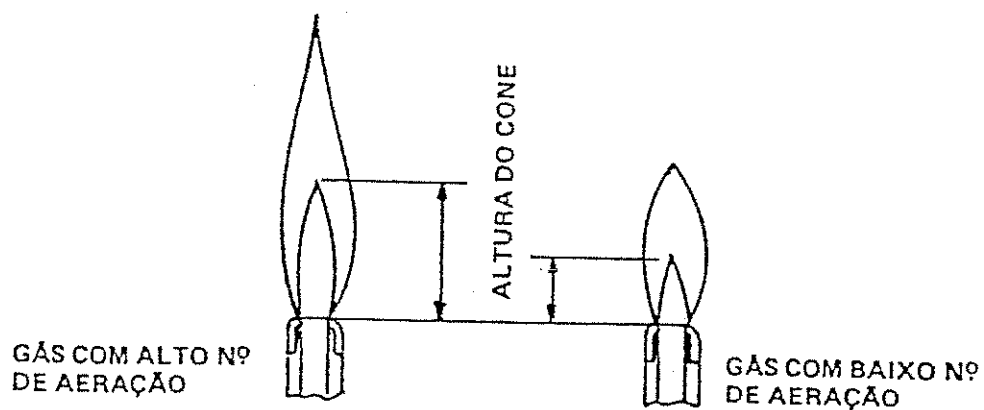
Os dois elementos característicos que entram na composição de quase todos os combustíveis são o carbono e o hidrogênio, que produzem reações exotérmicas com o oxigênio do ar.

O valor de um combustível pode ser medido pelo seu poder calorífico - quantidade de calor liberada por unidade de massa, ou volume do combustível, supondo-se combustão completa.

#### 2.4.3.2 - Fenômenos Típicos Que Ocorrem Com a Chama de Gás em Queimadores

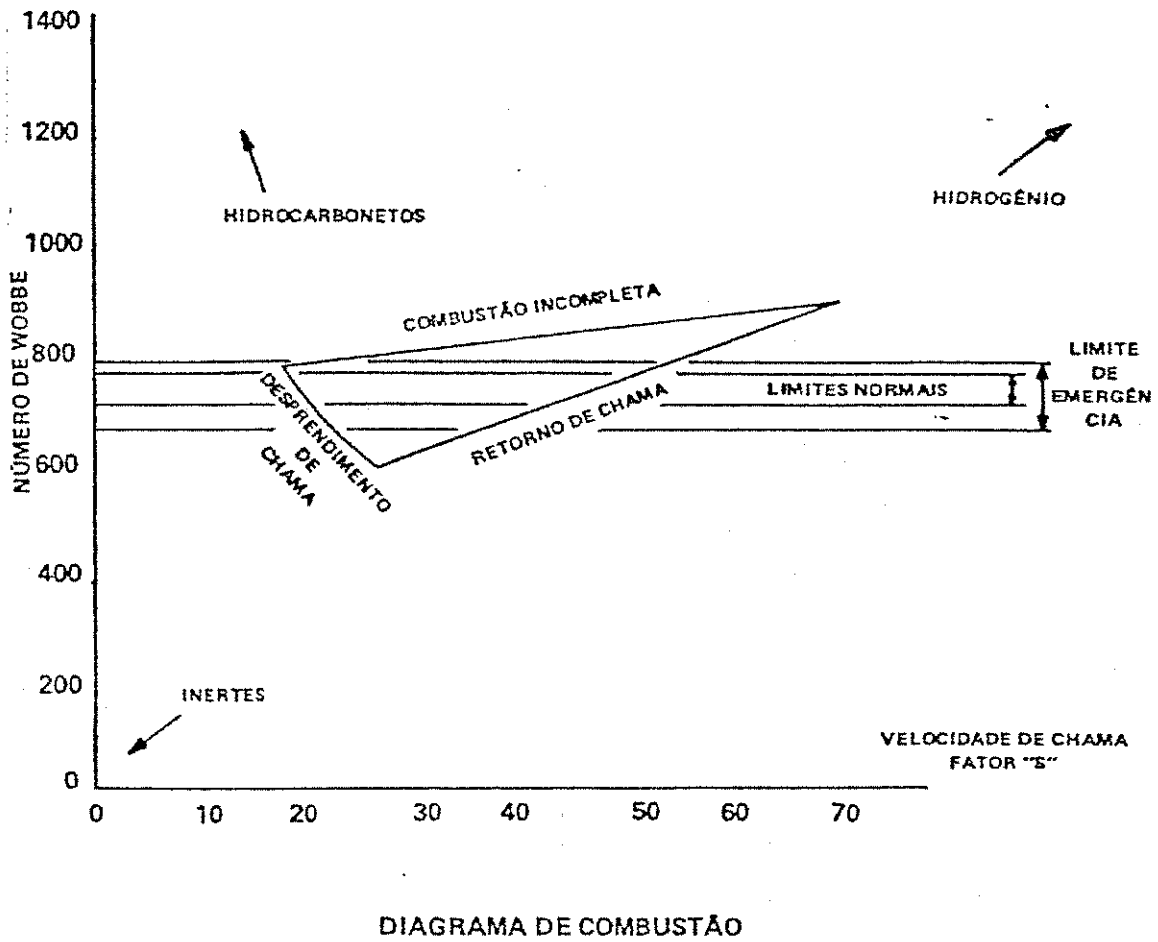
Queimador de gás é um dispositivo para queimar de forma controlada o gás, com objetivo de produzir calor útil. A forma, estilo e capacidade variam enormemente. Podem, entretanto, ser classificados em dois tipos básicos: queimadores luminosos (chama amarela) e

FIGURA 2.5 - Esquemática de duas chamas mostrando o efeito da queima dos gases com variação do número de aeração sob idênticas condições.



CARDOSO, A.J.C., 1982

FIGURA 2.6 - Diagrama de Combustão



CARDOSO, A.J.C., 1982

queimadoras de chama azul (Bunsen). O primeiro tipo seria simplesmente a passagem de gás por um cano até uma abertura. O gás queima com chama amarela porque não há mistura prévia de ar com gás antes da saída pela cabeça do queimador. O segundo tipo foi inventado em 1842 por Robert Wilhelm von Bunsen e queima gás com chama azul porque há mistura de algum ar com o gás antes de atingir a cabeça do queimador.

1. Ar primário - é o ar que é misturado com o gás no interior do corpo do queimador antes que ele deixe o queimador para queimar-se. Na maior parte dos queimadores apenas parte do ar necessário para combustão é fornecida como ar primário.

2. Ar secundário - é o restante do ar necessário para combustão de um gás e é o ar existente nas proximidades da chama.

3. Estabilidade da Chama - alguns fatores básicos afetam a estabilidade da chama. Dentre eles encontram-se: quantidade de ar primário, velocidade de chama do gás, velocidade de fluxo da mistura nas cabeças dos queimadores, tamanho e forma destas.

A velocidade da chama varia com a quantidade de ar na mistura, sendo maior para cada gás quando a mistura é estequiométrica. A chama em um queimador estabiliza-se a partir do momento em que a velocidade de chama e as velocidades de fluxos forem iguais.

4 - Deslocamento de Chama ("lift") - este fenômeno ocorre quando houver ar primário em demasia ou se a velocidade do fluxo da mistura na cabeça do queimador for maior do que a velocidade da chama. Neste caso as chamas se deslocam ("lift") do queimador e a combustão ocorrerá fora da cabeça do queimador. Estas chamas podem ser ruidosas,



poderá ocorrer combustão incompleta com formação de monóxido de carbono ou aldeídos. É claro que com isso cai a eficiência da combustão. A tendência de deslocamento da chama é mais frequente com gases de queima lenta, como os gases liquefeitos e o gás natural.

5 - Retorno da Chama ("Flashback") - em determinadas condições a velocidade da mistura ar-gás é menor que a velocidade de chama em alguns pontos localizados nas bordas da cabeça do queimador. A tendência de retorno de chama é mais frequente com gases de combustão mais rápida, como o gás de nafta, os gases manufaturados de forma geral e o hidrogênio.

6 - Chamas com Extremidades Amarelas - Ocorre normalmente quando há insuficiência de ar primário. Nestes casos os cones internos da chama se alongam podendo até desaparecer. As chamas tornam-se inteiramente amarelas se o ar primário for cortado totalmente. As extremidades amarelas das chamas são causadas por partículas de carbono incandescentes.

7 - Detonação na Extinção da Chama ("Pop") - algumas vezes ocorre uma pequena detonação ("pop") de gás no queimador quando este é apagado. Isto ocorre porque há retorno da chama na extinção. Esta detonação normalmente não é perigosa nem provoca qualquer dano ao equipamento; entretanto, um usuário de um queimador à gás geralmente reclama deste ruído e ele pode ser eliminado. A redução do ar primário fornecido ao queimador é normalmente a solução para o problema; entretanto é necessário que esta regulagem não cause o amarelecimento das extremidades da chama. O aumento da pressão do gás e a diminuição do orifício injetor também podem auxiliar para resolver o problema. (CARDOSO, 1982)

#### 2.4.4 - Estabilização das Chamas nos Queimadores

Desde que a combustão siga na velocidade de queima característica, uma chama estacionária pode ser obtida do fluxo de gases pré-misturados, na mesma velocidade da direção inversa. Da mesma forma a chama possuiria estabilidade neutra e sua posição ficaria incontrolada. Nas aplicações domésticas e industriais, a estabilidade da chama é alcançada ao fixar a chama com um instrumento conhecido como queimador.

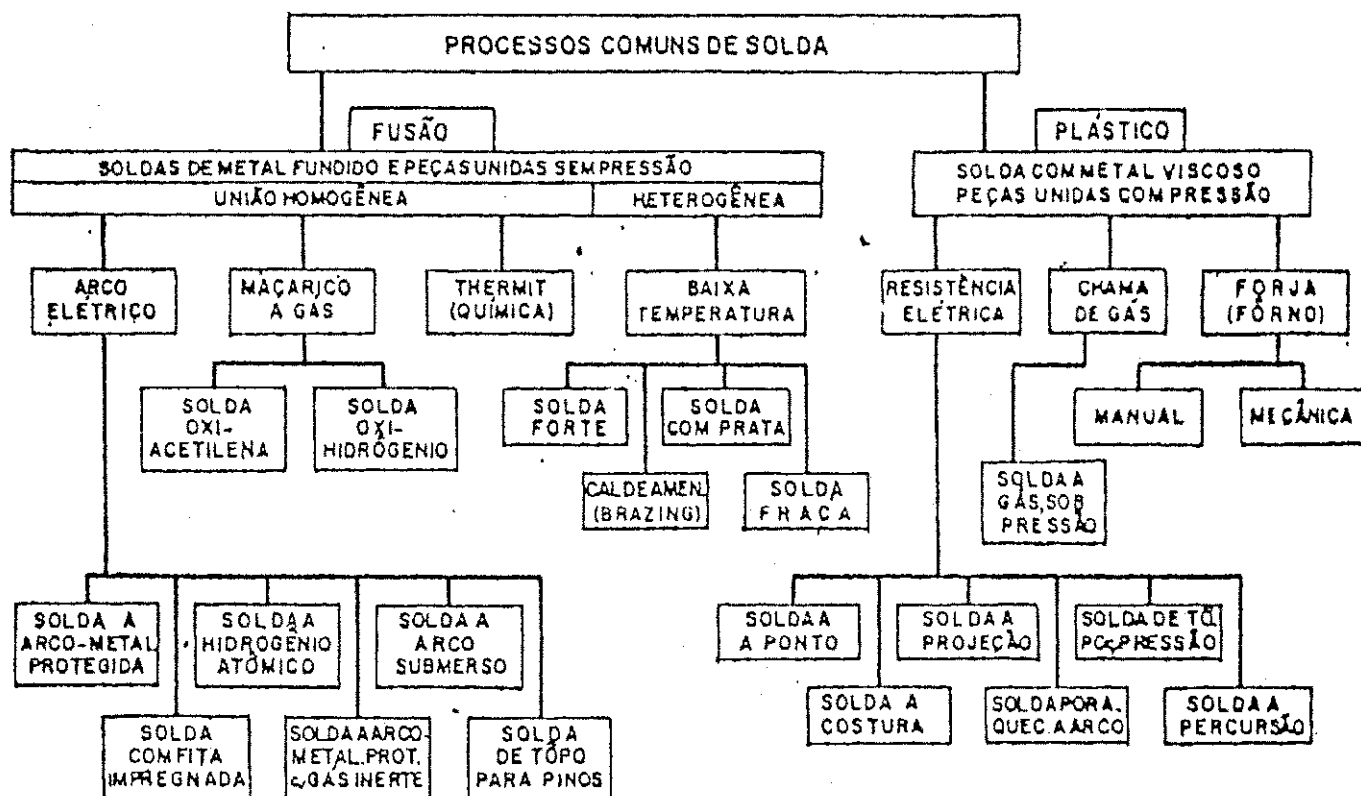
A chama somente é estabilizada dentro de certos limites de velocidade de fluxo. Se o fluxo de gás for progressivamente reduzido eventualmente será alcançado um ponto no qual a velocidade de queima excede a velocidade do gás em algum lugar transversal ao diâmetro do queimador. A contra-pressão causa distorção no fluxo e na região onde a velocidade do fluxo é reduzida a chama entrará no queimador. (BRADLEY, 1969)

#### 2.5 - O Processo de Soldagem

A solda é um meio de unir metais pela concentração de calor, pela pressão ou ambos para causar a união das áreas adjacentes. Uma boa solda é tão forte quanto o metal soldado. Os processos comuns de importância comercial estão indicados na Figura 2.7. (DOYLE et alii, 1966)

A soldagem como técnica solicita diversos ramos do conhecimento humano: a metalurgia, a mecânica, a eletrotécnica e a eletrônica, a química, a física e a resistência dos materiais. (ABM, 1960)

FIGURA 2.7 - Processos Comuns de Soldagem



DOYLE, L. E. et alii, 1966

A soldagem hoje está intimamente ligada às mais importantes atividades industriais como a construção civil metálica, a metalúrgica, a mecânica e a elétrica. (ABM, 1980)

#### 2.5.1 - Classificação dos processos de soldagem

Para soldar é preciso tempo, calor e/ou pressão; com o calor a continuidade da massa se estabelece por fusão a partir do estado líquido (semelhante a uma fundição localizada); com a pressão tem-se um forjamento localizado.

Sobre essa aparente simplicidade baseiam-se quase 50 processos fundamentais de soldagem, a maioria utilizando calor e pressão simultâneos.

O critério mais aceito para classificação dos processos de soldagem é o relativo à fonte de energia térmica: (ABM, 1980)

##### 1. Fonte QUÍMICA:

- Soldagem a gás: oxi-acetilênica, OXI-HIDROGÊNICA, etc.
- Soldagem aluminotérmica

##### 2. Fonte ELÉTRICA:

- Arco elétrico
- Resistência elétrica

##### 3. Fonte MECÂNICA

- Por percussão, por explosão, por ultrassom, por fricção.

##### 4. Fonte de ENERGIA RADIANTE

- Maser-laser

#### 2.5.1.1 - Soldagem a Gás

A soldagem à gás é realizada pela queima de um gás combustível com ar ou oxigênio, de forma a produzir uma chama concentrada de alta temperatura. O objetivo da chama produzida é

fundir o metal-base localizadamente e a vareta de metal que irá servir de enchimento.

A soldagem à gás é largamente utilizada em serviço de reparo. Pode soldar a maioria dos metais. Os gases que podem ser empregados no processo incluem o acetileno, o HIDROGÊNIO, a propana, a butana, gás natural e gás de rua. (CHIAVERINI, 1986)

2.5.1.2 - Solda autógena oxi-hidrogênio - neste método queima-se o hidrogênio, no lugar do acetileno, com o oxigênio para se obter uma chama mais fraca com temperatura inferior a  $3.600^{\circ}\text{F}$  ( $1.985^{\circ}\text{C}$ ). (DOYLE et alii, 1966)

2.5.2 - Solda e Corte por laser a  $\text{CO}_2$  - As primeiras aplicações do laser para o trabalho de materiais datam de há cerca de 20 anos. Entretanto, o corte de metais por raio laser a  $\text{CO}_2$  já se tornou processo industrial estabelecido e amadurecido nos últimos 10 anos.

Enquanto a solda de peças eletrônicas e na mecânica fina também alcançou elevado grau de aperfeiçoamento e já pode ser considerado processo padrão, a solda de peças metálicas na faixa de espessura de centímetros por meio do laser a  $\text{CO}_2$  ainda não é tão difundida mas, a exemplo do corte, está em vias de se tornar processo padrão, substituindo cada vez mais os métodos tradicionais.

2.5.2.1 - Corte com o laser a  $\text{CO}_2$  - Já há algum tempo, o corte ao raio laser se tornou processo costumeiro, amadurecido e econômico na indústria. Fenda de corte estreita, de menos de 0.3 mm de largura, excelente qualidade das bordas de corte, minimização da zona de influência térmica, pouca deformação e o domínio fácil de figuras de corte complexas foram os motivos de preferir esta nova tecnologia

aos processos tradicionais de corte. Elevada confiabilidade e disponibilidade a 90% das instalações também garantem vantagens econômicas.

Existem três modalidades do processo de corte com o laser a CO<sub>2</sub>: Corte por fusão, Corte por queima e Corte por sublimação.

2.5.2.2 - Solda com o laser a CO<sub>2</sub> - Ao lado do processo já estabelecido do corte ao laser, a solda ao laser se encontra atualmente na fase de introdução na produção industrial em série.

Para aplicação bem sucedida do laser em processos de solda foi decisiva a descoberta que a profundidade de solda não aumenta linearmente com a potência do laser. (36)

#### 2.5.2 - Fontes de Corrente de Soldagem

Um gerador elétrico foi por muito tempo a única fonte e ainda é a fonte mais importante de CC para soldagem. Poderá ser acionado por um motor elétrico ou por um motor de combustão interna para maior flexibilidade. Outro meio é reduzir a voltagem de uma CA através de um transformador e convertê-la em CC através de um retificador de silício ou selênio. Uma corrente CA é obtida diretamente de um transformador. (DOYLE et alii, 1966)

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA E TRABALHO EXPERIMENTAL

---

### 3 - METODOLOGIA E TRABALHO EXPERIMENTAL

O presente trabalho desenvolvido no Núcleo de Energia (NERD) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Campina Grande - PB, iniciado em 1992 consistiu no estudo do sistema de produção de  $H_2/O_2$  via eletrólise da água (Figura 3.1) cujos objetivos foram:

... Dominar o processo atual de produção de Hidrogênio e Oxigênio via eletrólise da água;

... Otimizar tal processo [segundo sugestões de ALVES (1992)] quanto a:

1 - Melhoria no aspecto relativo a segurança do sistema com a inclusão de telas isolantes para se evitar o curto-circuito interno;

2 - Melhoria nas soldas com aço-carbono através da injeção de oxigênio (comburente) em excesso para garantir a combustão total do hidrogênio e eliminar as reações entre o hidrogênio e o carbono da liga, que fragilizam a região soldada;

3 - Verificar o efeito da injeção de oxigênio em excesso na solda com metais não ferrosos.

O atual estágio é o produto de uma série de tentativas e modificações anteriores, pois o domínio da tecnologia de produção destes equipamentos requer muito conhecimento teórico e prático.

#### 3.1 - Descrição do Equipamento

O sistema de produção  $H_2/O_2$  apresenta as seguintes características que o descrevem:

Tipo: Bipolar

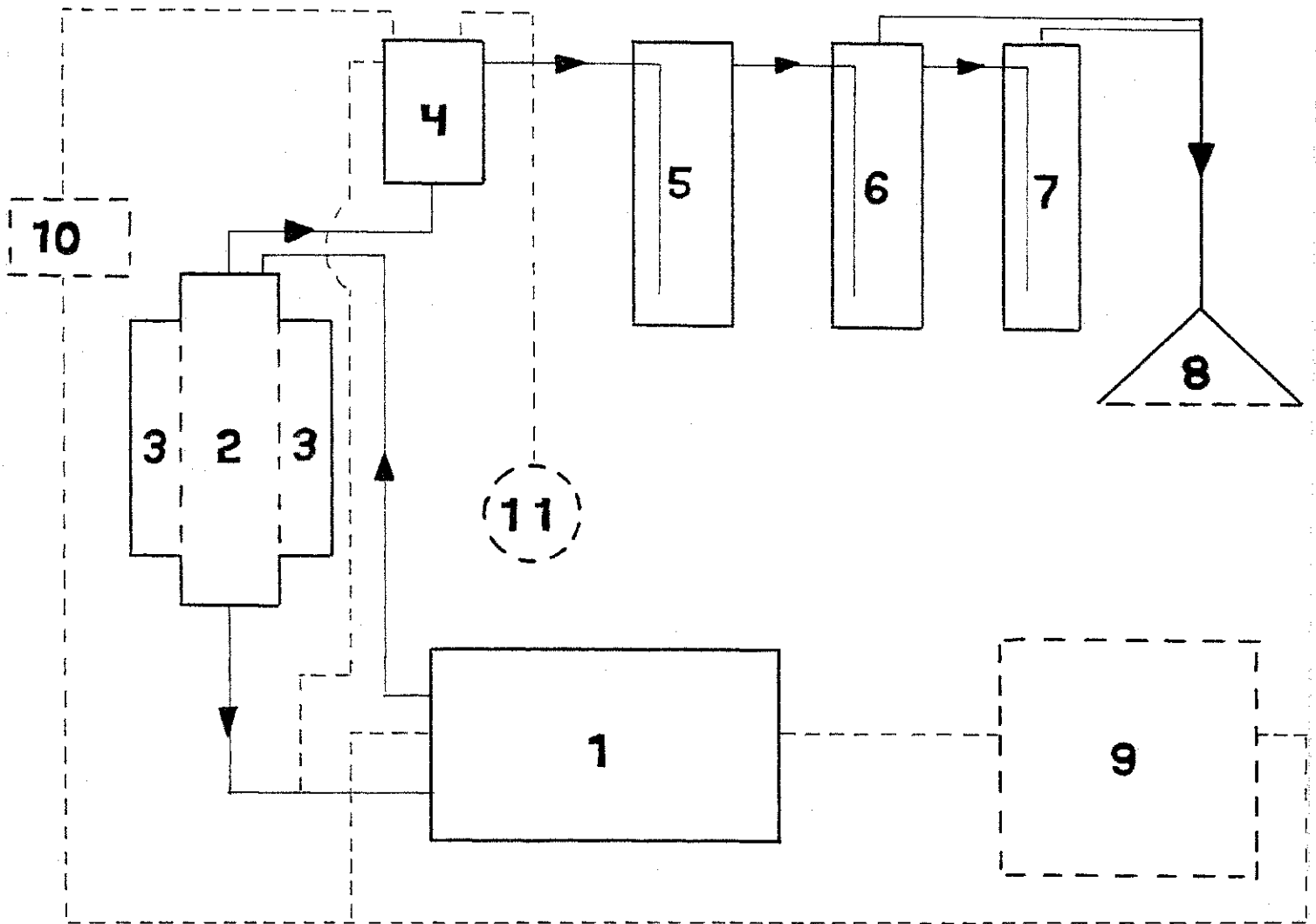
Potência de pico: 2,775 Kwh

Tensão da rede: 220 ac



FIGURA 3.1 - Fluxograma do processo -

(1)Eletrolisador,(2)Reservatorio, (3)Trocador de Calor, (4)Vaso de Medidas, (5)Selo de óleo, (6)Selo de Álcool, (7)Selo de Benzina, (8)Massarico, (9)Fonte de Alimentação, (10)Pressostato e (11)Manômetro.



Tensão de alimentação: 110 V

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

Pressão de Trabalho: 1 atm

Sistema de Refrigeração: água circulante

### 3.2 - Descrição do sistema

O sistema projetado para produção de até 0,4 m<sup>3</sup>/h de H<sub>2</sub> e 0,2 m<sup>3</sup>/h de O<sub>2</sub> simultaneamente é composto das seguintes unidades:

(APÊNDICE 6)

- Reator Eletrolítico
- Reservatório de Eletrólito
- Trocador de Calor
- Vaso de tomada de medidas
- Selo de óleo
- Selo de álcool
- Selo de benzina

Periféricos: Fonte de alimentação

Pressostato

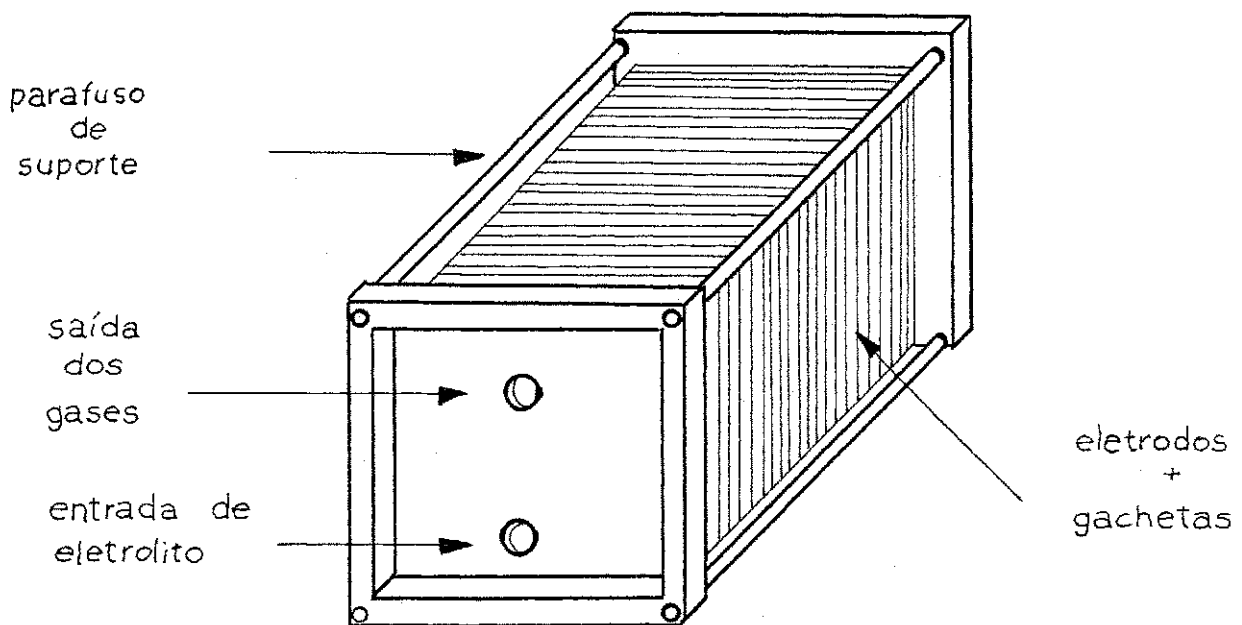
Manômetro

Massarico

#### 3.2.1 - Reator Eletrolítico

O reator eletrolítico é do tipo bipolar ou "filtro-prensa", sendo o mesmo constituído por: 55 células (placas) de 2V cada uma, dando um total de 110V; dois cabecotes que se fixam por meio de quatro parafusos, onde em um desses cabecotes estão localizados a entrada e a saída do eletrólito e do gás, respectivamente. (Figura 3.2)

FIGURA 3.2 - Reator Eletrolítico do tipo bipolar ou filtro-prensa constituído de 55 placas paralelas.



As placas que formam as células são separadas entre si por uma tela de polietileno de 2mm de espessura. (Figura 3.3)

O uso de um diafragma não foi feito para evitar que os gases não fossem separados, uma vez que a mistura é necessária para a combustão no massarico.

O eletrolisador foi colocado num plano inclinado de 10 graus com a horizontal para que as bolhas de gases formados fossem direcionadas para o tubo de saída dos gases.

Aplicou-se uma tensão contínua de 110V nas extremidades do reator, o que significa uma tensão de 2V por célula.

O material utilizado para as placas do reator eletrolítico foi o aço inoxidável com 0,5 mm de espessura, devido a sua reconhecida qualidade de resistência à oxidação e por justificar, conseqüentemente, o seu custo dentro do projeto. (Figura 3.4)

### 3.2.2 - Reservatório de Eletrólito

Este é constituído de um cilindro em aço 1020 com 13 cm de diâmetro e 20cm de altura.

O eletrólito parte da secção inferior do seu reservatório (Figura 3.5) para alimentar o reator de forma contínua; enquanto isso, os gases produzidos são jateados na superfície do eletrólito contido no reservatório para possibilitar a pré-remoção do eletrólito arrastado pelos gases. Ao redor do reservatório do eletrólito existe o trocador de calor, com água circulante, o qual assegura as condições normais de condensação do eletrólito.

A água destilada contida no reservatório assegura a operação do sistema. E a alimentação desta é feita através de uma das saídas

FIGURA 3.3 - Tela de Polietileno para separação das placas

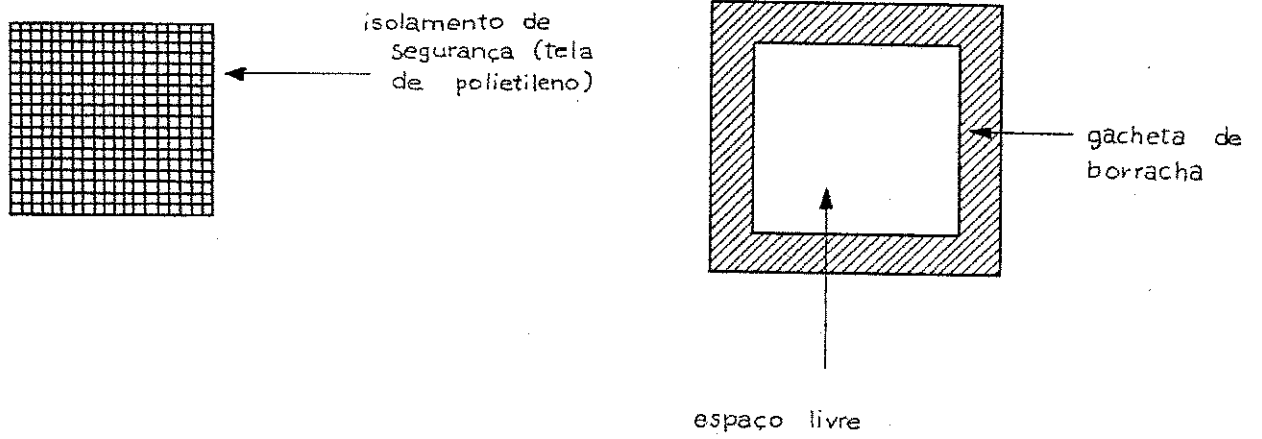
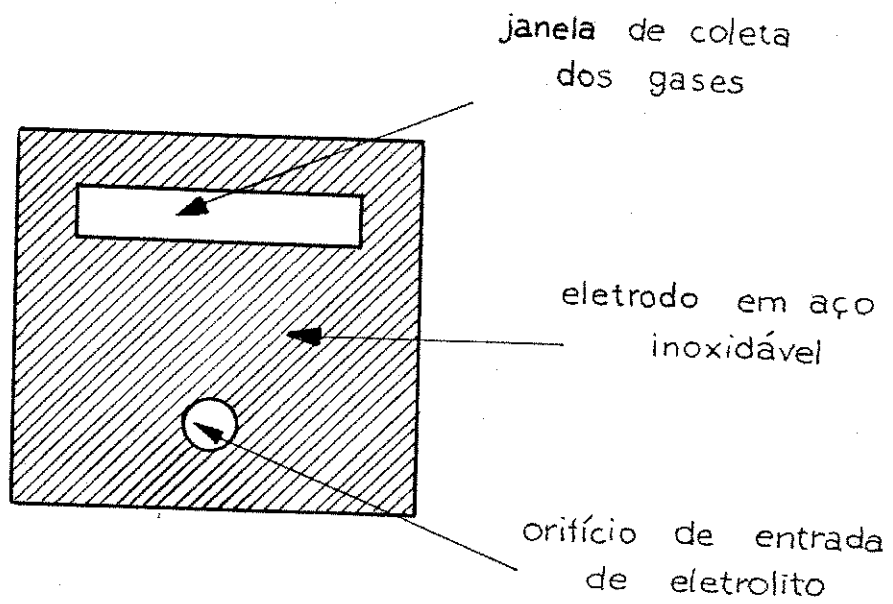


FIGURA 3.4 - Placas do Reator Eletrolítico



laterais do reservatório. As outras aberturas, também indicadas na figura, são a de reabastecimento e purgação (ou dispositivo de controle do nível máximo) do reservatório.

### 3.2.3 - Trocador de Calor

Tem como função baixar a temperatura da emulsão gás-eletrólito que sai do eletrolisador, facilitando a condensação do eletrólito arrastado. O trocador de calor é acoplado com o reservatório (Figura 3.5), tendo como superfície de troca de calor o próprio reservatório, uma vez que assim, o eletrólito condensado já está em ponto de realimentar o eletrolisador.

O trocador é do tipo casco-tubo, no qual a água circula na carcaça, enquanto na parte do tubo que é o próprio reservatório, a emulsão gás-eletrólito é resfriada. A parte do tubo é o próprio reservatório cilíndrico, de 27cm de comprimento e 12cm de diâmetro. Por razões econômicas, apenas 11cm do comprimento total encontra-se encamisado com a carcaça, por onde circula água de refrigeração, que também tem forma cilíndrica com diâmetro de 22cm (Figura 3.5).

### 3.2.4 - Sistema de Purificação

Embora uma pré-purificação dos gases, e talvez a que remova a maior quantidade de eletrólito arrastado seja feita no sistema trocador-reservatório, ainda há uma quantidade de eletrólito remanescente que deve ser removida. Esta remoção se dá em dois pontos principais: vaso de tomada de medidas e selo de óleo.

#### 3.2.4.1 - Vaso de tomada de medidas

Este vaso é um tubo cilíndrico onde o gás com alguma quantidade de eletrólito entra na parte inferior (Figura 3.6) e, sofrendo uma expansão, o eletrólito, parte mais pesada da mistura gás-

FIGURA 3.5 - Reservatório do Eletrólito e Trocador de Calor

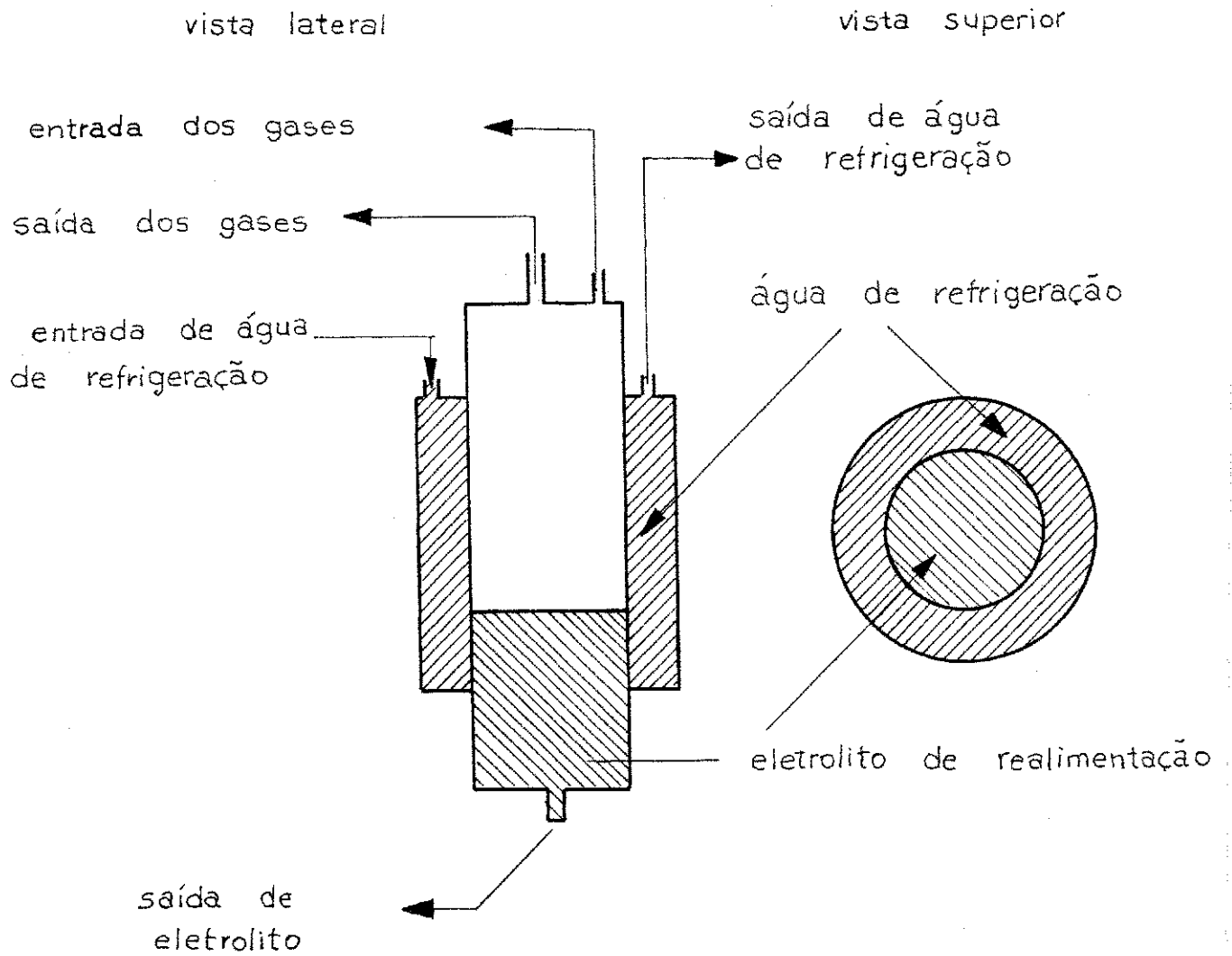
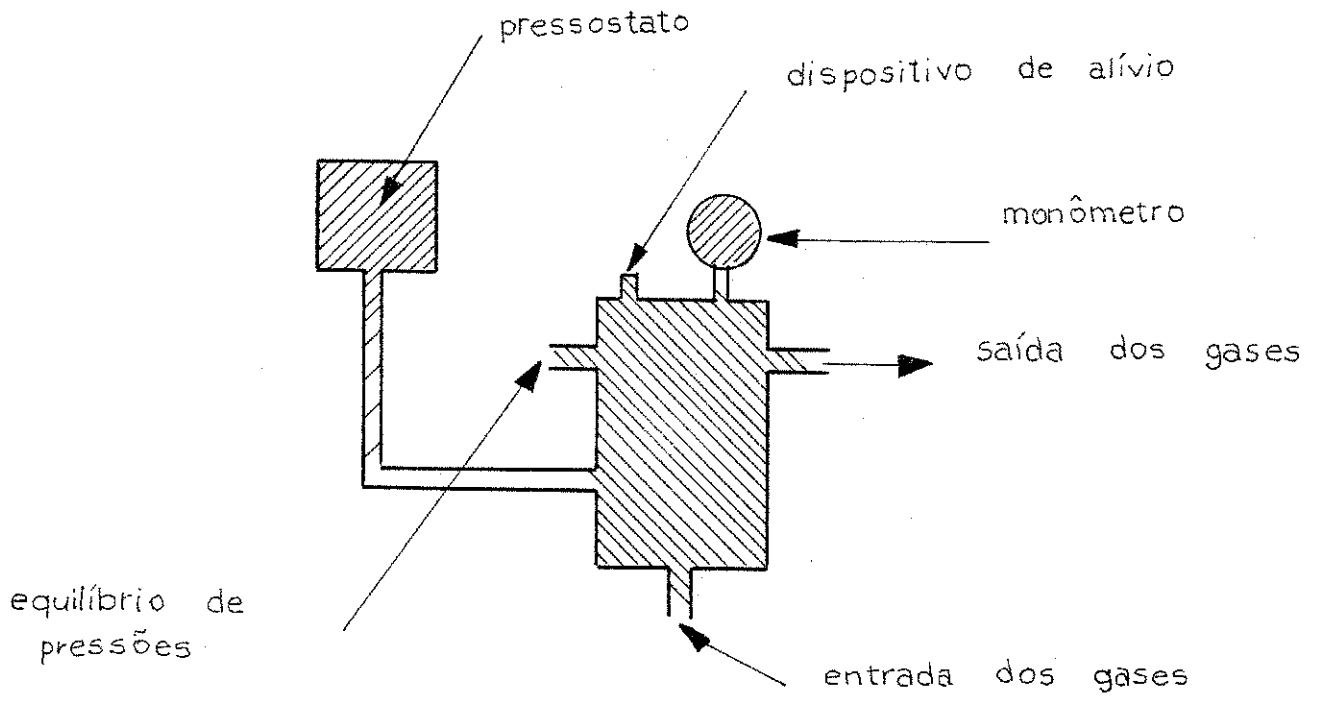


FIGURA 3.6 - Vaso de tomada de medidas





eletrólito é condensado, retornando ao reservatório em sentido contrário ao gás que alimenta o vaso de medidas, quando o fluxo dos gases for suficientemente baixo para permitir o retorno.

Os gases seguem saindo pela lateral superior do vaso de tomada de medidas de onde seguem para o selo de óleo.

#### 3.2.4.2 - Selo de óleo

O eletrólito ainda remanescente no vaso de tomada de medidas é quimicamente removido no selo de óleo, embora tenhamos observado na prática, que a maior separação se dá por precipitação ou decantação do eletrólito, significando que a utilização ou não do óleo no selo é opcional.

Quando o óleo está presente no selo (Figura 3.7), o gás é borbulhado através deste, o eletrólito é extraído da corrente gasosa inerte, reage com o óleo, cujo produto, o sabão, muito pesado, não mais segue junto com os gases, ficando decantado no selo de óleo, de onde deverá ser purgado posteriormente.

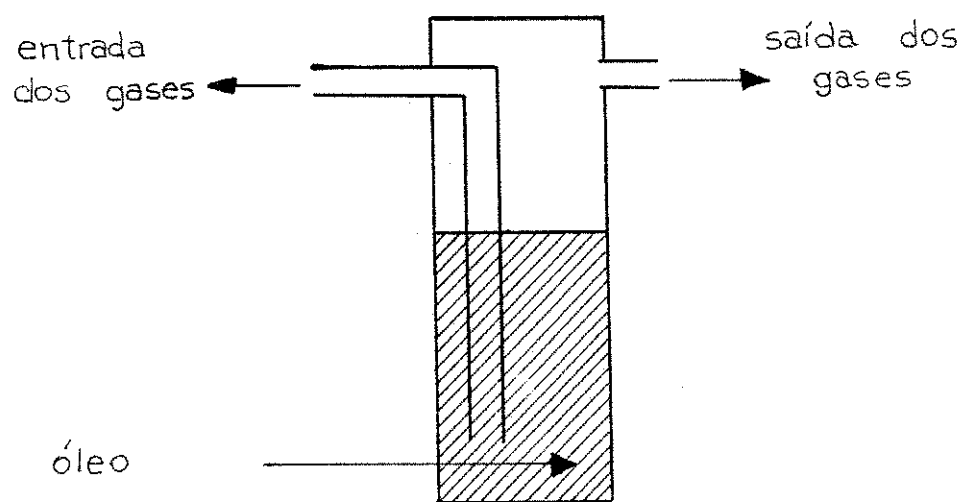
Como foi dito antes, a utilização ou não do óleo é opcional, pois observou-se na prática que quando da ausência deste, o eletrólito era decantado mesmo assim e separado dos gases, ficando no selo de óleo para ser posteriormente purgado.

Além disso, o selo de óleo serve também como selo de segurança para evitar engolimento da chama e possíveis explosões, embora que pequenas, no sistema, já que a possibilidade de grandes explosões foi totalmente eliminada.

#### 3.2.5 - Selos controladores da chama

O gás purificado que deixa o selo de óleo, antes de ser queimado no maçarico, é borbulhado através de um fluido orgânico

FIGURA 9.7 - Selo de óleo



controlador de chama, que confere ao gás uma propriedade de chama mais branda e pouco caráter explosivo. Os fluidos orgânicos que melhor conferem esta característica para fins de corte e solda, são o álcool e a benzina, respectivamente.

#### 3.2.5.1 - Selo de álcool

A presença de vapor de álcool na mistura H / O se dá através do borbulhamento dos gases no álcool líquido contido no selo (Figura 3.8a).

O álcool abranda a chama permitindo a queima controlada, mantendo uma chama de temperatura alta e formato pontual, o que é apropriado para o corte de metais. (Apêndice F)

#### 3.2.5.2 - Selo de benzina

De forma análoga ao selo de álcool (Figura 3.8b), neste selo é colocada a benzina através da qual os gases são borbulhados. A benzina atribui uma propriedade de chama com temperatura mais baixa que o álcool e ao mesmo tempo mais aberta (menos pontual), o que é mais apropriada para a solda de metais. (Apêndice F)

#### 3.2.6 - Pressostato

Com a finalidade de controlar o processo através da pressão dos gases, foi utilizado um pressostato da marca Fligor, São Paulo-SP, para controlar a pressão do sistema entre 1 e 1,5 Kgf/cm<sup>2</sup> durante a operação da máquina.

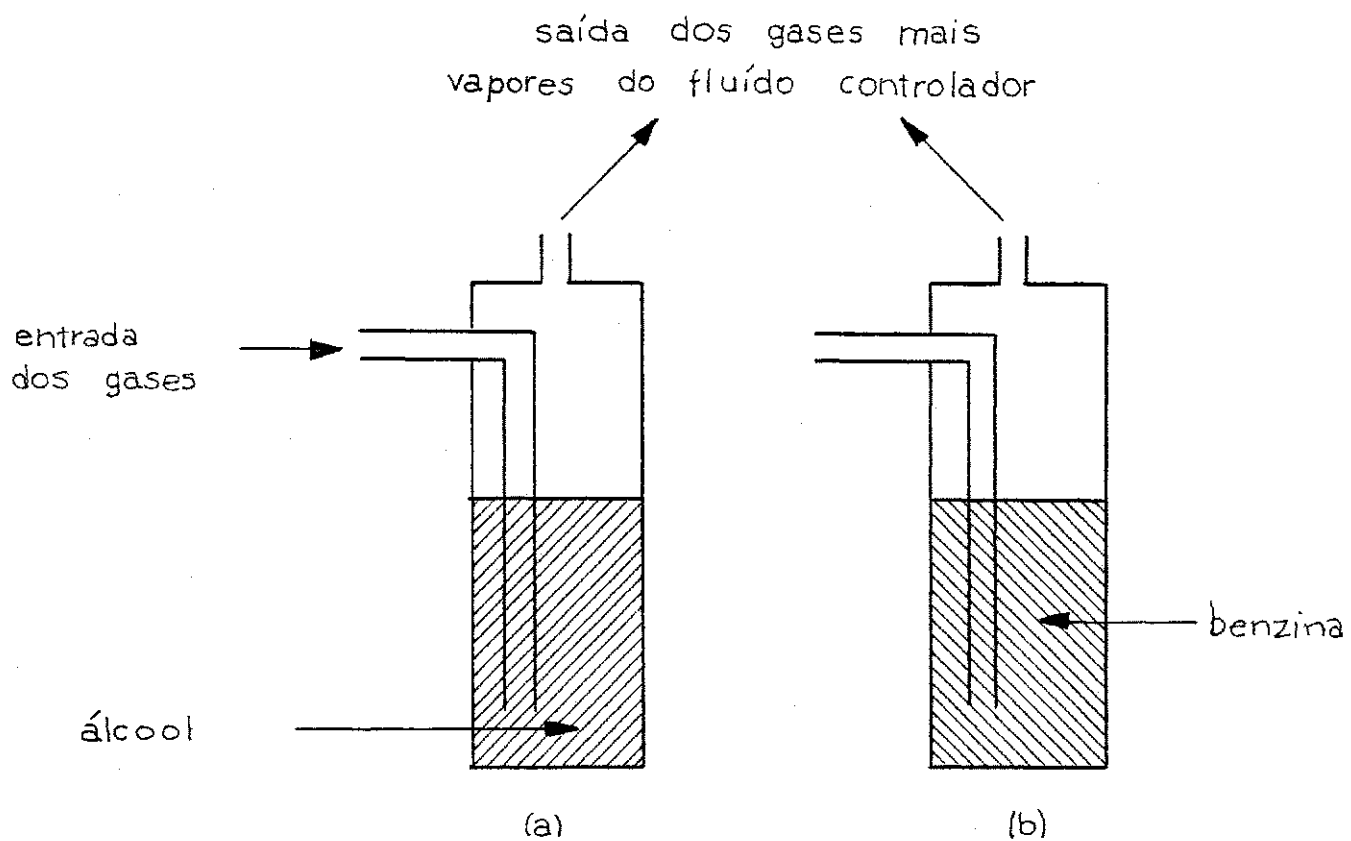
#### 3.2.7 - Fonte de Alimentação

A fonte de alimentação compreende o conjunto: transformador de 220V para 110V, retificador de corrente AC para DC e fusível de segurança contra altas amperagens.

FIGURA 3.8 - Selos Controladores de Chama

(a) Selo de Álcool

(b) Selo de benzina



### 2.2.8 - Disposição Espacial do Sistema

O sistema desenvolvido está distribuído espacialmente em três planos horizontais indicados na Figura 3.9. No plano 1, o mais baixo, está situado o eletrolisador que deverá ser alimentado pelo eletrólito que desce por gravidade do plano 2. Acima deste plano, temos um outro, o terceiro, onde está o sistema de purificação dos gases e selos controladores de chama.

Esta distribuição espacial das diferentes unidades do sistema, permite a alimentação do eletrolisador por gravidade, como também facilita a separação do eletrólito arrastado pelo gás gerado, durante o seu percurso da célula até o selo de óleo.

## 3.3 - Operação com a Máquina Oxi-hidrogênica

### 3.3.1 - Instalação

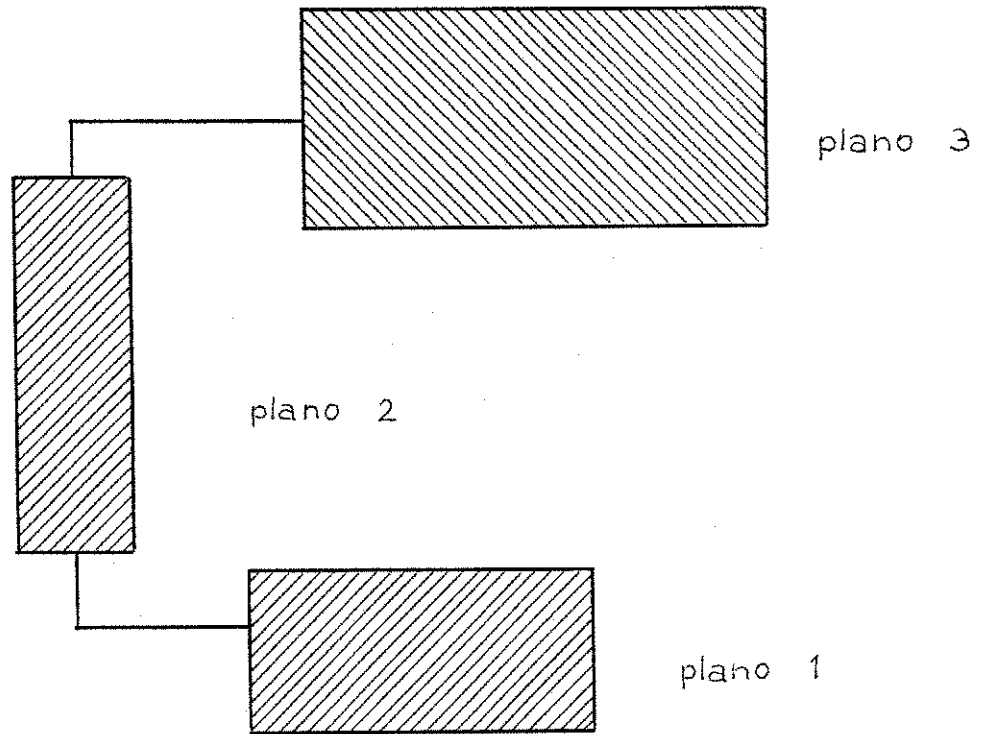
A máquina de solda oxi-hidrogênica deve ser instalada em lugar seco, arejado e em plano horizontal. Deve-se evitar ambientes fechados para que não haja o acúmulo dos gases produzidos e assim evitar os riscos de incêndio ou mesmo explosões.

A instalação elétrica deve estar preparada para suportar uma corrente de pico de até 30A.

### 3.3.2 - Procedimentos para partida

- Verificar se as válvulas do maçarico estão fechadas;
- Ligar a fonte de alimentação;
- Posicionar a chave seletora no máximo de 10A.
- Aguardar até o desligamento automático da máquina (quando a amperagem cai a zero), verificando a pressão no manômetro, a qual deve indicar  $1,5 \frac{\text{Kgf}}{\text{cm}^2}$ , que é a pressão máxima de operação.

FIGURA 3.9 - Visão Espacial do Sistema



### 3.3.3 - Acendimento e regulagem da chama

A máquina oxi-hidrogênica gera os gases  $H_2$  e  $O_2$  já misturados, assim pode-se acender o fogo em qualquer um dos registros dos maçaricos.

A regulagem da chama é semelhante ao sistema oxiacetilênico convencional.

Em uma das mangueiras de saída saem os gases  $H_2$  e  $O_2$  mais vapor de benzina, conferindo uma tonalidade azul à chama. Na outra mangueira saem os gases  $H_2$  e  $O_2$  mais vapor de álcool, que produz uma chama mais fechada e de cor menos intensa.

A chama que sai do lado da benzina tem menor temperatura do que a que sai do lado do álcool e, com isto, temos todas as possibilidades de regulagem, desde que a chama mais fraca, só do lado da benzina, seja por exemplo para soldas em estanho, chumbo ou latão, até a mais forte, só do lado do álcool, por exemplo, para fundir aço ou corte por fusão.

A calibragem da chama para soldagem de chapa de aço difere um pouco do sistema oxiacetilênico. A chama produzida pela máquina oxi-hidrogênica possui uma temperatura (e conseqüentemente uma potência calorífica) maior que a outra, por isso, ao regular a chama deve-se deixar um penacho azul (benzina) menor do que o da solda oxiacetilênica. O penacho deve ser de, aproximadamente, 1cm e a chama não deve estar soprando muito; Esta é uma chama silenciosa.

O aspecto visual da solda em chapas de aço exhibe uma aparência queimada nas bordas, o que não é uma preocupação porque a solda é bem feita e tem boa resistência.

O uso de bicos e maçaricos é diversificado, desde que,

quando em uso, a máquina produza mais do que se está consumindo, e em operação, fique ligando e desligando automaticamente.

#### 3.3.4 - Apagamento da chama e procedimento de parada

Deve-se tomar certos cuidados ao fechar as válvulas do macarico para o apagamento da chama. Como os gases hidrogênio e oxigênio estão misturados, existe uma maior facilidade para o engolimento da chama. Não deve haver preocupação com o pequeno "estampido" provocado pelo retorno da chama.

A maneira mais segura de apagar a chama é abrir bem as duas válvulas do macarico e apagar a chama com um sopro forte sobre elas..

Caso o bico não possibilite o apagamento por sopro, deve-se fechar um lado do macarico e fechar e abrir o outro com um movimento rápido. Sempre que se utilizar esta técnica, após o fechamento da última válvula, devemos abri-la novamente para se certificar de que a chama está extinta.

Ao desligar a máquina para a hora do repouso deixe as válvulas do macarico abertas, com este direcionado para o ambiente livre, para deixar a máquina despressurizada, evitando-se possíveis acidentes.

#### 3.4 - Manutenção

O principal ponto na manutenção da máquina refere-se as operações de reabastecimento de água e dos fluidos controladores de chama, embora com um longo período de utilização da máquina, a limpeza de suas partes internas, particularmente dos eletrodos, venha a melhorar o rendimento da mesma.

##### 3.4.1 - Água de alimentação

Sempre que o visor do nível indicar "mínimo", proceder o reabastecimento com água destilada. Isto deve ser feito com a máquina



desligada.

#### 3.4.2 - Álcool e benzina

Os selos devem ter uma coluna de líquido entre 15 e 20cm e devem ser verificados a cada 15 dias. Caso haja necessidade, completar o selo de álcool e/ou benzina. Isto deve ser feito com a máquina desligada.

#### 3.4.3 - Limpeza interna

Com o tempo, é comum haver oxidação dos eletrodos, principalmente no anodo, onde há evolução de oxigênio e, por isso, faz-se necessário a limpeza dos eletrodos, que poderá ser feita com ácido muriático comercial.

#### 3.5 - Segurança

O manuseio com o gás hidrogênio (Apêndice B) requer todos os cuidados necessários a qualquer gás combustível, sendo que o hidrogênio apresenta uma alta velocidade de chama (Apêndice B) e como no caso da máquina de solda ele se encontra na relação estequiométrica precisa com o hidrogênio, requer um maior cuidado. Porém, por outro lado, a máquina de solda desenvolvida não acumula o gás hidrogênio, ou seja, o gás é consumido à medida que vai sendo produzido, de modo que o volume de gás é apenas o contido no espaço não ocupado pelo eletrólito entre a máquina de solda e o bico do massarico. Com este pequeno volume de gás presente, mesmo no caso de haver alguma explosão, ela seguramente não trará consequências graves. O máximo que poderá haver é um pequeno susto com o estalo seco provocado pela explosão. Assim, pode-se operar seguramente com a máquina, tomando-se, porém, as medidas necessárias na operação com gases combustíveis, como o acetileno, por exemplo, cuja velocidade de chama é próxima da

velocidade de chama do hidrogênio (Apêndice L) e, portanto, os mesmos cuidados na operação com o acetileno devem ser seguidos quando da operação com hidrogênio.

### 3.6 - Material Utilizado

Os seguintes equipamentos foram utilizados no levantamento de dados do sistema:

- Fonte de tensão variável na determinação da curva de polarização, Tipo VM - 230, N01000 Fabricado pela Soc. Técnica Paulista LTDA com tensão de entrada de 220V e tensão de saída variável entre 0 e 240V e frequência de 60HZ.

- Amperímetro tipo MB com corrente máxima de 25A, na leitura da corrente fornecida pela fonte.

- Multímetro SANWA tipo 320 - XB, na leitura da tensão fornecida pela fonte.

- Rotâmetro LANDA nº 76287, fabricado pela OMEL S/A ind. brasileira, com escala de 2 a 20 SCFH, na medição da vazão dos gases.

CAPÍTULO 4  
RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após o sistema ter sido modificado e testado, foram avaliados os dados obtidos para se ter um domínio mais amplo dessa tecnologia, para compará-los com outros trabalhos já realizados. Os dados consistiram na obtenção de curvas de polarização, que permitem acompanhar o desempenho do eletrolisador, as curvas de Potência em função da Vazão de gases, que permitem avaliar o consumo de energia elétrica da máquina; o cálculo do rendimento do sistema, o qual determina sua viabilidade operacional e o efeito dos fluidos controladores de chama nas operações de corte e solda.

##### 4.1 - Curva de Polarização

As curvas de polarização do reator foram obtidas em função da concentração do eletrólito na temperatura de funcionamento (70 °C). O Apêndice E traz os dados relativos as figuras apresentadas neste trabalho.

As figuras 4.1 a 4.4 mostram as curvas de polarização da máquina para as concentrações de 4%, 7%, 10% e 13% de KOH em peso, respectivamente. Pode-se observar que em função da concentração do eletrólito a corrente aumentou para uma dada tensão aplicada ao reator. De acordo com a energia livre de Gibbs ( $\Delta G$ ) do sistema, sabe-se que a formação de gases ocorre a partir de uma tensão de 1,25 V a zero graus centígrados (45). Porém, no nosso caso, era de se esperar a formação de gases a uma tensão de 1,16 volts a 70 °C para um par de célula. Todavia, as Figuras de polarização em função da concentração do eletrólito demonstram a presença de corrente elétrica para tensões

TABELA 4.1 - DADOS EXPERIMENTAIS DE TENSÃO VERSUS CORRENTE PARA UMA  
 CONCENTRÇÃO DE 4% DE KOH T=70 C.

TENSÃO (V)	CORRENTE (A)
0	0
20	6,0
30	9,0
40	12,0
50	15,0
60	18,0
70	21,0
80	24,0
90	26,9
100	32,9
110	36,2

FIGURA 4.1 - CURVA DE POLARIZAÇÃO PARA UMA CONCENTRAÇÃO DE 4% DE KOH EM PESO E UMA TEMPERATURA DE OPERAÇÃO DE 70°C.

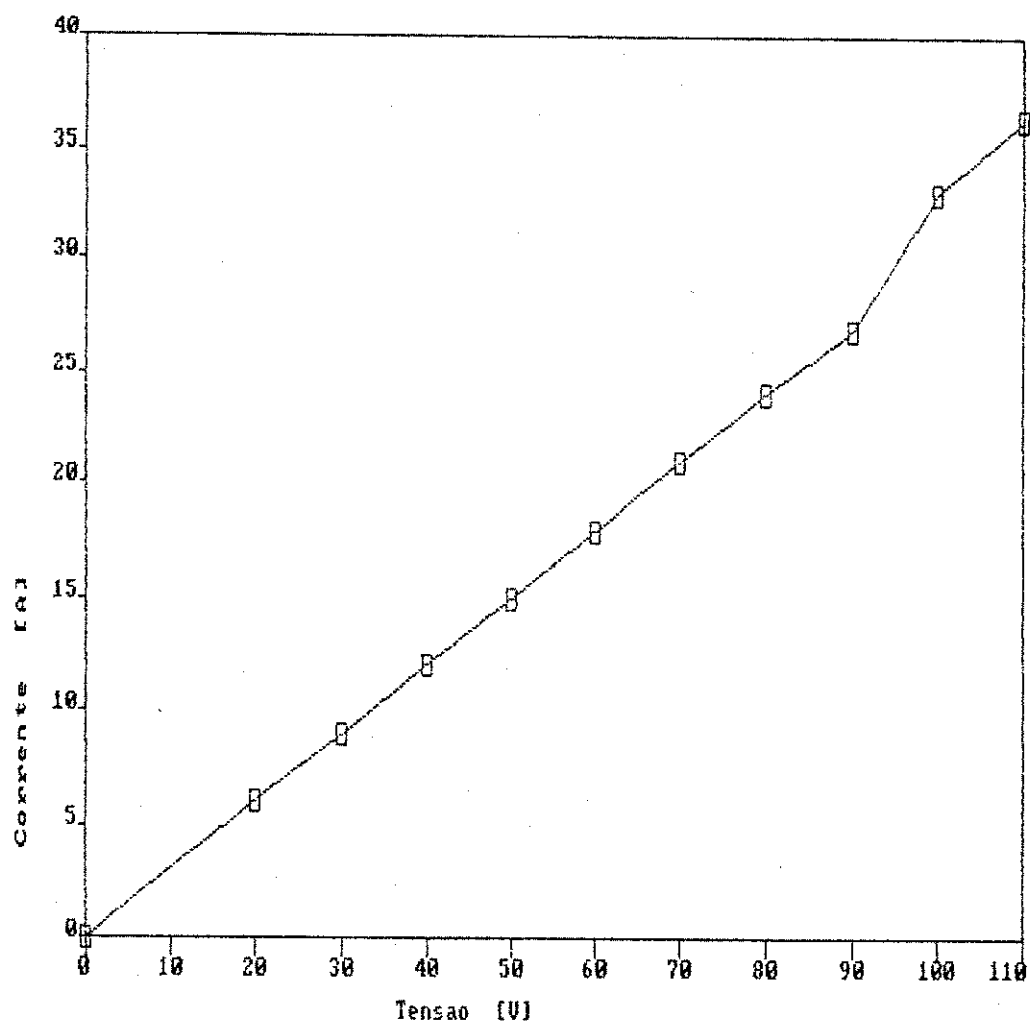


TABELA 4.2 - DADOS EXPERIMENTAIS DA TENSÃO VERSUS CORRENTE PARA UMA CONCENTRAÇÃO DE 7% DE KOH EM PESO E T=70<sup>o</sup> C.

TENSÃO (V)	CORRENTE (A)
0	0
20	7,5
30	11,0
40	14,5
50	17,9
60	22,4
70	26,0
80	29,0
90	32,0
100	37,0
110	41,0

FIGURA 4.2 - CURVA DE POLARIZACÃO PARA UMA CONCENTRAÇÃO DE 7% DE KOH EM PESO E TEMPERATURA DE OPERAÇÃO DE 70° C.

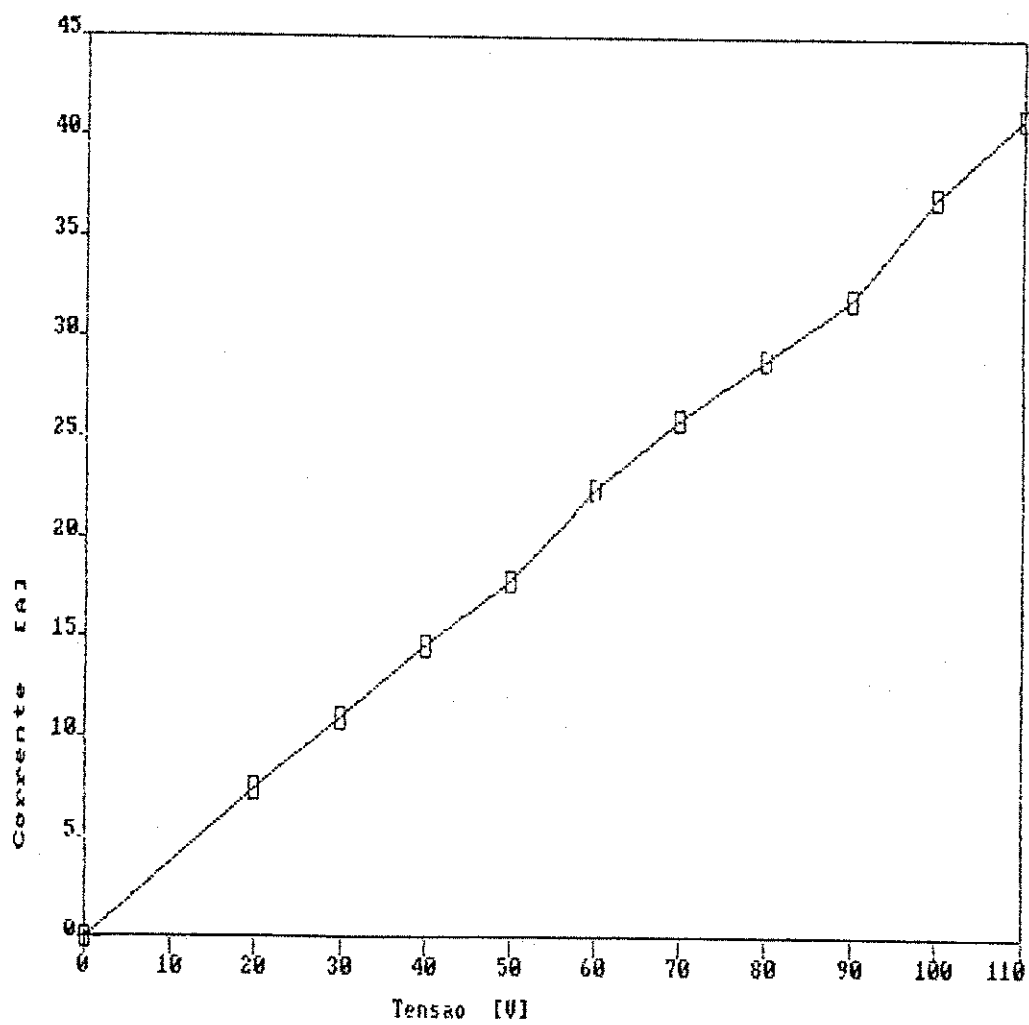




TABELA 4.3 - DADOS EXPERIMENTAIS DA TENSÃO VERSUS CORRENTE PARA UMA  
 CONCENTRAÇÃO DE 10% DE KOH EM PESO E T=70 °C.

TENSÃO (V)	CORRENTE (A)
0	0
20	7,5
30	11,0
40	14,5
50	17,9
60	22,4
70	26,0
80	29,0
90	32,0
100	37,0
110	41,0

FIGURA 4.3 - CURVA DE POLARIZAÇÃO PARA UMA CONCENTRAÇÃO DE 10% DE KOH EM PESO E TEMPERATURA DE FUNCIONAMENTO DE 70° C.

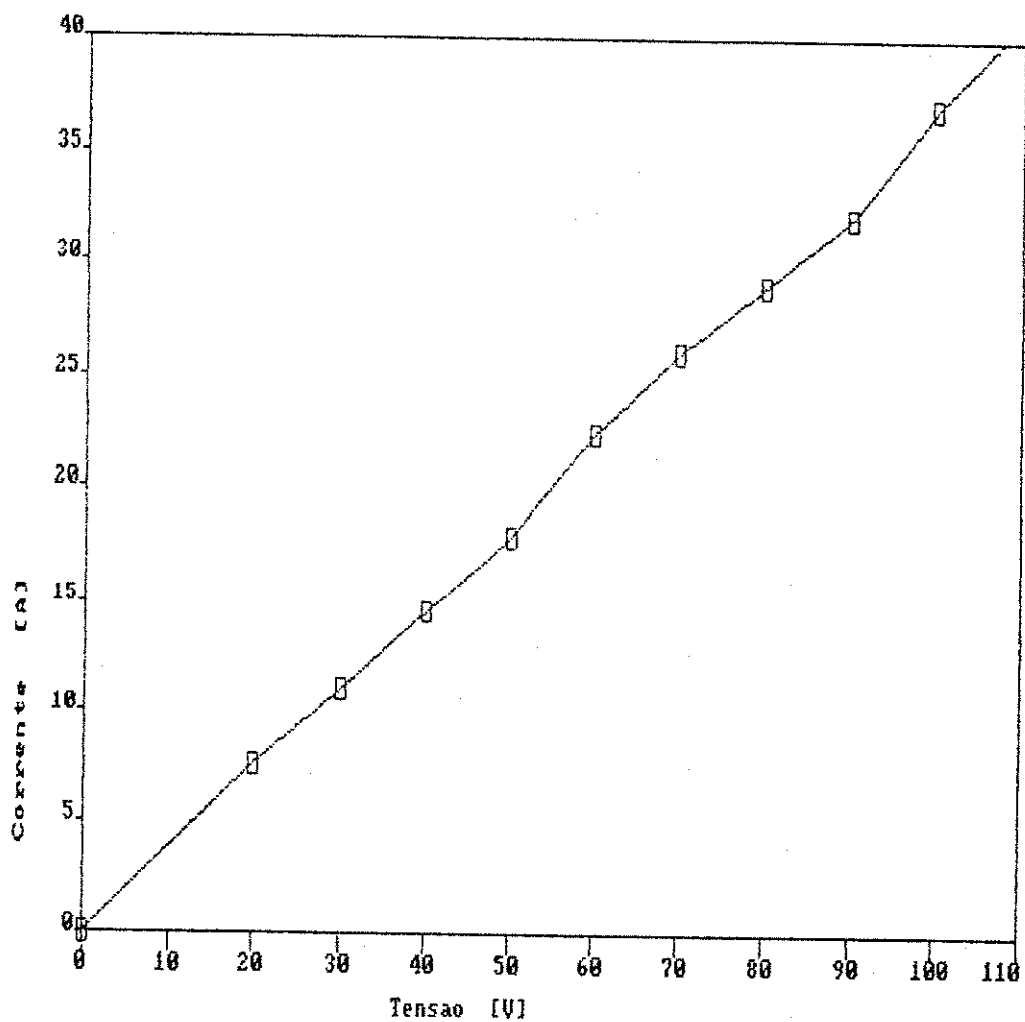
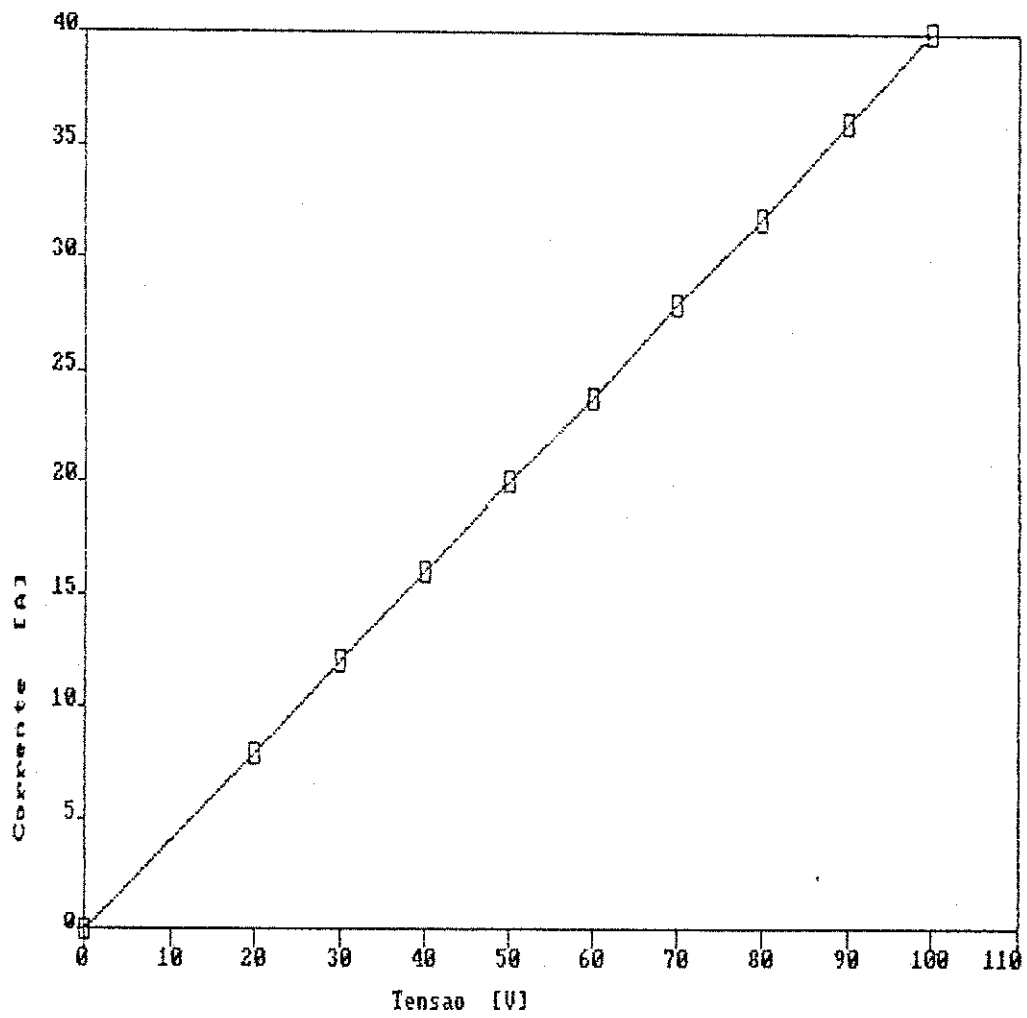


TABELA 4.4 - DADOS EXPERIMENTAIS DA TENSÃO VERSUS CORRENTE PARA UMA  
CONCENTRAÇÃO DE 13% DE KOH E T=70 °C.

TENSÃO (V)	CORRENTE (A)
0	0
20	7,9
30	12,0
40	14,0
50	20,0
60	23,8
70	28,0
80	31,8
90	36,0
100	40,0
110	43,8

FIGURA 4.4 - CURVA DE POLARIZAÇÃO PARA UMA CONCENTRAÇÃO DE 13% DE KOH EM PESO E TEMPERATURA DE OPERAÇÃO DE 70°C.



inferiores a 1,16 volts por célula. Como termodinamicamente é impossível a obtenção de gases nessas condições de tensão e temperatura, a corrente observada pode ser oriunda de vários fatores: a própria construção interna do reator em relação às distâncias entre placas, podendo permitir durante o processo a formação de gases em algumas células. Um outro fator a ser considerado é a possibilidade de fuga de corrente através de elementos condutores que constituem a célula.

#### 4.1.1 - Efeito da Concentração

A partir das Curvas de Polarização pode-se observar o efeito da concentração do eletrólito, conforme mostra a Figura 4.5 onde apresenta a variação da corrente elétrica produzida a 110V em função da concentração do eletrólito. Mais uma vez observa-se que a corrente tende a aumentar em função da concentração do KOH, refletindo no rendimento do sistema.

#### 4.2 - Consumo de Energia Elétrica e Rendimento do Sistema

O consumo de energia para cada concentração do eletrólito foi obtido a partir das curvas de polarização e medidndo-se a vazão dos gases, obteve-se as Figuras 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9. O comportamento das curvas obedecem a Lei de Faraday para eletrólise ( 07 ). Apresentando uma relação linear entre a produção de gases e a potência.

A Tabela 4.5 apresenta os dados da potência teórica requerida para eletrólise da água, conforme apresentados no Apêndice F. Com esses dados e a potência real para cada concentração de KOH, pode-se determinar o rendimento do sistema. Observa-se que o

TABELA 4.5 - DADOS TEÓRICOS E DADOS REAIS DE PRODUÇÃO DE GASES EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA CALCULADA PARA VOLUMES DE  $H_2O$  QUE VARIARAM DE  $0.1m^3$  A  $2m^3$ , NAS CONDIÇÕES NORMAIS DE TEMPERATURA E PRESSÃO. (APÊNDICE E)

P.T.	P.R. (13%)	(13%)	P.R. (10%)	(10%)	P.R. (7%)	(7%)	P.R. (4%)	(4%)
0,237	0,398	0,595	0,422	0,562	0,451	0,526	0,482	0,492
0,474	0,796	0,595	0,844	0,562	0,900	0,526	0,964	0,492
0,948	1,592	0,595	1,800	0,526	1,804	0,525	1,926	0,492
1,422	2,388	0,595	2,532	0,562	2,706	0,525	2,800	0,506
1,896	3,184	0,595	3,376	0,562	3,608	0,525	3,856	0,492
2,370	3,980	0,595	4,220	0,562	4,510	0,525	4,820	0,492
2,844	4,776	0,595	5,200	0,547	5,412	0,525	5,784	0,492
3,318	5,572	0,595	5,910	0,561	6,314	0,525	6,748	0,492
3,792	6,368	0,595	6,820	0,556	7,216	0,525	7,440	0,510
4,266	7,164	0,595	7,560	0,564	8,118	0,525	8,676	0,492
4,740	7,960	0,595	8,510	0,557	9,020	0,525	9,640	0,492
5,214	8,756	0,595	9,290	0,561	9,922	0,525	10,604	0,492

P.T - POTÊNCIA TEÓRICA EM [KW]

P.R - POTÊNCIA REAL EM [KW]

rendimento aumenta com a diminuição da resistência e praticamente independe da potência aplicada ao sistema. A Figura 4.5 apresenta o comportamento do rendimento em função da concentração de KOH, como foi comentado no item 4.1 a presença de corrente elétrica para tensões inferiores a 1,14 volts por célula deve-se a contribuição de fuga de corrente e a configuração geométrica do reator eletroquímico. Essa "corrente" é um fator que contribui na diminuição do rendimento do sistema, a partir da Figura 4.1 pode-se calcular que, antes da produção normal de gases ocorreu uma perda em torno de 38%. Isso pode justificar a essa concentração o rendimento de 60%.

FIGURA 4.5 - CURVA DE RENDIMENTO DO SISTEMA.

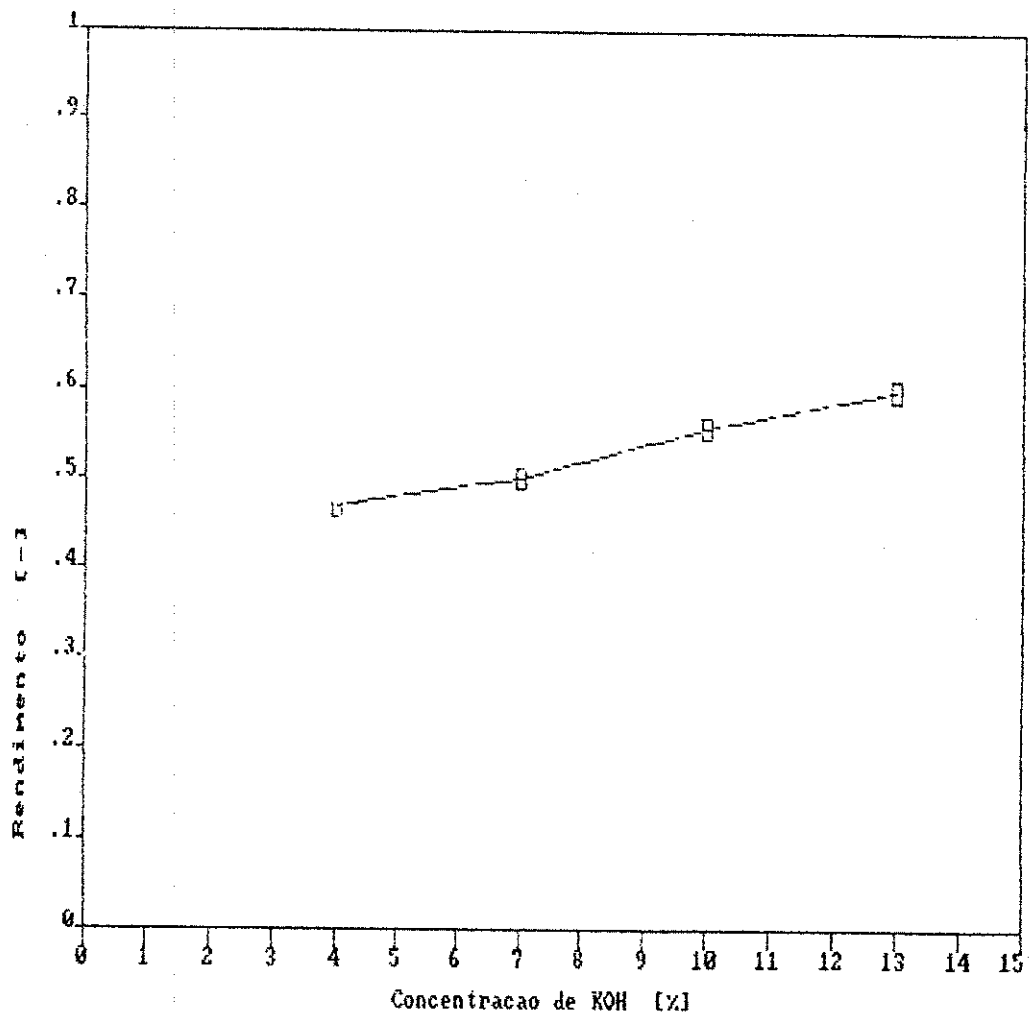




FIGURA 4.6 - CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA (PARA UMA CONCENTRAÇÃO DE 4% DE KOH.)

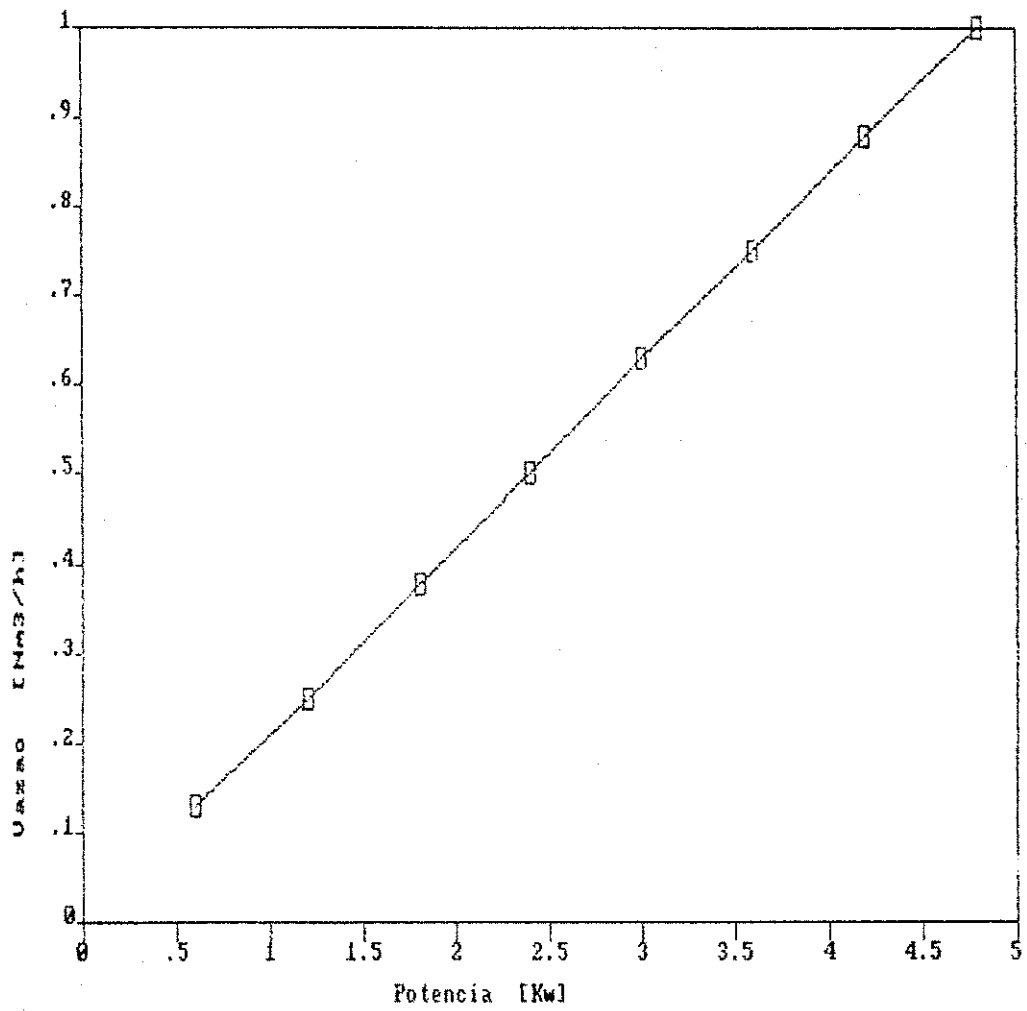


FIGURA 4.7 - CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA (PARA UMA CONCENTRAÇÃO DE 7% DE KOH) .

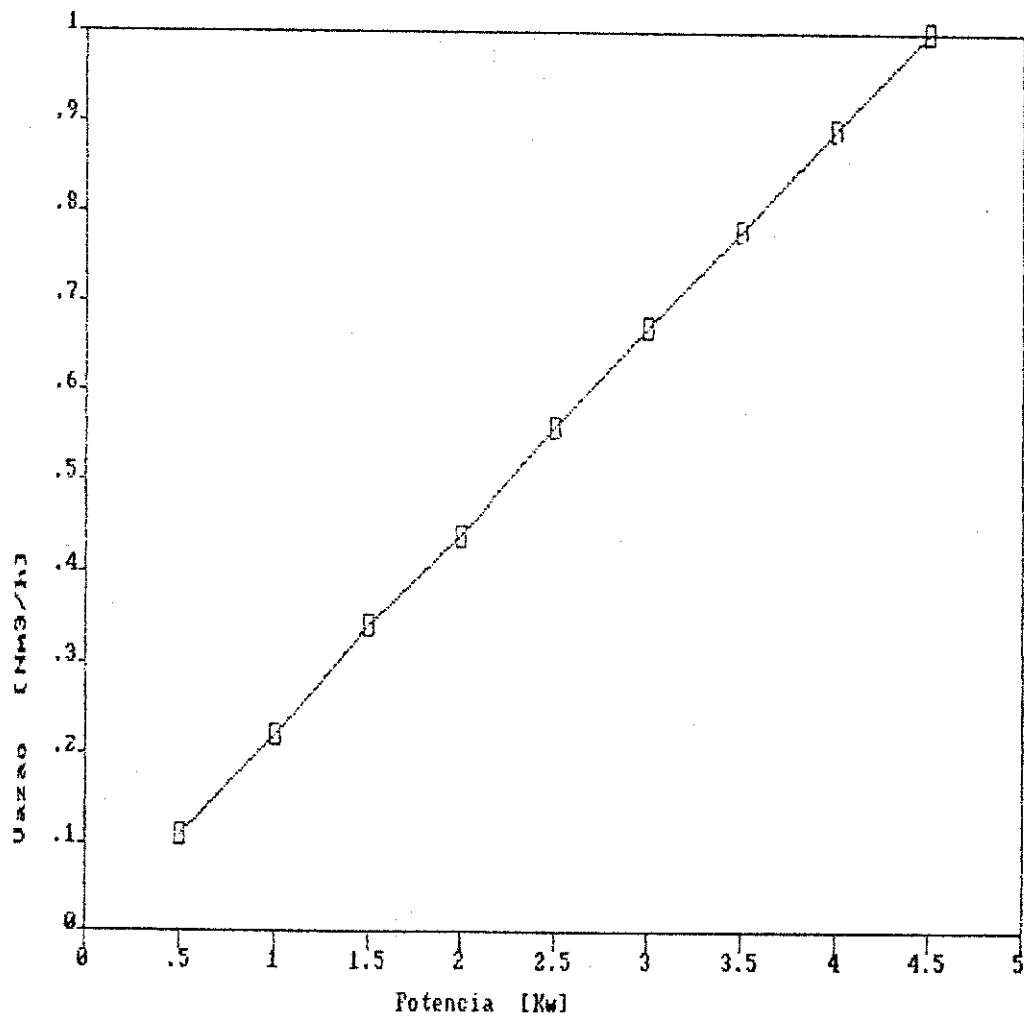


FIGURA 4.8 - CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA (PARA UMA CONCENTRAÇÃO DE 10% DE KOH).

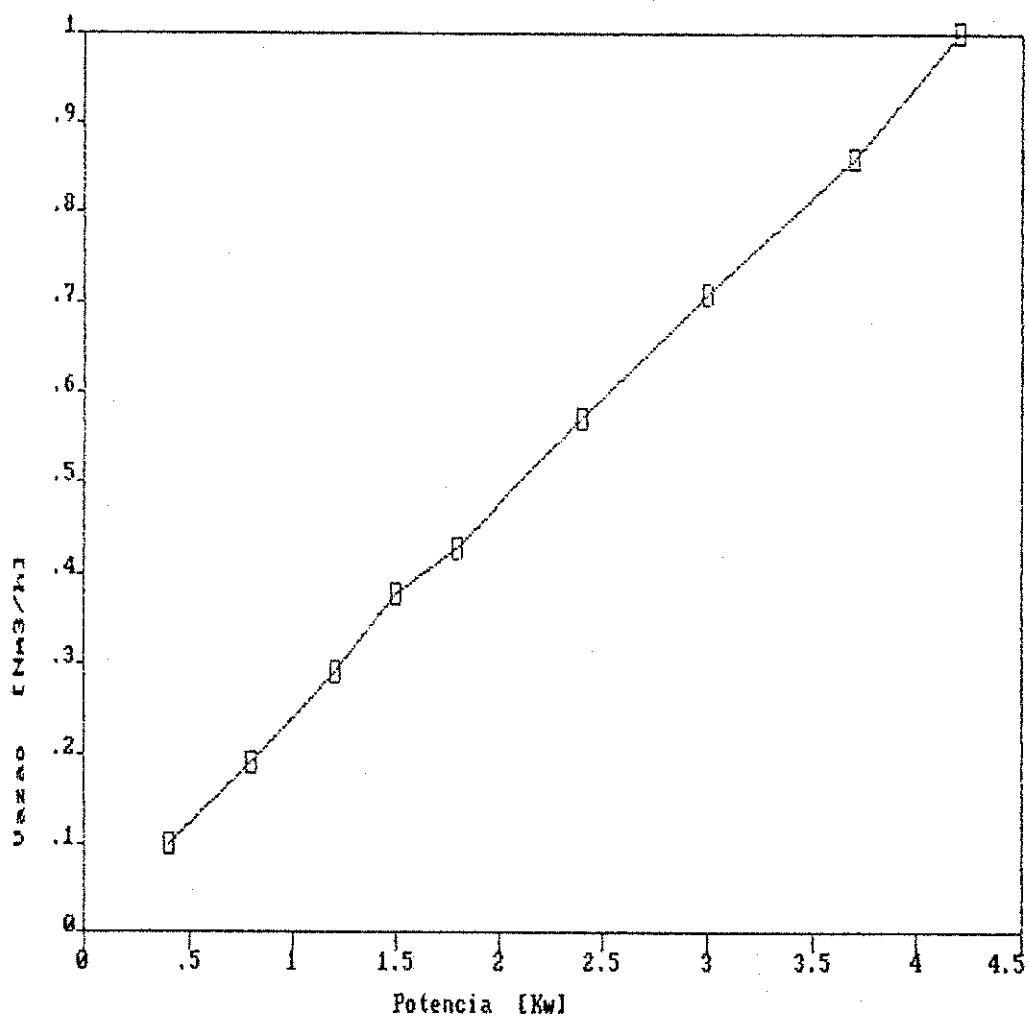


FIGURA 4.9 - CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA (PARA UMA CONCENTRAÇÃO DE 13% DE KOH).

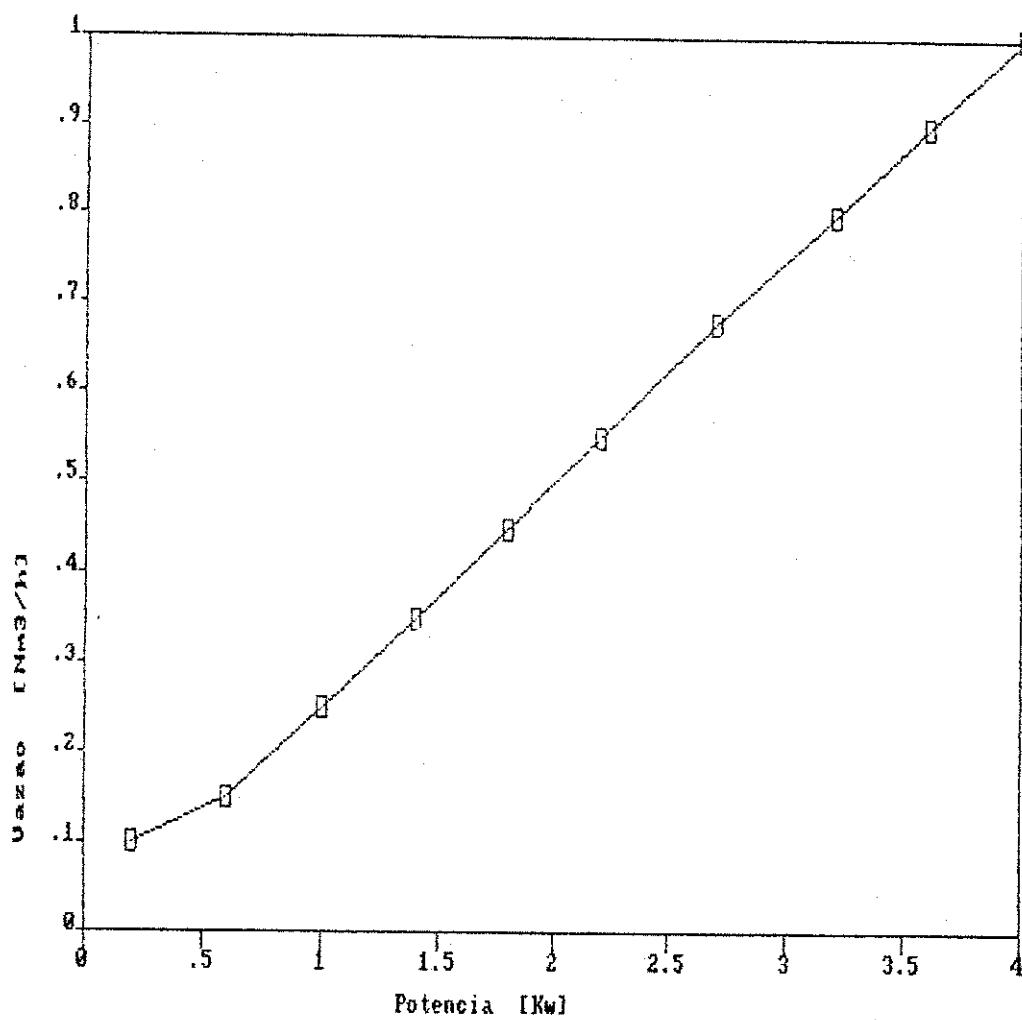
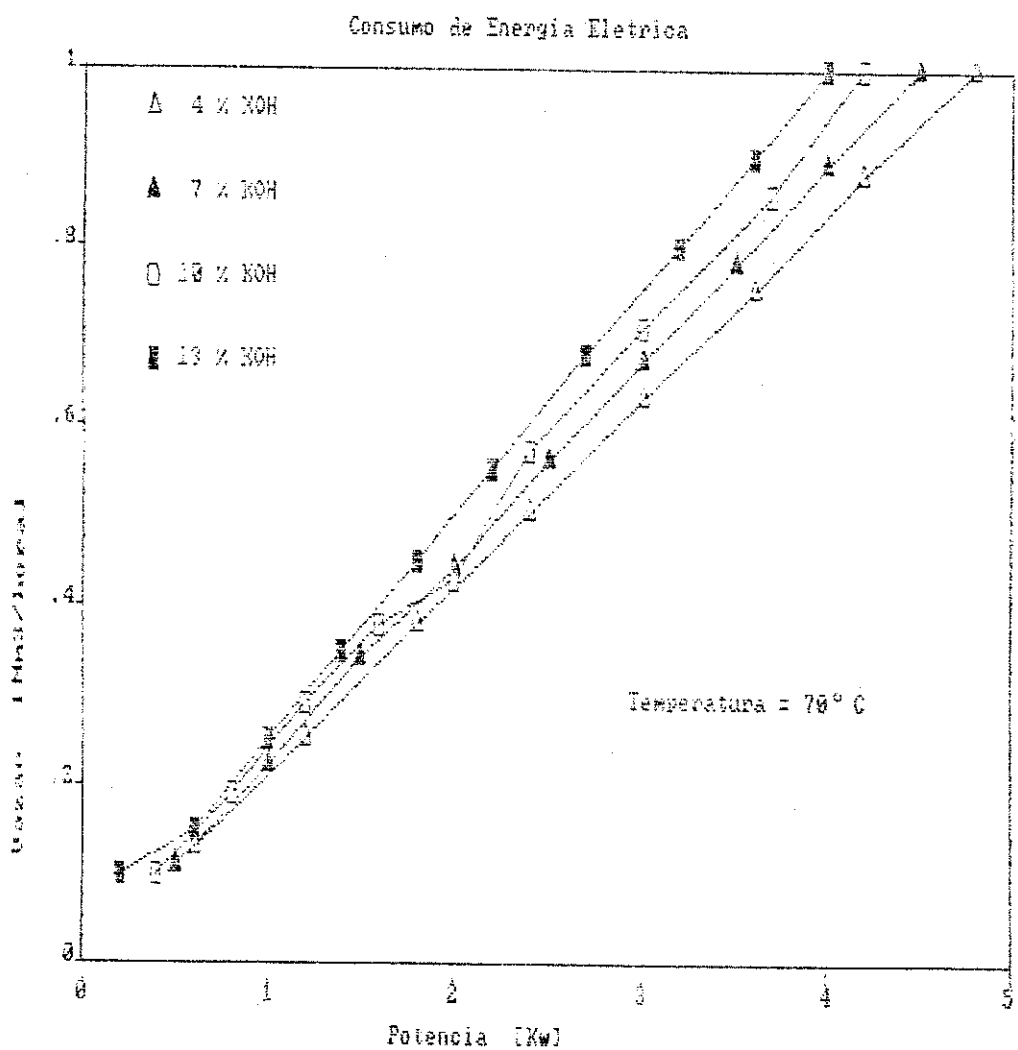


FIGURA 4.10 - CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA (PARA AS CONCENTRAÇÕES DE 4%, 7%, 10% E 13% DE KOH, COMPARATIVAMENTE).



CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

---

## 5.1 - CONCLUSÕES

1 - O aumento da concentração de eletrólito (KOH) eleva o rendimento do sistema, o que significa um menor consumo de energia, porém, nas condições do eletrolisador que não contém membranas separadoras de gases o sistema não suporta concentrações acima de 15% de KOH.

2 - Como os gases gerados se misturam dentro do reator existe uma tendência para o recuo de chama, pondo em risco as instalações devido ao perigo de explosão e incêndio.

3 - A introdução de uma tela de polietileno entre as placas do eletrolisador solucionou o problema de curto-circuito, porém, isto ocasionou um aumento da resistência ôhmica, diminuindo o seu rendimento.

## 6.1 - RECOMENDAÇÕES

1 - A fim de evitar o curto-circuito, ao invés de usar a tela de polietileno entre as placas, é aconselhável aumentar a espessura das juntas de borracha.

2 - Os gases  $H_2$  e  $O_2$  devem ser gerados separadamente, o que elevará a segurança interna do aparelho em virtude de possibilitar a inclusão de equipamentos que evitam o recuo de chama.

3 - O sistema produzindo gases separados possibilitará o uso de hidrogênio e oxigênio para múltiplas utilidades. O hidrogênio pode ser usado, além de combustível, para o enchimento de balões, para gerar eletricidade em células combustíveis, para hidrogenação de gorduras, redução de óxidos e fabricação da amônia. O oxigênio pode ser usado para fins hospitalares e como oxidante químico em geral.

4 - A inclusão de separadores de hidrogênio e oxigênio tais como o amianto ou o nafion possibilitará um aumento da taxa de densidade de KOH do sistema e, conseqüentemente, do rendimento.

5 - A inclusão de novos materiais tais como o polímero nafion e esponjas de níquel como eletrodo possibilitará projetos de células eletrolíticas que possam funcionar também como célula combustível.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

## BIBLIOGRAFIA

- 1 - 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/Paraíba, 1982.
- 2 - BOCKRIS, J. O'M., Energy, The Solar-Hydrogen Alternative. The Architectural Press Ltd., London, 1976.
- 3 - BOCKRIS, J. O'M., The economics of hydrogen as a fuel. International Journal of Hydrogen Energy, Vol.6, Num. 3, 1981.
- 4 - BRADLEY, J. N., Flame and Combustion Phenomena. Ed. Butler & Tanner Ltd., Frome and London, 1969.
- 5 - CAMPOS, R. F., Tecnologia Brasileira na Produção de Hidrogênio. Equipamentos Villares, 1985.
- 6 - CARDOSO, A. J. C., Queima de Gases. CETEC, Belo Horizonte - MG, 1982.
- 7 - CASPER, M.S., Hydrogen Manufacture by eletrolisis Thermal Decomposition and Unusual Techniques, Noyes Date Corporation, Park Ridge, New Jersey, U.S.A., 1978.
- 8 - COELHO, J. A. Utilização de Hidrogênio Eletrolítico como combustível, vol. II, 1984.
- 9 - CRAWFORD, G. Large Industrial Production of Eletrolytic Hydrogen, Seminário Brasil-Canadá de Alternativas Energéticas, São Paulo, SP, 1983.
- 10 - CAMPOS, R. F. Tecnologia Brasileira na Produção de Hidrogênio, Equipamentos Villares, 1985.
- 11 - CHEN, D. Z., WENG, Z. M. & LI, X. H., Theoretical Performance Evaluation of Hydrogen Flames. International Journal of Hydrogen Energy, vol. 13, num. 11, 1988.

- 12 - DINGA, G.P., Hydrogen: the ultimate fuel and energy carrier, International Journal of Hydrogen Energy, vol, 14, num. 11, 1989.
- 13 - DE LA RUE, E. R. & TOBIAS, C. W., On the Conductivity of Dispersions. Journal Electrochemistry Soc., 1959.
- 14 - DOENITZ, W. & SCHMIDBELGER, R., Concepts and design for scaling up high temperature water vapour electrolysis. German Bundesministerium für Forschung und Technologie, Berlin, Alemanha, 1980.
- 15 - DOENITZ, W., DIETRICH, G., EROLE, E. & STREICHER, R., Electrochemical high temperature technology for hydrogen production or direct electric generation. International Journal of Hydrogen Energy, vol. 13.
- 16 - DUGGER, G. L., Ocean Thermal Energy Conversion, in Solar Energy for Earth, American Institute of Aeronautics, New York, 1975.
- 17 - FORZA - Indústria de Equipamentos Elétricos Ltda. Projeto: Soldadora a hidrogênio e oxigênio. Relatório Técnico. Proc. 400826/90-9/0N/FV/PQ.
- 18 - GREGORY, D. P., A Hydrogen-Energy System, Report L 21173, American Gas Association, 1973.
- 19 - GOLDFARB, J., Hidrogênio: Perspectivas de sua Utilização no Nordeste Brasileiro. Curso de Planejamento Energético Global, COELCE/FINEP/UFC, Fortaleza, 1988.
- 20 - GOLDFARB, J., França, K. B., PALOMINO, G.N. e ALVES, J. J. N., Opção Alternativa para Produção de Energia em Alta Escala no Nordeste. IV Encontro Regional de Química, Aracaju, Sergipe.

Novembro, 1989.

- 21 - LEROY, R.L., STUART, A. K., Advanced Unipolar Electrolysis. International Journal of Hydrogen Energy, vol. 6, num. 6, 1981.
- 22 - MOURA, J. C., Manual de Segurança para o Hidrogênio. CODETEC, UNICAMP, CAMPINAS, SP, 1980.
- 23 - NUTALL, L. J., Conceptual design of large scale water eletrolysis plant using solid polymer electrolyte technology. International Journal Hydrogen Energy, vol. 2, 1977.
- 24 - NSF/NASA, Solar Energy Panel, An Assessment of Solar Energy as a National Energy Resource, University of Maryland, College Park, Md., 1972.
- 25 - OHTA, T., Solar - Hydrogen Energy Systems. Pergamon Press, Oxford, England, 1979.
- 26 - PERRIER, J. L., Energia Solar e Hidrogênio. Editorial Presença, Lisboa, Portugal, 1980.
- 27 - PERRY, R. H. & CHILTON, C. H., Manual de Engenharia Química, 5a. Edição, Editora Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1986.
- 28 - QUITES, A. M., DUTRA, J. C., Tecnologia da Soldagem a Arco Voltaico. Florianópolis - SC., 1979.
- 29 - QUADLIANO, J. V. & VALLARINO L. M., Química, Rio de Janeiro - RJ, Editora Guanabara Dois, 1985.
- 30 - ROY, L. R. Hydrogen Production by the Eletrolysis of Water, Seminário Brasil-Canadá de Alternativas Energéticas, São Paulo - SP, 1984.
- 31 - REIDER, R., EDESKUTY, F. J., Hydrogen Safety Problems. International Journal of Hydrogen Energy, vol. 4, num. 1.

- 32 - SPIRIG, E., Un Procédé de Soudage Utilisant l'Electrolyse de l'eau. Brevet Européen Num. 5597 - Février 1984 - França.
- 33 - SILVA, E.P., Fontes Energéticas Brasileiras - Hidrogênio. Vol. 1, CHESF/BRASAP ENG. Ltda., Rio de Janeiro - RJ., 1987.
- 34 - SILLEN, C. W. M. P., Barendrecht, E., Gas bubble behaviour during water electrolysis. International Journal of Hydrogen Energy, vol. 7, num. 7, 1982.
- 35 - SILVA, E. P., Introdução à Tecnologia e Economia do Hidrogênio, Editora da Unicamp, Campinas - SP., 1991.
- 36 - SIMPÓSIO TECNOLÓGICO BRASIL - AUSTRIA. "Corte e Solda com o laser a CO de Alta Performance". São Paulo - SP, 1992.
- 37 - SUZUKI, Y., On Hydrogen as Fuel Gas. International Journal of Hydrogen Energy, vol. 7, num. 9, 1990.
- 38 - TICIANELLI, E. A., Sistemas Eletroquímicos de Geração e Aproveitamento de Hidrogênio, Eletrolisadores e Células
- 39 - Fontes Alternativas de Energia, Projeto FINEP / PNUD / UNESCO, Brasil, 1985.
- 40 - TERMOQUIP - Energia Alternativa Ltda. Manual de Segurança para Hidrogênio. Campinas - SP.
- 41 - TOBIAS, C. W., Effect of Gas Evolution on Current Distribution and Ohmic Resistance in Electrolyzer. J. Electrochem. Soc., 1959.
- 41 - UTP - Brasileira de Soldas Ltda., 3a. Edição, Santo Amaro, São Paulo, 1982.
- 43 - VELZEN, D. VAN & LANGENKAMP, H., Development studies on thermochemical cycles for hydrogen production. C.C.R. Euratom,

Ispra, Itália, International Journal of Hydrogen Energy, vol.2, Pergamon Press, 1977.

- 44 - WINTER, C. J., KLAISS H. and NITSCH J., Hydrogen as Energy carrier: What is known ? What do we need to learn ?. International Journal of Hydrogen Energy, vol. 15, num.2, p.79-91, 1990, Pergamon Press.
- 45 - WAINER, E. Soldagem. Editado pela ABM-Associação Brasileira de Metais, 16a. edição ampliada, São Paulo - SP.
- 46 - WILLIAMSON, Jr. K. D. & COX, K. E., Hydrogen: Its technology and Implications, vol. I, CRC Press, Cleveland, 1977.
- 47 - II Congresso Latino-Americano e III Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem. UFSC/COPPE/UFRJ, Itapema, SC, 1977.

APÊNDICE A

PRINCIPAIS PROCESSOS DE GERAÇÃO DO 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 altas temperaturas	Água	Calor gerado por usinas nucleares	Em desenvolvimento
Eletrólise Fotovoltáica	Água	Radiação solar	Em desenvolvimento

## APÊNDICE B

### PROPRIEDADES FÍSICAS DO HIDROGÊNIO

O hidrogênio é um elemento gasoso que em temperatura ambiente e pressão atmosférica, apresenta-se sem cor, sem odor, sem sabor, não é tóxico, porém inflamável. É o gás mais leve e sua densidade em relação ao ar é apenas 0,0695. Encontra-se no ar em altitude normal em concentrações muito baixas: 1 a 2 ppm.

O hidrogênio queima com o ar com uma chama azul muito pálida, quase invisível.

A temperatura de ignição de mistura hidrogênio/ar e hidrogênio/oxigênio varia de acordo com a composição, pressão, umidade e temperatura inicial.

À pressão atmosférica a temperatura de ignição dessas misturas encontra-se na faixa de 565 a 579 C.

Os limites de inflamabilidade de misturas hidrogênio/ar e hidrogênio/oxigênio dependem da pressão e temperatura iniciais e da umidade. Em ar seco à pressão atmosférica, o limite inferior é de 4.1% de hidrogênio e o superior 74.2% de hidrogênio em volume. Em oxigênio seco à pressão atmosférica, o limite inferior é de 4.7% de hidrogênio e o superior é de 93.9 em volume.

O hidrogênio é um gás difícil de ser liquefeito, pois seu ponto de ebulição à pressão atmosférica é - 253 C.



O hidrogênio é transparente, sem odor e não é corrosivo nem reativo. Sua densidade é cerca de 14 vezes menor do que a da água. Todos os gases, com exceção do hélio, tornam-se sólidos à temperatura do hidrogênio líquido. O hidrogênio líquido possui coeficiente de expansão térmica alto quando comparado com outros líquidos criogênicos.

Em temperatura e pressão normais, os gases mais comuns ( $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$ ) esfriam-se por expansão em estrangulamentos de tubulações de alta para baixa. O hidrogênio, porém, é exceção e se aquece um pouco nestas condições.

O hidrogênio se difunde rapidamente através de materiais porosos e através de alguns metais aquecidos ao rubro. Ele pode vazar em sistemas bem vedados para o ar ou outros gases em pressão equivalente.

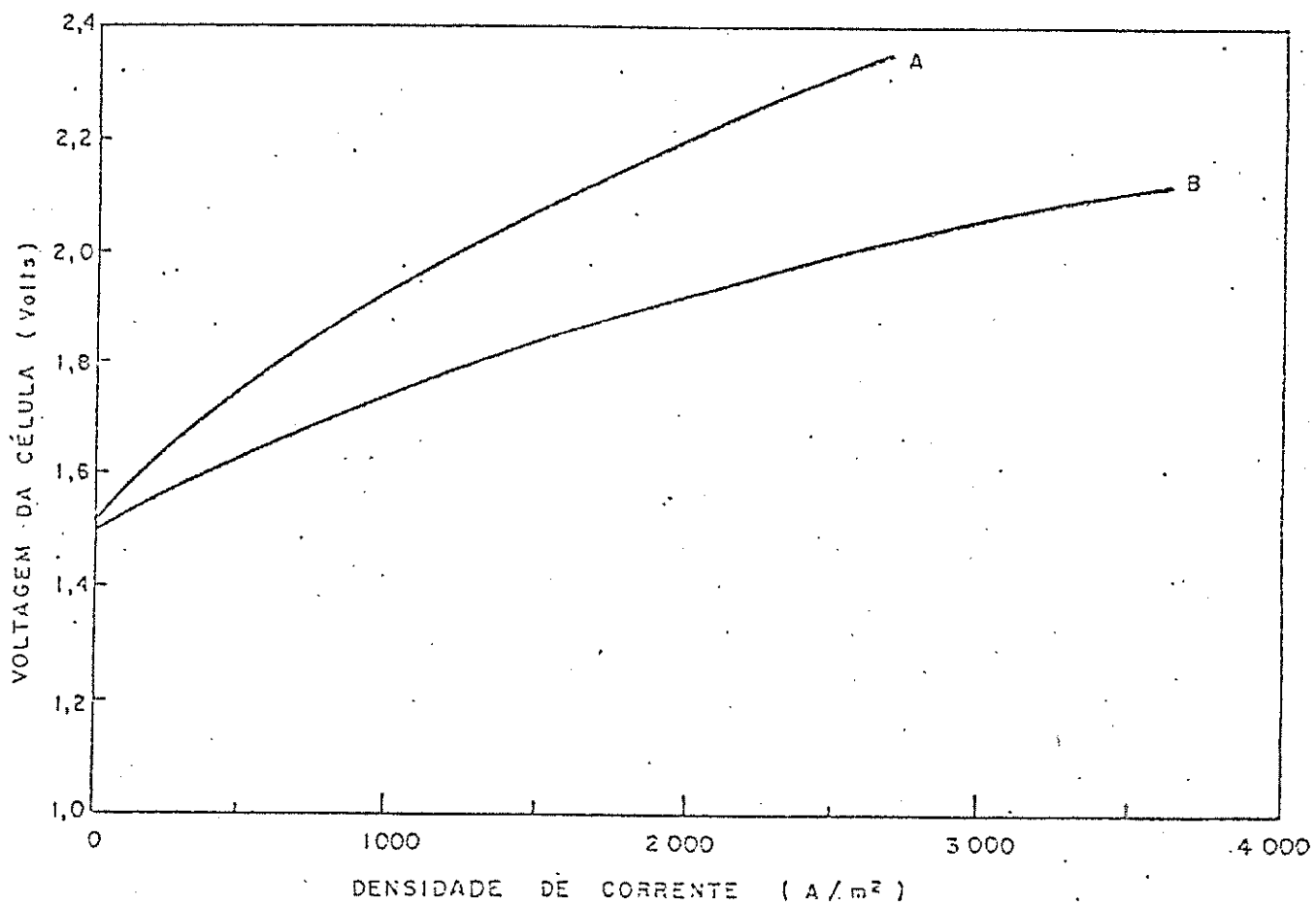
Do ponto de vista químico, o hidrogênio é fundamentalmente um agente redutor e como tal é aplicado frequentemente na tecnologia química, tanto orgânica como inorgânica. O quadro seguinte traz as principais propriedades físicas e químicas do hidrogênio. (MANUAL CODETEC)

CONSTANTES FÍSICAS DO HIDROGÊNIO

Símbolo	H <sub>2</sub>
Peso molecular	2,016
Estado de agregação nas CNTP	gás incolor
Massa específica (Kg/Nm <sup>3</sup> )	0,08987
Ponto de ebulição normal (°C)	-252,78
Calor Específico (Cal/mol K)	a = 6,424
$C_p = a + b.T + c.T^2$	b = 1,039 x 10 <sup>-3</sup>
	c = -7,8 x 10 <sup>-8</sup>
Limites de inflamabilidade:	4,1 a 75% de H <sub>2</sub>
com o ar	
Temperatura de ignição com o O <sub>2</sub>	450 °C
Temperatura de ignição com o ar	510 °C
Calor de Combustão a 25 °C	-241,8 KJ/mol
Calor de vaporização (cal/g)	107
Cp/Cv	1,41
Temperatura Crítica (°C)	-240
Pressão Crítica (atm)	12,8
Solubilidade em água a 15 °C (v/v)	0,019

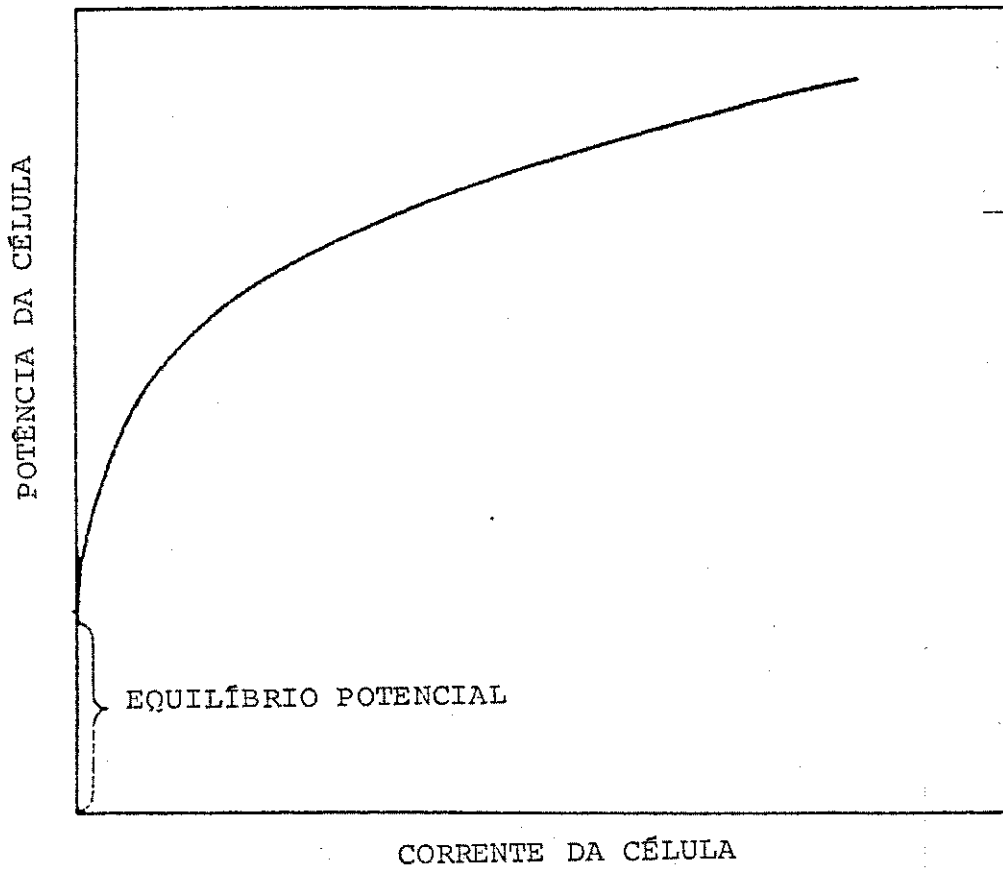
APÊNDICE C

CURVAS TÍPICAS DE VOLTAGEM vs DENSIDADE DE CORRENTE  
PARA CÉLULAS ELETROLÍTICAS



APÊNDICE D

CURVA DE POLARIZAÇÃO TÍPICA PARA A ELETRÓLISE

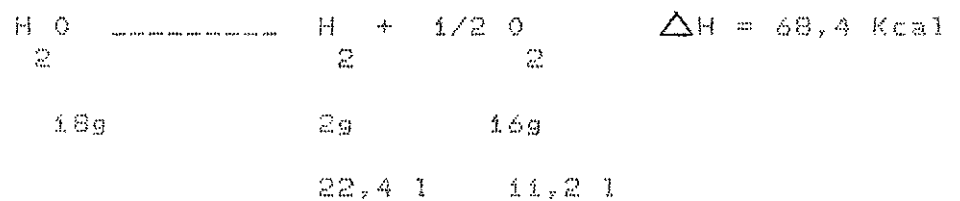


BOCKRIS, 1981

APÊNDICE E

CÁLCULOS DO RENDIMENTO DO SISTEMA

a) Cálculo da Potência Teórica de uma célula eletrolítica



Observa-se que para cada 18g de  $\text{H}_2\text{O}$  obtém-se 33,6 litros de gás ( $\text{H}_2 + \text{O}_2$ ), portanto, para se obter 1000 litros de gás, necessita-se de 535,7g de água.

Do mesmo modo, sabe-se que para se obter 33,6 litros de gás, consome-se 68,4 Kcal de energia, logo para obtenção de 1000 litros de gás, consome-se 2035,7 Kcal. Esse valor é a energia necessária teoricamente para se obter  $1000 \text{ Nm}^3 / \text{H}_2 + \text{O}_2$  ( $1000 \text{ Nm}^3 / \text{H}_2 + \text{O}_2$ ).

Transformando-se 2035,7 Kcal para Kwh, obtém-se 2,366 Kwh de potência (1 Kwh = 860 Kcal).

Portanto, a potência teórica de uma célula eletrolítica é 2,366 Kwh.

b) Cálculo do Rendimento do Sistema

O rendimento é dado pelo quociente entre a potência teórica e a potência real.

$$\text{Rend} = \text{Pot. teórica} / \text{Pot. real}, \text{ onde } \text{Pot. Real} = U \times i$$

TABELA E.1 - CONCENTRAÇÃO DE KOH VERSUS RENDIMENTO MÉDIO

CONCENTRAÇÃO DE KOH EM PESO (%)	RENDIMENTO
4	0.49
7	0.52
10	0.56
13	0.60

APÊNDICE F

FOTOGRAFIAS DA MÁQUINA OXIHIDROGÊNICA E SUAS CHAMAS

Figura F.1 - Fotografia da máquina oxí-hidrogênica vista de frente

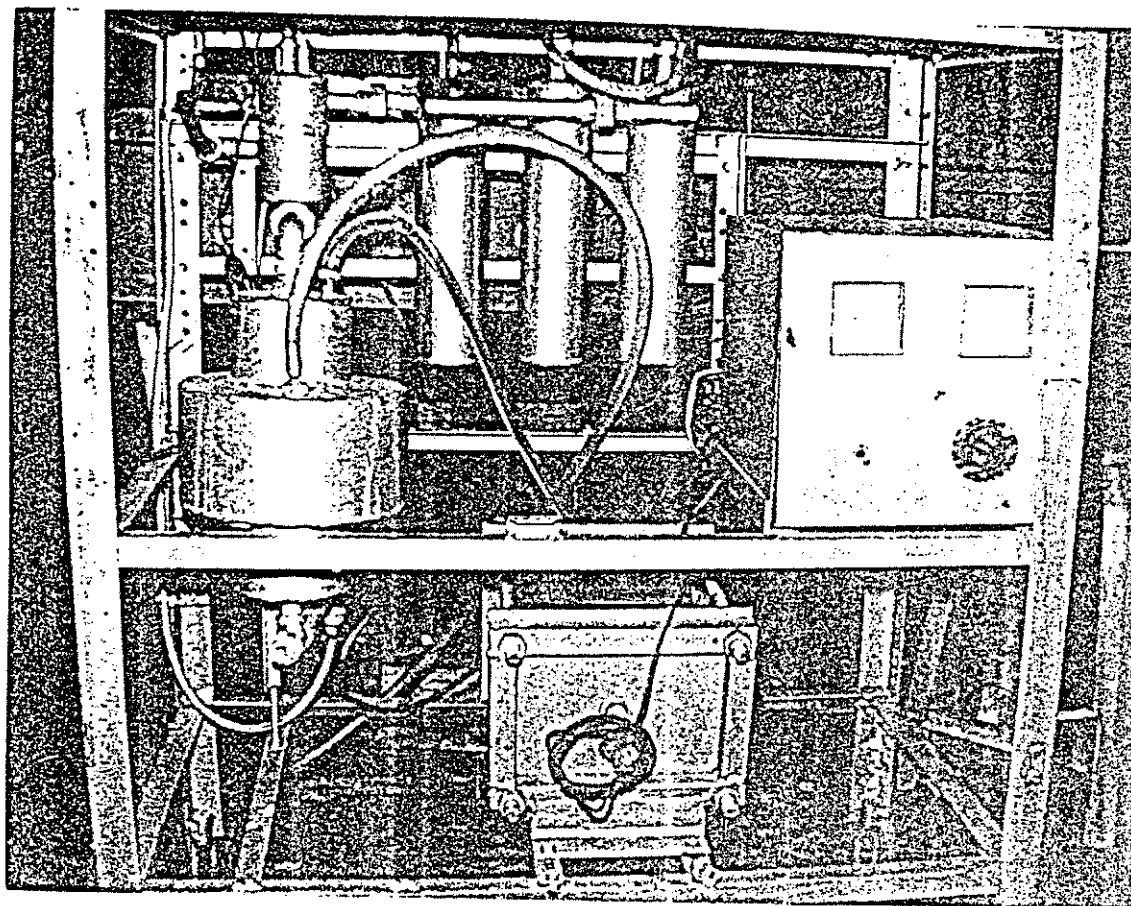




Figura F.2 - Fotografia da máquina oxí-hidrogênica vista de trás.

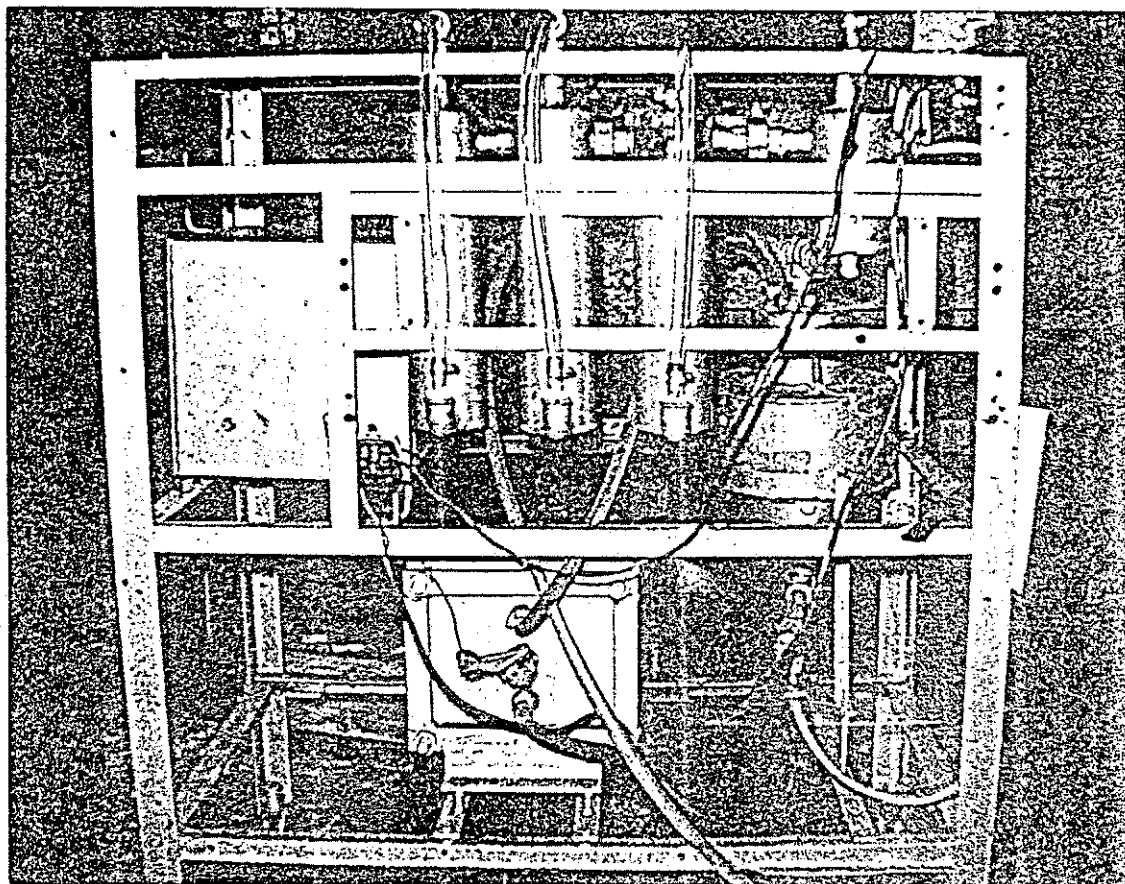


Figura F.3 - Fotografia da chama de benzina

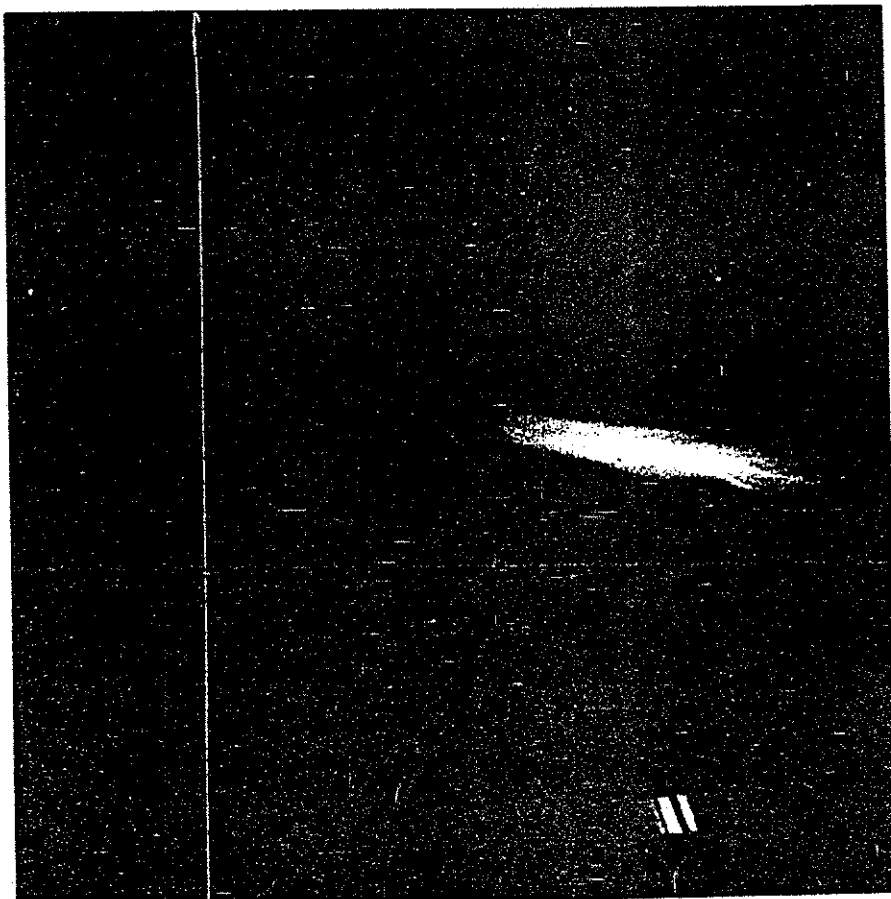


Figura F.4 - Fotografia da chama do álcool.

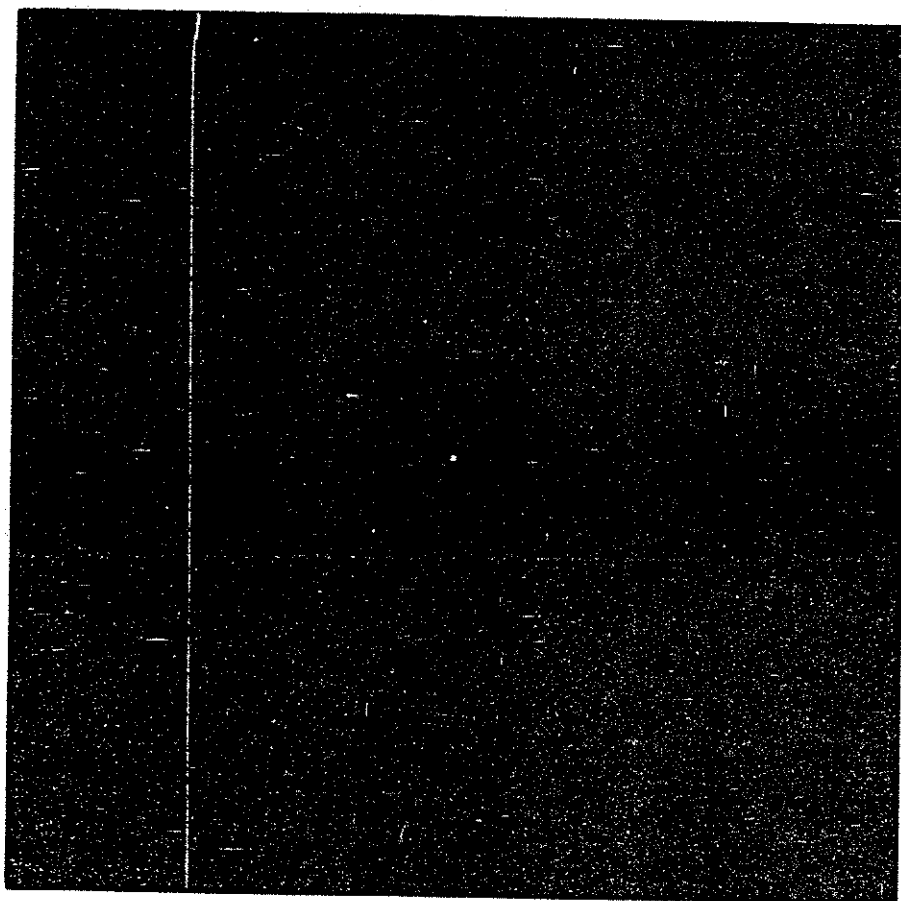


Figura F.5 - Fotografia da chama mista de álcool e benzina.

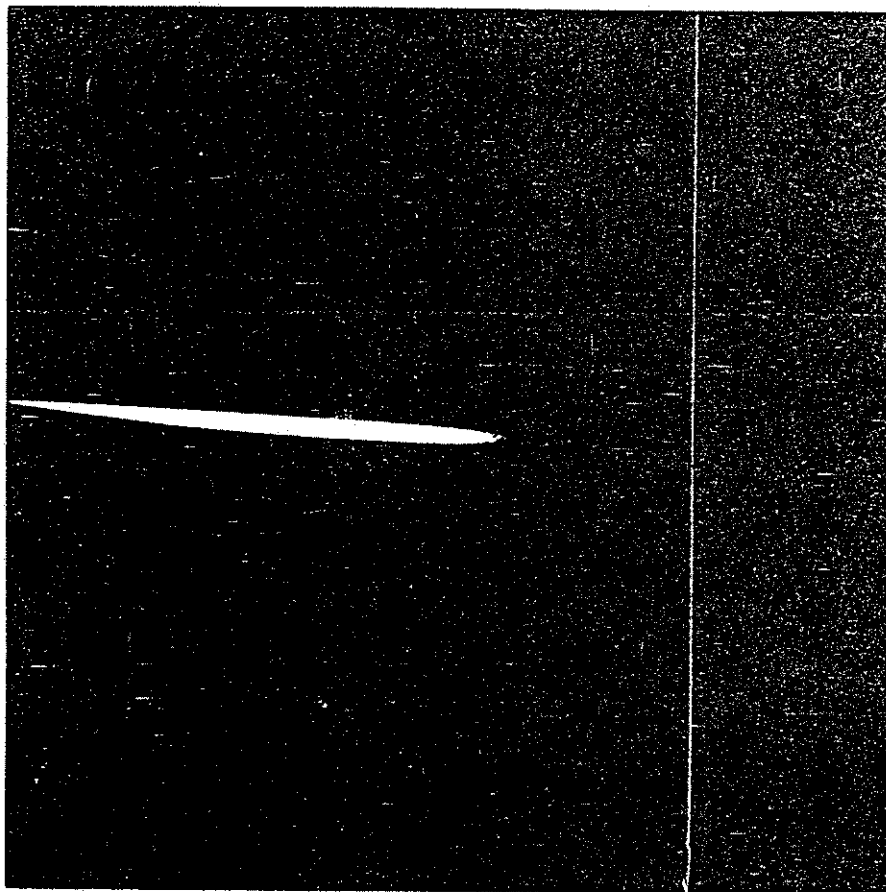


Figura F.6 - Fotografia de uma região do aço aquecida com a máquina oxí-hidrogênica.

