Sistema automatizado para medidas de efeito Hall em semicondutores

C. E. M. de Oliveira e M. M. G. de Carvalho
UNICAMP - IFGW - DFA/LPD
Caixa Postal 6165, 13081-970 - Campinas - SP

Recebido em 22 de fevereiro, 1996

Utilizando-se uma interface projetada e construida no próprio laboratório, foi feita a automatização de um sistema de caracterização elétrica por medida de efeito Hall de substratos e camadas epitaxiais de compostos semicondutores do grupo III-V (GaAs, InP, GaSb, e suas ligas). São apresentados detalhes da interface, do programa de controle, da técnica de medida e exemplos de caracterização, no caso, de amostras de InP crescidas pelo método *Liquid Encapsulated Czochralski* (LEC).

Using a home-made interface, a system for electric characterization of III-V semiconductors compounds (GaAs, InP, GaSb and their alloys) has been developed. Details of hardware, software, measure technique are presented, as well as characterization examples of InP samples grown by Liquid Encapsulated Czochralski (LEC) method.

I. Introdução

A medida de densidade de portadores livres, da mobilidade dos mesmos e da resistividade de substratos ou camadas epitaxiais é obrigatória para na caracterização elétrica de amostras semicondutoras.

Em linhas gerais, no método de medida de efeito Hall são necessários pelo menos quatro contatos ôhmicos na amostra a ser caracterizada. Quando a amostra é submetida a um campo magnético $\vec{B}$ perpendicular à sua superfície e, por dois de seus contatos aplica-se uma corrente elétrica, o resultado é uma tensão elétrica entre os outros dois contatos, chamada de tensão Hall. Um sistema de medidas típico constitui-se de uma fonte de corrente, um milivoltímetro, um eletroimã e um conjunto de chaves através do qual o usuário seleciona em quais contatos passará a corrente e em quais é serão medidas as tensões para $B \neq 0$ e $B = 0$ e ainda comandos para ligar/inverter/desligar o campo magnético (Fig. 1a). Depois da etapa de medidas segue-se a de cálculos para caracterização da amostra.

A probalidade da ocorrência de maus contatos elétricos, manipulação errônea das chaves e erros de cálculos não é pequena neste tipo de sistema de medida. Além disso, quando a medida é feita em função da temperatura (de 20K a 300K, por exemplo), o trabalho torna-se tedioso: são várias horas girando botões e anotando valores, e outras tantas para a realização dos cálculos.

No sistema de medidas automatizado apresentado neste trabalho o usuário é grandemente beneficiado, ficando somente aos seus cuidados a escolha da corrente e a entrada deste valor e do valor da espessura da amostra no programa de controle do sistema. A comutação dos contatos, o controle do eletroimã, a aquisição da tensão Hall e os cálculos ficam por conta do microcomputador. A caracterização de uma amostra num sistema como este demora alguns minutos, sendo que os cálculos possuem grande confibilidade e, para evitar os possíveis problemas de conexões defeituosas e maus contatos elétricos, o sistema pode ser testado no início de cada série de medidas com auxílio de uma "amostra padrão", cujas características são conhecidas.

II. A técnica de caracterização elétrica

A caracterização elétrica por medida de efeito Hall da amostra semicondutora é feita medindo-se o coeficiente de Hall (R_H) e a resistividade (ρ). Através do coeficiente Hall, tendo-se a carga do elétron (e), calcula-se a densidade Hall de portadores (n_H) e, juntamente com a resistividade, a mobilidade de Hall (μ_H):

$$n_H = (e.R_H)^{-1} \tag{1}$$

$$\mu_H = \rho \cdot (R_H)^{-1} \tag{2}$$

A concentração e a mobilidade de portadores é dada por

$$n = n_H \cdot r_H \tag{3}$$

$$\mu = \mu_H \cdot (r_H)^{-1} \tag{4}$$

onde r_H é o fator de Hall.

No caso dos semicondutores tipo n, à temperatura ambiente, r_H está normalmente perto de 1. Para semicondutores tipo p, r_H pode ser da ordem de 2[1] e, portanto, um cálculo mais preciso requer uma análise mais profunda e particularizada[2], cuja descrição foge aos objetivos deste trabalho.

Para as medidas, escolhemos, por simplicidade, a geometria de um quadrado com os contatos em suas quinas, como mostrado na Fig. 1b.

As medidas da tensão de Hall e tensões para o cálculo da resistividade, devem ser feitas nos dois sentidos da corrente e do campo magnético para evitar erros sistemáticos devidos aos efeitos Righi-Leduc, Nernst-Ettingshansen e termoelétricos gerados por gradientes térmicos externos involuntários. O efeito Ettingshansen não pode ser eliminado mas usalmente é desprezível diante da tensão de Hall (ele é mais acentuado em materiais de baixa resistividade e baixa condutividade térmica).

Seja V_H a tensão de Hall, V_0 a tensão de desalinhamento, V_E a tensão de Ettingshansen, V_R a tensão de Righi-Leduc, V_N a tensão de Nernst-Ettingshansen e V_T a tensão termoelétrica. Sejam ainda B^+ e B^- os dois sentidos do campo magnético e i^+ e i^- os dois sentidos de corrente.

A Tabela 1 dá o sinal de cada uma das componentes das tensões medidas.

Logo,

$$V_H(V_1 - V_2 + V_4 - V_3)/4 = V_H + V_E \tag{5}$$

Como usualmente $V_E \ll V_H$, o procedimento da inversão de campo e corrente dá a tensão de Hall com boa precisão.

Tabela 1. Tensões medidas em função de suas várias componentes nos dois sentidos de campo e corrente aplicados à amostra.

CAMPO, CORRENTE	TENSÕES MEDIDAS
B+, i+	$V1 = V_H + V_O + V_E + V_T + V_N + V_R$
B-, i+	$V2 = - V_H + V_O - V_E + V_T - V_N - V_R$
B+, i-	$V3 = - V_H - V_O - V_E + V_T + V_N + V_R$
B-, i-	$V4 = V_H - V_O + V_E + V_T - V_N - V_R$

Na prática, seguindo a numeração dos contatos adotada na Fig. 1b, esta medida é feita entre os contatos 1 e 4 com corrente entre 2 e 3 (V_{H1}) e entre os contatos 2 e 3 com a corrente entre 1 e 4 (V_{H2}). Para o cálculo do coeficiente Hall de uma amostra de espessura d, fazendo a média aritmética $< V_H >$ entre V_{H1} e V_{H2}, temos:

$$R_H = < V_H > \cdot d \cdot (i \cdot B)^{-1} \tag{6}$$

onde i é a corrente e B é a intensidade do campo magnético.

Normalmente utilizamos amostras de 5mm x 5mm com contatos da ordem de 0,5mm, o que, de acordo com cálculos feitos por Chwang, Smith e Crowell[3], e mostrados na Fig. 2, dá um erro para a tensão de Hall em torno de 5%.

A resistividade é calculada pela fórmula de Van-der-Pauw[4] como se segue.

Seja $V_{ab,cd}$ o valor absoluto da tensão entre os contatos a e b quando uma corrente i passa entre os terminais c e d.

Utilizamos os contatos numa ordem tal que a tensão é medida num dos lados do quadrado e com a corrente elétrica passando no lado oposto. A numeração adotada para os contatos é a mostrada no detalhe da Fig. 2. Com isto podemos determinar quatro valores R dados por:

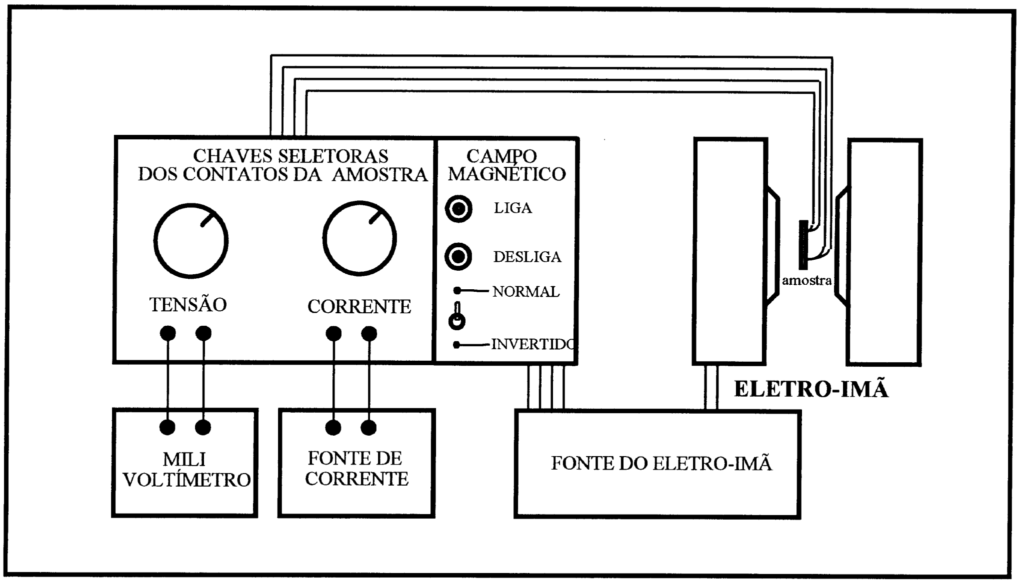
$$R_1 = (V_{13,42} + V_{12,34}) \cdot f(V_{13,42}/V_{12,34}) \cdot (2i)^{-1} \quad (7)$$

$$R_2 = (V_{34,12} + V_{31,42}) \cdot f(V_{34,12}/V_{31,42}) \cdot (2i)^{-1} \quad (8)$$

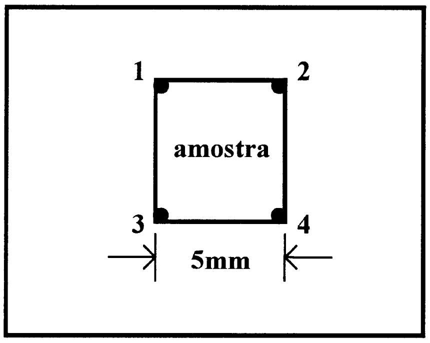
$$R_3 = (V_{43,21} + V_{42,13}) \cdot f(V_{43,21}/V_{42,13}) \cdot (2i)^{-1} \quad (9)$$

$$R_4 = (V_{21,34} + V_{24,13}) \cdot f(V_{21,34}/V_{24,13}) \cdot (2i)^{-1} \quad (10)$$

onde $f(V_I/V_{II})$, I e II representando os índices, é um fator de erro[4] cujo gráfico é dado na Fig. 3.



(a)



(b)

Figura 1. (a) Diagrama esquemático de um sistema de medida de efeito Hall convencional. (b) Formato das amostras e disposição dos contatos elétricos.

O valor da resistividade ρ de uma amostra de espessura d será:

$$\rho = \pi \cdot d \cdot R \cdot (\ln 2)^{-1} \tag{11}$$

com

$$R = (R_1 + R_2 + R_3 + R_4)/4 \tag{12}$$

A influência das dimensões dos contatos foi calculada por Chwang, Smith e Crowell[3] e pode ser vista na Fig. 4.

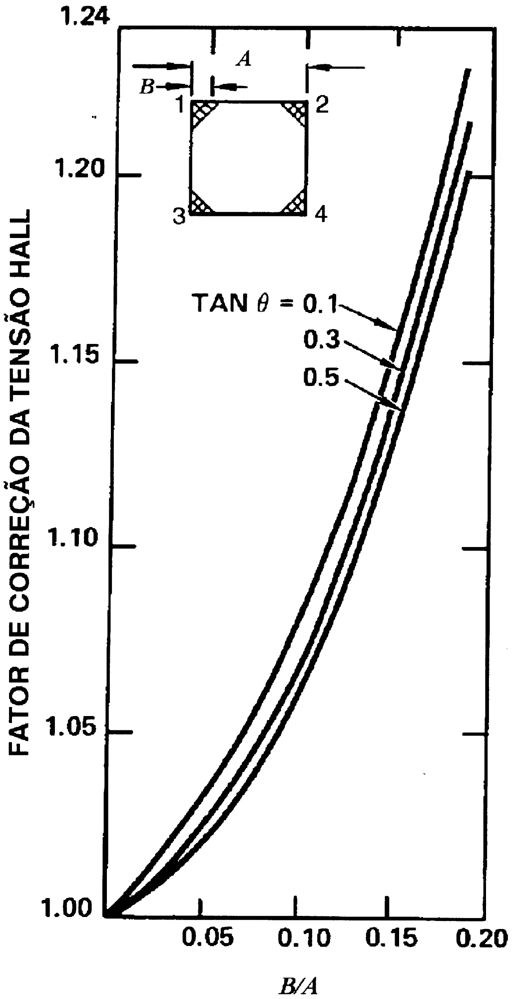


Figura 2. Fator de correção da tensão Hall como uma função da relação entre a dimensão do contato B e o lado A de uma amostra com formato de um quadrado para vários valores de tangente de Hall. A tangente de Hall é definida como a razão entre o campo elétrico de Hall e o campo elétrico na direção da corrente[2].

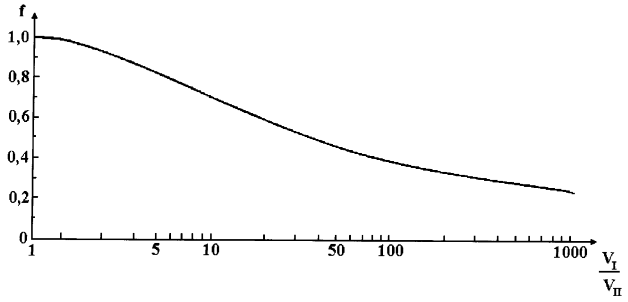


Figura 3. Função f usada para determinar a resistividade específica de uma amostra com um contorno arbitrário como função da relação V_I/V_{II} [3].

É importante ressaltar que um dos principais fatores de correção é a região de depleção de portadores livres, sobretudo para o caso de camadas epitaxiais. Neste caso, temos na realidade duas camadas de depleção: uma devido aos estados de superfície e outra, devido a interface entre a camada e o substrato (usualmente semi-isolante). O cálculo[5] da espessura total de tais camadas em GaAs tipo n, por exemplo, mostram que ela pode ir de 6,08 μm para $n = 10^{14}$ cm^{-3} e $T = 77$K ou $4,78\mu$m para a mesma concentração a $T = 296$K até $0,0187\mu$m para $n = 10^{19}$ cm^{-3} e $T = 296$K. Para valores de n mais usuais (de 10^{16} a 10^{17} cm^{-3}) e $T = 296$K, a região de depleção varia entre $0,544\mu$m e $0,182\mu$m. Portanto, uma camada de GaAs com 1μm de espessura e concentração medida de $n_H = 1,0 \times 10^{16}$cm^{-3}, na realidade tem concentração de aproximadamente 2×10^{16}cm^{-3}. Para material tipo p, as ordens de grandezas são as mesmas. É importante salientar que a correção devido às regiões de depleção não atingem a mobilidade, que não depende intrinsicamente da espessura da camada. Todavia, defeitos superficiais e de interface podem causar significativas alterações nos seus valores.

III. Equipamentos

O sistema de medida de efeito Hall automatizado é composto dos seguintes equipamentos: um microcomputador PC-XT com impressora matricial, um eletroimã Varian modelo V7200, uma fonte de corrente para o eletro-imã Varian modelo V7700, uma fonte de corrente Keithley modelo 227, um multímetro Keithley modelo 160B para leitura da corrente que passa pela amostra e de uma interface projetada e construida no Laboratório de Pesquisa em Dispositivos (LPD). A Fig. 5 é um diagrama esquemático que mostra como estes equipamentos se interligam e a Fig. 6 é uma foto do sistema.

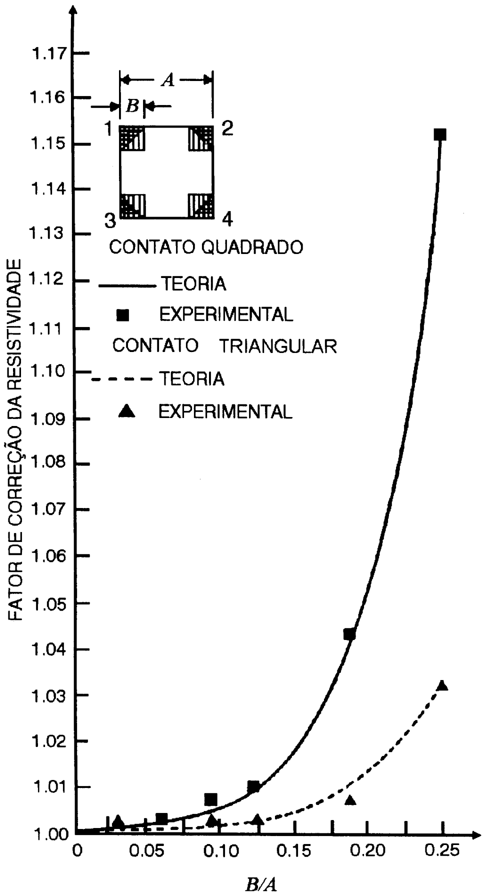


Figura 4. Fator de correção da resistividade como função de da relação B/A. As curvas contínuas e tracejadas foram calculadas para contatos quadrados e triangulares, respectivamente[2].

III.1 A interface

A interface utilizada, a Gênesis IV, é uma evolução de um projeto desenvolvido anteriormente denominado interface multipropósito Gênesis[6]. Esta interface possui a mesma filosofia da sua antecessora: é constituida de um bastidor que abriga uma placa-mãe na qual são conectados módulos básicos como conversores A/D e D/A, placas de entrada/saída de dados digitais e placas de comutação de relés dentre outros. Estes módulos compartilham de um barramento comum a todos eles, de onde recebem a alimentação para seus circuitos e por onde trocam dados com o microcomputador ligado à interface. Esta troca de dados ocorre através do endereçamento do módulo a ser acessado pelo microcomputador.

A grande diferença entre a interface Gênesis IV e a interface Gênesis é que nesta última o seu barramento de dados era uma extensão do barramento de dados do microcomputador. O chaveamento de dados em alta frequência destas linhas fazia da interface um ambiente muito ruidoso. Na Gênesis IV, a comunicação entre a interface e o microcomputador é feita via serial, opto-isolada, o que impede a passagem de ruído do micro para a interface.

Este tipo de interface possui como grande vantagem a versatilidade de poder ser configurada de acordo com a necessidade do usuário e de ser facilmente reconfigurada, acrescida ou diminuida de módulos.

No caso da automatização do sistema de medida de Efeito Hall, foram utilizados os seguintes módulos:

- Placa Fonte - responsável pelo barramento de alimentação da interface.
- Gerenciador Gênesis IV - responsável pela comunicação serial entre a interface e o microcomputador.
- Conversor A/D de 12 bits - responsável pela medida de tensão Hall.
- Placa comutadora de tensão - seleciona de quais contatos da amostra será feita a medida de tensão Hall.
- Placa comutadora de corrente - seleciona por quais contatos da amostra passará a corrente.
- Placa controladora de campo, corrente e conexões - fornece os comandos de "ligar", "desligar" e "inverter" para a fonte de corrente do eletro-imã. Liga e desliga a corrente que passa pela amostra e conecta fisicamente a amostra com as placas comutadores de tensão e corrente.

A Fig. 7 é um diagrama esquemático da interface Gênesis IV utilizada nesta automatização e na Fig. 8 é uma foto do painel frontal da interface.

III.1.1 Placa-mãe

A placa-mãe, presa ao fundo de um bastidor "Eurocard - 19 polegadas", faz a interconexão entre os módulos a ela conectados através de conectores tipo borda de cartão de 36 vias. Ela pode abrigar até 11 módulos além da Fonte de Alimentação e do Gerenciador que são obrigatórios em todas as interfaces. Além dos barramentos de dados (8 vias), de endereços (8 vias) e de alimentação (11 vias), esta placa ainda possui um barramento de 8 vias "extras" reservado para conexões especiais entre módulos. No caso da automatização do sistema de medida de efeito Hall, são usadas 4 destas vias como serão abordado adiante.

III.1.2 Placa fonte de alimentação

A Fonte de Alimentação foi projetada levando-se em conta a presença de circuitos analógicos de precisão para medida de tensões da ordem de microvolts e de circuitos digitais responsáveis pelas lógicas de endereçamento de cada módulo. Portanto, a fonte é constituida de três partes: a parte digital que fornece +5V e +12V para alimentação de circuitos TTL e bobinas de reles, a parte analógica que fornece +5V, +15V, -5V, -15V para alimentação de amplificadores operacionais e conversores A/D e D/A e, por último, a parte de referência que fornece +10,000V e +1,26V com precisão e estabilidade térmica necessárias para servirem de referência para conversores A/D e D/A de precisão. A tensão de referência de +10,000V é gerada pelo componente AD581LH [7] e a de 1,26V pelo ICL8069 [8]. As linhas de Terra do barramento também foram divididas em Terra Digital e Terra Analógico.

Cada uma das linhas de alimentação é protegida por um fusível e é monitorada por um LED, no frontal da Placa Fonte, de tal forma que o usuário possa facilmente detectar possíveis falhas na alimentação.

O esquema elétrico da Placa Fonte pode ser visto nas Figs. 9a e 9b.

III.1.3 Gerenciador Gênesis IV

Este módulo é baseado no microcontrolador INTEL 8751 [9], que gerencia a comunicação serial (RS232) entre o microcomputador e os outros módulos da interface. Com a comunicação serial é possível o desacoplamento elétrico entre o microcomputador e a interface, resultando num ambiente propício para medidas de precisão.

O microcontrolador 8751 é um componente que possui um microprocessador de 8 bits, uma memória EPROM de 4 Kbytes, uma memória RAM de 256 bytes, 4 portas de entrada/saida de dados e 2 contadores digitais de 16 bits. Uma das portas é utilizada como barramento de dados da interface, outra como barramento de endereços, a terceira como saída para um display de cristal líquido opcional e a última é utilizada como porta de comunicação serial. Na sua EPROM está um programa escrito em linguagem de máquina, através do qual os dados são transmitidos do microcomputador para os módulos da interface ou vice-versa, a Fig. 10 é o fluxograma deste programa.

Em linhas gerais, o fluxograma da Fig. 8 traduz-se no seguinte protocolo de comunicação:

1. Foi arbitrado que todos os módulos com endereços ímpares são para saída de dados e os com endereços pares são para entrada de dados. Por exemplo, um conversor D/A deve ter endereço ímpar e um conversor A/D, par.

2. O 8751 fica o tempo todo verificando se chegou um dado pela porta serial, assim que um byte é recebido ele é encarado como o primeiro byte, que é o endereço do módulo com o qual o microcomputador quer enviar ou receber dados.

3. Se o endereço é par, significa que o microcomputador quer receber um dado do módulo com este endereço. Então, o 8751 coloca no barramento de endereços o primeiro byte, a lógica de endereçamento do módulo com este endereço será ativada e liberará para o barramento de dados um byte. 0 8751 coloca este byte no Acumulador, um registrador temporário, e em seguida envia pela linha serial o conteúdo deste registrador.

4. Se o endereço é ímpar, significa que o microcomputador quer enviar um byte para o módulo com este endereço. Então, o 8751 guarda na sua memória RAM (pilha) este endereço e fica esperando o microcomputador enviar o segundo byte, que será o dado. Assim que este dado é recebido, o 8751 coloca no barramento de endereços o endereço e no barramento de dados o dado.

A Fig. 11 mostra o diagrama esquemático principal do Gerenciador. Como descrito anteriormente, a porta P1 do 8751 é o barramento de endereços da interface e está ligada a dois *buffers* TTL (74LS244) [10]. A porta

PO é o barramento de dados, a P2 está conectada a um visor alfa-numérico de cristal líquido (opcional) e a P3 é utilizada como porta serial.

III.1.4 O conversor A/D

Para medida de tensões variando desde microvolts até Volts foi necessário o uso de um conversor A/D de 12 bits com um amplificador de instrumentação com ganhos de 1, 10, 100 e 1000 comandados pelo micro-computador. O conversor utilizado foi o ICL7109 [8], componente facilmente encontrado no mercado e especialmente indicado para medida de tensões com grande constante de tempo, uma vez que utiliza o método de conversão de dupla-rampa. Este conversor fornece uma conversão A/D a cada 100ms, o que para esta aplicação é bastante adequado. O amplificador utilizado foi o AD524 [7] pela sua versatilidade e facilidade de utilização (requer poucos componentes externos) e pela sua grande estabilidade térmica (deriva de *off-set* menor que 0,5 μV/°C).

Os demais componentes deste módulo (Figs. 12a e 12b) estão relacionados com a lógica de endereçamento, com o *latch/driver* para os reles de mudança de ganhos do amplificador de instrumentação e com o *buffer* de dados do conversor A/D.

O conversor A/D, além dos 12 bits de dados, ainda fornece os sinais de *polarity, over-range* e *status*, os dois primeiros para indicarem a polaridade do sinal de entrada e se este atingiu o fundo de escala, o último indica se o dado disponível é válido. O sinal de *status* é de grande importância, pois enquanto o conversor A/D está realizando a conversão, o dado disponível no seu *buffer* é considerado não válido e é através do *status* que isto é sinalizado. Este conversor foi projetado prevendo-se a sua utilização em barramentos de dados de 8 bits, logo ele acomoda os bits de dados e sinais de controle em duas palavras de 8 bits: o "HIBYTE" e o "LOBYTE". Os bits de dados de 0 a 7 estão no LOBYTE e os de 8 à 11 no HIBYTE, juntamente com os sinais de *polarity, over-range* e *status*.

Com este módulo é possível realizar medidas de tensão com as seguintes características:

- Para ganho = 1 - fundo de escala = 10V, resolução = 3mV.
- Para ganho = 10 - fundo de escala = 1V, resolução = 300μV.
- Para ganho = 100 - fundo de escala = 100mV, resolução = 30μV.
- Para ganho = 1000 - fundo de escala = 10mV, resolução = 3μV.

De acordo com a tensão de entrada no conversor os ganhos são selecionados de modo a otimizar a resolução, comandados pelo programa que roda no microcomputador.

III.1.5 As placas comutadoras

Para que a fonte de corrente possa ser conectada a quaisquer contatos da amostra a ser caracterizada pela medida de efeito Hall, bem como o conversor A/D possa medir a tensão de quaisquer outros dois contatos desta amostra, é necessário a utilização de duas redes de reles como mostrado no esquema da Fig. 13.

Além do esquema mostrado na Fig. 13 para cada placa comutadora ainda há a lógica de endereçamento correspondente, os *latchs/drivers* para as bobinas dos reles e LEDs para a indicação de quais contatos estão sendo acessados. Utilizando estas placas o programa de controle do sistema de medida aciona os devidos reles de cada placa comutadora para que os contatos da amostra sejam acessados adequadamente pela fonte de corrente e pelo conversor A/D, conforme mostra a Tabela 2.

A Fig. 14 é o diagrama esquemático completo de uma das placa comutadoras, nele pode-se ver que os reles utilizados possuem dois contatos reversíveis cada. Um contato é utilizado para acessar a amostra o outro para a sinalizaçao com LEDs de quais contatos estão sendo acessados.

Pelo esquema da Fig. 13, vemos que os terminais 1, 2, 3 e 4 das placas comutadoras devem estar ligados entre si e ligados à amostra. A conexão entre as placas comutadoras é feita através de 4 vias extras do barramento Gênesis IV, e, por uma questão de falta de espaço no painel frontal das placas comutadoras, a conexão entre estas vias e a amostra é feita através da placa de controle de campo, corrente e conexões, como veremos a seguir.

		RELES						
ENDEREÇO 131	ENDEREÇO 129	RL2	RL4	RL3	RL6	RL1	RL5	DADO DECIMAL
I(1,2)	V(1,2)	0	0	0	0	0	1	1
I(1,3)	V(1,3)	1	0	0	0	0	0	32
I(1,4)	V(1,4)	1	0	0	1	0	0	36
I(2,1)	V(2,1)	0	0	1	0	0	0	8
I(2,3)	V(2,3)	1	0	1	0	0	0	40
I(2,4)	V(2,4)	1	0	1	1	0	0	44
I(3,1)	V(3,1)	0	0	0	0	1	0	2
I(3,2)	V(3,2)	0	0	0	0	1	1	3
I(3,4)	V(3,4)	1	0	0	1	1	0	38
I(4,1)	V(4,1)	0	1	0	0	1	0	18
I(4,2)	V(4,2)	0	1	0	0	1	1	19
I(4,3)	V(4,3)	1	1	0	0	1	0	50
		D5	D4	D3	D2	D1	D0	
		DADOS						

Tabela 2. "Tabela Verdade" das placas comutadoras. Os endereços "131" e "129" sobre as colunas de correntes e tensões selecionáveis são os endereços das placas comutadora de corrente e comutadora de tensão respectivamente. Cada *bit* da palavra de dados liga ou desliga um rele da placa comutadora, "0" significa desligado e "1", ligado. A coluna "DADO DECIMAL" é a representação em decimal do dado da coluna ao lado, representado em binário.

III.1.6 Placa controladora de campo, corrente e conexões

Esta placa tem as seguintes funções:

1. controlar o campo magnético, ou seja, ligar, desligar e inverter o campo magnético.
2. ligar e desligar a corrente que vai para a placa comutadora de corrente.
3. fazer a conexão dos cabos que vêm do porta-amostra com as entradas/saídas das placas comutadoras.

A Fig. 15 é o diagrama elétrico desta placa.

A primeira função é realizada através de três reles (reles 1, 2 e 3), que são ligados a três chaves do painel de controle manual da fonte de corrente do eletro-imã. Desta forma é possível a operação manual ou automática do eletro-imã.

A segunda função é realizada pelo rele 4, que permite ou não a passagem da corrente para a placa comutadora de corrente. Esta corrente é interrompida antes de cada mudança de contatos tanto na placa comutadora de corrente quanto na de tensão. Isto é de grande importância, pois, quando os reles são acionados, pelo fato de não possuirem todos a mesma velocidade de fechamento/abertura de contatos, combinações indesejáveis de contatos podem ser geradas antes da configuração determinada pelo programa. Isto pode resultar em grandes danos para a interface, pois nos terminais da fonte de corrente pode haver tensões de até 300V. Se a fonte de corrente for conectada à entrada do conversor A/D, por exemplo, isto certamente o danificará.

Quando o rele 4 é acionado a corrente ajustada pelo usuário deixa de passar pela amostra através da placa comutadora de corrente e é desviada para um resistor de *stand-by*. O projeto original não previa este resistor, mas ele se mostrou necessário quando nos testes preliminares da interface verificou-se que a cada abertura de contatos do rele 4, a tensão nos terminais da fonte de corrente atingia seu fundo de escala, e quando estes contatos eram fechados surgia um transiente na corrente da amostra que poderia lhe ser prejudicial. Com o resistor de *stand-by*, quando os contatos do rele 4 são acionados a fonte de corrente não fica em aberto, e a tensão de seus terminais não atigem o fundo de escala.

A terceira e última função desta placa é de fazer a conexão dos terminais 1, 2, 3 e 4 da amostra com as correspondentes entradas/saídas das placas comutadoras. As placas comutadoras conectam-se entre si através de 4 vias extras do barramento Gênesis IV (linhas 2B, 3B, 5B e 8B). Estas 4 vias, através desta placa são ligadas a 4 conectores do tipo BNC situados no seu painel frontal. Quatro cabos coaxiais fazem a ligação desta placa com o porta-amostra. O porta-amostra (Fig. 16) possui um conector tipo borda de cartão de seis vias onde a amostra, soldada a uma placa-suporte de circuito impresso de 3cmx3cm, se encaixa. Ele é construído de tal maneira que posiciona a amostra entre os polos do eletroimã onde as linhas de campo magnético uniforme são perpendiculares à superfície da amostra. Cada amostra é soldada à sua placa-suporte, como mostra a Fig. 17. Isto facilita muitíssimo a manipulação da amostra e a seu armazenamento.

IV. Programa de controle

O programa de controle, "HALL5.BAS", foi feito em BASIC[11] devido a facilidade de programação desta linguagem, além do que, a velocidade de acionamento do sistema e o volume de cálculos realizados não necessitam de uma linguagem compilada.

O HALL5.BAS foi feito de maneira modular, dividido em sub-rotinas, visando sua compreensão e permitindo futuras correções/modificações. A Fig. 18 é seu fluxograma, nesta figura podemos identificar os seguintes elementos:

INICIALIZAÇÃO - quando a porta serial do microcomputador é programada, o ganho=1 do conversor A/D é selecionado e as placas comutadoras de tensão e corrente são inicializadas;

APRESENTAÇÃO - quando o nome do programa e sua versão são mostradas na tela por alguns segundos;

ENTRADA DE DADOS - quando o usuário entra com a denominação da amostra e seu valor de espessura (d);

SUB-ROTINA AJUSTE DE CORRENTE - esta sub-rotina seleciona os contatos 1 e 2 da amostra para passagem de corrente e os contatos 3 e 4 para leitura de tensão. O valor da tensão é então mostrado na tela do microcomputador e o usuário deve ajustar a corrente pela sua amostra. Após o ajuste da corrente, o usuário dá entrada no programa do seu valor (i);

SUB-ROTINA RESISTIVIDADE - executa a seguinte sequência:

Seleciona I(1,2) e mede V(3,4).
Seleciona I(2,1) e mede V(4,3).
Seleciona I(2,4) e mede V(1,3).
Seleciona I(4,2) e mede V(3,1).
Seleciona I(4,3) e mede V(2,1).
Seleciona I(3,4) e mede V(1,2).
Seleciona I(3,1) e mede V(4,2).
Seleciona I(1,3) e mede V(2,4).
Calcula:

$$\begin{aligned} V_{\mathrm{RES}} &= (V(3,4)+V(4,3)+V(1,3)+V(3,1)+\\ &\quad V(2,1)+V(1,2)+V(4,2)+V(2,4))/8 \end{aligned}$$

$$\rho = \frac{(\pi \cdot d \cdot V_{\mathrm{RES}})}{(i \cdot \ln 2)}$$

Armazena o valor da resistividade (ρ) para ser utilizado no cálculo da densidade de portadores mais adiante.

SUB-ROTINA HALL - que executa a seguinte sequência:

Liga o campo magnético
Seleciona I(1,4) e mede V(2,3).
Seleciona I(4,1) e mede V(3,2).
Seleciona I(2,3) e mede V(1,4).
Seleciona I(3,2) e mede V(4,1).
Inverte o campo magnético.
Seleciona I(1,4) e mede V(2,3).
Seleciona I(4,1) e mede V(3,2).
Seleciona I(2,3) e mede V(1,4).
Seleciona I(3,2) e mede V(4,1).
Desliga o campo magnético.
Calcula:

V_A = (V(2,3) com campo normal - V(2,3) com campo invertido)/2

V_B = (V(3,2) com campo normal - V(3,2) com campo invertido)/2

V_C = (V(1,4) com campo normal - V(1,4) com campo invertido)/2

V_D = (V(4,1) com campo normal - V(4,1) com campo invertido)/2

$$V_H = (V_A + V_B + V_C + V_D)/4$$

$$R_H = V_H \cdot d/i.B$$

$$n = 1/R_H \cdot e$$

$$\mu = R_H/\rho$$

onde: B é a intensidade do campo magnético, fixado em 0,5T; e é a carga do elétron

Mostra os valores de ρ, R_H, n e μ na tela do microcomputador;

SUB-ROTINA IMPRESSÃO - se o usuário desejar, esta sub-rotina imprime um relatório com todas as medidas realizadas e os resultados obtidos (ρ, R_H, n e μ) para a amostra analisada;

O usuário também pode determinar a realização de mais uma medida ou o término do programa.

V. Resultados experimentais

Para demostrar funcionamento do sistema, quatro amostras semicondutoras de fosfeto de indio (InP) crescidas pelo método LEC (Liquid Encapsulated Czochralski) com níveis de dopagem variando de 10^{15}cm^{-3} a 10^{18}cm^{-3} foram caracterizadas à temperatura ambiente e o relatório impresso de suas características pode ser visto a seguir.

V.1. InP não dopado-n da ordem de 10^{15}cm^{-3}

CARACTERIZAÇÃO POR MEDIDA DE EFEITO HALL

AMOSTRA: InP#4-2
ESPESSURA: 1000.00 micra
CORRENTE: 5.000 mA

MEDIDA DE RESISTIVIDADE

I(1,2) V(3,4)= 12.894 mV
I(2,1) V(4,3)= 13.075 mV
I(2,4) V(1,3)= 9.465 mV
I(4,2) V(3,1)= 9.307 mV
I(4,3) V(2,1)= 12.900 mV
I(3,4) V(1,2)= 12.999 mV
I(3,1) V(4,2)= 9.506 mV
I(1,3) V(2,4)= 9.700 mV

RESISTIVIDADE= 101E-02 ohm.cm

MEDIDA DE MOBILIDADE E DENSIDADE DE PORTADORES

CAMPO NORMAL

I(1,4) V(2,3)= -11.229 mV
I(4,1) V(3,2)= -11.429 mV
I(2,3) V(1,4)= 4.930 mV
I(3,2) V(4,1)= 4.855 mV

CAMPO INVERTIDO

I(1,4) V(2,3)= 4.812 mV
I(4,1) V(3,2)= 4.504 mV
I(2,3) V(1,4)= -11.200 mV
I(3,2) V(4,1)= -11.194 mV

COEFICIENTE HALL= 3.21E+03 cm^3/C
DENSIDADE DE PORTADORES= 1.95E+15 cm^{-3}
MOBILIDADE= 3.18E+03 cm^2/V.s

V.2 - InP dopado com Enxofre - n da ordem de 10^{17}cm^{-3}

CARACTERIZAÇÃO POR MEDIDA DE EFEITO HALL

AMOSTRA: InP#5-1
ESPESSURA: 600.00 micra
CORRENTE: 95.000 mA

MEDIDA DE RESISTIVIDADE
I(1,2) V(3,4)= 3.774 mV
I(2,1) V(4,3)= 3.766 mV
I(2,4) V(1,3)= 1.104 mV
I(4,2) V(3,1)= 1.109 mV
I(4,3) V(2,1)= 3.715 mV
I(3,4) V(1,2)= 3.865 mV
I(3,1) V(4,2)= 1.161 mV
I(1,3) V(2,4)= 1.134 mV

RESISTIVIDADE= 625E-05 ohm.cm

MEDIDA DE MOBILIDADE E DENSIDADE DE PORTADORES

CAMPO NORMAL
I(1,4) V(2,3)= -3.689 mV
I(4,1) V(3,2)= -3.708 mV
I(2,3) V(1,4)= -1.362 mV
I(3,2) V(4,1)= -1.431 mV

CAMPO INVERTIDO

I(1,4) V(2,3)= -1.394 mV
I(4,1) V(3,2)= -1.408 mV
I(2,3) V(1,4)= -3.640 mV
I(3,2) V(4,1)= -3.702 mV

COEFICIENTE HALL= 1.44E+01 cm^3/C
DENSIDADE DE PORTADORES= 4.33E+17 cm^{-3}
MOBILIDADE= 2.31E+03 cm^2/V.s

V.3 - InP dopado com Enxofre-n da ordem de 10^{18}cm^{-3}

CARACTERIZAÇÃO POR MEDIDA DE EFEITO HALL

AMOSTRA: InP#7M
ESPESSURA: 720.00 micra
CORRENTE: 300.000 mA

MEDIDA DE RESISTIVIDADE

I(1,2) V(3,4)= 1.287 mV
I(2,1) V(4,3)= 1.293 mV
I(2,4) V(1,3)= 1.125 mV
I(4,2) V(3,1)= 1.152 mV
I(4,3) V(2,1)= 1.307 mV
I(3,4) V(1,2)= 1.276 mV
I(3,1) V(4,2)= 1.167 mV
I(1,3) V(2,4)= 1.159 mV

RESISTIVIDADE= 133E-05 ohm.cm

MEDIDA DE MOBILIDADE E DENSIDADE DE PORTADORES

CAMPO NORMAL

I(1,4) V(2,3)= -0.358 mV
I(4,1) V(3,2)= -0.358 mV
I(2,3) V(1,4)= 0.358 mV
I(3,2) V(4,1)= 0.392 mV

CAMPO INVERTIDO

I(1,4) V(2,3)= 0.359 mV
I(4,1) V(3,2)= 0.355 mV
I(2,3) V(1,4)= -0.334 mV
I(3,2) V(4,1)= -0.285 mV

COEFICIENTE HALL = 1.68E+00 cm^3/C
DENSIDADE DE PORTADORES = 3.72E+18 cm^{-3}
MOBILIDADE = 1.27E+03 cm^2/V.s

VI. CONCLUSÃO

Um sistema de medida de efeito Hall para caracterização elétrica de semicondutores do grupo III-V foi automatizado. Para tanto os equipamentos básicos necessários na realização deste tipo de caracterização foram interfaceados a um microcomputador PC-XT através de uma interface especialmente desenvolvida para esta finalidade. Como resultados desta automatização podemos ressaltar:

1. O tempo gasto para caracterização de uma amostra é da ordem de 2 minutos, cerca de cinco vezes menor do que se fosse realizada manualmente, sem levar em conta o tempo gasto com os cálculos;
2. O usuário não precisa, obrigatoriamente, conhecer a sequência de passos para a realização da medida e nem os cálculos envolvidos para a obtenção dos resultados;

3. A probabilidade de ocorrência de erros no sistema automatizado é muitíssimo menor que no manual, uma vez que os cálculos são feitos pelo microcomputador e o sistema pode ser testado a cada rodada de medidas, com o auxílio de uma amostra padrão, para detecção de possíveis maus contatos elétricos e falhas de equipamentos;
4. O usuário tem um relatório impresso com todas as medidas feitas na sua amostra e os resultados da sua caracterização (ρ, R_H, n e μ);
5. A relação custo/benefício desta automatização foi muito baixa, uma vez que a interface foi desenvolvida no próprio laboratório com um custo estimado em menos de R$1000,00 e o usuário do sistema tem resultados rápidos e muito confiáveis;
6. O fato da interface ter sido construida no próprio laboratório, com componentes facilmente encontrados no mercado, faz com que sua manutenção seja grandemente facilitada, pois não depende de terceiros como no caso de equipamentos comprados;
7. A interface utilizada nesta automatização, a Gênesis IV, é modular, podendo ser facilmente modificada para realizar outras funções além das atualmente realizadas;
8. O fato do programa ter sido desenvolvido no próprio laboratório abre a possibilidade dele ser modificado quando for necessário, o que certamente não seria possível se fosse comprado.

Agradecimentos

Agradecemos ao técnico Josemar Pinheiro pela grande ajuda no desenvolvimento da interface Gênesis IV, aos estagiários Isaias Ferreira e André Raposeiro pela colaboração na edição de várias placas da interface e ao CNPq e à TELEBRAS pelo apoio financeiro.

Referências

1. Takeda K., Matsumoto N., Tagushi A., Taki H., Ohta E. and Sabata M., Phys. Rev. B **32**, 1101 (1985).
2. Shibli S.M. and de Carvalho M.M.G., J. Appl. Phys. **64**, 235 (1988).
2. Chwang R., Smith B. J., Crowell C. R., Solid State Electron. **17**, 1217 (1974).
3. Van der Pauw L. J., Philips Res. Repts. **13**, 1 (1958).
4. Look D. C., *Electrical Characterization of GaAs Materials and Devices*, John Wiley & Sons, G. B., pp.46-47, 1989
5. Oliveira C. E. M., Rev. Fís. Apl. e Inst. **6**, 13 (1991).
6. Analog Devices Inc., *Component Data Catalog*, 1986.
7. Intersil Inc., *Component Data Catalog*, 1987.
8. Intel Corporation, *Embedded Controler Handbook,* Vol. 1, 1988.
9. Texas Instruments, *The TTL Data Book,* Vol. 2, 1985.
10. Scopus Tecnologia S. A., *Manual de Referência do Basic,* 1986.

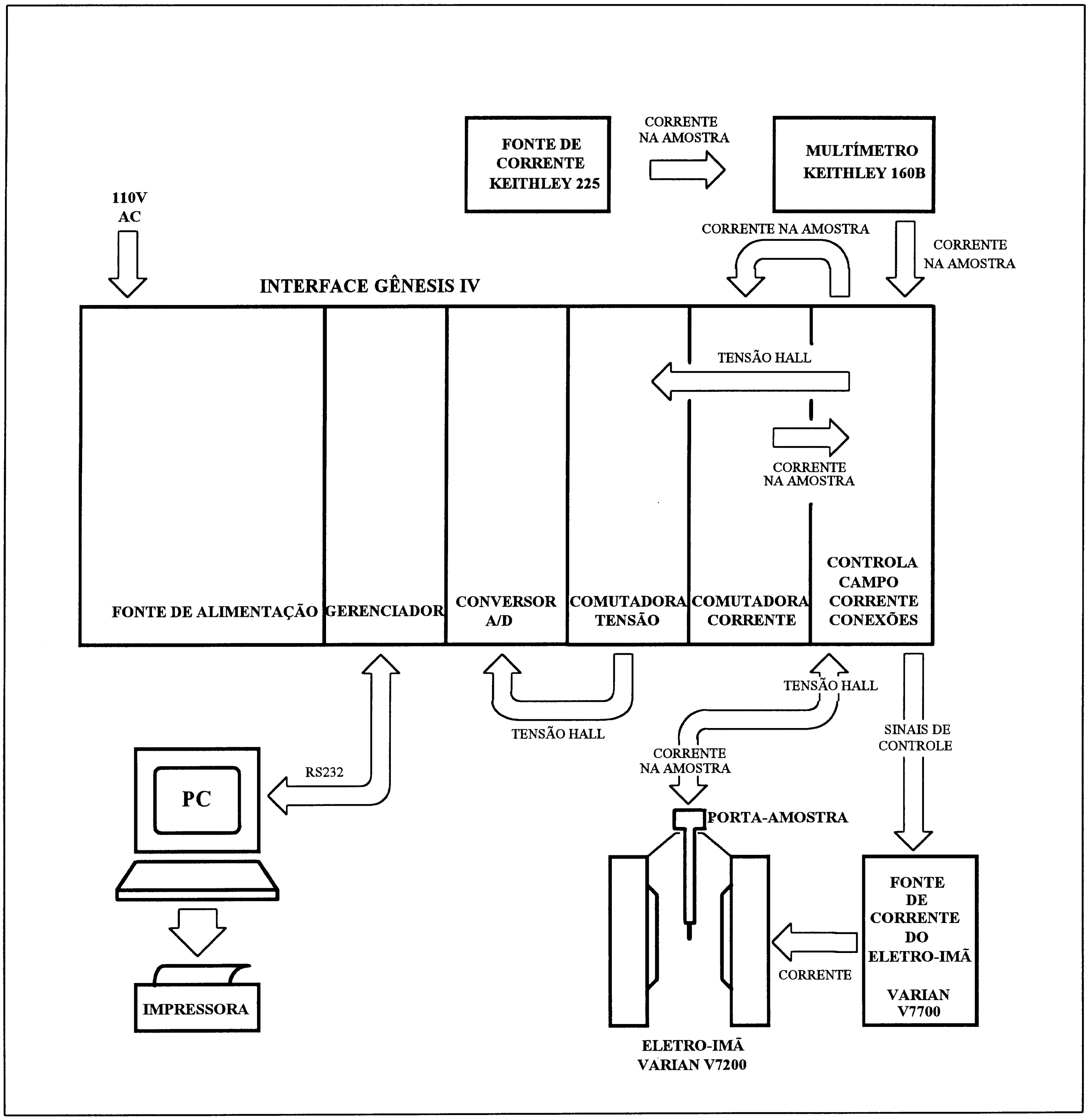


Figura 5. Diagrama esquemático mostrando como os equipamentos do sistema de medida de efeito Hall automatizado se interconectam.

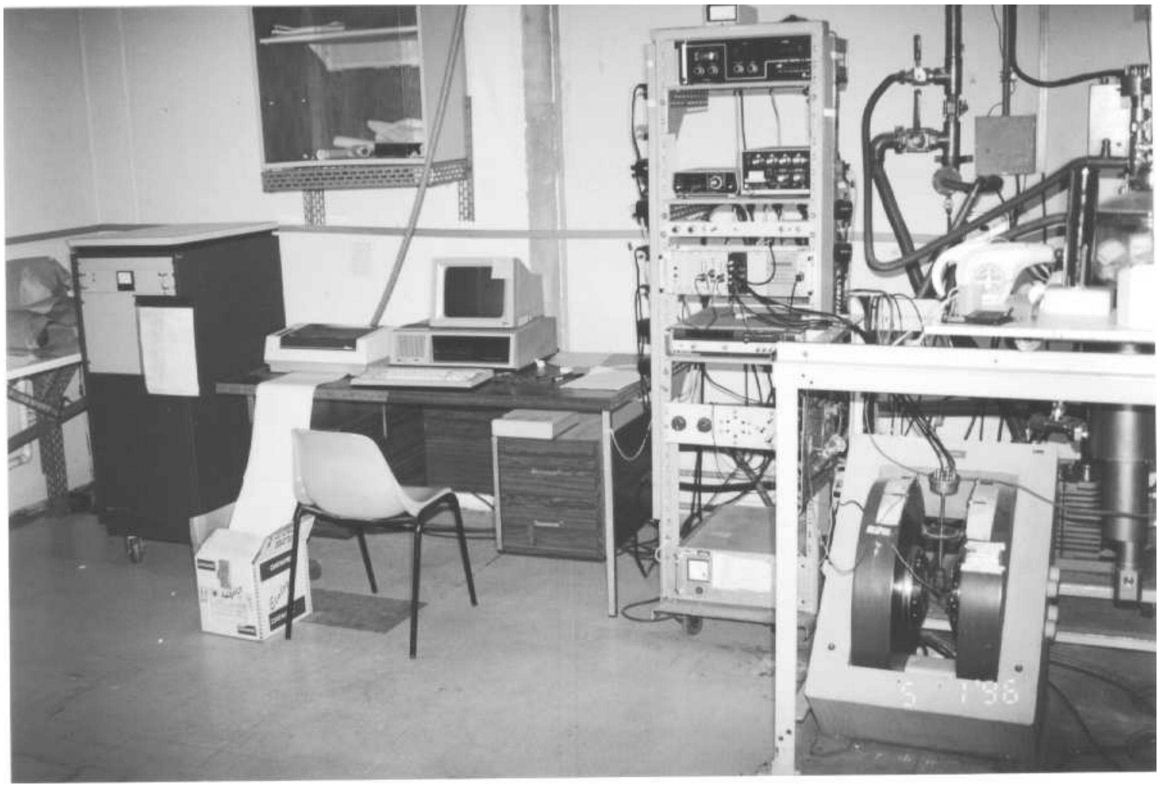


Figura 6. Foto mostrando uma visão geral do sistema de medida de efeito Hall: em primeiro plano estão o eletro-imã com o porta-amostra nele encaixado. Num segundo plano está o rack com a interface, a fonte de corrente para a amostra, o multímetro e o painel de comando do eletro-imã. Ao fundo estão o microcomputador com a impressora e a fonte de corrente do eletro-imã.

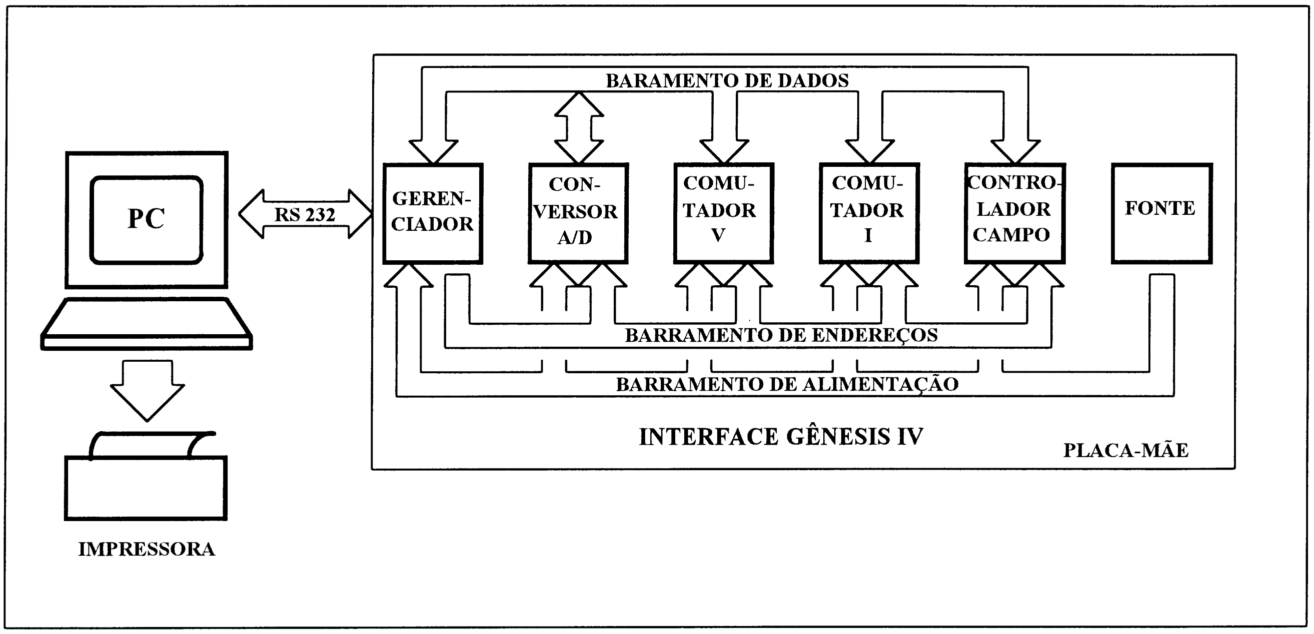


Figura 7. Diagrama de blocos da interface Gênesis IV, mostrando como seus módulos se inter-relacionam e a sua conexão com o microcomputador.

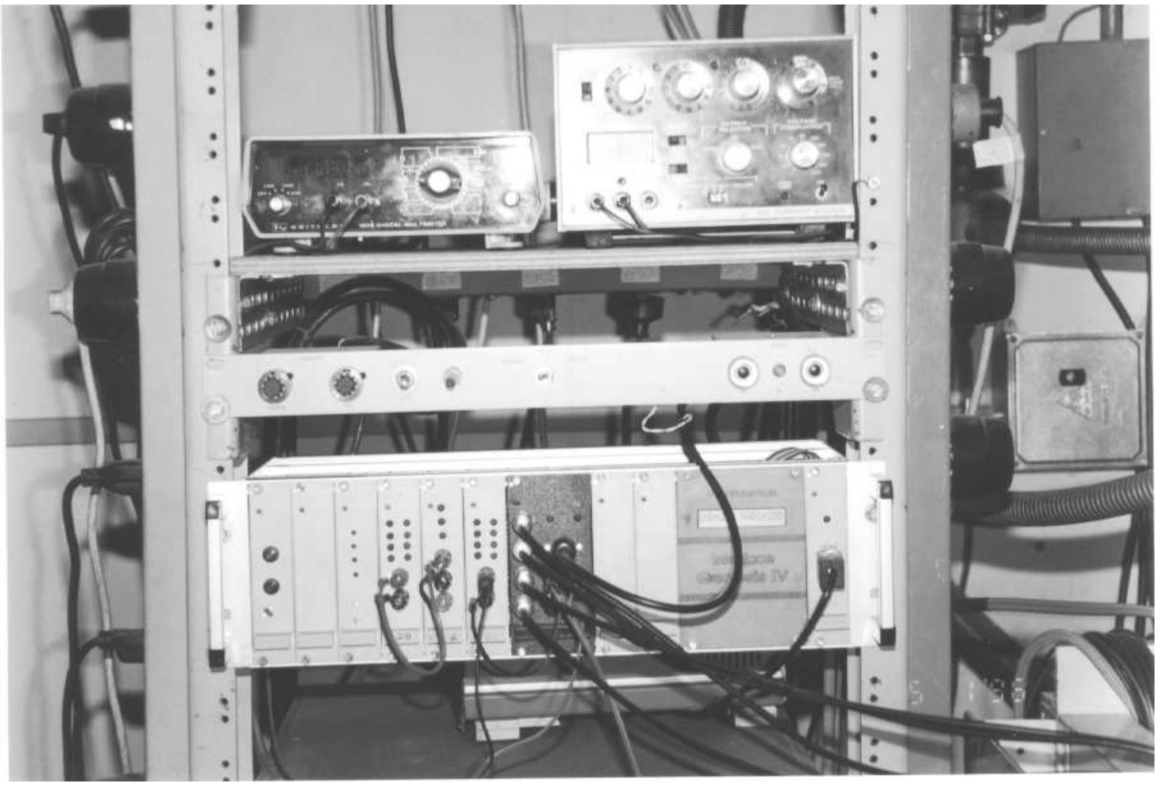


Figura 8. Foto em detalhe do rack de controle do sistema. De baixo para cima, pode-se ver a interface e suas conexões externas. Acima da interface está o painel de comando do eletro-imã e no topo do rack estão a fonte de corrente para a amostra e o multímetro utilizado para medir esta corrente.

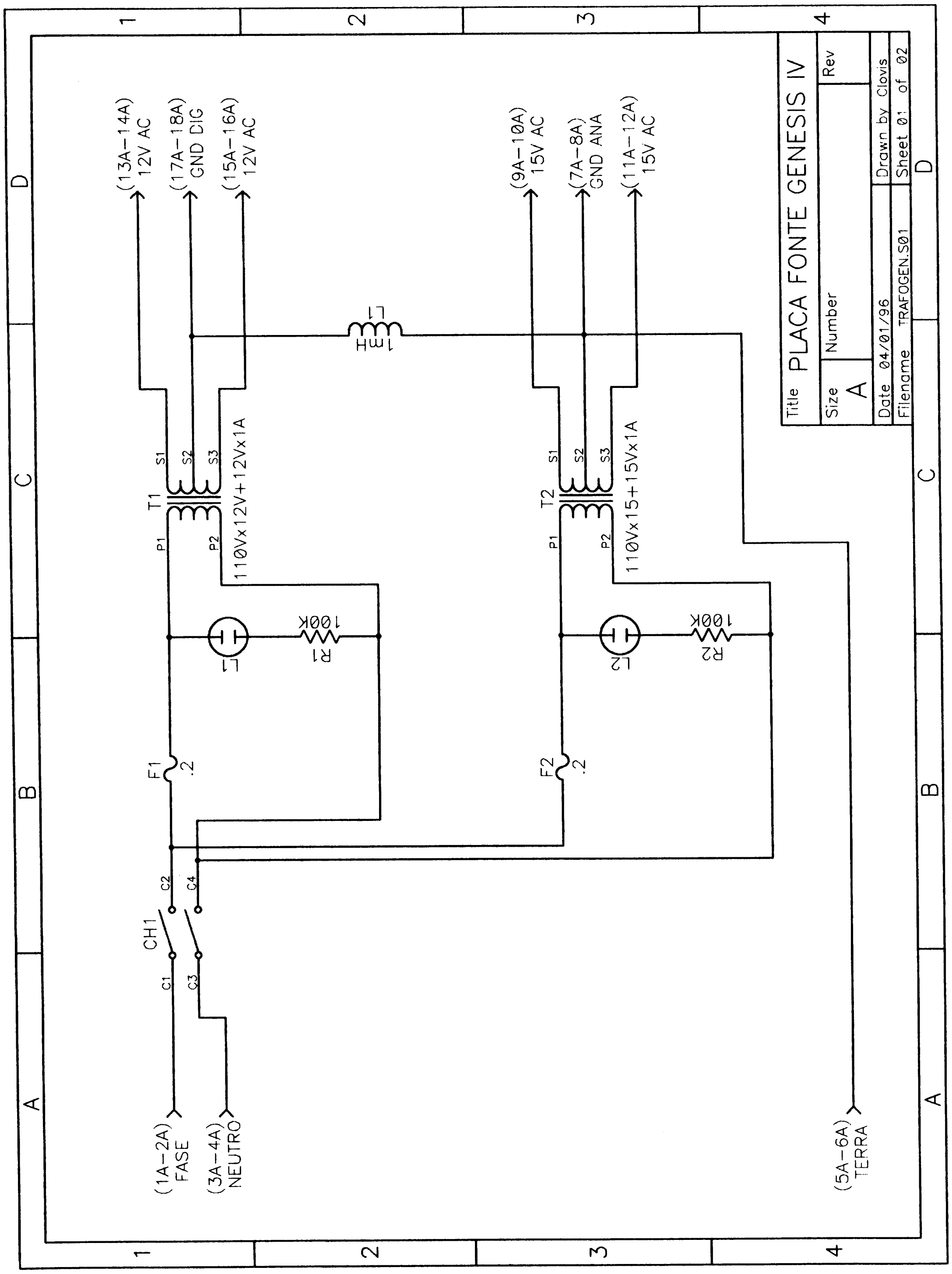


Figura 9a. Primeira parte do esquema elétrico da Fonte de Alimentação da interface Gênesis, constituida basicamente por transformadores de tensão.

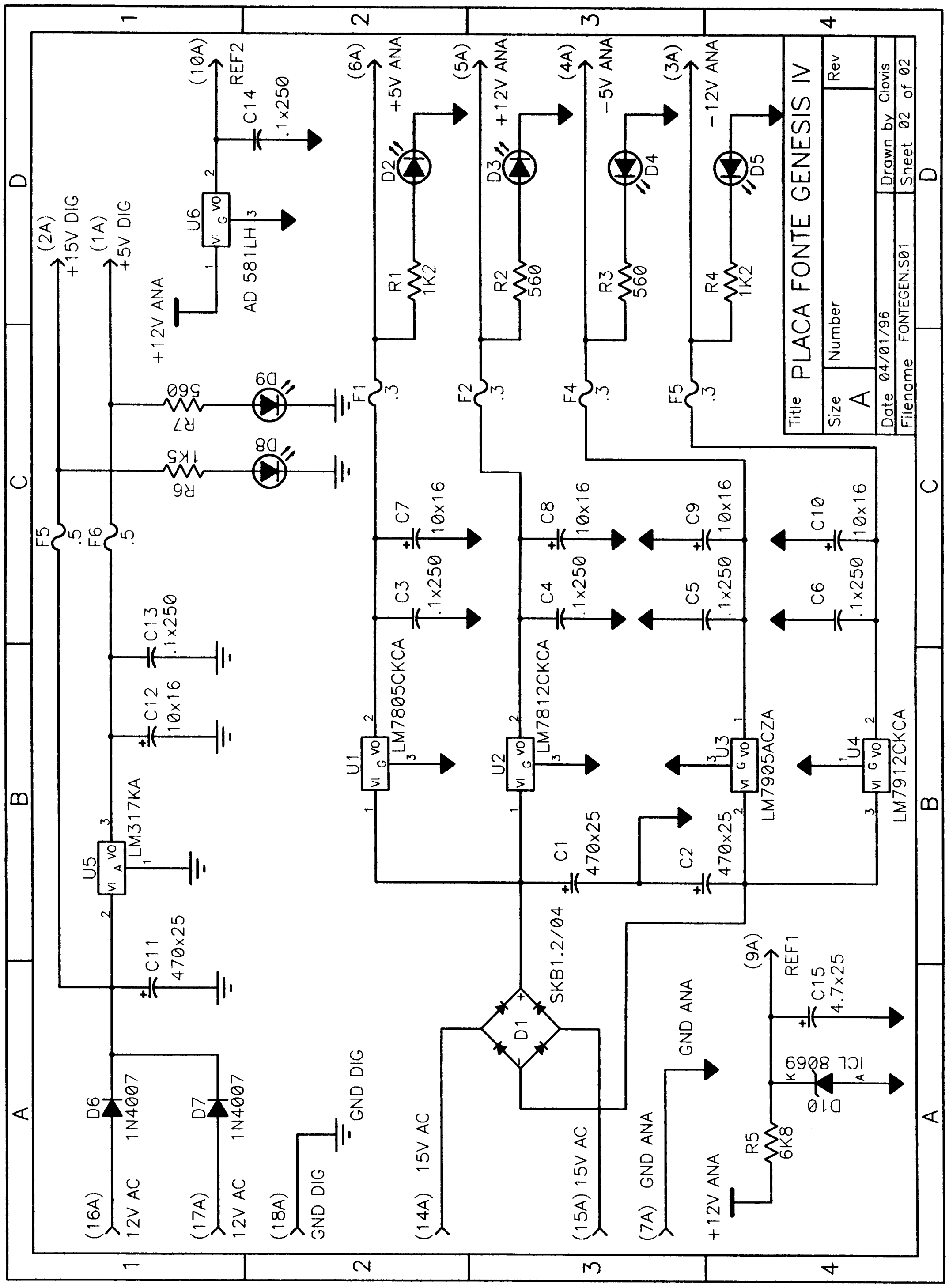


Figura 9b. Segunda parte do esquema elétrico da Fonte de Alimentação, evidenciando os controladores de tensão e fontes de referência.

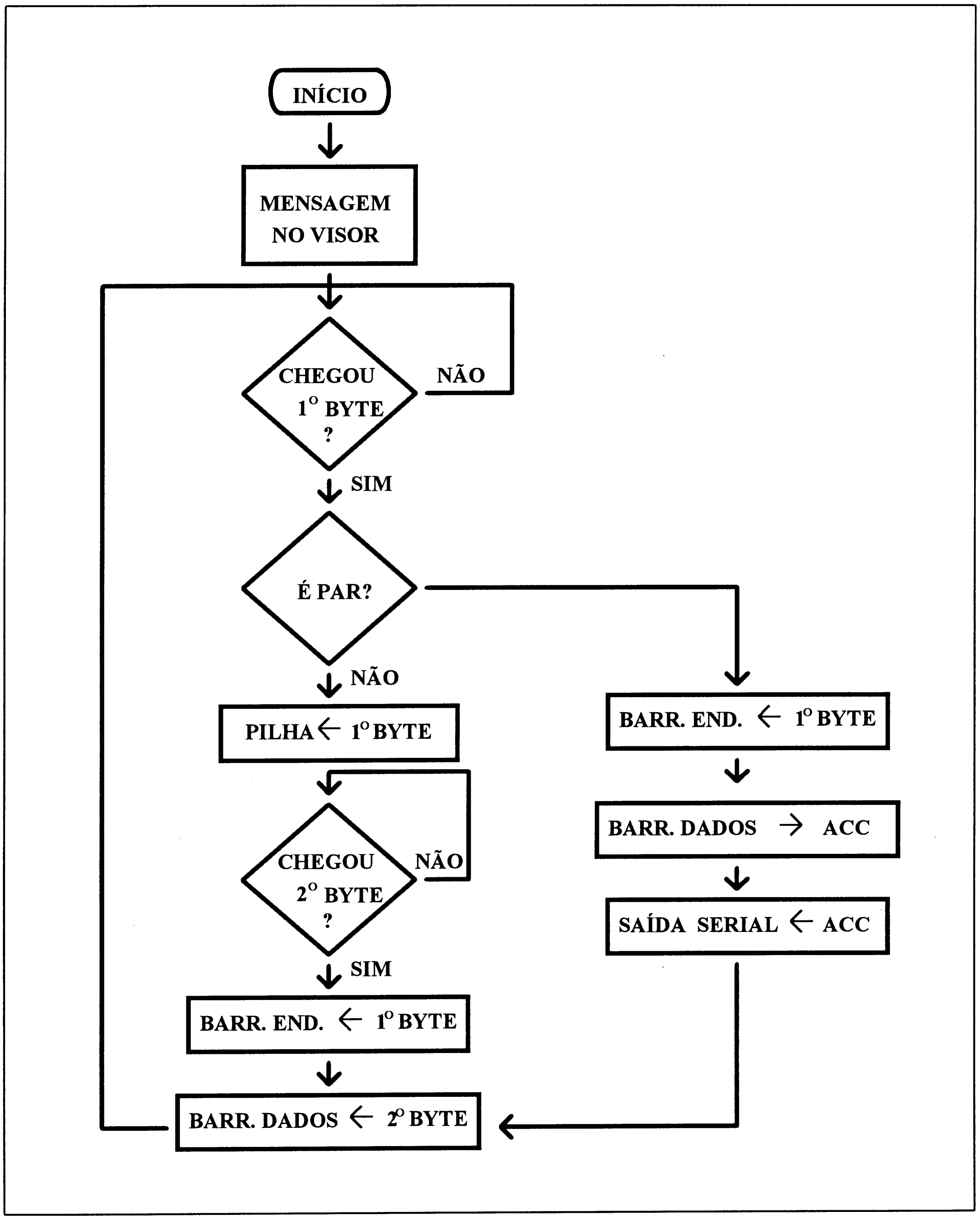


Figura 10. Fluxograma do programa que roda no microcontrolador do Gerenciador Gênesis IV.

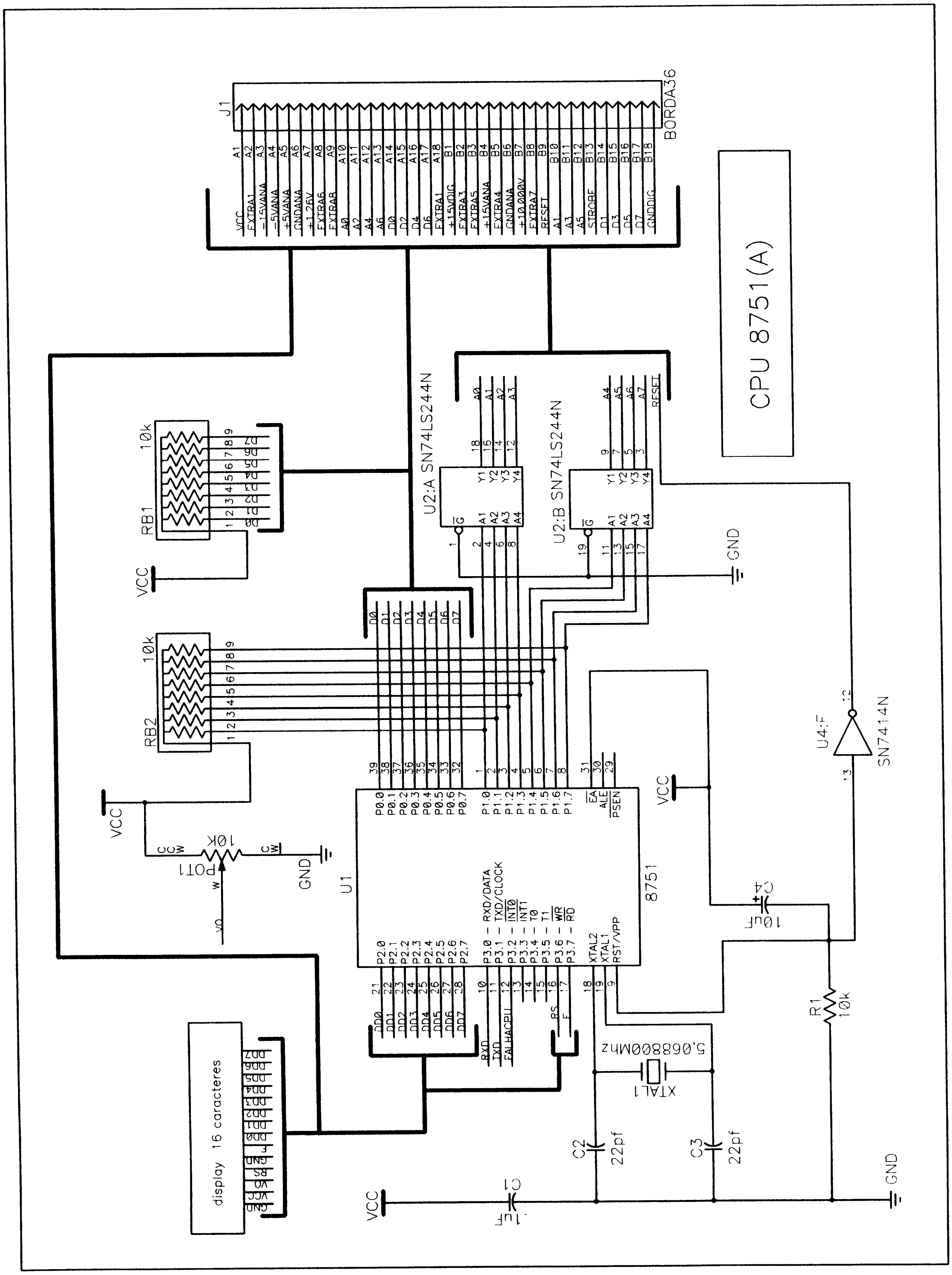


Figura 11. Esquema elétrico principal do Gerenciador Gênesis IV.

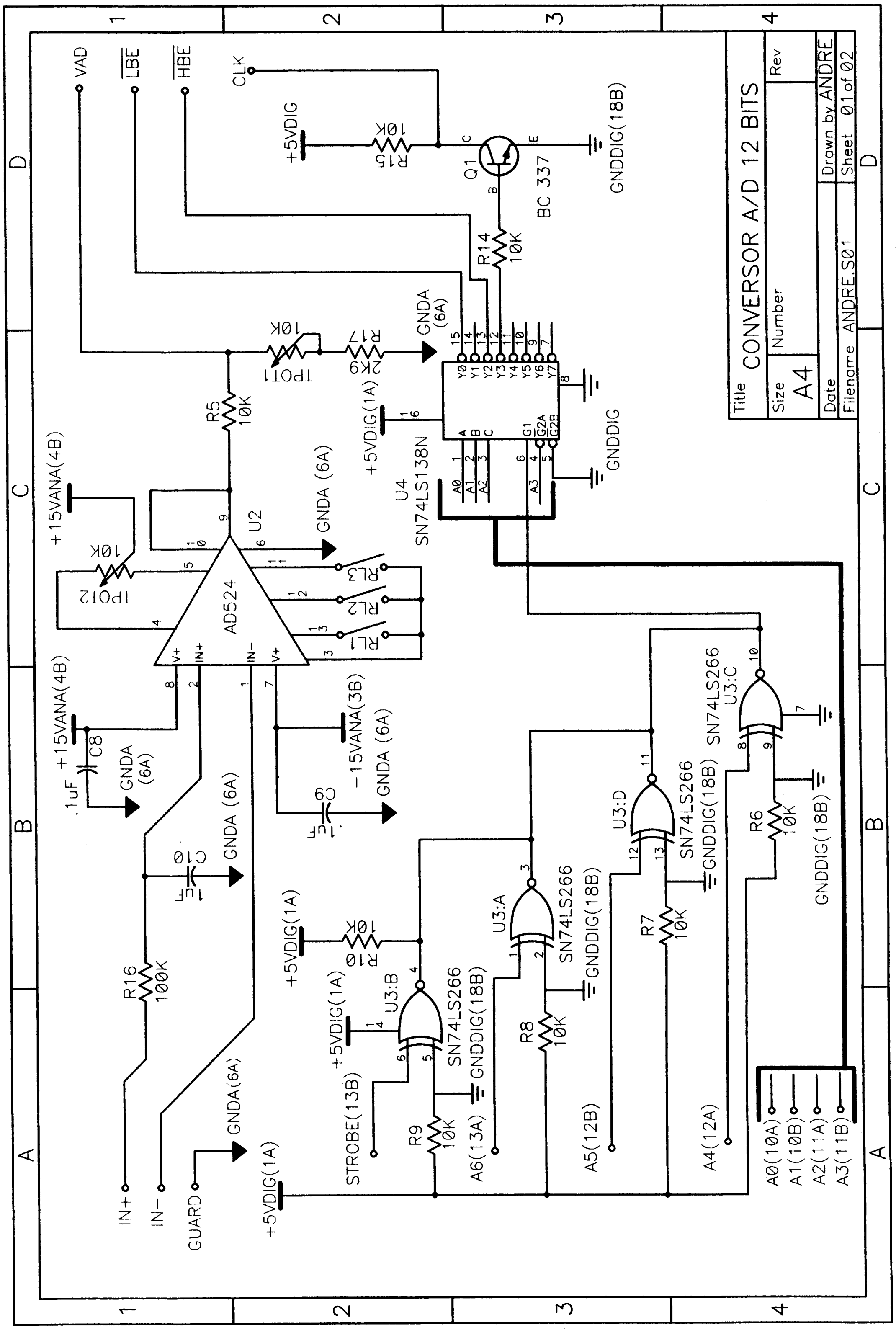


Figura 12a. Primeira parte do esquema elétrico do Conversor A/D. Nesta parte evidenciam-se o amplificador de entrada com ganho variável e a lógica de endereçamento da placa.

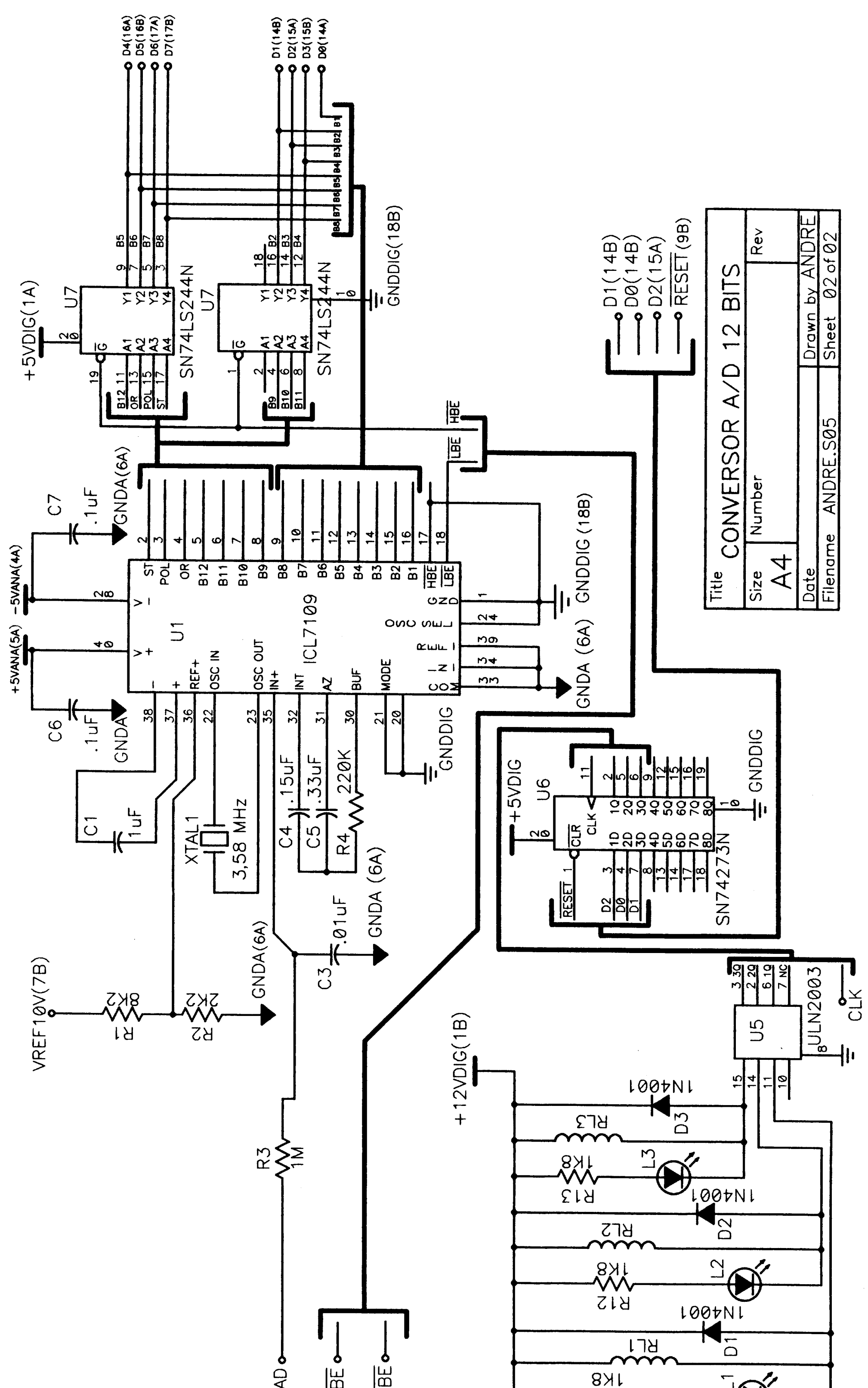


Figura 12b. Segunda parte do esquema elétrico do Conversor A/D, constituida basicamente do conversor A/D, *buffers* de saída de dados, *latch / driver* para os reles e pelos reles que controlam o ganho do amplif1cador de entrada.

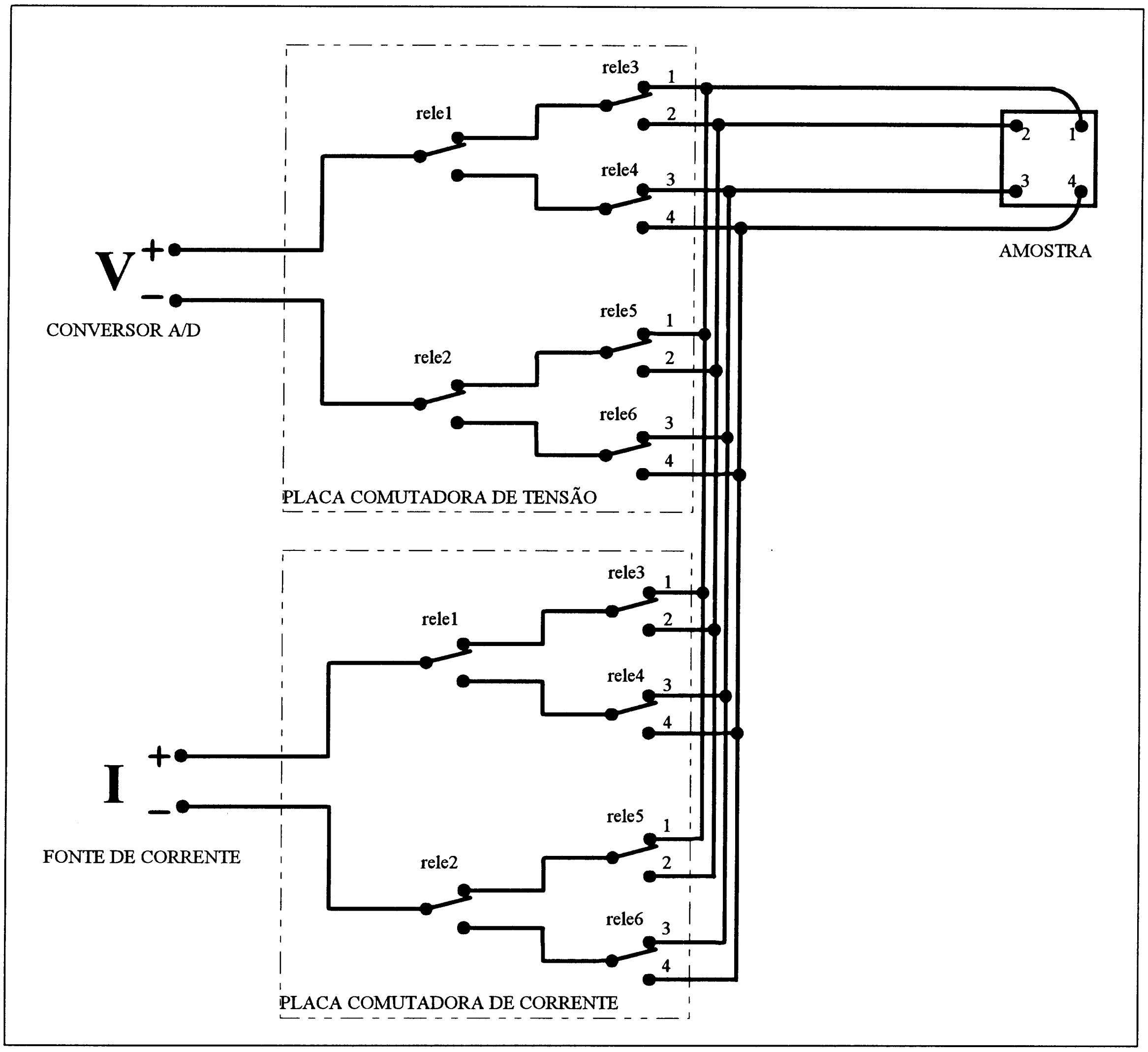


Figura 13. Diagrama esquemático da configuração na qual os reles das placas comutadoras foram montados para que os contatos da amostra possam ser acessados corretamente pela fonte de corrente e pelo conversor A/D.

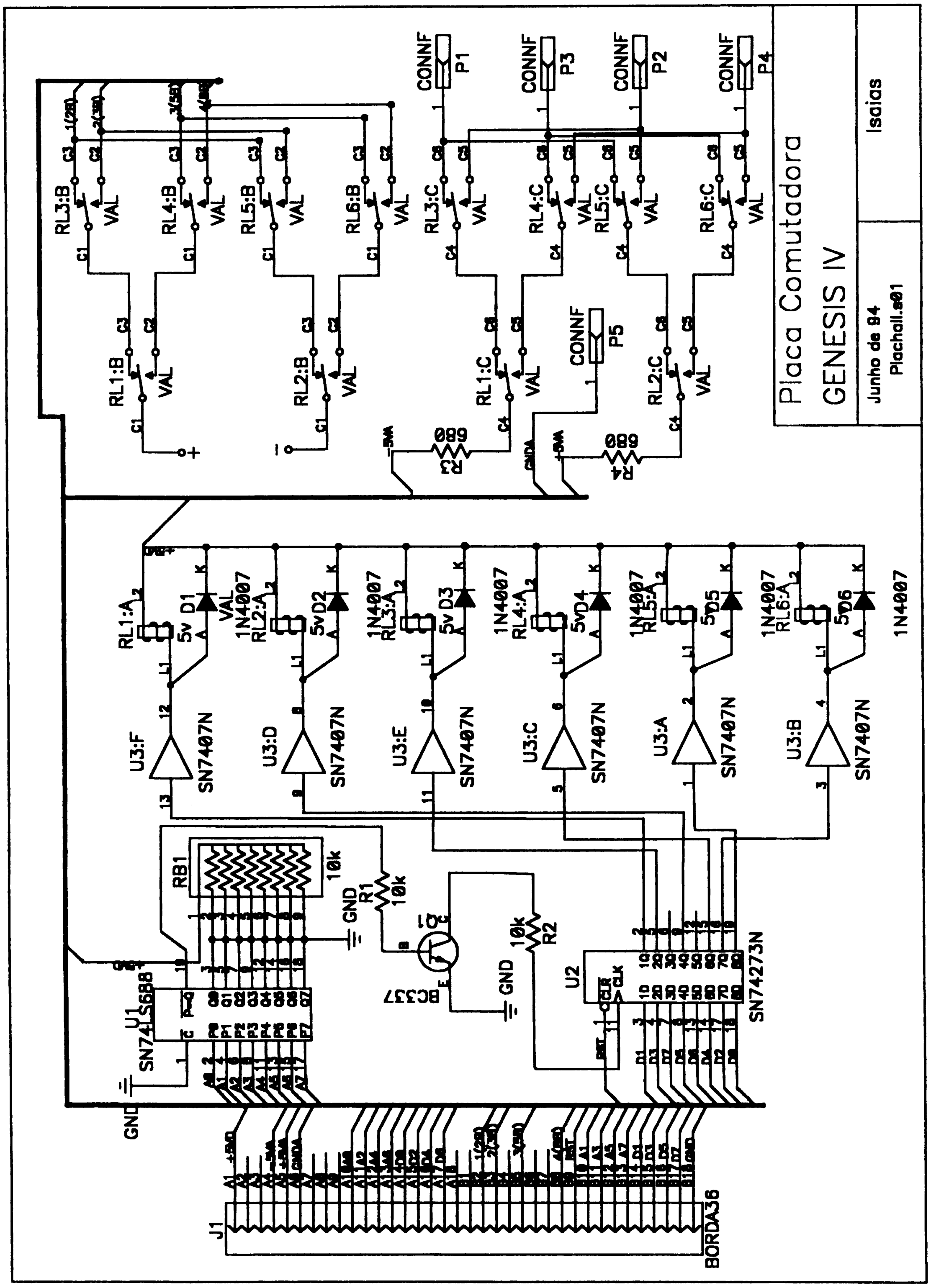


Figura 14. Esquema elétrico das placas comutadoras. O 74LS688 é responsável pela lógica de endereçamento, o 74LS273 é um *latch* para a palavra de dados que comanda os reles e o 7407 é um *driver* para as bobinas dos reles. Os pinos P1 à P5 estão ligados aos LEDs de indicação dos contatos da amostra acionados.