

CIRCUITOS DE OPERAÇÃO DE SONDAS EMISSIVAS PARA A DETERMINAÇÃO DE POTENCIAIS EM PLASMAS DE DESCARGAS ELÉTRICAS

Petraconi, G., Maciel, H.S. e Borges, C.

Laboratório de Plasmas e Processos (LPP)-Dep. de Física

Instituto Tecnológico de Aeronáutica-ITA,

São José dos Campos – SP – 12.228-900

Palavras-chave: Descargas elétricas, sonda emissiva, potencial de plasma.

RESUMO

Neste artigo são apresentados dois circuitos de sondas eletrostáticas destinados à medição de potenciais de plasma. O primeiro é um circuito de controle de sonda emissiva de leitura rápida da característica da sonda. O segundo é um circuito de controle de Sonda Emissiva Diferencial (SED) que permite uma leitura contínua do potencial de plasma através do controle automático do potencial de polarização das sondas. Estes circuitos apresentam inconvenientes se a característica da sonda não exibe uma saturação ideal da corrente como mostram os resultados obtidos em descargas de corrente contínua e descargas de rádio frequência (RF).

ABSTRACT

In this paper two circuits for plasma potential measurement are presented. The first one is an emissive probe control circuit for fast probe characteristics reading. The second one is a differential emissive probe control circuit that adjusts the bias voltage automatically and allows a direct potential measurement. These circuits present inconveniences if the characteristic of the probe doesn't exhibit an ideal saturation of the current as show the results obtained in continuous current discharge and RF discharge.

1 – INTRODUÇÃO

Técnicas de diagnósticos de descargas gasosas, através de sondas eletrostáticas, emissivas ou não-emissivas de elétrons, tornaram-se importantes principalmente em função das inúmeras aplicações tecnológicas de plasmas tais como em processos de deposição de filmes finos, tratamento de superfícies e corrosão especialmente em processos de microeletrônica. Torna-se desejável, deste modo, conhecer os parâmetros da descarga. A variação do potencial de plasma, sobretudo a queda de potencial na bainha de substratos, desempenham um papel preponderante nos mecanismos físico-químicos que determinam as propriedades do processamento do material. Neste contexto, circuitos de controle de

sondas emissivas de elétrons que permitam uma leitura do potencial de plasma e da curva característica da sonda de modo simples e eficiente são importantes. Os circuitos aqui apresentados foram desenvolvidos com o objetivo de determinar potenciais de plasma em descargas a corrente contínua ou a RF, sendo que estes potenciais podem estar na faixa de zero até 150 V, com relação aos eletrodos.

II – METODOLOGIA

Circuitos De Operação De Sondas Emissivas.

A emissão de elétrons de sondas emissivas fornece uma técnica simples para a medição do potencial de plasma. Estas sondas operam basicamente com dois circuitos independentes: um circuito de alimentação e um circuito de polarização. O circuito de alimentação é destinado ao aquecimento da sonda, enquanto o circuito de polarização promove a polarização da sonda com um determinado potencial em relação ao catodo do dispositivo de plasma. Quando a sonda é polarizada negativamente em relação ao potencial de plasma local, elétrons escapam para o plasma, compondo uma corrente efetiva de ions [1]. Esse processo não é sensível à deriva de elétrons porque depende mais diretamente do potencial de plasma do que da energia cinética dos elétrons e é menos sensível a contaminação da superfície da sonda, pois esta estará aquecida.

A medição do potencial de plasma possui maior resolução espacial com sondas emissivas, pois é possível construir sondas de tamanho reduzido. Nos experimentos descritos neste trabalho, foram utilizadas sondas de $5,0 \cdot 10^{-5}$ (50 μm) em diâmetro e com $0,5 \cdot 10^{-2}$ m (0,5 cm) de comprimento.

Circuito De Controle Da Sonda Emissiva De Leitura Rápida. Este circuito é destinado ao traçado da curva característica da sonda emissiva na tela de um osciloscópio (veja a figura 1). Para isso, o circuito gera uma rampa de tensão com pico de valor ajustável. Como os plasmas utilizados nos experimentos possuíam altos potenciais de plasma (entre 40 e 150V tipicamente), o valor de pico da rampa era de 150V.

Para que a superfície da sonda seja equipotencial durante a leitura da característica, a polarização da sonda deve ser feita durante intervalos de tempo quando esta não está sendo aquecida[1]. Para isso, a corrente de aquecimento

consiste em uma meia-senóide conseguida através da retificação em meia-onda da tensão presente no secundário de um transformador de 12 V. Foi adicionado um circuito de controle de corrente, para possibilitar o ajuste da temperatura da sonda. Este circuito e o transformador constituem o circuito de alimentação da sonda.

Como a leitura da característica da sonda deve ser realizada apenas nos intervalos de tempo quando esta não está sendo aquecida, torna-se necessário um sinal de sincronismo gerado pelo circuito de alimentação, com o objetivo de acionar o gerador de rampa de polarização no momento certo.

Como pode ser visto na Figura 1, o sinal de sincronismo atua no gerador de rampa de tensão. Este circuito gera uma rampa de tensão exponencial com um pico de alguns volts. Como a tensão de polarização da sonda deve atingir um pico de algumas centenas de volts, é necessário amplificar esta rampa de tensão. Isto é feito pelo amplificador de tensão. Este circuito permite obter uma alta tensão de polarização da sonda; nos circuitos utilizados o valor de pico da rampa era de 150V. Um controle de nível foi introduzido neste circuito, o que possibilitava ajustar este valor de pico.

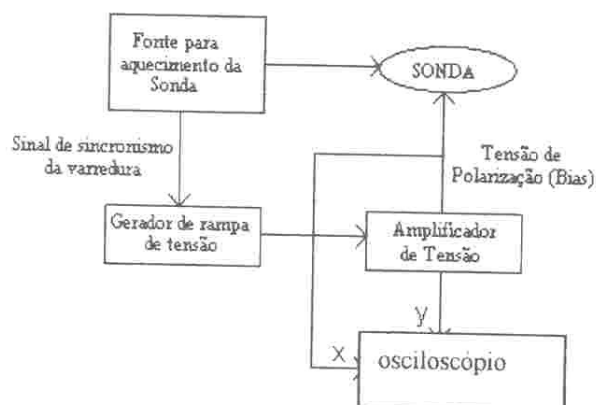


Figura 1. Diagrama em bloco do Circuito de controle da sonda emissiva de leitura rápida.

A referência de terra do amplificador de tensão não é ligada diretamente ao catodo do plasma, mas através de um resistor. O sinal sobre este resistor constitui um sinal de tensão proporcional à corrente da sonda. Este é o sinal presente no eixo Y (vertical) do osciloscópio. No eixo X (horizontal) é introduzido a tensão de polarização da sonda. O eixo Z do osciloscópio também deve ser utilizado (não está presente na Figura 1). Este eixo controla a intensidade do feixe de elétrons que atinge a tela do equipamento. Este sinal deve ser utilizado para apagar o tubo do osciloscópio durante os intervalos de tempo quando a varredura não está sendo realizada. Isto é necessário porque o gerador de rampa de tensão deve gerar uma rampa com duração de $\sim 100 \mu s$, e esta ocorre a cada $1/60 s$, pois a frequência de trabalho do circuito de alimentação é 60 Hz. Deste modo, se o feixe do tubo não for

desligado durante os intervalos quando o gerador de rampa está inativo, o feixe ficaria estacionado sobre um determinado ponto do cinescópio, o que poderia danificá-lo. Utiliza-se uma varredura rápida para evitar que o efeito de resfriamento da sonda [2] modifique a sua característica (relação corrente versus tensão). A referência de terra para o osciloscópio (ground) é a mesma do amplificador de tensão, ou seja, o 0 V da fonte de alimentação deste amplificador. Deve-se tomar cuidados em relação a estas referências de terra, pois se o catodo do plasma estiver ligado ao terra, este deve estar isolado da referência de terra do amplificador de tensão.

Deve ser observado que cuidados especiais devem ser tomados em relação à filtragem das linhas de alimentação e conexões com o plasma e o osciloscópio, para evitar interferências e ruídos, principalmente quando o circuito for utilizado com plasmas de RF.

Em relação a rampa de tensão gerada, não é necessário que esta rampa seja simétrica, ou seja, entre -V e +V, por exemplo entre -150 V e +150 V. Isto porque o potencial de plasma é geralmente positivo, logo só a parte positiva da rampa realmente interessa. Assim, tanto o gerador de rampa quanto o amplificador de tensão possuem configurações mais simples. Além disso, dispensa-se o uso de fonte simétrica de alta tensão para o amplificador de tensão, o que torna mais simples o circuito.

Circuito De Controle Da Sonda Emissiva Diferencial (SED) Segundo Chen [3], as características de corrente versus tensão de polarização de duas sondas, uma aquecida o suficiente para emitir elétrons e outra não emitindo, se interceptam em uma voltagem específica. Esta voltagem corresponde ao potencial de plasma, se efeitos de carga espacial puderem ser desprezados. Se os efeitos de carga espacial não forem significativos, determinando-se o potencial que faz estas duas sondas possuírem a mesma corrente, determina-se o potencial de plasma, pois o ponto de intercessão das características foi encontrado. Um circuito capaz de ajustar o potencial de polarização das sondas de modo que suas correntes fossem iguais foi proposto por Wang, *et al.* [2]. Na Figura 2 é apresentado o circuito proposto para este ajuste. Este circuito ajusta o potencial de polarização das duas sondas de modo que suas correntes sejam iguais. A sonda A é aquecida o suficiente para emitir elétrons. A sonda B é aquecida o suficiente para que sua superfície mantenha-se limpa, mas esta não emite elétrons. O potencial de plasma é lido diretamente no voltímetro V_p .

Como pretende-se medir potenciais de plasma que podem atingir centenas de volts, a configuração mostrada na Figura 2 apresenta o inconveniente de submeter as duas entradas do amplificador diferencial à alta tensão de polarização das sondas

(tensão comum às duas entradas), porque a referência de terra do amplificador diferencial é a mesma do amplificador principal, responsável pela polarização das sondas. Isto é inconveniente porque os circuitos de amplificadores diferenciais usam, geralmente, amplificadores operacionais, e estes não suportam altas tensões em suas entradas. Como o que realmente interessa para o amplificador diferencial são as tensões sobre os resistores em série com as sondas, tal problema seria solucionado se a referência de terra do amplificador diferencial fosse a saída do amplificador principal.

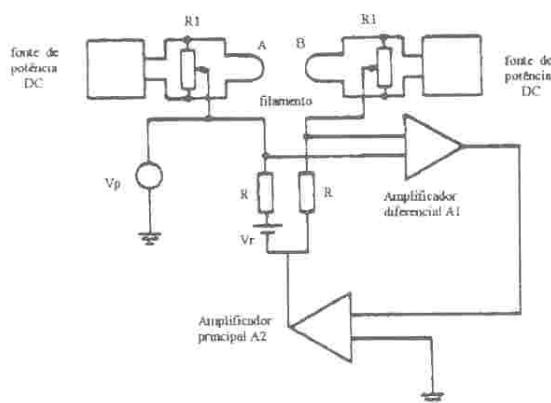


Figura 2. Circuito proposto por Wang *et al.* [2] para controle da voltagem de polarização das sondas. A voltagem V_r deve ser ajustada após escolhida a corrente de aquecimento das sondas.

Logicamente, como o amplificador diferencial e o amplificador principal possuem referências de terra distintos, suas fontes de alimentação devem ser distintas e não pode haver contato elétrico entre os dois circuitos. Entende-se por referência de terra o pólo de 0 V da fonte de alimentação, neste caso.

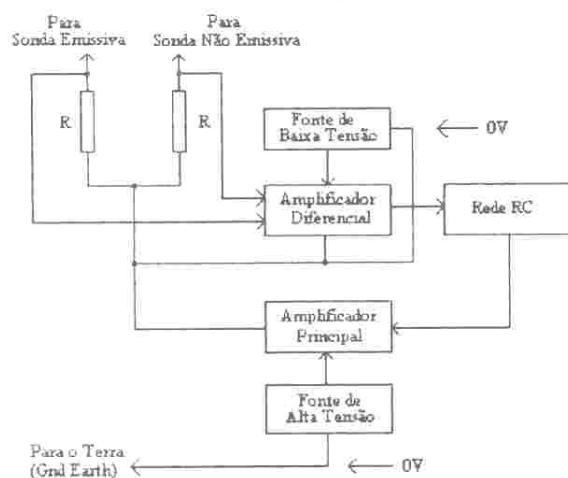


Figura 3. Diagrama em bloco simplificado do circuito de controle da sonda emissiva diferencial. Adotou-se o terra como sendo o catodo.

Assim, para haver isolamento elétrico entre estes amplificadores usou-se um foto-acoplador. Este é responsável pelo elo entre a saída do amplificador diferencial e o amplificador principal.

Na Figura 3 é apresentado o diagrama simplificado do circuito em blocos.

Como pode ser visto na Figura 3, as referências de terra dos dois amplificadores são distintas, conforme explicado acima. Além disso não foi usada a tensão de referência V_r , mas uma rede RC foi introduzida no elo de realimentação para o ajuste automático da tensão de polarização. Esta rede RC atua do seguinte modo: quando as correntes das duas sondas são diferentes, existe na saída do amplificador diferencial um potencial dado por:

$$V_d = G \cdot (R \cdot I_1 - R \cdot I_2) \quad (1)$$

onde G é o ganho do amplificador, R são as resistências em série com as sondas, I_1 é a corrente da sonda emissiva e I_2 é a corrente da sonda não-emissiva. Sempre que o potencial de polarização das sondas (V_{bias}) for menor que o potencial de plasma então $V_d > 0$. Este sinal alimenta a rede RC. Fazendo-se G alto, uma pequena diferença entre as correntes das sondas fará o amplificador diferencial saturar em $+V_{cc}$, onde V_{cc} corresponde à tensão de alimentação deste amplificador. Deste modo, se $V_{bias} < V_{plasma}$, V_d será aproximadamente $+V_{cc}$, e a tensão na entrada do amplificador principal começará a crescer exponencialmente devido à presença da rede RC. Quando a tensão de polarização das sondas atingir um valor para o qual V_d é igual à tensão na entrada do amplificador principal, o circuito entrará em equilíbrio. Haverá uma pequena diferença entre as correntes I_1 e I_2 , mas esta será tanto menor quanto maior G . O circuito usado nos experimentos descritos neste artigo possuía $G \approx 700$, $R = 100 \Omega$. Em todos os casos, $|I_1 - I_2|$ foi menor que 0,7mA. Deve ser observado que o uso de um ganho muito elevado do amplificador diferencial pode ocasionar problemas no circuito, principalmente devido às tolerâncias dos resistores em série com as sondas e correntes de offset dos amplificadores operacionais. Além disso, deve-se filtrar as entradas do amplificador diferencial e todas as linhas de alimentação do circuito para evitar ruídos e interferências de RF.

O potencial de plasma corresponde à tensão de polarização das sondas, medida na saída do amplificador principal em relação ao terra (ver figura3).

Como este circuito permite uma leitura contínua do potencial de plasma, ele possibilita o traçado da curva de potencial de plasma em função da posição ao longo de tubos de descarga, através do uso de uma sonda móvel e de um plotter conectado em sua saída (saída do amplificador principal). Nos apêndices A e B são mostrados os detalhes dos circuitos utilizados.

III - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para determinar o potencial de plasma com o circuito de controle da sonda emissiva de leitura rápida é necessário fazer uma análise das curvas características obtidas. Pode-se fazer isso analisando-se a curva obtida por diferenciação da característica, método do ponto de inflexão [1], ou determinando-se o ponto de saturação do potencial flutuante [4] [5] [6]. Este último método pode levar a sérias perturbações no plasma local. Já o método do ponto de inflexão pode levar a erros na presença de efeitos de carga espacial.

Utilizando o circuito de controle da sonda emissiva de leitura rápida, obteve-se as curvas características da figura 4 para diferentes correntes da fonte de alimentação da sonda. Utilizou-se uma descarga de corrente contínua em vapor de mercúrio.

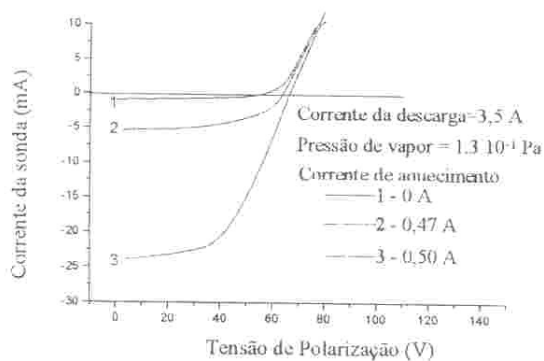


Figura 4. Curvas características da sonda emissiva para diferentes correntes de aquecimento (I_a). Curva1: $I_a=0.0$ A. Curva2: $I_a=0.47$ A. Curva 3: 0.5 A. Diâmetro do fio da sonda: $50\mu\text{m}$.

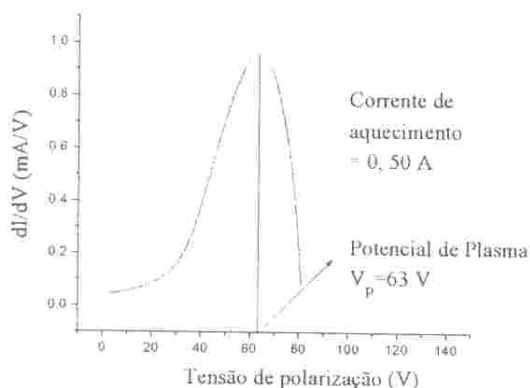


Figura 5. Derivada da curva característica da sonda emissiva para a corrente de aquecimento de 0.50 A realizada em descarga DC (derivada da curva de número 3 da figura 4).

Usando-se o circuito de controle da sonda emissiva diferencial obteve-se potenciais variando

entre 63 e 66 V para as mesmas condições de operação da descarga mostrada na figura 4. Pelo método do ponto de inflexão, como mostra a figura 5, o potencial de plasma obtido nestas mesmas condições é de aproximadamente 63 V.

Os potenciais flutuantes para as curvas da figura 4 são 56 , 64 e 66 V para as curvas 1, 2 e 3, respectivamente. A curva 3 corresponde à característica da sonda para a qual o potencial flutuante atingiu seu valor de saturação. Portanto o potencial de plasma fica em torno desse valor, ou seja, em torno de 66 V.

Realizando as medidas em um plasma de argônio com excitação de RF (13.56 MHz), obteve-se as curvas características para diferentes correntes da fonte de alimentação da sonda, conforme figura 6. Como pode ser observado na figura 6, os potenciais flutuantes são 28 e 34 V para as curvas 1 e 2, respectivamente. Como o valor de saturação do potencial flutuante foi 34 V, o potencial de plasma deve estar próximo deste valor. Entretanto, o método proposto por Chen [3] não conduziu a resultados satisfatórios, pois o ponto onde as características se interceptam corresponde ao potencial de 95 V.

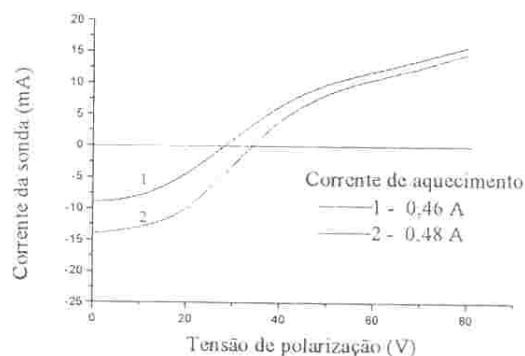


Figura 6. Curvas características da sonda emissiva para diferentes correntes de aquecimento (I_a). Curva1: $I_a=0.46$ A. Curva2: $I_a=0.48$ A. Descarga a RF em argônio (13.56 MHz) - Pressão= $2.0 \cdot 10^{-1}$ mbar.

Note que o potencial de referência procurado pelo circuito da SED ocorre para um valor muito alto de potencial, pois a saturação não é ideal nesta região. Ou seja, a medida que a tensão de polarização da sonda aumenta, a corrente já na região de saturação também aumenta. Isto sugere que a região de bainha em torno da sonda se expande com o aumento da tensão de polarização, aumentando consequentemente a área de coleção da sonda. Neste caso, quando é encontrado o ponto de intercessão entre as curvas característica da SED, a corrente da sonda é também muito alta, provocando a destruição da sonda. Assim, o valor indicado pelo máximo do potencial flutuante parece ser o valor

correto. Usando-se o método do ponto de inflexão, conseguiu-se resultados muito próximos daqueles obtidos com análise do potencial flutuante. Como pode ser visto na figura 7, as abscissas dos picos das derivadas das curvas características estão entre 28 e 32 V.

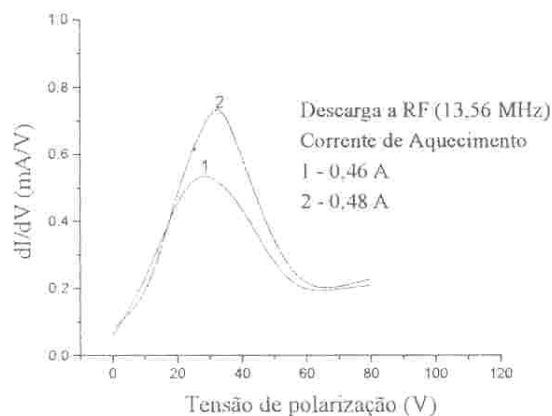


Figura 7. Derivada das curvas características apresentadas na Figura 6. Curvas 1 e 2 foram obtidas por diferenciação das curvas 1 e 2 da figura 6, respectivamente.

IV – CONCLUSÕES

Foi construído um circuito para efetuar uma leitura contínua do potencial de plasma. O chamado circuito da Sonda Emissiva Diferencial (SED) serve ao controle da tensão de polarização de duas sondas conectadas por um amplificador diferencial. Uma sonda opera como sonda de coleção, aquecida o suficiente para reduzir as impurezas impregnadas na sua superfície e a outra sonda é aquecida para a emissão de elétrons. O potencial de plasma é medido diretamente por um voltímetro em relação a uma tensão de referência ajustada pelo próprio circuito. Esta tensão de referência é fornecida pelo ponto de intercessão entre as características da sonda fria com a sonda emissiva. Com estas características, este circuito torna-se ideal para a determinação de perfis de potencial ao longo de curtas e longas distâncias. Devido a flutuações no potencial de plasma, o circuito da SED fornece um valor de potencial que oscila de 3 a 4 V. No entanto se a característica da sonda não exhibe saturação ideal, o circuito da SED tem dificuldade de encontrar a tensão de referência e quando a obtém, esta é muito alta causando a evaporação da sonda.

Uma solução para o problema de flutuações de potencial de plasma é projetar um circuito para obter a curva característica da sonda em curtos intervalos de tempo. Nestes circuitos de varredura rápida a voltagem de aquecimento é retificada para meia onda, tal que a curva pode ser traçada durante a metade do ciclo quando a voltagem de

aquecimento é nula. Os circuitos construídos neste trabalho, permitem obter valores de potenciais de até 150 V e correntes máximas de 50 mA para a SED e 200 mA para o circuito de varredura rápida. Em ambos os circuitos estudados, a determinação do potencial de plasma pela obtenção do valor de saturação do potencial flutuante da sonda emissiva mostrou-se coerente com a determinação do potencial de plasma obtido pelo método do ponto de inflexão.

REFERÊNCIAS

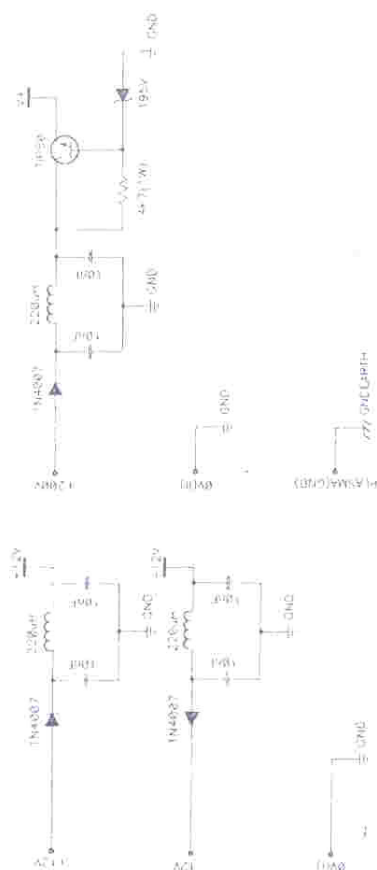
- [1] SMITH, J.R., Hershkowitz, N. and Coakley, P. (1979). Rev. Sci. Instrum. 50, 210
- [2] WANG, E.Y., Hershkowitz, N. and Intrator, T. (1985). Rev. Sci. Instrum. 56, 519
- [3] CHEN, F.F. (1965). In: Plasma Diagnostic Techniques. Academic Press, New York, p. 113
- [4] HALL, D. F., Kemp, R. F., and Sellen, J. M., Jr., AIAA J. 2, 1032 (1964)
- [5] KEMP, R. F. and Sellen, J. M., Jr., Rev. Sci. Instrum. 37, 455 (1966).
- [6] YAMADA, H. and Murphree, D. L., Phys. Fluids 14, 1120 (1971).

APÊNDICE A

Circuito de controle da sonda emissiva de leitura rápida

AGENDA

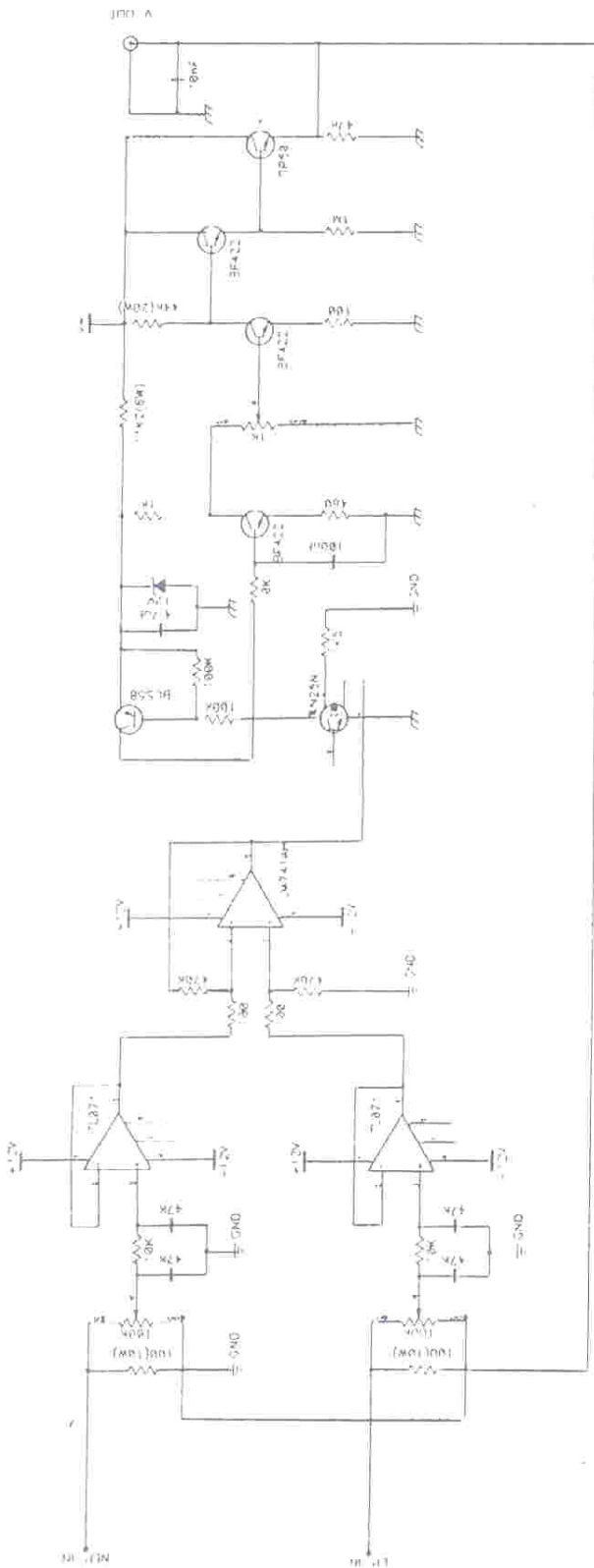
* todos os restaurantes que abrem
antes de 11h30
Cafeteria: 11h30
1911 - 20 DA FONTE DE SAUA TENDAO
2011 - 20 DA FONTE DE SAUA TENDAO
PLASMA (10) - TERÇA DO PLASMA (10:00)



Title		Circulo de Controle do Sudo Empresa de Abito Branco	
Size	Number	Drawn by	Scale
A2		S. J. G.	1:50

APÊNDICE B

Circuito de controle da sonda emissiva diferencial



LEGENDA

200V = 200V
 100V = 100V
 100kΩ = 100kΩ
 100kΩ = 100kΩ

777 2NCEARTH=terra do sistema(CATODO)
 2N111 fonte de alta tensão.
 2N111 fonte de baixa tensão.
 * Deve possuir dissipador de calor.

Título: Circuito de Controle da Sonda Emissiva Diferencial			
Auto	Rev	Number	Rev
1	1	1	1
2	2	2	2
3	3	3	3
4	4	4	4
5	5	5	5
6	6	6	6
7	7	7	7
8	8	8	8
9	9	9	9
10	10	10	10
11	11	11	11
12	12	12	12
13	13	13	13
14	14	14	14
15	15	15	15
16	16	16	16
17	17	17	17
18	18	18	18
19	19	19	19
20	20	20	20
21	21	21	21
22	22	22	22
23	23	23	23
24	24	24	24
25	25	25	25
26	26	26	26
27	27	27	27
28	28	28	28
29	29	29	29
30	30	30	30
31	31	31	31
32	32	32	32
33	33	33	33
34	34	34	34
35	35	35	35
36	36	36	36
37	37	37	37
38	38	38	38
39	39	39	39
40	40	40	40
41	41	41	41
42	42	42	42
43	43	43	43
44	44	44	44
45	45	45	45
46	46	46	46
47	47	47	47
48	48	48	48
49	49	49	49
50	50	50	50
51	51	51	51
52	52	52	52
53	53	53	53
54	54	54	54
55	55	55	55
56	56	56	56
57	57	57	57
58	58	58	58
59	59	59	59
60	60	60	60
61	61	61	61
62	62	62	62
63	63	63	63
64	64	64	64
65	65	65	65
66	66	66	66
67	67	67	67
68	68	68	68
69	69	69	69
70	70	70	70
71	71	71	71
72	72	72	72
73	73	73	73
74	74	74	74
75	75	75	75
76	76	76	76
77	77	77	77
78	78	78	78
79	79	79	79
80	80	80	80
81	81	81	81
82	82	82	82
83	83	83	83
84	84	84	84
85	85	85	85
86	86	86	86
87	87	87	87
88	88	88	88
89	89	89	89
90	90	90	90
91	91	91	91
92	92	92	92
93	93	93	93
94	94	94	94
95	95	95	95
96	96	96	96
97	97	97	97
98	98	98	98
99	99	99	99
100	100	100	100