

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

AVALIAÇÃO DE UMA SOLDADORA OXI-HIDROGÊNICA
COM ADIÇÃO DE OXIGÊNIO

NILZA CAMPOS DE ANDRADE

CAMPINA GRANDE

1993

AVALIAÇÃO DE UMA SOLDADORA OXI-HIDROGÊNICA
COM ADIÇÃO DE OXIGÊNIO

NILZA CAMPOS DE ANDRADE

AVALIAÇÃO DE UMA SOLDADORA OXI-HIDROGÊNICA
COM ADIÇÃO DE OXIGÊNIO

*Dissertação apresentada no curso de
mestrado em Engenharia Química da
Universidade Federal da Paraíba,
em cumprimento as exigências para
obtenção do Grau de Mestre.*

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: OPERAÇÕES E PROCESSOS

ORIENTADOR : PROF. KEPLER BORGES FRANÇA (PHD)

CO-ORIENTADOR : PROF. JÚLIO GOLDFARB (MSc)

CAMPINA GRANDE

1993



A553a Andrade, Nilza Campos de.
Avaliação de uma soldadora oxi-hidrogênica com adição de oxigênio / Nilza Campos de Andrade. - Campina Grande, 1993. 140 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1993.
"Orientação: Prof. Dr. Kepler Borges França, Prof. M.Sc. Júlio Goldfarb".
Referências.

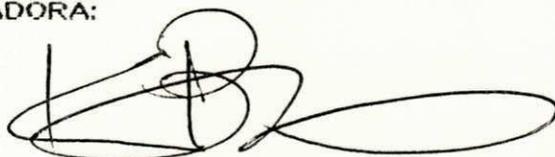
1. Soldagem Eletrolítica. 2. Soldadora Oxi-Hidrogênica - Avaliação. 3. Oxigênio - Adição. 4. Dissertação - Engenharia Química. I. França, Kepler Borges. II. Goldfarb, Júlio. III. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). IV. Título

CDU 621.791.797(043)

AVALIACAO DE UMA SOLDADORA OXI-HIDROGENICA
COM ADICAO DE OXIGENIO

DISSERTACAO APROVADA EM 20 / 12 / 93

BANCA EXAMINADORA:



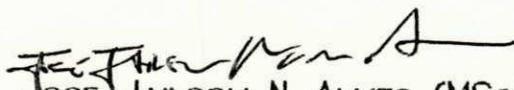
PROF. KEPLER BORGES FRANCA (PHD)
ORIENTADOR



PROF. JULIO GOLDFARB (MSC)
CO-ORIENTADOR



PROF. JOSE MAURICIO GURGEL (PHD)
COMPONENTE DA BANCA



PROF. JOSE JAILSON N. ALVES (MSC)
COMPONENTE DA BANCA

DEDICATÓRIA

Aos meus pais *Dely e Ester*

Ao professor *Júlio Goldfarb*

AGRADECIMENTOS

Ao orientador Professor Kepler Borges França, pela disposição em compartilhar seus conhecimentos, experiência e sabedoria.

Ao co-orientador Professor Júlio Goldfarb, pela atenção, incentivo, sugestões e incansável dedicação na elaboração deste trabalho.

Ao Núcleo de Energia - NERG, no nome do seu coordenador Edgar R. B. Filho, pelo acolhimento, materiais e serviços, na realização deste trabalho.

A Francisco Sérgio Buarque de Gusmão, pelo empenho, incentivo e contribuição durante toda essa jornada.

Aos funcionários do Núcleo de Energia da UFPB - NERG e em especial a Jorge E. Serey e Francisco Cândido da Silva Filho, pelo apoio que me dedicaram.

A ESCOLA TÉCNICA FEDERAL DA PARAÍBA, no nome do Prof José N. Feliciano, pela colaboração nas análises metalográficas.

Ao Prof. José Jailson N. Alves, que gentilmente co-orientou-me, com disposição incansável e amizade.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro, ao Departamento de Engenharia Química e aos amigos que contribuíram direto ou indiretamente para a realização deste trabalho.

RESUMO

O presente trabalho consiste no aperfeiçoamento de um sistema eletroquímico para produção dos gases hidrogênio e oxigênio a partir de um eletrolisador bipolar de água, pela passagem de corrente elétrica, para fins de corte e solda de metais.

O sistema em estudo é uma soldadora oxi-hidrogênica construída pela indústria FORZA, com o nome de "Aqqua Solda". Esta máquina apresenta soldas de ótima qualidade em metais não ferrosos, entretanto para materiais que contém ferro não se obtém soldas de boa qualidade.

O aperfeiçoamento foi feito com a injeção de oxigênio na máquina com o intuito de melhorar a qualidade das soldagens em metais ferrosos; através de análises metalográficas e testes de resistência mecânica foi feito um levantamento dos melhores percentuais de oxigênio injetado.

ABSTRACT

The present work to consist in improvement of an electrochemistry sistem to production of hydrogen and oxygen gases by means of bipolar electrolyzer of water for crossing electric current, with purpose of metals cutting and welding.

A welding machine oxygen-hydrogen builded for FORZA industry, named "Acqua Solda" is the studied sistem. This machine presents welds of good quality on non-ferrous metals, however at materials containing iron, the achieved welds are not of good quality.

The improvement took place with oxygen injection in machine in order to improve the quality of welds in ferrous metals; through metallographic analysis and mechanical resistance test it was done an Lifting of the best porcentage of injected oxigen.

SIMBOLOGIA

A	- Ampere
AC	- Corrente alternada
atm	- Atmosfera
C	- Carbono
°C	- Grau centígrado
Cal	- Caloria
CC	- Corrente contínua
CO	- Monóxido de Carbono
CO ₂	- Dióxido de Carbono
cm	- Centímetro
cm ²	- Centímetro quadrado
CNTP	- Condições normais de temperatura e pressão
E	- Voltagem real de operação da célula
e ⁻	- Eletron
E _o	- Tensão de decomposição nas CNTP
E _p	- Tensão de decomposição em função de pressão
E _{rev}	- Tensão mínima para a eletrólise
E _t	- Voltagem termoneutra
F	- Constante de Faraday
g	- Grama
(g)	- Gasoso

H	- Hidrogênio
h	- Hora
H ₂	- Gás hidrogênio
H ⁺	- Ion hidrogênio
H ₂ O	- Água
Hz	- Hertz
I	- Corrente da célula
kcal	- Quilocaloria
kg	- Quilograma
kgf	- Quilograma-força
KOH	- Hidróxido de Potássio
Kw	- Quilowatts
Kwh	- Quilowatts-hora
l	- Litro
(l)	- Líquido
m	- Metro
m ²	- Metro quadrado
m ³	- Metro cúbico
ml	- Mililitro
mm	- Milímetro
N	- Normais
N ₂	- Gás nitrogênio
n	- Número de eletrodos
O ₂	- Gás oxigênio

OH^-	- Ion hidroxila
P	- Pressão de operação do eletrolisador
ppm	- Parte por milhão
P_t	- Potência teórica
P_r	- Potência real
Q	- Carga transferida à reação
R_o	- Resistência da célula
R_t	- Rendimento térmico
s	- Segundo
t	- Tempo
ton	- Tonelada
V	- Volume
v	- Volts
z	- Número de eletrons
W	- Watts

LETRAS GREGAS:

ΔG	- Variação da energia livre de Gibbs na reação
ΔH	- Variação de entalpia da reação
η	- Rendimento do sistema

η_a - Sobretensão anódica
 η_c - Sobretensão catódica
 η_{total} - Sobretensão total

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1	- Esquemas de arranjos unipolares e bipolares para células eletrolíticas convencionais	17
FIGURA 2.2	- Esquema de um arranjo bipolar de uma célula eletrolítica usando polímero eletrólito sólido	20
FIGURA 2.3	- Curvas de voltagem versus temperatura para a eletrólise	24
FIGURA 2.4.a	- Tipos de chama oxi-combustível	52
FIGURA 2.4.b	- Principais regiões de chama-combustível	52
FIGURA 3.1	- Fluxograma do processo	65
FIGURA 3.2	- Eletrolisador bipolar	67
FIGURA 3.3	- Anéis do eletrolisador	68

FIGURA 3.4	- Fonte de alimentação	70
FIGURA 3.5	- Reservatório de eletrólito	72
FIGURA 3.6	- Reservatório de álcool e benzina	74
FIGURA 3.7	- Purgador	76
FIGURA 4.1	- Curva de variação da corrente em função da tensão durante o processo a 7% de KOH	93
FIGURA 4.2	- Curva de tensão por célula em função da corrente para 7% de KOH	94
FIGURA 4.3	- Curva de variação da corrente em função da tensão durante o processo a 10% de KOH	95
FIGURA 4.4	- Curva de tensão por célula em função da corrente para 10% de KOH	96

FIGURA 4.5	- Curva de variação da corrente em função da tensão durante o processo a 13% de KOH	97
FIGURA 4.6	- Curva de tensão por célula em função da corrente para 13% de KOH	98
FIGURA 4.7	- Curva do rendimento em função da concentração do eletrólito	106
FIGURA 4.8	- Produção teórica de gases em função da potência da máquina	107
FIGURA 4.9	- Produção real de gases em função da potência da máquina	108
FIGURA 4.10	- Relação entre a vazão de gases produzido e as potências real e teórica	109
FIGURA 4.11	- Fotografias metalográficas das soldagens	115

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 - PRINCÍPIOS TEÓRICOS	4
2.1 - Geração do hidrogénio	5
2.1.1 - Considerações Gerais	5
2.1.2 - Conceituação Teórica	8
2.1.2.1 - O hidrogénio	8
2.1.2.2 - Propriedades físicas	10
2.1.2.3 - Propriedades químicas	10
2.1.2.4 - Obtenção do hidrogénio	11
2.1.2.5 - Usos comerciais do hidrogénio ...	13
2.1.3 - A Eletrólise da Água	14
2.1.3.1 - Reações nos eletrodos	21
2.1.3.2 - Tensão de uma célula de eletrólise	22
2.1.3.3 - Sobretensões	25
2.1.3.4 - Rendimento térmico	26
2.1.3.5 - Efeito da temperatura	27
2.1.3.6 - Efeito da pressão	27
2.1.3.7 - Resistência da célula	28

2.1.3.8 - Energia requerida na eletrólise .	30
2.1.4 - Componentes básicos de uma célula eletrolítica	35
2.1.4.1 - Eletrólito	35
2.1.4.2 - Eletrodos	37
2.1.4.3 - Reservatório	38
2.1.4.4 - Separador	39
2.2 - A Soldagem	40
2.2.1 - Definição	40
2.2.2 - Histórico	41
2.2.3 - Corte por plasma de ar	44
2.2.4 - Solda microplasma	46
2.2.5 - Corte e solda com o laser CO ₂	47
2.2.6 - Importância da soldagem	48
2.3 - Estudo da chama	49
2.3.1 - Combustíveis e comburentes	49
2.3.2 - A chama oxi-combustível	50
2.3.3 - Temperatura da chama	53
2.4 - Fenômenos da combustão	56
2.4.1 - A química da combustão	56
2.4.2 - A queima dos gases	57

2.5 - Segurança para o hidrogénio	57
2.5.1 - Introdução	57
2.5.2 - Efeitos fisiológicos do hidrogénio	58
2.5.3 - Cuidados adicionais com a segurança	59
2.5.3.1 - Eliminação de fontes de ignição .	59
2.5.3.2 - Proteção de pessoal	61
 CAPITULO 3 - TRABALHO EXPERIMENTAL	 62
 3.1 - Introdução	 63
 3.2 - Descrição do Sistema	 64
3.2.1 - Eletrolisador	66
3.2.2 - Fonte de alimentação	69
3.2.3 - Pressostato	69
3.2.4 - Reservatório de eletrólito	71
3.2.5 - Reservatório de álcool	73
3.2.6 - Reservatório de Benzina	73
3.2.7 - Trocador de Calor	73
3.2.8 - Purgador	75
 3.3 - Operação com a máquina oxi-hidrogénica	 77
3.3.1 - Instalação da máquina	77

3.3.2 - Procedimento para a partida	77
3.3.3 - Acendimento e regulagem da chama	78
3.3.4 - Apagamento da chama	79
3.3.5 - Abastecimentos	80
3.3.5.1 - Água	80
3.3.5.2 - Alcool e benzina	81
3.4 - Material Utilizado	81
CAPITULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	83
4.1 - Curva de polarização	84
4.2 - Rendimento do sistema	89
4.3 - Aspectos das chamas	110
4.3.1 - Eter	110
4.3.2 - Acetona	110
4.3.3 - Benzina	111
4.3.4 - Alcool	111
4.4 - Aspectos Qualitativo das Soldagens	111
CAPITULO 5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	119

BIBLIOGRAFIA	121
APÈNDICE A	129
APÈNDICE B	130
APÈNDICE C	131
APÈNDICE D	132
APÈNDICE E	133

CAPÍTULO 1
INTRODUÇÃO



1 - INTRODUÇÃO

A ecologia é uma das preocupações fundamentais da presente geração. Os produtos carbonáceos provocam modificações negativas no meio ambiente caracterizadas pelo efeito estufa e outros poluentes. (WINTER, 1990). O hidrogênio é o mais importante candidato para substituir os combustíveis de origem carbonáceos. Sua queima é limpa tendo praticamente água como resíduo. O presente trabalho trata do estudo de uma tecnologia de solda e corte baseada no hidrogênio da água, obtido a partir da eletrólise bipolar. Os aparelhos de solda e corte via hidrogênio e oxigênio eletrolítico foram desenvolvidos a partir de 1983. O processo foi inventado na Suíça em 1983 onde se deu a primeira patente; a segunda patente de 1984 é francesa. (SPIRIG, 1984)

No Brasil os centros de pesquisas em hidrogênio eletrolítico começaram a desenvolver pesquisas nesta direção na mesma época. Na Pós-Graduação de Engenharia Química da UFPB, COPPE - RJ, Instituto de Física e Química, USP - SP e Departamento de Engenharia Química da UFRS, foram projetados e construídos protótipos de soldadoras oxi-hidrogênicas baseadas em eletrólise bipolar.

No Brasil, surgem a partir de 1988, quatro indústrias ligadas aos centros de pesquisas citados. Estas

indústrias são: Peter Pereira - Produtos Eletrônicos Ltda., Porto Alegre-RS, com o nome e patente de "Acqua Solda"; Indústria de Matrizes Imasul Ltda., São Leopoldo-RS, com o nome e patente de "Hidrosolda"; DAKOTA Indústria e Comércio Ltda., Rio de Janeiro-RJ, com o nome e patente "Dakota" e EDG - Equipamentos e controles Ltda., com o nome "Micromaçarico a hidrogênio". Todos estes aparelhos apresentaram problemas de segurança e os de maior potência um déficit em oxigênio. Por esta razão, dois anos mais tarde já não estavam sendo mais fabricados. A patente da "Acqua Solda" foi vendida para a indústria Forza - Indústria de Equipamentos Elétricos Ltda., Joinville-SC, que reprojeteu, introduziu modificações, sendo uma máquina disponível apenas sob solicitação. A DAKOTA reprojeteu esta máquina que voltou desde 1992 ao mercado.

O Departamento de Engenharia Química e Núcleo de Energia da UFPB, projetaram e construíram uma soldadora oxi-hidrogênica em 1990, também baseada na eletrólise bipolar. (ALVES, 1992).

Esta pesquisa foi desenvolvida a partir da introdução do oxigênio na soldadora "Acqua Solda" da Forza e levantamento dos principais parâmetros do aparelho, com a finalidade de melhorar as características da solda, como também a resistência mecânica da solda a ferro, que não apresenta boa resistência.

CAPÍTULO 2
PRINCÍPIOS TEÓRICOS

2 - PRINCÍPIOS TEÓRICOS

2.1 - A GERAÇÃO DO HIDROGÊNIO

2.1.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

Desde o início da civilização até o século XVIII a humanidade supria suas necessidades energéticas a partir de fontes renováveis (lenha, eólica, quedas d'água, etc.). A partir daí, com o crescimento da população mundial, as fontes renováveis se tornaram insuficientes e o mundo entrou na era dos combustíveis fósseis - inicialmente com carvão, depois com os combustíveis derivados do petróleo.

Estamos agora prestes a entrar num período de transição que será caracterizado pela substituição progressiva das fontes de energia fósseis (carvão, petróleo, etc.) pelas fontes não fósseis (fissão e fusão nuclear, hidráulica, eólica, solar, geotérmica, etc.).

Finalmente entraremos na era do hidrogênio eólico-solar. Uma era que será caracterizada pela utilização exclusiva das fontes não fósseis para produção de eletricidade e hidrogênio. E uma vez estabelecida, essa era deverá durar até o

final da civilização. (TICIANELLI,1985)

A época atual pode ser classificada como a Era do Petróleo. De fato, essa é a fonte básica de produção de combustível e geração de energia da maior parte das nações do mundo moderno. Iniciada no começo do século XX, esta era tem seu final indeterminado, mas que seguramente ocorrerá, no mais tardar, com a redução das reservas mundiais de petróleo. Sempre existiu muita polêmica sobre a extensão das reservas, conhecidas ou estimadas, e o tempo que o homem levará para esgotá-las. Entretanto um fato é incontestável: poder-se-á levar 20, 30 ou até 100 anos, mas a quantidade de petróleo existente é finita, esgotável e impossível de ser reposta. A diminuição da produção mundial de petróleo se seguirá o aparecimento de uma nova etapa ou era para a humanidade, onde outros energéticos deverão serem produzidos ou explorados, suprindo a demanda de energia, aliás sempre crescente. Muitos pesquisadores e estudiosos acreditam entretanto que o fim da Era do Petróleo se dará antes, ou até bem antes, do esgotamento das reservas mundiais deste energético. De fato o surgimento desta era se deu muito antes do esgotamento da principal fonte de energia que caracterizou a etapa anterior, no caso o carvão. Esta antecipação foi devida ao desenvolvimento tecnológico, que propiciou um grande salto em termos de eficiência, operacionalidade, economia e diversificação, etc., obtidos com o uso dos derivados do petróleo.

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

Nos dias atuais, o emprego energético do hidrogênio é ainda bastante reduzido, devendo-se situar abaixo dos 20% de sua produção total. Mais de 80% seria consumido como insumos químicos em processos industriais. Do total produzido atualmente, estima-se que ainda 80% do hidrogênio provenha de fontes primárias não renováveis de energia (carvão, gás natural e petróleo) sendo os 20% restantes oriundos principalmente de biomassa (madeira) e eletricidade, grande parte desta última na forma de sub-produto industrial.

Por todos os fatos citados é que o hidrogênio é conhecido como combustível do futuro, futuro este hoje imaginado já para o início do próximo século, ou seja, dentro de 20 ou 30 anos. (SILVA, 1987)

2.12 - CONCEITUAÇÃO TEÓRICA

2.12.1 - O QUE É O 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 é inflamável.

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

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

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

Os limites de inflamabilidade de misturas hidrogênio/ar e hidrogênio/oxigênio dependem da pressão e temperaturas iniciais e da umidade. Em ar seco à pressão atmosférica o limite inferior é 4,1% de hidrogênio e o superior 74,2% de hidrogênio em volume. Em oxigênio seco à pressão

atmosférica o limite inferior é 4,7% de hidrogênio e 93,9% de hidrogênio em volume.

O hidrogênio possui ponto de ebulição muito baixo (-253°C) à pressão normal, o que indica ser difícil liquefazê-lo.

O hidrogênio líquido é transparente, sem odor e não é corrosivo nem muito reativo. Sua densidade é 0,0899 g/l cerca de quatorze vezes menor que o ar atmosférico. Todos os gases, à 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 condições normais de temperatura e pressão os gases mais comuns (O_2 , N_2 , CO_2) esfriam por expansão em estrangulamentos de tubulação de alta para baixa pressão. O hidrogênio porém é exceção e se aquece um pouco nessas condições. (Ex.: a expansão de hidrogênio de 130 atm por pressão atmosférica eleva a temperatura do gás de aproximadamente de 5°C).

O hidrogênio se difunde rapidamente através de material poroso e através de alguns metais aquecidos ao rubro. Ele pode vazar em sistemas bem vedados para 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. (TERMOQUIP)

2.1.2.2 - PROPRIEDADES FÍSICAS

O hidrogênio comum tem peso atômico 1,00797, peso molecular 2,01594, valência 1 e estrutura cristalina cúbica. Seu átomo possui um potencial de ionização de 13,54 volts. Encontra-se livre na atmosfera em uma concentração inferior à 1 ppm. Além do que é um elemento que é absorvido por muitos metais, tais como Pd, Pt e Fe, sendo o Paládio particularmente característico neste caso, visto que absorve cerca de 1000 vezes seu volume em hidrogênio.

Apresenta também um comportamento solúvel em solventes orgânicos bastante acentuado. (SILVA, 1987)

2.1.2.3 - PROPRIEDADES QUÍMICAS

O hidrogênio apresenta molécula biatômica nas CNTP. É o elemento químico mais leve que se conhece, 14 vezes mais leve que o ar. Sua densidade em relação ao ar é somente 0,0655. Possui uma atividade química muito grande e é muito inflamável na presença de oxigênio e ar, produzindo uma chama muito quente e sem cor. Produz ácidos por combinação direta com

os halogênios, forma hidretos estáveis quando reage com os não metais (exceto gases inertes) e forma hidretos instáveis na reação com alguns metais.

Em temperaturas normais não é uma substância muito reativa, a não ser quando na presença de catalisadores convenientes; porém em temperaturas elevadas sua capacidade reativa é extremamente alta. Normalmente o hidrogênio se apresenta na forma molecular diatômica, dissociando-se a altas temperaturas, em átomos livres de acordo com a reação (2.1), cujo valor de dissociação é de 104,2 Kcal/mol a 25°C. (SILVA, 1987)



2.1.2.4 - OBTENÇÃO DO HIDROGÊNIO

O hidrogênio é produzido industrialmente de várias maneiras. O método usado em cada caso específico depende de uma série de fatores tais como:

- volume de hidrogênio a ser produzido;
- usos do hidrogênio;

- natureza de outras plantas e equipamentos;
- pureza desejada do hidrogênio.

Tradicionalmente, os processos de produção de hidrogênio são classificados segundo o insumo básico utilizado na sua geração. O apêndice A mostra os principais processos indicando o seu estágio atual de evolução.

Os mais importantes processos nos quais o hidrogênio produzido são:

- Processo Ferro esponja + vapor
- Processo Carvão em coque + vapor
- Craqueamento
- Reforma a Vapor
- Oxidação do Alumínio com hidróxidos alcalinos
- Eletrólise da água.

A eletrólise da água em solução alcalina ou ácida é uma importante fonte de hidrogênio. As plantas de eletrólise da água operam somente para produzir hidrogênio e oxigênio e em alguns casos água pesada. Em outros processos eletrolíticos, como o de produção de cloro e soda, o hidrogênio é um sub-produto. (TERMOQUIP)

2.12.5 - USOS COMERCIAIS DO HIDROGÊNIO

O hidrogênio é usado em larga escala na indústria moderna, como matéria-prima importante. Muitos dos usos do hidrogênio são baseados no seu comportamento químico; por exemplo, grandes quantidades do gás, geralmente misturados com outros gases, são usados como combustível.

O hidrogênio é largamente usado na síntese química, por exemplo, na síntese da amônia, do álcool metílico, e dos óleos vegetais hidrogenados sólidos, além de na manufatura de hidrocarbonetos líquidos sintéticos.

No campo da química orgânica usa-se hidrogênio para fabricar óleos comestíveis e também para produzir vários álcoois a partir de seus ácidos ou aldeídos.

Grande quantidade de hidrogênio são requeridos para vários processos de hidrogenação relacionados com a preparação da gasolina.

Outros usos do hidrogênio são baseados nas suas propriedades físicas, particularmente a sua densidade baixa e a sua alta capacidade calorífica. É usado como um gás no enchimento de balões de observação meteorológica, devido sua baixa densidade. Por outro lado, em virtude da sua capacidade calorífica elevada, é

utilizado como meio de transferência de calor em instalações de transformadores elétricos. (QUAGLIANO, 1985)

Como combustível o uso industrial de hidrogênio envolve a sua queima nas operações de solda e corte de diversos metais, inclusive 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.

O hidrogênio gasoso é usado em balões meteorológicos ou outros (metereologia).

O hidrogênio líquido é usado como combustível para mísseis e em operações de laboratório para estudar propriedades de materiais em temperaturas muito baixas (criogênia). (TERMOQUIP)

2.13 - A ELETRÓLISE DA ÁGUA

A eletrólise da água consiste em decompor a água através de uma corrente elétrica contínua em seus elementos de formação: hidrogênio e oxigênio. Esta operação é realizada de

maneira prática pela imersão de dois eletrodos condutores de eletricidade na água com condutividade elétrica aumentada pela adição de um soluto, geralmente hidróxido de potássio.

Aplicando-se uma diferença de potencial entre os dois eletrodos, o campo elétrico contínuo resultante provoca a migração de íons H^+ e OH^- , que vão se descarregar respectivamente no catodo e no anodo.

Os compartimentos anódico e cátodico são separados por uma membrana semipermeável que evita ou diminui a mistura dos gases despreendidos em cada compartimento.

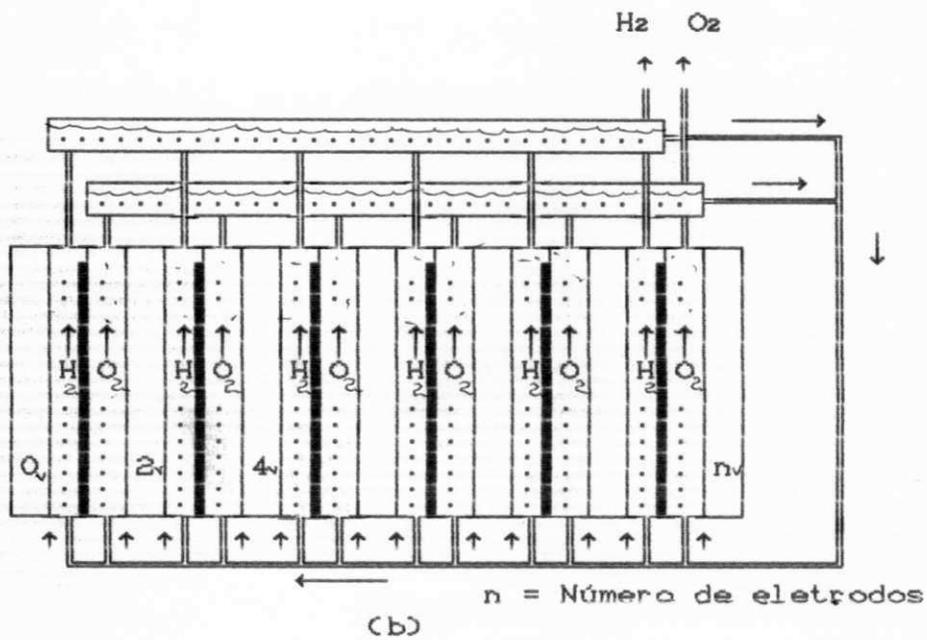
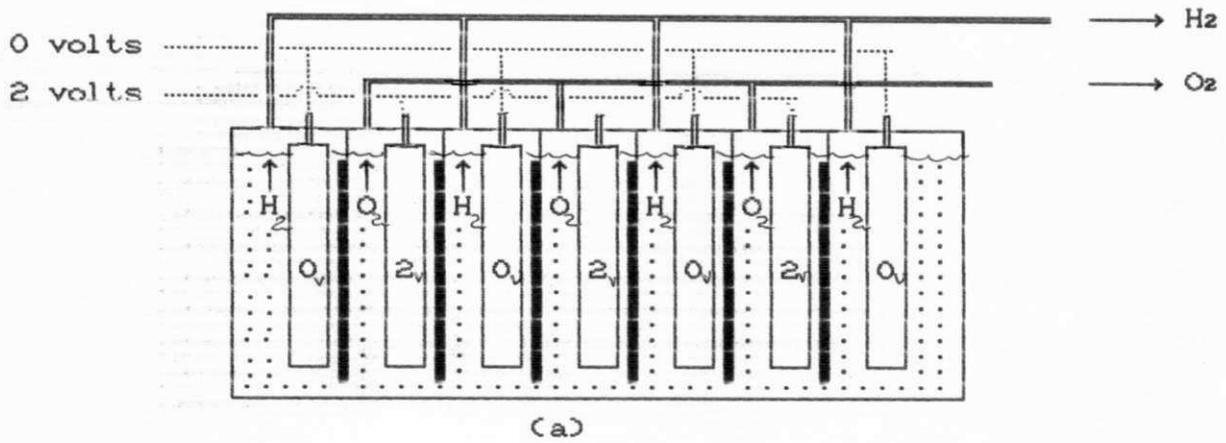
Cuidados especiais devem ser tomados para garantir alta pureza da água utilizada na eletrólise, pois uma vez que a água é consumida, substâncias estranhas podem ir se acumulando na célula e permitir o desenvolvimento de processos corrosivos dos eletrodos e destrutivos do diafragma, além de queda de eficiência devido à desativação dos eletrodos e aumento da resistividade da solução. Além disso, deve-se evitar que os elementos imersos no eletrólito estejam contaminados com gordura ou graxa pois isso leva à formação de espuma devido às condições próprias para promover as reações de saponificação. (TERMOQUIP)

Os eletrolisadores de água tem sido tradicionalmente classificados em unipolares e bipolares. Na configuração unipolar (Figura 2.1 a) tipo tanque, cada eletrodo tem a mesma

polaridade em ambas as superfícies e executa em um único processo eletrolítico - a reação de evolução de hidrogênio ou a reação de evolução de oxigênio. Uma célula contém um determinado número de eletrodos sendo que os de mesma polaridade são conectados eletricamente em paralelo. O resultado é que a voltagem total da célula corresponde à voltagem do par catodo/anodo que em termos práticos é 1,7 a 2,2 volts. O isolamento elétrico interno se torna relativamente simples, devido à baixa voltagem, e a corrente pode ser aumentada progressivamente na medida em que se aumenta o número de células no interior do mesmo tanque. Um número suficiente de células são conectados eletricamente em paralelo para que a planta total forneça a quantidade planejada de hidrogênio.

Os eletrolisadores de configuração bipolar (Figura 2.1 b) consiste num arranjo compacto de um grande número de eletrodos associados em série, que de um lado funcionam como catodo (H_2) e do outro lado como anodo (O_2). Cada eletrodo é isolado eletricamente de seu vizinho e um par sucessivo juntamente com um diafragma de separação formam uma célula unitária individual. O fluxo de corrente elétrica é aplicado atravessando todo o empacotamento que contém entre 30 a várias centenas de células individuais de 1,7 a 2,2 volts cada. Assim a voltagem final varia entre 50 a 600 volts CC, dependendo

FIGURA 2.1 - ESQUEMAS DE ARRANJOS UNIPOLARES (a) E BIPOLARES (b)
 PARA CÉLULAS ELETROLITICAS CONVENCIONAIS.



da capacidade de produção de hidrogênio desejada.

Uma diferença marcante entre os dois sistemas está relacionada com conexão elétrica em série do arranjo bipolar e paralela do arranjo unipolar. Essas células devem ser seladas para evitar vazamentos de eletrólito resultantes de variações de temperatura, bem como devem ser isoladas para evitar o curto-circuito eletrônico. Esses requisitos implicam no uso de tecnologia de alta precisão na fabricação do equipamento bipolar. Nas unidades unipolares, grande parte dos problemas não aparecem devido principalmente à baixa voltagem de operação.

Uma outra diferença importante se relaciona à fuga de corrente através do eletrólito que se verifica na configuração bipolar. Isso requer o uso de tubos bastante finos para circular o eletrólito através das diversas células; a consequência é a necessidade de bombas, filtrações e o uso de materiais altamente resistentes à corrosão. (TICIANELLI, 1982)

Na configuração bipolar, estão os eletrolisadores avançados de última geração, nos quais são usados eletrólito sólido, que funciona também como membrana separadora. Os eletrodos, anodo e catodo são constituídos de níquel esponjoso com grande atividade eletrocatalítica. O eletrólito sólido é uma

membrana dialítica (Figura 2.2) que conduz a corrente elétrica deixando passar uma única espécie de íons, podendo ser cátion H^+ (membranas catiónicas) ou ânions OH^- (membranas aniônicas). A tecnologia dos eletrolisadores avançados foi desenvolvida a partir da célula combustível desenvolvida por Bacon em 1950, que empregou pela primeira vez um polímero plástico simultaneamente como eletrólito e membrana separadora (GOLDFARB, 1988).

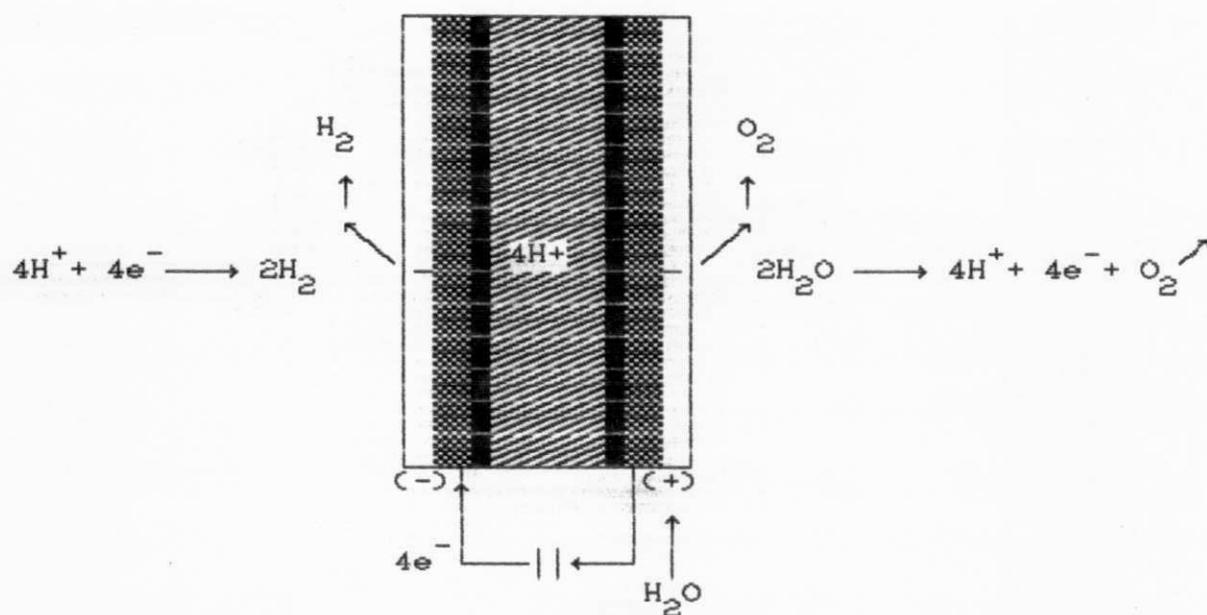
Uma vez que as condições de projeto para um reator eletroquímico tenham sido satisfeitas, ou seja, havendo mais de um projeto tecnicamente possível, a escolha do tipo de reator e dos materiais para a construção deste sistema, como também do equipamento auxiliar, dependerá das considerações econômicas como em qualquer outro projeto de interesse comercial.

Existem vários sistemas onde a eletrólise da água pode ser desenvolvida, diferenciando entre si, basicamente, pelo tipo de condutor iônico utilizado. De qualquer forma, em todos eles, a reação final é a decomposição da água em seus elementos constituintes, como segue:



(SILVA, 1987)

FIGURA 2.2 - ESQUEMA DE UM ARRANJO BIPOLAR DE UMA CÉLULA ELETROLÍTICA USANDO POLÍMERO ELETRÓLITO SÓLIDO

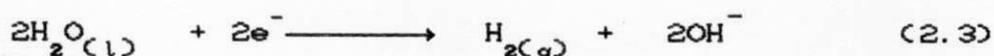


- ▨ - Polímero Eletrólito Sólido (SPE)
- - Catalisador do anodo (+) e catodo (-)
- ▩ - Estrutura Porosa

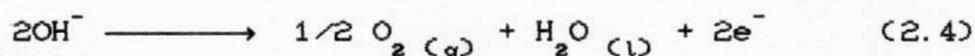
2.1.3.1 - REAÇÕES NOS ELETRODOS

As reações de formação de hidrogênio e oxigênio ocorrem sobre os eletrodos e quando a eletrólise se realiza em meio básico ocorre redução da água no catodo e oxidação dos íons (OH^-) no anodo, conforme as reações (2.3) e (2.4):

Reação catódica:



Reação anódica:



Considerando-se um processo reversível, o balanço energético indica:

$$\left[\begin{array}{l} \text{Energia elétrica fornecida pelo gerador} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{Variação da energia química do sistema} \end{array} \right]$$

ou

$$E_{rev} \cdot Q = -\Delta G \quad (2.5)$$

Sendo E_{rev} : tensão mínima para a eletrólise
 Q : carga transferida à reação
 ΔG : variação da energia livre de Gibbs da reação
(SILVA, 1987)

2.1.3.2 - TENSÃO EM UMA CÉLULA DE ELETRÓLISE

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

$E_{rev} = \frac{-\Delta G}{z.F}$ voltagem mínima (reversível) para o desenvolvimento das reações.

$E_t = \frac{-\Delta H}{z.F}$ voltagem termoneutra, onde não há troca de calor entre o sistema químico e o meio ambiente.

onde z : número de elétrons transferidos na reação
 F : constante de Faraday (96.480 coulomb/equivalente)
 ΔH : variação da entalpia da reação

Tanto E_{rev} (curva 1) como E_t (curva 2) são funções diretas da temperatura em que se desenvolve o processo. Esses resultados implicam nas seguintes conclusões:

- A eletrólise da água não ocorre para tensões, fornecidas ao sistema químico, abaixo de E_{rev} (curva 1).

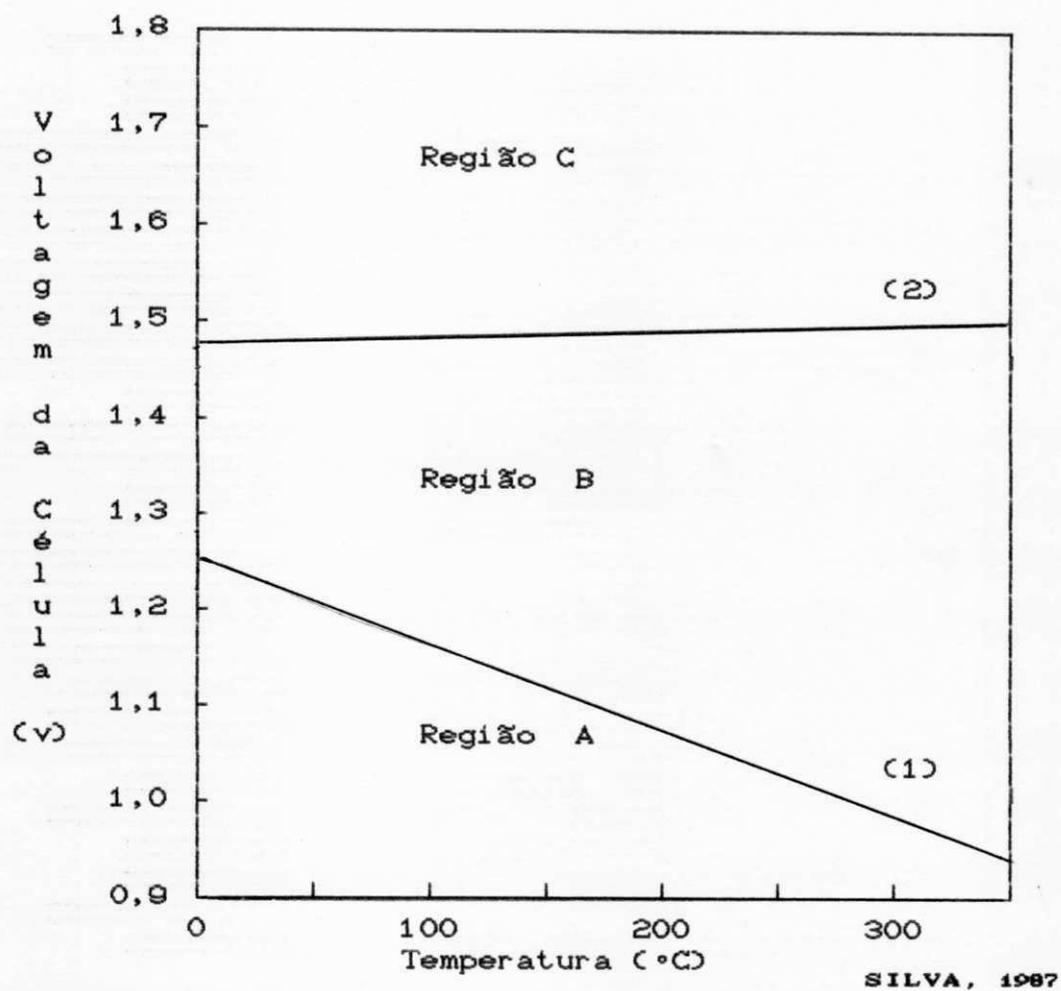
- Para tensões entre E_{rev} (curva 1) e E_t (curva 2), a eletrólise ocorre desde que o calor seja fornecido ao sistema (processo endotérmico).

- Para tensões acima da voltagem termoneutra E_t (curva 2), o calor é transferido ao meio ambiente (processo exotérmico).

As conclusões acima e as variações de E_{rev} e E_t com a temperatura estão mostradas na Figura 2.3.

Na prática, os sistemas químicos descritos, conhecidos como células eletrolíticas, operam todos na Região C, com uma tensão aplicada acima do limite inferior determinada pela Termodinâmica. A diferença entre a tensão necessária para a operação de uma célula, à uma determinada pressão e temperatura, e a tensão mínima estabelecida termodinamicamente para as mesmas condições de operação, é denominada sobretensão da célula. (SILVA, 1987)

FIGURA 2.3 - CURVAS DE VOLTAGEM VS TEMPERATURA PARA A ELETRÓLISE



Região A : Impossível a geração de H₂
 Região B : Geração de H₂ através de calor e eletricidade
 Região C : Geração de H₂ e calor através de eletricidade
 Curva (1): Tensão reversível
 Curva (2): Tensão termoneutra

2.13.3 - SOBRETENSÕES

A diferença entre as voltagens real e teórica nas células, deve-se as sobretensões que aparecem quando há fluxo de corrente através da célula. Para a célula de eletrólise, a sobretensão total pode ser escrita como:

$$\eta_{\text{total}} = E - E_{\text{rev}} \quad (2.6)$$

onde E_{rev} : voltagem teórica requerida

E : voltagem real de operação da célula

A voltagem real de operação da célula é a soma da sobretensão anódica (η_a), sobretensão catódica (η_c) e da resistência:

$$E = E_{\text{rev}} + \eta_a + \eta_c + IR_o \quad (2.7)$$

Cada uma destas contribuições poderá ser maior ou menor dependendo do tipo de sistema eletroquímico que está sendo considerado. (GOLDFARB, 1988)

2.1.3.4 - RENDIMENTO TÉRMICO

O rendimento térmico é dado pela seguinte equação:

$$R_t = \frac{|\Delta H|}{z.F.E} \quad (2.8)$$

$$E = E_{rev} + (\eta_c + \eta_a + R_o I) \quad (2.9)$$

onde E : tensão real, isto é, tensão de operação
medida nos terminais da célula

E_{rev} : tensão reversível

η_c : sobretensão catódica

η_a : sobretensão anódica

I : corrente da célula

R_o : resistência da célula

Qualquer aumento de rendimento depende de diminuir η_c , η_a , e R_o .

A sobretensão anódica e catódica dependem do uso de materiais apropriados e de superfícies que possam inclusive incluir efeitos catalíticos. Dependem também de pH e da corrente elétrica. Diminuir a corrente elétrica implica em comprometer a produção, que é proporcional à corrente. Alterar o pH é possível,

mas implica em introduzir novos conceitos de operação e construção da célula.

A resistência da célula depende da distância anodo-catodo e da condutividade da solução. (TERMOQUIP)

2.13.5 - EFEITO DA TEMPERATURA

Com a elevação da temperatura, a tensão cai quando se mantém fixa a corrente elétrica. No entanto, por fatores inerentes a aceleração da corrosão, a temperatura normal de operação adotada é 70 a 90°C. Cita-se também que o diafragma de amianto, quando empregado, é mais atacado pelo eletrólito em temperaturas superiores 80°C. Além disso a operação em temperaturas acima de 100°C necessita de pressurização das células. (TERMOQUIP)

2.13.6 - EFEITO DA PRESSÃO

O aumento da pressão tem um efeito termodinâmico que pode ser calculado pela expressão abaixo:

$$E_p = E_o + 0,0444 \log P \quad (25^\circ\text{C e } 1 \text{ atm}) \quad (2.10)$$

onde,

E_p : Tensão de decomposição como função da pressão

E_o : Tensão de decomposição nas condições ambiente
(25°C e 1 atm)

P : Pressão de operação do eletrolisador

No entanto, em condições reais de operação, o efeito da pressão é diminuir o tamanho das bolhas que se elevam imersas no eletrólito, diminuindo o volume vazio formado pelas bolhas e proporcionando maior área de eletrólito para circulação da corrente elétrica, isto é, promovendo uma diminuição em R_o , que pode compensar o efeito negativo da pressão, previsto pela termodinâmica ou até torná-lo positivo, ocasionando ligeiro aumento na eficiência térmica. (TERMOQUIP)

2.1.3.7 - RESISTÊNCIA DA CÉLULA

As resistências ôhmicas em uma célula de eletrólise estão distribuídas na fase líquida e no circuito coletor da corrente. Dessa forma, a resistência R_o depende de uma série de

parâmetros como: condutividade elétrica do eletrólito, bolhas de gás desprendidas pela eletrólise, distância entre os eletrodos, diafragma e contato entre os elementos constituintes da célula.

Condutividade elétrica do eletrólito: Por motivos de reduzir os problemas de corrosão na célula, normalmente se faz opção por uma base em vez de um ácido para aumentar a condutividade elétrica da água.

Bolhas de gás: As bolhas de gás são responsáveis por uma boa parte da resistência interna da célula, pois diminuem a área de eletrólito disponível para a passagem da corrente elétrica. Além disso, algumas bolhas podem também ficar ocluídas no diafragma, criando dessa forma resistência adicional.

Distância entre os eletrodos: Uma vez que a resistência é diretamente proporcional ao comprimento de solução (distância entre eletrodos), este parâmetro deve ser o menor possível, ficando apenas limitado por problemas construtivos.

Diafragma: Embora haja atualmente certos estudos com materiais para diafragma à base de fibras de titanato de potássio ligado com teflon, usa-se ainda em todos os eletrolisadores comerciais diafragmas de amianto de espessura entre 2 a 4 mm. Os

diafragmas de amianto quando operam continuamente submetidos a temperaturas superiores a 90°C, sofrem perda de peso, indicando ataque químico e têm suas propriedades mecânicas prejudicadas.

Resistência de contato: As ligações cobre-cobre devem ser bem limpas e desoxidadas, para evitar a introdução de resistência adicional e as superfícies planas de contato devem ser bem acomodadas, para evitar maus contatos e aquecimento localizado. (TERMOQUIP)

2.13.8 - ENERGIA REQUERIDA NA ELETRÓLISE

O processo global de produção de hidrogênio pela eletrólise da água é o inverso do processo de combustão do hidrogênio. Portanto, a quantidade de energia teórica necessária para produzir uma certa quantidade de hidrogênio, equivale ao calor desprendido quando se queima esta mesma quantidade do gás. Cada molécula de hidrogênio é formada pela adição de dois elétrons a dois íons hidrogênio em solução, de forma que existe uma relação

direta entre a corrente (velocidade de fluxo de elétrons) e a velocidade de produção de hidrogênio (Lei de Faraday). Os desvios da Lei de Faraday são caracterizados pela eficiência de corrente elétrica da célula. (CASPER, 1978)

A eficiência de corrente em muitas células é próximo a 100%. Uma baixa eficiência de corrente é o resultado de reações paralelas nos eletrodos durante a eletrólise. Mas teoricamente, nenhuma outra reação poderá acontecer, a não ser a recombinação de hidrogênio e oxigênio em solução. Numa célula perfeitamente eficiente 94 kwh de energia elétrica são consumidos para cada 26,5 m³ de hidrogênio produzido. Destes 94 kwh, somente 79 são fornecidos como energia elétrica; o restante é fornecido como calor. A energia elétrica entra na célula na forma de potência (produto da tensão pela corrente), e cada processo eletrolítico tem uma voltagem teórica correspondente a energia necessária para a reação proceder.

Na eletrólise, somente a energia livre de reação, ΔG , pode ser transformada em energia elétrica a uma temperatura e pressão constante. A quantidade de carga elétrica correspondente a quantidade molar indicada no balanço químico da equação de produção de H₂ a partir da água pela eletrólise é $z.F$, onde z é o número de elétrons transferidos por molécula e F é a constante de Faraday. Se esta quantidade de carga elétrica é transportada através de uma diferença de potencial de E volts, a quantidade de

trabalho necessário é dado por z.F.E. Como esta variação de energia elétrica não envolve trabalho pressão-volume e é levado isotermicamente, então a mudança na energia livre de Gibbs do sistema é dada pela equação (2.1) aplicada a um sistema que encontra-se em um estado diferente do padrão:

$$\Delta G = - z.F.E \quad (2.1)$$

onde E é a diferença de potencial, ou voltagem, que por convenção é tida como positiva. Como ΔG é negativo para uma dada reação espontânea na célula e E é tido como positivo para uma descarga espontânea da célula, isto resulta um sinal negativo na equação (2.1).

Para uma célula de eletrólise da água, pode-se calcular que a voltagem correspondente a mudança de entalpia, ou calor de combustão do hidrogênio é 1,47 volts a 25°C, enquanto a voltagem correspondente a mudança da energia livre é somente 1,23 volts.

No caso ideal, 1,47 volts aplicados para a eletrólise da água, por célula, a 25°C deveria gerar hidrogênio e oxigênio isotermicamente, isto com uma eficiência térmica de 100% onde o calor produzido não seria desperdiçado. Entretanto, uma

voltagem tão baixa como 1,23 volts deveria, assim mesmo, gerar hidrogênio e oxigênio, mas a célula deveria absorver calor de suas vizinhanças.

A energia elétrica requerida para o processo é somente 83,7% da energia de combustão do hidrogênio; os outros 16,3% é fornecido como calor. Outra maneira de expressar este fato é dizer que a quantidade de energia desprendida na combustão do H_2 produzido é 120% do valor da energia elétrica que é absorvida nesta forma.

Nas células práticas, existe usualmente uma perda de eficiência que é maior do que a diferença entre a voltagem correspondente a energia livre e a voltagem correspondente a entalpia.

As células, na prática, operam a voltagens maiores do que 1,47 volts e liberam calor por causa da perda de eficiência que ocorre nas células. O calor requerido para suprir a entropia de reação é então absorvido da soma destes calores desperdiçados, e a célula, na prática, não absorve calor de suas vizinhanças. Se uma célula de performance perfeita operasse a uma voltagem abaixo de 1,47 volts, ela deveria atuar como um refrigerador, absorvendo calor das vizinhanças para compensar a deficiência de energia na entrada. É pouco provável o desenvolvimento de células de eletrolisadores que operem muito próximo ao ideal por que eles, na verdade, atuariam como refrigeradores.

Entretanto, existe a possibilidade de se obter células operando a 1,47 volts, que representaria uma conversão de 100% de energia elétrica em energia de combustão do hidrogênio. Se uma célula com tal performance pode ser encontrada, então uma eficiência de 100% pode ser demonstrada e isto, ainda assim, representaria uma eficiência eletroquímica de 83%.

A voltagem correspondente a energia livre, E_{rev} , ou voltagem reversível como ela é chamada, varia com a temperatura como mostra a Figura 2.3. Como pode ser visto, aumentando-se a temperatura, a voltagem de decomposição da água diminui. Este fator operacional é favorável as células de eletrólise por que a temperaturas maiores o processo no eletrodo ocorre mais rapidamente, com menos perda, e desta forma, a energia necessária na alimentação é menor. Isto é o contrário no caso da célula combustível: a energia na saída (fornecida pela célula) diminui quando a temperatura aumenta. A voltagem correspondente a mudança de entalpia, ou "voltagem termoneutra", varia somente ligeiramente com a temperatura, indo de 1,47 volts a 25°C para 1,5 volts a 340°C. Isto também pode ser visto na Figura 2.3. Três regiões podem ser identificadas nesta figura: região A na qual o hidrogênio não evolui; região B na qual o hidrogênio é produzido com uma eficiência aparente maior que 100%; região C na qual o hidrogênio é produzido com uma eficiência menor que 100% e há liberação de calor (CASPER, 1978).

2.14 - COMPONENTES BÁSICOS DE UMA CÉLULA ELETROLÍTICA

Uma célula eletrolítica é composta basicamente de eletrólito, eletrodos, reservatório e separador.

2.1.4.1 - ELETRÓLITO

Este 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 a célula (somente a água deve decompor-se); não pode ser volátil a ponto de ser removido facilmente junto com os gases de saída; como as concentrações do íon hidrogênio mudam continuamente e rapidamente na superfície dos eletrodos, o eletrólito deve apresentar uma alta resistência a mudanças instantâneas de pH, isto é, deve ser uma

solução tampão ("buffer").

Nas aplicações práticas, estes critérios são conseguidos com o uso de um ácido forte, como o ácido sulfúrico, ou de uma base forte, como 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 isto não são usualmente selecionado para serem utilizados nos eletrolisadores. Assim, a maioria dos eletrolisadores comerciais operam com um 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 exceção 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 a 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. (GOLDFARB, 1988)

2.14.2 - ELETRODOS

Os eletrodos devem ter as seguintes características: devem ser condutores elétricos; devem ter uma superfície catalítica adequada para a 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 outra. Grandes áreas de contacto com o eletrólito são obtidas pelo uso de diversas estruturas sintetizadas, como juntas finas, telas, pratos perfurados e planos com superfície eletroquímica rugosa e mais recentemente, eletrodos volumétricos tipo esponjas.

Em células alcalinas, o níquel é mais comumente utilizado como catalisador de superfície. Visto que, eletrodos de níquel puro é muito 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 níquel, mas o custo extra do metal precioso não justifica sua aplicação.

No caso do eletrólito ácido polimérico, os eletrodos devem ser feitos com materiais quimicamente mais resistentes do que o aço ou mesmo o níquel. Tântalo e ouro têm sido usados, mas outros metais preciosos puros, como platina, ródio, irídio, etc, são usualmente necessários como catalisadores na superfície. Quando platina é usada, uma grande superfície específica pode ser conseguida pelo uso de um negro de platina, formado de partículas de platina metálica finamente dividida, a qual é suportada no metal do eletrodo. (GOLDFARB, 1988)

2.1.4.3 - RESERVATÓRIO

É utilizado 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 interpostos 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, 1988)

2.1.4.4 - SEPARADOR

O separador é colocado entre os dois eletrodos, serve para os seguintes propósitos: evita que dois eletrodos toquem um com o outro evitando curto-circuito e impede a mistura dos gases oxigênio e hidrogênio 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 o outro. Estes poros devem permanecer cheios de líquido, 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 a 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 misturas dos gases. No caso de células alcalinas, asbestos têm sido comumente usadas como material separador. Tranças de tecidos de asbestos e emaranhados de fibras de asbestos são bastantes 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 o próprio separador, não sendo necessário portanto, um material adicional. Existe 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, 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. (GOLDFARB, 1988)

2.2 - A SOLDAGEM

2.2.1 - DEFINIÇÃO

A soldagem é a técnica de reunir duas ou mais partes constitutivas de um todo, assegurando entre elas a continuidade do material e em consequência suas características mecânicas e

químicas. Outras operações com o mesmo fim não asseguram essa continuidade geométrica - caso da rebiteagem, parafusagem ou química - caso da colagem.

Essa técnica ou conjunto de técnicas aplica-se a diversos materiais de construção: o vidro, os plásticos, etc. Nossa atenção se focalizara especificamente nos metais e suas ligas. Nesse sentido, a soldagem se classifica entre os métodos de conformação dos metais, complementando a série de processos de conformação metalúrgicos (fundição, laminação, forjamento, extrusão, trefilação, sinterização de pó) e mecânicos (usinagem). (WAINER, 1980)

2.2.2 - HISTÓRICO

As mais antigas notícias que se tem sobre a soldagem remontam a soldagem por forjamento da "espada de Damasco" (1330 A.C.) e ao uso de uma espécie de maçarico soprado pela boca - usando álcool ou óleo como combustível, que os egípcios usavam para fundir e soldar bronze, técnica legada a gregos e romanos.

A arqueologia tem revelado obras metálicas soldadas, de difícil explicação operacional, tendo em vista as poucas

disponibilidades técnicas daquele tempo; é o caso dos pilares de ferro de 20m de altura e 40cm de diâmetro descobertos na cidade de Nova Delhi, Índia, com trabalho em soldagem por forjamento, contemporâneo de Cristo.

A fase propriamente histórica da soldagem começa no século XIX; algumas datas ligadas a essa história:

1801 - Sir Humphrey Davis cria um arco elétrico entre os terminais de um circuito.

1836 - Davy descobre o acetileno, que em 1832 Wohler ligaria ao carbureto de cálcio como meio de obtenção.

1837 - Richemont estuda a chama aero-hídrica (ar + hidrogénio).

1847 - Hare funde um kg de platina com um maçarico oxi-hidrogénico (oxigénio + hidrogénio).

1850 - St. Claire - Deville estuda a chama oxi-hidrogénica.

1856 - Joule acidentalmente realiza uma solda a resistência em fios de aço.

1877 - Thomeon sistematiza e estuda a soldagem por resistência elétrica com auxílio de pressão mecânica. É considerado o pai da soldagem por resistência (primeira patente em março de 1886, seguida de 150 outros). O campo de utilização era especificamente de fios metálicos.

1880 - Moissan estuda o arco elétrico para fornos;
em 1892 fabrica o carbureto de cálcio no forno elétrico.

1885 - Bernardos desenvolve o uso de eletrodos de
carvão para fusão localizada do aço.

1887 - Fletcher realiza os primeiros ensaios de
perfuração de aço sob jato de oxigênio.

1891 - Slavianoff realiza a primeira soldagem de
chapas de aço com eletrodo metálico nú.

1895 - Le Chatelier estuda a chama oxi-acetilênica
e prevê suas aplicações industriais.

1898 - Linde realiza produção industrial de oxigênio
e nitrogênio a partir da expansão adiabática do ar comprimido.

1901 - Fouche e Picard fazem o primeiro maçarico
oxi-acetilênico industrial.

1902 - a firma Musener patenteia a chama de
aquecimento e jato de oxigênio combinados.

1902 - Claude faz o aperfeiçoamento da unidade de
produção de oxigênio e nitrogênio.

1904 - Picard projeta um maçarico de oxicorte.

1907 - Kjellberg aplica um revestimento ao eletrodo
de soldagem a arco.

O restante pertence já a história recente de
soldagem: Em 1924 Langmuir propõe a soldagem com hidrogênio

atômico; em 1935 surge a solda TIG; em 1936 a soldagem sob fluxo; em 1938 a soldagem de materiais plásticos. Nestes últimos vinte anos surge solda a plasma, a laser, a feixe eletrônico, a eletro-escoria, por fricção.

Pelos nomes e pelas datas, percebe-se que as técnicas de soldagem seguem muito de perto a vanguarda da ciência: um avanço na ciência física, na eletrônica, na química, pode ter rapidamente sua repercussão na tecnologia da soldagem (o plasma, o "laser" - Light Amplification through Stimulated Emission of Radiation e o ultra-som são exemplos frisantes). Um novo metal, uma nova liga na metalurgia obriga também a avanços consideráveis na técnica de como soldá-los; recentemente: titânio e ligas, aços baixa liga de alta resistência mecânica, aços ao Níquel para temperaturas criogênicas. Na década atual está se consolidando a solda oxi-hidrogênica objeto dessa pesquisa. (WAINER, 1960)

2.2.3 - CORTE POR PLASMA DE AR

O corte plasma de metais baseia-se na ação térmica e mecânica de um jato de gás esquentado por um arco elétrico de corrente contínua estabelecido entre um eletrodo ubicado no bico e a peça a se cortar.

O jato de gás acelerado ao passar por um bocal de diâmetro reduzido atinge temperaturas de 15.000°C até 20.000°C, provocando a ionização do ar (plasma) e conseguindo assim uma alta concentração (até 100 A/mm²).

O jato de plasma lançado contra o metal tem penetração sobre a totalidade da espessura a cortar, provocando a fusão e expulsão do material.

O corte obtido tem alta velocidade e sangradura pequena, com a mínima região afetada pelo calor e paredes verticais (nos cortes de alta velocidade as paredes podem ter uma pequena inclinação para a base do corte). O início do corte é praticamente instantâneo e produz uma deformação mínima na peça.

A escolha do gás de corte fica em função do material a se cortar. Preferem-se sempre os gases de alta entalpia (hidrogênio, nitrogênio, ar). No caso do alumínio e aços inoxidáveis, em cortes de qualidade, usam-se misturas de Argón-hidrogênio e nitrogênio, exceto em pequenas espessuras (até 10 mm aproximadamente). Para o corte de ferro, aços ou carbono e ligações utiliza-se ar como gás de corte. Acrescenta-se a ação do aquecimento do plasma, a combustão do oxigênio (21% no ar) com o carbono do aço, como fonte adicional de energia, isso é o que possibilita velocidades maiores que com os gases inertes. Respeito a um método alternativo como o "oxi-corte" o plasma de ar apresenta notáveis vantagens até aproximadamente 25mm de espessura

na velocidade do corte, qualidade, custo e a quase total ausência de deformação. Por sobre 40mm o oxi-corte aparece como a melhor solução técnica com os equipamentos disponíveis no país. (TBA, 1993)

2.2.4 - SOLDA MICROPLASMA

Dá-se o nome de plasma a qualquer gás suficientemente ionizado, por meio de energia térmica ou elétrica. No processo de soldadura por plasma, um fluxo de gás se aquece por meio de um arco elétrico, até uma temperatura suficiente como para que os choques entre átomos e moléculas provoquem um certo grau de ionização e dissociação de gás. Este gás é forçado em seguida a fluir através de um conduto refrigerado de pequeno diâmetro. A concentração do arco modifica seu campo de temperatura confinando sua zona mais quente perto de eixo, obtendo-se ao mesmo tempo um alto grau de ionização. O centro do plasma alcança temperatura muito alta (10.000°C a 20.000°C). As paredes do conduto por onde flui o gás esfriam a parte exterior do jorro de gás ionizado, o que o confina e o estabiliza em uma corrente muito baixa.

Para soldar espessuras entre 0,05mm e 1mm se requer usar correntes entre 0,1A e 15A. Nestes valores de corrente a tensão em um arco livre (não confinado) cresce a valores tais

que o arco se torne instável independentemente das características da fonte de alimentação. No arco confinado da soldadura por plasma a tensão cresce lentamente ao baixar a corrente, possibilitando, com um desenho adequado da fonte de alimentação, perfeita estabilidade do arco em 0,1A.

O arco se estabelece entre um eletrodo não consumível de tungstênio e a peça a soldar (arco transferido). A iniciação deste arco se consegue com facilidade pela presença em forma permanente de um arco estabelecido entre o eletrodo e o arco piloto, que por sua vez se ascende mediante uma descarga de radiofrequência entre ambas as partes.

O processo de soldadura com plasma requer um segundo gás de proteção, em geral de argônio e hidrogênio, que cumpre uma dupla função: protege a zona fundida do metal contra a oxidação e focaliza o arco transferido. O gás de proteção esfria a capa exterior do jorro de plasma melhorando sua estabilidade fora do conduto confinado e afinando mais a zona de alta temperatura, o que resulta em uma deformação mínima da peça a soldar. (TBA, 1993)

2.2.5 - CORTE E SOLDA COM O LASER A CO_2

O laser a CO_2 é um laser de vidro, cujo meio ativo é

gás CO_2 . O comprimento de onda de sua radiação é de 10,6 micron, situado portanto na faixa infravermelha larga, invisível. Não possibilita o emprego de ópticas normais de vidro, pois o vidro absorve este comprimento de onda e seria destruído.

O corte com o laser a CO_2 já é usado na indústria, produz fenda de corte estreita, de menos de 0,3mm de largura, boa qualidade das bordas de corte, minimizando a zona de influência térmica, pouca deformação e o domínio de figuras de corte complexas.

Ao lado do processo já estabelecido do corte ao laser, a solda com o laser a CO_2 se encontra atualmente na fase de introdução na produção industrial em série. As chapas finas soldadas ao laser podem ser dobradas e deformadas plasticamente sem prejudicar a qualidade e solidez da costura de solda e sem que se constatem rachaduras na zona de influência térmica. (SIMPÓSIO TECNOLÓGICO BRASIL-AUSTRIA, 1992)

2.2.6 - IMPORTÂNCIA DA SOLDAGEM

Está hoje intimamente ligada às mais importantes atividades industriais: construção naval, ferroviária, automobilística, caldeiraria; construção civil metálica;

metalurgia; mecânica e elétrica.

É rara a indústria e talvez nem exista - que prescindia da soldagem como processo de produção ou de manutenção.

Em país de alto nível industrial, os Estados Unidos, a indústria de soldagem representa uma atividade da ordem de 1,5 bilhões de dólares/ano entre gases, produtos de consumo e equipamentos vendidos.

No Brasil, sem termos estatísticos mais precisos já alguns valores são expressivos; por exemplo: consome-se cerca de 20.000 toneladas de eletrodos revestidos para soldagem elétrica - 6 kg de eletrodo/ton de lingote de aço em 1966. (WAINER, 1980)

2.3 - ESTUDO DA CHAMA

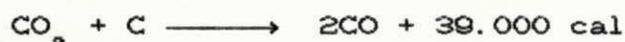
2.3.1 - COMBUSTÍVEIS E COMBURENTE

Combustíveis são os materiais que reagem facilmente com o oxigênio (comburente) do ar, produzindo grande quantidade de calor. Devem preencher requisitos técnico-econômicos como

segurança no armazenamento, transporte e utilização, além de baixo preço de obtenção.

O ar atmosférico é constituído de oxigênio, nitrogênio, vapor d'água e quantidades menos importantes de gases raros, CO₂ e impurezas. Para cálculos técnicos de combustão, considera-se 20% de O₂ e 80% de N₂, 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.

(WAINER, 1980)

2.3.2 - A CHAMA OXI-COMBUSTÍVEL

A chama oxicom bustível pode se apresentar de três formatos (Figura 2.4.a):

Chama Neutra - quando a proporção oxigênio/gás for correta, isto é, a relação oxigênio/gás for igual a um.

Chama Oxidante - quando houver excesso de oxigênio, ou seja, a relação oxigênio/gás for maior que um.

Chama Carburante - quando houver deficiência de oxigênio, ou seja, a relação oxigênio/gás for menor que um.

Uma chama oxicom bustível possui três regiões distintas, conforme a Figura (2.4.b):

- Cone interno de iluminação intensa;
- Zona interna ou de redução em que todo o oxigênio advém do maçarico e é avidamente queimado pelo gás;
- zona externa em que parte do gás se queima em contato com o oxigênio do ar. (WAINER, 1980)

FIGURA 2.4.a - TIPOS DE CHAMA OXI-COMBUSTÍVEL

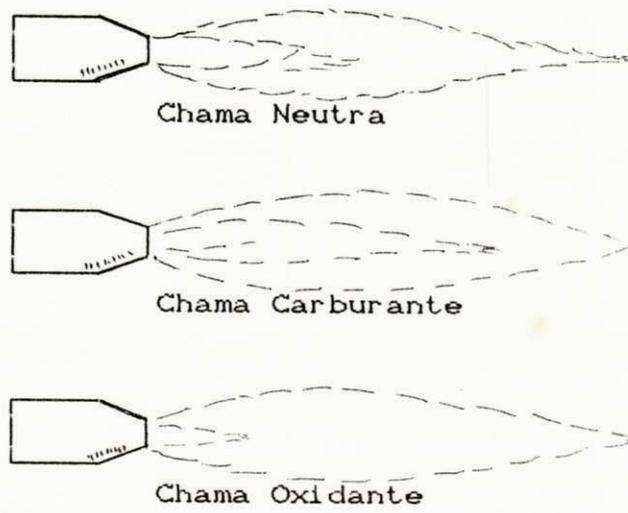
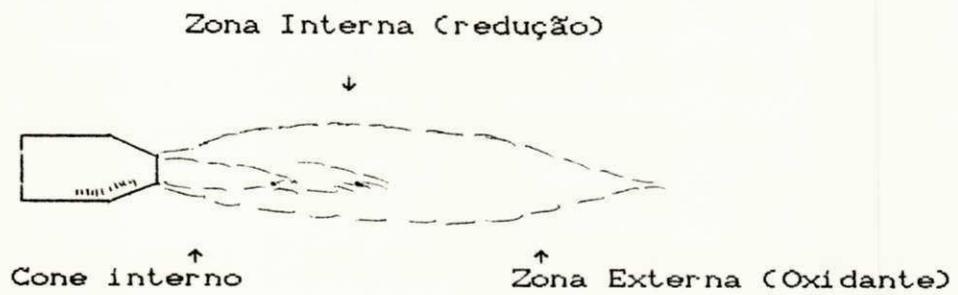


FIGURA 2.4.b - PRINCIPAIS REGIÕES DA CHAMA-COMBUSTÍVEL



2.3.3 - 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, portanto, da temperatura teórica máxima alcançada pelos produtos de combustão em condições adiabáticas.

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 CO_2 e H_2O que ocorrem a partir de 1200°C , da presença de nitrogênio (N_2) no gás combustível, do excesso de oxigênio (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. (CARDOSO, 1982)

As Tabelas 2.1 e 2.2 mostram a temperatura de chama de alguns gases e a temperatura média das chamas com diferentes combinações de gases respectivamente.

TABELA 2.1 - TEMPERATURA DE CHAMA DE ALGUNS GASES

TIPO	Com AR (°C)	Com Oxigênio (°C)
Gás Natural	1.920	2.700
Gás Nafta	1.980	2.700
Gás de Carvão	1.950	2.660
GLP	1.930	2.720

CARDOSO, 1982

TABELA 2.2 - TEMPERATURA MÉDIA DAS CHAMAS COM
DIFERENTES COMBINAÇÕES DE GASES.

Gases	Temperatura (°C)
Oxigênio - Acetileno	3200
Oxigênio - Propano	2500
Oxigênio - Hidrogênio	2370
Oxigênio - Gás Carbônico	2200
Ar - Acetileno	2460
Ar - Gás Carbônico	1870
Ar - Propano	1750

UPT Brasileira de Solda Ltda., 1982

2.4 - FENOMENOS DA COMBUSTÃO

O fenômeno da combustão provém da interação de processos químicos e físicos e a aplicação prática de tais fenômenos envolvem não apenas física e química mas também ciências aplicadas de aerodinâmica, tecnologia de combustível e engenharia mecânica. (BRADLEY, 1969)

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 envolvem processos de cadeias de algum tipo.

Devido a 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. (BRADLEY, 1969)

2.4.2 - A QUEIMA DOS 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. (CARDOSO, 1982)

2.5 - SEGURANÇA PARA O HIDROGÊNIO

2.5.1 - INTRODUÇÃO

Este capítulo se refere a muitos aspectos da produção e manuseio de hidrogênio considerando os equipamentos e o pessoal. O que apresenta-se aqui acredita-se ser os padrões mínimos de segurança requeridos.

Fundamentalmente, a segurança preventiva com hidrogênio é eficiente se houver prevenção de vazamentos, ventilação adequada e eliminação de fontes de ignição.

Porém, no caso de ocorrência de acidentes deve-se procurar através do "lay-out" das instalações, proteger o pessoal e parte dos equipamentos localizando os equipamentos que contém volumes de hidrogênio em áreas mais afastadas e evitando a circulação de pessoal não habilitado nas áreas de produção.

(TERMOQUIP)

2.5.2 - EFEITOS FISIOLÓGICOS DO HIDROGÊNIO

O hidrogênio não é tóxico, porém pode agir como asfixiante diluindo o oxigênio no ar. A inalação de ar com grandes quantidades de hidrogênio pode ocorrer sem que se note qualquer sintoma como tonturas.

Pequenas concentrações, insuficientes para provocar a inconsciência podem ser inflamáveis, portanto, todas as precauções que se tomam com qualquer gás inflamável devem ser também tomadas com o hidrogênio.

O hidrogênio líquido e o gás frio proveniente do líquido pode produzir queimaduras semelhantes às com temperatura alta, na pele, outros tecidos e olhos. O contato entre a parte externa de paredes, sem isolamento, contendo internamente hidrogênio líquido, e a pele, faz com que a carne cole na parede e

rasgue quando se tenta soltar sem cuidado. (TERMOQUIP)

2.5.3 - CUIDADOS ADICIONAIS COM A SEGURANÇA

2.5.3.1 - ELIMINAÇÃO DE FONTES DE IGNIÇÃO

Mesmo quando se adota os maiores cuidados na prevenção de vazamentos, estes podem ocorrer, e necessitamos, então, obedecer a um procedimento geral de eliminação de fontes de ignição em área perigosa, sujeita a grandes vazamentos ou acumulação de hidrogênio.

As fontes potenciais de ignição são faíscas de fricção, impacto, elétricas e objetos quentes, chamas e cigarros.

As faíscas de fricção são causadas quando objetos duros batem entre si, como metal contra metal, metal contra pedra, pedra contra pedra.

As faíscas de impacto são devido à transformação de energia mecânica em elétrica por efeito pizoelétrico.

As faíscas elétricas são causadas por descarga elétrica repentina entre dois objetos, tendo potenciais elétricos diferentes, por exemplo, descarga de eletricidade estática e

abertura ou fechamento de circuitos elétricos.

A eletricidade estática é obtida quando se penteia ou alisa cabelos ou pelos, quando se anda sobre chão seco vestindo tecidos de nylon ou outros tecidos sintéticos.

A eliminação de fontes de ignição devido a equipamentos elétricos e enrolamentos é feita usando-se equipamentos à prova de explosão, ou isolando o equipamento e mantendo seu ambiente em pressão positiva.

Todos os equipamentos elétricos que possam ser fonte de ignição devem ser proibidos na área, incluindo resistências de aquecimento, aparelhos que formam arco elétrico e equipamentos que operam em altas temperaturas.

A proteção contra raios é essencial e toda área deve estar sob a proteção de pára-raios dimensionado e escolhido de acordo com padrões e normas vigentes.

Eliminar todas as fontes de eletricidade estática é muito difícil, entretanto, pode-se tomar algumas medidas como:

- aterrar todas as partes metálicas;
- usar correias condutivas nas máquinas;
- evitar pentear os cabelos;
- quando as pessoas forem utilizar ferramentas em respiradouros ou chaminés metálicos, devem eliminar toda sua eletricidade estática;

- evitar o uso de roupas feitas de naylon ou outro material sintético, seda e lã. Roupas de algodão comum são recomendáveis;

- manter animais de pelo e outros animais fora de áreas com hidrogênio.

Ao usar ferramentas, é melhor ter a certeza de que a atmosfera não é explosiva, pois é muito difícil evitar sua queda ou mesmo batida contra partes metálicas.

Em hipótese alguma deve ser permitido acender fósforos, isqueros e fumar em áreas que contenham hidrogênio.

Objetos quentes não devem ser permitidos quando sua temperatura for superior a 400°C, nem deve-se permitir operações de solda e corte de metais em presença de hidrogênio. (TERMOQUIP)

2.5.3.2 - PROTEÇÃO DE PESSOAL

A presença de pessoas estranhas à área de operação com hidrogênio é sempre perigosa e só deve ser permitida depois de tomar certas medidas, como alertar os estranhos do perigo da área, fazer com que deixem fora da área seus fósforos, isqueiros e cigarros, sendo que se o ambiente estiver com mistura combustível a permissão não deve ser concedida. (TERMOQUIP)

CAPÍTULO 3

TRABALHO EXPERIMENTAL



3 - TRABALHO EXPERIMENTAL

3.1 - INTRODUÇÃO

Os testes desta pesquisa foram desenvolvidos no eletrolisador da FORZA - Indústria de Equipamentos Elétricos Ltda., Joinville - SC, patenteada com o nome de "Acqua Solda". A "Acqua Solda" apresenta as seguintes características técnicas:

Tensão de alimentação	: 220 v AC - 60 Hz
Potência	: 2700 W
Produção de gases	: 0 - 1000 l/h
Temperatura máxima de chama:	2800 °C
Dimensões	: 1150 x 600 x 500 mm
Peso	: 120 Kg
Pressão dos gases	: 1,8 Kgf/cm ² (interna) 1,0 Kgf/cm ² (Saída)

Foram estudados os seguintes parâmetros:

- Curvas de polarização
- Rendimento do sistema

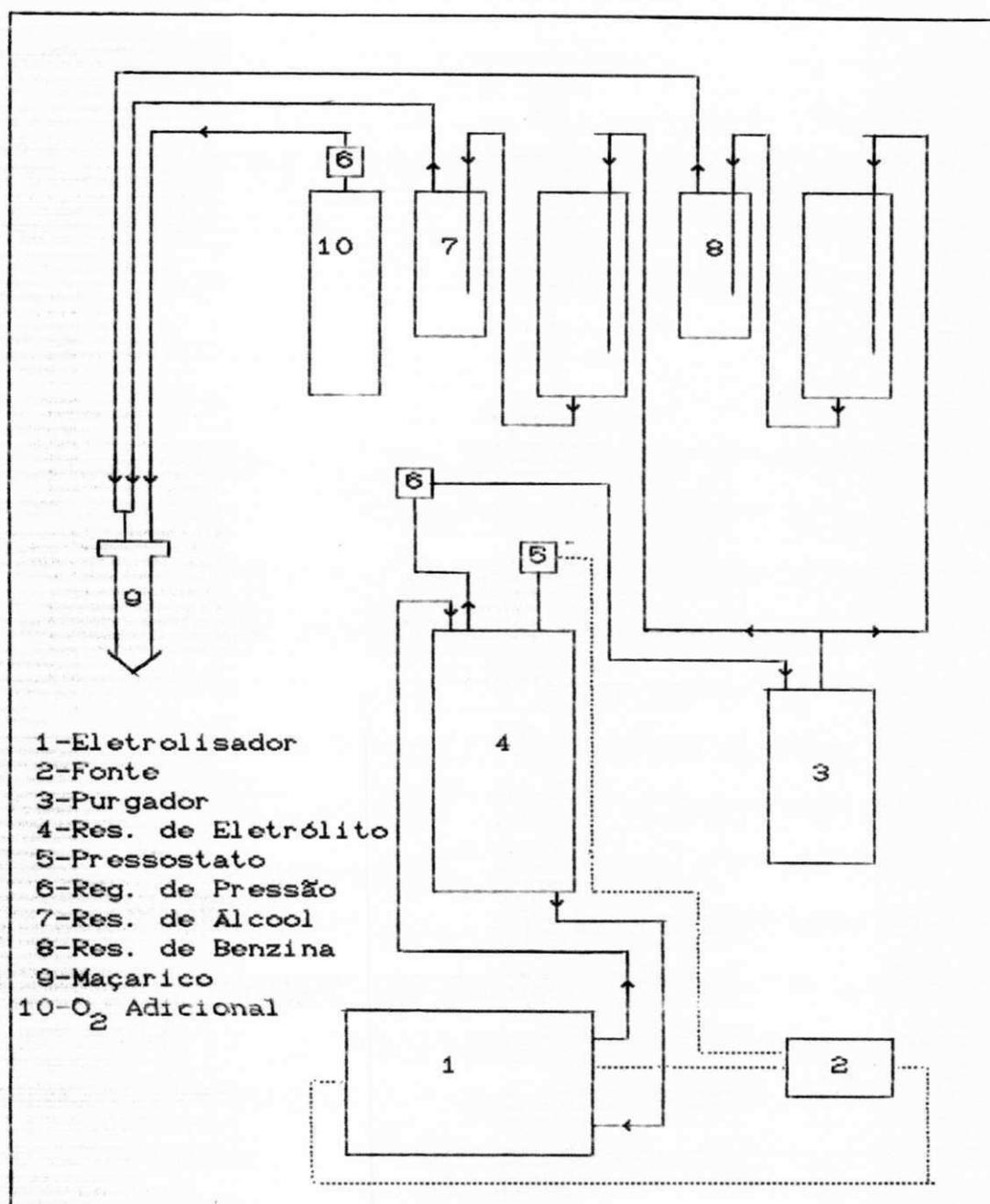
- Produção de gases em função da potência da máquina
- Aspectos da chama
- Estudo qualitativo das soldas

3.2 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA

A soldadora oxi-hidrogênica é formada basicamente por um eletrolisador bipolar, um reservatório de eletrólito, um reservatório de benzina, um reservatório de álcool, um purgador e um sistema de refrigeração para os gases gerados e eletrólito, distribuída em três planos. Na parte inferior situa-se o eletrolisador com uma inclinação de 10° em relação à horizontal. Na parte média situa-se o reservatório de eletrólito e o purgador e na parte superior os selos de álcool e benzina, conforme a Figura 3.1.

Além das unidades acima descritas, compõem ainda o sistema uma fonte de alimentação, um pressostato, um manômetro, um regulador de pressão e um maçarico. O oxigênio suplementar, armazenado em um cilindro, foi acoplado na entrada de oxigênio do maçarico e na entrada de combustível do maçarico foi acoplado os gases gerados na máquina.

FIGURA 3.1 - FLUXOGRAMA DO PROCESSO



- 1-Eletrolisador
- 2-Fonte
- 3-Purgador
- 4-Res. de Eletrólito
- 5-Pressostato
- 6-Reg. de Pressão
- 7-Res. de Álcool
- 8-Res. de Benzina
- 9-Maçarico
- 10-O₂ Adicional

3.2.1 - ELETROLISADOR

O reator eletrolítico é formado por 55 células (2 v por célula dando um total de 110 v), com uma inclinação de 10° em relação à horizontal, nos quais se fixam seis parafusos num cabeçote de 30cm de diâmetro, formando um cilindro de 26cm de comprimento e 26cm de diâmetro. No cabeçote situado na parte superior da inclinação existem duas entradas, uma inferior para receber o eletrólito e outra superior para a saída dos gases gerados e eletrólito arrastado (Figura 3.2).

As placas dos eletrodos foram fabricadas em aço 1020 niquelados com 1,0mm de espessura com 20cm de diâmetro.

As placas que formam as células são separadas entre si por um anel de plástico de 2mm de espessura e 26cm de diâmetro (Figura 3.3). O espaçamento usado entre as placas foi de 2mm. Como rendimento do sistema depende da diminuição da resistência ôhmica, que depende de um menor espaçamento, pode-se provavelmente operar com 1,0mm de distância placa a placa.

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

FIGURA 3.2 - ELETROLISADOR BIPOLAR

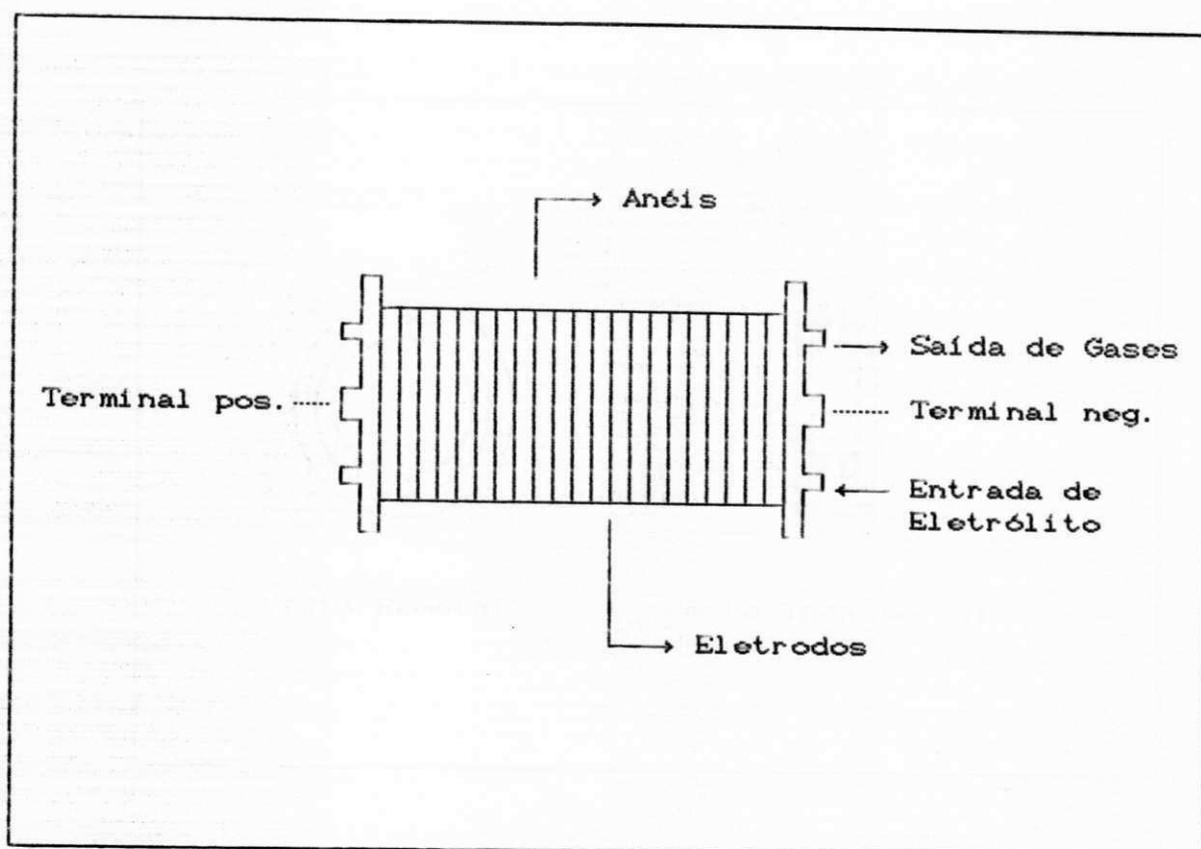
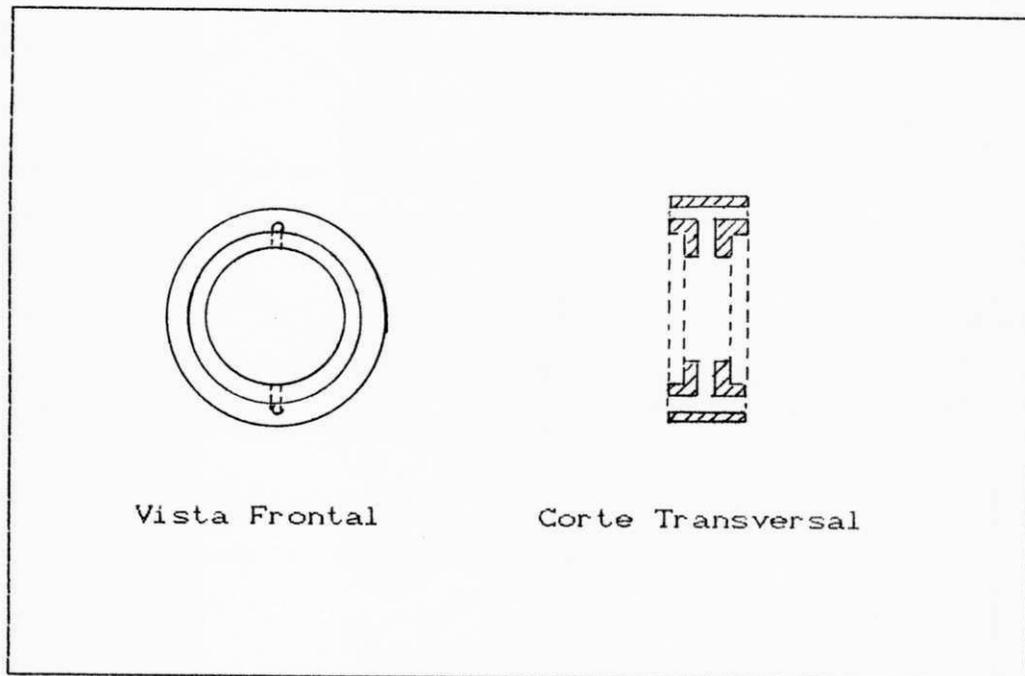


FIGURA 3.3 - ANÉIS DO ELETROLISADOR



Os gases que são gerados no eletrolisador são conduzidos para o reservatório de eletrólito, seguem para o purgador e daí para os selos de álcool e benzina. Após atravessarem os selos, a mistura gasosa é conduzida para o maçarico. No eletrolisador bipolar os eletrodos não são separados pelo tradicional tecido de amianto, desta forma os gases são misturados automaticamente.

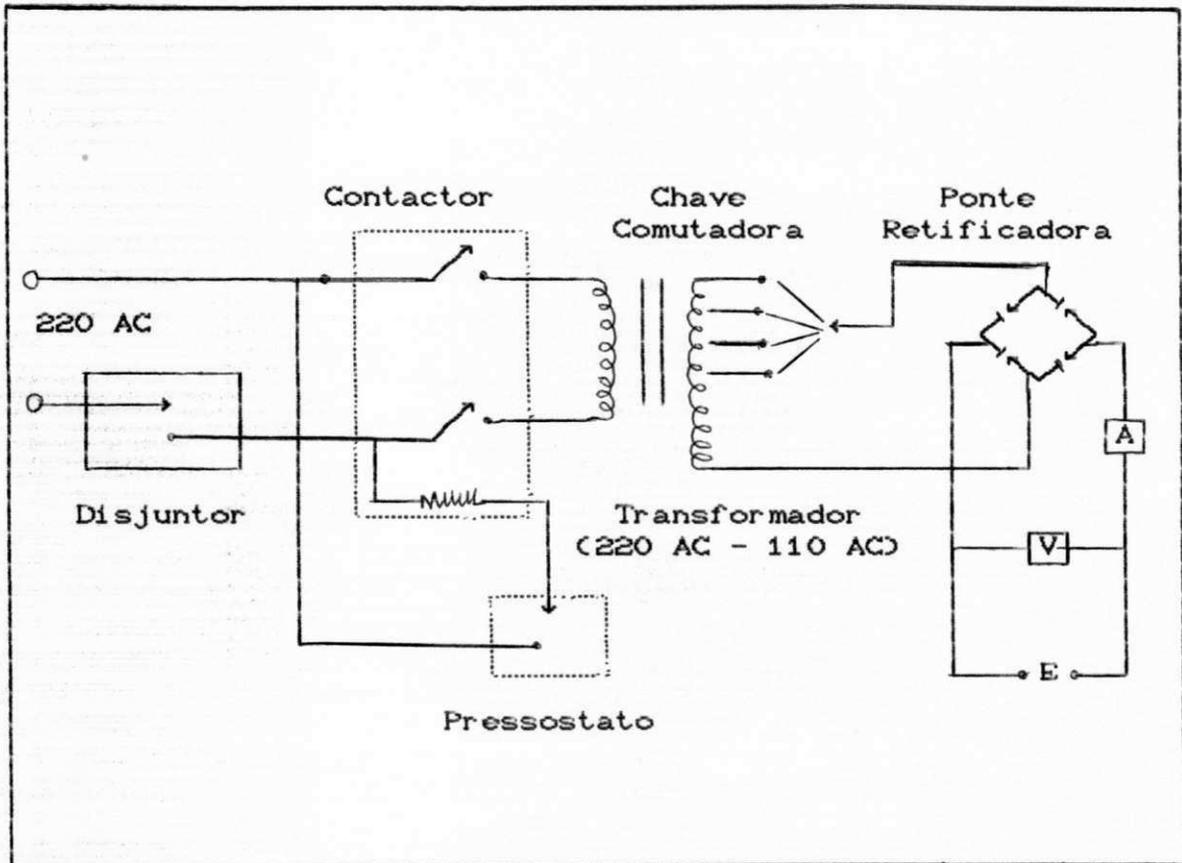
3.2.2 - FONTE DE ALIMENTAÇÃO

A fonte de alimentação corresponde ao conjunto: transformador monofásico de 220 volts AC para 110 volts AC, fabricado pela WALTEC, Blumenau-SC, retificador de corrente e disjuntor de segurança contra altas amperagens (Figura 3.4).

3.2.3 - PRESSOSTATO

Com a finalidade de controlar o processo através da pressão dos gases, utilizou-se um pressostato da marca Fligor, São Paulo- SP, para controlar a pressão do sistema entre 1,0 e 1,5 kgf/cm^2 durante a operação da máquina.

FIGURA 3.4 - FONTE DE ALIMENTAÇÃO

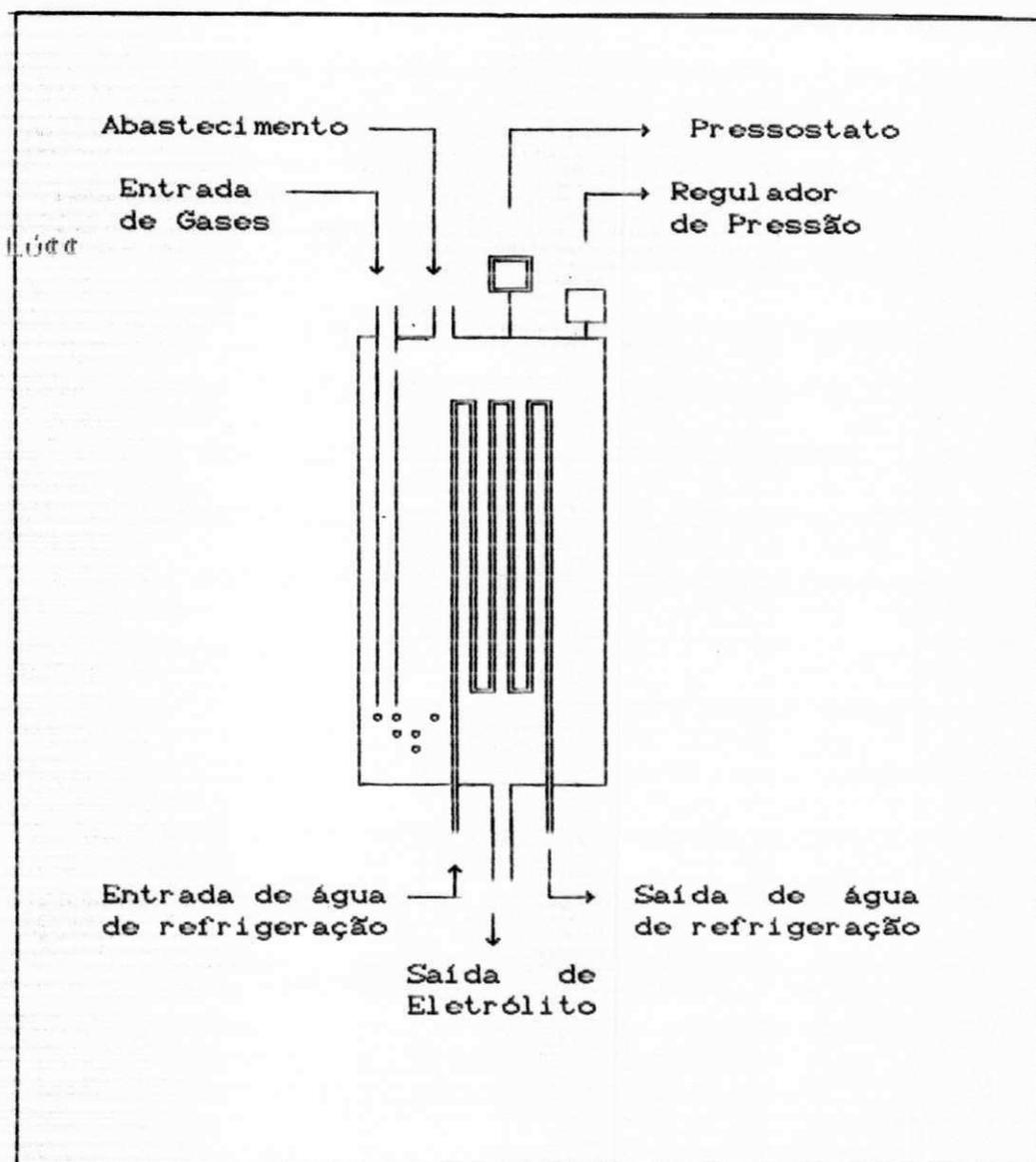


3.2.4 - RESERVATÓRIO DE ELETRÓLITO

Destinado a manter a autonomia do sistema, é constituído de um cilindro em aço com 18 cm de diâmetro e 40 cm de altura. O eletrólito que sai da parte inferior do reservatório (Figura 3.5) alimenta o eletrolisador continuamente enquanto os gases produzidos são jateados na superfície do eletrólito contido no reservatório para que haja uma pré-remoção do eletrólito arrastado pelo gás. No interior do reservatório existe uma serpentina na qual circula água, que atua como trocador de calor, baixando a temperatura da emulsão que sai do eletrolisador favorecendo a condensação do eletrólito arrastado.

A água destilada contida no reservatório garante certa autonomia de operação contínua ao sistema. A terceira abertura vista na Figura (3.5) é a de reabastecimento do reservatório, enquanto a outra, também indicada na figura, serve como dispositivo de controle de nível máximo ou purgador do reservatório.

FIGURA 3.5 - RESERVATÓRIO DE ELETRÓLITO



3.2.5 - RESERVATÓRIO DE ÁLCOOL

O reservatório de álcool tem por finalidade agregar vapores de álcool à mistura $H_2 - O_2$ elevando a temperatura da chama no maçarico a mais de $2000^{\circ}C$ ($2000 - 2400^{\circ}C$), dando condições apropriadas para o corte de metais. É constituído de um cilindro em aço com 9cm de diâmetro e 18cm de altura (Figura 3.6).

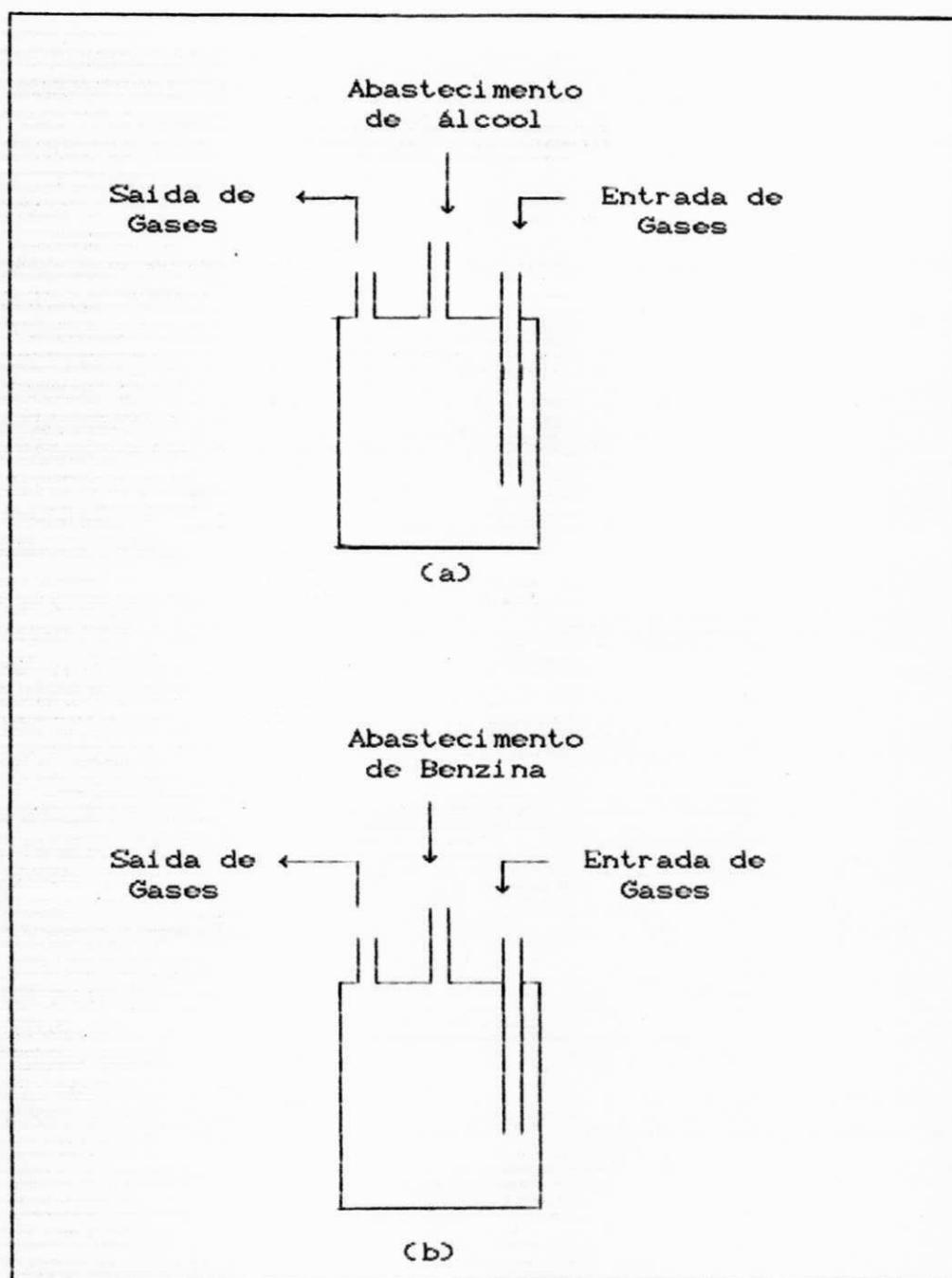
3.2.6 - RESERVATÓRIO DE BENZINA

O reservatório de benzina tem por finalidade agregar vapores de benzina à mistura gasosa, mantendo temperaturas de chama de $800 - 1200^{\circ}C$, que são apropriadas para a solda de metais, tendo as mesmas dimensões do reservatório de álcool (Figura 3.6).

3.2.7 - TROCADOR DE CALOR

O sistema de refrigeração a água, permite manter a

FIGURA 3.6 - RESERVATÓRIO DE ALCÓOL (a) e BENZINA (b)

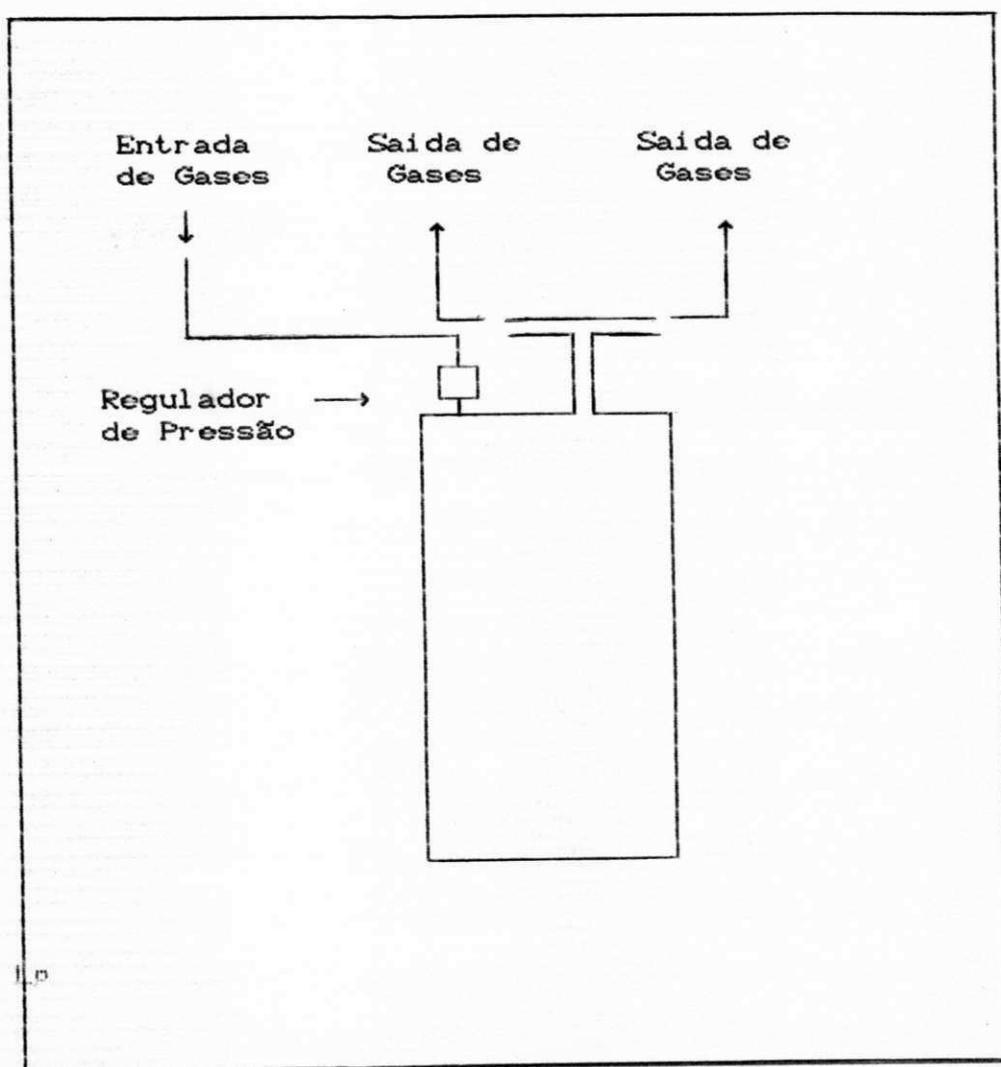


temperatura dentro do eletrolisador na faixa de 65-75°C e separar os vapores de KOH e H₂O na mistura H₂-O₂, minimizando desta forma o arraste do eletrólito para os reservatórios de álcool e benzina. O trocador de calor é do tipo serpentina, e encontra-se no interior do reservatório de eletrólito (Figura 3.5), onde a água é circulada. Tem como função baixar a temperatura da emulsão gás-eletrólito que sai do eletrolisador, facilitando a condensação do eletrólito arrastado, tendo como superfície de troca de calor o próprio eletrólito, pois desta forma o eletrólito condensado já está em ponto de realimentar o eletrolisador.

3.2.8 - PURGADOR

O purgador é um tubo cilíndrico constituído de aço, com 9cm de diâmetro e 29cm de altura, onde o gás com alguma quantidade de eletrólito entra na parte superior, e sofrendo uma expansão, o eletrólito, parte mais pesada da mistura gás-eletrólito é condensada e os gases são conduzidos para os reservatórios de álcool e benzina em sentido contrário ao gás que alimenta o purgador (Figura 3.7).

FIGURA 3.7 - PURGADOR



3.3 - OPERAÇÃO COM A MÁQUINA OXI-HIDROGÊNICA

3.3.1 - INSTALAÇÃO DA MÁQUINA

A Instalação elétrica deve estar preparada para suportar a corrente de 30 amperes.

Instalar a máquina em lugar seco, arejado e em plano horizontal.

Ligar o sistema de refrigeração, instalando as mangueiras para circulação da água, usando dois bicos para mangueiras localizados na parte inferior do tubo de abastecimento.

3.3.2 - PROCEDIMENTOS PARA PARTIDA

Verificar se todas as torneiras do painel traseiro, tampões de abastecimentos e maçaricos estão fechados.

Ligar a chave disjuntora.

Com a chave seletora, posicionar a corrente mostrada no amperímetro até no máximo 18 amperes.

Aguardar até o desligamento automático da máquina,

(a amperagem cai à zero), significa que os gases já estão na pressão de trabalho.

Manter os reguladores de pressão regulados em 0,7 - 1,0 kgf/cm² aproximadamente.

3.3.3 - ACENDIMENTO E REGULAGEM DA CHAMA

A máquina oxi-hidrogênica gera os dois gases (O₂ e H₂) misturados, portanto pode-se acender o fogo em qualquer um dos registros do maçarico.

A regulagem da chama é semelhante ao sistema oxiacetilênico convencional.

Em uma das mangueiras de saída saem os gases O₂ e H₂ mais vapor de benzina, que dá um penacho azul na chama. Na outra, saem os gases O₂ e H₂ mais vapor de álcool, que dá uma chama mais fechada e cor menos intensa.

A chama que sai do lado da benzina é mais fraca, possui menor temperatura, a que sai do lado do álcool é mais forte, possui maior temperatura. Com isto, temos todas as possibilidades de regulagem, desde a chama mais fraca, do lado da benzina, por exemplo para soldas em estanho ou chumbo, até a mais forte, do lado do álcool, por exemplo para fundir aço ou

corte por fusão.

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

O aspecto visual da solda em chapas de aço parece que fica queimada nas bordas, mas não há o que se preocupar, a solda é bem feita.

Pode-se usar diversos tipos de bicos e maçaricos, desde que, quando em uso, a máquina produza mais do que se está consumindo, isto é, em operação, a máquina oxi-hidrogénica tem que ficar ligando e desligando automaticamente.

3.3.4 - APAGAMENTO DA CHAMA

Deve-se tomar certos cuidados ao fechar as válvulas do maçarico para o apagamento da chama. Como os gases oxigénio e hidrogénio 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 abrindo bem as duas válvulas do maçarico e apagar a chama com um sopro forte sobre ela. Caso o bico não possibilite o apagamento por sopro, deve-se fechar um lado do maçarico (de preferência o lado da benzina) e fechar e abrir com movimento rápido o lado do oxigênio.

Sempre que se extinguir a chama usando as válvulas do maçarico, após o fechamento da última válvula, abri-la novamente para se certificar de que a chama está extinta.

Ao desligar a máquina, na hora do repouso, deixe as válvulas do maçarico abertas para deixar a máquina despressurizada, evitando-se possíveis acidentes.

3.3.5 - ABASTECIMENTOS

3.3.5.1 - ÁGUA

Sempre que o visor de nível indicar "mínimo", proceder o reabastecimento com água destilada. Isto deve ser feito com a máquina desligada, maçarico fechado para reter um pouco da pressão no interior da máquina.

3.3.5.2 - ÁLCOOL E BENZINA

Sempre que o visor de nível de álcool ou benzina indicar "mínimo" proceder o reabastecimento do líquido correspondente. Com a máquina ligada; fecha-se o maçarico (ambos os registros) e espera-se que a máquina desligue automaticamente. Desliga-se no disjuntor a máquina e abre-se completamente o maçarico (ambos os registros) e aguarda-se que a pressão caia a zero. Abre-se o tampão de abastecimento, álcool ou benzina e coloca-se a quantidade de álcool ou benzina faltante. (FORZA)

3.4 - MATERIAL UTILIZADO

Foram utilizados para obtenção de dados os seguintes equipamentos:

- Fonte de tensão variável na determinação da curva de polarização, Tipo VM - 230, N° 1080. Fabricado pela Soc. Técnica Paulista Ltda., com tensão de entrada de 220 volts e tensão de saída variável entre 0 e 240 volts e frequência de 60 Hz

- Amperímetro tipo HB com corrente máxima de 60 amperes, na leitura da corrente fornecida pela fonte.

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

- Rotâmetro MATEC 3/8 - 8 - 6 - 5/87, na medição da vazão dos gases.

- Microscópio eletrônico HITACHI, para análises e fotografias metalográficas das soldagens.

- Prensa para ensaio em tração - LOSENHAUSEN, na medição da resistência das soldagens.

CAPÍTULO 4
RESULTADOS E DISCUSSÕES

4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Uma vez acrescentado o oxigênio no sistema, obteve-se dados sobre o funcionamento do mesmo, para um maior domínio da máquina, comparação com seu funcionamento anterior e avaliação do sistema.

Os dados obtidos consistiram basicamente na construção das curvas de polarização para concentrações de 7, 10 e 13% do eletrólito, o que permite acompanhar o desempenho do eletrolisador; construção da curva de rendimento da máquina em função da concentração do eletrólito; construção de curvas de produção de gases em função da potência da máquina, o que determina a viabilidade operacional do sistema; efeito dos fluidos controladores de chama nas operações de corte e soldas; e características das soldagens em diferentes materiais, usando diferentes vazões de fluidos.

4.1 - CURVA DE POLARIZAÇÃO

As curvas de polarização do sistema foram obtidas variando-se a tensão em função da corrente, a uma temperatura de

70°C no eletrolisador para concentrações do eletrólito (KOH) a 7%, 10% e 13% conforme Tabelas 4.1, 4.3 e 4.5. As curvas de tensão por célula em função da corrente foram obtidas pelo quociente entre a tensão total e o número de células como mostram as Tabelas 4.2, 4.4 e 4.6.

Para a concentração de 7% do eletrólito, o hidrogênio começa a ser gerado na tensão aproximada de 80,00 volts - 1,00A, aumenta progressivamente e se torna significativo a partir de 90,00 volts - 2,90A, isto corresponde a 1,64 volts - 2,90A por célula, lembrando-se que o eletrolisador bipolar da máquina de solda tem 55 células. A tensão foi estabilizada em 106,50 volts - 32,00A, que corresponde a 1,94 volts - 32,50A por célula, e a temperatura obtida a partir do efeito Joule foi de 70°C, conforme Figuras 4.1 e 4.2.

Para a concentração de 10% do eletrólito, a geração de hidrogênio inicia-se na tensão aproximada de 80,00 volts - 1,40A, aumenta progressivamente tornando-se significativa a partir de 90,00 volts - 3,50A, correspondendo assim a 1,64 volts - 3,50A por célula. A estabilização deu-se em 104,00 volts - 32,50A, o que corresponde a 1,91 volts - 32,50A, como mostram as Figuras 4.3 e 4.4.

Na concentração de 13% do eletrólito, o hidrogênio começa a ser gerado na tensão aproximada de 70,00 volts - 1,40A, aumenta progressivamente, tornando-se significativo a partir de 90,00 volts - 3,50A, correspondendo a 1,64 volts - 3,50A por célula. A tensão foi estabilizada em 100,00 volts - 32,50A, isto corresponde a 1,81 volts - 32,50A, conforme as Figuras 4.5 e 4.6.

Observamos que à medida que a tensão aumenta, aumenta também a produção de hidrogênio, como mostram as Figuras 4.1 a 4.6.

Estes resultados correspondem aos dados da literatura em que a tensão do eletrolisador desse tipo se situa em torno de 1,47 - 2,30 volts. (CASPER, 1978)

TABELA 4.1 - DADOS EXPERIMENTAIS DE TENSÃO
EM FUNÇÃO DA CORRENTE PARA
UMA CONCENTRAÇÃO DE 7% DE KOH.

Tensão (volts)	Corrente (A)
00,00	0,00
50,00	0,50
70,00	0,75
80,00	1,00
90,00	2,90
95,00	8,90
100,00	19,00
105,00	26,50
106,50	32,00

TABELA 4.2 - DADOS EXPERIMENTAIS DE TENSÃO POR
CÉLULA EM FUNÇÃO DA CORRENTE PARA
UMA CONCENTRAÇÃO DE 7% DE KOH

Tensão por Celula (v)	Corrente (A)
0,00	0,00
0,91	0,50
1,27	0,75
1,45	1,00
1,64	2,90
1,73	8,90
1,82	19,00
1,91	26,50
1,94	32,00

TABELA 4.3 - DADOS EXPERIMENTAIS DE TENSÃO
EM FUNÇÃO DA CORRENTE PARA
UMA CONCENTRAÇÃO DE 10% DE KOH.

Tensão (volts)	Corrente (A)
00,00	0,00
35,00	0,50
50,00	0,75
70,00	1,00
80,00	1,40
90,00	3,50
95,00	12,00
100,00	22,50
104,00	32,50

TABELA 4.4 - DADOS EXPERIMENTAIS DE TENSÃO POR
CÉLULA EM FUNÇÃO DA CORRENTE PARA
UMA CONCENTRAÇÃO DE 10% DE KOH.

Tensão por Célula (v)	Corrente (A)
0,00	0,00
0,64	0,50
0,91	0,75
1,27	1,00
1,45	1,40
1,64	3,50
1,73	12,00
1,82	22,50
1,91	32,50

TABELA 4.5 - DADOS EXPERIMENTAIS DE TENSÃO
EM FUNÇÃO DA CORRENTE PARA
UMA CONCENTRAÇÃO DE 13% DE KOH.

Tensão (volts)	Corrente (A)
00,00	0,00
30,00	0,50
45,00	0,75
60,00	1,00
70,00	1,40
90,00	3,50
95,00	12,00
98,00	22,50
100,00	32,50

TABELA 4.6 - DADOS EXPERIMENTAIS DA TENSÃO POR CÉLULA EM FUNÇÃO DA CORRENTE PARA UMA CONCENTRAÇÃO DE 13% DE KOH.

Tensão por Célula (v)	Corrente (A)
0,00	0,00
0,54	0,50
0,82	0,75
1,09	1,00
1,27	1,40
1,64	3,50
1,73	12,00
1,78	22,50
1,82	32,50

FIGURA 4.1 - CURVA DE VARIAÇÃO DA CORRENTE EM FUNÇÃO DA TENSÃO DURANTE O PROCESSO A 7% DE KOH REFERENTE À TABELA 4.1.

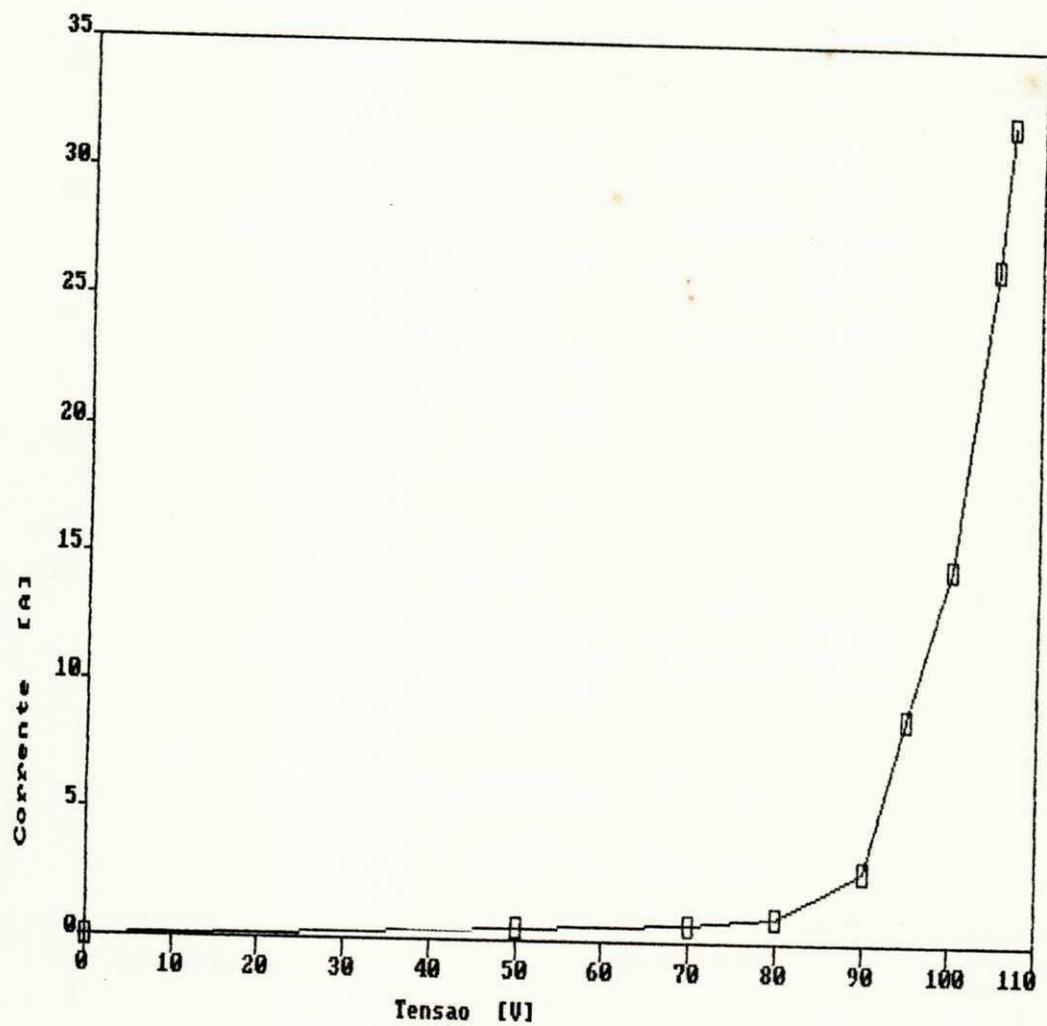


FIGURA 4.2 - CURVA DE TENSÃO POR CÉLULA EM FUNÇÃO DA CORRENTE A 7% DE KOH REFERENTE À TABELA 4.2.

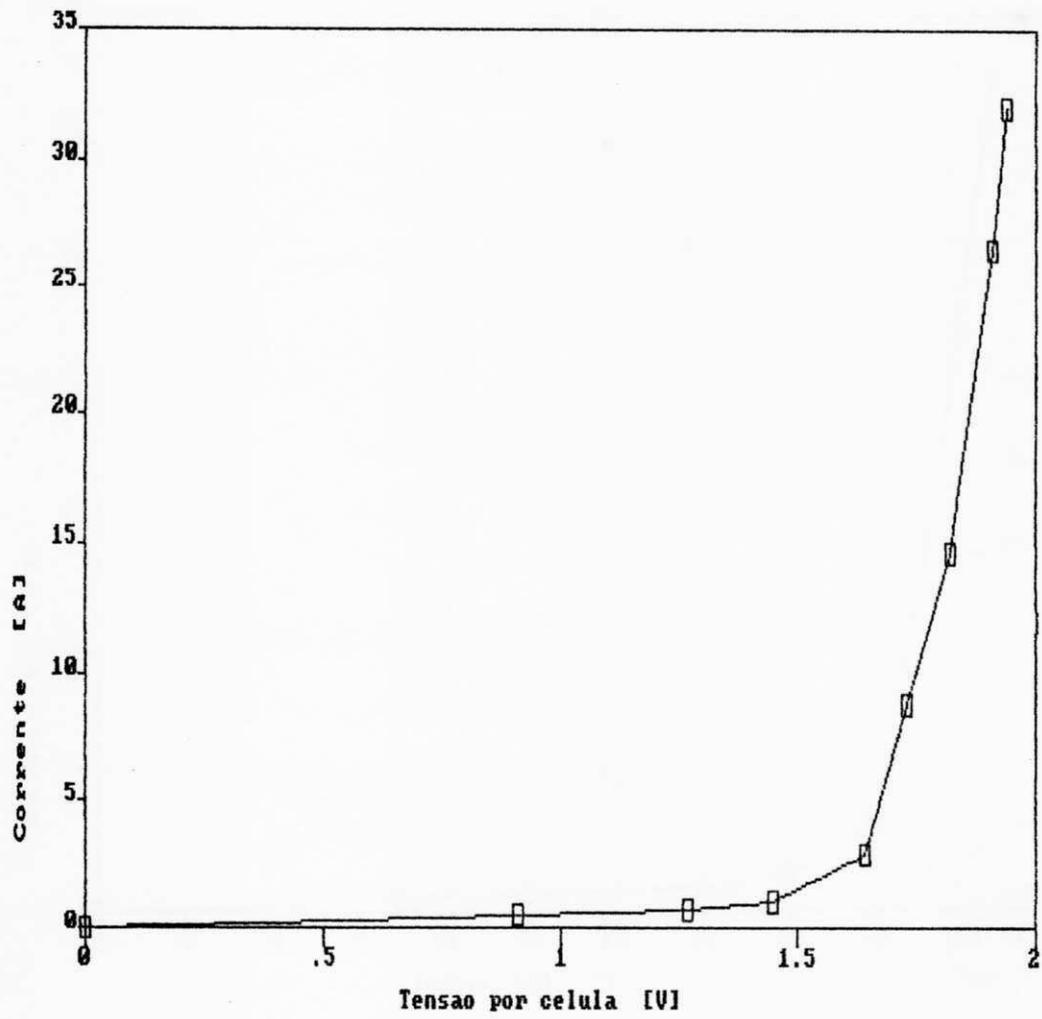


FIGURA 4.3 - CURVA DE VARIAÇÃO DA CORRENTE EM FUNÇÃO DA TENSÃO DURANTE O PROCESSO A 10% DE KOH REFERENTE À TABELA 4.3

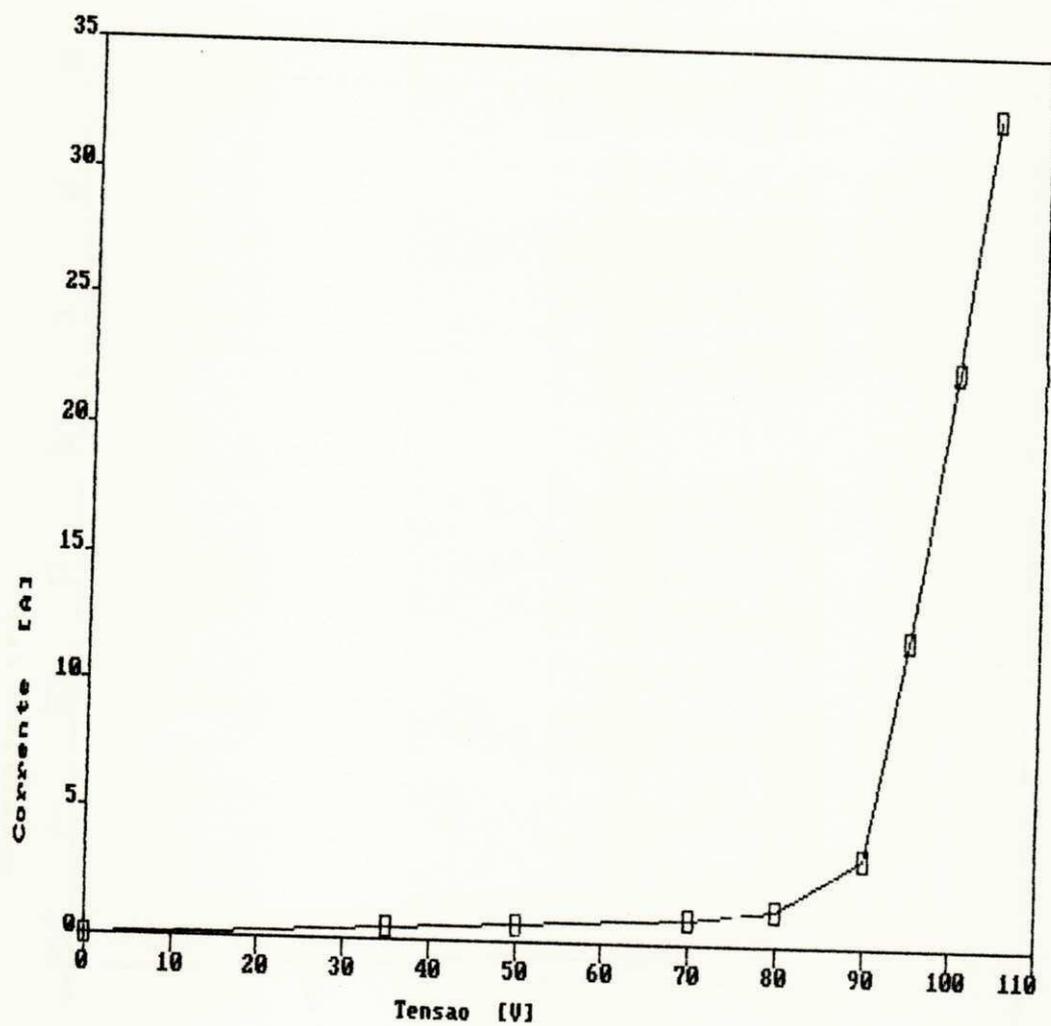


FIGURA 4.4 - CURVA DE TENSÃO POR CÉLULA EM FUNÇÃO DA CORRENTE A 10% DE KOH REFERENTE À TABELA 4.4.

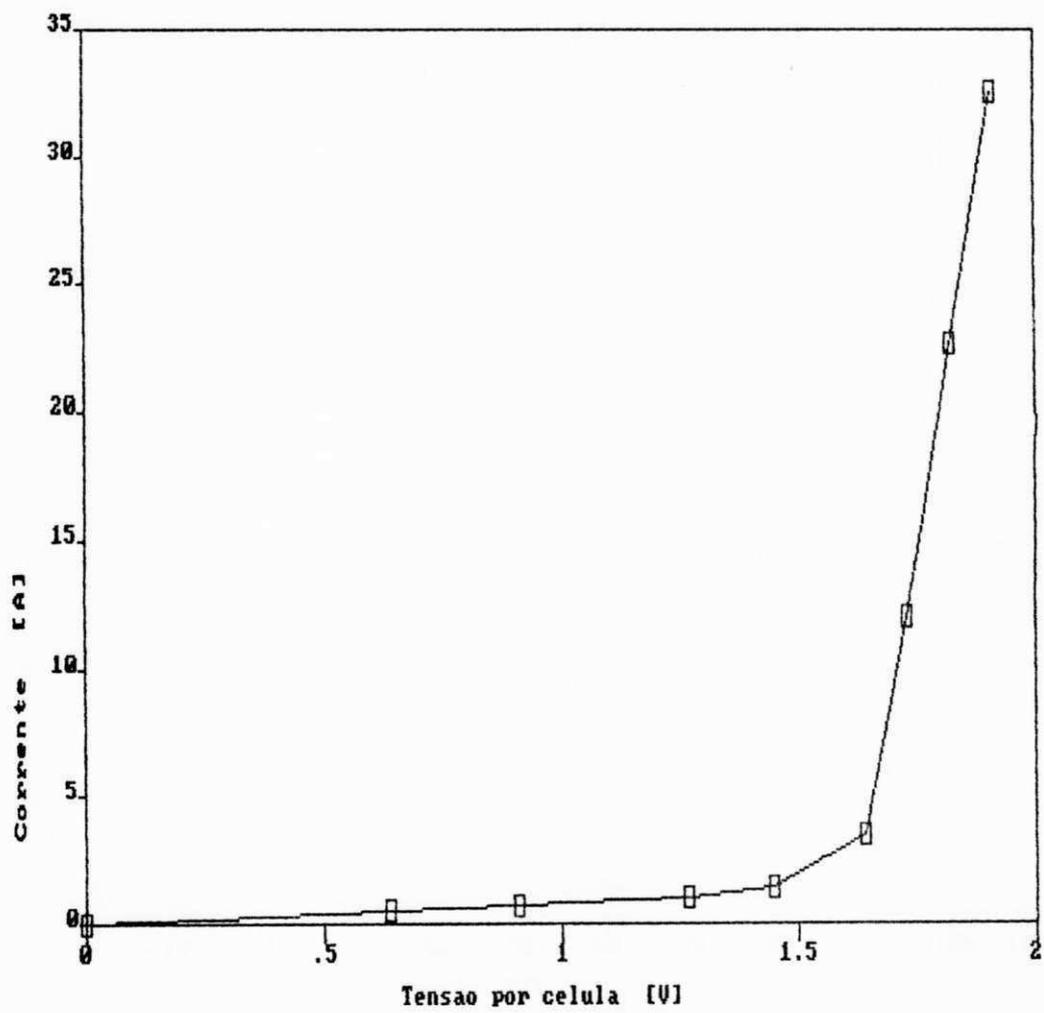


FIGURA 4.5 - CURVA DE VARIAÇÃO DA CORRENTE EM FUNÇÃO DA TENSÃO DURANTE O PROCESSO A 13% DE KOH REFERENTE À TABELA 4.5

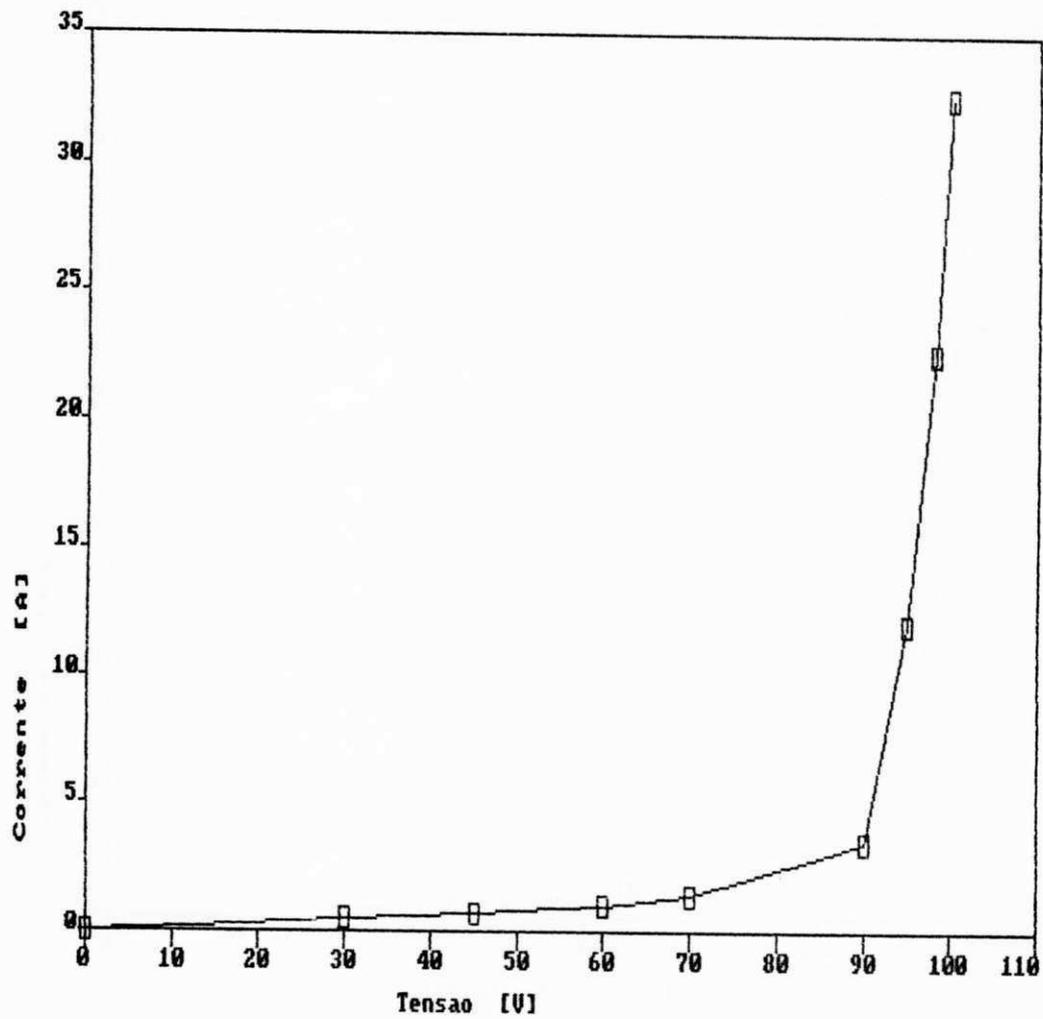
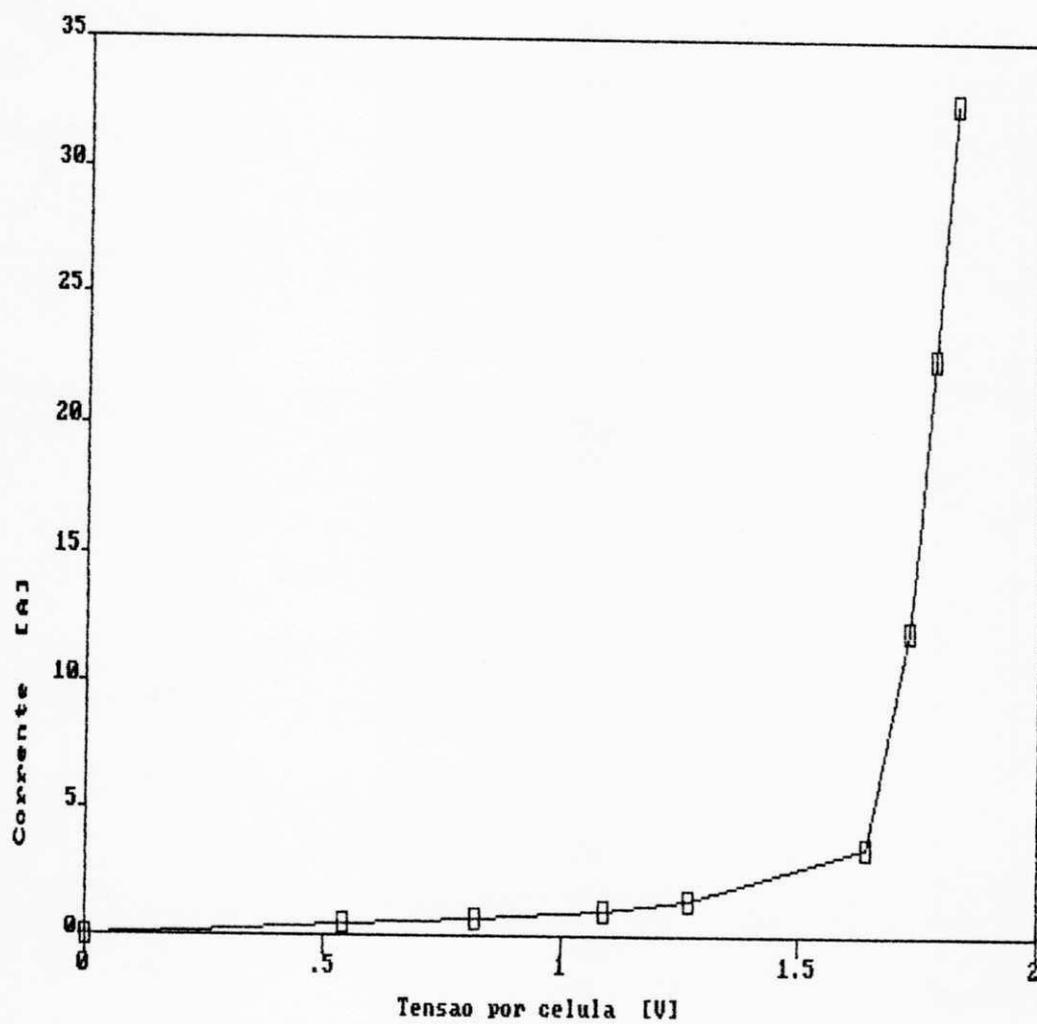


FIGURA 4.6 - CURVA DE TENSÃO POR CÉLULA EM
FUNÇÃO DA CORRENTE A 13% DE KOH
REFERENTE À TABELA 4.6.



4.2 - RENDIMENTO DO SISTEMA

A energia necessária teoricamente para se obter 1Nm^3 de gás ($\text{H}_2 + \text{O}_2$) para um eletrolisador de água é de 2,366 kWh (Apêndice D). Foi feito um levantamento de dados da vazão de gases em função da potência da máquina para concentrações de 7, 10 e 13% de KOH. Os resultados são mostrados na Tabela 4.7, juntamente com o rendimento. A Figura 4.7 mostra a curva de rendimento da máquina em função da concentração do eletrólito.

Observa-se que o rendimento é função da concentração do eletrólito. Quanto maior a concentração para uma temperatura fixa, maior o rendimento. Nas condições experimentais a máquina apresentou rendimento que varia entre 0,66 a 0,69 dependendo da concentração do eletrólito. Observa-se ainda que o aumento do rendimento é pequeno com o aumento da concentração, devido a este fato é indicado que se trabalhe com concentração de 7% de KOH, visto que com o aumento da concentração de KOH houve uma elevação de temperatura do eletrolisador.

Para a concentração de 7% de KOH, foram levantados dados de vazões de gases produzidos (H_2-O_2) em função da potência da máquina, como mostra as Tabelas 4.9 a 4.11. Vide Apêndice D e

Figuras 4.8 a 4.9.

Nas Figuras 4.8 e 4.9 podemos observar que a vazão de gás é diretamente proporcional a potência consumida (ou a intensidade de corrente), relação estabelecida pela Lei de Faraday da eletrólise.

A figura 4.10 sobrepõem as potências real e teoricamente necessárias para a produção de uma dada quantidade de gases. A diferença entre a potência real e a teórica deve-se ao fato de que o rendimento energético não é 100%. O rendimento energético pode ser verificado nesta figura, pela relação entre a potência teórica e a real. O rendimento encontrado para uma concentração de 7% foi de 0,66.

É necessário frisar que estas curvas (potência real em função da vazão) servem para indicar qual deverá ser a potência da máquina para uma dada produção de gás desejada.

É importante assinalar que o rendimento é função de diferentes fatores que envolvem os complexos fenômenos das reações eletroquímicas. Além da concentração do eletrólito, o rendimento depende também do um aumento de temperatura, que aumenta a velocidade de reação ($\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2$), e a diminuição das perdas resistivas expressas em termos de polarização.

Os dados foram obtidos após a estabilização do eletrolisador.

TABELA 4.7 - DADOS EXPERIMENTAIS DE PRODUÇÃO DE GASES
EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO E CÁLCULO DO
RENDIMENTO DO ELETROLISADOR.

% KOH	Vazão (l/h)	Tensão (volts)	Corrente (A)	Potência (Kwh)	Rendi- mento
7	720	100	25,80	3,58	0,66
10	720	95	26,70	3,52	0,67
13	720	90	27,20	3,40	0,69

TABELA 4.8 - DADOS DO RENDIMENTO EM FUNÇÃO
DA CONCENTRAÇÃO DO ELETRÓLITO.

Concentração (%)	Rendimento
7	0,66
10	0,67
13	0,69

TABELA 4.9 - DADOS TEÓRICOS DE PRODUÇÃO DE GASES
EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA.

Potência (kw)	Vazão de gás (Nm ³ /h)
0,000	0,000
0,400	0,169
0,800	0,338
1,200	0,507
1,600	0,676
2,000	0,845
2,400	1,014

TABELA 4.10 - DADOS REAIS DE PRODUÇÃO DE GASES
EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA.

Potência (kw)	Vazão de Gás (Nm ³ /h)
0,000	0,000
0,400	0,112
0,800	0,224
1,200	0,336
1,600	0,448
2,000	0,560
2,400	0,670
3,570	1,000

TABELA 4.11 - RELAÇÃO ENTRE O VOLUME DE GÁS PRODUZIDO
E AS POTÊNCIAS REAL E TEÓRICA.

Vazão(Nm ³ /h)	Potência Teórica(kw)	Potência Real(kw)
0,000	0,000	0,000
0,112	-	0,400
0,169	0,400	-
0,224	-	0,800
0,336	-	1,200
0,338	0,800	-
0,448	-	1,600
0,507	1,200	-
0,560	-	2,000
0,670	-	2,400
0,676	1,600	-
0,845	2,000	-
1,000	-	3,570
1,014	2,400	-

FIGURA 4.7 - RENDIMENTO DO ELETROLISADOR EM
FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE KOH,
REFERENTE À TABELA 4.8.

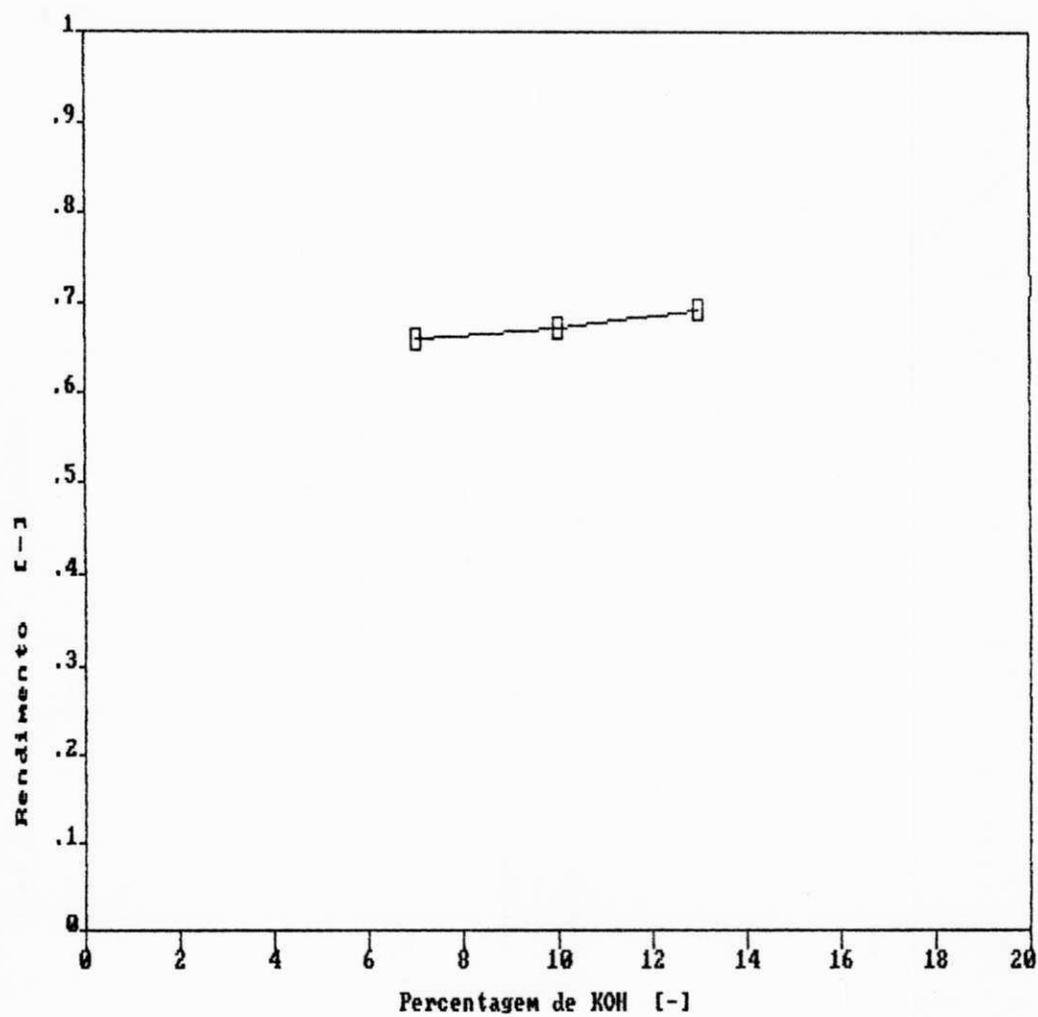


FIGURA 4.8 - PRODUÇÃO TEÓRICA DE GÁS EM FUNÇÃO DA POTENCIA REFERENTE A TABELA 4.9.

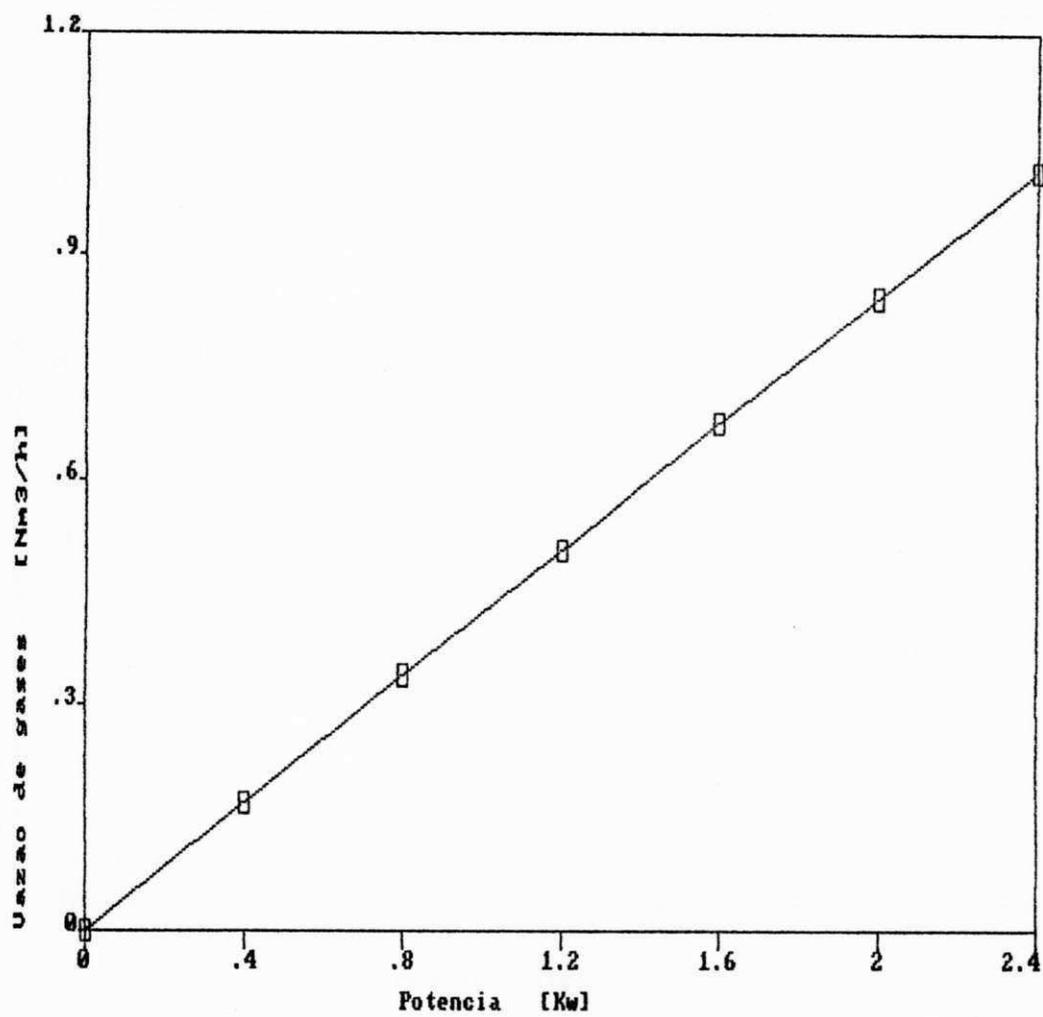


FIGURA 4.9 - PRODUÇÃO REAL DE GÁS EM FUNÇÃO DA POTENCIA REFERENTE À TABELA 4.10.

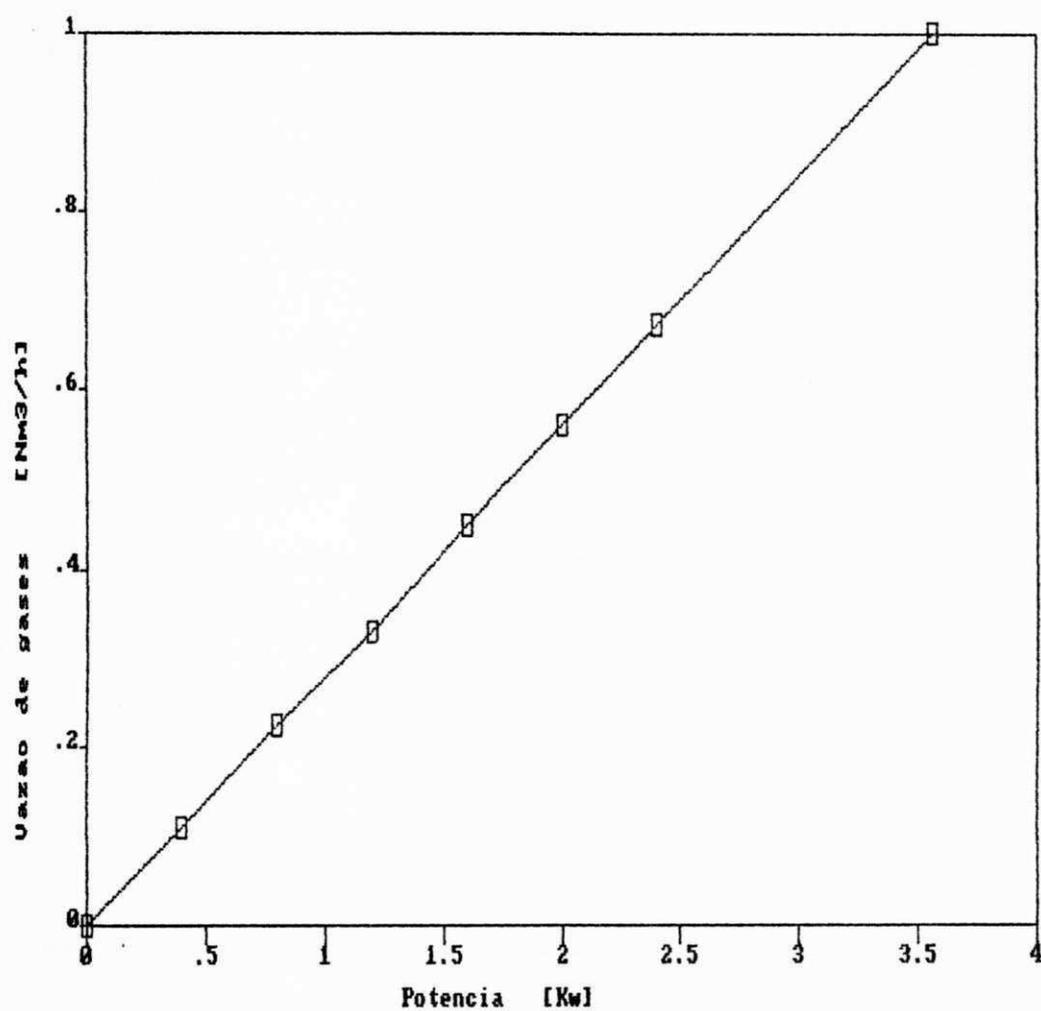
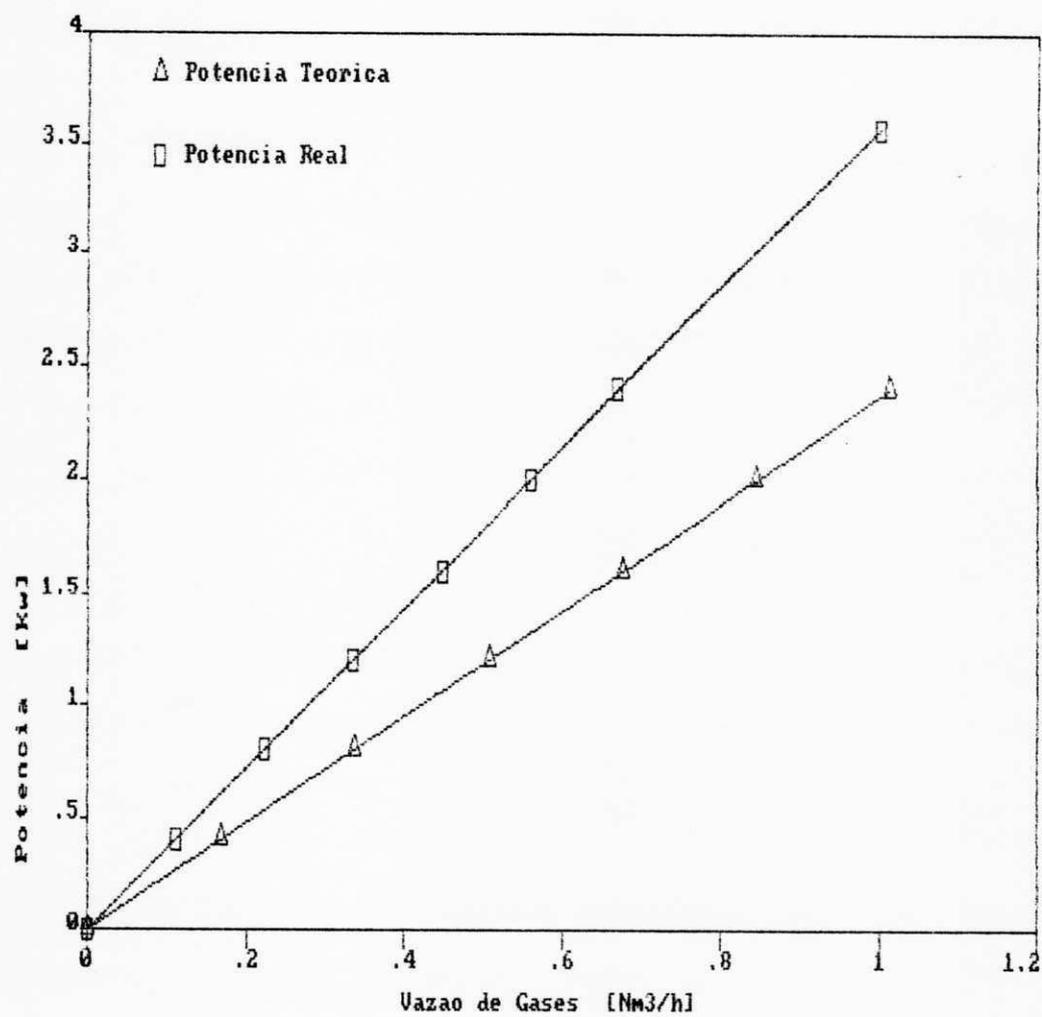


FIGURA 4.10 - RELAÇÃO ENTRE A VAZÃO DE GÁS PRODUZIDO E AS POTÊNCIAS REAL E TEÓRICA REFERENTE À TABELA 4.11.



4.3 - ASPECTOS DA CHAMA

4.3.1 - ÉTER

O éter apresentou uma chama aberta e de cor intensa. A chama deste fluido tem forma arredondada tipo "Bico de Bussen". Produz uma chama com temperatura demasiadamente baixa, e embora apresente um excelente efeito controlador sobre a combustão do hidrogênio, evitando o engolimento de chama, não serve para a operação.

4.3.2 - ACETONA

Apresenta uma chama com características idêntica a do éter, porém, é o único composto orgânico dentre os analisados que é completamente impróprio para o uso na máquina de solda como controlador de chama, pois altera as propriedades mecânicas do material plástico do sistema.

4.3.3 - BENZINA

Este fluido apresenta uma chama mais fechada e de cor menos intensa que o éter. Produz uma temperatura de chama própria para solda de metais, principalmente com varetas de solda de latão. É um excelente controlador de chama, minimizando o efeito de engolimento de chama.

4.3.4 - ÁLCOOL

Dentre os fluidos orgânicos experimentados é o que apresenta a chama mais fechada e com maior temperatura. É apropriada para o corte de metais. Apresenta uma chama fina. É um excelente controlador de chama, evitando engolimento da mesma.

4.4 - ASPECTOS QUALITATIVO DA SOLDAGEM

A soldadora em estudo gera os gases hidrogênio e oxigênio na proporção 2:1. Com essa proporção a soldagem é

adequada para diversos materiais, apresentando uma soldagem com excelentes características mecânicas, todavia para materias que contém ferro, a solda não apresenta boa qualidade. Com a adição de oxigênio, observou-se um melhoramento considerável nas características das soldagens dos materiais ferrosos.

Foram realizados dez testes de soldagens, utilizando aço 1020, cobre e latão, com e sem a utilização de oxigênio suplementar em diferentes proporções.

Com referência ao cobre e latão, a adição de oxigênio não teve qualquer influência, obtendo-se sempre soldas de boa qualidade, entretanto para o aço notou-se deficiência em alguns casos. Observou-se que as soldas sem oxigênio suplementar foram de má qualidade, as denominadas soldas frias. Com a adição de oxigênio, conseguiu-se a obtenção de soldas de ótima qualidade. Foram nestas então feitas análises metalográfica para um estudo mais profundo da qualidade da soldagem e determinação da melhor percentagem de oxigênio adicional.

Para o aço 1020, a melhor soldagem foi obtida com a adição de $0,06 \text{ Nm}^3/\text{h}$ de oxigênio suplementar e uma vazão de $0,20 \text{ Nm}^3/\text{h}$ de gases gerados pela máquina, o que corresponde a 48,85% de oxigênio total, como mostra as Tabelas 4.12 e 4.13.

Os experimentos levam à seguinte conclusão: as soldas com a máquina oxi-hidrogénica necessitam de adição de oxigénio no caso de materiais ferrosos e não necessitam no caso de não-ferrosos.

Na Tabela 4.12 estão referidos as vazões respectivas de gases aditivados com álcool, benzina e oxigénio utilizados nos dez experimentos para o caso do aço 1020.

Também foram realizados testes de resistência à tração para soldagens com os gases gerados pela máquina, isto é, estequiométricos, com aproximadamente 50% de oxigénio total, com 76% de oxigénio total e com a solda oxi-acetilénica.

Observou-se que a soldagem oxi-acetilénica apresentou uma grande resistência em comparação com a oxi-hidrogénica. Já com referência ao teor de oxigénio observa-se que a solda com os gases gerados pela máquina apresentou baixa resistência com relação à solda com 50% de oxigénio, entretanto com relação à solda com 76% de oxigénio apresentou uma maior resistência como mostra a Tabela 4.14.

ENSAIO METALOGRÁFICO

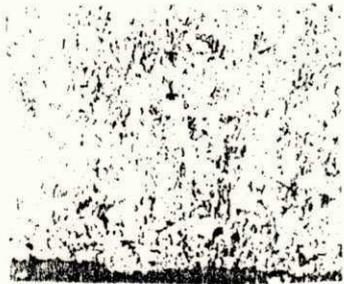
O ensaio metalográfico foi realizado no laboratório de metalografia, com o objetivo de verificar a influência da injeção de oxigênio sobre a microestrutura do aço. A descarbonetação detectada variou de acordo com a quantidade de oxigênio injetado.

Observou-se uma descarbonetação intensa nas soldas feitas com apenas gases gerados na máquina. Entretanto com a adição de oxigênio até um percentual de aproximadamente 50% de oxigênio total houve uma diminuição nesta descarbonetação e a partir deste percentual houve formação de óxidos de Ferro.

Conclui-se portanto que à medida que se aumenta o percentual de oxigênio nas soldas, há uma diminuição da descarbonetação.

Com as considerações acima observadas indica-se uma adição de oxigênio na faixa de 40 a 55% para se obter um bom resultado das soldagens para a soldadora em estudo, conforme mostra a Figura 4.11.

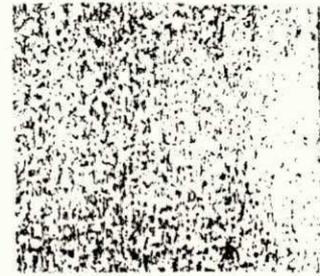
FIGURA 4.11 - FOTOGRAFIAS METALOGRAFICAS
DAS SOLDAGENS.



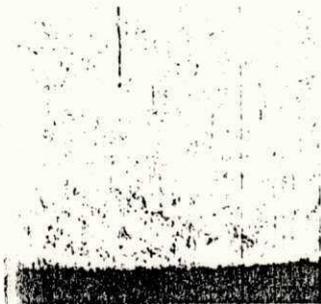
A0 - 33,36% de O_2



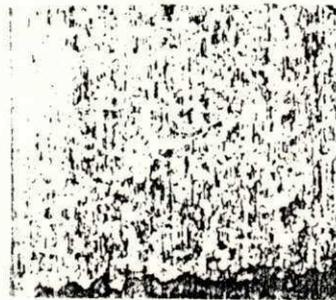
A1 - 33,35% de O_2



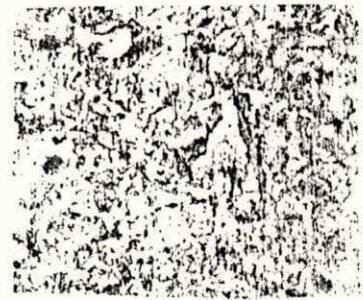
A2 - 33,31% de O_2



A3 - 37,73% de O_2



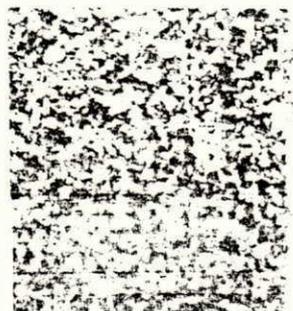
A4 - 39,39% de O_2



A5 - 44,10% de O_2



A6-65,92% de O_2



A7-54,86% de O_2



A8-48,80% de O_2



A9-76,07% de O_2

TABELA 4.12 - DADOS DE VAZÕES DE GASES PARA
A SOLDAGEM (Nm³/h).

AÇO 1020

Amostra	H2+1/2O2 + Álcool	H2+1/2O2 +Benzina	H2+1/2O2 +Oxigênio	% de O ₂ total	Qualidade da Solda
0	1,90	-	-	33,3	Inferior
1	1,50	0,20	-	33,3	Inferior
2	1,10	0,20	-	33,3	Inferior
3	1,70	-	0,12	37,7	Regular
4	1,70	-	0,15	39,4	Regular
5	1,70	-	0,20	44,1	Boa
6	-	0,25	0,24	65,9	Regular
7	-	0,25	0,12	54,9	Ótima
8	-	0,20	0,06	48,8	Ótima
9	-	0,10	0,18	76,1	Inferior

TABELA 4.13 - CÁLCULO DA PERCENTAGEM DE OXIGÊNIO USADOS
 PARA AS SOLDAGENS RELACIONADA À TABELA 4.12
 (Nm³/h).

Amos tra	H ₂ /O ₂ + Álcool	H ₂ /O ₂ +Ben.	O ₂ adi cional	H ₂ da mistura	O ₂ da mistura	O ₂ total	Gás total	% O ₂
0	1,900	-	-	1,266	0,633	0,633	1,899	33,33
1	1,500	0,200	-	1,133	0,567	0,567	1,700	33,35
2	1,100	0,200	-	0,867	0,433	0,433	1,300	33,31
3	1,700	-	0,120	1,134	0,567	0,687	1,821	37,73
4	1,700	-	0,150	1,134	0,567	0,737	1,871	39,39
5	1,700	-	0,200	0,947	0,567	0,747	1,694	44,10
6	-	0,250	0,240	0,167	0,083	0,323	0,490	65,92
7	-	0,250	0,120	0,167	0,083	0,203	0,370	54,86
8	-	0,200	0,060	0,133	0,067	0,127	0,260	48,85
9	-	0,100	0,180	0,067	0,033	0,213	0,280	76,07

TABELA 4.14 - DADOS RELACIONADOS AOS TESTES
DE TRAÇÃO PARA AS SOLDAGENS.

Amostra	Gases	Tração (kg/mm ²)
1	Máquina	30,60
2	50% de O ₂	41,18
3	76% de O ₂	26,77
4	Acetileno	43,30

CAPÍTULO 5
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O reator eletroquímico apresentou um rendimento satisfatório, porém o desempenho apresentou os seguintes problemas:

1 - A segurança da máquina não foi satisfatória, em virtude da tendência a retrocesso de chama.

2 - Quanto a qualidade da solda, observou-se que:

- Soldas de aço com injeção de oxigênio suplementar na proporção de 1/4 de volume apresentam boas.

- Soldas de aço sem injeção de oxigênio foram deficientes.

- As soldas dos não-ferrosos, como por exemplo cobre e latão, demonstraram ótima qualidade sem injeção de oxigênio.

Em visto do exposto propormos:

1 - Projetar os novos eletrolisadores com saídas independentes para o oxigênio e hidrogênio. Dentro desses sistemas adicionando-se válvulas contra recuo de fluxo e válvulas corta chama a segurança será de 99%. Em outras palavras tem que haver uma separação total entre o combustível (H_2) e o comburente (O_2), o que permitirá a inclusão de equipamentos contra explosões.

2 - Fazer com que o sistema admita uma injeção suplementar de oxigênio, o que permitirá soldas adequadas para aços.

BIBLIOGRAFIA

- 1 - ALVES, J. J. N., Avaliação de parâmetros da combustão H_2/O_2 obtidos a partir de um reator eletroquímico bipolar (Tese de Mestrado), DEQ/UFPB/Campina Grande/PB, 1992.
- 2 - BOCKRIS, J. O'M., Energy. The Solar-Hydrogen Alternative. The Architectural Press Ltd., Condon, 1976.
- 3 - BOCKRIS, J. O'M., The economics of hydrogen as a fuel. International Journal of Hydrogen Energy, Vol.6, N° 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.

-
- 24 - MOURA, J. C., Manual de Segurança para o Hidrogênio. CODETEC, UNICAMP, Campinas, SP, 1980.
- 25 - NSF/NASA, Solar energy panel, An Assessment of Solar Energy as a National Energy Resource, University of Maryland, College Park, Md., 1972.
- 26 - NUTALL, L. J., Conceptual design of large scale water electrolysis plant using solid polymer electrolyte technology. International Journal of Hydrogen Energy, Vol 2, 1977.
- 27 - OHTA, I., Solar - Hydrogen Energy Systems. Pergamon Press, Oxford, England, 1979.
- 28 - PERRIER, J. L., Energia Solar e Hidrogênio. Editorial Presença, Lisboa, Portugal, 1980.
- 29 - PERRY, R. H. & CHILTON, C. H., Manual de Engenharia Química, 5ª Edição, Editora Guanabara Dois, Rio de Janeiro, RJ, 1986.
- 30 - QUAGLIANO, J. V. & VALLARINO L. M., Química, Rio de Janeiro, RJ, Editora Guanabara Dois, 1985.

- 31 - QUITES, A. M., DUTRA, J. C., Tecnologia da soldagem a arco Voltaico, Florianópolis, SC, 1979.
- 32 - REIDER, R., EDESKUTY, F. J., Hydrogen safety problems. International Journal of Hydrogen Energy, Vol 4, N° 1.
- 33 - ROY, L. R., Hydrogen Production by the electrolysis of water. Seminário Brasil-Canadá de Alternativas Energéticas, São Paulo, SP, 1984.
- 34 - SILLEN, C. W. M. P., BARENDRECHT, E., Gas bubble behaviour during water electrolysis. International Journal of Hydrogen Energy, Vol 7, N° 7, 1982.
- 35 - SILVA, E. P., Fontes Energéticas Brasileiras - Hidrogênio, Vol 1, CHESF/BRASAP ENG. LTDA., Rio de Janeiro, RJ, 1987.
- 36 - SILVA, E. P., Introdução à tecnologia e economia do hidrogênio, Editora da Unicamp, Campinas, SP, 1991.
- 37 - Simpósio Tecnológico Brasil-Áustria. Consulting & Engineering Industrielle Laser Technologie, São Paulo, SP, 1992.

- 38 - SPIRIG, E., Un procédé de soudage utilisant l'électrolyse de l'eau. Brevet Européen N° 5597, Février, 1984, França.
- 39 - SUZUKI, Y., On hydrogen as fuel gas. International Journal of Hydrogen Energy, Vol 7, N° 3, 1990.
- 40 - TBA - Soldas do Brasil Ltda. Rio Grande do Sul - Brasil.
- 41 - TERMOQUIP - Energia Alternativa Ltda. Manual de segurança para hidrogênio, Campinas, São Paulo.
- 42 - TICIANELLI, E. A., Sistemas eletroquímicos de geração e aproveitamento de hidrogênio, eletrolisadores e células combustíveis. Fontes Alternativas de Energia, Projeto FINEP/PNUD/UNESCO, Brasil, 1985.
- 43 - TOBIAS, C. W., Effect of gas evolution on current distribution and ohmic resistance in electrolyzer. J. Electrochem. Soc., 1959.
- 44 - UTP - Brasileira de Soldas Ltda. 3ª Edição, Santo Amaro, SP, 1982.

- 45 - VELZEN, D. VAN & LANGENKAMP, H., Development studies on thermochemical cycles for hydrogen production. C.G.R. Euratom, Ispra, Itália. International Journal of Hydrogen Energy, Vol 2, Pergamon Press, 1977.
- 46 - WAINER, E., Soldagem. Editado pela Associação Brasileira de Metais - ABM, 16ª edição ampliada, São Paulo, SP.
- 47 - WILLIAMSON, Jr. K. D. & COX, K. E., Hydrogen: Its technology and implications, Vol I, CRC Press, Cleveland, 1977.
- 48 - WINTER, G. J., KLAISS, H. and NITSCH, J., Hydrogen as an Energy carrier: What is known? What do we need to learn?. International Journal of Hydrogen Energy, Vol 15, N° 2, 1990, Pergamon Press.
- 49 - II Congresso Latino-Americano e III Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem. UFSC/COPPE/UFRJ, Itapema, SC, 1977.

APÊNDICE A

PRINCIPAIS PROCESSOS DE GERAÇÃO DE HIDROGÊNIO

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

SILVA, 1991

APÊNDICE B

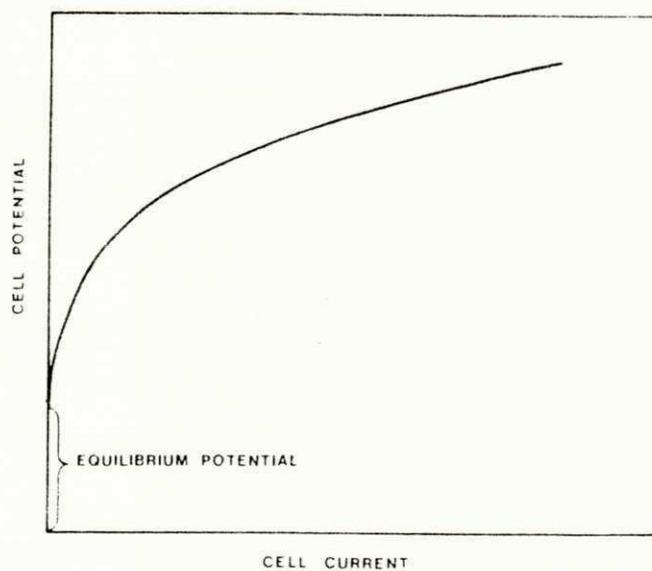
PROPRIEDADES FÍSICAS DO HÍDROGÊNIO

Densidade (0°C e 1 atm).....	0,08987g/l
Densidade (comparada com o ar = 1) (15°C a 20°C).....	0,06948
Densidade do H ₂ lq (-252,8°C e 1 atm).....	0,0708g/cm ³
Ponto de fusão.....	-259,21°C
Ponto de vapor.....	-252,77°C
Temperatura crítica.....	-240,00°C
Pressão crítica.....	12,80atm
Densidade crítica.....	0,0301g/cm ³
Calor de fusão (-259,21°C e 1 atm).....	14,0cal/g
Calor de vaporização (-252,77°C e 1 atm).....	107,0 cal/g
Calor específico Cp (25°C e 1 atm).....	3,42cal/g°C
Calor específico Cp (H ₂ lq à pressão constante de 1 atm e -256°C).....	1,93cal/g°C
Condutividade térmica K (0°C).....	1,665mw/cmK
Condutividade térmica K (25°C).....	1,815mw/cmK
Condutividade térmica K (100°C).....	2,106mw/cmK
Condutividade térmica K (H ₂ lq à 15K).....	1,022mw/cmK
Condutividade térmica K (H ₂ lq à 25K).....	1,269mw/cmK
Condutividade térmica K (H ₂ lq à 33K).....	0,60mw/cmK
Solubilidade em água (0°C).....	0,0214V/VH ₂ O
Solubilidade em água (20°C).....	0,0180V/VH ₂ O
Solubilidade em água (50°C).....	0,0160V/VH ₂ O
Solubilidade em água (80°C).....	0,0085V/VH ₂ O
Limites de inflamabilidade.....	95%H ₂ + 5%O ₂
Limites de inflamabilidade com ar.....	4,1 a 75%H ₂
Temperatura de ignição com oxigênio.....	450°C
Temperatura de ignição com ar.....	510°C
Umidade do gás saturado (32°C e 1 atm).....	40gH ₂ O/Nm ³ gás seco
Umidade do gás saturado (25°C e 1 atm).....	26,64gH ₂ O/Nm ³ gás seco
Viscosidade (25°C).....	0,00892centipoise

SILVA, 1991

APENDICE C

CURVA DE POLARIZAÇÃO TÍPICA PARA A ELETRÓLISE

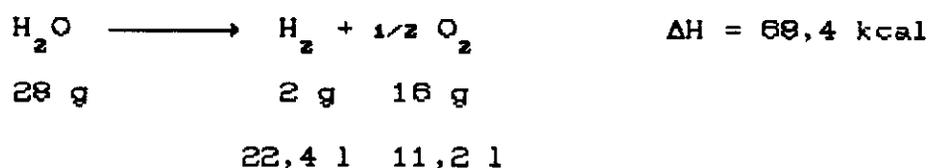


BOCKRIS, 1975

APÊNDICE D

CÁLCULOS DA POTÊNCIA TEÓRICA DE UMA CÉLULA ELETROLÍTICA

A reação final que ocorre numa célula eletrolítica é dada como segue:



Observa-se que para cada 18g de H_2O obtém-se 33,6 litros de gás ($\text{H}_2 + \text{O}_2$), portanto para se obter 1000 litros 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 desse gás, consome-se 2.035,7 kcal. Esse valor é a energia necessária teoricamente para se obter 1 Nm^3 de gás (1000 litros de $\text{H}_2 + \text{O}_2$).

Transformando-se 2.035,7 kcal para kw, obtém-se 2,366 kwh de potência (1kw = 860 kcal). Portanto, a potência teórica de uma célula eletrolítica é 2,366 kwh.

APÊNDICE E

FOTOGRAFIAS DA MÁQUINA E SUAS CHAMAS

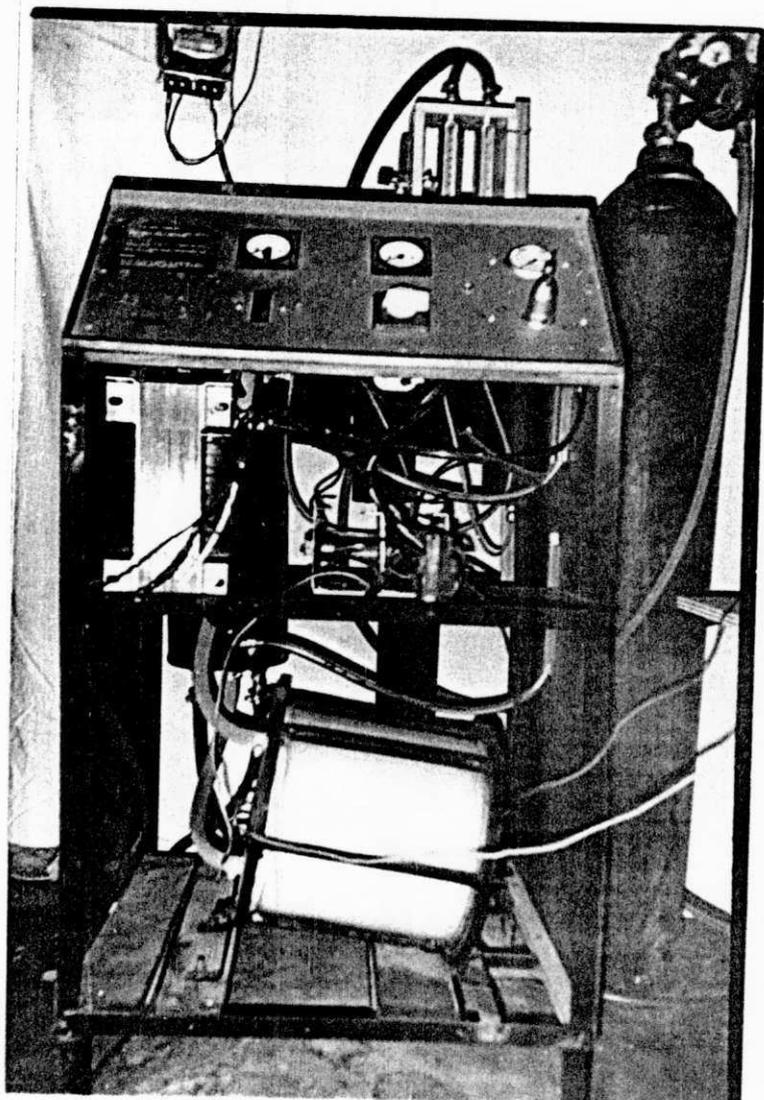


FIGURA E.1 - Fotografia da máquina oxi-hidrogénica
vista de frente.

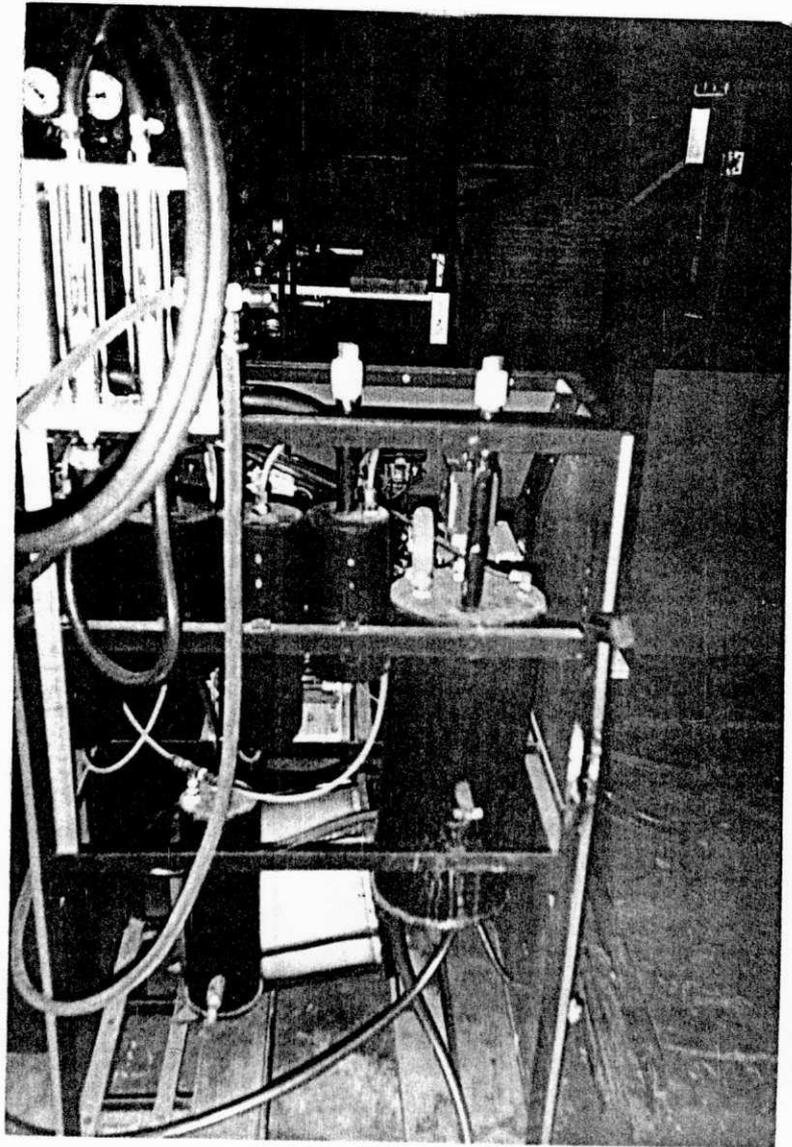


FIGURA E.2 - Fotografia da máquina oxí-hidrogénica
vista de trás.

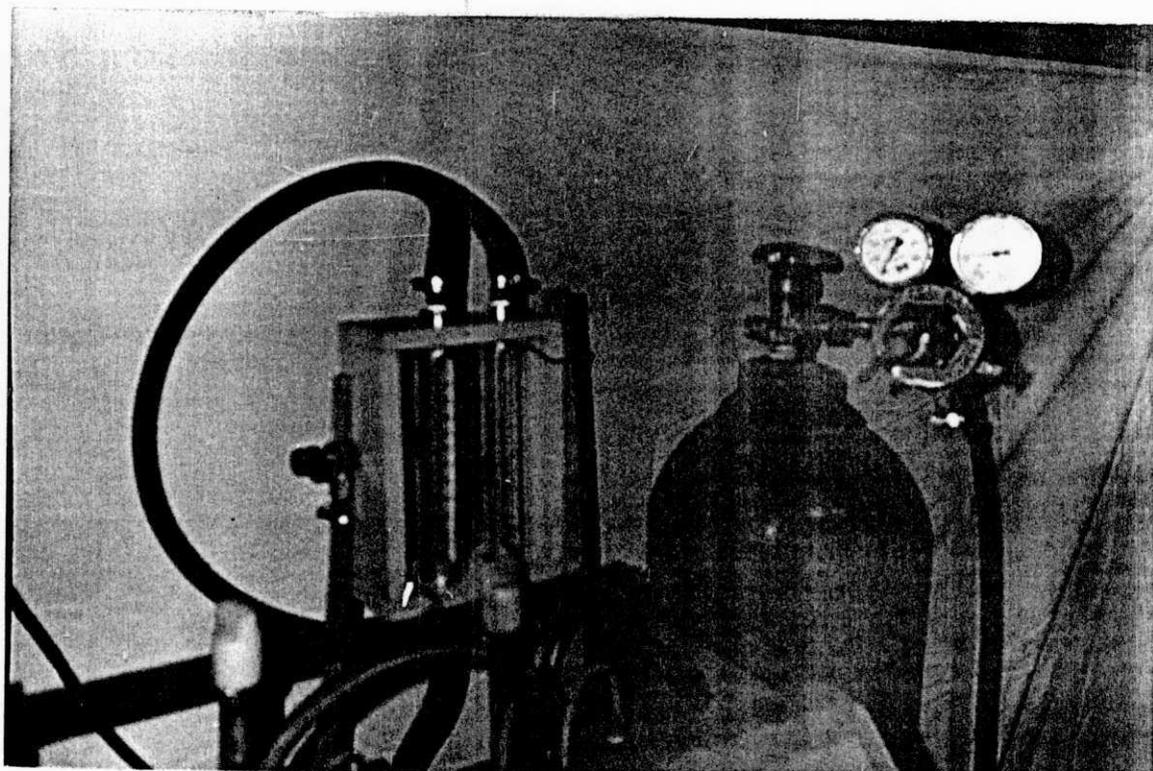


FIGURA E.3 - Fotografia do Oxigênio adicional e
seus fluxômetros.

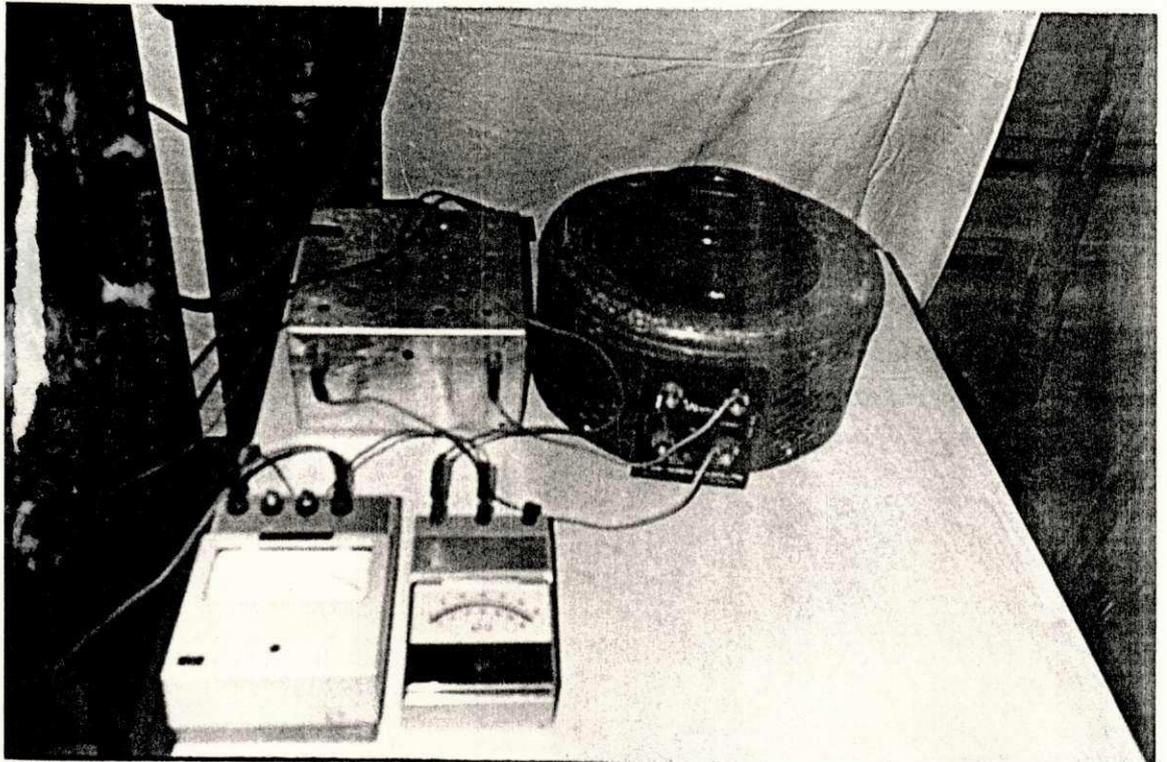


FIGURA E. 4 - Fotografia dos equipamentos usados para a obtenção de dados.

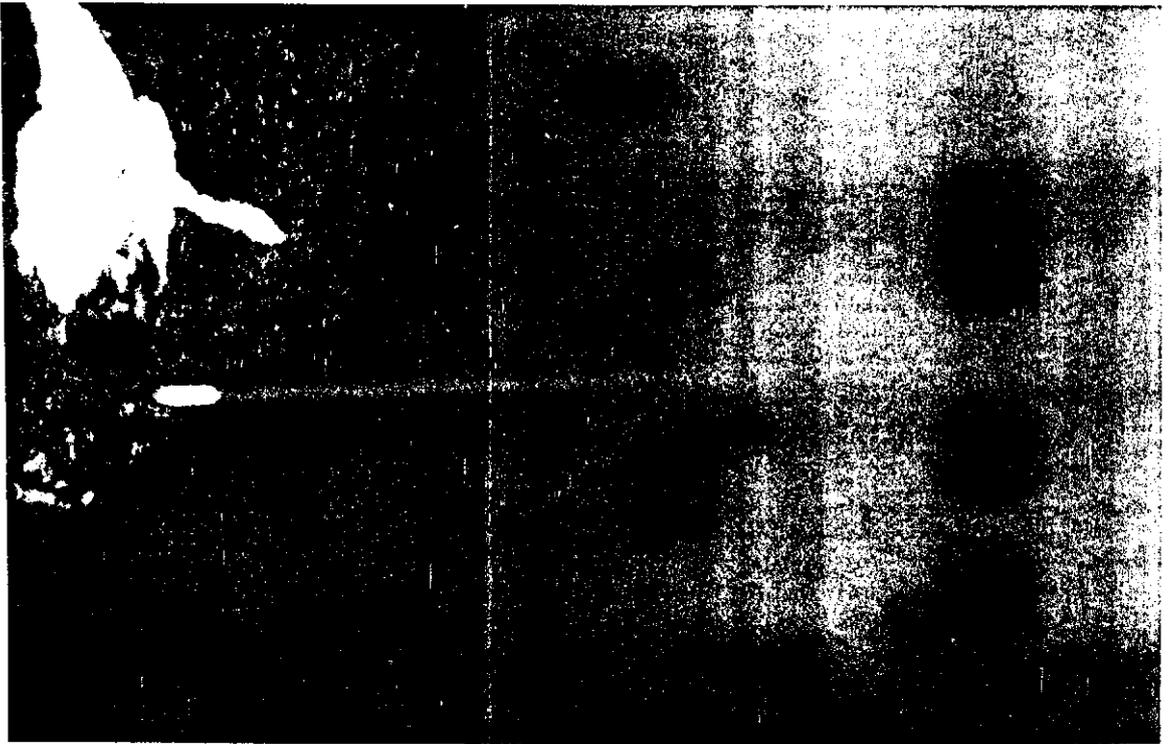


FIGURA E.5 - Fotografia da chama de Álcool.

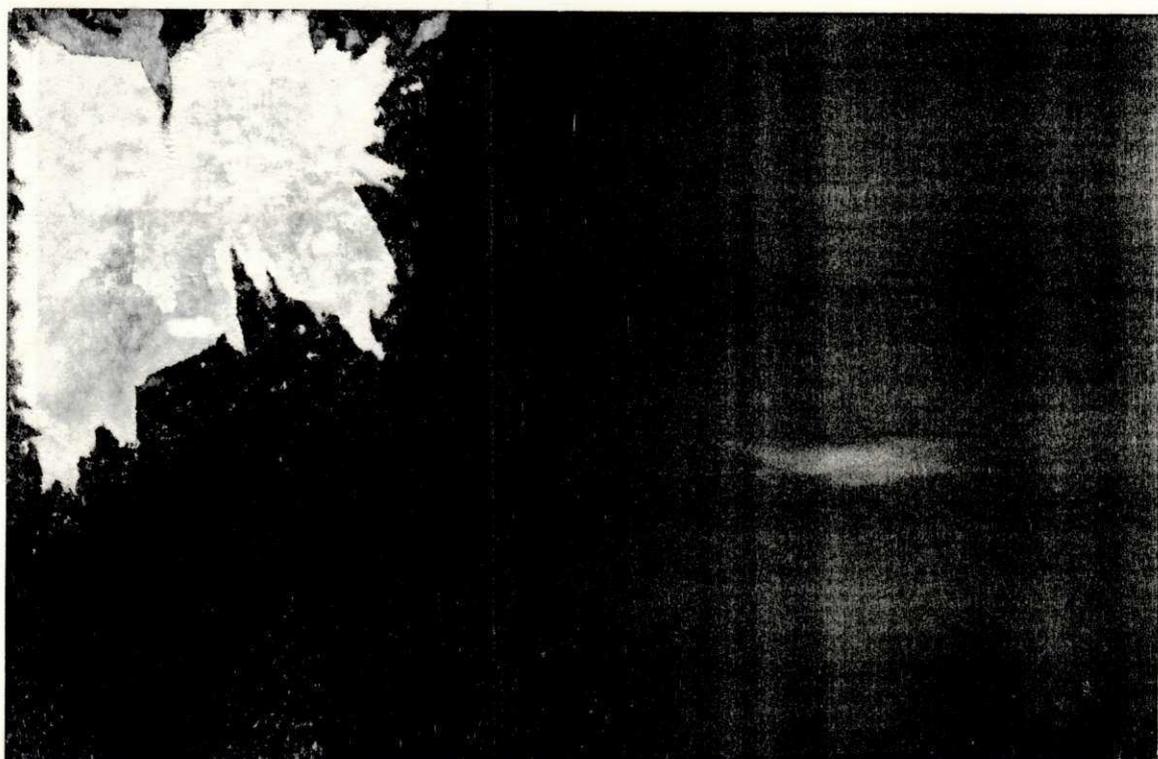


FIGURA E.6 - Fotografia da chama de benzina.

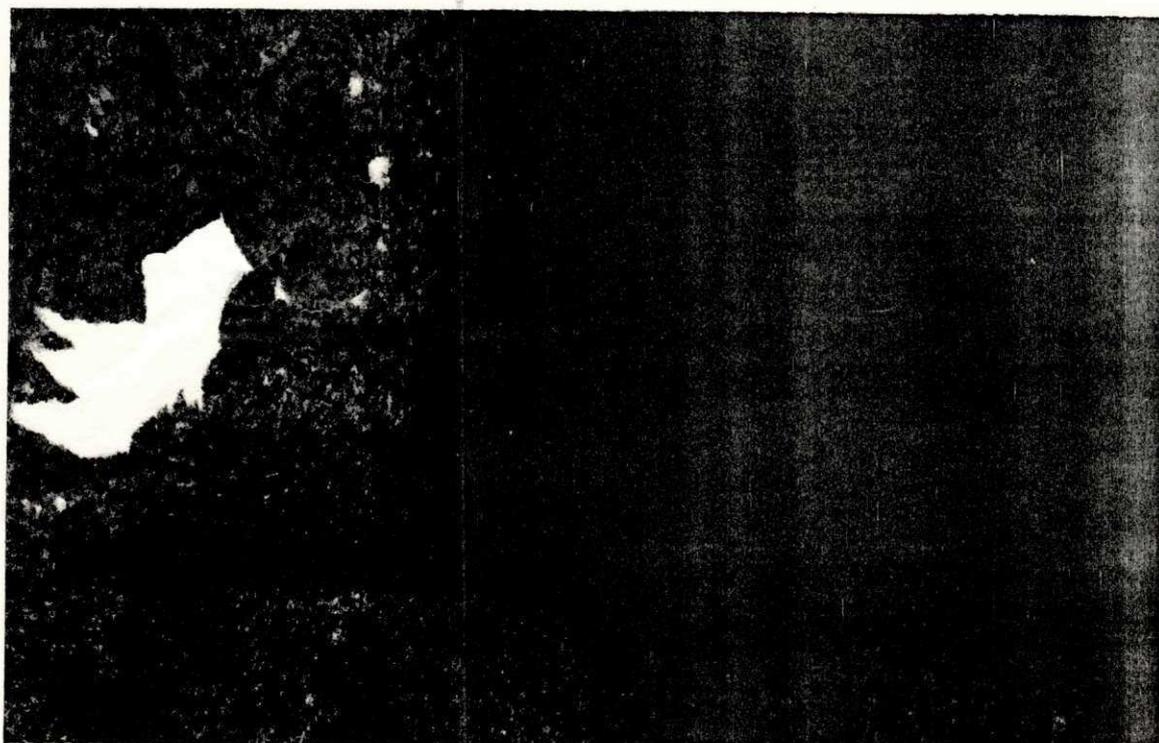


FIGURA E.7 - Fotografia da chama mista álcool/benzina.