

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
DEPARTAMENTO DE SEMI-CONDUTORES,
INSTRUMENTAÇÃO E FOTÔNICA

Dissertação apresentada à
Faculdade de Engenharia Elétrica
como requisito parcial à obtenção do título de
Mestre em Engenharia Elétrica

**AUTOMATIZAÇÃO DO DIAGNÓSTICO
DE TOCHAS DE PLASMA**

Autor: **Luiz Otávio Moreira da Silva** ³⁸
Orientador: **Prof. Dr. Aruy Marotta** ^(A)

Banca examinadora:

Prof. Dr. Aruy Marotta (IFGW-UNICAMP)

Prof. Dr. Furio Damiani (FEE-UNICAMP)

Prof. Dr. Carlos Alberto da Silva Lima (IFGW-UNICAMP)

Prof. Dr. Vitor Baranauskas (FEE-UNICAMP)

Profa. Dra. Alaide Pellegrini Mammana (FEE-UNICAMP)

novembro/1993

Este exemplar é o original final da tese
defendida por LUIZ OTÁVIO MOREIRA DA SILVA
da Comissão

Julgadora em 30 11 93

Aruy Marotta
Orientador

Aos meus pais Laura e Luiz,
às minhas irmãs Rita e Ana,
ao meu irmão Marcos e
à Ecilda Mara que sempre estiveram
ao meu lado.

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Aruy Marotta pela orientação dada, sem a qual não seria possível a realização deste trabalho,

Aos alunos de iniciação científica Edgar Alberto Cabral, pela colaboração na parte computacional e André Fenili pelas discussões sobre a sonda de entalpia,

Aos técnicos Antônio Aparecido Batista do Prado, pela confecção das peças mecânicas e pelo apoio dado durante todo o trabalho e Jorge Baldin Pinheiro, pela montagem dos circuitos eletrônicos,

Ao CNPq, FAPESP, FINEP e FAEP/UNICAMP pelo suporte financeiro,

E aos amigos e amigas que de alguma maneira fizeram parte desta caminhada.

Resumo

Este trabalho trata da implementação de um sistema automatizado de aquisição de dados que tem por objetivo caracterizar um maçarico de plasma. O sistema é aplicado a dois tipos de diagnósticos: diagnóstico básico do maçarico de plasma e diagnóstico do jato de plasma, utilizando uma sonda de entalpia. O sistema de aquisição de dados é implementado utilizando uma interface analógico-digital (A/D). O processo de aquisição de dados é controlado por um cartão de relés. É utilizada a Teoria da Similaridade no tratamento matemático dos dados obtidos no diagnóstico macroscópico do maçarico de plasma. Foram obtidas as curvas características da tensão, rendimento térmico, entalpia e temperatura em função da corrente para diversos valores da vazão de gás. Com a sonda de entalpia foram obtidos os perfís de temperatura do jato de plasma. Relações simples foram observadas entre alguns dos parâmetros do maçarico de plasma.

Abstract

An automated data acquisition system for the characterization of a plasma torch was developed. The system was applied to two types of diagnostics: a study of external parameters of the plasma torch and a detailed study of temperature profiles of the plasma jet. The system was implemented through an analog-digital interface (A/D). The process of acquisition was controlled through a board of relays. The Theory of Similarity was used for the mathematical treatment of the experimental results. Characteristic curves for the voltage, thermal efficiency, enthalpy and temperature were obtained as functions of the current and gas flow rate. Temperature profiles were obtained along the plasma jet using the enthalpy probe. Simple relationships were observed to exist between some of the parameters of the plasma torch.

Conteúdo

1	Introdução	1
2	Teoria	4
2.1	Plasma térmico	4
2.2	Maçarico de plasma	7
2.2.1	Fundamentos teóricos do maçarico de plasma	8
2.2.2	Aspectos construtivos	18
2.3	Sonda de Entalpia	20
2.3.1	Fundamentos teóricos	22
2.3.2	Aspectos construtivos	26
3	Parte Experimental	27
3.1	Sistema de Aquisição de Dados (SAD)	27
3.1.1	Software	29
3.1.2	Hardware	31
3.1.3	Rotinas gerais	44
3.2	Maçarico de Plasma	47
3.2.1	Sistema de aquisição para o maçarico	49
3.2.2	Programa de aquisição para o maçarico	54
3.3	Sonda de entalpia	56
3.3.1	Sistema de aquisição para a sonda	57
3.3.2	Programa de aquisição para a sonda	60

4 Resultados Experimentais e Análise	64
4.1 Maçarico de plasma	64
4.2 Sonda de Entalpia	80
5 Conclusões	89
A Barramentos STD-BUS e GPIB	94
B Circuito da fonte utilizada	99
C Listagem das rotinas e dos programas	100
D Resultados calculados	113

Capítulo 1

Introdução

A crescente utilização de sistemas automatizados em laboratórios de pesquisa e desenvolvimento tem provocado uma maior agilidade no desenvolvimento tecnológico, abrangendo áreas desde a pesquisa biomédica até a pesquisa de novas tecnologias.

Neste trabalho foi implementado um sistema de aquisição de dados, que tem por objetivo caracterizar um maçarico de plasma (ou tocha de plasma). Devido à forte turbulência num maçarico de plasma, grande volume de dados deve ser obtido experimentalmente e em seguida processado em um microcomputador. O processo de aquisição de dados é bastante demorado, quando feito manualmente.

O sistema de aquisição de dados desenvolvido neste trabalho utiliza um microcomputador da linha PC e um controlador de cartões fabricado pela STD. O software utilizado para implementar a comunicação entre o micro e o sistema de aquisição foi o "ASYST". O sistema utiliza a interface de comunicação GPIB. O sistema é aplicado a dois tipos de diagnósticos: diagnóstico do maçarico de plasma como equipamento e diagnóstico do jato de plasma produzido pelo maçarico.

No primeiro diagnóstico são feitas medidas de tensão e corrente de operação, vazão de gás e vazão e temperaturas das águas de refrigeração dos eletrodos. No diagnóstico do jato de plasma são medidos os perfis de temperatura do jato de plasma em diferentes secções. Para este último diagnóstico usamos uma sonda de entalpia, dispositivo construído em nosso laboratório. Na sonda de entalpia são

feitas medidas de temperaturas e vazões de gás e água de refrigeração. Os perfís de temperatura do jato de plasma são obtidos pela sonda de entalpia ao percorrer um linha transversal ao jato de plasma. O deslocamento da sonda é controlado por um motor CC.

O sistema de aquisição de dados é implementado basicamente com uma interface analógico-digital (A/D). O processo de aquisição de dados exige, entretanto, que determinadas válvulas, motores e termopares sejam controlados segundo determinada sequência temporal. Esse controle é realizado com um cartão de relés.

O tratamento matemático que utilizamos no diagnóstico macroscópico do maçarico de plasma foi a Teoria da Similaridade, que apresenta grande vantagem na análise de sistemas complexos.

No capítulo 2 são mostrados os fundamentos teóricos do maçarico de plasma e da sonda de entalpia bem como alguns aspectos construtivos.

No capítulo 3 é feita a descrição de todas as partes do sistema de aquisição de dados, software, hardware e rotinas. É feita também a descrição do maçarico e da sonda utilizados e dos circuitos de interface com o sistema de aquisição.

No capítulo 4 são apresentados os resultados experimentais obtidos com o sistema de aquisição de dados tanto para o maçarico quanto para a sonda de entalpia. A Teoria da Similaridade é utilizada para o ajuste de curvas teóricas aos dados obtidos. Em seguida é feita uma análise dos resultados obtidos. Foram obtidas as curvas características da tensão, rendimento térmico, entalpia e temperatura em função da corrente para diversos valores da vazão de gás. Com a sonda de entalpia foram obtidos os perfís de temperatura do jato de plasma. Relações simples foram observadas entre alguns dos parâmetros do maçarico de plasma.

Devido as suas características únicas, os maçaricos de plasma vêm sendo empregados em grande número de processos industriais tradicionais: no tratamento térmico de cerâmicas e metais, na metalurgia extrativa, na fusão de metais, na síntese de produtos químicos, no corte e solda de metais, na destruição de rejeitos tóxicos ou hospitalares, na decomposição térmica, na melhoria do valor energético dos combustíveis pobres, na deposição de filmes para proteção contra a corrosão

química, a abrasão e as altas temperaturas e muitas outras aplicações. Um dos processos de grande porte, onde as tochas de plasma vêm sendo empregadas com êxito é na substituição do coque metalúrgico como fonte de energia térmica dos altos fornos.

A característica básica do maçarico de plasma é o aquecimento de gases a altas temperaturas com grande eficiência de conversão de energia elétrica em energia térmica. Nas condições de altas temperaturas, as transferências térmicas e as velocidades das reações químicas são bem mais rápidas, o que possibilita a realização de processos que, nas condições habituais seriam impossíveis de realizar.

Os maçaricos de plasma podem realizar o aquecimento de quaisquer gases, sejam eles oxidantes, neutros ou redutores. Na escolha do gás leva-se em conta apenas as exigências do processo, o que permite um grau à mais de liberdade quando comparados aos sistemas que empregam a combustão. O uso de qualquer tipo de gás implica que os processos são muito mais limpos, com baixíssimo nível de poluição ambiental.

A alta densidade de energia das tochas de plasma resulta em sistemas térmicos compactos e de baixo custo. Existem em funcionamento industrial tochas de plasma com potências que vão desde algumas centenas de watts até vários megawatts, com eficiências de 80 a 95% de conversão de energia elétrica em térmica.

Para o Brasil o maçarico de plasma constitui-se numa alternativa importante para obtenção de calor industrial a partir da eletricidade, tendo em vista a pobreza de seu carvão (alto teor de cinzas) e o alto custo do seu petróleo devido à necessidade de importá-lo ou extraí-lo no mar em águas profundas, ao mesmo tempo que o país possui grande potencial hidroelétrico, com custo relativamente baixo da eletricidade.

Capítulo 2

Teoria

Podemos classificar os plasmas em plasmas de alta temperatura, onde as temperaturas são maiores que 50.000 K e os de baixa temperatura onde as temperaturas vão até 50.000 K.

Os plasmas de baixa temperatura podem ainda ser subdivididos em 2 tipos: plasmas frios e plasmas térmicos. Um exemplo prático de plasma frio é encontrado nas lâmpadas fluorescentes utilizadas em sistemas de iluminação comuns. Nestas os elétrons possuem temperaturas de cerca de 20.000 K e as partículas pesadas (átomos, íons e moléculas) possuem temperaturas próximas a do ambiente. Devido à baixa densidade de elétrons livres e de sua pequena massa comparada à massa das partículas pesadas, a temperatura final de equilíbrio tende a ser muito mais próxima à temperatura destas.

2.1 Plasma térmico

O tipo de plasma em questão neste trabalho é o plasma térmico, onde é observado praticamente o equilíbrio térmico entre a temperatura dos elétrons e a temperatura dos íons ($T_e = T_g$). A equação

$$\frac{T_e - T_g}{T_e} = \frac{\pi m_g (\lambda_e e E)^2}{24 m_e (k T_e)^2}, \quad (2.1)$$

onde,

T_e é a temperatura dos elétrons,

T_g é a temperatura das partículas pesadas,

m_g é a massa das partículas pesadas,

e é a carga do elétron,

λ_e é o caminho livre médio dos elétrons,

m_e é a massa dos elétrons,

k é a constante de Boltzman,

E é o campo elétrico,

permite concluir que o equilíbrio térmico ocorre quando a pressão for alta, pois $\lambda_e \sim 1/p$, onde p é a pressão.

Na Fig. 1 [12] vemos que plasmas com pressão maior que 1 atm estão em equilíbrio térmico.

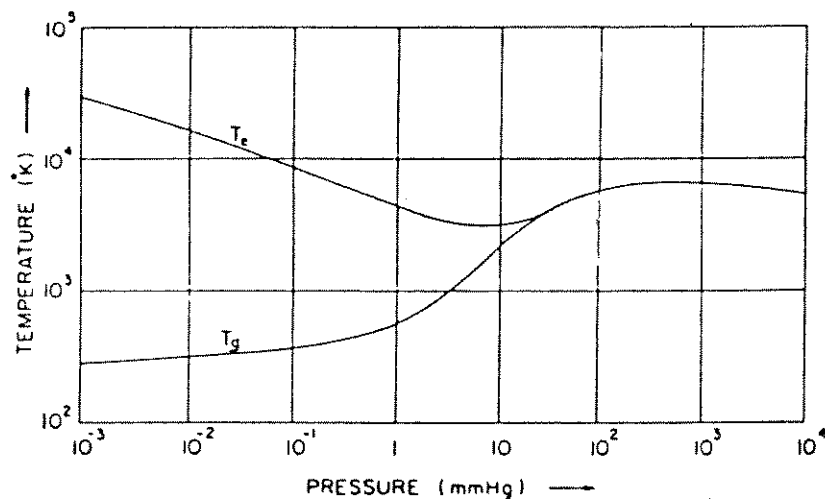


Fig. 1: Temperatura dos elétrons e das partículas pesadas em função da pressão. [13].

O modelo de equilíbrio termodinâmico a ser considerado para o plasma térmico é o equilíbrio termodinâmico local (ETL), uma vez que o estado de perfeito equilíbrio termodinâmico (ET) não é alcançado em condições laboratoriais [1]. O modelo ETL significa que há equilíbrio dentro de uma região pequena do plasma,

mas não entre regiões diferentes do plasma. Este modelo de equilíbrio é aplicado a plasmas não homogêneos. Para o ETL são válidas as condições de equilíbrio dadas pelas equações de Maxwell, Boltzman e Saha e não é válida a equação de Planck. Estas equações são apresentadas a seguir:

1. a distribuição de velocidades das partículas é descrita pela equação de Maxwell:

$$f(v_r) = \frac{4v_r^2}{\sqrt{\pi}(2kT_{cin}/m_r)^3} e^{-m_r v_r^2/(2kT_{cin})}, \quad (2.2)$$

onde,

v_r é a velocidade das partículas de espécie r ,

m_r é a massa das partículas de espécie r ,

T_{cin} é a temperatura cinética de todas as partículas de espécie r ;

2. a densidade de população dos estados excitados de espécie r segue a distribuição de Boltzman,

$$n_{r,s} = n_r \left(\frac{g_{r,s}}{Z_r} \right) e^{(-X_{r,s}/kT_{ex})}, \quad (2.3)$$

onde,

$n_{r,s}$ é a densidade de partículas de espécie r no nível quântico s ,

$g_{r,s}$ é o peso estatístico do nível quântico s ,

Z_r é a função de partição da espécie r ,

$X_{r,s}$ é a energia do estado quântico s ,

T_{ex} é a temperatura de excitação das partículas de espécie r ;

3. a densidade de partículas (neutras, elétrons e íons) é descrita pela equação de Saha,

$$\frac{n_{r+1}n_e}{n_r} = \left(\frac{2Z_{r+1}}{Z_r} \right) \left[(2\pi m_e kT_{ion})^{3/2}/h^3 \right] e^{(-X_{r+1}/kT_{ion})}, \quad (2.4)$$

onde,

X_{r+1} representa a energia de ionização do estado r para $r + 1$

n_{r+1} é a densidade de partículas no estado $r + 1$ ionizado,

T_{ion} é a temperatura de ionização.

No ETL o plasma exibe a mesma temperatura termodinâmica T em todas as relações acima, ou seja,

$$T_{cin} = T_{ex} = T_{ion} = T \quad (2.5)$$

E para fechar o conceito do ETL a relação de Planck para a radiação não é satisfeita pois a radiação é livre de escapar pelos limites do plasma.

2.2 Maçarico de plasma

O maçarico de plasma é um equipamento que transforma a energia elétrica de um arco em energia térmica do jato de plasma, podendo ser do tipo não-transferido, transferido ou superposto conforme mostra a Fig. 2. As temperaturas alcançadas pelo jato de plasma são bem mais altas que as temperaturas alcançadas por tochas de combustão utilizadas em metalurgia [1].

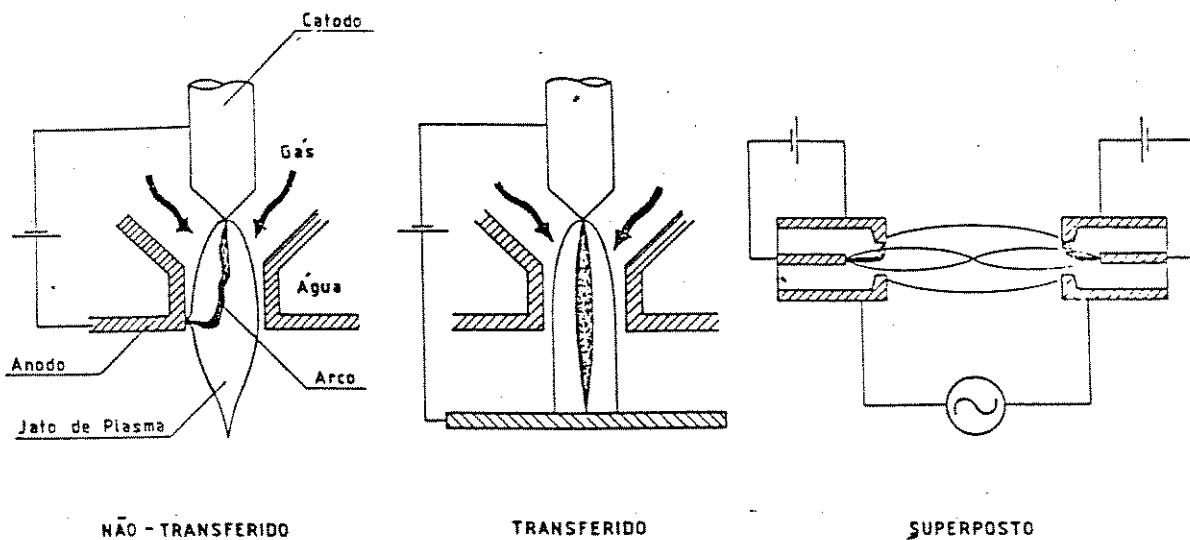


Fig. 2: Tipos básicos de maçaricos de plasma.

2.2.1 Fundamentos teóricos do maçarico de plasma

O plasma estacionário de arco elétrico numa tocha de plasma pode ser descrito por um sistema de equações que contém: as equações gasodinâmicas (conservação de massa, quantidade de movimento e energia),

$$\operatorname{div}(\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (2.6)$$

$$\rho(\mathbf{v} \cdot \operatorname{grad})\mathbf{v} = \mathbf{j} \times \mathbf{B} - \operatorname{grad} p \quad (2.7)$$

$$\rho \mathbf{v} \cdot \operatorname{grad} \left(h + \frac{1}{2}v^2 \right) = \mathbf{j} \cdot \mathbf{E} + \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + Q, \quad (2.8)$$

as equações eletrodinâmicas de Maxwell e a equação de Ohm,

$$\operatorname{div} \mathbf{j} = 0 \quad (2.9)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} \quad (2.10)$$

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}, \quad (2.11)$$

a equação de estado termodinâmico,

$$p = \rho R_g T, \quad (2.12)$$

as equações das constantes físicas do sistema $\rho = \rho(T, p)$, $h = h(T, p)$, $\sigma = \sigma(T, p)$, $\lambda = \lambda(T, p)$, $\mu = \mu(T, p)$, e as condições de contorno, onde,

ρ é a densidade,

\mathbf{v} é a velocidade,

\mathbf{E} é o campo elétrico,

\mathbf{j} é a densidade de corrente,

\mathbf{B} é a indução magnética,

p é a pressão,

h é a entalpia,

λ é a condutividade térmica,

Q é o fluxo de radiação,

$R_g = R_o/M$ é a constante do gás, onde R_o é a constante universal dos gases e M o peso molecular.

Uma solução completa deste sistema forneceria informações muito úteis sobre o comportamento do arco, como por exemplo a temperatura no eixo em função da potência de entrada, porém devido ao grande número de fenômenos envolvidos esta é uma tarefa extremamente difícil.

Com base na Teoria da Similaridade e considerando apenas os processos mais significativos que ocorrem no arco é possível trabalhar com um número limitado de parâmetros adimensionais obtidos a partir das equações acima. Este número pode ainda ser reduzido estimando-se valores para alguns parâmetros após observação experimental de uma dada configuração do arco elétrico.

São conhecidos da gasodinâmica clássica os seguintes parâmetros adimensionais: o número de Mach $M = v/a$, a constante adiabática $\kappa = c_p/c_v$, o número de Reynolds $Re = \rho v d/\mu$, o número de Prandtl $Pr = \mu c_p/\lambda$, onde,

v é a velocidade do gás,

a é a velocidade do som,

c_p e c_v são os calores específicos,

ρ é a densidade,

d é o diâmetro,

μ é a viscosidade,

λ é a condutividade térmica.

Um arco estacionário em um fluxo de gás pode ser descrito pelo conjunto de equações (2.6-2.8). Essas equações podem ser escritas na forma adimensional, fazendo uso de valores de referência (denotados com subscrito zero), e tendo L como comprimento de referência. Dividimos a equação (2.7) da quantidade do movimento pelo termo inercial $\rho_0 v_0^2/L$ e a equação da energia (2.8) pelo termo de aquecimento por efeito Joule $j_0 E_0$. Os parâmetros adimensionais resultantes da equação da quantidade de movimento são:

$$\Pi_p = \frac{p_0}{\rho_0 v_0^2} \quad \text{e} \quad \Pi_{em} = \frac{j_0 B_0 L}{\rho_0 v_0^2}, \quad (2.13)$$

que refletem as forças de interação no arco elétrico.

Da equação da energia resultam os parâmetros adimensionais:

$$\Pi_h = \frac{\rho_0 v_0 h_0}{j_0 E_0 L}, \quad \Pi_{ac} = \frac{\rho_0 v_0^3}{j_0 E_0 L}, \quad \Pi_{hc} = \frac{\lambda_0 T_0}{j_0 E_0 L^2} \quad \text{e} \quad \Pi_r = \frac{Q_0}{j_0 E_0}, \quad (2.14)$$

que refletem, respectivamente, energia Joule convertida em energia do fluxo de gás aquecido, energia usada na aceleração do gás, energia transferida por convecção e por radiação térmica.

Os parâmetros, resultantes das equações de Maxwell e da lei de Ohm são:

$$\Pi_m = \frac{\mu_0 j_0 L}{B_0} \quad \text{e} \quad \Pi_E = \frac{\sigma_0 E_0}{j_0}, \quad (2.15)$$

os quais refletem a relação entre os campos magnético próprio e o campo externo e o processo de transferência de carga no campo elétrico.

Das condições de contorno obtêm-se os parâmetros adicionais:

$$\frac{L_i}{L}, \quad \frac{T_i}{T_0}, \quad \frac{p_i}{p_0}, \quad \frac{v_i}{v_0}, \dots \quad (2.16)$$

Nenhum dos parâmetros adimensionais acima, pode ser usado imediatamente na correlação das características de um arco elétrico, tendo em vista que contêm grandezas desconhecidas, tais como densidade de corrente ou velocidade. Entretanto, pode-se facilmente excluí-las, fazendo uso de diferentes combinações. Tais combinações dependerão das condições sob as quais o arco existe.

Consideremos o plasmatron de eletrodos cilíndricos. Além dos parâmetros adimensionais acima obtêm-se, das equações integrais:

$$I = \int_S \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S} \quad \text{e} \quad U = \int_1 \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \quad (2.17)$$

os parâmetros adimensionais, respectivamente, para a corrente e tensão no arco,

$$\Pi_I = \frac{j_0 d^2}{I} \quad \text{e} \quad \Pi_U = \frac{E_0 L}{U}. \quad (2.18)$$

Combinando-se os parâmetros acima, podemos obter o critério (ou parâmetro adimensional) para a tensão no arco,

$$S_u = \frac{\sigma_0 U d}{I}, \quad (2.19)$$

e o critério energético pode ser expresso em função da vazão $G = \pi \rho_0 v_0 d^2 / 4$, i. e.,

$$S_i \sim \frac{I^2}{\sigma_0 h_0 G d}. \quad (2.20)$$

Outras combinações dos parâmetros adimensionais originais permitem obter os números de Reynolds e de Prandtl, respectivamente,

$$Re = \frac{\rho_0 v_0 d}{\mu_0} \sim \frac{G}{\mu_0 d} \quad \text{e} \quad Pr = \frac{\mu_0 c_p 0}{\lambda_0}. \quad (2.21)$$

A ruptura do arco para a parede tem importante papel no plasmatron, principalmente no de arco com comprimento auto-estabelecido [21]. O número de Knudsen reflete esse efeito. A tensão de ruptura é dada pela Lei de Paschen, que depende do produto da pressão p pela distância d entre os eletrodos. O número de Knudsen

$$Kn = \frac{1}{pd} \quad (2.22)$$

pode ser obtido como combinação dos números de Reynolds e do número de Mach pela equação $Kn \sim M/Re$.

A experiência mostra que com apenas os quatro critérios S_u , S_i , Re e Kn é possível generalizar a equação para a característica $V - I$ do plasmatron de arco com comprimento auto-estabelecido, com estabilização por vórtice e na ausência de campo magnético. Estes critérios podem ser escritos na forma [20]:

$$S_u = C_0 \frac{Ud}{I}, \quad S_i = C_1 \frac{I^2}{Gd}, \quad Re = C_2 \frac{G}{d}, \quad Kn = C_3 \frac{1}{pd}, \quad (2.23)$$

onde, C_0, C_1, C_2, C_3 são combinações dimensionais das propriedades físicas (densidade, viscosidade, etc), tomadas como valores de referência, e são consideradas aproximadamente como constantes. Aproxima-se a função $\sigma = f(h)$ por duas potências e o ponto de encontro é tomado como valor de referência (Fig. 3) [19].

Para a equação característica tensão-corrente obtém-se, então,

$$S_u = A S_i^{\alpha'} Re^{\beta'} Kn^{\gamma'}, \quad (2.24)$$

onde $A, \alpha', \beta', \gamma'$ são constantes.

Observando que $d/I = [I^2/Gd]^{-0,5} \cdot (G/d)^{-0,5}$, podemos explicitar na equação acima a tensão, obtendo-se:

$$U = C_u \left[\frac{I^2}{Gd} \right]^\alpha \left(\frac{G}{d} \right)^\beta (pd)^\gamma. \quad (2.25)$$

Para o plasmatron de arco auto-estabelecido, com estabilização por vórtice, polaridade direta e gás plasmagênico ar, Zhukov [20] mostrou que a equação característica tensão-corrente tem a forma,

$$U = 1290 \left[\frac{I^2}{Gd} \right]^{-0,15} \left(\frac{G}{d} \right)^{0,30} (pd)^{0,25}. \quad (2.26)$$

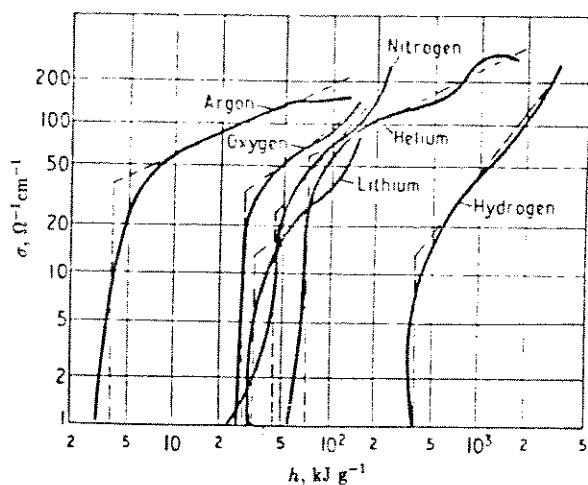


Fig. 3: Condutividade elétrica em função da entalpia à pressão atmosférica [19].

De forma semelhante foi obtida a equação para a eficiência do plasmatron de arco auto-estabelecido:

$$(1 - \eta)/\eta = 0,585 \cdot 10^{-4} \left[\frac{I^2}{Gd} \right]^{0,27} \left(\frac{G}{d} \right)^{-0,27} (pd)^{0,3070,50}, \quad (2.27)$$

onde, a eficiência $\eta = G \Delta h / UI$ e $\bar{l} = l/d$, sendo l e d , respectivamente, o comprimento e o diâmetro do anodo.

Na interação do arco elétrico com o fluxo de gás e as paredes do canal do anodo, ocorrem fenômenos importantes que determinam a distribuição do campo

elétrico ao longo do canal, o comprimento do arco e as perdas térmicas e são de grande importância pois permitem prever quais as medidas a serem adotadas para aumentar a potência, a eficiência ou a entalpia do gás. A Fig. 4 mostra as regiões em que se divide o canal de arco elétrico de uma tocha de plasma do tipo não-transferido. Podemos dividir o canal radialmente em 4 regiões: arco, camada térmica, fluxo livre laminar e camada limite. A camada térmica desenvolve-se junto ao arco e a camada limite junto à parede. A região inicial do arco no canal vai do catodo (ponto A) até o encontro da camada limite turbulenta com a camada térmica no ponto B. No ponto C a camada térmica encontra-se com a parede. Este esquema permite prever que as perdas de calor do arco para as paredes por convecção só tem início à partir do ponto C, quando ocorre o encontro da camada térmica com a parede. Do ponto A até C as perdas de calor do arco para a parede só podem ocorrer por radiação. Uma das características da primeira região AB é o valor constante do campo elétrico ao longo do comprimento do canal e sua independência com a vazão. A partir de D o campo começa a crescer atingindo o valor máximo em E, e daí em diante permanece constante [22,20].

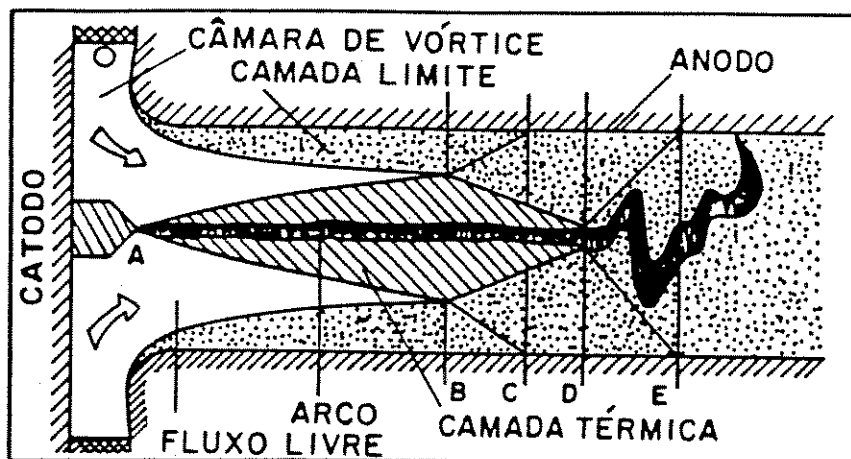


Fig. 4: Interação do arco com o fluxo de gás e a parede [21].

No ponto D dá-se o encontro da fronteira da camada limite com o próprio arco. A turbulência da camada limite tira o arco de sua posição estável no eixo do canal, facilitando a ruptura.

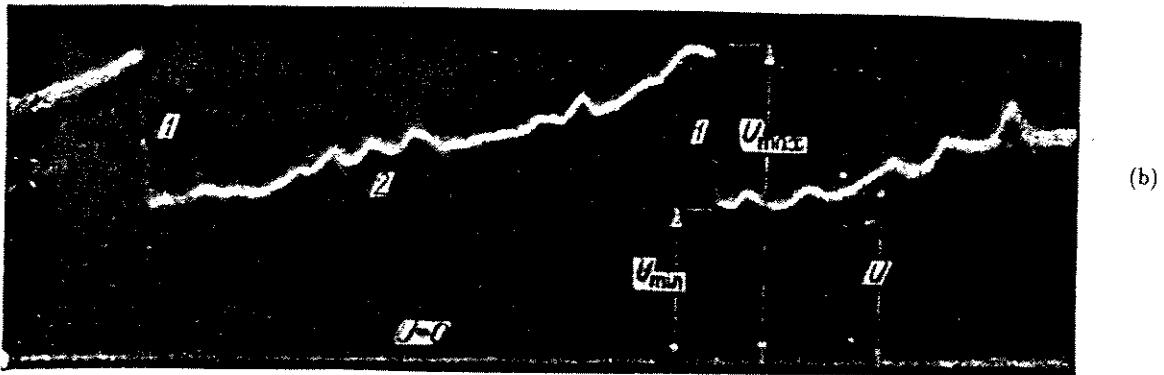
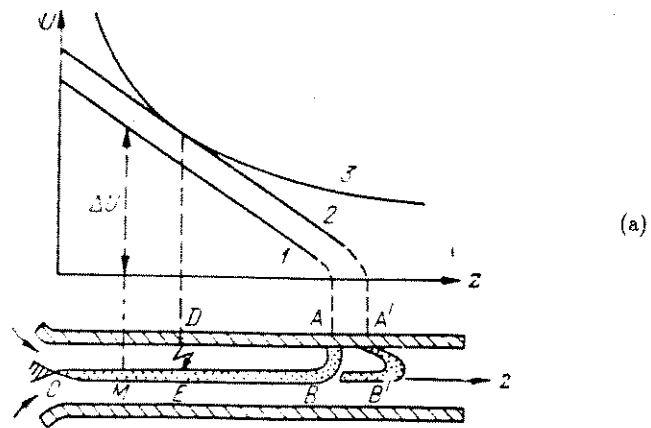


Fig. 5: (a) 1 e 2 - tensão entre o arco e parede do anodo numa dada secção; 3 - tensão de ruptura do gás entre o arco e a parede do anodo para uma dada secção; z - distância ao longo do eixo do anodo; (b) Oscilograma da tensão de operação do maçarico [21].

Consequentemente, isso limita o comprimento do arco no canal. Do ponto E à jusante tem início o escoamento turbulento plenamente desenvolvido do plasma no canal. A construção de tochas de plasma do tipo de arco com comprimento auto-estabelecido, com anodo tubular longo, muito maior do que o comprimento AE, tem baixa eficiência, devido à grande perda de calor para as paredes, à jusante da secção E. Isso significa que, nesse tipo de maçarico, devemos limitar o comprimento do anodo ao comprimento AE para se obter a máxima eficiência .

O aumento das perdas de calor para as paredes do anodo são uma consequência deste comportamento do arco no interior do canal, pois quando a corrente aumenta mantendo-se a vazão constante ocorre uma abertura do ângulo da camada térmica devido a uma maior convecção de calor a partir do arco, com isto o ponto de encontro (ponto B) entre a camada térmica e a camada limite ocorre mais próxima ao catodo, o mesmo ocorrendo com os outros pontos. Com isto, haverá uma maior área de troca de calor do gás com a parede, aumentando as perdas. Como o arco terá um menor comprimento isto implicará numa diminuição da tensão de operação do maçarico. Um efeito contrário ocorre se a vazão for aumentada mantendo-se a corrente contante, fazendo com que as perdas diminuam e provocando um aumento da tensão. Conclusão: a tensão diminui com o aumento da corrente, a tensão aumenta com o aumento da vazão e as perdas para o anodo aumentam com o aumento da corrente.

A oscilação axial do comprimento do arco no interior do anodo é mostrada na Fig. 5 e pode ser entendida da seguinte maneira: a porção radial do arco move-se para frente sob a ação da força de arraste do gás. A tensão de ruptura do gás entre o arco e a parede do canal é representada na curva 3 e diminui com o aumento da temperatura. A diferença de tensão entre o arco e a parede do canal está representada nas curvas 1 e 2. Então, à medida que o “pé do arco” se desloca na parede do canal soprado pelo próprio fluxo, a curva 1 é deslocada na direção da curva 2. A curva 2, ao tangenciar a curva 3, corresponderá a uma diferença de potencial entre os pontos D e E igual a tensão de ruptura do gás entre estes pontos. Sendo assim uma ruptura do arco para a parede deverá ocorrer nesse ponto, fazendo

com que o comprimento do arco diminua. Este processo se repete ininterruptamente e é o responsável pela formação da onda “dente de serra” mostrada no oscilograma da Fig. 5b.

A frequência de ruptura do arco está relacionada com a vazão do gás conforme mostra a Fig. 6. Neste gráfico pode-se observar que para uma vazão $G = 1.0 \times 10^{-3}$ kg/s em um anodo de diâmetro $d = 1.0 \times 10^{-2}$ m, a frequência de ruptura estará em torno de 2 kHz.

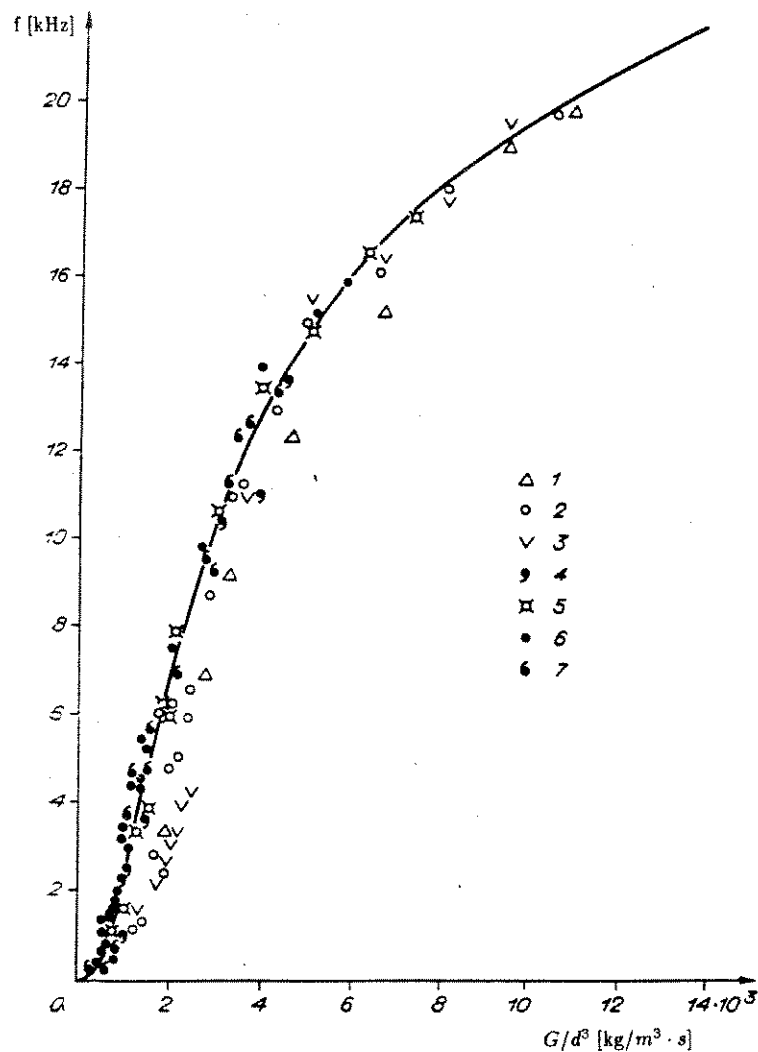


Fig. 6: Gráfico da frequência de ruptura em função da vazão e do diâmetro do anodo. 1, 2, 3: $I = 80$ A, $I = 100$ A, $I = 150$ A e $d = 1$ cm; 4, 5: $I = 100$ A, $I = 150$ A e $d = 1,5$ cm; 6, 7: $I = 100$ A, $I = 150$ A e $d = 2$ cm [21].

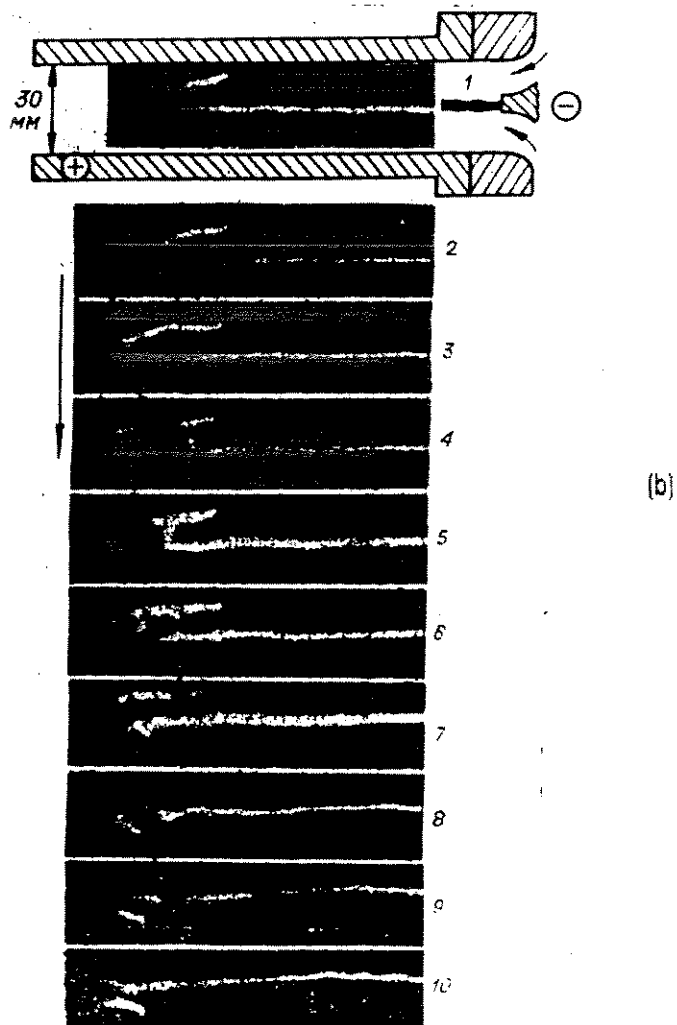
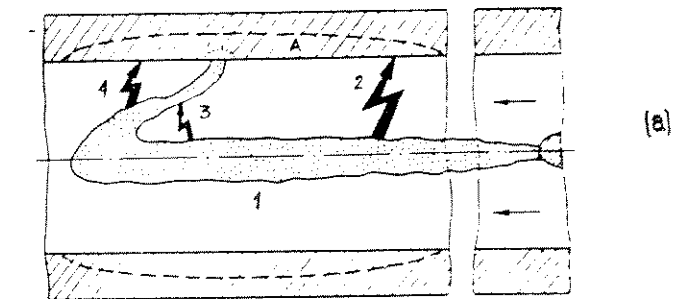


Fig. 7: (a) Tipos de ruptura do arco no canal do anodo; (b) Fotos da ruptura do arco no canal do anodo [21].

Esta não é a única forma de ruptura que ocorre no interior do canal. A Fig. 7a mostra os três tipos de ruptura que podem ocorrer: do corpo do arco para a parede (2), do corpo do arco para o arco (3) e da parte radial do arco para a parede (4). Na Fig. 7b é mostrada uma sequência de fotos [21] do arco no canal do anodo onde pode-se observar a ocorrência das rupturas tipo 2 (foto nº4 e foto nº8).

Este é um fenômeno importante para a operação do equipamento porque a movimentação do arco pela parede do anodo faz com que o calor e a erosão sejam distribuídos por uma grande área, proporcionando assim uma maior vida útil para o eletrodo.

2.2.2 Aspectos construtivos

A escolha dos eletrodos (catodo e anodo) como qualquer outro componente do maçarico, depende do desempenho desejado para uma determinada aplicação. Em alguns casos eletrodos consumíveis (carbono, grafite ou metal) podem ser aceitáveis ou até mesmo desejáveis (dependendo do processo onde o maçarico for aplicado). Por outro lado em outras aplicações deve-se tomar cuidado na escolha dos eletrodos, pois isto pode resultar em contaminação do processo, devendo-se optar por eletrodos não consumíveis. Neste caso, é necessário buscar uma minimização na erosão dos eletrodos com o objetivo de assegurar uma maior vida útil dos mesmos diminuindo assim os custos de operação.

No sentido de diminuir o desgaste dos eletrodos, um sistema de refrigeração eficiente deve ser utilizado além de outras medidas. Isto porém pode reduzir a eficiência do maçarico, o que é indesejável, principalmente para aplicações contínuas onde um dos objetivos é maximizar a utilização da energia elétrica aplicada.

1. catodo:

Existem dois tipos de catodos utilizados em maçaricos: catodo “quente” e catodo “frio”. No catodo tipo “quente” o fenômeno predominante é a emissão termoiônica. No catodo tipo “frio” a liberação de elétrons ocorre predominantemente por emissão de campo.

Para a confecção de catodos “quentes” são utilizados três tipos de materiais refratários: tungstênio, zircônio, e o háfnio. O cobre é amplamente utilizado como catodo “frio”.

2. anodo:

O anodo tem um papel mais passivo em um arco que o catodo, mas pode consumir uma grande parcela da potência total dissipada no arco. Com isso torna-se necessário uma proteção térmica por refrigeração a água. Embora a erosão em anodos refrigerados não seja tão severa quanto a do catodo o fluxo de calor em anodos de arcos de alta intensidade pode chegar a valores da ordem de 10^5 até 10^6 W/cm^2 .

É comum usar anodos na forma de tubos, discos, bocais ou anéis dependendo da aplicação do aquecedor. Anodos em forma de bocais são bastante utilizados em aquecedores e neste caso não funcionam apenas como anodo, eles atuam como um “estrangulador” do arco aumentando o nível de entalpia do jato de plasma. Para gerar jatos supersônicos de plasma bocais supersônicos podem ser usados pelo menos parcialmente como anodos. A distribuição do fluxo de calor sobre uma maior área do anodo pode levar a uma diminuição da erosão de maneira análoga à ocorrida no catodo. A escolha de um material próprio para o anodo não é tão crítica quanto para o material do catodo.

3. tipo de fluxo:

O principal objetivo de um aquecedor a arco (maçarico de plasma) é um bem controlado e eficiente aquecimento de gases. Um importante pré requisito para se atingir esta meta, é a escolha apropriada do tipo de fluxo de gás e a interação resultante do arco com o fluxo sobreposto inclusive a estabilização da coluna do arco. Existem várias opções de fluxos de gás disponíveis para o projeto:

fluxo coaxial

fluxo cruzado

fluxo radial
fluxo em vórtice

O fluxo em vórtice é utilizado pelas seguintes razões:

- (a) proporciona uma excelente estabilização do arco mesmo em tubos de grande diâmetro,
- (b) leva a uma excelente proteção térmica da parede do tubo na qual o arco opera.
- (c) a intensa interação do fluxo de gás com o arco provoca um aumento das forças de campo, ou seja, aquecedores a arco que usam fluxo em vórtice são dispositivos de alta tensão com alta eficiência térmica.

O fluxo em vórtice é obtido através da câmara de vórtice situada entre os eletrodos para injetar tangencialmente o fluxo de gás, de modo a provocar uma vorticidade que se mantém até a saída do anodo. A vorticidade do fluxo provoca uma rotação do “pé do arco” pela superfície do anodo o que também melhora a distribuição da erosão contribuindo para um aumento da vida útil do anodo.

2.3 Sonda de Entalpia

Vários métodos ópticos espectrométricos, eletromagnéticos e térmicos são utilizados para se determinar a temperatura em jatos de plasma [2].

A sonda de entalpia utilizada neste trabalho, foi desenvolvida pela primeira vez por Grey [7]. Trata-se de um método calorimétrico onde é determinada a temperatura local do jato de plasma, a partir da entalpia local. A entalpia local é calculada de uma maneira simples aplicando-se a equação do balanço energético a um fluxo de água que refrigera uma amostra de gás succionada do jato. Os erros provenientes do fluxo de calor externo são eliminados fazendo-se a “tara” das trocas de calor calculadas.

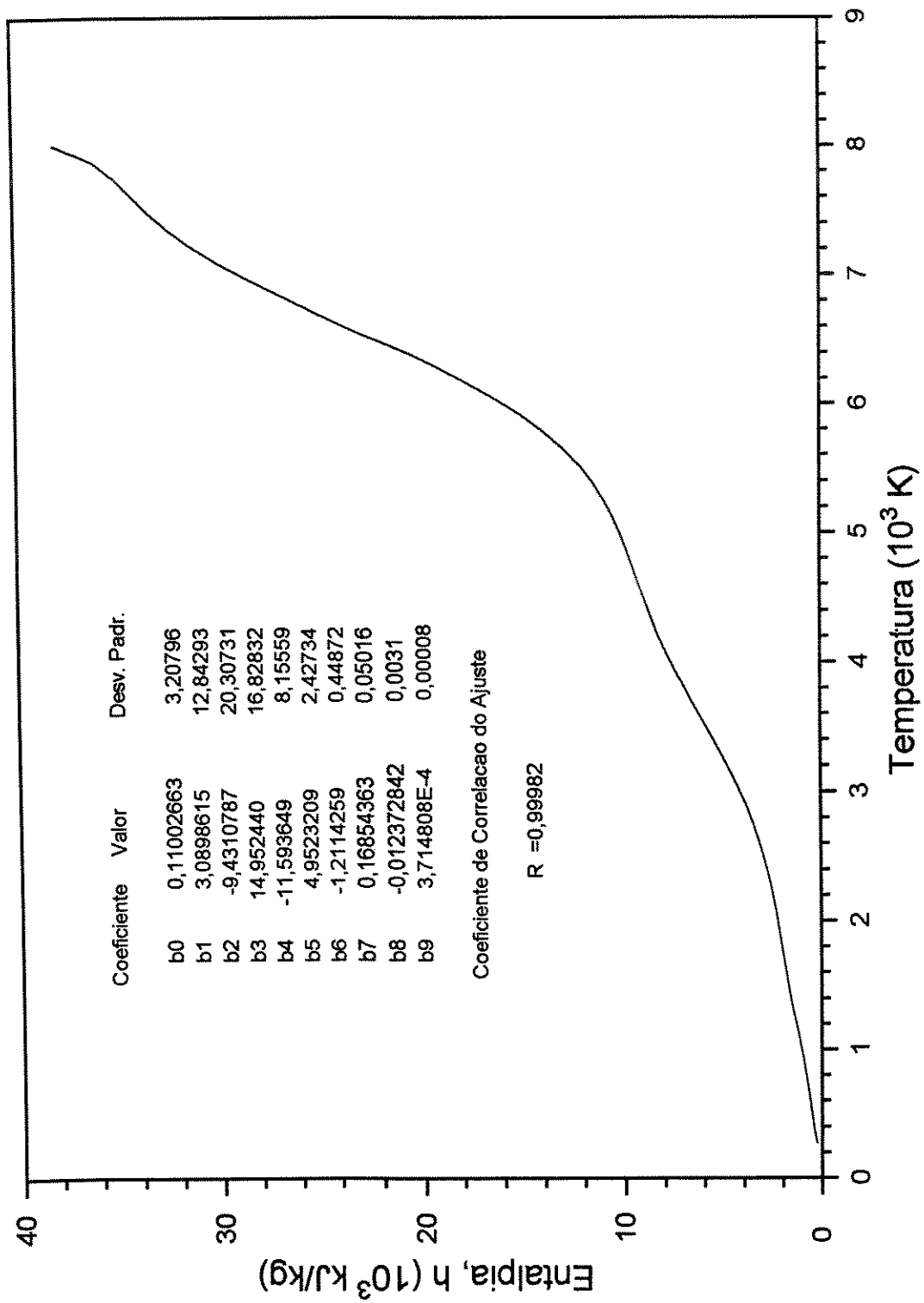


Fig. 8: Entalpia em função da temperatura do ar a 1 atm. Gráfico obtido por ajuste polinomial de ordem 9 aos valores da tabela [17].

Estes cálculos são perfeitamente aceitáveis uma vez que o jato de plasma em estudo encontra-se em ETL conforme discussão na secção 2.1.

2.3.1 Fundamentos teóricos

Para se fazer a medida de temperatura a sonda é mergulhada no jato de plasma e uma amostra de gás é sugada.

Nestas condições são tomadas três temperaturas:

$T_{a_{ent}}^{cf}$, temperatura de entrada da água;

$T_{a_{sai}}^{cf}$, temperatura de saída da água;

T_g , temperatura de saída do gás.

Em seguida a sucção é interrompida e novamente são tomadas duas temperaturas:

$T_{a_{ent}}^{sf}$, temperatura de entrada da água;

$T_{a_{sai}}^{sf}$, temperatura de saída da água.

Os índices *cf* e *sf* são utilizados para diferenciar as condições com fluxo (com sucção) e sem fluxo (sem sucção) de gás.

As vazões mássicas do gás (\dot{m}_g) na condição com fluxo e da água de refrigeração (\dot{m}_a) são conhecidas a partir de medidas feitas utilizando-se rotâmetros.

O valor considerado para o calor específico da água (c_{pa}) é $4.174 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ \text{C}$.

De posse destas grandezas e utilizando a equação de balanço energético para as duas condições, são obtidas as equações abaixo:

$$\dot{m}_g(h_{1g} - h_{2g}) + Q_{ext} = \dot{m}_a c_{pa} \Delta T_a^{cf} \quad (2.28)$$

$$Q_{ext} = \dot{m}_a c_{pa} \Delta T_a^{sf} \quad (2.29)$$

Assumindo que a quantidade de calor externo (Q_{ext}) é a mesma para as duas condições é feita então a “tara” das medidas, subtraindo a eq.2.29 da eq.2.28 obtendo após rearranjar ambos os membros:

$$h_{1g} = \frac{\dot{m}_a c_{pa}}{\dot{m}_g} (\Delta T_a^{cf} - \Delta T_a^{sf}) + h_{2g} \quad (2.30)$$

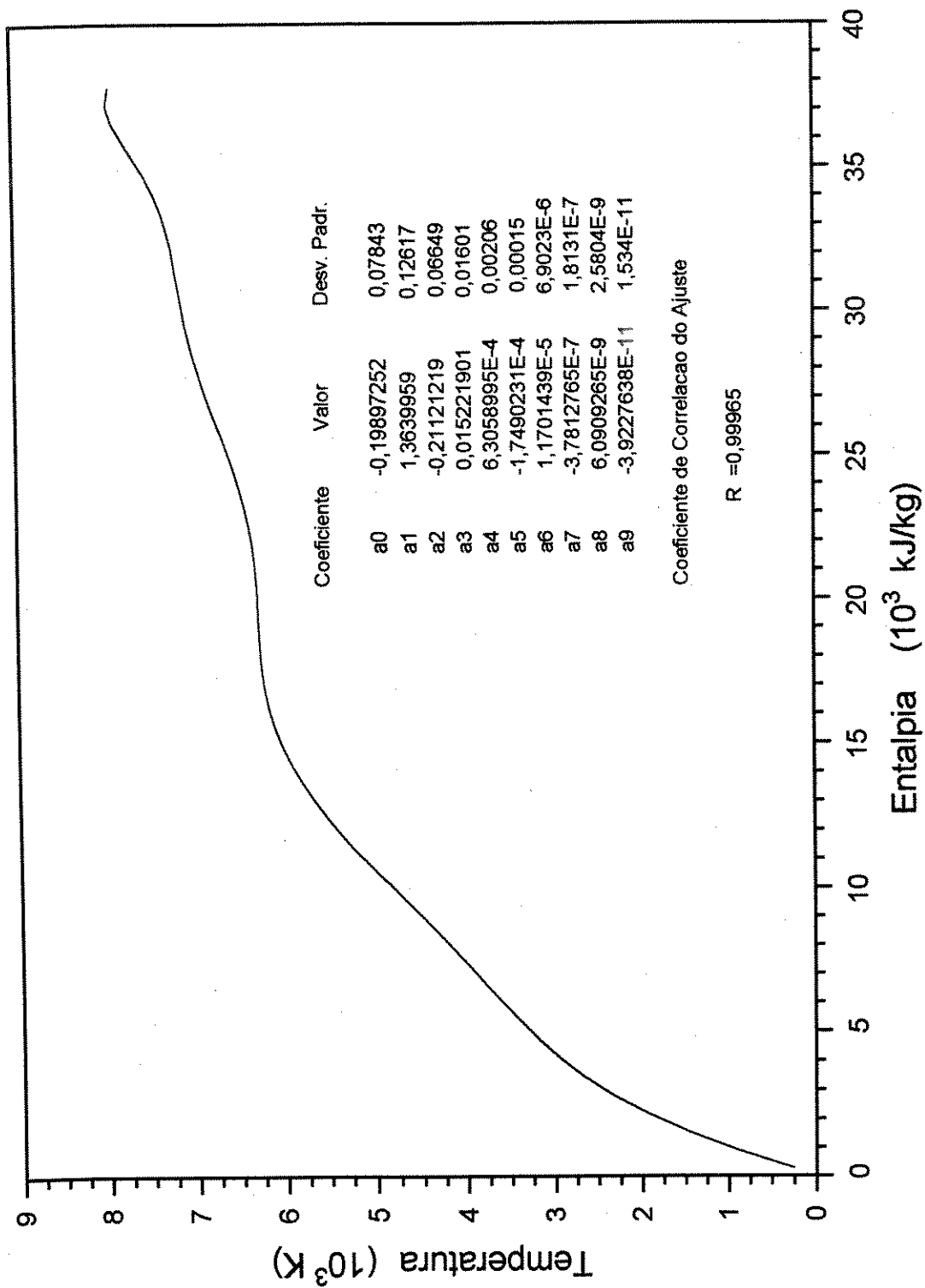


Fig. 9: Temperatura em função da entalpia do ar a 1 atm. Gráfico obtido por ajuste polinomial de ordem 9 aos valores da tabela [17].

A entalpia de saída do gás (h_{2g}) pode ser obtida a partir da temperatura de saída do gás (T_{2g}), aplicada ao polinômio $h = b_0 + b_1T + b_2T^2 + \dots + b_9T^9$, ajustado aos pontos de uma das tabelas de propriedades termodinâmicas de gases e líquidos da referência [17]. O gráfico $h = f(T)$ e os coeficientes estão mostrados na Fig. 8. Sendo assim, a única grandeza desconhecida passa a ser a entalpia de entrada do gás h_{1g} .

Uma vez calculada a entalpia de entrada do gás, utilizamos outro polinômio $T = a_0 + a_1h + a_2h^2 + \dots + a_9h^9$, ajustado aos mesmos pontos da tabela russa de propriedades termodinâmicas de gases e líquidos [17], para se obter a temperatura de entrada do gás. O gráfico deste polinômio e os respectivos coeficientes são apresentados na Fig. 9.

Foi utilizado o polinômio de grau 9 para o ajuste aos pontos da tabela da referência [17], por ele ter apresentado o melhor aos pontos .

Para a sonda de entalpia a sensibilidade foi definida por Grey em [8] como sendo:

$$\sigma \equiv \frac{(\Delta T_a^{cf} - \Delta T_a^{sf})}{\Delta T_a^{cf}}, \quad (2.31)$$

onde, ΔT_a é a variação da temperatura do fluido refrigerante e os índices $()^{cf}$ e $()^{sf}$ correspondem às condições com fluxo e sem fluxo respectivamente.

Em outras palavras a sensibilidade corresponde ao valor normalizado da quantidade de calor entregue pela amostragem contínua de gás ao fluido refrigerante, tomando como base a quantidade de calor total recebida pelo fluido refrigerante na condição com fluxo.

A partir da eq.2.31 Grey obteve a seguinte expressão para a sensibilidade da sonda:

$$\sigma \approx \left(\frac{d_i^3}{D_o} \right) \frac{1}{L} \left(\frac{S}{\dot{m}} \right) \frac{p\Delta P}{T^{3/2}} \quad (2.32)$$

onde,

d_i é o diâmetro interno da sonda,

D_o é o diâmetro externo da sonda,

L é o comprimento da sonda imerso no plasma,

\dot{m}/S é o fluxo de massa por unidade de área nas vizinhanças da sonda,

p é a pressão do gás na entrada da sonda,
 $(\Delta P)_g$ é a queda de pressão do gás no tubo,
 T é a temperatura ambiente,

Da fórmula 2.32 podem ser tiradas as seguintes informações importantes para serem usadas no projeto de uma sonda a fim de se obter uma máxima sensibilidade:

1. A razão d_i/D_o deve ser a maior possível, e isto é obtido usando-se um tubo interno com o maior diâmetro possível e um tubo externo com o menor diâmetro possível,
2. O comprimento L deve ser o menor possível para que o corpo da sonda não receba um calor excessivo do jato de plasma, o que é obtido posicionando-se a sonda transversalmente ao jato de plasma.

Outros aspectos relacionados com a precisão na medida da temperatura devem ser considerados no uso da sonda:

1. A amostragem de gás extraída pela sonda do plasma não deve ter uma vazão maior que a vazão local de gás do plasma na entrada da sonda se o perfil de temperatura for altamente não uniforme (grandes gradientes de temperatura). Se a amostragem de gás da sonda não satisfizer essa condição o valor da temperatura medido será menor no pico e maior nas bordas do perfil de temperatura. Essa condição pode ser relaxada para um fluxo não uniforme de pequeno gradiente, inclusive ausência total de fluxo.
2. A dependência da sensibilidade da vazão de água de refrigeração. É desejável que a vazão de água seja a menor possível para se ter um ΔT_a grande. Porém um valor muito baixo da vazão levará à destruição física da sonda. O ideal seria a construção da sonda com duas águas: uma para a refrigeração da parede externa da sonda e a outra para a medida da temperatura do plasma. Neste caso é possível fazer a vazão da água interna baixa e da água externa alta. Esse tipo de sonda é denominado de dupla jaqueta.

3. A sonda é limitada quando se deseja medir temperaturas de baixo fluxo de gás.

2.3.2 Aspectos construtivos

Seria desejável que a sonda tivesse as menores dimensões possíveis (pequeno diâmetro externo). Grey construiu sondas com D_o até 3.175 mm (alta impedância). Para isso ser possível utilizou água com pressão de até 50 atm. A alta pressão de água contribui para o aumento da transferência de calor, o que melhora a sensibilidade da sonda.

A forma da sonda é outro parâmetro importante. O melhor formato é o axial (eixo da sonda paralelo com o eixo do plasma). A sonda transversal do tipo coaxial usada nesta tese deve produzir uma perturbação no escoamento alterando o valor da temperatura local.

O tipo de sonda utilizada por Grey [7] foi o axial com uma dupla jaqueta d'água (mesma água nas jaquetas). Em operação seu eixo fica alinhado com o eixo da tocha de plasma. Com isso todo o seu corpo fica sujeito a todo calor externo.

Outro tipo de sonda (sonda transversal), utilizada em [4], possui apenas uma jaqueta d'água e é semelhante à sonda proposta por Dresvin em [5]. Essa sonda é de grande simplicidade construtiva e possibilita a obtenção de menores diâmetros externos, permitindo um aumento da sensibilidade. Outro aspecto desta sonda é seu posicionamento transversal ao eixo da tocha, com isto uma menor área fica sujeita ao fluxo de calor externo.

Num outro tipo de sonda, também com duas jaquetas de água, porém controladas independentemente, é possível diminuir a influência de calor externo que possa afetar as medidas.

A sonda utilizada neste trabalho (Fig. 22) é do tipo transversal coaxial, isto é, possui uma dupla jaqueta d'água (mesma água em ambas as jaquetas) assim como a de Grey, porém seu corpo é de cobre e seu posicionamento é transversal ao fluxo do jato assim como a utilizada em [4].

Capítulo 3

Parte Experimental

Para ser realizado este trabalho foi utilizado um sistema composto de três partes:

- um maçarico de plasma, equipamento construído na UNICAMP e responsável pela geração do jato de plasma;
- uma sonda de entalpia, que permite determinar a temperatura do jato de plasma, além de outras grandezas tais como velocidades e pressão.
- um sistema de aquisição de dados e controle, formado por um microcomputador PC interligado a um gerenciador de cartões através de um barramento GPIB, cartões de relés e conversor A/D e uma linguagem que implementa a comunicação entre o gerenciador e o microcomputador.

Foram utilizados também termopares, circuitos analógicos e de chaveamento construídos no laboratório e equipamentos de medição para condicionamento de sinais, os quais serão comentados nas seções que seguem.

3.1 Sistema de Aquisição de Dados (SAD)

A Fig. 10 apresenta os diagramas em blocos simplificado do sistema aplicado aos experimentos.

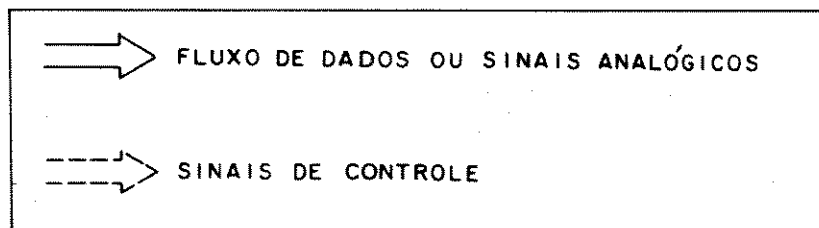
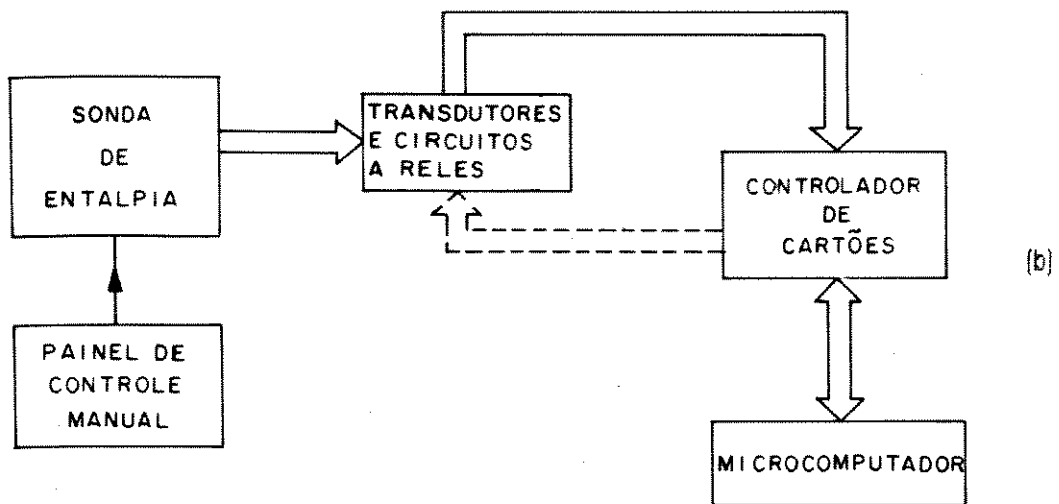
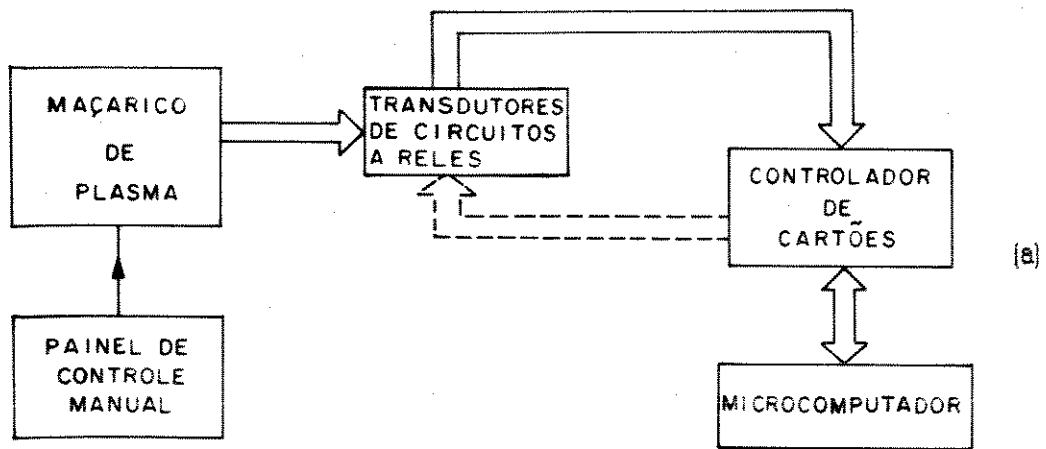


Fig. 10: (a) SAD aplicado ao maçarico de plasma; (b) SAD aplicado à sonda de entalpia.

Neste trabalho o SAD é dividido em três partes: o software ASYST que gera comandos de programação permitindo inclusive a implementação da comunicação via GPIB, o hardware composto pelo controlador de cartões, uma placa de relés, um conversor A/D e as placas de interface GPIB e as rotinas gerais desenvolvidas em linguagem ASYST utilizadas na comunicação via GPIB.

O controlador usado no SAD, é um “sistema inteligente” que pode operar com ou sem o auxílio de um microcomputador, gerenciando até 15 placas, entre cartões de relés, multiplexadores, conversores A/D e D/A e outros.

3.1.1 Software

Pode-se operar de duas maneiras com o ASYST: no modo iterativo ou no modo programado.

No modo iterativo de operação ele atua como uma calculadora executando instantaneamente operações matemáticas complexas em números ou em listas de números (arrays) com duas ou mais dimensões. Ainda neste modo o ASYST permite criar subrotinas, sendo possível então testar uma subrotina (colon definitions) iterativamente antes de colocá-la no programa final.

Todos os números e arrays no ASYST são referenciados através de uma área especial de memória chamada pilha numérica (stack number). Esta pilha é tecnicamente chamada de LIFO (Last In First Out), onde o último array ou número colocado na pilha é o primeiro a ser removido.

A maior parte dos comandos do ASYST opera na pilha numérica, entretanto, nem todos os resultados destas operações são números que podem ser colocados nesta pilha, como por exemplo, o resultado de uma operação de comparação (valor lógico).

Para solucionar este problema existe também um outro tipo de pilha chamado pilha de símbolos (symbol stack), que armazena valores lógicos e strings de caracteres.

No modo programado o ASYST opera utilizando palavras já existentes em seu dicionário, ou então utilizando-se de novas palavras que são definidas pelo

usuário.

O GPIB (General Purpose Interface Bus - Apêndice A) foi desenvolvido para proporcionar um poderoso e flexível padrão para interface de comunicação entre computadores e outros dispositivos, em especial para laboratórios e instrumentos de teste.

O ASYST torna este padrão de comunicação acessível ao micro, oferecendo comandos de fácil uso e um excelente ambiente de programação, além de ser totalmente integrado com outros módulos do ASYST, possibilitando assim que dados coletados a partir do barramento GPIB, sejam analisados, apresentados em tela, impressos ou plotados em gráficos.

A escolha de uma interface continua sendo uma incômoda tarefa, enquanto que a importância da escolha é cada vez maior a medida que os computadores são cada vez mais utilizados no controle de processos. Uma interface lenta e inflexível, pode reduzir enormemente a capacidade do mais potente computador. As primeiras interfaces eram caracterizadas por software e hardware especializados desenvolvidos para uma única aplicação, e frequentemente não possibilitavam uma adaptação para uma aplicação diferente por menor que fosse a diferença.

Como uma solução para este problema é que foi desenvolvido o padrão GPIB, que também é conhecido como HP-IB e IEEE-488. O nome IEEE-488 surgiu da adoção do padrão pelo Institute for Electrical and Electronics Engineers, publicando seu padrão IEEE-488 em 1975 e revisando-o em 1978 e 1980. O termo HP-IB é devido a Hewlett-Packard Company ter desenvolvido o barramento e patenteado seu esquema de "handshake" (Apêndice A).

As principais vantagens do GPIB sobre as outras interfaces são as seguintes:

- redução dos requisitos de hardware do computador para uma interface para todo o sistema ao invés de uma interface para cada dispositivo;
- como resultado de uma padronização do hardware o GPIB caminha para uma generalização do software.

O ASYST-GPIB/IEEE-488 é um desses resultados e para que seus coman-

dos possam ser utilizados é necessário que o ASYST seja configurado de acordo com o hardware conectado (STD-8410) no barramento do micro, uma vez que ele oferece uma lista de opções de placas

Neste trabalho a placa (STD-8410) que faz a interface do multiprogramador com o micro é compatível com a placa National Instruments GPIB-PC1, pertencente a lista de opções do ASYST, e está configurada para o barramento número 0, pois são 4 (quatro) os barramentos que o ASYST pode controlar.

Como qualquer outro dispositivo no barramento a placa STD-8410 deve ter um endereço primário, que neste caso é 0.

Desta maneira o conjunto micro-STD-8410 é tratado pelo ASYST como o ente ME.

Para que o micro tenha acesso aos registradores de dados da placa GPIB é necessário que seja fornecido o endereço hexadecimal de E/S nela configurado que, como será visto a seguir, é 2B8 (hexa).

Caso outra placa venha a ser instalada no micro, é necessário que sua faixa de endereços seja diferente da faixa da placa atualmente instalada.

As últimas configurações a serem feitas são: a do ente ME como controlador do sistema, qual a linha de interrupção a ser usada para que se possa trabalhar no modo assíncrono e qual será o nível de interrupção desejado.

Para que esta configuração possa ser utilizada sempre que se deseje utilizar o SAD é necessário salvá-la no disco rígido.

3.1.2 Hardware

Os princípios de emprego e operação do multiprogramador (STD-85MP) podem ser melhor entendidos analisando-se o diagrama em blocos na Fig. 11.

Neste trabalho o multiprogramador está inserido em um ambiente onde ele atua como leitor de grandezas elétricas analógicas (tensão, corrente e temperatura) e como chaveador de circuitos externos (circuitos de termopares e controlador de um motor cc), através de dois cartões de E/S instalados no bastidor.

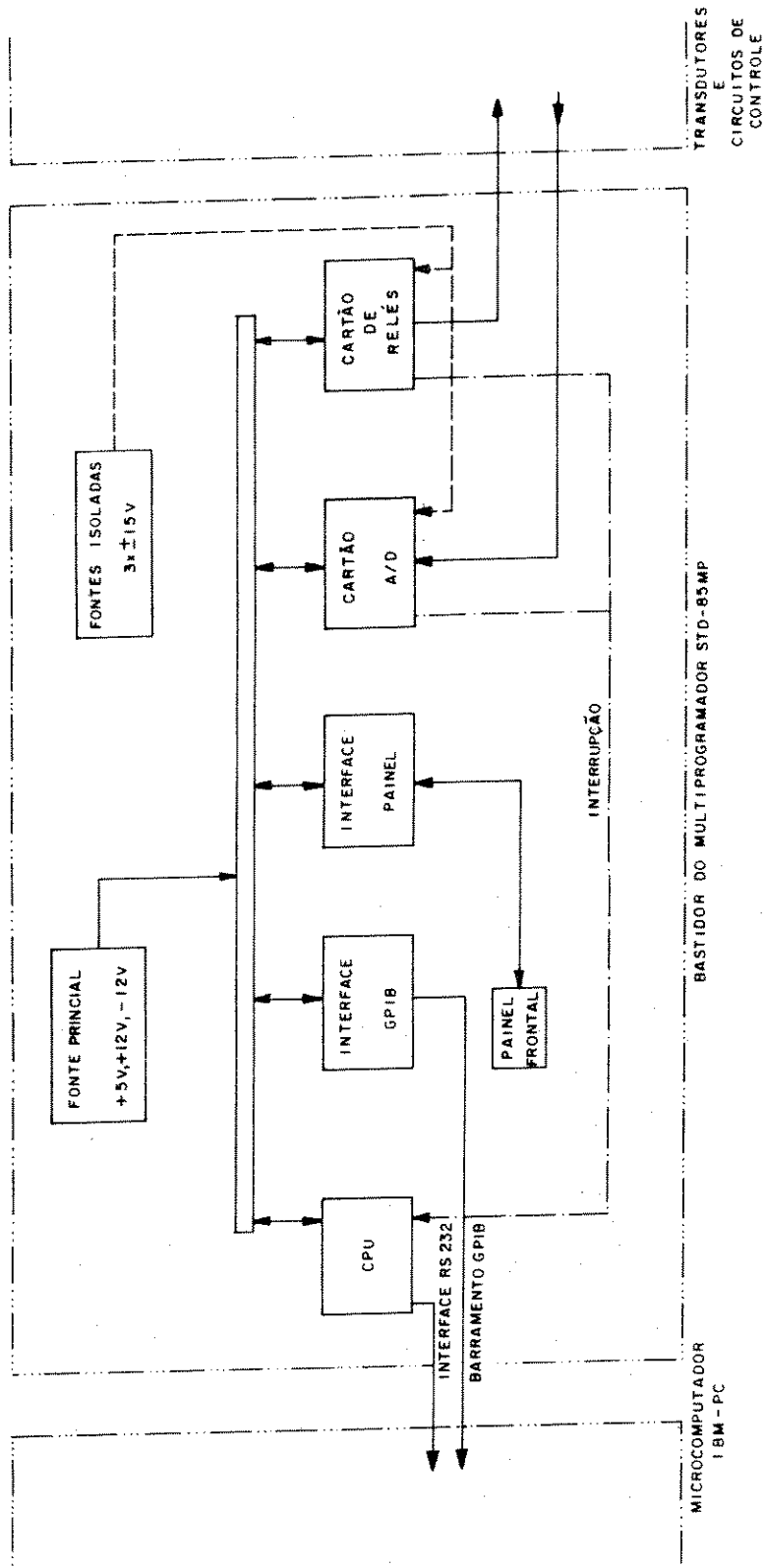


Fig. 11: Diagrama em blocos do multiprogramador.

Um microcomputador externo envia ao módulo CPU informações necessárias para o gerenciamento das operações. Esta comunicação é feita através do módulo interface GPIB, que gerencia toda a comunicação micro-multiprogramador de acordo com a norma IEEE-Std-488/1978, fazendo com que o multiprogramador assuma as posições de "TALKER" e "LISTENER".

O módulo CPU conta com um microprocessador 8085 operando a 6,144 MHz, três temporizadores/contadores programáveis de 16 bits, um controlador programável de interrupções, 2 kbytes de RAM e até 16 kbytes de EPROM, onde reside o software que controla o funcionamento interno do multiprogramador. Neste software estão incluídas rotinas dedicadas ao atendimento específico de cada cartão ou "handlers", que formatam e transferem dados a comandos para cartões de E/S de forma apropriada.

A entrada de comandos, dados e a sinalização do painel frontal bem como as necessidades operacionais da interface GPIB são responsabilidades do módulo CPU, ou seja ele é o gerenciador mestre de todo o funcionamento interno do multiprogramador.

A comunicação do módulo CPU com as interfaces GPIB e do painel com os cartões E/S se dá através do barramento interno padrão STD-BUS (Apêndice A).

O multiprogramador possui quatro fontes sendo uma fonte principal conectada ao barramento STD-BUS e fornecendo as tensões de +5 Vdc para os circuitos digitais e ± 12 Vdc como alimentação auxiliar e outras três fontes isoladas destinadas a alimentação do setor analógico dos cartões que não podem compartilhar o mesmo nível de referência dos demais circuitos.

Ao ser ligado o multiprogramador, alguns parâmetros operacionais são definidos internamente, a partir da configuração de "jumpers" (JM2) existentes no módulo CPU. Neste trabalho a configuração dos "jumpers" foi feita de modo que as necessidades do padrão GPIB fossem atendidas.

Toda operação de escrita ou leitura em um cartão funcional (modo remoto ou local), exige uma identificação de acesso para o multiprogramador através de um endereço lógico (caractere ASCII entre "@" e "N" inclusive).

A cada endereço lógico estão associados dois números numa tabela em memória RAM, representando o tipo e o número de ordem. O tipo indica qual o gerenciador de cartões (handler) deve ser acionado e o número de ordem determina qual o endereço-base configurado nos "jumpers" do cartão acionado, localizando-o fisicamente no multiprogramador. Estes dois parâmetros compoem o código de configuração do endereço lógico, que é efetivamente armazenado em memória. Ambos podem variar de 0 a F (HEXA).

Inicialmente o código de configuração carregado na memória RAM é aquele armazenado em EPROM, entretanto ele pode ser alterado tanto local como remotamente, voltando sempre á configuração inicial quando o multiprogramador é desligado.

O multiprogramador possui 3 três parâmetros de controle de grande importância: HMT, HSS e DDS.

Com o HMT acionado, o multiprogramador só aceitará novos comandos após ter concluído a tarefa em curso. Este controle é feito a nível de barramento GPIB.

O acionamento de HSS causa a efetiva colocação dos dados introduzidos nos cartões de escrita disponíveis e atuantes sobre os dispositivos externos a ele conectados e enquanto ele não for acionado, todas as saídas sensíveis a ele assumem um estado pré determinado.

A desabilitação do display pelo acionamento de DDS, pode melhorar o desempenho do multiprogramador no tratamento das operações de escrita ou leitura dos cartões.

Operando remotamente o multiprogramador é capaz de executar cinco das dez funções oferecidas pelo padrão GPIB. São elas: "listener", "talker", "service request", "acceptor handshake" e "source handshake".

Os comandos são enviados pelo micro via barramento GPIB e para que possam ser interpretados pelo módulo CPU eles são enviados como cadeias de caracteres ASCII, representando valores de uma cadeia de dígitos octais.

No sentido micro-multiprogramador são três os tipos de cadeia que podem

ser transmitidas: cadeia de controle, cadeia de dados e cadeia de endereçamento.

A cadeia de controle visa programar o modo operacional do multiprogramador, ligando ou desligando os parâmetros de controle. Sua forma é:

O * * * * * T

onde,

O é o campo de endereço. "O" é o endereço lógico de configuração,
* * * * * é o campo de dados (configuração dos bits de controle) e
T é o caracter de transferência de dados (LEITURA).

A cadeia de dados é utilizada para enviar dados aos cartões funcionais do multiprogramador. Enquanto a cadeia de controle programa o comportamento geral do multiprogramador, a cadeia de dados atua sobre um cartão específico. Sua forma geral é semelhante a cadeia de controle, variando apenas o campo de endereço:

e * * * * * T

onde,

e é o campo com o endereço lógico interno do cartão funcional,
* * * * * é o campo de dados (dígitos octais codificados em ASCII) e
T é caracter de transferência de dados (LEITURA).

A cadeia de endereçamento seleciona o cartão de entrada que deve enviar dados ao micro. Normalmente ela vem precedida de uma cadeia de controle e/ou uma cadeia de dados que programa o cartão com variáveis apropriadas. A cadeia de endereçamento possui apenas dois caracteres:

e X

onde,

e é o campo de endereço e
X é o caracter de transferência de dados (ESCRITA).

Já no sentido multiprogramador-micro, são dois os tipos de cadeias que podem ser transmitidos: cadeia de endereçamento e byte de status.

A cadeia de dados transporta informações referentes a um cartão de entrada que foi previamente selecionado por uma cadeia de endereçamento proveniente do controlador do sistema. Sua forma geral é a seguinte:

*** * * * * CR LF**

onde,

* (o 1º da esquerda para a direita) é o campo de verificação (Byte (1) = conversão OK, Byte (0) = não convertido),

* * * * * é o campo de dados (5 dígitos octais codificados em ASCII) e
CR LF são os caracteres de retorno de carro e avanço de linha.

O campo de dados representa ao todo 16 bits, os mesmos obtidos do cartão através da operação de leitura. Durante a transmissão do último carácter, 0A hexa o multiprogramador ativa a linha EOI do barramento GPIB.

O byte de status não representa propriamente o envio de dados de cartões do multiprogramador para o micro, ele apenas informa o estado operacional do multiprogramador quando ele é selecionado numa rotina de "serial pool".

A comunicação entre o micro e o multiprogramador é implementada a partir de dois elementos: a linguagem de programação ASYST apresentada na secção anterior e o cartão controlador GPIB (STD-8410) instalado no micro e descrito a seguir.

Desta maneira o multiprogramador envia e recebe mensagens através da interface GPIB conectada em seu barramento interno, podendo então controlar a placa conversora A/D (STD-8502) e a placa de relés (STD-8402) apresentadas mais adiante.

O cartão controlador STD-8410

Este cartão pode ser visto de uma maneira simplificada como um conversor de barramentos, cuja operação converte mensagens e sinais presentes no barramento interno do micro em mensagens e sinais apropriados do barramento GPIB para enviá-los a CPU do multiprogramador.

Seu diagrama em blocos, apresentado na Fig. 12 , é constituído principalmente pelos seguintes blocos funcionais:

- decodificador de endereços: monitora as linhas de endereço do barramento do

micro de modo a reconhecer endereços válidos e permitir o acesso do computador aos registros internos do microcontrolador GPIB;

- transceptores: realizam a função de acoplamento das linhas de endereço, dados e controle do barramento do micro ao barramento interno do STD-8410. Garantem também a minimização do carregamento do barramento do micro. Todas as linhas de entrada representam apenas uma carga TTL-LS para o micro;
- arbitrações de interrupções; reconhece a habilitação ou desabilitação de interrupções e permite ou não a circulação dos sinais correspondentes entre o STD-8410 e o barramento do micro;
- arbitração de DMA: reconhece a habilitação ou desabilitação de operação por DMA e permite ou não a circulação dos sinais correspondentes entre o STD-8410 e o barramento do micro. O término da última transferência em uma operação de DMA pode causar, a critério do usuário uma interrupção;
- chaves e estrapes de configuração: determinam de acordo com a configuração escolhida pelo usuário, o endereço-base de acesso a cartão, além do canal de DMA e/ou linha de interrupção utilizada (quando for o caso);
- microcontrolador GPIB: circuito integrado específico que implementa virtualmente todas as funções do IEEE-488 para interagir com os dispositivos do GPIB. É composto por 21 registros internos que são utilizados para configurar, controlar e monitorar as funções de interface e para a transferência do e para o GPIB de comandos e dados;
- transceptores GPIB: realizam o acoplamento entre o microcontrolador e o barramento GPIB.

Uma vez que o micro está equipado com o cartão STD-8410, um cabo IEEE-488 e um software gerenciador, ele pode se comportar como “talker”, “listener” ou “controller”.

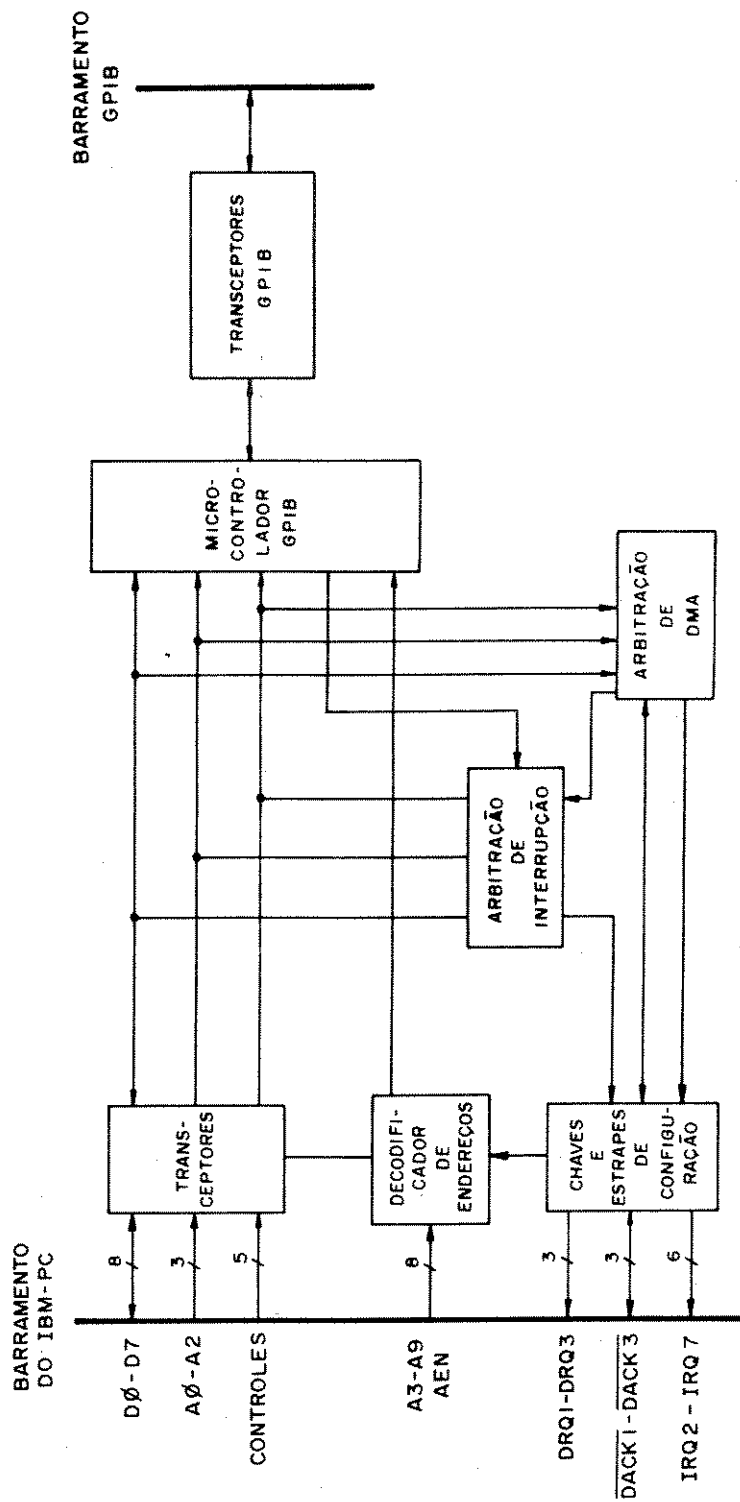


Fig. 12: Diagrama em blocos da placa GPIB STD-8410.

De uma maneira simplificada um “talker” numa comunicação entre duas entidades é aquele que envia os dados ou mensagens, da mesma maneira que um “listener” é aquele que recebe os dados ou mensagens e um “controller” é aquele que endereça e executa um “trigger” em dispositivos específicos bem como desempenha funções de gerenciamento do barramento.

O endereço-base de E/S para a placa STD-8410 é determinado pelo “dip-switch” CH1 da placa, e neste trabalho o endereço-base utilizado é aquele configurado de fábrica 2B8 (hexa), sendo que nesta configuração o STD-8410 ocupará a faixa de endereçamento de 2B8 a 2BF (hexa). Este endereço é importante quando da configuração do ASYST para a aplicação do módulo ASYST GPIB/IEEE-488.

O cartão conversor STD-8502

O STD-8502 é um A/D de alta resolução desenvolvido no padrão STD-BUS e no caso em estudo é monitora tensões CC na faixa de ± 100 mV, fornecendo uma palavra de 13 bits (uma mantissa de 12 bits mais um bit de sinal).

O setor digital do cartão é isolado do setor analógico por meio de fotoacopladores com uma tensão de isolamento de 150 V.

Ele tem uma capacidade de entrada de 6 (seis) canais, sendo que o acesso a cada um deles é feito por seleção através de palavra de dados do barramento STD-BUS e a comutação é feita por relés tipo “reed” de dois contatos normalmente abertos.

Os “jumpers” de configuração estão selecionados para acesso como periférico E/S e o acesso aos dados convertidos é obtido enviando-se comandos de leitura aos endereços específicos.

A conversão do sinal de entrada é feita por integração a quatro rampas, fazendo com que o tempo de conversão seja relativamente longo, porém proporcionando benefícios consideráveis com relação a redução de ruídos [16].

O conversor oferece ainda as seguintes características técnicas:

- tempo de conversão: 85 ms,

- acuidade: $200\mu V$ para faixa ± 100 mV a $25\text{ }^{\circ}C$ (embora a resolução calculada para ± 100 mV de fundo de escala e 12 bits de conversão seja $25\mu V$),
- impedância de entrada: $640k\Omega$
- rejeição a ruído (60 Hz $\pm 0.1\%$): modo normal maior que 50 dB
modo comum maior que 120 dB

O diagrama em blocos do conversor A/D é apresentado na Fig. 13.

O endereço-base do conversor A/D utilizado é 60 (hexa), entretanto existem mais 14 opções de endereçamento de 62 a 7E (hexa).

As entradas dos sinais analógicos estão implementadas em conector tipo "header" de 14 pinos e quando desligadas as entradas ficam em aberto.

A parte digital da placa é alimentada por tensões de +5 e +12 V do barramento STD-BUS e os circuitos analógicos são alimentados por uma fonte de +15 V interna do multiprogramador.

O gerenciador (handler) do conversor A/D é do tipo 4 e como o endereço-base definido é 60 (hexa) implica em um número de ordem 0. Então ele está configurado com o endereço lógico D (hexa) para o multiprogramador.

A conversão é feita no modo bipolar sendo enviada no formato de 12 bits em complemento de dois com "off-set".

Este cartão não é afetado pelo bit de controle HSS do multiprogramador, porém quando o bit HMT estiver setado para "1" (e sempre deverá estar devido ao longo tempo de conversão), o barramento GPIB só será liberado após o tempo de conversão de 85 ms.

Para se fazer uma leitura no conversor no modo remoto é necessário que se escreva primeiramente uma palavra de programação indicando a entrada analógica a ser lida (1 a 6) e o modo de leitura (bipolar ou unipolar). Todos esses dados são codificados nos bits b3 a b0 da palavra escrita no endereço lógico adequado do multiprogramador.

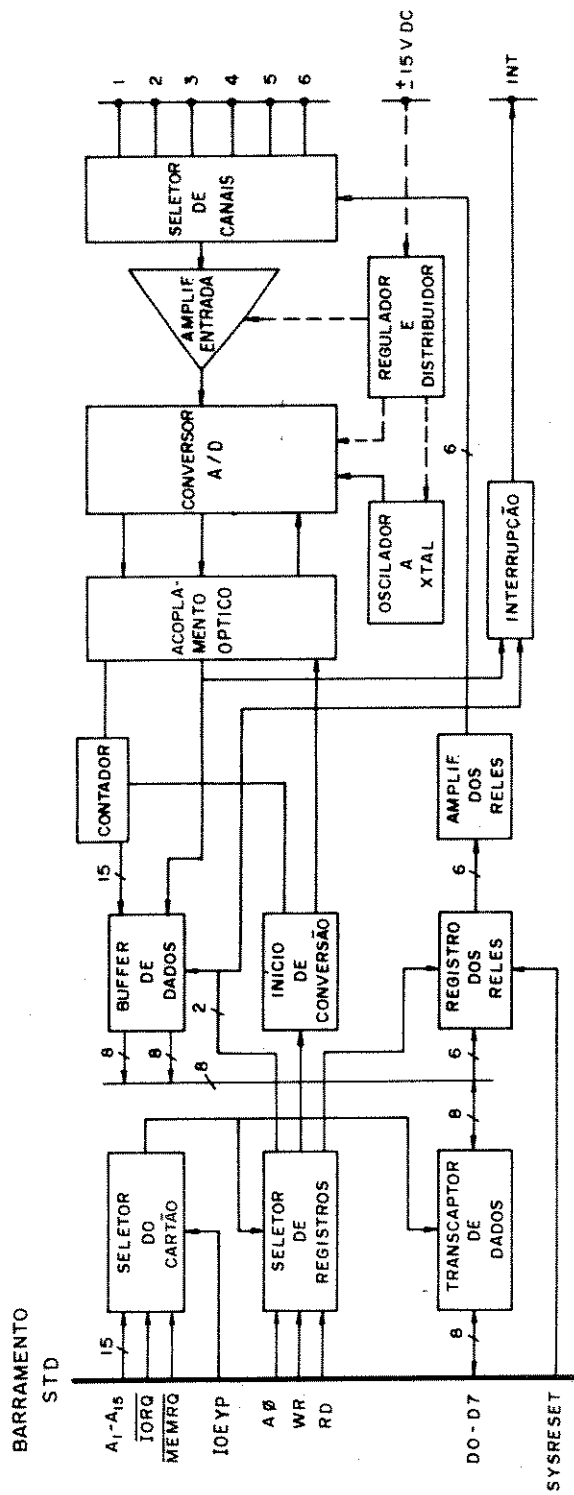


Fig. 13: Diagrama em blocos da placa conversora STD-8502.

Por exemplo deseja-se ler um nível unipolar de um dispositivo ligado a entrada analógica 4 do conversor A/D, cujo endereço lógico é D (hexa), sendo que o multiprogramador ainda não foi programado em seu modo operacional.

Deve-se enviar então a seguinte cadeia via barramento GPIB:

O60TD14TDX

onde,

O60T é a mensagem que habilita os parâmetros HSS e HMT,

D14T é a mensagem que indica o endereço lógico, define o modo de conversão e o canal a ser lido,

DX é a mensagem que escreve a palavra convertida pelo conversor.

O cartão de relés STD-8402

Este é um cartão desenvolvido no padrão STD-BUS, que controla o acionamento de 16 relés tipo “reed” de 1 polo normalmente aberto, divididos em dois grupos de de 8, o primeiro grupo logicamente identificado por KA1 a KA8 e o segundo por KB1 a KB8.

As saídas de comutação dos relés estão disponíveis em 2 conectores tipo “header”, um para cada grupo de relés, com 16 contatos. A comunicação com o barramento STD-BUS é feita através de conector padrão em placa de circuito impresso de 56 pinos.

Os dois grupos de relés são acessados separadamente, através de endereçamento interno, e cada relé pode ser acionado independentemente ou em conjunto com outros do mesmo grupo.

O acionamento dos relés é feito através de um comando de escrita em um endereço de periférico E/S (de 8 bits) previamente selecionado através de “jumpers”.

A Fig. 14 mostra o diagrama em blocos do cartão de relés.

Foi utilizada a configuração de fábrica com endereço base 00 (hexa) para que não fosse preciso configurar o multiprogramador a cada início de aquisição.

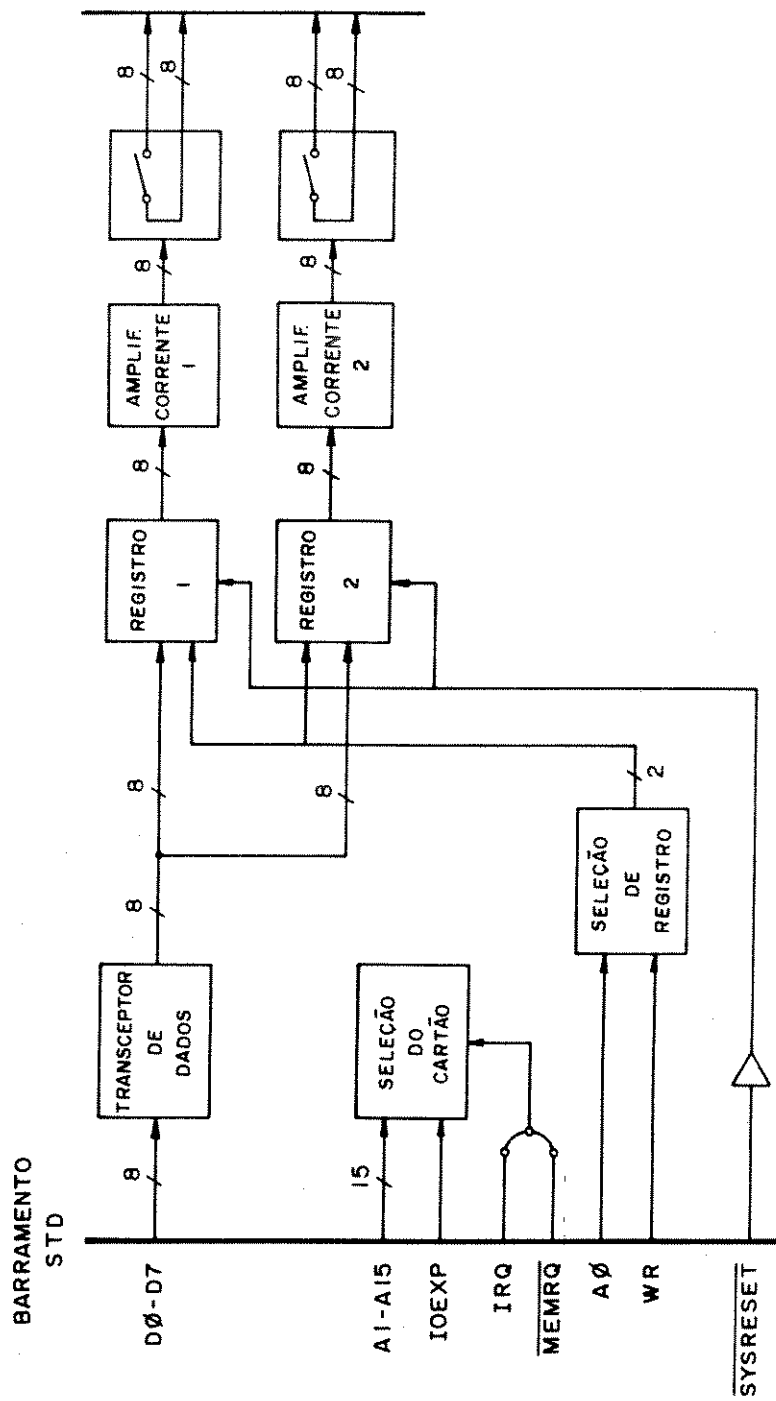


Fig. 14: Diagrama em blocos do cartão de relés STD-8402.

Uma vez que o cartão de relés é habilitado com um comando de escrita no endereço-base A0="0" tem-se acesso aos relés do grupo KA e no endereço-base+1 tem-se acesso aos relés do grupo KB.

Assim como o conversor a placa de relés é alimentada pelo barramento STD-BUS nas tensões de +5 e +12 V, porém não necessita de fontes isoladas por não estar conectada a nenhum sinal analógico.

O "handler" para este cartão é do tipo 0 que associado ao número de ordem 0 configurado de fábrica implica do endereço lógico "A" para o multiprogramador.

Quando o multiprogramador opera no modo de temporização (HMT=1) o barramento GPIB somente será liberado após o acionamento dos relés (2 ms) e os relés somente serão acionados se o bit de controle HSS for igual a "1", caso contrário os relés não serão acionados.

O "handler" oferece ainda o recurso de tornar disponível ao usuário a última palavra programada, de maneira que uma leitura no endereço lógico deste cartão causará a apresentação do estado dos vários relés conforme estabelecido no último comando de escrita.

Como exemplo, para ativar os relés KB4, KB1, KA6 e KA3, deve ser enviada a seguinte palavra ao multiprogramador via barramento GPIB:

O60TA044444TAX

onde,

O60T é a mensagem que habilita os parâmetros HSS e HMT,

A044444T é a mensagem em octal que representa o conjunto de relés a ser ligado e

AX é a mensagem para escrever a palavra no cartão de relés.

3.1.3 Rotinas gerais

Na secção anterior foi mostrado como devem ser escritas as palavras a serem enviadas ao multiprogramador para que ele gerencie os cartões. Neste subítem são apresentadas as rotinas específicas desenvolvidas para cada um dos cartões, e que

possibilitam a operacionalidade do SAD.

Estas rotinas estão escritas no programa ROTINAS.PRG, em linguagem ASYST e deve ser carregado sempre que o sistema de aquisição de dados for utilizado.

No início deste programa são feitas 4 definições importantes para o SAD, antes de se iniciar a escrita das rotinas propriamente ditas. São elas:

- é definida uma variável string de 8 caracteres de nome DADOS para receber e enviar mensagens ao multiprogramador;
- é definido o endereço primário 24 e a palavra STD.85MP para o multiprogramador;
- é definido o "timeout" de 1 s para o micro e o multiprogramador.

Uma vez feitas estas declarações dá-se início a escrita das 8 rotinas de uso geral, que são descritas de maneira simplificada a seguir.

Os nomes das rotinas foram definidos com o objetivo de sintetizar as operações por elas realizadas.

a. Inicialize.STD.85MP

Esta rotina é encarregada de inicializar o multiprogramador. Isto significa dizer que ME será o controlador do sistema, que o multiprogramador vai para a operação no modo remoto e qual é o modo de operação do multiprogramador.

b. #) "Octal

Esta rotina tem como finalidade transformar o número decimal do topo da pilha de números em um "string" de caracteres octais correspondentes ao número decimal, colocando-o no topo da pilha de símbolos, permitindo assim que seja formada uma cadeia de caracteres na forma definida para que o multiprogramador "entenda" a comunicação no modo remoto, conforme visto em 3.1.2.

c. Le.Canal.AD.STD.8502

Uma vez que o número referente ao canal do conversor no qual se deseja fazer a leitura esteja na pilha de números, esta rotina provoca a conversão do sinal analógico da entrada, retornando o valor convertido na “string” DADOS como uma cadeia de caracteres octais e posteriormente transformando esta cadeia de octais em um valor decimal correspondente a amplitude so sinal lido, colocando-o no topo da pilha de números.

d. Le.Reles.STD.8402

A função desta rotina é escrever o estado atual dos relés da placa STD-8402 (conjunto de caracteres octais) na variável “string” DADOS e transformar este conjunto de caracteres octais em um número decimal no topo da pilha numérica.

e. Escreve.Reles.STD.8402

Ao contrário da rotina anterior, esta tem como função criar e enviar a mensagem para se ligar um determinado dispositivo a partir de um número referente a este dispositivo colocado no topo da pilha de números.

f. Liga.Dispositivo

Esta rotina faz uso das rotinas “d” e “e” para implementar a função de ligar um dispositivo desejado a partir de um número pré-definido para este dispositivo no início do programa principal.

g. Desliga.Dispositivo

Da mesma maneira que a rotina anterior, esta usa as rotinas “d” e “e” para implementar a função de desligar um dispositivo a partir de um número pré-definido para este dispositivo no início do programa principal.

h. Espera.Enter

Esta rotina interrompe a execução do programa até que seja pressionada a tecla Enter no teclado.

	A	B	C	D
1	100	96	296	285.5
2	148	150.4	145	148.8
3	142	143.1	182	183
4	136	137.5	228	227.6
5	130	126.4	258	258.4
6	124	120.6	288	288.7
7	120	115.2	307	306.8
8	80	80.8	180	187.7
9	54	53.3	250	248.5
10	48	46.7	288	281.6
11	40	38.8	345	336.8
12	60	62.6	181	156.4
13	74	74.5	218	214.2
14	88	88	268	262.2
15	84	85.1	280	268.6
16	80	81.1	317	310.7
17	100	100.3	184	185
18	84	82.8	215	214.8
19	88	88.2	255	257
20	84	84.6	281	279.3
21	80	83.7	305	304.1
22	120	122.7	170	172.2
23	114	115.4	210	211.5
24	108	107.5	251	252.5
25	104	101.8	288	270.5

Fig. 15: Comparação entre os dados obtidos pelo SAD e pelo multímetro após a calibração: (A) Corrente multímetro (A), (B) Corrente SAD (A), (C) Tensão multímetro (V), (D) Tensão SAD (V).

Numa primeira etapa antes de se iniciar a aplicação, foram feitas aquisições, utilizando as rotinas acima, com o objetivo de calibrar o sistema. As medidas foram feitas com o SAD e com um multímetro. A Fig. 15 apresenta uma comparação entre os dados obtidos pelo SAD e pelo multímetro após a calibração.

No Apêndice D é apresentada a forma pela qual os dados calculados são armazenados, tanto para a utilização no ASYST quanto para a utilização em softwares que aceitem arquivos com a extensão .WK1.

3.2 Maçarico de Plasma

O maçarico utilizado nesta tese é do tipo não transferido, arco auto-estabelecido e polaridade direta (catodo à montante e anodo à jusante). Como gás plasmagênico é utilizado o ar.

Durante a realização destes experimentos a faixa de vazão do ar comprimido variou de .6 a 6.0 g/s, medidas através de rotâmetros calibrados no laboratório. Por se tratar de fluido compressível além da posição do flutuador do rotâmetro foi necessária a medida da pressão do gás para se calcular a vazão em g/s. O controle da vazão do gás é feito através de um regulador de pressão.

A vazão da água de refrigeração dos eletrodos foi medida utilizando-se rotâmetros, sendo que a vazão do anodo foi fixada em 7.6l/min e do catodo em 1.94l/min.

O catodo “quente” utilizado nesta tese é do tipo “button” confeccionado em zircônio prensado em suporte de cobre e o anodo é tubular de cobre com diâmetro interno de 9.52mm e 120.0mm de comprimento.

A câmara de vórtice, situada entre os eletrodos, tem um diâmetro interno de 68mm e seis furos tangenciais que provocam a vorticidade do fluxo que estabiliza o arco no centro do canal.

O maçarico de plasma é alimentado por duas fontes não controladas trifásicas associadas em série de maneira a se obter uma tensão CC de 780 V em vazio. O controle da tensão das fontes é feito através da variação do núcleo móvel dos transformadores monofásicos.

Os bancos de transformadores monofásicos estão ligados em conexão Δ/Y , sendo que um deles é conectado a rede de 440 V e cada transformador monofásico que o compõe possui uma relação de transformação de 3:1 e o outro é ligado a rede de 220 V e cada um de seus transformadores possui uma relação de transformação de 1,5:1.

O método aqui utilizado para ignição do maçarico é o de pré-ionização do gap, aplicando-se um “spark” de alta frequência e tensão entre os eletrodos, tendo como fluido de ignição o argônio, que tem um potencial de ruptura menor que o do ar. Uma vez iniciado o arco, um sensor de corrente provoca a abertura da válvula de ar comprimido e o fechamento da válvula do argônio.

O “spark” de alta frequência é gerado por uma fonte de rádio frequência, e as tensões são da ordem de 10kV e as frequências da ordem de 100MHz.

Na Fig. 16 é mostrado o diagrama da parte elétrica do maçarico.

3.2.1 Sistema de aquisição para o maçarico

As medidas de temperatura da água de refrigeração dos eletrodos foram feitas com termopares, colocando-se a junção de medição diretamente em contato com a água.

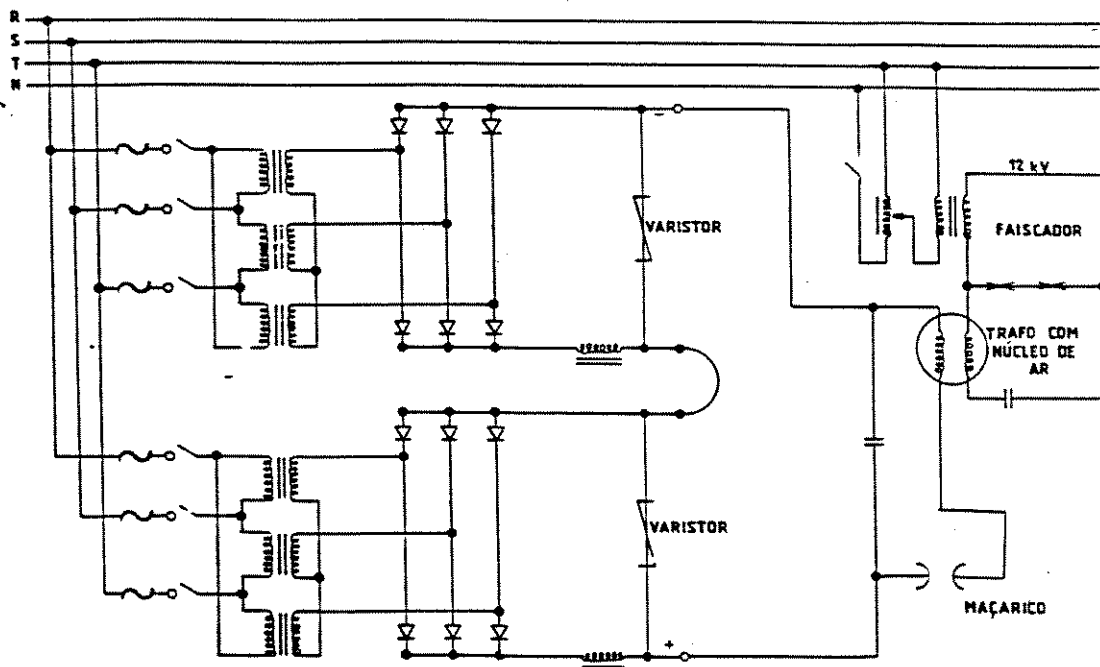


Fig. 16: Diagrama elétrico do maçarico.

Os termopares fabricados pela firma ECIL são protegidos por uma camada de óxido de manganês (bom condutor de calor e mau condutor elétrico) e por um invólucro de aço inoxidável, resultando em diâmetro externo de 1.5mm. Foram testados com a fonte que alimenta o maçarico ligada e desligada para verificar se as leituras de temperatura eram diferentes nas duas condições sendo que o resultado foi negativo.

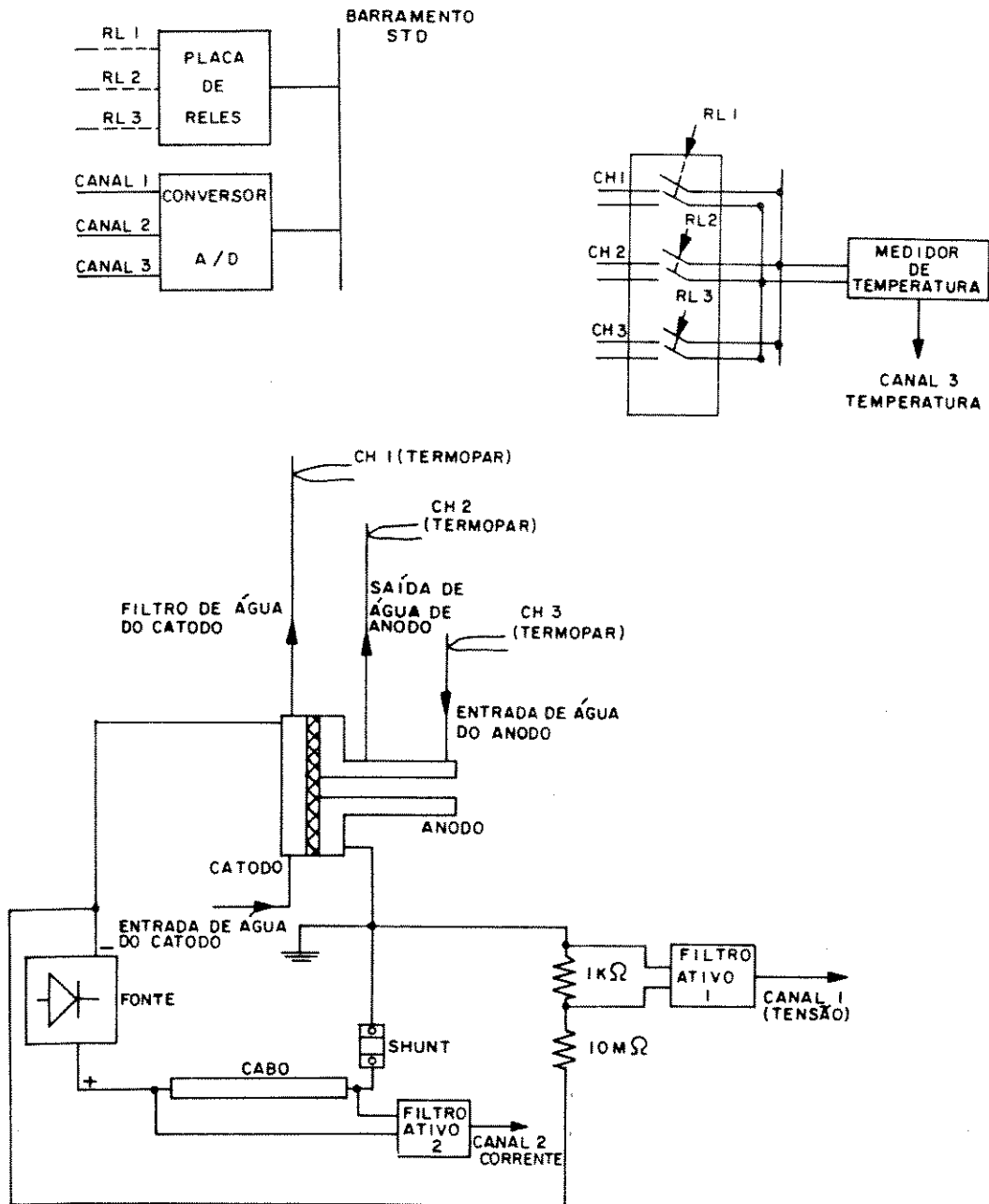


Fig. 17: Conexão entre o SAD e o maçarico.

O termopar que mede a temperatura de saída da água do catodo foi colocado a uma distância de 10 centímetros do catodo porque como o catodo está em alto potencial (máximo 780V) e o termopar pode ficar sujeito ao mesmo potencial danificando assim o conversor A/D.

Para realizar as medidas da tensão de operação do maçarico foi necessária uma redução na sua amplitude, uma vez que o maçarico opera em tensões de centenas de Volts enquanto que a máxima tensão de entrada do cartão conversor A/D é de 100 mV .

A redução da tensão foi feita através de um divisor de tensão construído com uma resistência de $10.0M\Omega$ e uma resistência de $1k\Omega$ dispostos conforme mostra a Fig. 17. Desta maneira a tensão máxima na entrada do conversor A/D passa a ser da ordem de 78 mV, correspondendo a 780 V.

A medida da corrente seria feita medindo-se diretamente a tensão em um "shunt" de $1000 A/50 mV$, entretanto como a corrente de operação varia numa faixa de 40 a 140 A, a tensão a ser lida nesse "shunt" iria variar de 2 a 7 mV, o que é um sinal muito baixo com relação a entrada do canal do conversor A/D ($\pm 100mV$). A solução encontrada foi utilizar o cabo que liga o maçarico á fonte como "shunt". A queda de tensão nesse cabo é da ordem de 1,3 V.

Encontramos problemas no acoplamento da tensão e da corrente ao conversor A/D: os valores medidos com o multímetro eram diferentes dos valores medidos com o conversor. Esses problemas podem ter sua origem, conforme referência [16], nos seguintes aspectos, relacionados com a própria natureza da grandeza medida:

1. Filtragem.

A tensão e a corrente vêm carregadas de frequências indesejáveis, da ordem de kHz, provenientes dos fenômenos que ocorrem no próprio arco.

Para resolver o problema das frequências indesejáveis várias tentativas de configuração de filtros foram feitas, desde filtros passivos RC mais simples até configurações de filtros ativos utilizando-se amplificadores operacionais. A configuração de filtro que apresentou melhores resultados é mostrada na Fig.

18. Este filtro é do tipo ativo passa baixa e foi calculado para ter dois pólos em 10 Hz e dois em 2 Hz, sendo obtido um excelente resultado.

2. Rejeição de modo comum.

No processo de operação do arco ocorrem dentro do canal rupturas com frequências de alguns kHz . O ruído eletromagnético, propagado pelo espaço, produzido pelas rupturas pode ser eliminado através da rejeição ao modo comum (por exemplo usando amplificador diferencial ou de instrumentação).

3. Flutuações no terra do sinal.

Isso pode ser resolvido através do desacoplamento da terra do sinal e da entrada do A/D utilizando as mesmas medidas que no item anterior.

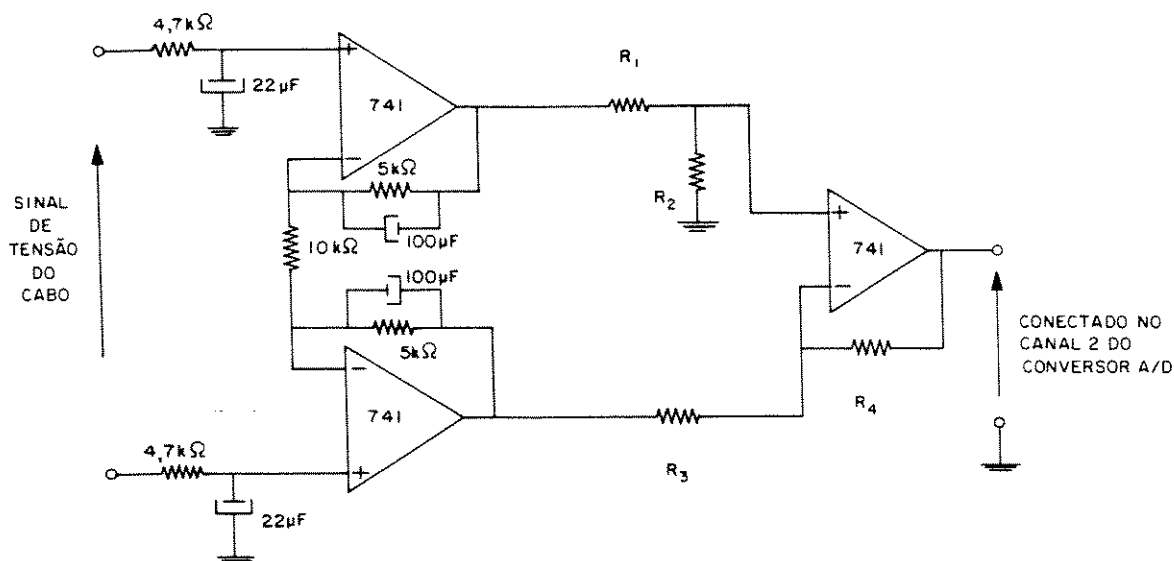


Fig. 18: Condicionamento do sinal de tensão ($R_1=R_3= 39\text{ K}$, $R_2=R_4= 23\text{ K}$) e corrente ($R_1=R_3= 100\text{ K}$, $R_2=R_4= 2,2\text{ K}$) com filtro ativo passa-baixa.

Conforme colocação feita em 3.2, a ignição é obtida utilizando-se um “spark” de alta frequência.

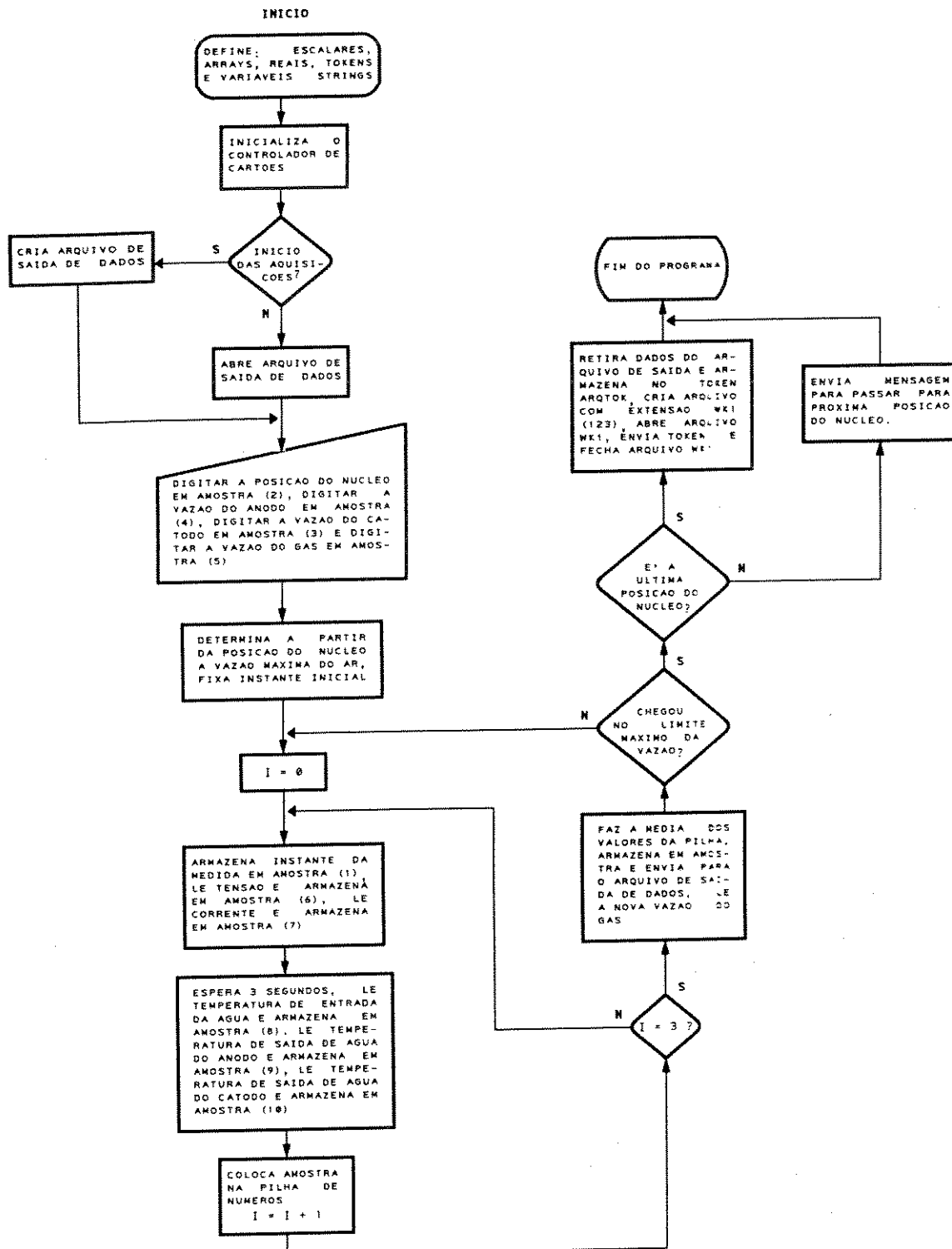


Fig. 19: Fluxograma do programa de aquisição para o maçarico.

Pelo fato dos níveis de tensão atingirem a ordem de 10 kV durante a ignição, foi necessária a construção de uma chave de 12 secções, para evitar que estas tensões atingissem o SAD.

3.2.2 Programa de aquisição para o maçarico

O fluxograma do programa para aquisição de dados do maçarico é mostrado na Fig. 19.

Para se utilizar este programa é necessário que ele seja compilado juntamente com as rotinas de aquisição. Durante a compilação são definidas todas as variáveis utilizadas pelo programa.

Com isso o programa de aquisição para o maçarico funciona conforme descrição a seguir.

A operação se inicia após ser digitado "aquisicao.macarico". Com isso o controlador de cartões é inicializado e o programa pergunta qual é a posição do núcleo dos transformadores e armazena esse valor na posição 2 do array Amostra. A posição do núcleo irá identificar, dentro do arquivo LIMITE.DAT, qual a vazão máxima do gás para esta posição do núcleo.

O arquivo LIMITE.DAT contém todos os limites de operação do maçarico, para todas as posições de núcleo dos transformadores.

O programa pergunta se a aquisição está sendo iniciada, e se a resposta for sim o programa pergunta qual o nome do arquivo de saída de dados a ser criado e se for não (para as aquisições subsequentes) ele apenas pergunta qual o nome do arquivo de saída já criado.

Em seguida o programa pergunta pelas vazões de água do anodo e do catodo e pela vazão do gás plasmagênico e armazena estes valores nas posições 3, 4 e 5 do array Amostra respectivamente.

Neste ponto o programa fixa uma referência de tempo e entra num "loop" de três laços. Em cada laço o programa armazena um valor de tempo contado a partir da referência de tempo na posição 1 de Amostra, comunica-se com o controlador de cartões para realizar uma leitura no canal de tensão e outra no de corrente e

armazena essas leituras nas posições 6 e 7 de Amostra respectivamente. Comunica-se novamente com o controlador de cartões para acionar o relé que liga termopar da entrada das águas ao medidor de temperatura, ler a temperatura no canal do A/D onde está ligada a saída do medidor, armazenar a leitura na posição 8 de Amostra e desligar o relé do termopar da entrada das águas.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	7.9	4	32.17	126.03	0.74	37.28	246.0	20.45	24.90	24.15
2	27.9	4	32.17	126.03	0.94	35.77	264.2	20.57	24.75	24.30
3	45.7	4	32.17	126.03	1.01	34.52	279.5	20.70	24.80	24.40
4	7.9	5	32.17	126.03	0.76	51.78	228.9	20.77	26.87	24.97
5	27.9	5	32.17	126.03	0.85	51.13	236.3	20.90	26.88	24.92
6	45.7	5	32.17	126.03	1.12	49.58	253.4	20.92	26.83	24.85
7	62.8	5	32.17	126.03	1.34	47.62	270.6	20.95	26.48	24.85
8	81.2	5	32.17	126.03	1.55	45.78	284.7	21.20	26.47	24.87
9	96.9	5	32.17	126.03	1.82	43.20	303.9	21.43	26.32	24.85
10	7.9	6	32.17	126.03	0.76	7.55	-34.6	22.53	30.77	28.05
11	27.9	6	32.17	126.03	0.76	75.13	220.3	22.68	30.97	27.95
12	45.7	6	32.17	126.03	1.07	71.73	245.8	22.88	30.97	27.78
13	62.8	6	32.17	126.03	1.42	70.13	259.8	22.77	30.63	26.40
14	81.2	6	32.17	126.03	1.82	66.80	278.8	22.67	30.13	26.96
15	96.9	6	32.17	126.03	2.21	63.94	293.3	22.63	29.62	26.00
16	112.9	6	32.17	126.03	2.58	59.61	313.1	22.65	29.03	25.82
17	7.9	7	32.17	126.03	0.76	95.25	201.1	22.35	33.32	28.60
18	27.9	7	32.17	126.03	0.98	91.77	227.1	22.35	33.40	28.25
19	45.7	7	32.17	126.03	1.55	86.93	253.8	22.40	32.77	28.27
20	62.8	7	32.17	126.03	1.87	84.09	267.3	22.37	32.37	27.57
21	81.2	7	32.17	126.03	2.46	82.01	286.7	22.35	31.85	26.28
22	96.9	7	32.17	126.03	2.84	80.67	301.5	22.33	31.17	25.77
23	112.9	7	32.17	126.03	3.55	73.04	326.9	22.42	30.32	25.72
24	7.9	8	32.17	126.03	0.76	119.80	184.4	22.15	36.18	28.77
25	27.9	8	32.17	126.03	1.06	113.30	219.3	22.15	36.35	29.15
26	45.7	8	32.17	126.03	1.55	109.34	241.8	22.18	35.77	29.17
27	62.8	8	32.17	126.03	2.35	104.10	266.8	22.20	35.05	27.07

Fig. 20: Tabela de dados do maçarico: (A) Tempo (s), (B) Posição do núcleo, (C) Vazão de água catodo (g/s), (D) Vazão de água anodo (g/s), (E) Vazão de gás (g/s), (F) Corrente (A), (G) Tensão (V), (H) Temperatura de entrada da água (°C), (I) Temperatura de saída da água do anodo (°C), (J) Temperatura de saída da água do catodo (°C).

Comunica-se novamente com o controlador para acionar o relé que liga o

termopar da saída da água do anodo ao medidor de temperatura, ler a temperatura no canal do A/D, armazenar a leitura na posição 9 de Amostra e desligar o relé que do termopar da saída da água do anodo. Comunica-se pela última vez no laço com o controlador para acionar o relé que liga o termopar da saída da água do catodo, ler a temperatura no canal do A/D, armazenar a leitura na posição 10 de Amostra.

Ao final de cada laço o array Amostra é colocado no topo da pilha de números do ASYST e no final do "loop" é calculada a média dos três arrays. Esta média é armazenada no arquivo de saída de dados.

O programa pergunta qual é a nova vazão do gás. Se a vazão for menor que o máximo o programa volta ao começo do "loop" de três laços se for igual ao máximo o programa segue em frente e verifica se a posição atual do núcleo é a última. Se não é ele apresenta na tela uma mensagem para desligar o maçarico e mudar para a próxima posição do núcleo e se sim o programa cria um arquivo no formato LOTUS com o mesmo nome do arquivo criado inicialmente, mudando a extensão para .WK1 e armazena todos os dados adquiridos neste arquivo encerrando as aquisições.

Este programa corresponde a uma semi-automatização do sistema de medidas, pois, a fonte de alimentação e as vazões do ar e da água de refrigeração dos eletrodos não são controladas pelo micro.

Na Fig. 20 é mostrada uma parte da tabela de dados adquiridos e armazenados em forma apropriada para ser analisado pelo ASYST ou um outro software que aceite arquivos .WK1.

3.3 Sonda de entalpia

A sonda de entalpia utilizada nesta tese é constituída por 3 tubos de cobre concêntricos de diâmetros $D_3=8.60$ mm ($d_3=7.90$ mm), $D_2=6.40$ mm ($d_2=5.20$ mm) e $D'_1=3.60$ mm ($d_1=3.20$ mm), onde as letras maiúsculas referem-se aos diâmetros externos e as minúsculas referem-se aos diâmetros internos dos respectivos tubos. O diâmetro D'_1 foi obtido a partir do diâmetro $D_1=4.75$ mm colocando-se este tubo numa solução de perclorato de ferro.

A redução da parede do tubo interno tem como objetivo, diminuir a resistência térmica entre o gás e a água de refrigeração da sonda e os obstáculos deixados na superfície do tubo interno têm como objetivo aumentar a turbulência do fluxo da água de refrigeração e o caminho percorrido. Essas medidas foram adotadas visando obter uma melhoria nas trocas de calor entre o gás e a água de refrigeração e na sensibilidade da sonda.

Na Fig. 21 é apresentada uma fotografia da montagem final da sonda de entalpia.

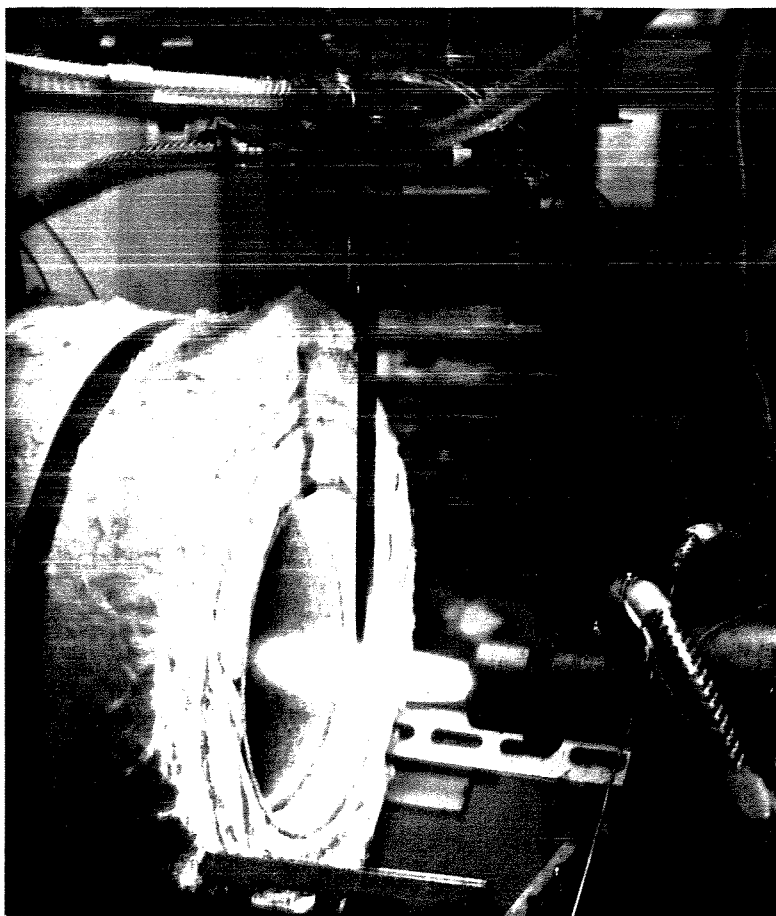


Fig. 21: Fotografia da montagem final da sonda.

3.3.1 Sistema de aquisição para a sonda

Conforme discutido em 4.2 e 4.3 são necessárias três medidas de temperatura ($2\Delta T_a$ e $1 T_g$) e as vazões de gás e de água para se determinar a temperatura do jato de plasma. Duas dessas temperaturas são utilizadas para se avaliar a sensibilidade

da sonda. Como o objetivo é levantar o perfil de temperatura da tocha é necessário que se desloque e meça tal deslocamento.

As temperaturas de entrada e saída da água e de saída do gás são obtidas de maneira simples colocando-se as junções de medição dos termopares diretamente nos fluxos de água e gás. As extremidades de saída dos termopares (tipo K, cromel-alumel) que medem a temperatura da água, são conectadas a um circuito multiplexado a relés. A saída desse circuito bem como as extremidades do termopar (tipo J, ferro-constantan) que mede a temperatura de saída do gás, estão conectadas a medidores de temperatura apropriados de fabricação RobertShaw. Estes medidores de temperatura possuem um circuito interno que faz a compensação de junção fria e a amplificação do sinal. As saídas destes medidores de temperatura fornecem um sinal de tensão igual, em módulo, a temperatura na junção de medição do termopar. Daí então estes sinais são injetados em duas entradas do conversor A/D. A Fig. 22 mostra um diagrama destas ligações.

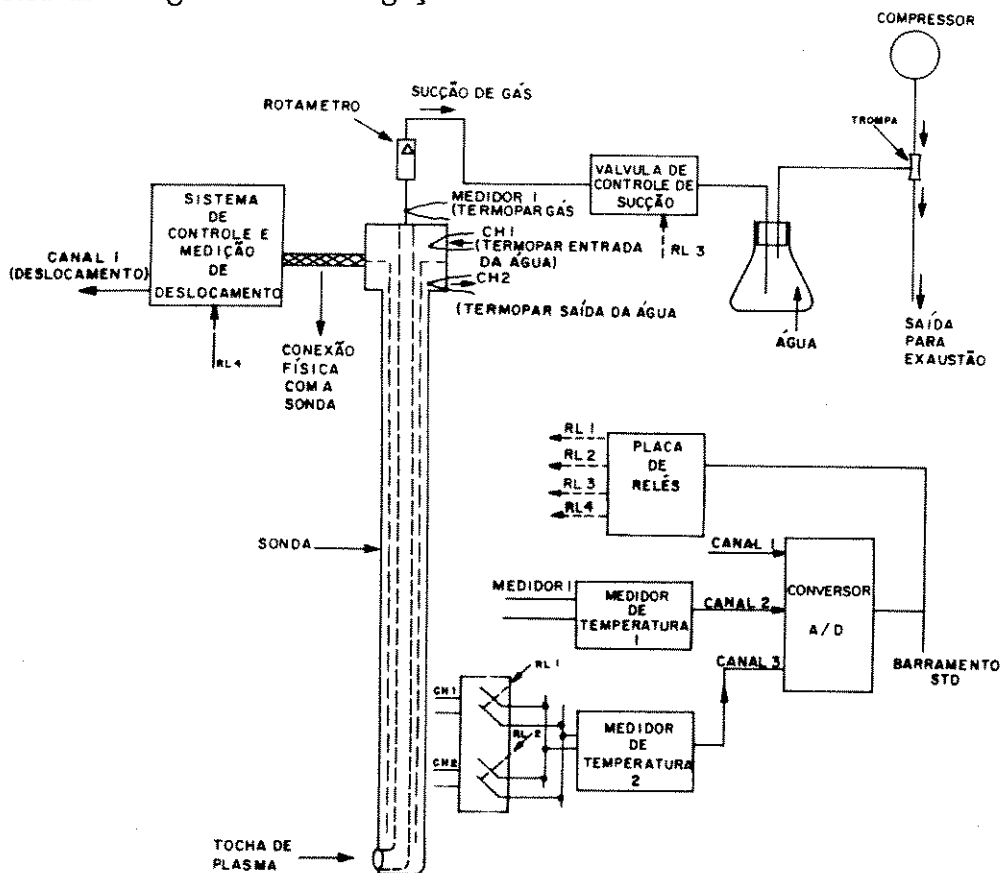


Fig. 22: Conexão do SAD com a sonda.

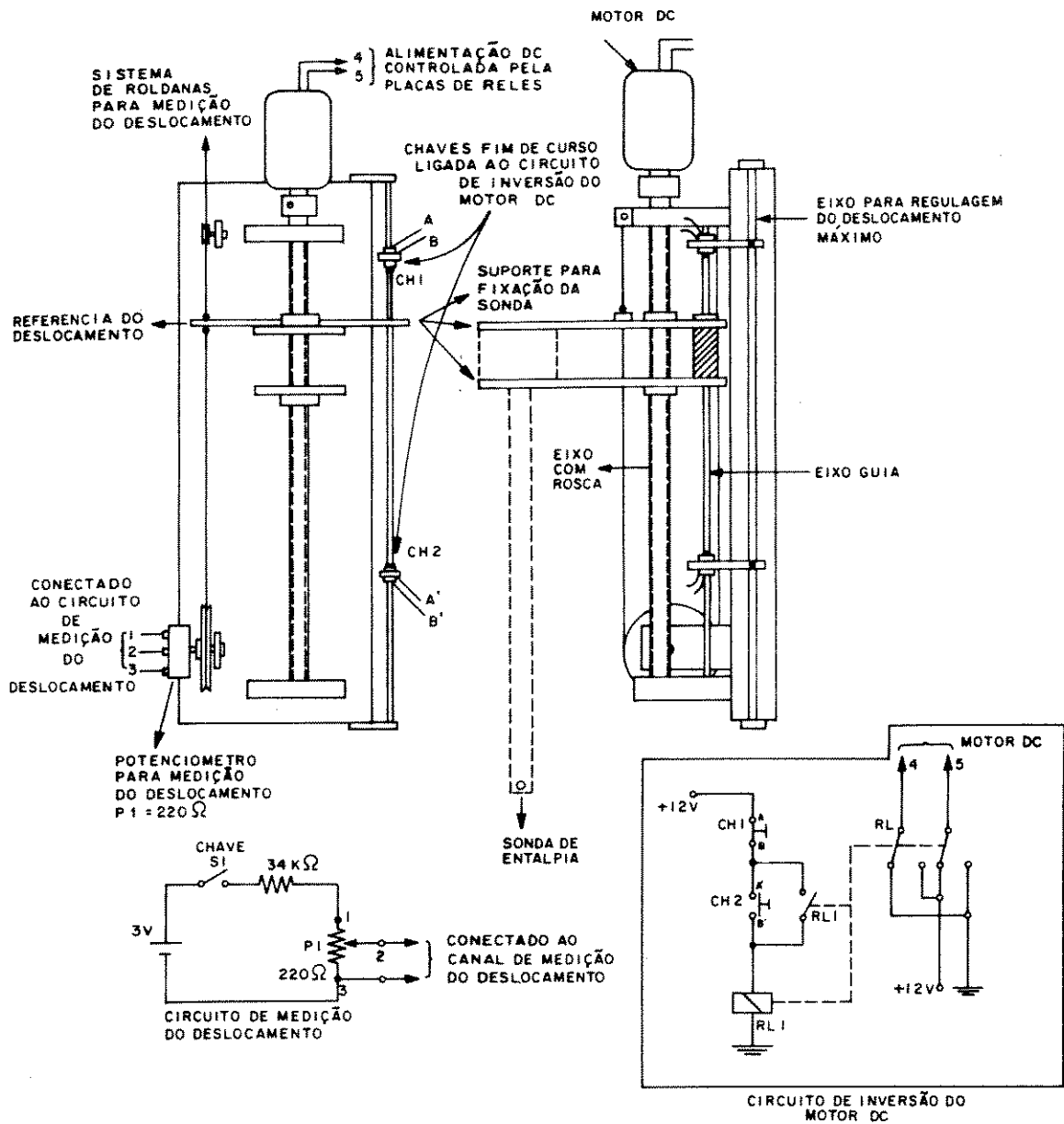


Fig. 23: Sistema de deslocamento da sonda.

O deslocamento da sonda foi feito fixando-se a sonda em um conjunto formado por um eixo com rosca, um eixo guia e um motor CC. O deslocamento da sonda é monitorado por um potenciômetro acionado por um fio de nylon solidário ao movimento da sonda.

O controle do deslocamento da sonda é feito por um dos relés do cartão de relés, que liga e desliga o motor CC. A medida do deslocamento é obtida com base no circuito da Fig. 23. A variação do deslocamento (Δx) é proporcional à variação da resistência do potenciômetro (ΔP_1). Como a variação da tensão lida pelo conversor também é proporcional a ΔP_1 , conclui-se que a tensão lida pelo conversor é proporcional a Δx . O sinal de tensão ΔV_{P_1} é então colocado na entrada de outro canal do conversor A/D.

3.3.2 Programa de aquisição para a sonda

O objetivo desta aplicação é obter dados que permitam calcular a temperatura e avaliar a sensibilidade da sonda em vários pontos de uma linha transversal ao fluxo da tocha de plasma.

A sonda é aterrada por medida de segurança, uma vez que ela opera mergulhada no jato de plasma, que é um ambiente ionizado podendo submeter a sonda a potenciais diferentes de zero.

Nestas condições foi colocado em operação um programa que executa tarefas de acordo com o fluxograma mostrado na Fig. 24.

Com a compilação desse programa e das rotinas de aquisição são definidas todas as variáveis que serão utilizadas pelo programa.

A operação deste programa se inicia após ser digitado "aquisicao.sonda". O controlador de cartões é inicializado e em seguida o programa pergunta qual o nome do arquivo de saída de dados a ser criado. Cria e abre o arquivo de saída de dados. Em seguida o programa pergunta quais os valores das vazões da água e do gás, armazena esses valores nas posições 3 e 4 de Amostra e fica aguardando a tecla ENTER ser pressionada para iniciar as aquisições pelo controlador de cartões.

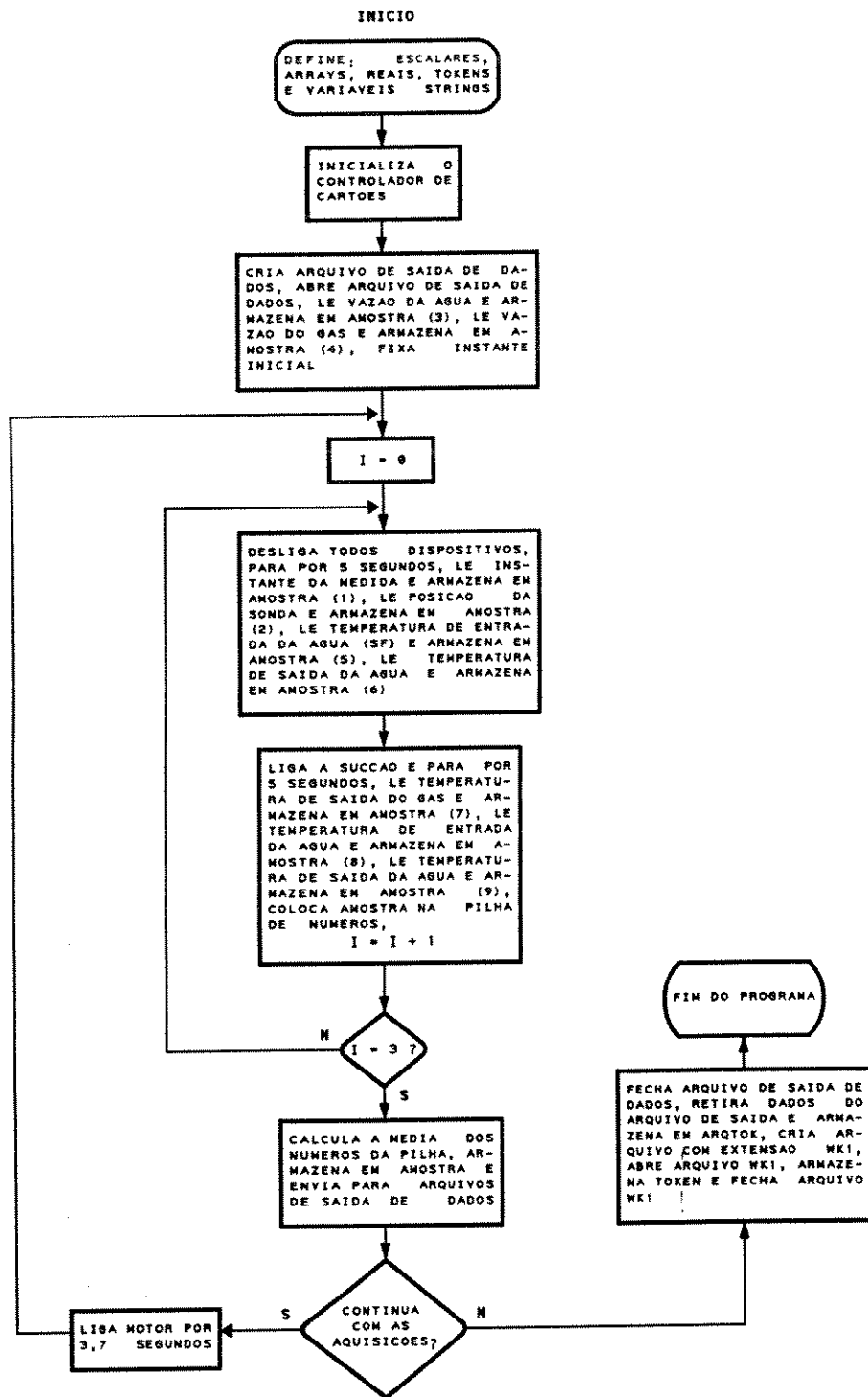


Fig. 24: Fluxograma do programa de aquisição para a sonda.

Ao ser pressionada a tecla ENTER o programa fixa uma referência de tempo e inicia o "loop" de três laços. Em cada laço o programa aguarda cinco segundos para a estabilização dos termopares, determina o tempo de início da medida com relação a referência de tempo e armazena o valor na posição 1 de Amostra. Comunica-se com o controlador para ler o canal do A/D referente a posição da sonda e armazenar a leitura na posição 2 de Amostra.

Comunica-se com o controlador para acionar o relé que liga o termopar da entrada da água ao medidor de temperatura, ler o canal do A/D referente a temperatura da água, armazenar a leitura na posição 5 de Amostra e desligar o relé que liga o termopar da entrada da água ao medidor.

Comunica-se com o controlador para acionar o relé que liga o termopar da saída da água ao medidor de temperatura, ler o canal do A/D referente a temperatura da água. Armazenar a leitura na posição 6 de Amostra e desligar o relé que liga o termopar ao medidor de temperatura. Comunica-se com o controlador para ler o canal do A/D referente a temperatura de saída do gás e armazenar a leitura na posição 7 de Amostra.

Comunica-se com o controlador para acionar o relé que fecha a válvula de sucção de gás e pára o programa por cinco segundos para estabilização dos termopares.

Comunica-se com o controlador para acionar o relé que liga o termopar da entrada da água ao medidor de temperatura, ler o canal do A/D referente a temperatura da água, armazenar a leitura na posição 8 de Amostra e desligar o relé que liga o termopar da entrada da água ao medidor.

Comunica-se com o controlador para acionar o relé que liga o termopar da saída da água ao medidor de temperatura.

O canal do A/D referente a temperatura da água é lido, armazenar a leitura na posição 9 de Amostra, desligar o relé que liga o termopar ao medidor de temperatura e desligar o relé que abre a sucção do gás.

No final de cada laço o array Amostra é colocado no topo da pilha de números do ASYST e no final do "loop" é calculada a média que será armazenada

no arquivo de saída de dados.

O programa pergunta se serão feitas mais aquisições. Se a resposta é sim, o programa se comunica com o controlador para acionar o relé que deslocará a sonda por 3,7 segundos e reinicia o “loop” de três laços, e se a resposta é não o programa cria um arquivo LOTUS com o mesmo nome do arquivo inicialmente criado, mudando a extensão para .WK1 e armazena todos os dados adquiridos neste arquivo encerrando assim as aquisições.

A seguir é mostrada a forma na qual os dados são armazenados em arquivos ficando preparados para serem analisados pelo ASYST ou por outro software que aceite arquivos com extensão .WK1.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	18.2	14.94	13.3	200	17.20	19.95	35.81	17.23	19.57
2	61.4	12.64	13.3	200	17.38	20.68	46.01	17.43	20.11
3	104.7	8.81	13.3	200	17.83	22.50	58.30	17.93	21.34
4	147.9	6.51	13.3	200	18.58	24.62	68.38	18.73	22.97
5	191.1	3.06	13.3	200	19.33	26.68	78.03	19.47	24.98
6	234.3	-0.38	13.3	200	20.07	29.54	87.93	20.18	27.14
7	277.5	-3.45	13.3	200	20.95	31.86	92.34	21.12	29.15
8	320.7	-6.84	13.3	200	21.83	33.10	97.62	21.93	30.78
9	363.9	-10.47	13.3	200	22.20	34.03	79.96	22.28	31.63
10	407.2	-13.41	13.3	200	22.35	33.64	71.22	22.38	32.08
11	450.5	-16.35	13.3	200	22.60	33.72	64.19	22.68	32.63
12	493.7	-19.92	13.3	200	22.68	33.87	57.38	22.92	32.79
13	537.0	-22.66	13.3	200	22.93	33.79	52.35	22.95	33.18
14	580.2	-19.28	13.3	200	29.17	55.37	47.79	29.20	55.14
15	623.6	-22.73	13.3	200	29.45	55.68	44.78	29.58	55.29
16	668.8	-20.05	13.3	200	29.63	54.91	46.71	29.60	54.91
17	715.5	-16.47	13.3	200	29.60	55.29	51.19	29.53	54.91

Fig. 25: Tabela de dados da sonda: (A) Tempo (s), (B) Posição (mm), (C) Vazão de água (g/s), (D) Vazão de gás (lN/min), (E) Temperatura entrada água c/ fluxo gás (°C), (F) Temperatura saída água c/ fluxo gás (°C), (G) Temperatura do gás (°C), (H) Temperatura entrada água s/ fluxo gás (°C), (I) Temperatura saída água s/ fluxo gás (°C).

Capítulo 4

Resultados Experimentais e Análise

4.1 Maçarico de plasma

A partir da tabela de dados com extensão .WK1, foi utilizado o software ORIGIN versão 2.8 para fazer os cálculos necessários para caracterização e estudo do maçarico de plasma.

Como pode ser observado na tabela de dados os únicos valores que não variam durante a operação do maçarico para este experimento são os das vazões das águas de refrigeração do catodo (\dot{m}_{cat}) e do anodo (\dot{m}_{an}) que foram fixados em 32,1 e 126,1 g/s.

Cálculos foram feitos para se obter a característica $U \times I$ do maçarico, utilizando a equação 2.25 com os parâmetros p e d constantes. Essa equação resulta em:

$$U = A \cdot I^m G^n, \quad (4.1)$$

Aplicando-se o logaritmo a ambos membros, a seguinte equação é obtida,

$$\ln U = \ln A + m \ln I + n \ln G. \quad (4.2)$$

Esta é uma equação multilinear do tipo

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n. \quad (4.3)$$

Essa equação pode ser ajustada ao logaritmo neperiano dos dados experimentais, pelo método dos mínimos quadrados, o que resulta nos seguintes coeficientes: $\ln A=8.2983$, $m=-0.2189$ e $n=0.2778$, com os seguintes desvios padrões, $\sigma_{\ln A}=0.0465$, $\sigma_m = 0.0069$ e $\sigma_n=0.0042$ com um coeficiente de correlação de ajuste igual a 0.9911. As unidades são Volts para U , Ampere para I e kg/s para G .

Substituindo estes coeficientes obtém-se então:

$$U = 4017 \cdot I^{-0.2189} G^{0.2778}. \quad (4.4)$$

Para o rendimento, foi utilizada a equação 2.27 simplificada,

$$(1 - \eta)/\eta = B \cdot I^p G^q. \quad (4.5)$$

O rendimento pode ser escrito na forma:

$$\eta = \frac{G\Delta h}{UI} = \frac{P_{saída} - Gh_{entrada}}{UI} = \frac{P_{saída}}{UI} = \frac{UI - P_{perdida}}{UI}, \quad (4.6)$$

onde a potência térmica de entrada $Gh_{entrada}$ é considerada desprezível e a potência perdida é obtida aplicando-se a equação de energia aos fluxos que refrigeram os eletrodos,

$$P_{perdida} = \dot{m}_{cat} \cdot c_p \cdot (\Delta T)_{cat} + \dot{m}_{an} \cdot c_p \cdot (\Delta T)_{an}, \quad (4.7)$$

onde,

\dot{m}_{cat} é a vazão mássica da água do catodo em g/s,

c_p é o calor específico da água em J/(g·°C),

$(\Delta T)_{cat}$ é a diferença entre a temperatura de entrada e saída da água do catodo em °C,

\dot{m}_{an} é a vazão mássica da água do anodo em g/s e

$(\Delta T)_{an}$ é a diferença entre a temperatura de entrada e saída da água do anodo em °C.

Com rendimento calculado obtém-se o valor de $(1 - \eta)/\eta$.

Fazendo-se uma regressão multilinear após aplicar o logaritmo neperiano aos valores experimentais de $(1 - \eta)/\eta$, corrente e vazão foram obtidos os coeficientes $\ln B = -5.4691$, $p = 0,3671$ e $q = -0.4515$ com os respectivos desvios padrões

$\sigma_{\ln B} = 0.1241$, $\sigma_p = 0.0183$ e $\sigma_q = 0.0113$. O coeficiente de correlação obtido para o ajuste de ajuste multilinear foi igual a 0.97666.

Substituídos os coeficiente foi obtida a seguinte equação :

$$\frac{(1 - \eta)}{\eta} = 4.2151 \times 10^{-3} \cdot I^{0.3671} G^{-0.4515} \quad (4.8)$$

O ponto de operação para uma situação desejada do maçarico pode ser previsto a partir da característica $U \times I$ mostrada na Fig. 26, obtida a partir da equação 4.4, e ainda pode ser ajustada a vazão de acordo com a característica $\eta \times I$ mostrada na Fig. 27, obtida a partir da equação 4.8 para que seja obtido o máximo rendimento durante a operação.

Substituindo os valores de corrente e vazão experimentais nas equações $U = f(I, G)$ e $(1 - \eta)/\eta = g(I, G)$, foram obtidas os valores teóricos para a tensão e rendimento. Esses valores teóricos são comparados com os valores experimentais nos gráficos das Fig. 28 e 29. Nestas Fig.s podemos observar que existe uma boa correlação entre os valores teóricos e experimentais tanto para tensão quanto para o rendimento. As retas obtidas na comparação possuem coeficientes angular e linear iguais 3.6587 e 0.9863 (44.6°) para a tensão e 3.0780 e 0.9581 (43.8°) para o rendimento. Os coeficientes de correlação são 0.99185 e 0.97702 para a tenão e rendimento e as respectivas dispersões são 2.9 % e 4.7 %.

Considerando que as equações da tensão e do rendimento são uma boa representação do maçarico é possível após uma manipulação algébrica destas calcular o valor teórico do rendimento, entalpia e temperatura na saída do maçarico.

Partindo da equação da tensão ($P_{entrada}$) descrita acima, ao substituírmos a tensão pela equação teórica $U = f(I, G)$ obtemos:

$$P_{entrada} = A \cdot I^{m+1} G^m. \quad (4.9)$$

Da equação $(1 - \eta)/\eta$ obtemos que o rendimento teórico é igual a :

$$\eta = \frac{1}{1 + B \cdot I^p G^q}. \quad (4.10)$$

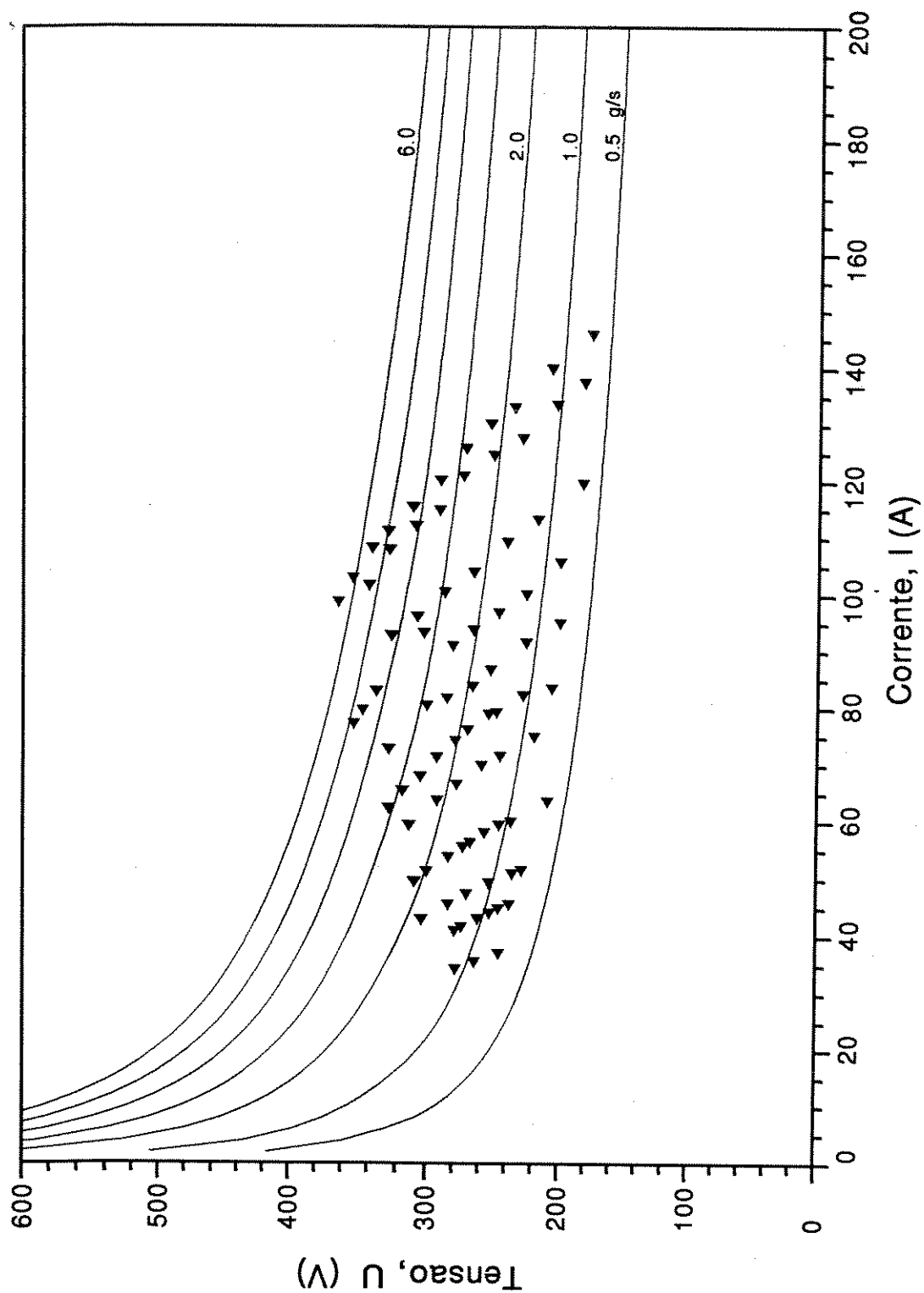


Fig. 26: Característica $U \times I$ da tocha de plasma, tendo como parâmetro a vazão do gás.
 Dados experimentais e curvas ajustadas por regressão multilinear.

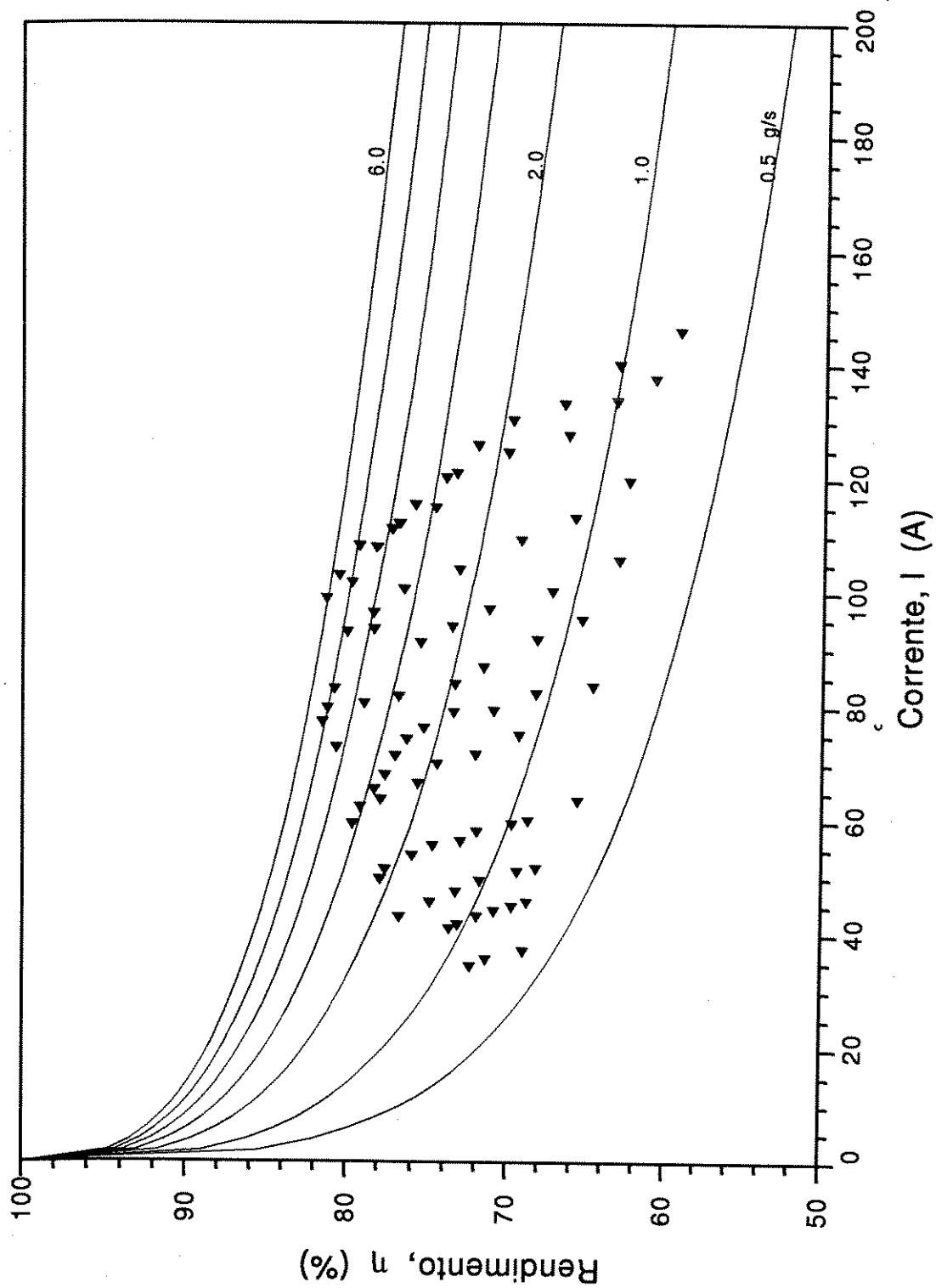


Fig. 27: Rendimento térmico da tocha de plasma em função da corrente, tendo como parâmetro a vazão do gás. Dados experimentais e curva ajustadas por regressão multilinear.

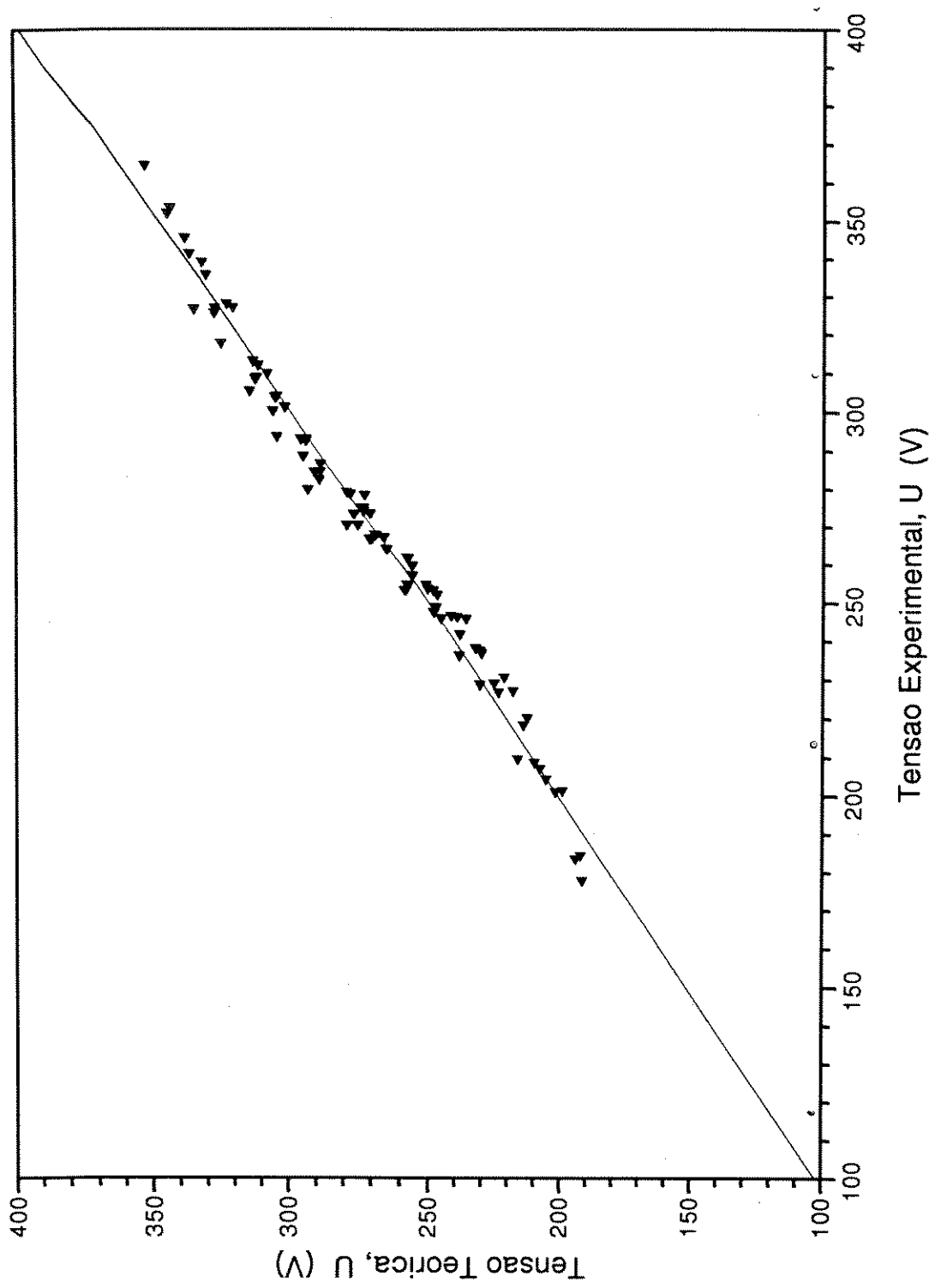


Fig. 28: Comparação entre a tensão teórica e experimental.

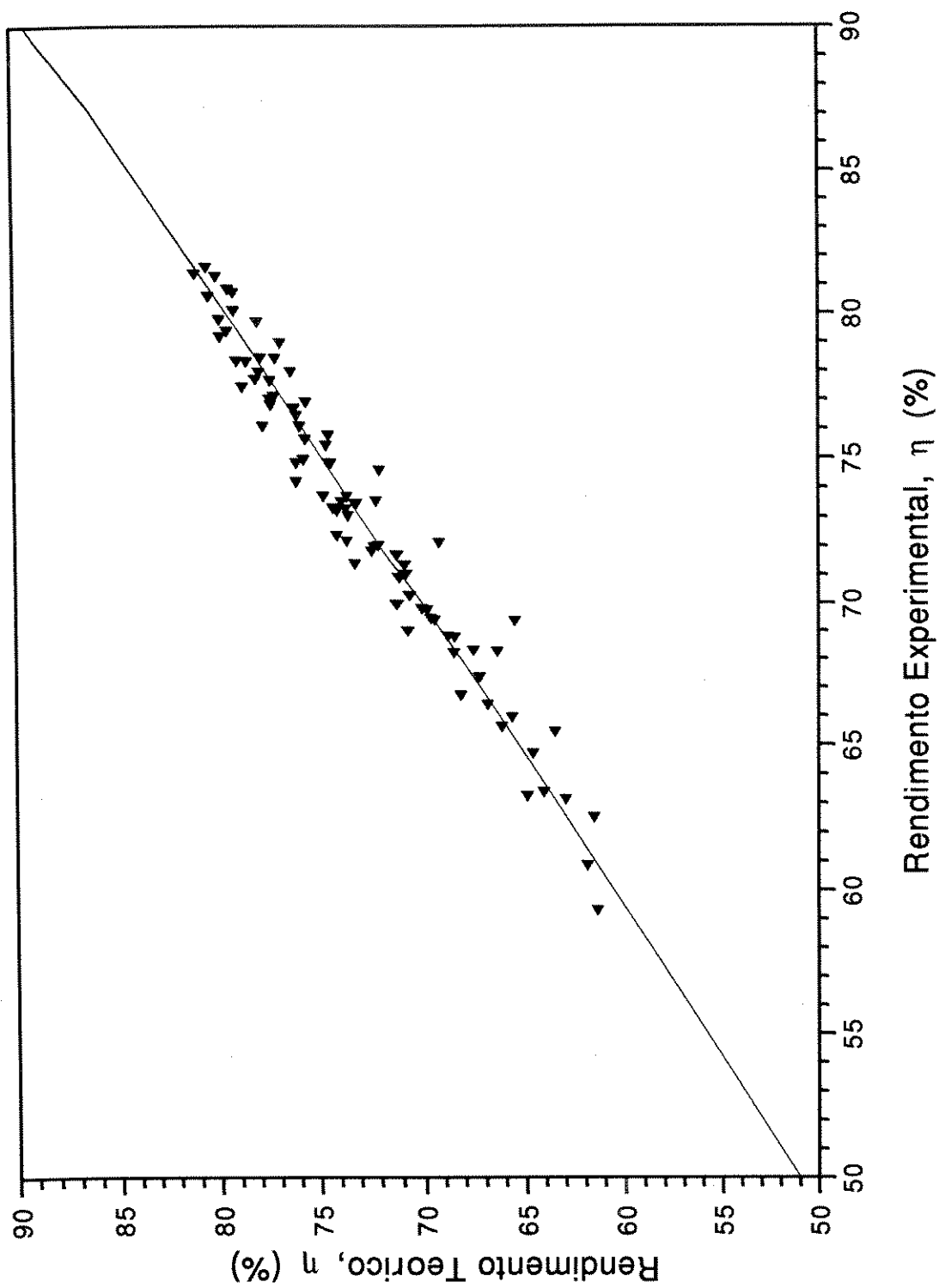


Fig. 29: Comparação entre o rendimento teórico e experimental.

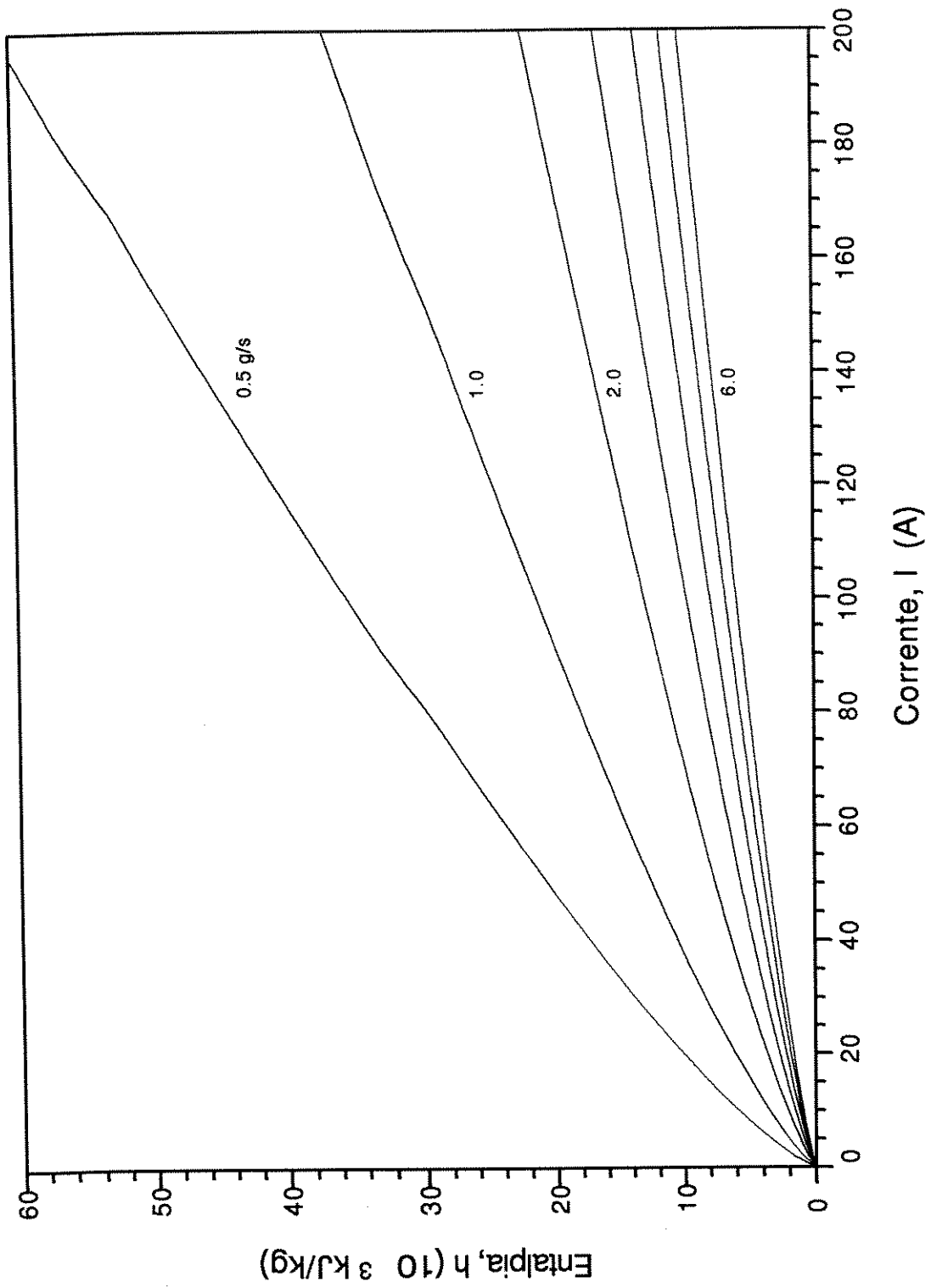


Fig. 30: Gráfico da entalpia média na saída do bocal da tocha em função da corrente.

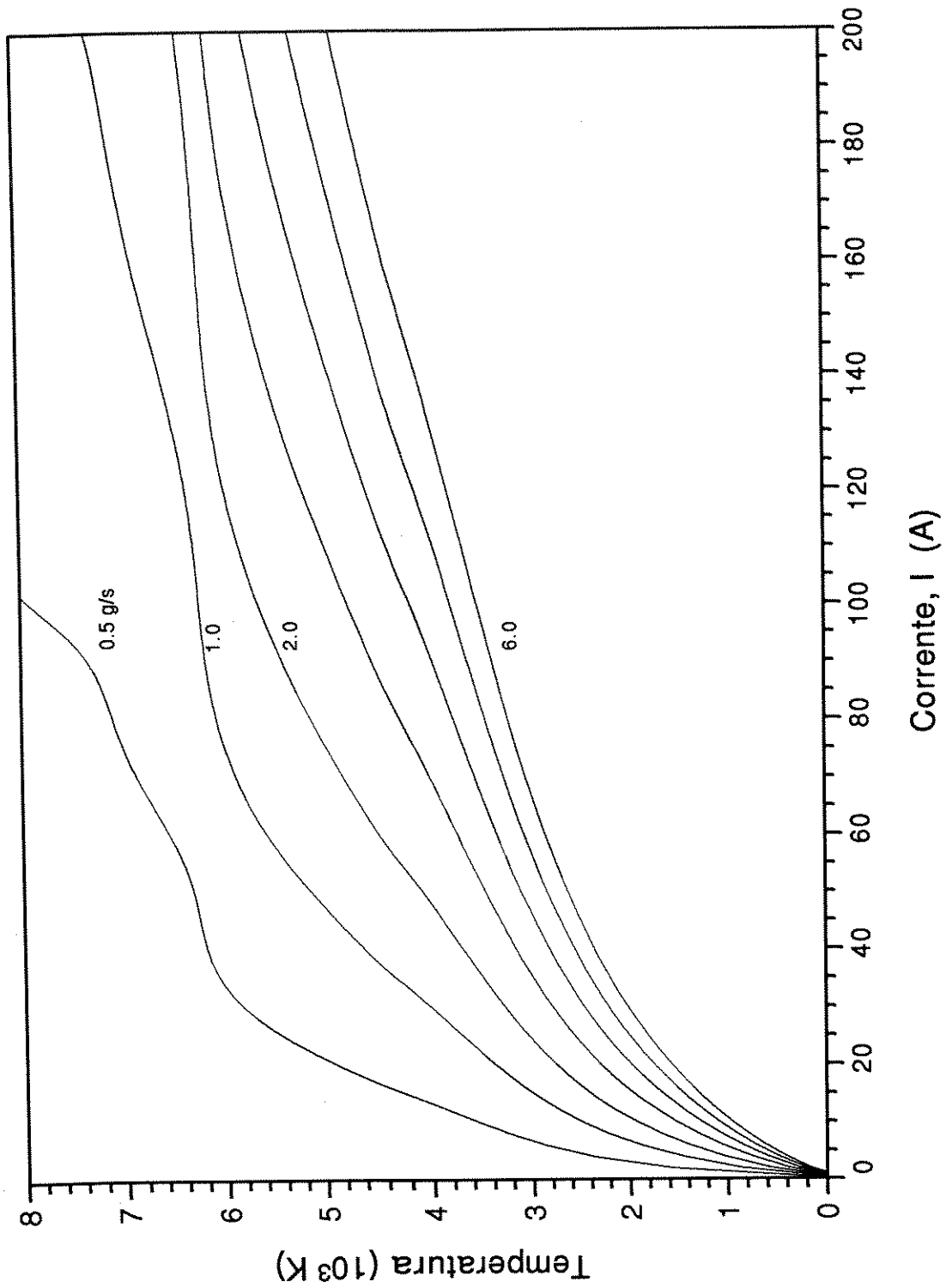


Fig. 31: Gráfico da temperatura média na saída do bocal da tocha em função da corrente.

Para a potência de saída temos então:

$$P_{saída} = \frac{A \cdot I^{m+1} G^n}{1 + B \cdot I^p G^q} + G h_{entrada}. \quad (4.11)$$

A entalpia de saída ($h_{saída}$) pode então ser obtida a partir da fórmula:

$$h_{saída} = \frac{A I^{m+1} G^{n-1}}{1 + B \cdot I^p G^q} + h_{entrada} \quad (4.12)$$

Substituindo os valores das constantes calculadas na equação acima, onde para o valor da entalpia de entrada ($h_{entrada}$) foi utilizado, $0.3003 \times 10^3 \text{kJ}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$, obteve-se a equação

$$h_{saída} = \frac{4017 I^{0.7811} G^{-0.7223}}{1 + 4.215 \times 10^{-3} \cdot I^{0.3671} G^{.4515}} + 0.03003, \quad (4.13)$$

que é mostrada na Fig. 30.

A partir da Tabela [17] obtém-se a entalpia em função da temperatura. Esses valores foram ajustados utilizando um polinômio de nono grau. Podemos então obter o gráfico da temperatura em função da corrente mostrado na Fig. 31.

Foram plotados outros gráficos que são apresentados nas Fig. s 32 e 33, e mostram a relação entre as perdas totais e tensão e entre perdas totais e corrente.

Do gráfico mostrado na Fig. 32 podemos verificar que as perdas totais não se correlacionam com a tensão. Já do gráfico mostrado na Fig. 33 vemos que há uma excelente correlação entre as perdas e a corrente. Observamos que nessas figuras a vazão variou de 0.6 a 6.0 g/s.

Para o rendimento também tentou-se encontrar uma correlação com as mesmas grandezas tensão e corrente e os resultados obtidos são mostrados nas Fig. s 34 e 35 onde pode-se observar que o rendimento apresenta boa correlação com a tensão e má com a corrente.

No gráfico apresentado na Fig. 37 é mostrado que o rendimento tende a aumentar com o aumento da vazão.

De volta aos gráficos mostrados nas Fig. 33 e 34, foi ajustada uma reta aos pontos experimentais do gráfico que relaciona perdas e corrente. A reta obtida foi:

$$P_{perdida} = a + b \cdot I, \quad (4.14)$$

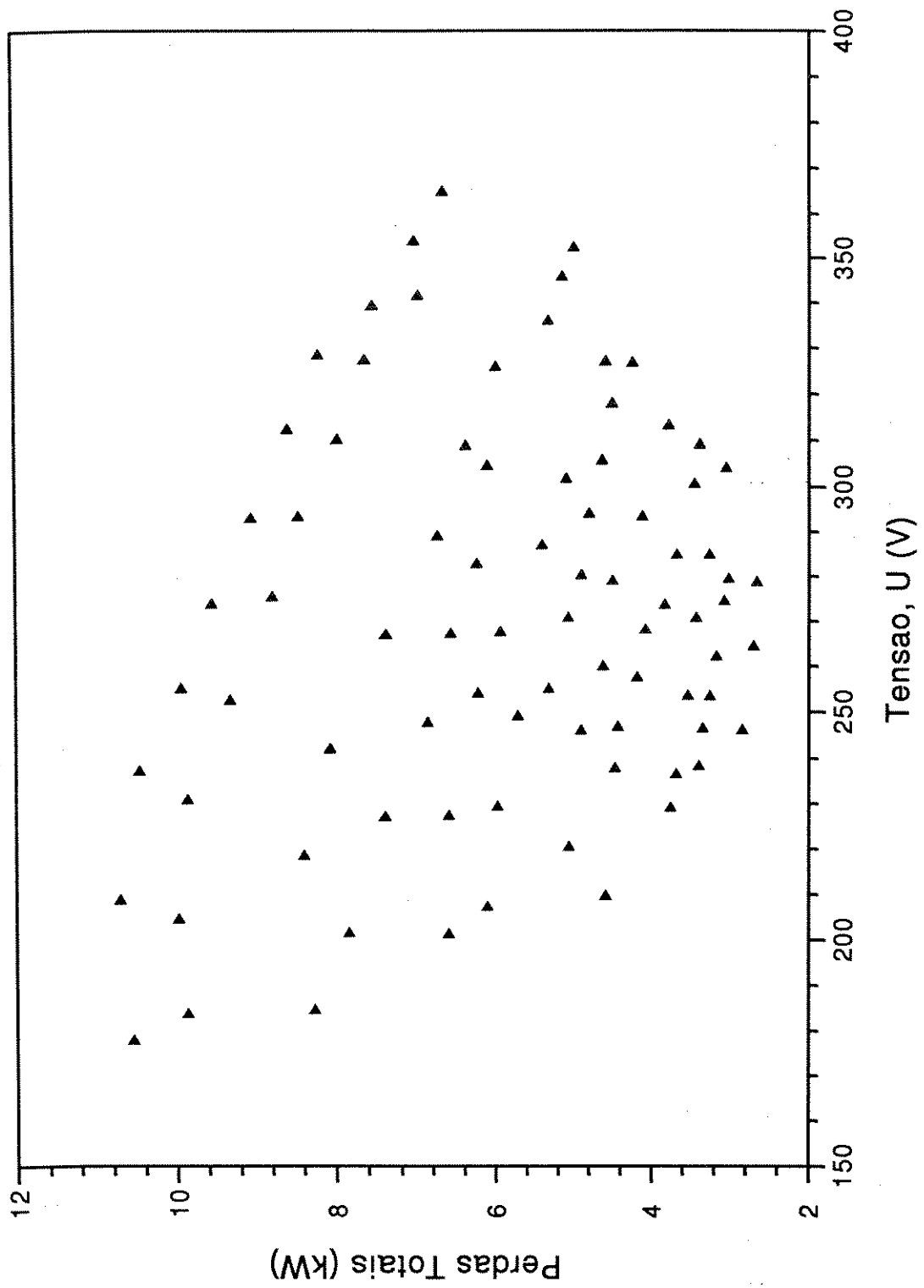


Fig. 32: Gráfico das perdas totais em função da tensão.

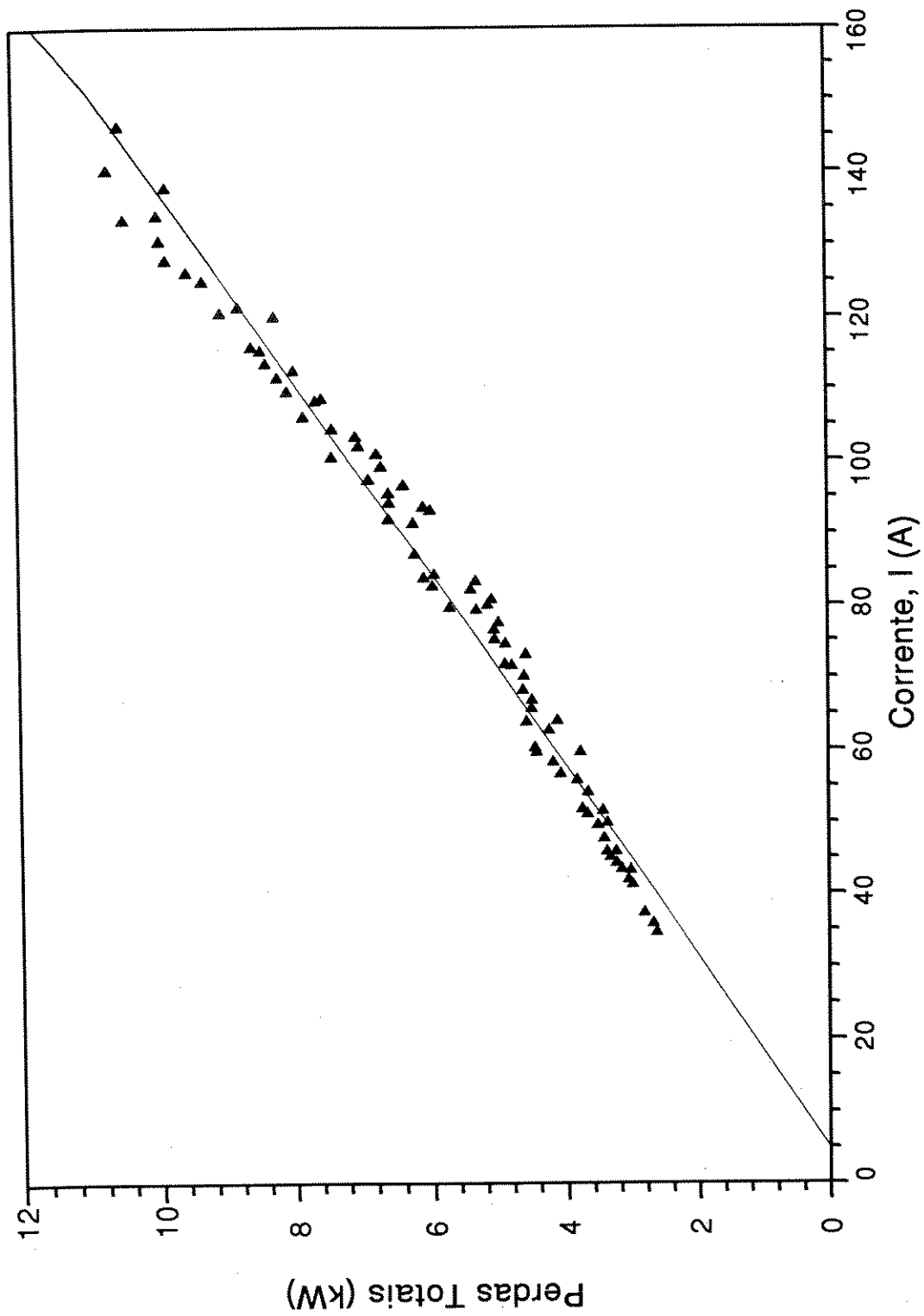


Fig. 33: Gráfico das perdas totais em função da corrente.

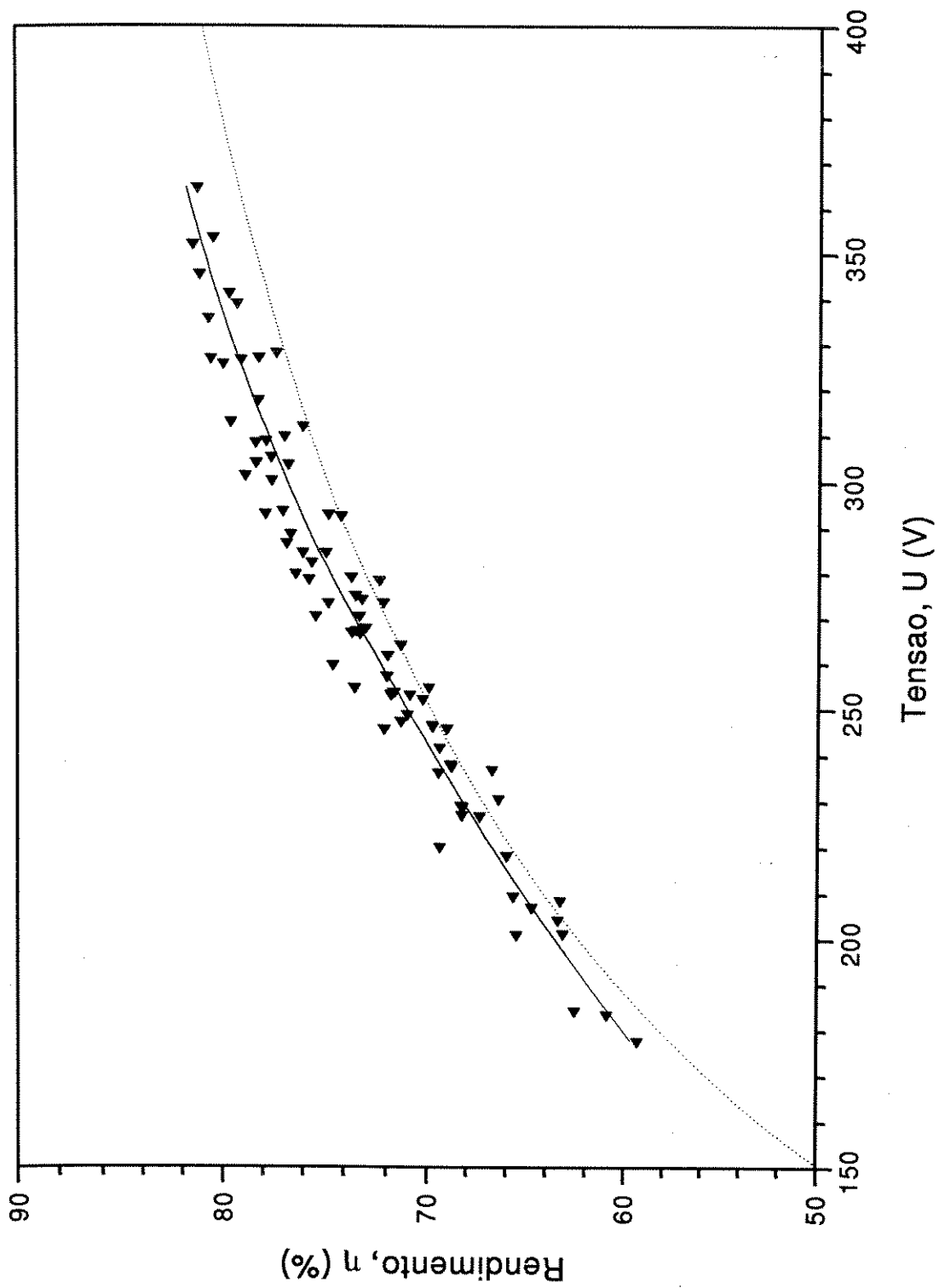


Fig. 34: Gráfico do rendimento em função da tensão.

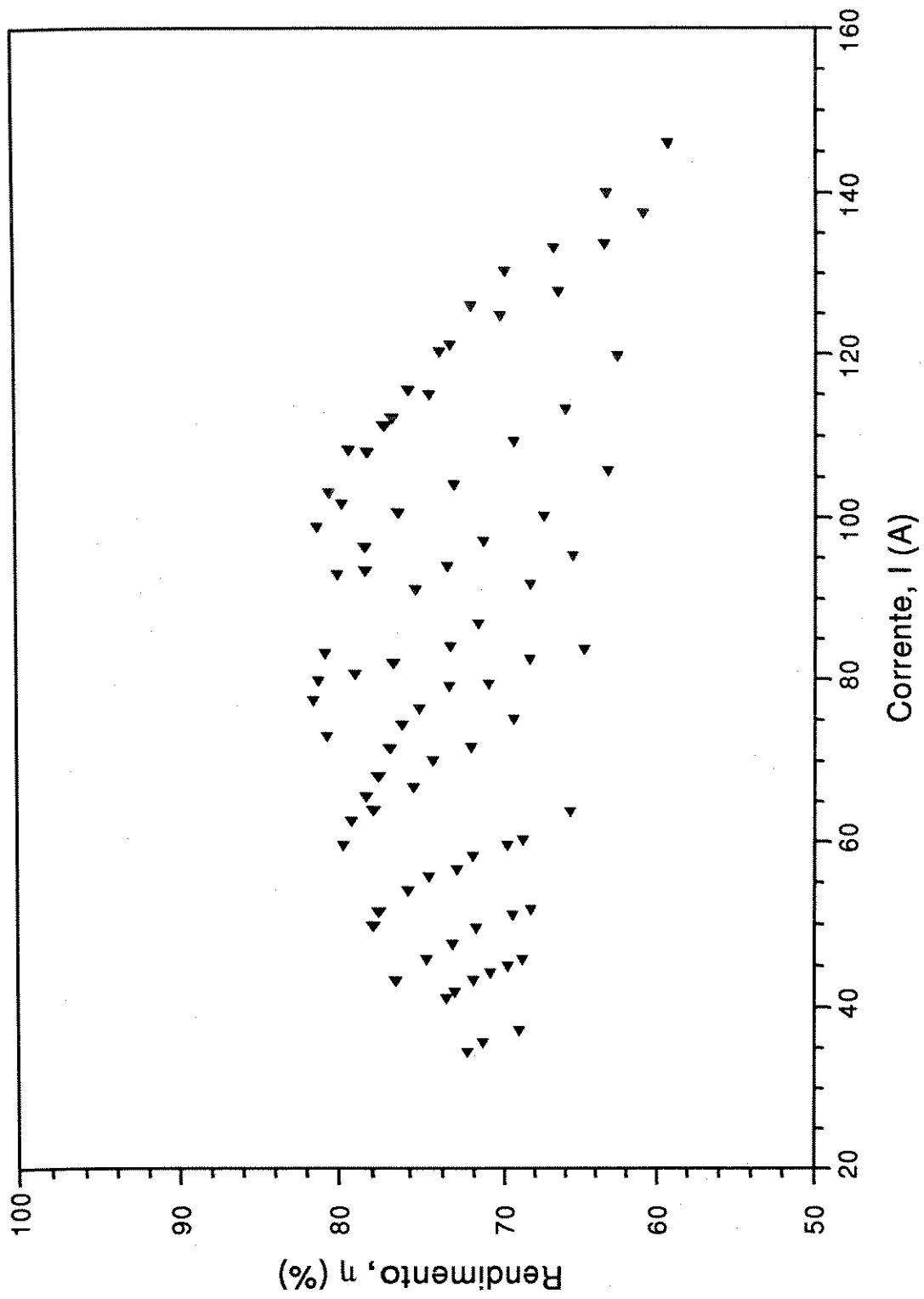


Fig. 35: Gráfico do rendimento em função da corrente.

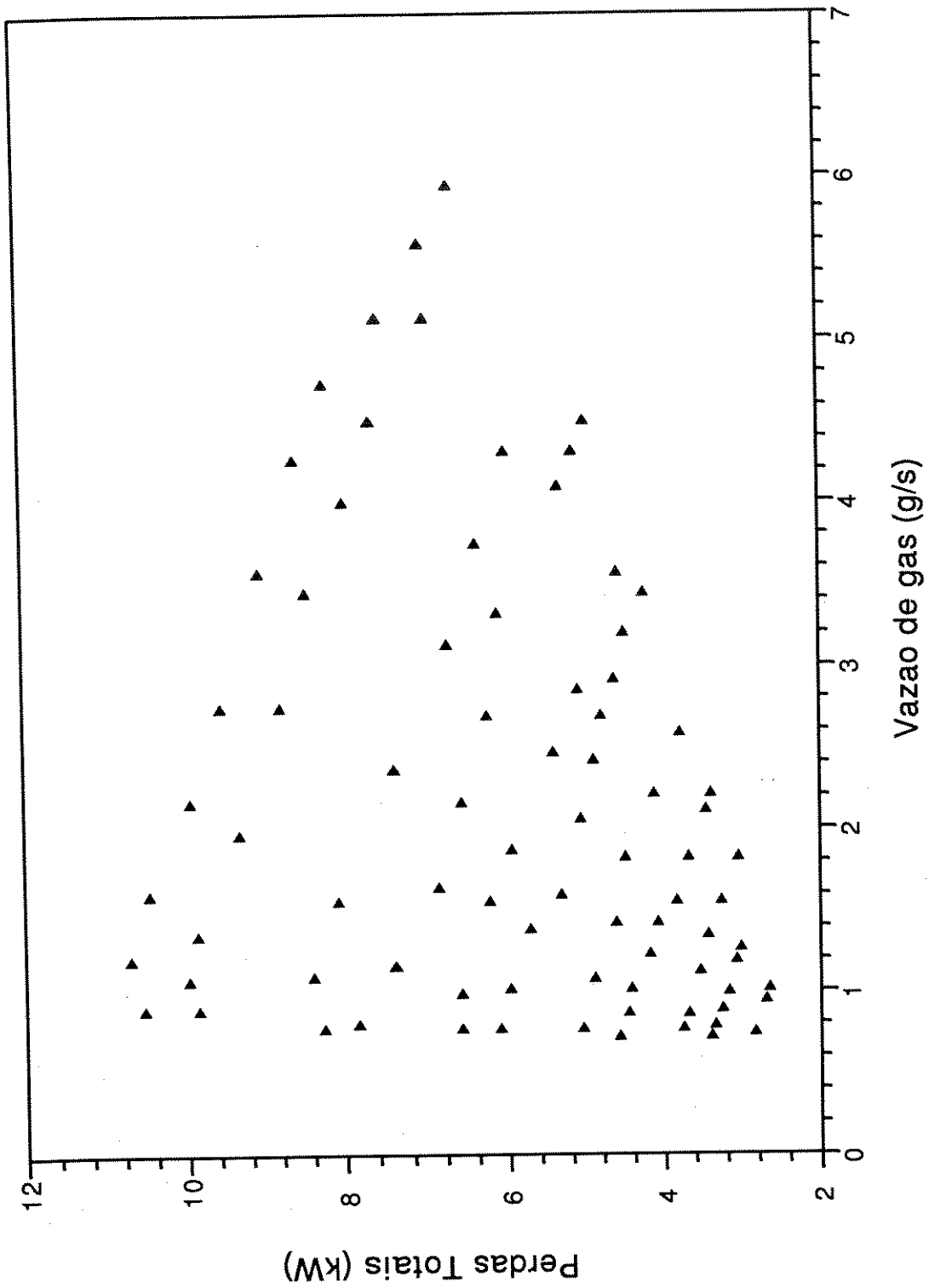


Fig. 36: Gráfico das perdas totais em função da vazão.

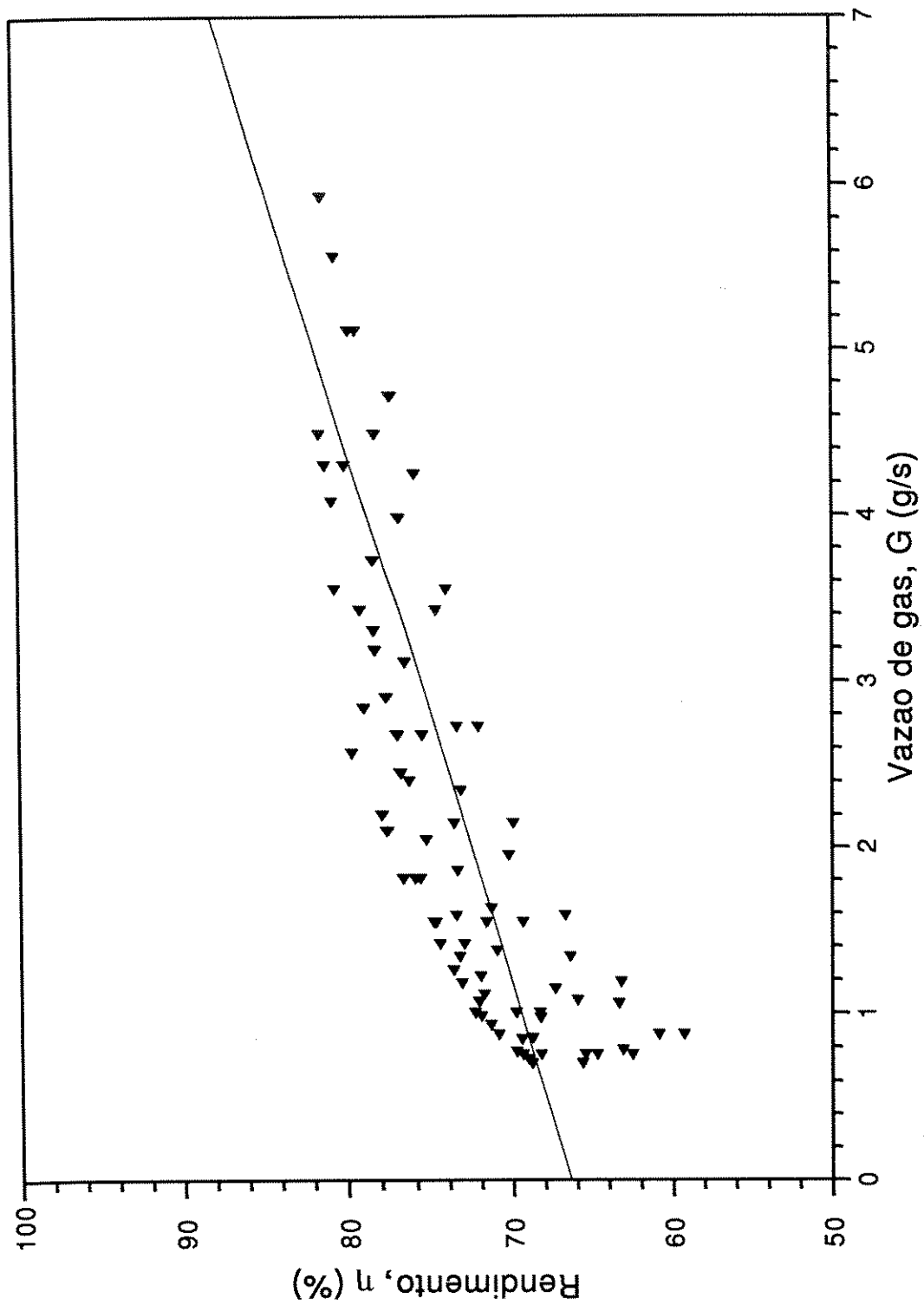


Fig. 37 Gráfico do rendimento em função da vazão.

onde,

$P_{perdida}$ é a potência perdida em Watt,

I é a corrente de operação em Ampere.

As constantes a e b são obtidas com o ajuste e iguais a -362.7 com desvio padrão $\sigma_a = 106.0$ e 75.36 com desvio padrão $\sigma_b = 1.21$. O coeficiente de correlação deste ajuste é igual a 0.9898 e o coeficiente linear a pode ser desprezado, pois como pode ser observado corresponde a aproximadamente 10% da menor perda medida.

Utilizando-se novamente a definição do rendimento, temos que:

$$\eta = 1 - \frac{P_{perdida}}{P_{entrada}}. \quad (4.15)$$

Como a potência de entrada é igual ao produto da corrente pela tensão de operação a equação do rendimento acima pode ser escrita apenas como uma função da tensão:

$$\eta = 1 - \frac{b}{U}. \quad (4.16)$$

Esta equação (linha tracejada) não reflete exatamente o comportamento do rendimento em função da tensão, como o polinômio do segundo grau (linha cheia) ajustado aos pontos, mas pode ser considerada, principalmente pela maneira simples como foi obtida, como uma boa aproximação.

4.2 Sonda de Entalpia

O SAD foi aplicado à sonda de entalpia para obter o perfil de temperatura do jato de plasma em cinco secções situadas a 30, 40, 50, 60 e 70 mm da saída do maçarico.

Neste experimento a tocha de plasma teve como ponto de operação fixado em: $U=250$ V, $I=100$ A, $G=1.428$ g/s, $\dot{m}_{cat}= 32,1$ g/s e $\dot{m}_{an}=126,1$ g/s que de acordo com a secção anterior implica em um rendimento η igual a 69% e a uma temperatura média na saída do anodo igual a 6149 K.

A sucção do gás (\dot{m}_g) para a sonda foi fixada em 200 l/h (0.00774 g/s).

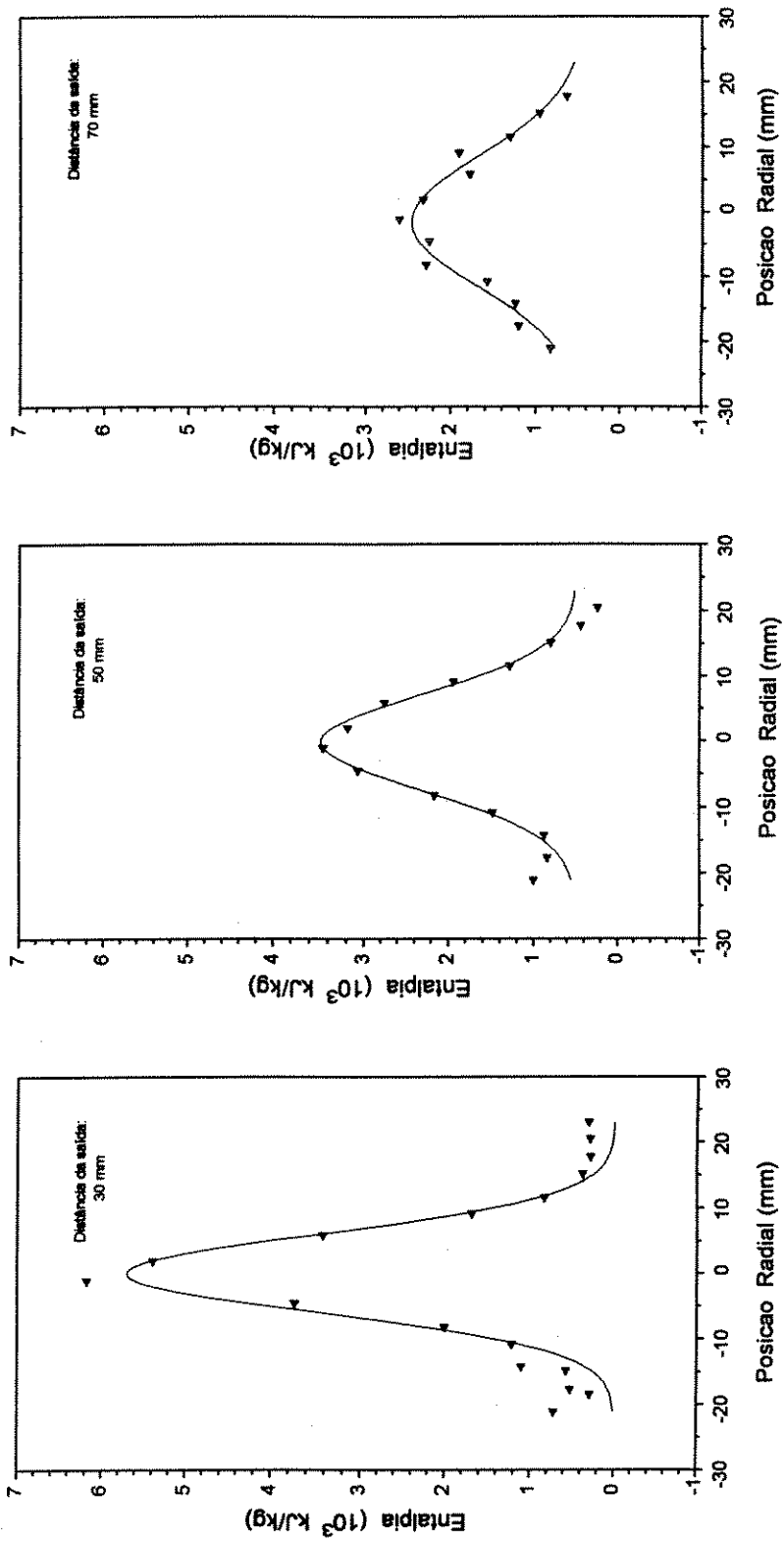


Fig. 38: Gráfico da entalpia em função da posição a 30, 50 e 70 mm da saída do maçarico.

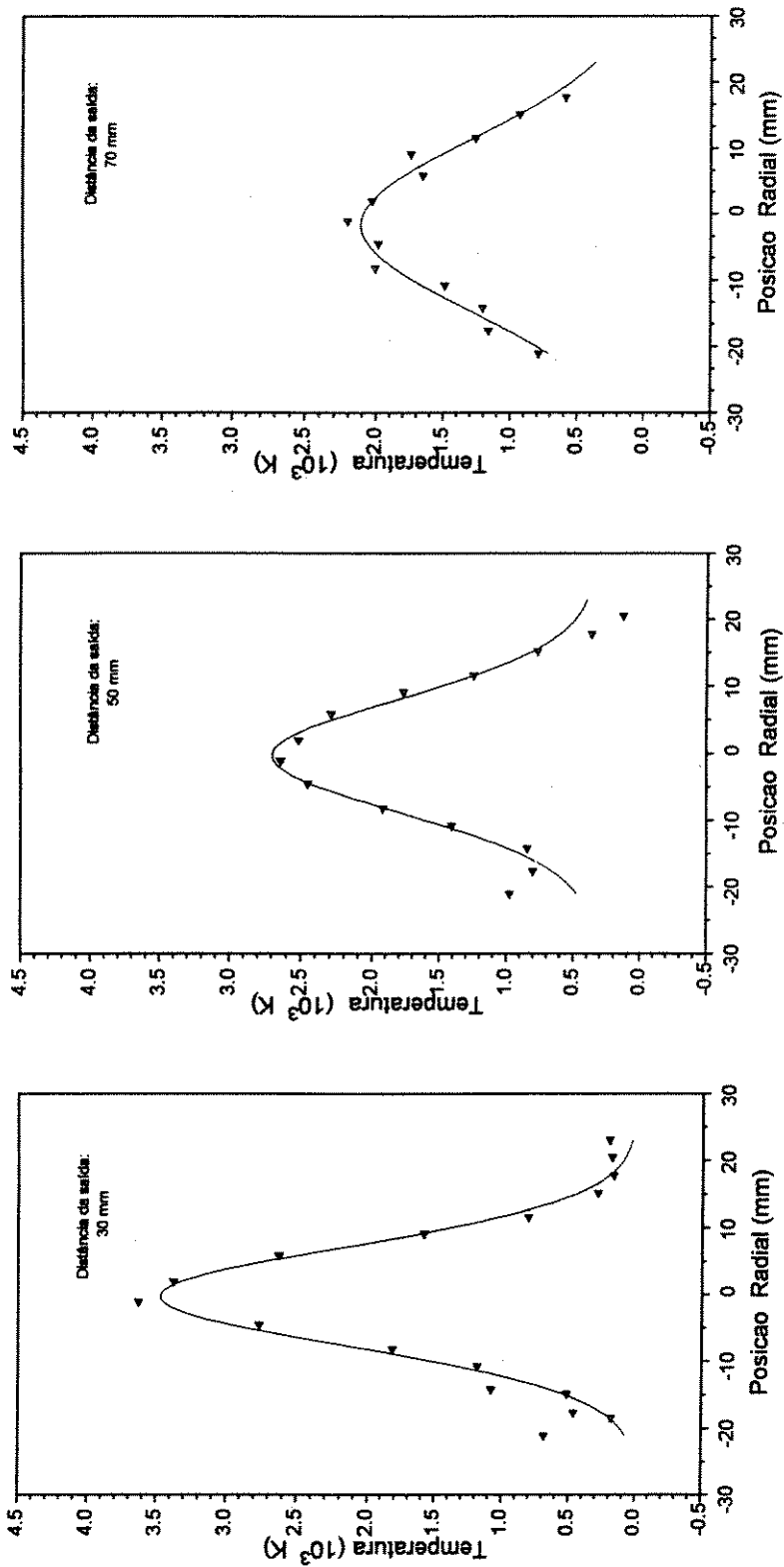


Fig. 39: Gráfico da temperatura em função da posição a 30, 50 e 70 mm da saída do maçarico.

Foi estimada a vazão mássica de gás supondo um aumento do diâmetro do jato de 10 mm para 25 mm a uma distância de 30 mm da saída do maçarico. Assim a vazão mássica referente a esta área passa a ser de 0.0234 g/s. Supondo agora uma temperatura média para esta secção igual a 2500 K tem-se uma densidade volumétrica específica ρ para o ar igual a 0.1394 kg/m³, levando então a uma vazão volumétrica igual a 0.168 l/s ou 604 l/h. A sucção da sonda foi fixada menor que a vazão correspondente na área de entrada da sonda para assegurar que não fosse succionado gás de regiões vizinhas a tomada de gás.

A vazão da água de refrigeração da sonda foi fixada em 13.3 g/s. Nestas condições foram feitas então as aquisições de posição da tomada de gás, temperaturas da água de refrigeração e temperatura de saída dos gás (T_{2g}) necessárias para o cálculo da entalpia da tocha em cada ponto.

A partir do valor da temperatura de saída do gás T_{2g} determina-se a entalpia de saída h_{2g} utilizando-se o polinômio $h = g(T)$. Com isso a entalpia de entrada h_{1g} passa a ser a única incógnita da equação

$$h_{1g} = \frac{\dot{m}_a c_{pa}}{\dot{m}_g} (\Delta T_a^{cf} - \Delta T_a^{sf}) + h_{2g} \quad (4.17)$$

Uma vez calculado o valor de entalpia na entrada da tomada de gás, faz-se o uso do polinômio $T = f(h)$, para determinar o valor da temperatura para cada ponto da linha transversal ao eixo da tocha.

Após o cálculo da temperatura em cada ponto da linha, foram plotados os gráficos da entalpia e da temperatura em função da posição para cada secção que estão mostrados nas Fig. s 38 e 39.

O ajuste aos pontos experimentais foi obtido com uma função Gaussiana mostrada a seguir:

$$y = \frac{A}{w\sqrt{\pi/2}} \cdot e^{(-2(x-x_c)^2/w^2)} + y_o, \quad (4.18)$$

onde,

$\frac{A}{w\sqrt{\pi/2}}$ é o valor máximo da função,

w é a largura a semi-altura,

A é a área sob a curva,

x_c é a posição do centro da função e

y_o é o off-set da função.

Fazendo-se uma transformação de variáveis foi obtida a seguinte função relacionando temperatura com a posição:

$$T = T_{max} e^{\left(-2(x-x_c)^2/w^2\right)} + T_o, \quad (4.19)$$

onde,

T_{max} é a temperatura máxima e

T_o é a temperatura ambiente.

Esta função foi então ajustada aos pontos experimentais, para as secções situadas a 30, 50 e 70 mm da saída do maçarico, como pode ser observado na Fig. 39.

Destes ajustes foi obtida a largura a semi-altura para cada secção que é mostrada na Fig. 40a e indica que a largura da tocha aumenta com o aumento da distância da saída do maçarico. A temperatura no eixo para cada secção também é obtida do ajuste e, como pode ser observado na Fig. 41, diminui a medida que as secções se afastam da saída. O deslocamento do centro do jato em relação ao eixo da tocha é mostrado na Fig. 40b. Como pode-se observar há uma deflexão do eixo do jato com relação ao eixo da tocha. Foi observado que realmente existe esta deflexão durante a operação normal do maçarico que pode estar relacionada com a assimetria do arco no anodo.

Partindo da função Gaussiana, que se ajusta bem ao perfil de temperatura do jato, e da equação para o cálculo do valor médio é possível estimar o valor da temperatura máxima na saída do maçarico.

O valor médio de uma função é calculado pela equação,

$$\bar{f} = \frac{1}{b-a} \int_a^b f(x) dx \quad (4.20)$$

Fazendo, $f(x) = T(x)$ temos que $\bar{f} = \bar{T}$, onde \bar{T} é conhecido a partir das condições de operação do maçarico durante a realização do experimento.

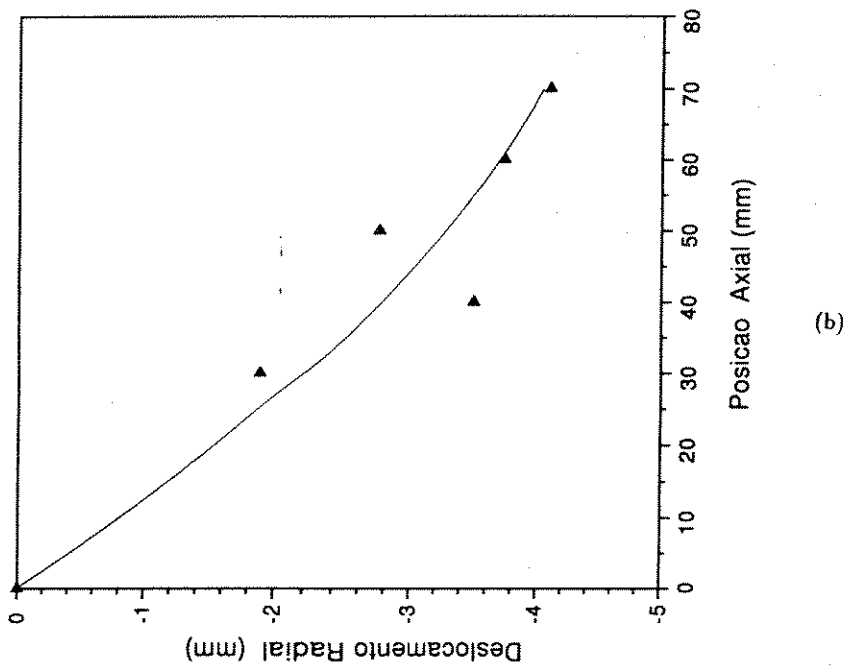
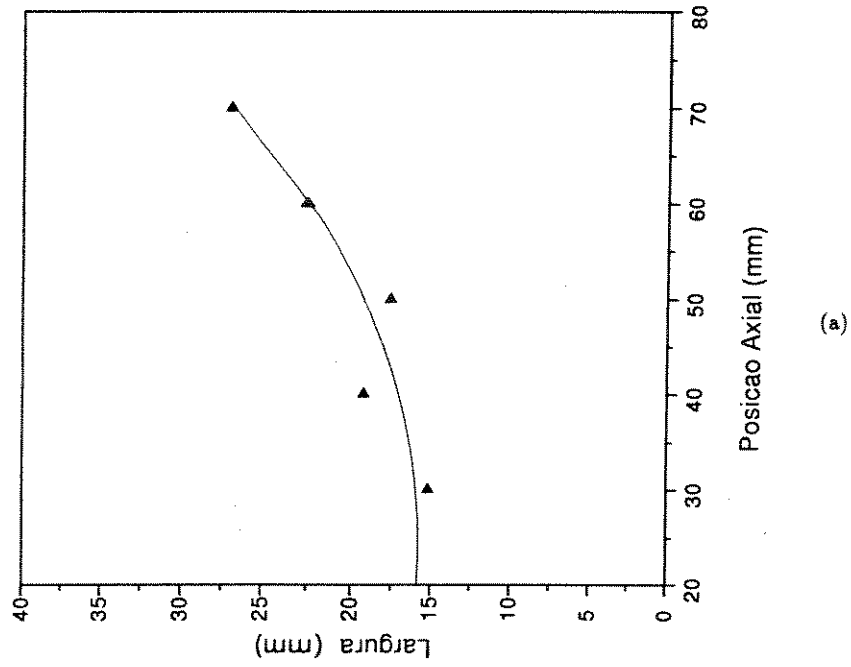


Fig. 40: (a) Gráfico da variação da largura a meia altura do jato em função da distância da saída; (b) Deslocamento do eixo do jato de plasma em relação ao eixo do maçarico para as secções localizadas a 0, 30, 40, 50, 60 e 70 mm da saída.

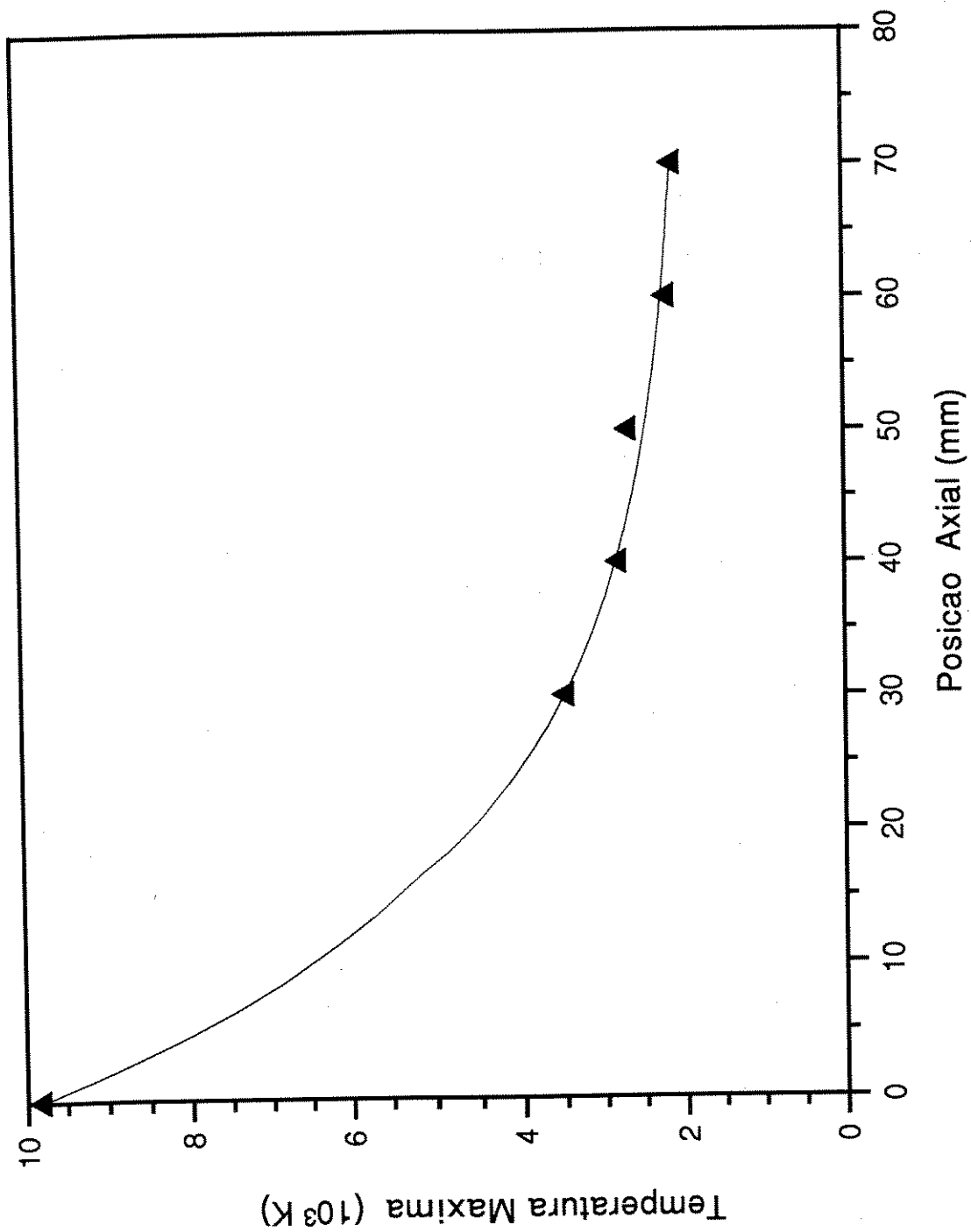


Fig. 41: Gráfico da temperatura máxima do jato em função da distância da saída do maçarico.

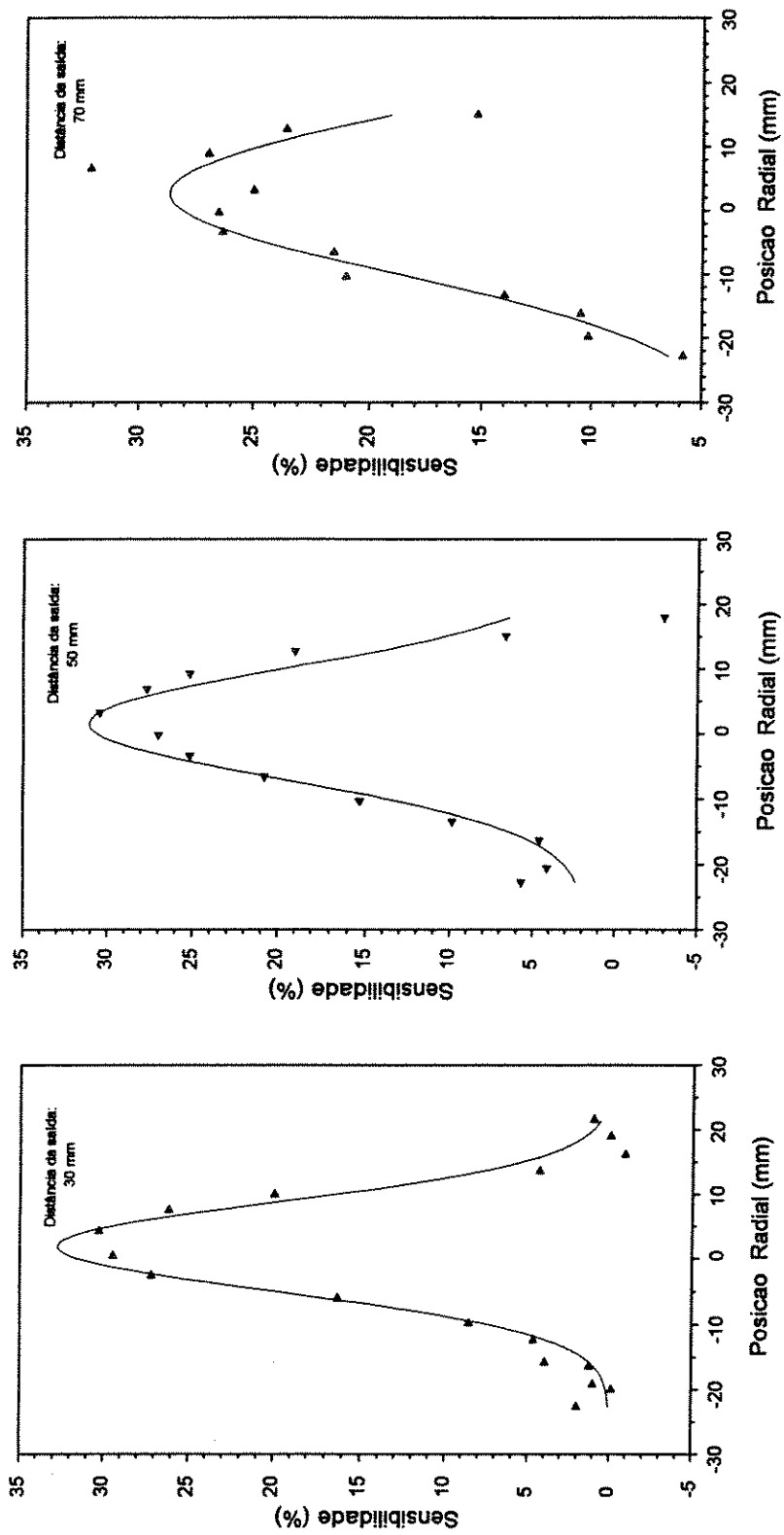


Fig. 42: Sensibilidade da sonda para secções a 30, 50 e 70 mm da saída do maçarico.

Comparando-se a função Gaussiana com a função ajustada aos pontos experimentais temos que,

$$T_{max} = \frac{A}{w\sqrt{\pi/2}} \quad (4.21)$$

Como a área sob uma curva é calculada a pela equação,

$$A = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx \quad (4.22)$$

temos então da equação do valor médio que, $A = \bar{T} \cdot (b - a)$. Onde $(b - a)$ é igual ao diâmetro (d) do anodo.

Aproximando-se o valor da largura a semi-altura (w) da função temperatura na saída do anodo para a metade do diâmetro temos então que,

$$T_{max} \approx \frac{\bar{T} \cdot d}{\frac{d}{2} \cdot \sqrt{\pi/2}}, \quad (4.23)$$

e finalmente,

$$T_{max} \approx 1.60 \cdot \bar{T}. \quad (4.24)$$

Logo, $T_{max} \approx 9800$ K, para $\bar{T}=6130$ K.

A partir dos dados experimentais foi também levantado o comportamento da sensibilidade da sonda em função da posição que é mostrado na Fig. 42 onde pode ser observado que os maiores valores de sensibilidade coincidem com os maiores valores de temperatura.

Capítulo 5

Conclusões

Foi desenvolvido nesta Tese um sistema automatizado de aquisição de dados com o objetivo de caracterizar um maçarico de plasma. A caracterização do maçarico de plasma consistiu, em primeiro lugar, na medida de grandezas macroscópicas externas que permitiram a determinação das características tensão-corrente e rendimento-corrente em função da vazão de gás. Foram calculadas, a partir desses dados, a entalpia e a temperatura médias no bocal do maçarico. A partir desses dados foram observadas correlações simples entre alguns dos parâmetros do maçarico: a potência térmica perdida para os eletrodos apresentou uma dependência linear com a corrente. Esse resultado permitiu obter uma dependência simples entre o rendimento e a tensão.

O sistema foi também aplicado para a determinação dos perfís de temperatura do jato de plasma utilizando uma sonda de entalpia construída no laboratório. Os perfís de temperatura do jato apresentaram um bom ajuste à curvas gaussianas.

O sistema de automatização é formado por um microcomputador PC-XT interligado a um multiprogramador STD-85MP via barramento GPIB. O multiprogramador possui um barramento interno ao qual estão conectados 2 cartões: um cartão conversor A/D (STD-8502) e um cartão de relés (STD-8402). O micro comunica-se com o multiprogramador através da interface GPIB utilizando a linguagem estruturada denominada ASYST. O multiprogramador gerencia o cartão de

relés, que controla o experimento, e o cartão conversor que faz a aquisição dos dados.

Foram resolvidos diversos problemas relacionados com o acoplamento do sinal ao sistema de conversão analógico-digital para a proteção das placas de interface e do micro contra a alta tensão do sistema de ignição do maçarico de plasma, e contra os altos níveis de corrente e tensão da fonte de potência, bem como para eliminar o ruído.

A capacidade de obtenção de dados de forma automatizada pode ser observada comparando-se o tempo gasto para se obter um conjunto de dados manualmente e o gasto automaticamente. O tempo total gasto para ser feita uma varredura de 10 pontos com a sonda de entalpia para a determinação de um perfil de temperatura do jato de plasma foi de 729 seg (≈ 12 min), enquanto uma média de duas horas foi necessária para a realização manual. Constatamos com isso uma diminuição de 10 vezes no tempo gasto para se fazer um mesmo conjunto de medida na tocha de plasma.

Uma próxima etapa a ser realizada em continuidade a este trabalho deverá ser a extensão do sistema de automatização aos transdutores-controladores de vazão de gás e água do maçarico e da sonda de entalpia, bem como ao controle da fonte de alimentação do maçarico de plasma.

Levando em conta a grande diminuição conseguida no tempo de aquisição de dados e os resultados obtidos que permitiram a caracterização completa do maçarico de plasma podemos considerar que os objetivos inicialmente propostos foram alcançados nesta Tese.

Bibliografia

- [1] Bittencourt, J. A.; Fundamentals of Plasma Physics: An Introduction, Report INPE-1450-RPE/15, 1979.
- [2] Boffa, C. and Pfender, E.; "Enthalpy Probe and Spectrometric Studies in an Argon Plasma Jet", Heat Transfer Laboratory, Department of Mechanical Engineering, University of Minnesota, 1969.
- [3] Cobine, J. D., "Gaseous Conductors, Theory and Engineering Applications", Dover Publications, Inc. New York, 1958.
- [4] Cunha, A. G.; "Desenvolvimento de uma Sonda de Entalpia e Aplicação ao Maçarico de Plasma", Tese de Mestrado, IFGW/UNICAMP, 1988.
- [5] Dresvin, S.V.; Donskoi, A. V.; Goldfarb, V.M.; Klubnikin, V.S.; " Physics and Technology of Low-Temperature Plasmas", The Iowa State University Press, 1977.
- [6] Eckert, K. G. and Pfender, E.; "Advances in Plasma Heat Transfer in Heat Transfer edited by James P. Hartnett & Thomas F. Irvin Jr., Vol. 4, pg 229-313, 1967.
- [7] Grey, J. "Probe Measurement in High Temperature Gases and Dense Plasmas", Measurements in Heat Transfer, second edition; pg. 337-374, 1976.
- [8] Grey, J.; "Sensitivity Analysis for the Calorimetric Probe" The Review of Scientific Instruments, Vol. 34, 8, pg 857, 1963.

- [9] Grey, J. and Jacobs, P. F.; "Experiments on Turbulent Mixing in a Partially Ionized Gas", AIAA Journal, **2**, 433-8, 1964.
- [10] Grey, J.; Jacobs, P. F. and Sherman, M. P.; "Calorimetric Probe for the Measurement of Extremely High Temperatures", Rev. Sci. Instr. **33**, 738-41, 1962.
- [11] Gross, B.; Gryez, B. and Miklossy, K.; "Plasma Technology", pg.13-37, Iliffe Books Ltda, London, 1968.
- [12] Marotta, A. "Tochas de Plasma: Questões Básicas; Primeiro Cong. Bras. Físicas de Plasma Anais, Vol. 1 , pg. 228-241, 1991.
- [13] Pfender, E.; "Electric Arcs and Arc Gas Heaters"; Gaseous Electronics, Academic Press, New York, 1978.
- [14] Rodrigues, V. A; "Caracterização de um Maçarico de Plasma", Tese de Mestrado, UNICAMP-IFGW, 1988.
- [15] Shashkov, A. G. and Yas'ko, O. I.; "Aplication of Approximate Similarity for Correlating Arc Characteristics", IEEE Trans. Plasma Sci., PS-1, **21**, pp. 21-37, 1973.
- [16] Sheingold, D. H.; "Analog Digital Conversion Handbook", third edition, Norwood-MA, Prentice-Hall, 1986.
- [17] Vargaftik, N. B.; "Tabela de Propriedades Termofísicas de Gases e de Líquidos", Nauka, Moscou, 1972. (em russo)
- [18] Vicente, L. C.; "Construção e Diagnóstico de um Maçarico de Plasma para Corte; Tese de Mestrado, UNICAMP-IFGW, 1985.
- [19] Yas'ko, O. I.; "Correlation of Characteristics of Electric Arcs", J. Appl. Phys. D, **2**, 1969, pp. 733-751.
- [20] Zhukov, M. F.;"Princípios de Cálculo de Geradores de Plasma de Esquema Linear", Instituto de Termo-física, Novosibirsk, 1979. (em russo)

- [21] Zhukov, M. F.; Koroteiev, A. S.; Uriukov, B. A.; "Dinâmica Aplicada do Plasma Térmico", Nauka, Novosibirsk, 1975. (em russo)
- [22] Zhukov, M. F.; Smolialov, V. I.; Uriukov, B. A.; "Aquecedores de Gás a arco elétrico (Plasmatrons)", Nauka, Moscou, 1973. (em russo)

Apêndice A

Barramentos STD-BUS e GPIB

O barramento internacional STD-BUS foi concebido pela Prolog Corporation e desenvolvido em conjunto com a MOSTEK para ser uma estrutura simples de barramento de 56 pinos, organizado de forma lógica e de fácil compreensão. Sua flexibilidade permite que se trabalhe com todos os microprocessadores de 8 bits existentes e sua principal utilização é tanto em controle dedicados como em processamento de dados.

A STD (Sistemas Técnicos Digitais S.A.) adotou este padrão, por ele ter seu uso irrestrito e livre de marcas e patentes, em sua série de produtos dedicados a aplicações de controle de processos e instrumentação microprocessada. O quadro mostrado na Fig. 1 apresenta todos os sinais presentes no barramento STD-BUS e o sentido do fluxo para o cartão CPU.

O padrão GPIB (IEEE-488) foi desenvolvido com quatro principais restrições:

1. Toda comunicação de dados é digital.
2. No máximo 15 equipamentos podem ser conectados num mesmo barramento (incluindo o controlador do sistema).
3. O comprimento máximo do cabo não pode ultrapassar 15 m ou 2 m por equipamento.
4. A taxa máxima de transferência de dados é 1 Megabyte por segundo.

	LADO DOS COMPONENTES				LADO DO CIRCUITO			
	PINO	MNEMONICO	SINAL	DESCRIÇÃO	PINO	MNEMONICO	SINAL	DESCRIÇÃO
ALIMENTAÇÃO LÓGICA	1	+5VDC	→	ALIMENTAÇÃO LÓGICA	2	+5VDC	→	ALIMENTAÇÃO LÓGICA
	3	GND	←	TERRA LÓGICA	4	GND	←	TERRA LÓGICA
	5	VDD#3	→	POLARIZAÇÃO LÓGICA (-5V)	6	VDD#2	→	POLARIZAÇÃO LÓGICA (-5V)
DADOS	7	D3	↔	BIT 3 DE DADOS	8	D7	↔	BIT 7 DE DADOS
	9	D2	↔	BIT 2 DE DADOS	10	D6	↔	BIT 6 DE DADOS
	11	D1	↔	BIT 1 DE DADOS	12	D5	↔	BIT 5 DE DADOS
	15	D0	↔	BIT 0 DE DADOS	14	D4	↔	BIT 4 DE DADOS
ENDEREÇOS	16	A7	↔	BIT 7 DE ENDEREÇOS	16	A15	↔	BIT 15 DE ENDEREÇOS
	17	A6	↔	BIT 6 DE ENDEREÇOS	18	A14	↔	BIT 14 DE ENDEREÇOS
	19	A5	↔	BIT 5 DE ENDEREÇOS	20	A13	↔	BIT 13 DE ENDEREÇOS
	21	A4	↔	BIT 4 DE ENDEREÇOS	22	A12	↔	BIT 12 DE ENDEREÇOS
	23	A3	↔	BIT 3 DE ENDEREÇOS	24	A11	↔	BIT 11 DE ENDEREÇOS
	25	A2	↔	BIT 2 DE ENDEREÇOS	26	A10	↔	BIT 10 DE ENDEREÇOS
	27	A1	↔	BIT 1 DE ENDEREÇOS	28	A9	↔	BIT 9 DE ENDEREÇOS
	29	A0	↔	BIT 0 DE ENDEREÇOS	30	A8	↔	BIT 8 DE ENDEREÇOS
CONTROLE	31	WR#	←	ESCRITA EM MEMÓRIA OU E/S	32	RDB	←	LER EM MEMÓRIA OU E/S
	33	IOR#	←	SELEÇÃO DE ENDEREÇOS DE E/S	34	MEMR#	←	SELEÇÃO DE ENDEREÇO DE MEMÓRIA
	35	IDEP	←	EXPANSÃO DE E/S	36	MEM#	←	EXPANSÃO DE MEMÓRIA
	37	REFRESH	←	TEMPORIZAÇÃO DE REFRESH	38	MCST#	←	SINC DO CICLO DE MÁQUINA (CPM)
	39	STATUS 16	←	STATUS DA CPU	40	STATUS 06	←	STATUS DA CPU
	41	BUSAK#	←	ACK DO BARRAMENTO	42	BUSRD#	←	SOLICITAÇÃO DO BARRAMENTO
	43	INTAK#	←	ACK DE INTERRUPTO	44	INTR#	←	SOLICITAÇÃO DE INTERRUPTO
	45	WAITR#	←	SOLICITAÇÃO DE ESPERA	46	NMI#	←	INTERRUPTO NÃO-MASCARÁVEL
	47	SYSRST#	←	INICIALIZAÇÃO DO SISTEMA	48	PRESET#	←	INICIALIZAÇÃO POR TECLA
	49	CLOCK#	←	RELÓGIO DA CPU	50	CTRL#	←	TEMPORIZAÇÃO AUXILIAR
51	PCO	←	SINAL DE PRIORIDADE SERIAL	52	PCI	←	ENTRADA DE PRIORIDADE SERIAL	
ALIMENTAÇÃO AUXILIAR	53	AUX GND	←	TERRA AUXILIAR	54	AUXRD	←	TERRA AUXILIAR
	55	AUX +V	→	ALIM POSITIVA AUXILIAR (+12V)	56	AUX-Y	←	ALIM NEGATIVA AUXILIAR (-12V)

Fig. 1: Sinais do barramento STD-BUS.

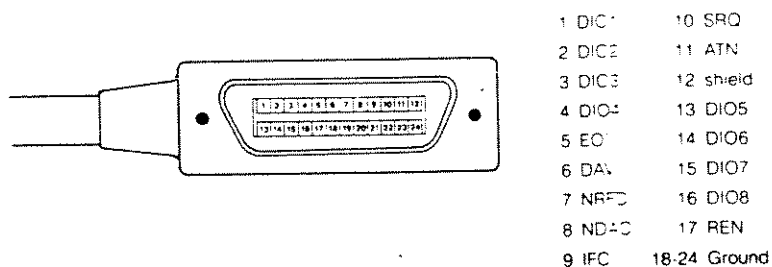


Fig. 2: Conector GPIB.

O conector utilizado é um conector de 24 pinos mostrado na Fig. 2.

O barramento GPIB está dividido em três grupos básicos de linhas:

1. 8 linhas de dados: DIO1-DIO8.
2. 5 linhas de controle de barramento: ATN, IFC, REN, EOI e SQR.
3. 3 linhas de handshake: DAV, NRFD e NDAC.

As oito linhas de dados são na realidade as linhas multipropósito do barramento. Através destas linhas os equipamentos podem enviar ou receber dados.

Somando-se a isso o controlador usa as linhas DIO para o envio de comandos, que são chamados comandos multilinhas ou comandos GPIB. O controlador executa estes comandos colocando o valor apropriado nas linhas DIO setando simultaneamente a linha de controle ATN. Assim um equipamento pode diferenciar um comando GPIB de um dado normal.

A descrição do uso das linhas de controle do barramento é feita a seguir:

- ATN - attention - esta linha é usada pelo controlador para indicar se as linhas de dados contém dados ou comandos. Quando a linha de dados esta setada as linhas de dados contém comandos GPIB.
- IFC - interface clear - a linha IFC é usada somente pelo controlador para alterar toda atividade do barramento. Quando setada todos os talkers e listeners são desendereçoados e qualquer serial poll é desabilitado.
- REN - remote enable - a linha REN pode ser usada apenas pelo controlador do sistema. Quando setada torna possível a operação remota dos equipamentos presentes no barramento e quando resetada todos os equipamentos retornam ao modo local de controle.
- EOI - end or identify - a linha EOI é usada em conjunto com a linha ATN para diferenciar uma transmissão de dados de um início de "parallel poll".

- SRQ - service request - a linha SRQ é usada por um equipamento presente no barramento para enviar uma mensagem de solicitação de serviço ao controlador do sistema.

As linhas de handshake são descritas a seguir:

- DAV - data valid - esta linha é controlada pelo equipamento vai enviar um dado, para indicar que o dado presente nas linhas DIO é válido.
- NRFD - not ready for data - esta linha é controlada pelos equipamentos, para indicar se estão prontos ou não para receber o dado. Quando a linha NRFD está no nível alto, todos os equipamentos presentes no barramento estão habilitados para receber o dado presente nas linhas DIO.
- NDAC - not accepted data - os equipamentos que recebem dados usam esta linha para comunicar que o byte de dados foi aceito. Quando esta linha está no nível alto todos os equipamentos presentes no barramento receberam o byte de dados.

A sequência de handshake é iniciada pelos equipamentos de recepção colocando a linha NRFD no nível alto para indicar que estão prontos para receber o dado. Depois que o dado está estável nas linhas DIO e que o equipamento de envio de dado percebe que a linha NRFD foi para o nível alto, ele coloca a linha DAV no nível baixo. Neste ponto os equipamentos de recepção começam a processar o dado e recolocam a linha NRFD no nível baixo. Quando todos os equipamentos de recepção, terminarem o processamento do dado presente nas linhas DIO, a linha NDAC é colocada para o nível alto. Isto sinaliza ao equipamento de envio, que não é mais necessário manter a linha DAV no nível baixo, com isso esta linha é colocada no nível alto. Quando os equipamentos de recepção percebem que a linha DAV foi para o nível alto, a linha NDAC é colocada então no nível baixo, encerrando assim a sequência de handshake. A Fig. 3 mostra esta sequência graficamente.

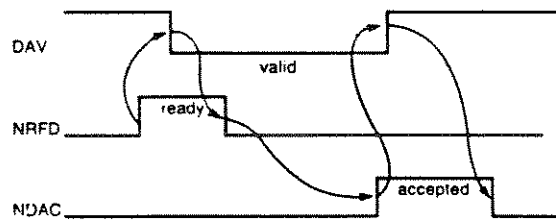
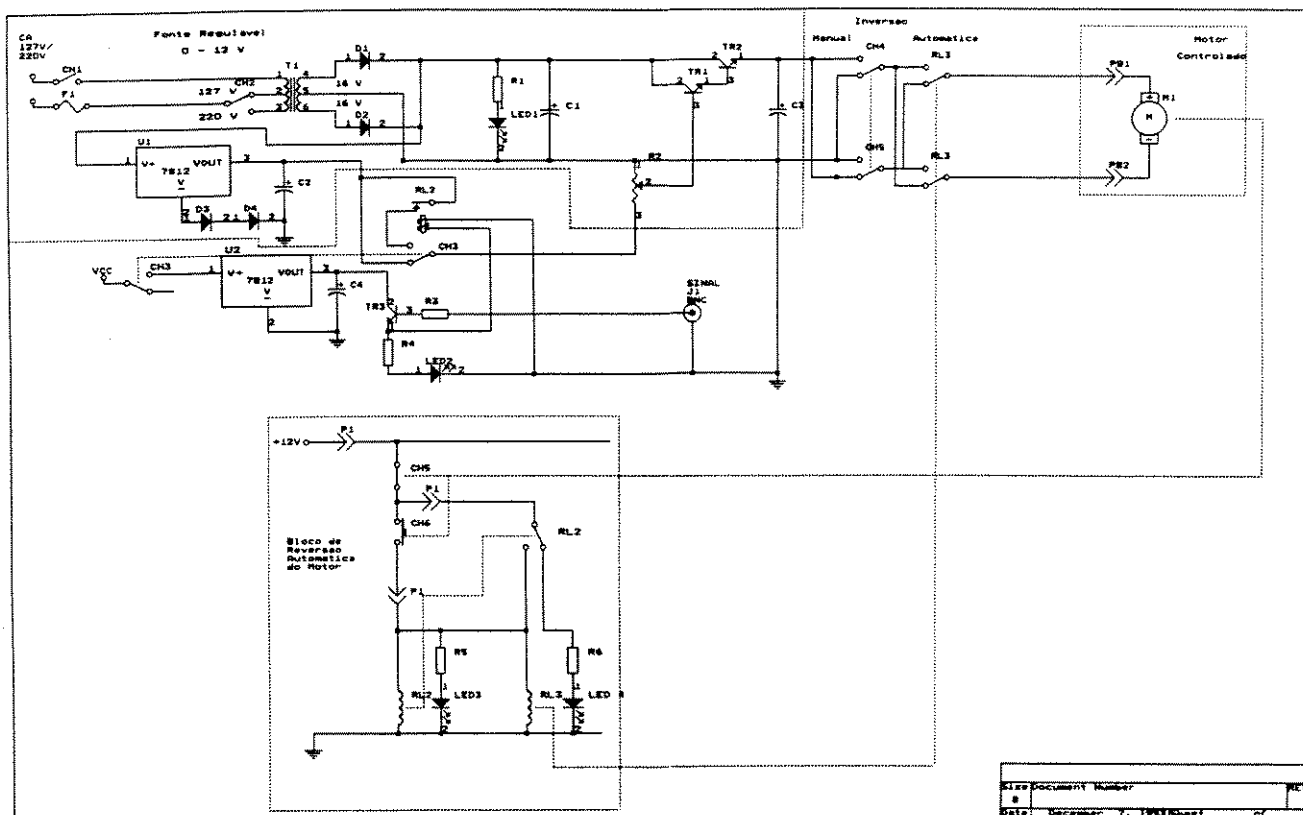


Fig. 3: Diagrama do handshake de 3 linhas.

Apêndice B

Circuito da fonte utilizada

O diagrama da fonte utilizada para acionar o motor CC utilizado para deslocar a sonda de entalpia é mostrado na figura abaixo.



Apêndice C

Listagem das rotinas e dos programas

```
\ *****
\ *          ROTINAS PARA IMPLEMENTAR A COMUNICACAO          *
\ *          VIA BARRAMENTO GPIB          *
\ *****

\ *****
\ Rotinas:
\ - Para se inicializar o Multiprogramador STD-85MP
\ - Para transformar um numero decimal da pilha numerica em octal na de
simbolos
\ - Para requerer dados da placa STD-8502 atraves do Multiprogramador
STD-85MP.
\ - Para ler o estado da placa STD-8402
\ - Para escrever o estado desejado para a placa STD-8402
\ - Para ligar um dispositivo desejado
\ - Para desligar um dispositivo desejado
\ - Para esperar o pressionamento da tecla ENTER.
\ *****
ECHO.OFF
\ *****
\          DEFINICAO DE VARIAVEIS, DISPOSITIVOS E
\          PARAMETROS DA COMUNICACAO
\ *****
\ Variavel string para recepcao de dados
8 STRING "DADOS
\ Definicao do time out do computador (controlador do sistema)
ME 1000 TIMEOUT
\ Definicao do nome do controlador de cartoes para o computador
24 GPIB.DEVICE STD.85MP
\ Definicao do time out para o controlador de cartoes
STD.85MP 1000 TIMEOUT
\ *****

\ *****
```

```

\
\                                     ROTINAS
\ *****
\ Rotina para inicializar o controlador de cartoes
: Inicialize.STD.85MP
TRACE.OFF
SEND.INTERFACE.CLEAR      \ Torna ME controlador do Sistema
REMOTE.ENABLE.ON         \ Coloca todos os dispositivos no modo remoto
STD.85MP                  \ Coloca STD como dispositivo corrente

EOI.ON
EOS.OFF
" 060T" GPIB.WRITE        \ Manda palavra de comando para o STD-85MP
                          \ Habilita modo de temporizacao - HMT
                          \ Habilita a saida dos Cartoes - HSS
;

\ Rotina para transformar um numero de decimal para octal
: #>"Octal
\ 0 topo da pilha numerica deve conter um numero decimal
\ Apos a execucao desta rotina sera retornado ao topo da
\ pilha de simbolos o valor correspondente em octal
" "
BEGIN
DUP 8 >
WHILE
DUP 8 MODULO DUP
"." 2 1 "SUB
"SWAP "CAT - 8 /
REPEAT
"." 2 1 "SUB
"SWAP "CAT
"LEN 1 - "LEFT
;

\ Rotina para ler um canal do cartao conversor A/D
: Le.Canal.STD.8502
\ 0 topo da pilha numerica deve conter o numero do canal a ser analisado
\ Retorna o valor lido no topo da pilha numerica.
" D" "." 2 1 "SUB "CAT    \ Cria a mensagem "DnTDX" onde n e' o numero
" TDX" "CAT              \ do canal a ser analisado
GPIB.WRITE               \ Envia a mensagem ao STD-85MP
"DADOS GPIB.READ         \ Retorna leitura na string DADOS
"DADOS 3 4 "SUB          \ Isola o caracter mais sign.
13 OCTAL "NUMBER
DECIMAL IF THEN "DROP
"DADOS 3 1 "SUB          \ Isola o caracter mais sign.
13 "NUMBER 4 >=         \ Verifica se o bit mais sign. esta em 1
IF 4096 - THEN          \ Se sim, efetua complemento do valor.
IF THEN "DROP           \ Elimina efeitos colaterais na pilha de
simbolos
0.05 *                  \ Transforma o valor lido em mV
;

\ Rotina para ler o estado do cartao de reles
: Le.Reles.STD.8402
\ Envia para a pilha numerica um numero correspondente ao

```

```

\ rele da placa que esta ligado
" AX" GPIB.WRITE
"DADOS GPIB.READ
"DADOS 2 5 "SUB
13 OCTAL "NUMBER
DECIMAL
IF THEN "DROP
;

\ Rotina para escrever um novo estado no cartao de reles
: Escreve.Reles.STD.8402
  \ Envia o numero do topo da pilha numerica correspondente
  \ a qual rele deve ser ligado
  " A" #>"OCTAL "CAT
  " TDX" "CAT          \ que define quais sao os reles a serem
ligados.
  GPIB.WRITE          \ Envia a mensagem ao STD-85MP.
;

\ Rotina para ligar um dispositivo atraves do cartao de reles
: Liga.Dispositivo
  \ 0 topo da pilha numerica deve conter um numero decimal
  \ correspondente ao rele da placa de reles ao qual esta ligado
  \ o dispositivo
  1 -
  2 SWAP **
  Le.Reles.STD.8402
  #>MASK #>MASK
  OR
  MASK>#
  Escreve.Reles.STD.8402
;

\ Rotina para desligar um dispositivo atraves do cartao de reles
: Desliga.Dispositivo
  \ 0 topo da pilha numerica deve conter um numero decimal
  \ correspondente ao rele da placa de reles ao qual esta ligado
  \ o dispositivo
  1 -
  2 SWAP **
  Le.Reles.STD.8402
  #>MASK #>MASK
  AND
  MASK>#
  Escreve.Reles.STD.8402
;

\ Rotina que para o programa ate ser presionado a tecla ENTER
: Espera.Enter
  BEGIN
  KEY 13 =
  UNTIL
;

\ *****

```

```

\ *****
\ **          PROGRAMA PARA A EXTRACAO DE DADOS          **
\ **          DO MACARICO DE PLASMA                      **
\ *****
ECHO.OFF
-1 3 FIX.FORMAT
\ *****
\ O arquivo LIMITES.DAT contem todos os dados referentes aos limites
\ operacionais do macarico. Este arquivo e' uma matriz 15x7 onde as
colunas
\ correspondem na ordem da primeira a setima a :
\ 1a coluna -> posicao da manivela
\ 2a coluna -> vazao max ar (g/s)
\ 3a coluna -> tensao p/ vaz max ar (V)
\ 4a coluna -> corrente p/ vaz max ar (A)
\ 5a coluna -> vazao min ar (g/s)
\ 6a coluna -> tensao p/ vaz min ar (V)
\ 7a coluna -> corrente p/ vaz min ar (A)
\ *****
\ *****
\ Sinais lidos do sistema (atraves da placa STD-8502):
\ *****
\ Canal 1 - Tensao de operacao do macarico
\ Canal 2 - Corrente de operacao do macarico
\ Canal 3 - Temperatura da agua de refrigeracao
\ *****
\ *****
\ Sinais controlados pelo computador (atraves da placa STD-8402):
\ *****
\ Rele 1 - Temperatura da agua na entrada (anodo e catodo)
\ Rele 2 - Temperatura da agua na saida do anodo
\ Rele 3 - Temperatura da agua na saida catodo
\ *****
\ *****
\ Este programa cria um arquivo contendo varios Sub-Files de um mesmo
tipo,
\ no caso um Array de 10 elementos. Cada Sub-File corresponde 'a uma
amostra
\ no tempo. Cada elemento do Array esta' descrito 'a seguir:
\ 1o elemento => instante inicial para determinada amostra (seg)
\ 2o elemento => posicao do nucleo dos transformadores das fontes
\ 3o elemento => vazao da agua do catodo (kg/s)
\ 4o elemento => vazao da agua do anodo (kg/s)
\ 5o elemento => vazao do ar (kg/s)
\ 6o elemento => tensao de operacao do macarico (V)
\ 7o elemento => corrente de operacao do macarico (A)
\ 8o elemento => temperatura de entrada da agua do anodo e catodo (oC)
\ 9o elemento => temperatura de saida da agua do anodo (oC)
\ 10o elemento => temperatura de saida da agua do catodo (oC)
\ Este arquivo e' criado apenas na primeira aquisicao de dados. Para as
\ aquisicoes seguintes, os dados serao colocados em anexo ao arquivo
criado

```

```

\ inicialmente.
\ *****
\ *****
\ Carregando as rotinas de uso geral
LOAD C:\LUIZ\ROTINAS.PRG CR
\ *****
ECHO.OFF
\ *****
\ Definicao das variaveis utilizadas no programa
\ *****
\ Variavel que armazena o instante inicial das aquisicoes (referencia de
tempo)
REAL SCALAR InstanteInicial
\ Variavel para armazena a vazao maxima do ar
REAL SCALAR VazMaxAr
\ Variavel que define o canal de leitura de tensao
INTEGER SCALAR Tensao
\ Variavel que define o canal de leitura de corrente
INTEGER SCALAR Corrente
\ Variavel que define o canal de leitura de temperatura
INTEGER SCALAR Temperatura
\ Variavel que define o acionamento do dispositivo 1
INTEGER SCALAR Dispositivo1
\ Variavel que define o acionamento do dispositivo 2
INTEGER SCALAR Dispositivo2
\ Variavel que define o acionamento do dispositivo 3
INTEGER SCALAR Dispositivo3
\ Variavel que armazena o nome do arquivo de saida de dados
20 STRING NomeDoArquivo
\ Array que armazena um loop de medidas
REAL DIM[ 10 ] ARRAY Amostra
\ Definindo o array para usar os dados do arquivo LIMITE.DAT
REAL DIM[ 15 , 7 ] ARRAY Limite
\ Definindo polinomio para calcular a vazao do gas em g/s
REAL DIM[ 4 ] ARRAY POLIGAS
REAL POLY[ -7.41352e-7 , 4.61082e-4 , 9.56156e-3 , 0.243569 ] POLIGAS :=
\ *****
\ *****
\ Rotinas de uso neste programa
\ *****
\ Rotina para criar arquivode saida de dados
: Cria.Arquivo
CR ." Qual e' o nome do arquivo de saida dos dados ?
CR ." O PATH mais o nome nao devem ocupar mais que 20 caracteres"
CR ." "
"INPUT NomeDoArquivo " :=
REGULAR.DATAFILE
FILE.TEMPLATE
NomeDoArquivo DEFER> FILE.CREATE
END
;

\ Rotina para abrir arquivo de saida de dados
: Abre.Arquivo
CR ." Qual e' o nome do arquivo de saida dos dados (PATH+nome) ? "
"INPUT NomeDoArquivo " :=
;

```

```

\ Rotina para determinar a posicao do nucleo dos transformadores
: Posicao.do.nucleo?
  CR ." Qual a posicao do nucleo ? "
  BEGIN
    "INPUT 13 "NUMBER
  UNTIL
;

\ Rotina para leitura da vazao da agua do anodo
: Lendo.Vazao.Anodo
  7.6 995e-3 * 60 /
;

\ Rotina para leitura da vazao da agua do catodo
: Lendo.Vazao.Catodo
  1.94 995e-3 * 60 /
;

: Lendo.Vazao.Gas
  CR ." Qual foi a posicao do rotametro (mm) ? "
  BEGIN "INPUT 13 "NUMBER UNTIL
  POLIGAS POLY[X] 0.6073195 *
  CR ." Qual foi a pressao do ar (kgf/cm2) ? "
  BEGIN "INPUT 13 "NUMBER UNTIL
  0.9419 + SQRT *          \ Vazao em g/s
;

\ Rotina que retira dados do arquivo LIMITE.DAT e os coloca no array
Limite
: Abrindo.Arq.Limite
LOAD.OVERLAY DATAFILE.SOV
FILE.OPEN \LUIZ\LIMITE.DAT          \ Abre o arquivo
1 SUBFILE                          \ Indica o subfile
Limite FILE>ARRAY                  \ Envia os dados do subfile p/ array
FILE.CLOSE                          \ Fecha o arquivo
;

\ Rotina para armazenar os dados em arquivo LOTUS 123 com extensao .WK1
: Armazena.Em.Lotus
  NomeDoArquivo DEFER> FILE.OPEN
  FILE.CONTENTSWAP DROP
  1 + 1 DO
    I SUBFILE FILE>UNNAMED.ARRAY
    I 1 =
      IF ELSE
        LAMINATE
      THEN
  LOOP
  BECOMES> ArqTok
  FILE.CLOSE
  LOAD.OVERLAY 123IO.SOV
  NomeDoArquivo "LEN
  1 SWAP 3 - "SUB
  " WK1" "CAT NomeDoArquivo " :=

```



```

NomeDoArquivo DEFER> 123FILE.CREATE
NomeDoArquivo DEFER> 123FILE.OPEN
ArqTok ARRAY>123FILE
123FILE.CLOSE
SS.CLEAR
;
\ *****
\ *****
\ Programa principal para aquisicao dos dados
\ *****
: Aquisicao.Macarico
  1 Tensao :=
  2 Corrente :=
  3 Temperatura :=
  1 Dispositivo1 :=
  2 Dispositivo2 :=
  3 Dispositivo3 :=
  Inicialize.STD.85MP
  Posicao.do.nucleo?
  Amostra [ 2 ] :=
  Abrindo.Arq.Limite
  limite Amostra [ 2 ]
  3.5 - 2 * [ , 2 ] VazMaxAr :=
  CR ." A aquisicao esta sendo iniciada (S/N) ? "
    115 KEY =
      IF
        Cria.Arquivo
      ELSE
        Abre.arquivo
      THEN
  Lendo.Vazao.Catodo
  Amostra [ 3 ] :=
  Lendo.Vazao.Anodo
  Amostra [ 4 ] :=
  Lendo.Vazao.Gas
  Amostra [ 5 ] :=
  REL.TIME FIX InstanteInicial :=
  BEGIN
    SS.CLEAR
    4 1 DO
      \ Le o instante da amostra (em segundos).
      REL.TIME FIX InstanteInicial - 1000 /
      Amostra [ 1 ] :=

      \ Le o valor da tensao de operacao do macarico
      Tensao Le.Canal.STD.8502
      10.6508 * 6.56 +
      Amostra [ 6 ] :=

      \ Le o valor da corrente de operacao do macarico
      Corrente Le.Canal.STD.8502
      DUP 2 ** .0163 * SWAP
      1.5901 * 3.42 + +
      Amostra [ 7 ] :=

      \ Espera estabilizacao dos termopares.

```

```

3000 MSEC.DELAY

\ Ativa rele1 para ler a temperatura da agua na entrada
\ do anodo e catodo
Dispositivo1 Liga.Dispositivo
\ Le temperatura da agua de entrada do anodo e catodo
Temperatura Le.Canal.STD.8502
Amostra [ 8 ] :=
\ Desativa rele 1
Dispositivo1 Desliga.Dispositivo

\ Ativa rele2 para ler temperatura de saida da agua do anodo
Dispositivo2 Liga.Dispositivo
\ Ler temperatura da agua na saida do anodo
Temperatura Le.Canal.STD.8502
Amostra [ 9 ] :=
\ Desativa rele2
Dispositivo2 Desliga.Dispositivo

\ Ativa rele3 para ler a temperatura de saida da agua do catodo
Dispositivo3 Liga.Dispositivo
\ Ler temperatura da agua na saida do catodo
3 Le.Canal.STD.8502
Amostra [ 10 ] :=
\ Desativa rele3
Dispositivo3 Desliga.Dispositivo

Amostra
LOOP
+ + 3 / Amostra :=
\ Anexar os dados ao arquivo de saida.
NomeDoArquivo DEFER> FILE.OPEN
Amostra APPEND.ARRAY>FILE
Nomedoarquivo DEFER> FILE.CLOSE
\ Lendo qual a nova vazao
Lendo.Vazao.Gas
Amostra [ 6 ] :=
Amostra [ 6 ] VazMaxAr >=
UNTIL
SS.CLEAR
Amostra [ 2 ] limite [ 15 , 1 ] <>
IF
CR ."      Este e o limite maximo de vazao para esta      "
CR ."                  posicao do nucleo "
CR ."
CR ."      DESLIGAR O MICRO E O MACARICO E !!! "
CR ."
CR ."      MUDAR PARA PROXIMA POSICAO DO NUCLEO !!! "
CR ."
CR ."
ELSE
Armazena.Em.Lotus
THEN
;
ECHO.ON CR

```

```

\ *****
\ *
\ *      Para executar o programa digite:  Aquisicao.Macarico      *
\ *
\ *****

```

```

\ *****
\ **          PROGRAMA PARA A EXTRACAO DE DADOS          **
\ **          DA SONDA DE ENTALPIA                      **
\ *****

```

ECHO.OFF

-1 3 FIX.FORMAT

```

\ *****
\ Sinais lidos do sistema (atraves da placa STD-8502):
\ *****
\ Canal 1 - Posicao da sonda
\ Canal 2 - Temperatura da agua de refrigeracao da sonda
\ Canal 3 - Temperatura do gas
\ *****
\ Sinais controlados pelo computador (atraves da placa STD-8402):
\ *****
\ Rele 1 - Temperatura da agua na entrada da sonda
\ Rele 2 - Temperatura da agua na saida da sonda
\ Rele 3 - Temperatura de saida do gas
\ Rele 3 - Liga e desliga o motor que desloca a sonda
\

```

```

\ Este programa cria um arquivo contendo varios Sub-Files de um mesmo
tipo,
\ no caso um Array de 9 elementos. Cada Sub-File corresponde 'a uma
amostra

```

```

\ no tempo. Cada elemento do Array esta' descrito 'a seguir:
\ 1o elemento => instante inicial para determinada amostra (seg)
\ 2o elemento => posicao da sonda (mm)
\ 3o elemento => vazao da agua da sonda (kg/s)
\ 4o elemento => vazao do gas succionado (kg/s)
\ 5o elemento => temperatura de entrada da agua com succao (oC)
\ 6o elemento => temperatura de saida da agua som succao (oC)
\ 7o elemento => temperatura de saida do gas (oC)
\ 8o elemento => temperatura de entrada da agua sem succao (oC)
\ 9o elemento => temperatura de saida da agua sem succao (oC)
\ Este arquivo e' criado no inicio da aquisicao de dados, para cada
\ seccao.

```

```

\ *****
\ *****

```

\ Carregando as rotinas de uso geral

```

LOAD C:\LUIZ\ROTINAS.PRG CR
\ *****
ECHO.OFF
\ *****
\          Definicao das variaveis utilizadas no programa
\ *****
\ Variavel que armazena o instante inicial das aquisicoes (referencia de
tempo)
REAL SCALAR InstanteInicial
\ Variavel que define o canal de leitura da posicao da sonda
INTEGER SCALAR Posicao
\ Variavel que define o canal de leitura da temperatura da agua
INTEGER SCALAR TempAgua
\ Variavel que define o canal de leitura da temperatura do gas
INTEGER SCALAR TempGas
\ Variavel que define o acionamento do dispositivo 1
INTEGER SCALAR Dispositivo1
\ Variavel que define o acionamento do dispositivo 2
INTEGER SCALAR Dispositivo2
\ Variavel que define o acionamento do dispositivo 3
INTEGER SCALAR Dispositivo3
\ Variavel que define o acionamento do dispositivo 4
INTEGER SCALAR Dispositivo4
\ Variavel que armazena o nome do arquivo de saida de dados
20 STRING NomeDoArquivo
\ Array que armazena um loop de medidas
REAL DIM[ 9 ] ARRAY Amostra
\ *****
\ *****
\ Rotinas de uso neste programa
\ *****
\ Rotina para criar arquivo de saida de dados
: Cria.Arquivo
  CR ." Qual e' o nome do arquivo de saida dos dados ?
  CR ." O nome do arquivo deve ter extensao .DAT "
  CR ." O PATH mais o nome nao devem ocupar mais que 20 caracteres"
  CR ." "
  "INPUT NomeDoArquivo " :=
  REGULAR.DATAFILE
  FILE.TEMPLATE
  NomeDoArquivo DEFER> FILE.CREATE
  END
  NomeDoArquivo DEFER> FILE.OPEN
;

: Lendo.Vazao.Agua
  CR ." Qual a vazao da agua (l/min) ? "
  BEGIN "INPUT 13 "NUMBER UNTIL
  995e-3 * 60 /
;

: Lendo.Vazao.Gas
  CR ." Qual a vazao do gas (lN/h) ? "
  BEGIN "INPUT 13 "NUMBER UNTIL
  200e-3 1.2771 * 3600 /
;

```

```

\ Rotina para armazenar os dados em arquivo LOTUS 123 com extensao .WK1
: Armazena.Em.Lotus
  NomeDoArquivo DEFER> FILE.OPEN
  FILE.CONTENTS SWAP DROP
  1 + 1 DO
    I SUBFILE FILE>UNNAMED.ARRAY
    I 1 =
    IF ELSE
      LAMINATE
    THEN
  LOOP
  BECOMES> ArqTok
  FILE.CLOSE
  LOAD.OVERLAY 123IO.SOV
  NomeDoArquivo "LEN
  1 SWAP 3 - "SUB
  " WK1" "CAT NomeDoArquivo " :=
  NomeDoArquivo DEFER> 123FILE.CREATE
  NomeDoArquivo DEFER> 123FILE.OPEN
  ArqTok ARRAY>123FILE
  123FILE.CLOSE
  SS.CLEAR
;
\ *****
\ *****
\ Programa principal para aquisicao dos dados
\ *****
: Aquisicao.Sonda
  1 Posicao :=
  2 TempAgua :=
  3 TempGas :=
  1 Dispositivo1 :=
  2 Dispositivo2 :=
  3 Dispositivo3 :=
  4 Dispositivo4 :=
  Inicialize.STD.85MP
  Cria.Arquivo
  Lendo.Vazao.Agua
  Amostra [ 3 ] :=
  Lendo.Vazao.Gas
  Amostra [ 4 ] :=
  REL.TIME FIX InstanteInicial :=
  BEGIN
    SS.CLEAR
    Dispositivo4 Desliga.Dispositivo
    4 1 DO
      \ 5000 MSEC.DELAY
      \ Le o instante da amostra (em segundos).
      REL.TIME FIX InstanteInicial - 1000 /
      Amostra [ 1 ] :=

      \ Le o valor da posicao da sonda
      Posicao Le.Canal.STD.8502
      Amostra [ 2 ] :=

```

```

\ Liga rele do termopar da entrada da agua
Dispositivo1 Liga.Dispositivo

\ Le o valor da temperatura de entrada da agua
TempAgua Le.Canal.STD.8502
Amostra [ 5 ] :=

\ Desliga rele do termopar da entrada da agua
Dispositivo1 Desliga.Dispositivo

\ Liga rele do termopar da saida da agua
Dispositivo2 Liga.Dispositivo

\ Le o valor da temperatura de entrada da agua
TempAgua Le.Canal.STD.8502
Amostra [ 6 ] :=

\ Desliga rele do termopar da entrada da agua
Dispositivo2 Desliga.Dispositivo

\ Le temperatura de saida do gas
TempGas Le.Canal.STD.8502
Amostra [ 7 ] :=

\ Liga rele que fecha a succao do gas
Dispositivo3 Liga.Dispositivo

\ Espera estabilizacao dos termopares.
5000 MSEC.DELAY

\ Liga rele do termopar da entrada da agua
Dispositivo1 Liga.Dispositivo

\ Le o valor da temperatura de entrada da agua
TempAgua Le.Canal.STD.8502
Amostra [ 8 ] :=

\ Desliga rele do termopar da entrada da agua
Dispositivo1 Desliga.Dispositivo

\ Liga rele do termopar da saida da agua
Dispositivo2 Liga.Dispositivo

\ Le o valor da temperatura de entrada da agua
TempAgua Le.Canal.STD.8502
Amostra [ 9 ] :=

\ Desliga rele do termopar da saida da agua
Dispositivo2 Desliga.Dispositivo

\ Desliga rele que fecha a succao do gas
Dispositivo3 Desliga.Dispositivo

Amostra

LOOP
+ + 3 / Amostra :=

```

```

Amostra APPEND.ARRAY>FILE
CR ." Vai continuar com as aquisicoes (S/N) ? "
    110 KEY =
        IF
            TRUE
        ELSE
            Dispositivo4 Liga.Dispositivo
            3700 MSEC.DELAY
            FALSE
        THEN
UNTIL
SS.CLEAR
NomeDoArquivo DEFER> FILE.CLOSE
Armazena.Em.Lotus
;
ECHO.ON CR
\ *****
\ *
\ *   Para executar o programa digite:  Aquisicao.Sonda   *
\ *
\ *****

```

Apêndice D

Resultados calculados

A tabela de dados abaixo, refere-se aos dados calculados a partir dos dados obtidos do maçarico, onde : (A) Posição do núcleo, (B) Vazão de água catodo (g/s), (C) Vazão de água anodo (g/s), (D) Vazão de gás (g/s), (E) Corrente (A), (F) Tensão (V), (G) Temperatura de entrada da água (°C), (H) Temperatura de saída da água do anodo (°C), (I) Temperatura de saída da água do catodo (°C), (J) Perdas no anodo (kW), (K) Perdas no catodo (kW), (L) Perdas totais (kW), (M) Potência de entrada (kW), (N) Rendimento experimental (%), (O) Tensão teórica (V) e (P) Rendimento teórico (%).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	4	32.17	126.0	0.74	37.26	246.0	20.45	24.90	24.15	2.341	0.497	2.838	9.167	69.0	245.6	70.8
2	4	32.17	126.0	0.94	35.77	264.2	20.57	24.75	24.30	2.201	0.501	2.702	9.450	71.4	265.0	73.3
3	4	32.17	126.0	1.01	34.52	278.5	20.70	24.80	24.40	2.157	0.497	2.654	9.617	72.4	272.5	74.2
4	5	32.17	126.0	0.76	51.76	228.8	20.77	26.87	24.87	3.209	0.551	3.760	11.848	68.3	230.7	68.6
5	5	32.17	126.0	0.85	51.13	236.3	20.90	26.88	24.92	3.148	0.539	3.687	12.084	69.5	239.7	69.7
6	5	32.17	126.0	1.12	49.56	253.4	20.92	26.63	24.85	3.007	0.528	3.536	12.560	71.9	258.8	72.5
7	5	32.17	126.0	1.34	47.62	270.6	20.95	26.48	24.85	2.911	0.524	3.435	12.886	73.3	274.9	74.4
8	5	32.17	126.0	1.55	45.78	284.7	21.20	26.47	24.87	2.771	0.492	3.263	13.035	75.0	288.6	75.9
9	5	32.17	126.0	1.82	43.20	303.9	21.43	26.32	24.95	2.569	0.472	3.041	13.127	76.8	305.5	77.5
10	6	32.17	126.0	0.76	75.13	220.3	22.68	30.97	27.95	4.358	0.707	5.065	16.549	69.4	212.7	65.5
11	6	32.17	126.0	1.07	71.73	245.8	22.88	30.97	27.78	4.252	0.668	4.910	17.633	72.2	236.2	69.3
12	6	32.17	126.0	1.42	70.13	259.8	22.77	30.63	26.40	4.138	0.488	4.626	18.221	74.6	256.5	72.1
13	6	32.17	126.0	1.82	66.80	278.8	22.67	30.13	26.98	3.928	0.580	4.508	18.622	75.8	277.7	74.6
14	6	32.17	126.0	2.21	63.94	293.3	22.63	29.62	26.00	3.674	0.452	4.126	18.752	78.0	295.8	76.5
15	6	32.17	126.0	2.58	59.81	313.1	22.85	29.03	25.82	3.358	0.425	3.783	18.662	79.7	313.6	78.2
16	7	32.17	126.0	0.76	95.25	201.1	22.35	33.32	28.60	5.769	0.839	6.608	19.151	65.5	201.9	63.6
17	7	32.17	126.0	0.98	91.77	227.1	22.35	33.40	28.25	5.813	0.792	6.605	20.838	68.3	218.2	66.4
18	7	32.17	126.0	1.55	86.93	253.8	22.40	32.77	28.27	5.454	0.788	6.241	22.067	71.7	250.8	71.3
19	7	32.17	126.0	1.87	84.09	267.3	22.37	32.37	27.57	5.261	0.898	5.959	22.479	73.5	265.9	73.2
20	7	32.17	126.0	2.46	82.01	286.7	22.35	31.65	26.28	4.892	0.528	5.421	23.509	76.9	288.7	75.7
21	7	32.17	126.0	2.84	80.67	301.5	22.33	31.17	25.77	4.647	0.461	5.108	24.317	79.0	301.7	77.0
22	7	32.17	126.0	3.55	73.04	326.9	22.42	30.32	25.72	4.156	0.443	4.599	23.879	80.7	328.0	79.4
23	8	32.17	126.0	0.76	119.80	184.4	22.15	36.18	28.77	7.382	0.889	8.271	22.087	62.6	192.0	61.6
24	8	32.17	126.0	1.08	113.30	218.3	22.15	36.35	29.15	7.470	0.940	8.410	24.731	66.0	214.2	65.7
25	8	32.17	126.0	1.55	109.34	241.8	22.18	35.77	29.17	7.146	0.938	8.083	26.437	69.4	238.5	69.5
26	8	32.17	126.0	2.35	104.10	266.8	22.20	35.05	27.07	6.760	0.654	7.413	27.771	73.3	270.7	73.7
27	8	32.17	126.0	3.12	100.64	288.7	22.43	34.32	26.25	6.251	0.513	6.764	29.061	76.7	294.9	76.3
28	8	32.17	126.0	3.73	96.36	308.6	22.65	33.88	26.32	5.909	0.492	6.402	29.734	78.5	312.8	78.0
29	8	32.17	126.0	4.31	92.98	325.7	22.82	33.42	26.15	5.576	0.448	6.024	30.285	80.1	328.1	79.3
30	9	32.17	126.0	0.88	137.59	183.5	23.47	40.27	31.18	8.838	1.036	9.874	25.248	60.9	193.9	61.9
31	9	32.17	126.0	1.06	133.73	204.3	23.52	40.60	31.05	8.987	1.012	9.999	27.326	63.4	205.5	64.1
32	9	32.17	126.0	1.34	127.71	230.6	23.40	40.25	30.98	8.864	1.018	9.882	28.446	66.4	221.5	66.9
33	9	32.17	126.0	1.96	124.77	252.3	23.28	39.20	30.55	8.373	0.976	9.349	31.477	70.3	247.2	70.7
34	9	32.17	126.0	2.73	121.15	275.2	23.20	38.25	29.92	7.917	0.902	8.819	33.345	73.6	272.9	74.0
35	9	32.17	126.0	3.43	115.07	293.2	23.15	37.53	29.98	7.567	0.918	8.484	33.734	74.9	294.0	76.2
36	9	32.17	126.0	3.99	112.25	309.9	23.12	36.78	29.07	7.180	0.799	7.989	34.792	77.0	308.2	77.6
37	9	32.17	126.0	4.49	108.07	327.1	23.15	36.22	28.98	6.874	0.783	7.657	35.356	78.3	321.3	78.7
38	9	32.17	126.0	5.12	101.78	341.3	23.08	35.48	26.77	6.523	0.495	7.018	34.742	79.8	337.5	80.1
39	10	32.17	126.0	0.88	146.05	177.7	22.82	40.58	30.85	9.452	1.106	10.557	25.954	59.3	191.4	61.4
40	10	32.17	126.0	1.19	140.06	208.6	22.63	40.97	30.70	9.644	1.083	10.728	29.216	63.3	210.0	64.9
41	10	32.17	126.0	1.59	133.20	237.0	22.63	40.43	31.03	9.364	1.128	10.492	31.565	66.8	230.1	68.2
42	10	32.17	126.0	2.15	130.33	254.8	22.63	39.57	30.52	8.908	1.059	9.967	33.212	70.0	251.4	71.3

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
43	10	32.17	126.0	2.73	126.01	273.6	22.55	38.83	30.12	8.566	1.016	9.582	34.480	72.2	270.6	73.7
44	10	32.17	126.0	3.55	120.35	292.8	22.55	37.97	29.80	8.110	0.974	9.084	35.232	74.2	294.0	76.2
45	10	32.17	126.0	4.26	115.60	312.1	22.52	37.18	29.27	7.716	0.906	8.622	36.081	76.1	311.8	77.9
46	10	32.17	126.0	4.72	111.31	328.2	22.53	36.65	28.55	7.426	0.808	8.234	36.532	77.5	323.7	78.9
47	10	32.17	126.0	5.12	108.33	339.1	22.50	36.05	25.75	7.128	0.436	7.565	36.729	79.4	332.9	79.7
48	10	32.17	126.0	5.57	103.07	353.6	22.48	35.37	24.62	6.777	0.286	7.064	36.443	80.6	344.6	80.6
49	10	32.17	126.0	5.93	98.87	364.6	22.50	34.82	24.17	6.479	0.224	6.703	36.049	81.4	353.9	81.3
50	4.5	32.17	126.0	0.71	45.77	238.2	22.38	27.78	26.52	2.841	0.555	3.396	10.901	68.8	232.6	68.9
51	4.5	32.17	126.0	0.78	45.00	246.3	22.55	27.88	26.58	2.806	0.542	3.347	11.083	69.8	239.5	69.9
52	4.5	32.17	126.0	0.88	44.21	253.3	22.72	27.90	26.65	2.727	0.528	3.255	11.199	70.9	248.6	71.2
53	4.5	32.17	126.0	0.99	43.30	261.9	22.87	27.93	26.65	2.665	0.508	3.173	11.341	72.0	257.9	72.4
54	4.5	32.17	126.0	1.18	41.87	274.4	23.00	27.90	26.70	2.578	0.497	3.075	11.487	73.2	273.0	74.2
55	4.5	32.17	126.0	1.26	41.15	279.3	23.10	27.92	26.70	2.534	0.483	3.017	11.491	73.7	279.0	74.9
56	5.5	32.17	126.0	0.71	63.79	209.5	23.40	30.63	29.23	3.805	0.783	4.589	13.362	65.7	216.3	66.2
57	5.5	32.17	126.0	0.86	60.26	237.7	23.37	30.50	28.68	3.753	0.714	4.467	14.323	68.8	230.9	68.6
58	5.5	32.17	126.0	1.01	59.62	246.6	23.40	30.43	28.88	3.700	0.736	4.436	14.703	69.8	241.8	70.2
59	5.5	32.17	126.0	1.23	58.26	257.3	23.33	30.12	27.97	3.568	0.622	4.191	14.993	72.0	256.5	72.1
60	5.5	32.17	126.0	1.42	56.61	267.9	23.32	29.90	27.93	3.463	0.620	4.083	15.165	73.1	268.8	73.6
61	5.5	32.17	126.0	1.55	55.77	273.4	23.30	29.68	26.85	3.358	0.477	3.835	15.249	74.9	276.4	74.5
62	5.5	32.17	126.0	1.82	54.08	284.6	23.32	29.43	26.73	3.218	0.459	3.677	15.392	76.1	290.8	76.1
63	5.5	32.17	126.0	2.11	51.54	300.4	23.30	29.00	26.70	2.999	0.457	3.455	15.484	77.7	306.1	77.6
64	5.5	32.17	126.0	2.21	49.84	309.0	23.32	28.90	26.70	2.937	0.454	3.392	15.399	78.0	312.4	78.1
65	6.5	32.17	126.0	0.76	83.89	207.1	22.95	32.90	29.48	6.234	0.877	6.112	17.336	64.7	207.7	64.6
66	6.5	32.17	126.0	1.01	82.48	229.2	23.00	32.75	29.37	5.129	0.855	5.984	18.902	68.3	225.2	67.6
67	6.5	32.17	126.0	1.38	79.49	249.0	23.02	32.32	29.25	4.892	0.837	5.729	19.789	71.0	247.6	70.9
68	6.5	32.17	126.0	1.59	79.16	254.9	22.98	32.03	27.23	4.761	0.571	5.332	20.178	73.6	257.9	72.2
69	6.5	32.17	126.0	2.06	76.43	270.6	23.00	31.62	27.05	4.533	0.544	5.077	20.678	75.4	278.9	74.7
70	6.5	32.17	126.0	2.41	74.47	280.0	22.95	31.27	26.90	4.375	0.530	4.906	20.853	76.5	293.2	76.2
71	6.5	32.17	126.0	2.69	71.55	293.8	22.92	30.85	27.65	4.173	0.636	4.809	21.025	77.1	304.8	77.4
72	6.5	32.17	126.0	2.91	68.17	305.5	22.98	30.58	27.75	3.998	0.640	4.638	20.830	77.7	314.9	78.3
73	6.5	32.17	126.0	3.19	65.67	317.8	22.95	30.22	28.10	3.823	0.692	4.514	20.869	78.4	325.8	79.2
74	6.5	32.17	126.0	3.43	62.63	326.6	23.00	29.87	27.78	3.612	0.642	4.255	20.458	79.2	335.9	80.0
75	7.5	32.17	126.0	0.79	105.79	201.3	22.78	35.92	29.75	6.909	0.936	7.844	21.297	63.2	199.2	63.0
76	7.5	32.17	126.0	1.15	100.23	226.9	22.85	35.68	27.80	6.751	0.685	7.416	22.737	67.4	223.7	67.3
77	7.5	32.17	126.0	1.64	97.10	247.6	22.92	34.85	27.42	6.278	0.604	6.882	24.040	71.4	248.4	70.9
78	7.5	32.17	126.0	2.15	93.97	267.0	23.15	34.60	27.40	6.023	0.571	6.594	25.087	73.7	270.0	73.7
79	7.5	32.17	126.0	2.69	91.16	282.5	23.28	34.12	27.50	5.699	0.566	6.265	25.752	75.7	289.0	75.8
80	7.5	32.17	126.0	3.31	93.46	304.2	23.48	33.73	28.95	5.392	0.734	6.126	28.433	78.5	304.7	77.3
81	7.5	32.17	126.0	4.09	83.22	335.7	23.80	32.75	28.65	4.708	0.638	5.346	27.939	80.9	331.4	79.6
82	7.5	32.17	126.0	4.31	79.87	345.5	23.88	32.50	28.57	4.533	0.629	5.162	27.598	81.3	339.2	80.2
83	7.5	32.17	126.0	4.49	77.44	352.1	24.07	32.47	28.45	4.419	0.589	5.008	27.265	81.6	345.6	80.7

As tabelas a seguir, referem-se aos dados calculados a partir dos dados obtidos da sonda de entalpia, para as posições de 30, 50 e 70 mm respectivamente. As colunas destas tabelas correspondem a: (A) Posição (mm), (B) Temperatura entrada água c/ fluxo gás (°C), (C) Temperatura saída água c/ fluxo gás (°C), (D) Temperatura do gás (°C), (E) Temperatura entrada água s/ fluxo gás (°C), (F) Temperatura saída água s/ fluxo gás (°C), (G) Dif. de temp. da água c fluxo de gás (°C), (H) Dif. de temp. da água s fluxo de gás, (I) Entalpia (10^3 kJ/kg), (J) Temperatura (10^3 K) e (K) Sensibilidade (%).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	21.5	20.80	22.50	22.74	20.82	22.50	0.31	0.203	1.80	1.58	1.04
2	18.9	20.80	22.58	22.74	20.80	22.58	0.30	0.187	1.88	1.88	0.00
3	18.1	20.82	22.74	23.82	20.80	22.74	0.28	0.172	1.82	1.84	-0.82
4	13.5	20.85	23.12	32.33	20.87	23.05	0.38	0.288	2.17	2.08	4.33
5	10.0	21.17	24.51	47.58	21.22	23.80	0.84	0.81	3.35	2.88	18.97
6	7.5	21.77	28.38	73.31	21.85	28.83	1.70	1.585	8.81	4.88	28.15
7	4.2	22.88	35.73	108.88	23.22	32.17	3.42	2.825	12.84	8.85	30.28
8	0.4	24.87	48.25	151.34	25.07	40.28	5.38	3.377	21.58	15.22	28.45
9	-2.7	28.80	53.80	151.34	27.05	48.78	8.17	3.832	27.10	18.74	27.17
10	-8.1	27.80	54.28	102.47	28.10	50.18	3.73	2.784	28.38	22.08	18.28
11	-8.8	28.28	53.21	72.23	28.33	51.12	2.01	1.821	24.82	22.78	8.58
12	-12.4	28.35	52.87	58.23	28.42	51.88	1.23	1.187	24.82	23.47	4.87
13	-15.8	28.53	54.08	51.88	28.82	53.13	1.12	1.081	25.52	24.51	3.88
14	-19.3	28.17	55.37	47.78	28.20	55.14	0.53	0.485	28.20	25.84	1.01
15	-22.7	28.45	55.88	44.78	28.58	55.28	0.72	0.884	28.23	25.71	1.88
16	-20.0	28.83	54.81	48.71	28.80	54.81	0.28	0.184	25.27	25.31	-0.13
17	-18.5	28.80	55.28	51.18	28.53	54.81	0.57	0.518	25.88	25.37	1.25

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	18.0	18.80	21.88	27.14	18.82	22.04	0.253	0.133	2.08	2.12	-2.84
2	15.1	20.25	22.81	37.88	20.27	22.88	0.445	0.388	2.58	2.38	8.88
3	12.8	20.40	23.88	48.88	20.40	23.05	0.808	0.772	3.28	2.85	18.85
4	9.2	20.57	25.44	82.85	20.83	24.28	1.284	1.248	4.88	3.85	25.18
5	8.8	21.40	28.77	78.73	21.58	28.81	1.844	1.771	7.37	5.33	27.88
6	3.2	22.50	32.58	88.58	22.70	28.70	2.758	2.28	10.08	7.00	30.44
7	-0.3	23.22	38.50	111.75	23.40	33.10	3.184	2.513	13.28	9.70	28.88
8	-3.4	23.85	38.44	115.23	24.13	35.81	3.447	2.838	15.58	11.87	25.13
9	-8.8	24.88	41.45	103.88	25.23	38.38	3.084	2.452	18.57	13.12	20.78
10	-10.3	25.88	41.08	85.38	26.05	38.82	2.181	1.823	15.08	12.77	15.31
11	-13.4	25.88	40.75	74.78	25.87	38.28	1.882	1.41	14.77	13.32	9.83
12	-18.3	26.02	40.88	85.81	26.08	40.37	0.874	0.842	14.87	14.28	4.58
13	-20.8	28.53	42.15	58.82	28.83	41.81	0.833	0.788	15.81	14.87	4.11
14	-22.7	28.82	42.07	53.51	28.83	41.22	1.004	0.973	15.25	14.38	5.88

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	14.9	17.20	19.95	35.81	17.23	19.57	0.84	0.59	2.75	2.33	15.28
2	12.8	17.38	20.88	46.01	17.43	20.11	0.98	0.93	3.50	2.87	23.55
3	8.8	17.83	22.50	56.30	17.83	21.34	1.31	1.28	4.87	3.41	28.98
4	8.5	18.58	24.82	68.38	18.73	22.87	1.91	1.74	6.24	4.23	32.14
5	3.1	19.33	28.88	78.03	19.47	24.98	1.78	1.85	7.35	5.51	24.97
6	-0.4	20.07	29.54	87.93	20.18	27.14	2.32	2.03	9.47	6.98	28.53
7	-3.4	20.85	31.88	92.34	21.12	28.15	2.81	2.20	10.91	8.04	28.33
8	-8.8	21.83	33.10	97.82	21.83	30.78	2.25	1.98	11.27	8.85	21.48
9	-10.5	22.20	34.03	79.98	22.28	31.83	2.29	2.01	11.63	9.35	20.88
10	-13.4	22.35	33.84	71.22	22.38	32.08	1.58	1.49	11.29	9.71	13.88
11	-18.3	22.80	33.72	84.19	22.88	32.83	1.25	1.21	11.12	9.85	10.48
12	-19.9	22.88	33.87	57.38	22.92	32.79	1.20	1.18	10.99	9.87	10.18
13	-22.9	22.83	33.79	52.35	22.85	33.18	0.82	0.79	10.88	10.23	5.85