

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
ESCOLA POLITÉCNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE COMPUTAÇÃO

TRAÇADOR DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE TRANSISTORES DE JUNÇÃO  
BIPOLAR (BJT) E DE EFEITO DE CAMPO (FET)

Autor:

---

Daniel Teixeira Duarte

Orientador:

---

Prof. Joarez Bastos Monteiro, D.Sc.

Examinador:

---

Prof. Fernando Antônio Pinto Barúqui, D.Sc.

Examinador:

---

Prof. Ricardo Rhomberg Martins, D.Sc.

DEL  
Março de 2008

## Dedicatória

*Aos meus pais, José Ernesto e Maria Bernarda.*

## **Agradecimentos**

Aos professores do curso de Engenharia Eletrônica e de Computação da UFRJ, que se dedicaram para me passar todo o seu conhecimento.

Aos amigos que conquistei durante esses cinco anos de faculdade e que sempre pude contar nas horas de aperto. Esses que também participaram das horas mais alegres desse período, durante diversas festas, churrascos e viagens.

Aos amigos de longa data, que mesmo sem ter muito contato nesses cinco anos, continuam os mesmos de outrora.

À minha namorada Flavia, por ter que aturar minhas horas de estudo e estresse e sempre apoiar as minhas decisões.

À minha família: José Ernesto, Maria Bernarda e Felipe, por terem me acompanhado durante esses anos, sempre me dando apoio nas horas difíceis.

Ao pessoal do Projeto Minerva, por terem cedido gentilmente um espaço para que eu pudesse realizar os testes do equipamento na Faculdade com toda a infraestrutura necessária.

## Resumo

O projeto do “traçador de curvas” consiste em um equipamento para traçar alguns gráficos característicos dos transistores, assim como medir alguns de seus parâmetros. Esse equipamento foi desenvolvido para suportar tanto transistores de junção bipolar, BJT, quanto transistores de efeito de campo, FET (MOSFET e JFET).

O equipamento consiste de uma interface, onde será encaixado o transistor a ser testado, conectada a um computador onde será instalado um *software* dedicado. A comunicação entre esses dois elementos é feita através da porta serial do computador.

Para os transistores bipolares, as curvas a serem traçadas serão:  $I_C \times V_{CE}$  e  $h_{FE} \times I_C$ , e os parâmetros a serem calculados serão:  $h_{FE}$ ,  $h_{fe}$ ,  $h_{ie}$ ,  $h_{oe}$ ,  $g_m$  e  $r_o$ .

Para os transistores de efeito de campo, a curva a ser traçada será:  $I_D \times V_{DS}$  e os parâmetros a serem calculados serão:  $g_m$  e  $r_o$ .

Essas informações são úteis para o projetista na investigação de problemas em circuitos envolvendo transistores e também ajudam na compreensão destes dispositivos por alunos iniciantes.

## **Palavras-Chave**

Transistor, Curvas Características, Parâmetros, BJT, FET

# Índice

|   |    |
|---|----|
| 1. Introdução .....                                 | 1  |
| 1.1. Motivação .....                                | 1  |
| 1.2. Objetivo .....                                 | 1  |
| 1.3. Estrutura do Documento .....                   | 2  |
| 2. Desenvolvimento .....                            | 3  |
| 2.1. Introdução Teórica.....                        | 3  |
| 2.2. Processos para as Medidas dos Parâmetros ..... | 17 |
| 2.3. Circuitos .....                                | 20 |
| 2.3.1. Fonte de Corrente $I_B$ .....                | 20 |
| 2.3.2. Fonte de Tensão $V_{bb}$ .....               | 22 |
| 2.3.3. Fonte de Tensão $V_{cc}$ .....               | 25 |
| 2.3.4. Fonte de Tensão $V_G$ .....                  | 27 |
| 2.3.5. Medidor de Corrente $I_E$ .....              | 28 |
| 2.3.6. Fonte de Alimentação.....                    | 30 |
| 2.4. Microcontrolador .....                         | 31 |
| 2.5. Software.....                                  | 36 |
| 2.6. Softwares Utilizados.....                      | 48 |
| 3. Construção do Equipamento.....                   | 51 |
| 4. Conclusão .....                                  | 60 |
| 5. Bibliografia.....                                | 62 |
| 6. Referências Extras .....                         | 63 |
| Anexo I - Circuito Completo .....                   | 64 |
| Anexo II – Foto da <i>Protoboard</i> .....          | 66 |

## Índice de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.1 - Tipos e símbolos do BJT .....   | 4  |
| Figura 2.2 - Variação do $\beta$ com $I_C$ e temperatura .....                             | 5  |
| Figura 2.3 - Curva Característica do BJT .....   | 6  |
| Figura 2.4 - Curvas Características do Transistor .....                                    | 6  |
| Figura 2.5 - Quadripolo .....  | 7  |
| Figura 2.6 - Modelo do Transistor Utilizando Parâmetros Híbridos .....                     | 9  |
| Figura 2.7 - BJT como Amplificador (Emissor-Comum) .....                                   | 9  |
| Figura 2.8 - Tensão de Early .....   | 12 |
| Figura 2.9 - O Modelo $\pi$ -Híbrido .....   | 13 |
| Figura 2.10 - Tipos e Símbolos do MOSFET .....   | 14 |
| Figura 2.11 - Curva Característica ( $i_D - v_{DS}$ ) .....                                | 15 |
| Figura 2.12 - Modelos de pequenos sinais para o MOSFET .....                               | 16 |
| Figura 2.13 - Tipos e Símbolos do JFET .....   | 16 |
| Figura 2.14 - Circuitos Propostos BJT e FET .....  | 17 |
| Figura 2.15 - $I_B$ (ou $V_{GS}$ ) e $V_{CE}$ (ou $V_{DS}$ ) .....                         | 19 |
| Figura 2.16 - Diagrama de Blocos .....   | 20 |
| Figura 2.17 - Fonte de Corrente $I_B$ .....  | 21 |
| Figura 2.18 - Fonte de Corrente $I_B$ com <i>Push-Pull</i> .....                           | 22 |
| Figura 2.19 - Fonte de Tensão $V_{bb}$ .....   | 23 |
| Figura 2.20 - Fonte de Tensão $V_{cc}$ .....   | 25 |
| Figura 2.21 - Gerador de $V_G$ .....   | 27 |
| Figura 2.22 - Primeira parte do circuito medidor de $V_{RE}$ .....                         | 28 |
| Figura 2.23 - Amplificador de Instrumentação para medida da queda de tensão em $R_E$ ..... | 29 |
| Figura 2.24 - Fonte de Alimentação .....   | 31 |
| Figura 2.25 - Diagrama de Pinos do PIC16F877/ PIC16F877A .....                             | 32 |
| Figura 2.26 - PIC e a ligação com a Porta Serial .....                                     | 33 |
| Figura 2.27 - Conversão Analógica-Digital .....  | 35 |
| Figura 2.28 - Potenciômetro Digital com Microcontrolador .....                             | 36 |
| Figura 2.29 - Tela Inicial do <i>Software</i> .....  | 37 |
| Figura 2.30 - Escolha da Porta Serial .....  | 38 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.31 - Gráfico $I_C$ x $V_{CE}$ .....   | 42 |
| Figura 2.32 - Gráfico $I_D$ x $V_{DS}$ .....   | 42 |
| Figura 2.33 - Gráfico $I_C$ x $V_{CE}$ com melhor resolução na região de saturação ..... | 43 |
| Figura 2.34 - Gráfico $h_{FE}$ x $I_C$ .....   | 44 |
| Figura 2.35 - Cálculo de $h_{oe}$ e $r_o$ .....  | 45 |
| Figura 2.36 - Cálculo de $h_{fe}$ e $g_m$ .....  | 47 |
| Figura 2.37 - Cálculo de $h_{ie}$ ( $r_\pi$ ) .....                                      | 48 |
| Figura 3.1 - Animação 3D da Placa de Circuito Impresso .....                             | 54 |
| Figura 3.2 - Trilhas da Parte Superior da Placa .....                                    | 55 |
| Figura 3.3 - Trilhas da Parte Inferior da Placa .....                                    | 55 |
| Figura 3.4 - Diagrama de Furos da Placa .....  | 56 |
| Figura 3.5 - Posição do Componentes da Placa ( <i>Silk Screen</i> ) .....                | 56 |

## Índice de Tabelas

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 - Descrição dos Parâmetros $h$ .....                                 | 8  |
| Tabela 2 - Configurações do ADC .....   | 34 |
| Tabela 3 - String de Comando Enviada.....                                     | 39 |
| Tabela 4 - Tipo de Transistor .....   | 39 |
| Tabela 5 - Faixa de Corrente $I_B$ ou de Tensão $V_{GS}$ .....                | 40 |
| Tabela 6 - Tensão Máxima de $V_{CE}$ ou $V_{DS}$ .....                        | 40 |
| Tabela 7 - Tensão $V_{CE}$ ou $V_{DS}$ para Medida de $h_{fe}$ ou $g_m$ ..... | 40 |
| Tabela 8 - String de Retorno.....   | 41 |
| Tabela 9 - Medidas do BC548 (1) .....   | 52 |
| Tabela 10 - Medidas do BC548 (2) .....  | 52 |
| Tabela 11 - Medidas do TIP31 (1) .....  | 53 |
| Tabela 12 - Medidas do TIP31 (2) .....  | 53 |
| Tabela 13 - Medida do MPF102 (1) .....  | 53 |
| Tabela 14 - Medidas do MPF102 (2) .....                                       | 53 |
| Tabela 15 - Lista de Componentes .....  | 59 |

## **Glossário, Abreviaturas, Siglas, Símbolos e Sinais**

**ADC** – *Analog to Digital Converter* (Conversor Analógico - Digital).

**Assembly** – Linguagem de programação muito utilizada para microcontroladores.

**BJT** – *Bipolar Junction Transistor* (Transistor de Junção Bipolar).

**CI** – Circuito Integrado.

**DAC** – *Digital to Analog Converter* (Conversor Digital - Analógico).

**Driver** – Programa desenvolvido para traduzir a linguagem de uma aplicação para outra linguagem.

**EEPROM** – *Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory* (Memória somente de leitura eletricamente programável e apagável).

**FET** – *Field Effect Transistor* (Transistor de Efeito de Campo).

**$g_m$**  – Transcondutância do BJT/FET.

**$h_{FE}$**  – Ganho de Corrente DC do BJT (Modelo Híbrido).

**$h_{fe}$**  – Ganho de Corrente AC do BJT (Modelo Híbrido).

**$h_{ie}$**  – Resistência Base-Emissor do BJT (Modelo Híbrido).

**$h_{oe}$**  – Condutância Coletor-Emissor do BJT (Modelo Híbrido).

**$i_b$**  – Corrente AC de Base do BJT.

**$I_B$**  – Corrente DC de Base do BJT.

**$i_B$**  – Soma das Correntes DC e AC de Base do BJT.

**$i_c$**  – Corrente AC de Coletor do BJT.

**$I_C$**  – Corrente DC de Coletor do BJT.

**$i_C$**  – Soma das Correntes DC e AC de Coletor do BJT.

**$i_d$**  – Corrente AC de Dreno do FET.

**$I_D$**  – Corrente DC de Dreno do FET.

**$i_D$**  – Soma das Correntes DC e AC de Dreno do FET.

**$i_e$**  – Corrente AC de Emissor do BJT.

**$I_E$**  – Corrente DC de Emissor do BJT.

**$i_E$**  – Soma das Correntes DC e AC de Emissor do BJT.

**I<sup>2</sup>C** - *Inter-Integrated Circuit*. É um barramento serial bidirecional para computadores.

**Layout** - Disposição dos elementos de um projeto gráfico.

**MSSP** - *Master Synchronous Serial Port*. É uma interface serial para troca de dados entre periféricos.

**MIPS** – *Millions of Instructions Per Second* (Milhões de Instruções Por Segundo).

**MOSFET** – *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*.

**Mux** – *Multiplex* - Dispositivo cuja função é multiplexar sinais permitindo a sua transmissão em um mesmo meio de transmissão

**Orcad Pspice** - Software de simulação de circuitos eletrônicos baseado em SPICE.

**PC** – *Personal Computer* – Computador pessoal.

**PIC** – *Peripheral Interface Controller* (Interface Controladora de Periféricos).  
Microcontroladores Fabricados pela Microchip Technology.

**Proteus** – Software de simulação de circuitos eletrônicos baseado em SPICE.

**Protoboard** - Placa com milhares de furos e conexões condutoras para montagem de circuitos elétricos experimentais. Também conhecido como “Matriz de Contatos”.

**PWM** – *Pulse Width Modulation* – Modulação por Largura de Pulso.

**RAM** – *Random Access Memory* (Memória de acesso aleatório).

**Ripple** - Componente alternada que incide sobre uma fonte de corrente contínua.

**RISC** - *Reduced Instruction Set Computer* (Computador com um Conjunto Reduzido de Instruções).

**RS232** – É um padrão para troca serial de dados binários.

**SPI** - *Serial Peripheral Interface*. É um protocolo que permite a comunicação do microcontrolador com diversos outros componentes.

**TTL** – *Transistor-Transistor Logic*.

**USART** – *Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter* (Transmissor/Receptor Universal Síncrono e Assíncrono).

**USB** – *Universal Serial Bus*. É um tipo de conexão “*Plug and Play*” que permite a conexão de periféricos sem a necessidade de desligar o computador.

**VB** – Visual Basic.

**V<sub>T</sub>** – Tensão Térmica – Aproximadamente 26mV @27°C.

**Watchdog timer** - Contador independente do *Clock* do Microcontrolador.

# 1. Introdução

## 1.1. *Motivação*

Ao final do curso de Engenharia Eletrônica e de Computação surgiu uma oportunidade e um desafio de desenvolver algo que realmente utilizasse todo o conhecimento adquirido ao longo desses anos. O projeto que foi desenvolvido utiliza o conhecimento tanto na área de eletrônica aplicada como na área de computação, já que o equipamento é constituído por um *Hardware* e um *Software* que atuam em conjunto e ainda é muito útil, pois servirá como mais um aparelho para o Laboratório de Ensino de Graduação (LEG).

## 1.2. *Objetivo*

O objetivo desse projeto é conseguir levantar algumas características dos transistores que por ventura venham a ser utilizados em projetos ou mesmo práticas de laboratório do Departamento de Engenharia Eletrônica e de Computação da UFRJ.

O equipamento deverá suportar uma grande gama de transistores, incluindo os transistores de junção bipolar (*BJT – Bipolar Junction Transistor*) e transistores de efeito de campo (*FET – Field Effect Transistor*).

O transistor a ser testado deverá ser encaixado ao equipamento que por sua vez será conectado a um computador via porta serial. Pelo computador, o usuário deverá selecionar qual tipo de transistor a ser utilizado, BJT (NPN-PNP), MOSFET (Canal N-Canal P) ou JFET (Canal N-Canal P). Deverá selecionar também, no caso de um BJT, a faixa de correntes que deverá ser aplicada à base e a tensão máxima de  $V_{CE}$  e, no caso de um MOSFET ou JFET, a faixa de tensões de  $V_{GS}$  e tensão máxima de  $V_{DS}$ .

A partir das escolhas do usuário, o programa envia ao circuito as configurações necessárias para realizar as medidas. Após realizar todas as medidas necessárias, o circuito envia para o programa todos os dados adquiridos, para que este possa calcular os parâmetros necessários assim como traçar as curvas características.

### **1.3. Estrutura do Documento**

Este documento está organizado em seis capítulos principais. O primeiro capítulo, introdução, apresenta a motivação para o desenvolvimento desse projeto, o objetivo a que esse projeto se propõe atingir e como esse documento está estruturado.

O segundo capítulo descreve o desenvolvimento do projeto. Nele haverá uma explicação teórica das características importantes dos dispositivos para situar o projeto. Essa explicação abrange a polarização e modelos de pequenos sinais.

Também no segundo capítulo serão explicados os processos de medidas dos parâmetros descritos na parte teórica. Os esquemas dos circuitos propostos para o BJT e para o FET serão apresentados assim como os métodos utilizados para realizar tais medidas.

Ainda no segundo capítulo será descrito todo o *hardware* do equipamento, como foi projetado e como funciona cada parte do circuito. Há uma explicação sobre o microcontrolador utilizado, sua arquitetura, suas características e motivo pelo qual foi escolhido para esse projeto.

A penúltima parte desse capítulo descreve o *software* desenvolvido, quais as escolhas que o usuário deve fazer, como ocorre a comunicação com o equipamento e quais gráficos e parâmetros serão gerados ou calculados.

Por último, haverá uma descrição de todos os softwares utilizados no projeto, incluindo os softwares de simulação, softwares de apoio ao desenvolvimento e o próprio software de desenvolvimento do programa principal.

O terceiro capítulo descreve como foi construído o equipamento. Nele é discutido como foi montado o protótipo, as dificuldades encontradas para a montagem e problemas como ruído e mau contato, os testes realizados, além do projeto da placa de circuito impresso, lista de materiais utilizados e a validação dos resultados obtidos com o protótipo.

No quarto capítulo, a conclusão, serão discutidos os resultados do projeto e quais mudanças podem ser realizadas futuramente para melhorar o aparelho, ou torná-lo mais moderno.

O quinto e sexto capítulos são a bibliografia e referências, que foram utilizadas para o desenvolvimento, e dúvidas do projeto.

## 2. Desenvolvimento

### 2.1. *Introdução Teórica*

#### *Histórico*

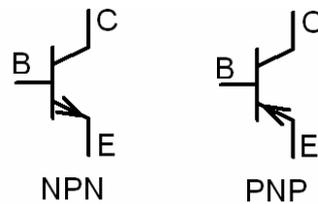
O transistor foi inventado nos Laboratórios da *Bell Telephone* em dezembro de 1947 por Bardeen e Brattain [1], e inicialmente demonstrado em 23 de Dezembro de 1947 por John Bardeen, Walter Houser Brattain e William Bradford Shockley, que receberam o prêmio Nobel da Física em 1956. Eles pretendiam fabricar um transistor de efeito de campo (FET) idealizado por Julius Edgar Lilienfeld antes de 1925, mas acabaram por descobrir uma amplificação da corrente no ponto de contacto do transistor, isso evoluiu posteriormente para converter-se no transistor de junção bipolar (BJT). O objetivo do projeto era criar um dispositivo compacto e barato para substituir as válvulas termiônicas usadas nos sistemas telefônicos da época.

O transistor e outros componentes semicondutores eletrônicos similares constituem a base para o projeto de amplificadores e chaves estáticas, empregados em Eletrônica Digital e Microprocessadores, bem como em Conversores de Eletrônica de Potência. O comportamento do transistor pode ser explicado por meio de fontes controladas (corrente/corrente ou corrente/tensão – transcondutância). Os fenômenos relacionados com tais componentes permitem ainda fazer com que se comportem como diodos, capacitores, resistores e diversos tipos de fontes controladas, o que é a base para a implementação de circuitos integrados (CI's ou chips).

#### *O BJT*

O nome bipolar para os transistores BJT, vem do fato do fluxo principal de elétrons atravessar dois tipos de semicondutor distintos. Os transistores BJT são dispositivos de três terminais: Base (B), Coletor (C) e Emissor (E). É um dispositivo controlado por corrente, em que uma pequena corrente de base (na ordem de  $\mu\text{A}$  ou  $\text{mA}$  para transistores de potência) consegue controlar uma corrente de coletor relativamente elevada que o atravessa (na ordem dos  $\text{mA}$ , chegando até as dezenas de Ampères). A corrente principal vai do coletor para o emissor (NPN)

ou do emissor para o coletor (PNP). A corrente de controle tem o sentido da base para o emissor (NPN) ou do emissor para a base (PNP). Na Figura 2.1 são apresentados os símbolos para o BJT.



**Figura 2.1** - Tipos e símbolos do BJT

A diferença funcional entre o transistor do tipo NPN ou PNP é a polarização dos seus terminais quando em operação.

O BJT tem três correntes distintas, a corrente de base  $I_B$ , a corrente de coletor  $I_C$  e a corrente de emissor  $I_E$ , sendo a última a mais intensa e igual a soma das correntes de base  $I_B$  e de coletor  $I_C$ . A corrente de base é muito pequena comparativamente com as outras.

Aplicando a lei de Kirchhoff dos nós ao transistor, tendo em conta que a corrente de coletor e a corrente de base juntam-se no emissor, deriva a formula:

$$I_E = I_C + I_B \quad (2.1)$$

Como a corrente de base é muito pequena:

$$I_E \approx I_C \quad (2.2)$$

Temos que,

$$I_C \gg I_B \quad (2.3)$$

O parâmetro  $\beta$  (Beta) de um transistor, também chamando de  $h_{FE}$ , define-se como sendo a razão entre a correntes  $I_C$  e  $I_B$  e representa o ganho em corrente DC,

$$\beta_{DC} = \frac{I_C}{I_B} \equiv h_{FE} \quad (2.4)$$

O parâmetro  $\beta$  varia de transistor para transistor devido a fatores físicos de construção como o tamanho da região de base e o próprio processo de fabricação, e no mesmo transistor,

para diferentes temperaturas e polarizações. As especificações do fabricante costumam indicar um valor mínimo, típico e máximo para  $\beta$ . Uma curva típica da variação de  $\beta$  com  $I_C$  e temperatura é apresentada na Figura 2.2.

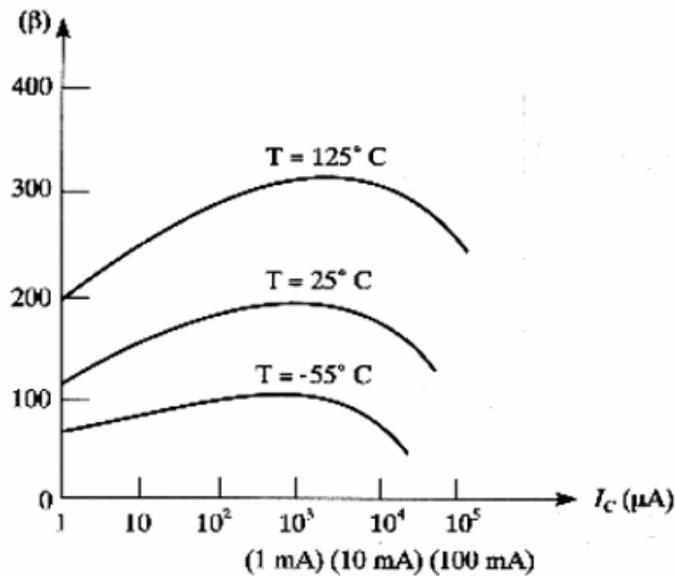
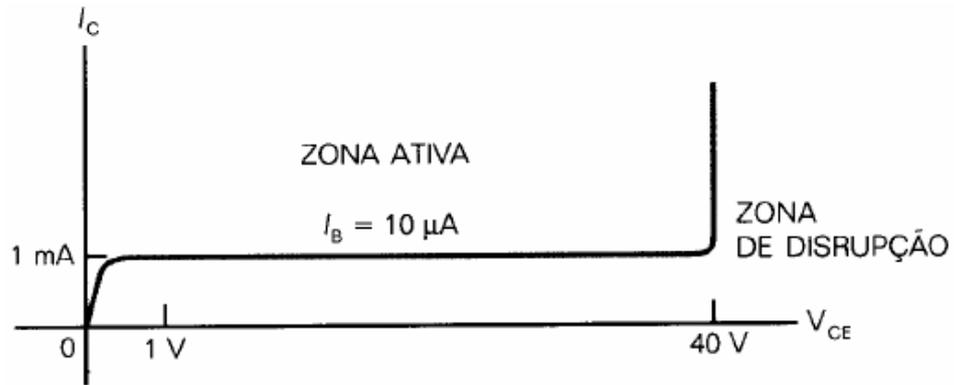


Figura 2.2 - Variação do  $\beta$  com  $I_C$  e temperatura

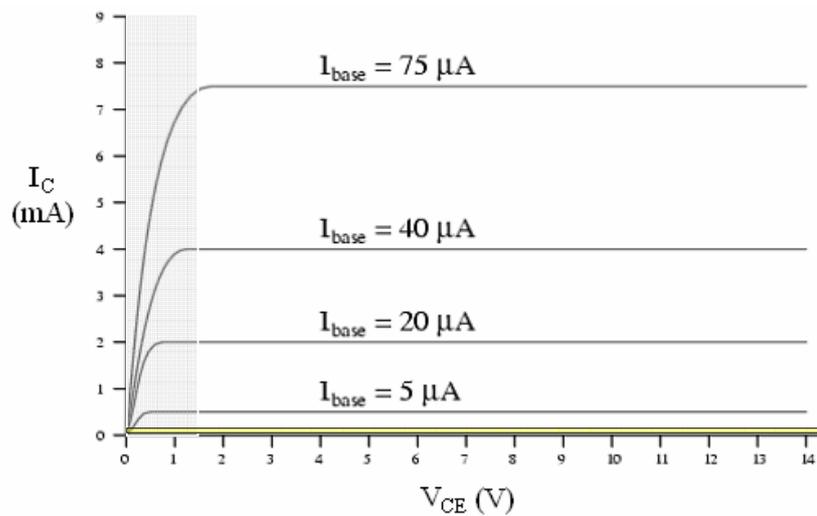
O parâmetro  $\beta$  tem maior utilidade quando se considera o uso do transistor em amplificadores de sinal, pois demonstra o comportamento do transistor para alterações na tensão e corrente aplicadas.

A Figura 2.3 representa uma curva típica do transistor BJT para uma corrente de base constante: a corrente de coletor  $I_C$  é nula para  $V_{CE}$  igual a zero, se  $V_{CE}$  aumentar a partir de zero, a inclinação da reta de subida da corrente de coletor é grande até que atinja algumas centenas de milivolts, logo após  $I_C$  torna-se praticamente constante. Quando a tensão  $V_{CE}$  atinge um valor muito alto (40V nesse caso da figura), acontece a ruptura do diodo de coletor. Nesta situação o transistor perde o comportamento normal e pode danificar-se.



**Figura 2.3** - Curva Característica do BJT

A representação gráfica de curvas de coletor para diferentes valores de  $I_C$  é chamada de **Curvas Características do Transistor** (Figura 2.4). Esse tipo de representação é muito importante para estudar o comportamento do transistor e determinar a sua região de operação. A região ativa é a zona em que a junção de emissor está polarizada diretamente e a junção de coletor inversamente. Nesta zona de operação a corrente de coletor é proporcional à corrente de base. Esta zona é a região de operação linear do transistor, onde a amplificação de sinais é possível.



**Figura 2.4** - Curvas Características do Transistor

A região de saturação corresponde à zona em que a tensão  $V_{CE}$  varia entre zero e alguns décimos de volt (região mais a esquerda da Figura 2.4). Nesta zona a corrente de coletor  $I_C$  é

proporcional à tensão  $V_{CE}$ . A região de corte corresponde à zona onde a corrente de base  $I_B$  é igual à zero, mas ainda existe uma pequena corrente de coletor  $I_C$  (região logo acima do eixo  $x$ ), a esta corrente dá-se o nome de corrente de corte de coletor.

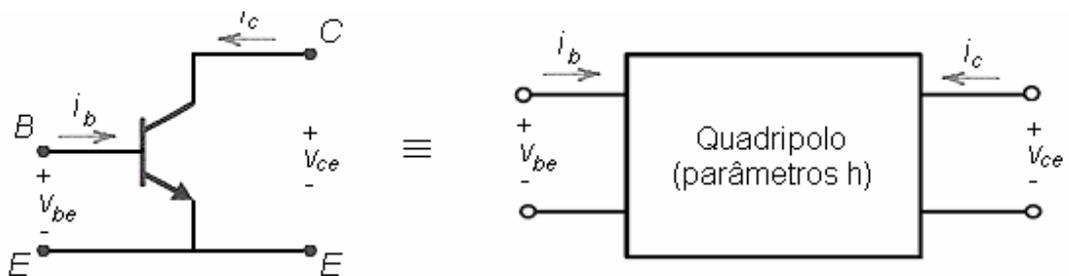
Resumindo, são quatro as zonas de operação do transistor: Ativa, Corte, Saturação e Disrupção. O funcionamento na zona ativa é aplicado quando se pretende a amplificação de sinais, as outras duas zonas, a saturação e o corte, são úteis em circuitos digitais na comutação de sinais e a zona de disrupção, como já foi dito anteriormente, deve ser evitada, pois corre o risco de dano ao transistor.

### ***O Modelo de Pequenos Sinais***

Quando polarizado na região ativa, o transistor BJT apresenta um comportamento linear e, como qualquer circuito linear, pode ser modelado como um quadripolo ([2], página 294). O modelo de pequenos sinais assim obtido permite fazer previsões teóricas importantes sobre o comportamento do circuito tais como: ganho e impedâncias de entrada e saída.

Um modelo bastante difundido e utilizado pelos fabricantes de transistores BJT é o modelo híbrido, caracterizado pelos parâmetros  $h$ . Esses parâmetros são obtidos tomando-se como variáveis independentes a corrente de base ( $i_b$ ) e a tensão de coletor ( $v_{ce}$ ).

A Figura 2.5 representa a equivalência entre o circuito com transistor e o quadripolo:



**Figura 2.5** - Quadripolo

O quadripolo pode ser caracterizado por vários tipos de matrizes, porém para esse modelo, utilizaremos a matriz  $H$ , que pode ser dada por:

$$H = \begin{bmatrix} h_{ie} & h_{re} \\ h_{fe} & h_{oe} \end{bmatrix}$$

Dessa matriz podemos tirar as seguintes equações:

$$v_{be} = h_{ie}i_b + h_{re}v_{ce} \quad (2.5)$$

$$i_c = h_{fe}i_b + h_{oe}v_{ce} \quad (2.6)$$

Os valores de  $h_{ie}$ ,  $h_{re}$ ,  $h_{fe}$  e  $h_{oe}$ , são conhecidos como parâmetros híbridos e podem ser definidos individualmente da seguinte forma:

$$\begin{aligned} h_{ie} &\equiv \left. \frac{v_{be}}{i_b} \right|_{v_{ce}=0} & h_{re} &\equiv \left. \frac{v_{be}}{v_{ce}} \right|_{i_b=0} \\ h_{fe} &\equiv \left. \frac{i_c}{i_b} \right|_{v_{ce}=0} & h_{oe} &\equiv \left. \frac{i_c}{v_{ce}} \right|_{i_b=0} \end{aligned} \quad (2.7)$$

A nomenclatura desses parâmetros segue de acordo com a Tabela 1:

| Índice | Descrição                                |
|--------|--|
| i      | Entrada (input)                          |
| r      | Transferência Reversa (reverse transfer) |
| f      | Transferência Direta (forward transfer)  |
| o      | Saída (output)                           |
| e      | Emissor Comum                            |

**Tabela 1** - Descrição dos Parâmetros  $h$

Podemos, então, identificar esses parâmetros:

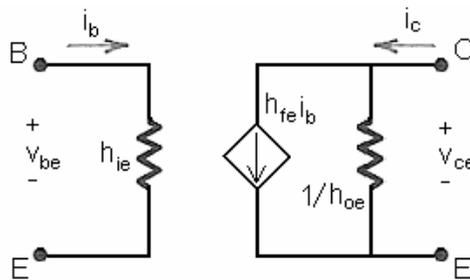
O parâmetro  $h_{fe}$  equivale ao parâmetro  $\beta_{AC}$  do transistor. Esse parâmetro é um dos mais importantes do transistor e tem um valor próximo ao valor de  $\beta_{DC}$ , que também pode ser chamado de  $h_{FE}$ , e que já foi definido anteriormente. Na Literatura é muito comum o uso de  $h_{fe}$ ,  $h_{FE}$  e  $\beta$ , com o mesmo significado.

O parâmetro  $h_{ie}$  representa a impedância de entrada vista pela base do transistor.

O parâmetro  $h_{oe}$  equivale ao valor inverso da resistência de saída vista pelo coletor, ou seja, a impedância de saída vale  $1/h_{oe}$ .

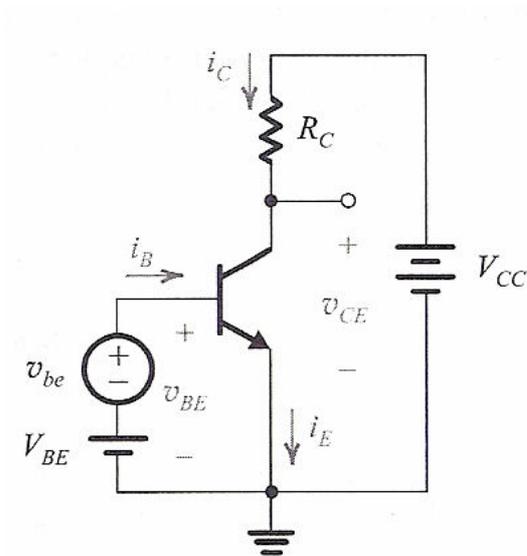
O parâmetro  $h_{re}$  é muito pequeno e pode ser desprezado na maioria das análises, desta forma, foi excluído do modelo para que este se tornasse mais simples.

Desta forma, então, o modelo do transistor fica da forma indicada na Figura 2.6:



**Figura 2.6** - Modelo do Transistor Utilizando Parâmetros Híbridos

O modelo de pequenos sinais do transistor pode ser melhor entendido observando-se o circuito da Figura 2.7.



**Figura 2.7** - BJT como Amplificador (Emissor-Comum)

A tensão base-emissor instantânea total  $v_{BE}$  pode ser escrita como:

$$v_{BE} = V_{BE} + v_{be} \quad (2.8)$$

Da mesma forma, a corrente do coletor pode ser escrita ([3], página 241):

$$i_C = I_C e^{v_{be}/V_T} \quad (2.9)$$

Onde  $V_T$ , Tensão Térmica, é dado por ([3], página 126):

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (2.10)$$

e:

$k$  = constante de Boltzmann =  $1,38 \times 10^{-23}$  joules/kelvin;

$T$  = temperatura absoluta em kelvin;

$q$  = valor da carga do elétron =  $1,60 \times 10^{-19}$  Coulomb.

Considerando a temperatura ambiente em torno de  $27^\circ\text{C}$ ,  $V_T$  tem o valor aproximado de 26mV.

Se  $v_{be} \ll V_T$ , a equação acima aproxima-se de ([3], página 241):

$$i_c \approx I_C \left( 1 + \frac{v_{be}}{V_T} \right) \quad (2.11)$$

Essa aproximação é referenciada como **aproximação para pequenos sinais**, e só é válida para valores de  $v_{be}$  menores que 10mV.

E pode ser reescrita como:

$$i_c = I_C + \frac{I_C}{V_T} v_{be} \quad (2.12)$$

Podemos, então, deduzir que a componente de sinal da corrente de coletor é:

$$i_c = \frac{I_C}{V_T} v_{be} \quad (2.13)$$

Essa equação relaciona a corrente de sinal no coletor a um sinal de tensão emissor-base e pode ser reescrita dessa forma:

$$i_c = g_m v_{be} \quad (2.14)$$

Onde  $g_m$  é chamada de **transcondutância** e é dada como ([3], página 241):

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} \quad (2.15)$$

Observamos que a transcondutância é proporcional à corrente de polarização do transistor. Logo, para obter um valor previsível e constante para  $g_m$ , necessitamos de um valor constante e previsível de  $I_C$ .

Agora, para determinar a corrente de base vista por  $v_{be}$ , precisamos avaliar a corrente total na base  $i_B$ :

$$i_B = \frac{i_C}{h_{fe}} = \frac{I_C}{h_{fe}} + \frac{1}{h_{fe}} \frac{I_C}{V_T} v_{be} \quad (2.16)$$

Também podemos deduzir que:

$$i_B = I_B + i_b \quad (2.17)$$

Comparando as equações (2.16) e (2.17), observamos que a componente de sinal é dada por:

$$i_b = \frac{1}{h_{fe}} \frac{I_C}{V_T} v_{be} \quad (2.18)$$

De acordo com a equação (2.15), temos que:

$$i_b = \frac{g_m}{h_{fe}} v_{be} \quad (2.19)$$

A resistência de entrada para pequenos sinais entre a base e o emissor, vista pela base, é definida por ([3], página 243):

$$h_{ie} \equiv \frac{v_{be}}{i_b} \quad (2.20)$$

Pela equação (2.19), temos:

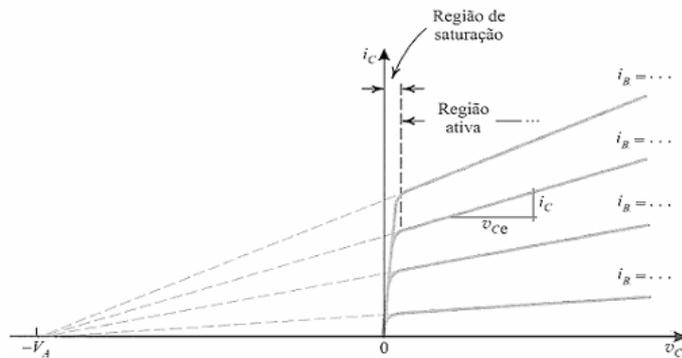
$$h_{ie} = \frac{h_{fe}}{g_m} \quad (2.21)$$

Substituindo  $g_m$  pela equação (2.15),  $h_{ie}$  pode ser definido como:

$$h_{ie} = h_{fe} \frac{V_T}{I_C} \quad (2.22)$$

Na região ativa, os BJTs apresentam uma dependência da corrente de coletor com a tensão de coletor. Dessa forma, suas curvas características ( $i_C-v_{CE}$ ) não são retas horizontais perfeitas (na região ativa).

Se extrapolarmos essas retas, elas se encontrarão em um ponto negativo do eixo  $v_{CE}$ , em  $v_{CE} = -V_A$ , esse ponto é conhecido como tensão de Early, representado por  $V_A$ .



**Figura 2.8** - Tensão de Early

A inclinação das retas indica que a resistência de saída ( $r_o$ ) vista pelo coletor não é infinita e é definida por:

$$r_o = \left. \frac{v_{ce}}{i_c} \right|_{i_b=0} \quad (2.23)$$

Comparando a equação (2.23) com a equação (2.7), representada novamente por conveniência:

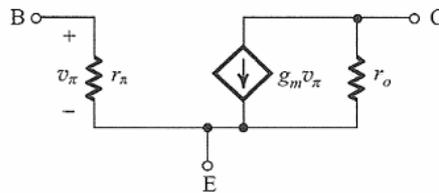
$$h_{oe} \equiv \left. \frac{i_c}{v_{ce}} \right|_{i_b=0}$$

Tem-se que:

$$r_o = \frac{1}{h_{oe}} \quad (2.24)$$

### **O Modelo $\pi$ -Híbrido:**

Outra forma também utilizada para caracterizar o transistor é o modelo  $\pi$ -Híbrido, que pode ser representado pela Figura 2.9. Ele representa o BJT como uma fonte de corrente controlada por tensão (amplificador de transcondutância) e utiliza outra nomenclatura para as impedâncias de entrada e saída, denominadas, respectivamente como  $r_\pi$  e  $r_o$ .



**Figura 2.9** - O Modelo  $\pi$ -Híbrido

Comparando esse modelo  $\pi$ -híbrido com o híbrido h, temos que:

$$r_\pi = h_{ie} \quad v_\pi = v_{be} \quad r_o = \frac{1}{h_{oe}} \quad g_m = \frac{h_{fe}}{r_\pi}$$

É importante ressaltar que esse não é um modelo completo do transistor, ele só leva em conta a operação do transistor para pequenos sinais em baixas frequências e em um ponto de polarização, alguns dos parâmetros que aparecem nesse modelo dependem da corrente de polarização  $I_C$ , como  $g_m$  e  $r_\pi$ .

Esse modelo serve tanto para transistores NPN quanto para transistores PNP, sem troca de polaridade.

### **O FET**

O transistor de efeito de campo (FET) é, tal como o BJT, um dispositivo semiconductor, mas ao contrário deste último, a corrente que o atravessa é controlada por um campo elétrico.

Dentre as famílias de FETs: JFET e MOSFET, a mais comum é o MOSFET. Os terminais equivalentes ao emissor, base e coletor do BJT são, respectivamente, denominados fonte (S - *Source*), porta (G - *Gate*) e dreno (D - *Drain*) no FET. Nessa introdução teórica, daremos ênfase ao estudo do MOSFET para exemplificar os dispositivos FET.

## O MOSFET

O MOSFET é um FET tipo Metal-Óxido-Semicondutor, e tornou-se muito popular ao final da década de 1970. Se comparado com o BJT, o MOS (como também é conhecido) pode ser construído com dimensões menores e seu processo de fabricação é mais simples. Além disso, funções lógicas digitais podem ser implementadas com circuitos que utilizam exclusivamente MOSFETs, ou seja, sem a necessidade de resistores ou diodos. Por essas razões, os MOSFETs são muito utilizados para fabricação de circuitos integrados (CIs).

Os dispositivos MOSFET podem ser modelados de forma muito parecida com os dispositivos BJT. Porém, a impedância de entrada é considerada infinita, pois a porta é isolada do corpo por um óxido ( $\text{SiO}_2$ ), daí seu nome. Na Figura 2.10 são apresentados os símbolos do MOSFET:

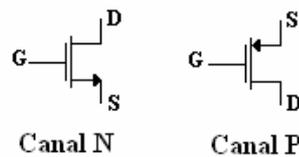


Figura 2.10 - Tipos e Símbolos do MOSFET

Para que haja condução de corrente do terminal do dreno para fonte, uma tensão porta-fonte,  $V_{GS}$ , deve ser aplicada. Assim, quando essa tensão atingir um certo valor,  $V_t$ , o dispositivo estará apto a conduzir plenamente (um canal entre dreno e fonte será formado para passagem da corrente). Dessa forma, ao aplicar uma tensão dreno-fonte,  $V_{DS}$ , a corrente irá fluir pelos terminais, tendo sua intensidade controlada por  $V_{GS}$ .

A região onde  $V_{DS} < V_{GS} - V_t$  é chamada de triodo. Essa região é usada quando o FET opera como chave. Nesse tipo de operação, outra região também é utilizada: quando  $V_{GS}$  é menor que  $V_t$  e é conhecida como região de **corte**.

Na região de triodo, podemos definir a corrente de dreno por ([3], página 343):

$$i_D = k_n' \frac{W}{L} \left[ (v_{GS} - V_t)v_{DS} - \frac{1}{2}v_{DS}^2 \right] \quad (2.25)$$

Onde  $k_n'$  representa o parâmetro de transcondutância do processo de produção do FET e  $W$  e  $L$  são parâmetros construtivos do dispositivo representando, respectivamente, a largura e o comprimento do canal.

Aumentando-se a tensão  $v_{DS}$ , a corrente de dreno praticamente se mantém constante a partir de  $v_{DS} = v_{GS} - V_t$ . A corrente de dreno então satura e dizemos que essa é a região de saturação. A tensão  $v_{DS}$  de **saturação** é representada por  $v_{DS_{SAT}}$ ,

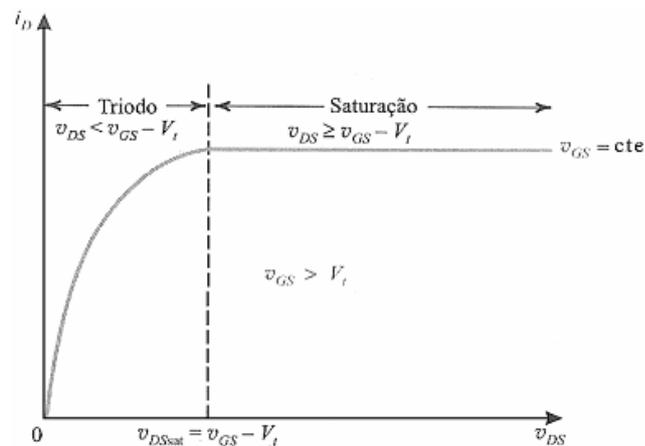
$$v_{DS_{SAT}} = v_{GS} - V_t \quad (2.26)$$

Na região de saturação, podemos escrever a corrente  $i_D$  da forma ([3], página 344):

$$i_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t)^2 \quad (2.27)$$

Portanto, na região de saturação, o MOSFET apresenta uma corrente de dreno cujo valor é independente da tensão  $v_{DS}$  e é determinada pela tensão  $v_{GS}$ . Logo, o MOSFET saturado se comporta como uma fonte de corrente cujo valor é controlado por  $v_{GS}$ .

A Figura 2.11 representa a curva característica do MOSFET:



**Figura 2.11** - Curva Característica ( $i_D - v_{DS}$ )

Assim como no BJT, essa curva apresenta uma pequena inclinação devido ao fato de existir uma resistência de saída causada por uma variação do comprimento do canal onde passa a corrente  $I_D$ .

Podemos calcular a resistência de saída, de maneira semelhante ao já apresentado para o BJT:

$$r_o = \left. \frac{v_{ds}}{i_d} \right|_{v_{gs}=0} \quad (2.28)$$

Para pequenos sinais, o MOSFET apresenta um parâmetro que relaciona a tensão de entrada,  $v_{gs}$ , com a corrente de saída,  $i_d$ . Ele é conhecido como a transcondutância do MOSFET ou simplesmente  $g_m$ , e é definida como ([3], página 365):

$$g_m \equiv \frac{i_d}{v_{gs}} \quad (2.29)$$

Assim, seu modelo de pequenos sinais pode ser representado de forma semelhante ao modelo  $\pi$ -híbrido do BJT, com a diferença que a resistência de entrada é infinita. A Figura 2.12 representa esse modelo:

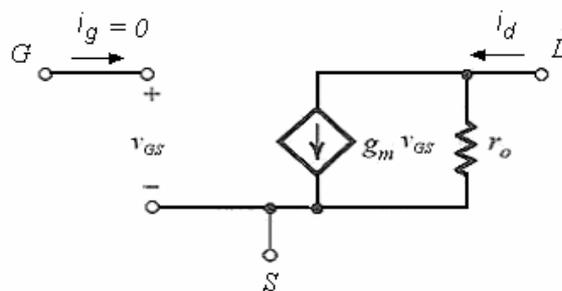


Figura 2.12 - Modelos de pequenos sinais para o MOSFET

## O JFET

O **Transistor de Efeito de Campo de Junção, JFET**, é o transistor mais simples. Possui alta impedância de entrada, porém não maior que a do MOSFET. A diferença para o MOSFET está no fato de não haver um isolante entre o terminal da porta e o corpo do dispositivo e pela tensão  $V_t$ , que no JFET é negativa.

As características corrente-tensão do JFET são idênticas às do MOSFET, exceto que o valor máximo permitido por  $V_{GS}$  para o JFET é de 0V. Na Figura 2.13 são mostrados os símbolos do JFET:

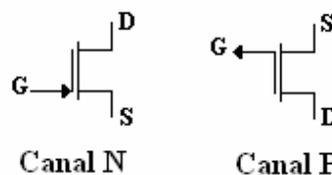


Figura 2.13 - Tipos e Símbolos do JFET

## 2.2. Processos para as Medidas dos Parâmetros

Como já apresentado na introdução, esse projeto tem por objetivo calcular alguns parâmetros dos transistores e gerar alguns gráficos específicos. Para tal, alguns dados do transistor precisam ser medidos de alguma forma sem que haja interferência nos seus valores.

Para o BJT, são necessárias as informações de  $I_B$ ,  $V_{CE}$ ,  $I_C$ ,  $i_b$ ,  $v_{ce}$  e  $i_c$ . Com esses dados, pode-se calcular  $h_{FE}$ ,  $h_{fe}$ ,  $h_{oe}$ ,  $h_{ie}$ ,  $r_o$  e  $g_m$  pelas equações obtidas na seção 2.1, repetidas abaixo por conveniência, e traçar o gráfico de  $I_C$  x  $V_{CE}$  para diversas correntes de base, e ainda o gráfico  $h_{FE}$  x  $I_C$  para um determinado  $V_{CE}$ .

$$h_{FE} \equiv \beta_{DC} = \frac{I_C}{I_B} \quad (2.30)$$

$$h_{fe} \equiv \left. \frac{i_c}{i_b} \right|_{v_{ce}=0} \quad (2.31)$$

$$h_{oe} \equiv \left. \frac{i_c}{v_{ce}} \right|_{i_b=0} \quad (2.32)$$

$$h_{ie} = h_{fe} \frac{V_T}{I_C} \quad (2.33)$$

$$r_o = \frac{1}{h_{oe}} \quad (2.34)$$

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} \quad (2.35)$$

Para o FET, são necessárias as informações de  $V_{GS}$ ,  $V_{DS}$ ,  $I_D$ ,  $v_{gs}$ ,  $v_{ds}$  e  $i_d$ . Assim pode-se calcular a impedância de saída  $r_o$  pela equação (2.28), o ganho de transcondutância  $g_m$  através da equação (2.29) e traçar o gráfico de  $I_D$  x  $V_{DS}$  para diversas tensões  $V_{GS}$ .

Sendo assim, foram propostos dois tipos de circuitos para realizar essas medidas, um para o BJT e outro para a família FET, conforme mostrado na Figura 2.14:

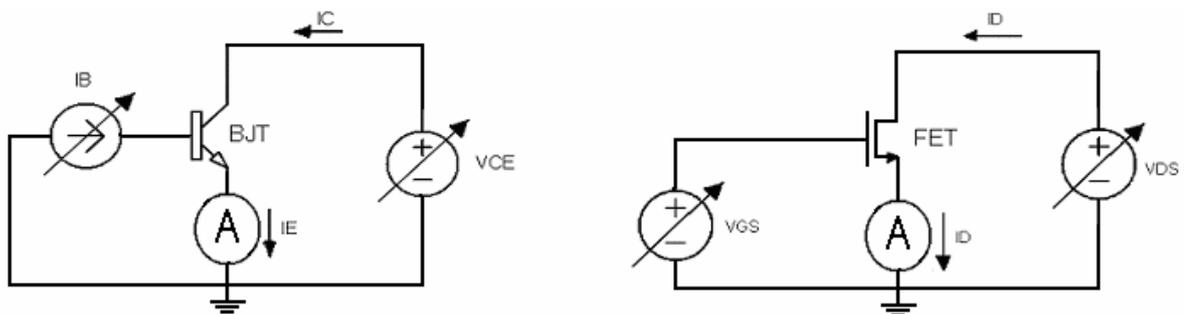


Figura 2.14 - Circuitos Propostos BJT e FET

Para o BJT, temos então uma fonte de corrente controlada para  $I_B$  e uma fonte de tensão controlada para  $V_{CE}$ . Logo, dois dos três parâmetros necessários, já são conhecidos e não precisam ser medidos. O outro parâmetro, que precisa ser medido, deveria ser  $I_C$ , porém, essa

medida de corrente é algo um pouco complicado de se fazer. Para medir essa corrente, seria preciso introduzir um resistor no coletor para medir a queda de tensão nele e pela lei de Ohm calcular seu valor. Contudo, um resistor nessa posição faria com que a tensão de  $V_{CE}$  não pudesse ser controlada, já que não seria totalmente aplicada aos terminais de coletor e emissor do transistor. Sendo assim, foi introduzido um resistor de emissor e então, medida a corrente  $I_E$ . Para chegarmos a corrente  $I_C$ , basta subtrair  $I_E$  de  $I_B$ , cujo valor já é conhecido, chegando assim à última informação necessária para os cálculos.

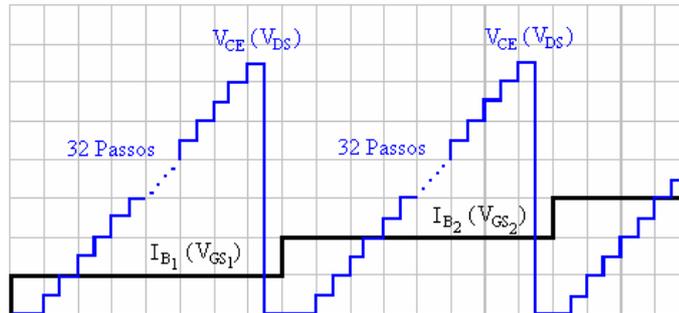
Já no caso do FET, algo semelhante foi desenvolvido. Ao invés de uma fonte de corrente, foi projetada uma fonte de tensão controlada  $V_{GS}$ . Temos também uma fonte de tensão controlada  $V_{DS}$ . Assim como para o BJT, dois parâmetros já são conhecidos, faltando somente a informação da corrente  $I_D$ . Essa corrente pode ser medida da mesma maneira que no caso do BJT, porém, não é necessário subtrair um valor de corrente de base, visto que a corrente que passa pela fonte é a mesma que passa pelo dreno.

Agora que já são conhecidos os circuitos do BJT e do FET, segue a explicação de como as medidas deverão ser realizadas para traçar os gráficos e cálculos dos parâmetros:

Para traçar as curvas características do transistor, primeiramente devem ser selecionadas quais correntes de base (no caso de um BJT) ou quais tensões  $V_{GS}$  (FET) serão testadas, assim como a tensão máxima  $V_{CE}$  ou  $V_{DS}$ . Nesse projeto, serão testadas 8 correntes de base (ou tensões  $V_{GS}$ ) por vez, gerando 8 curvas por gráfico com valores de  $V_{CE}$  ( $V_{DS}$ ) de até 15V.

A primeira corrente de base (ou tensão  $V_{GS}$ ) deve ser selecionada, então a tensão  $V_{CE}$  (ou  $V_{DS}$ ) deve aumentar de 0V até o valor máximo escolhido. Esse aumento será dividido por passos. Serão 32 passos no total. A cada passo, será feita a medida de  $I_E$  (ou  $I_S$ ) 60 vezes e então será tirada a média para evitar o efeito do ruído. Esse procedimento se repetirá por mais 8 vezes, uma para cada corrente de base (ou tensão  $V_{GS}$ ). A cada mudança de corrente de base, os dados serão enviados para o computador, para que esse possa ir realizando as contas e traçar os gráficos. Ao final das medidas, o circuito fica esperando por mais uma chamada para realizar essas ou outras medidas.

A Figura 2.15 mostra como os sinais da corrente de base ou tensão  $V_{GS}$  e da tensão de coletor são gerados:



**Figura 2.15** -  $I_B$  (ou  $V_{GS}$ ) e  $V_{CE}$  (ou  $V_{DS}$ )

Para calcular os parâmetros  $h_{oe}$  e  $r_o$  do BJT, ou  $r_o$  do FET, são aproveitados os dados dos gráficos gerados. Como esses parâmetros estão relacionados com a inclinação das retas dos gráficos  $I_C \times V_{CE}$  (BJT) ou  $I_D \times V_{DS}$  (FET),  $v_{ce}$  e  $v_{ds}$  podem ser considerados, respectivamente, como a diferença entre o último ponto da reta até o primeiro ponto da região ativa (BJT) ou saturação (FET), assim como  $i_c$  e  $i_d$  como as variações de  $I_C$  e  $I_D$  para esses pontos.

Para o realizar o cálculo do  $h_{fe}$ ,  $h_{ie}$  e  $g_m$  do BJT deverá ser selecionada uma tensão  $V_{CE}$  desejada e então o circuito deve, para cada uma das 8 correntes  $I_B$  pré-selecionadas, gerar uma variação ( $i_b$ ) em torno da corrente de polarização  $I_B$  e medir as variações de  $I_E$  correspondentes ( $i_e$ ). As variações de  $I_B$  são geradas ajustando uma corrente pouco acima e outra pouco abaixo do valor de  $I_B$  (essas medidas são realizadas 60 vezes e tirada a média para efeito de eliminação de ruídos). Logo após, deve enviar os dados para o computador, que realizará as contas dos parâmetros  $h_{fe}$  dividindo  $i_c$  (que corresponde a  $i_e$  subtraído de  $i_b$ ) por  $i_b$ ,  $g_m$  dividindo  $I_C$  (que corresponde a  $I_E - I_B$ ) por  $V_T$  e  $h_{ie}$  dividindo  $h_{fe}$  por  $g_m$  (recém calculados) e esperar por mais uma chamada para realizar medidas. De forma análoga ao  $h_{fe}$ , o parâmetro  $g_m$  do FET será calculado, somente ressaltando que a variação deverá ser em torno de  $V_{GS}$  e as correntes medidas serão  $i_d$ .

Para o circuito funcionar de maneira autônoma, sem que haja intervenção manual, foi introduzido no circuito, um microcontrolador. Esse dispositivo serve para fazer o controle, alterando a configuração do *hardware* para realizar as medidas desejadas. O microcontrolador serve como a unidade central de processamento do equipamento e de interface entre o *software* e o *hardware*, interpretando os comandos recebidos e enviando as informações das medidas. Mais detalhes sobre o microcontrolador escolhido para o projeto, bem como seu funcionamento, serão explicados na seção 2.4.

A Figura 2.16 mostra o diagrama de blocos do equipamento:

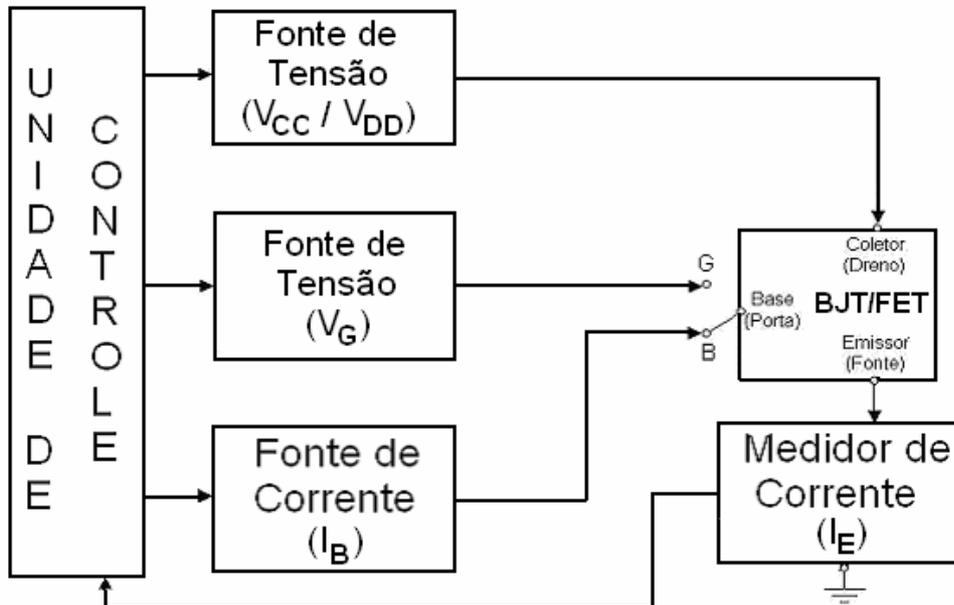


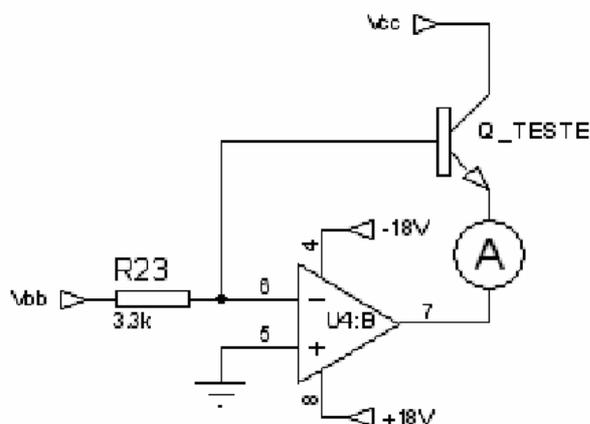
Figura 2.16 - Diagrama de Blocos

## 2.3. Circuitos

Agora que já foi discutido como as medidas devem ser realizadas, esse tópico traz o circuito projetado, separando cada parte por funções específicas e como essas partes se integram com as restantes, assim como seu funcionamento.

### 2.3.1. Fonte de Corrente $I_B$

Para gerar a corrente de base  $I_B$ , no caso em que o transistor em teste seja um BJT, foi utilizado o circuito da Figura 2.17. Esse circuito é uma fonte de corrente, que tem seu valor controlado pela tensão de entrada  $V_{bb}$ , como será demonstrado a seguir.



**Figura 2.17** - Fonte de Corrente  $I_B$

O funcionamento desta fonte de corrente é relativamente simples. A tensão nos terminais do resistor  $R_{23}$  são  $V_{bb}$  e  $0V$  (devido à terra virtual do Amplificador Operacional). Logo uma corrente  $V_{bb}/R_{23}$  deve passar por ele. Como o amplificador operacional tem uma impedância de entrada idealmente infinita, a corrente deve então seguir para a base do transistor a ser testado.

Logo, essa é uma fonte de corrente que depende exclusivamente da tensão de entrada  $V_{bb}$  e da resistência  $R_{23}$  e seu valor pode ser calculado por:

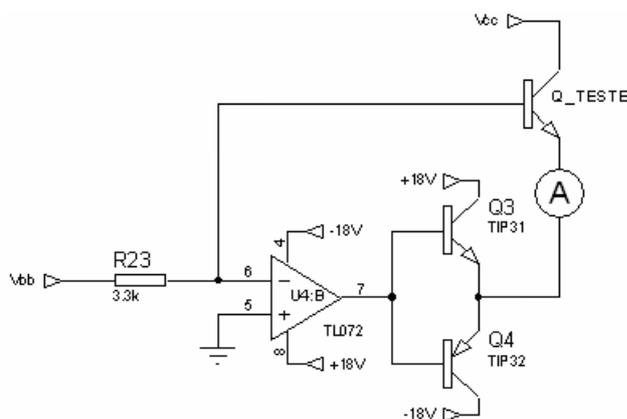
$$I_B = \frac{V_{bb}}{R_{23}} \quad (2.36)$$

Deve-se notar que é uma fonte de corrente que funciona tanto para valores positivos quanto para valores negativos de  $V_{bb}$ , gerando assim correntes de base  $I_B$  tanto positivas, para dispositivos NPN, quando negativas, para dispositivos PNP. Nesse projeto, as correntes  $I_B$  foram escolhidas para alcançar desde  $\pm 10\mu A$  até  $\pm 5mA$ .

O medidor de corrente no emissor do transistor não influencia na fonte de corrente  $I_B$ . Ele está relacionado com a medida de  $I_C$  e sua função será explicada mais adiante.

Também foi decidido que nesse projeto, a corrente máxima que poderá circular pelo coletor,  $I_{C_{Máx}}$ , será de aproximadamente  $100mA$ . Esse valor de corrente é muito maior que o suportado pela a saída do amplificador operacional, que é limitado em  $25mA$ , logo, foi necessário acrescentar um estágio de saída que pudesse fornecer/absorver essa corrente. Com esta finalidade, foi adicionado na saída do amplificador, um par de transistores de potência mais

elevada ( $Q_3$  e  $Q_4$ ). Essa configuração de saída também é conhecida como *push-pull*. A fonte de corrente completa está representada na Figura 2.18:



**Figura 2.18** - Fonte de Corrente  $I_B$  com *Push-Pull*

### 2.3.2. Fonte de Tensão $V_{bb}$

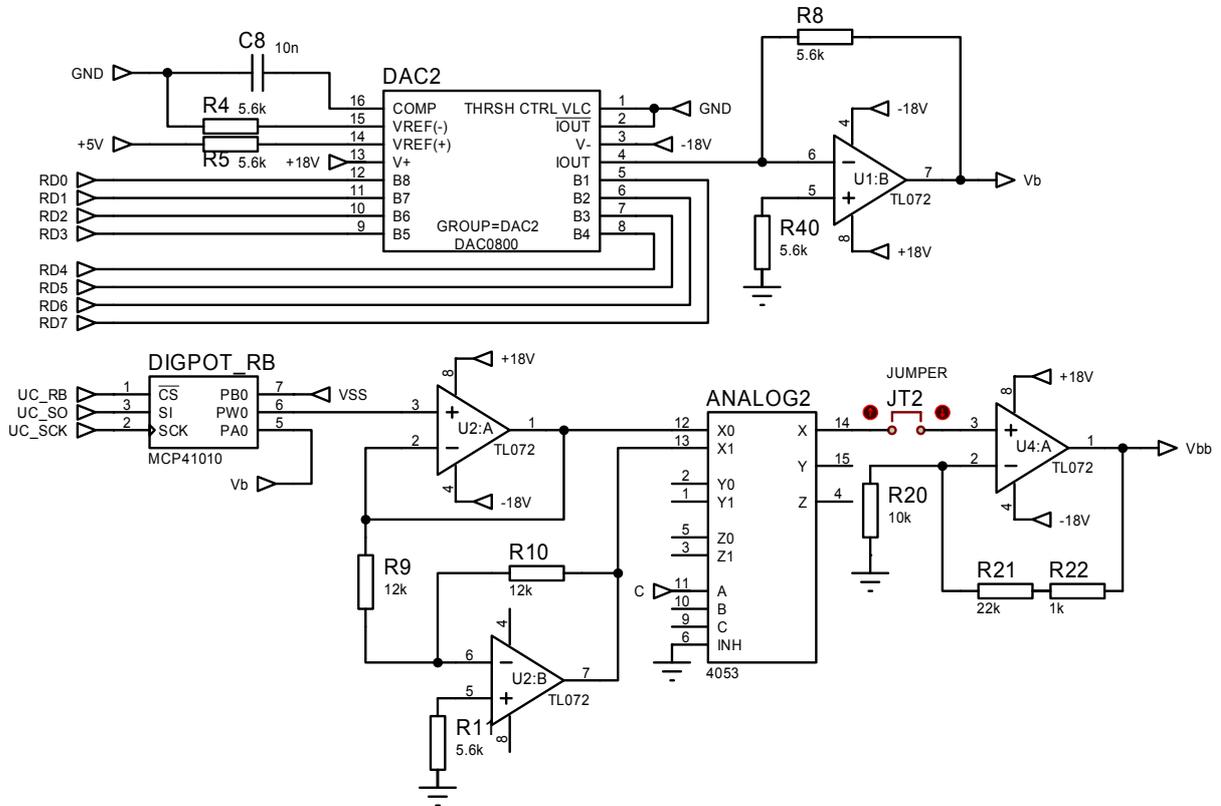
Para alimentar a Fonte de Corrente  $I_B$ , uma fonte de tensão  $V_{bb}$  foi desenvolvida. Essa fonte precisa gerar tensões controladas positivas e negativas para gerar as correntes  $I_B$  (e no caso do FET, tensões  $V_{GS}$ ) com os valores exatos.

Uma solução que se revela precisa, eficaz e suficientemente controlável é aquela que usa um conversor digital analógico (DAC). Trata-se de um dispositivo eletrônico que converte uma representação digital de uma quantidade, num valor analógico discreto ou, dito de outra forma, converte um código binário digital numa corrente ou tensão de saída.

Para esse projeto, foi escolhido o conversor DAC0800. Esse é um DAC de 8 bits de resolução e com saída em corrente. Ele pode ser configurado para trabalhar no modo bipolar, ou seja, com sua saída variando de valores negativos a positivos.

A entrada de valores é feita de forma paralela através da unidade de controle automático (mais a frente será explicado o seu funcionamento). Assim, fica simples enviar os dados para o DAC já que é só dizer qual o valor decimal (0 a 255) a ser utilizado e a unidade de controle enviará a palavra para a entrada dos DAC. Como a saída do DAC é em corrente e aproveitando-se do fato de possuir duas saídas complementares, um circuito foi adicionado para converter essa corrente em tensão. No próprio manual do CI é mostrado como fazer esse procedimento, que será

mostrado mais a seguir. A Figura 2.19 mostra a fonte de Tensão  $V_{bb}$ :



**Figura 2.19** - Fonte de Tensão  $V_{bb}$

Esse circuito é separado em duas partes que podem ser explicadas separadamente. A primeira parte é formada pelo DAC e pelo Amplificador Operacional U1:B.

O DAC recebe uma palavra binária da unidade de controle pelas portas B<sub>1</sub> a B<sub>8</sub> e gera na saída uma corrente proporcional a esse valor e a tensão de referência ( $V_{REF} = +5V$  nesse caso). Com isso, o amplificador da saída consegue gerar tensões de 0V até a tensão de referência, mas para isso é necessário que a seguinte condição seja respeitada:  $R_4 = R_5 = R_8 = R_{40}$ , segundo o manual do CI.

Podemos calcular o valor de  $V_b$  para cada valor enviado pela unidade de controle através da fórmula abaixo:

$$V_b = \frac{V_{REF}}{255} \cdot X \quad (2.37)$$

Onde  $X$  corresponde ao código enviado pela unidade de controle.

Dessa forma, cada incremento de  $V_b$  valerá então:

$$V_{b\ inc} \approx 0,0196V$$

Assim, o valor de  $V_b$  pode variar de 0V até 5V com incrementos de aproximadamente 20mV. Porém, com esse valor de incremento, não seria possível varrer todos os valores de corrente de base desejados para esse projeto (detalhado no módulo Fonte de Corrente  $I_B$ ) e também não atinge valores negativos, para o caso de um BJT PNP.

Para dar mais mobilidade para as faixas de corrente de base, foi então colocado um potenciômetro digital na saída da fonte  $V_b$  funcionando como um divisor resistivo de tensão. Assim pode-se dividir essa tensão em até 256 valores diferentes. Contudo, esse potenciômetro será utilizado para dividir essa tensão  $V_b$  em quatro vezes ou simplesmente deixar a tensão  $V_b$  sem alteração, dependendo da faixa de  $I_B$  que será utilizada. Se houver a divisão, o novo incremento nessa tensão passa a ser de aproximadamente 4,9mV. Esse potenciômetro digital possui limitação de 1mA de corrente e a tensão nos seus terminais deve ficar entre 0V e 5V.

Contudo, ainda foi necessário implementar um inversor para gerar as tensões negativas de  $V_{bb}$ . Assim, após o potenciômetro, foi inserido um amplificador operacional configurado como buffer e outro configurado como inversor de ganho unitário. Dessa forma, a saída do buffer é uma tensão positiva com impedância muito baixa e a saída do inversor é uma tensão negativa com impedância também muito baixa.

Para selecionar qual das duas tensões será utilizada, a unidade de controle seleciona qual saída quer utilizar através de um multiplexador (mux) analógico (ANALOG2), dependendo do tipo do dispositivo em teste que for escolhido pelo usuário. Para esse projeto foi escolhido o MC14053, que é um multiplexador analógico que possui três módulos com duas entradas para uma saída e um pino de controle para cada módulo.

Como a impedância de saída do mux é da ordem de  $600\Omega$ , foi preciso inserir um amplificador de alta impedância de entrada e baixa impedância de saída para que a corrente  $I_B$  possa ser gerada com maior precisão. O ganho desse amplificador foi ajustado em 3,3V/V para que esta fonte seja também utilizada na geração de tensão  $V_G$  no teste de FET, conforme será explicado mais adiante.

### 2.3.3. Fonte de Tensão $V_{CC}$

Para gerar as tensões aplicadas ao coletor (ou dreno) do transistor, foi utilizado o circuito da Figura 2.20:

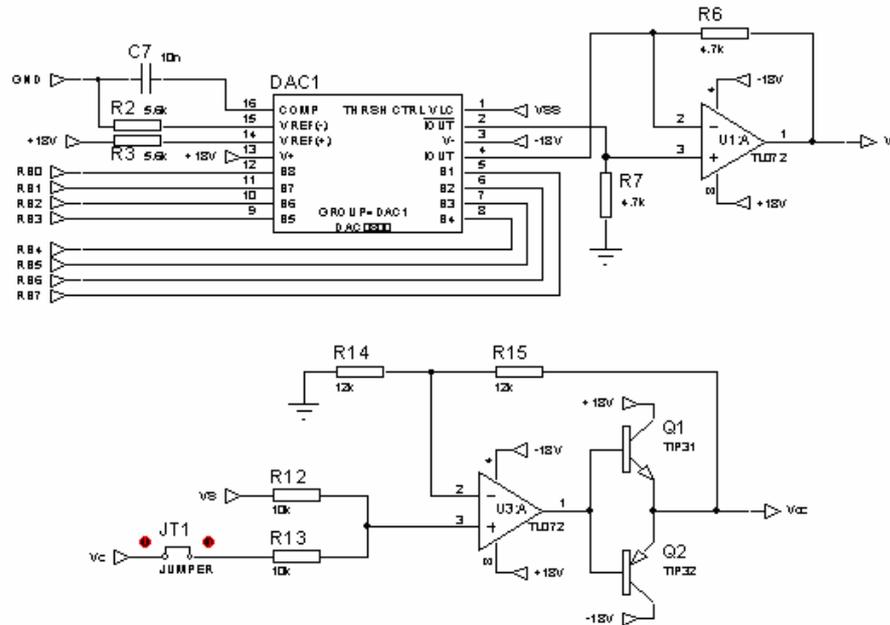


Figura 2.20 - Fonte de Tensão  $V_{CC}$

Para esse projeto, foi decidido testar os transistores com tensão máxima de coletor-emissor,  $V_{CE}$ , ou dreno-fonte  $V_{DS}$  (em módulo) de 15V. Isso porque, até esse valor, já se pode tirar conclusões a respeito do comportamento do transistor em teste e também porque a saída máxima do amplificador operacional de saída começa a ser limitada por sua alimentação (18V).

O circuito gerador de  $V_{CC}$  pode ser dividido em duas partes e explicadas separadamente. A primeira delas, que é formada por um DAC e um Amplificador Operacional, é bem similar à primeira parte do gerador de  $V_{bb}$ . Porém, existem algumas diferenças. A primeira é que a tensão de referência  $V_{REF}$  para esse caso é de +18V e a segunda diferença, que é fundamental é: essa parte está configurada para operar de maneira bipolar, ou seja, com tensões positivas e negativas.

O DAC recebe uma palavra de 8 bits da unidade de controle e gera na saída uma corrente proporcional a esse valor e a tensão de referência  $V_{REF}$ . A saída é complementar,  $I_{OUT}$  e  $\overline{I_{OUT}}$ . Dessa forma, o amplificador operacional de saída consegue gerar tensões simétricas entre -15V

(0 na entrada do DAC) e +15V (255 na entrada do DAC), mas para isso se faz necessário que  $R_2 = R_3$  e  $R_6 = R_7$ . Essa tensão de saída ( $V_C$ ) pode ser calculada pela fórmula (2.38) que se encontra no próprio manual do CI:

$$V_C = V_{REF} \cdot \frac{R_6}{R_2} \left( \frac{-255}{256} + \frac{2X}{256} \right) \quad (2.38)$$

Onde  $X$  representa o código enviado pela unidade de controle.

Dessa forma, cada incremento na tensão poderá ser calculado pela diferença do resultado da fórmula acima para dois valores consecutivos de  $X$ , e que será de aproximadamente:

$$V_{C_{inc}} \approx 0,118V$$

Porém, para traçar as curvas características do transistor, é preciso que este passe pelas três regiões: corte, saturação e região ativa. Para isso é preciso que algumas condições sejam satisfeitas. Desta forma, como a base do transistor em teste está com potencial de terra, 0V, e a tensão de coletor nunca ficaria em um nível para polarizar a junção base-coletor diretamente, requisito para o transistor entrar no modo de saturação. Por esse motivo, a segunda parte do gerador de  $V_{CC}$ , é formada por um somador que adiciona a tensão desejada para o coletor (no caso,  $V_C$ ) com a tensão de emissor ( $V_E$ ). Como a tensão de emissor está por volta de  $-V_{BE}$  (devido ao terra virtual da base do transistor), a tensão de coletor vai estar polarizando diretamente a junção enquanto a tensão  $V_C$  não for maior que  $V_{BE}$ . Assim o transistor passar pelas três regiões e as curvas são traçadas perfeitamente.

Com esta alteração, a tensão  $V_{CE}$  efetivamente aplicada ao transistor BJT em teste será o valor da tensão de saída da fonte de tensão  $V_C$ , definida pela unidade de controle, conforme indicado pela equação (2.39):

$$\begin{aligned} V_{CC} &= V_C + V_E \\ V_{CC} - V_E &= V_{CE} = V_C \end{aligned} \quad (2.39)$$

Como dito anteriormente, a corrente máxima que deve circular pelo transistor deve ser da ordem de 100mA, sendo assim, também se fez necessária a utilização da configuração *push-pull* na saída do gerador de  $V_C$ .

Essa configuração serve também, pelos motivos similares para os transistores FET.

### 2.3.4. Fonte de Tensão $V_G$

Para gerar a tensão  $V_G$ , no caso do transistor em teste ser um FET, foi projetado o circuito da Figura 2.21:

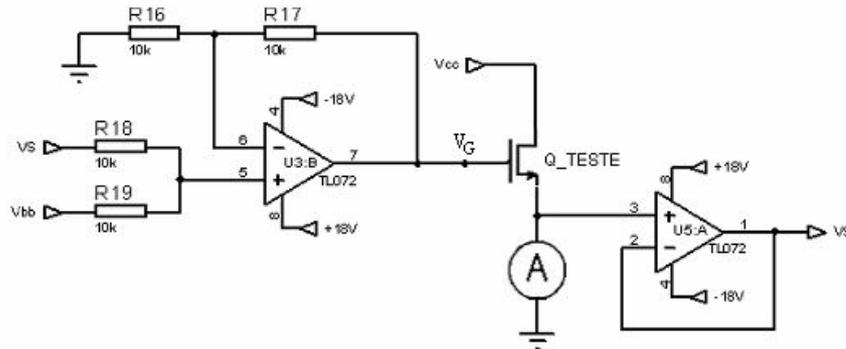


Figura 2.21 - Gerador de  $V_G$

Para traçar as curvas do FET, diferente do BJT, é preciso colocar uma tensão na Porta, ao invés de uma corrente na Base. Porém, ao colocar uma tensão na Porta, não é possível garantir uma tensão  $V_{GS}$  constante, pois quando a corrente de Dreno passar pelo medidor de corrente  $I_D$  (representado ainda por um amperímetro), a tensão da Fonte ( $V_S$ ) ficará com valor desconhecido, pois depende dessa corrente. Para garantir que a tensão  $V_{GS}$  continue constante durante as medidas e que essa também seja conhecida, foi necessário projetar um circuito somador não inversor, que então some a tensão de entrada ( $V_{bb}$ ) e a da Fonte ( $V_S$ ).

Assim, a tensão  $V_{GS}$  efetivamente aplicada ao FET em teste será o valor da tensão de saída da fonte de tensão  $V_{bb}$ , definida pela unidade de controle, como mostrado na equação (2.40):

$$\begin{aligned} V_G &= V_{bb} + V_S \\ V_{GS} &= V_G - V_S = V_{bb} + V_S - V_S = V_{bb} \end{aligned} \quad (2.40)$$

### 2.3.5. Medidor de Corrente $I_E$

Para realizar a medida de  $I_E$ , foi preciso arranjar uma maneira de transformar essa corrente em tensão, para que pudesse ser medida pelo conversor analógico-digital (ADC) do microcontrolador.

Dessa forma, foi decidido pela introdução de um resistor no emissor para então, medirmos a queda de tensão nele,  $V_{RE}$ , e pela lei de Ohm calcular a corrente que o atravessa,  $I_E$ . Porém,  $R_E$  pode influenciar diretamente nas curvas do transistor.  $R_E$  deve ser pequeno o suficiente para não ter uma queda de tensão muito grande, a ponto atrapalhar as curvas características, e também deve ser grande o suficiente para que  $V_{RE}$  possa ser medida pelo ADC.

Foi projetado então um amplificador de instrumentação de ganho variável, utilizando um potenciômetro digital para variar este ganho. Depois de alguns testes,  $R_E$  foi escolhido com a resistência de  $10\Omega$ , pois assim, a queda de tensão máxima seria de aproximadamente 1V, já que a corrente máxima estipulada que o atravessaria seria 100mA.

Porém, como já foi explicado anteriormente, o potenciômetro digital não funciona com tensões negativas nem com tensões acima de 5V. Então foi necessário projetar um circuito que pudesse então só enviar para o amplificador de instrumentação tensões positivas.

A Figura 2.22 mostra como ficou essa parte do circuito:

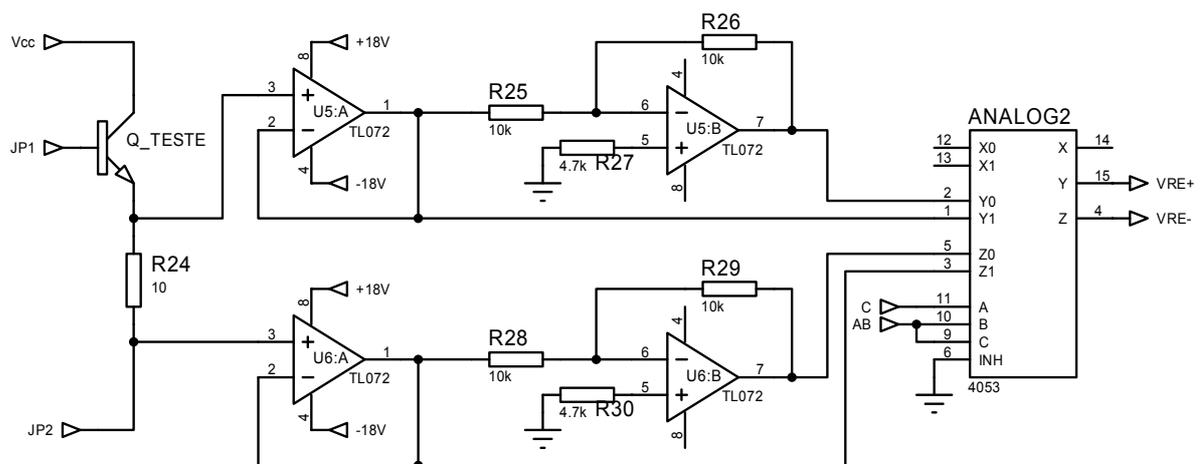
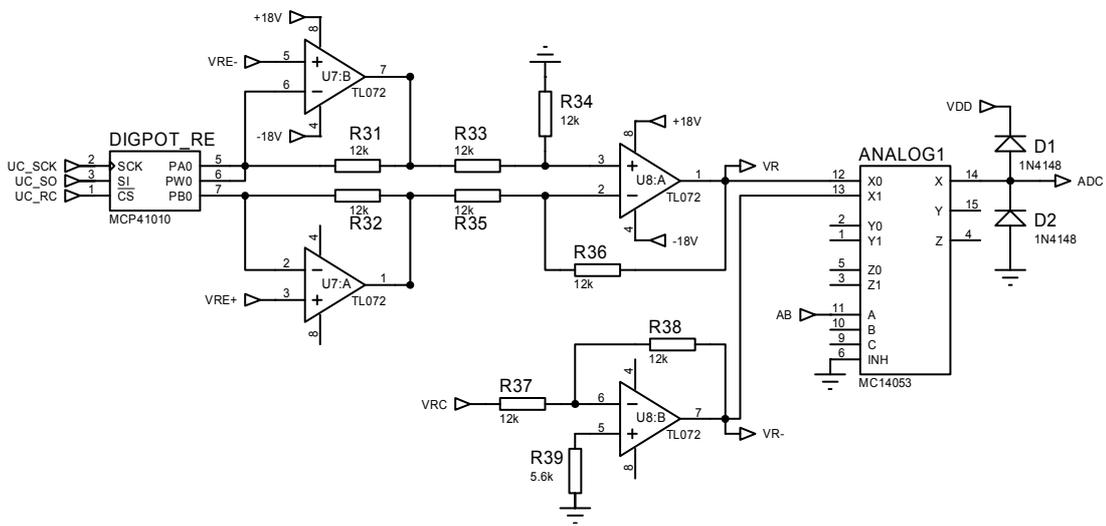


Figura 2.22 - Primeira parte do circuito medidor de  $V_{RE}$

Esse primeiro estágio possui uma impedância de entrada muito alta, assim não influenciando o circuito de teste. Ele conta com dois *buffers* de entrada e logo após amplificadores inversores de ganho unitário. A escolha de qual tensão será utilizada é decidida pelo pela unidade de controle da mesma forma que foi feito para o gerador de  $V_{bb}$ , utilizando as outras portas do mux analógico.

A segunda parte do circuito é de fato o amplificador de instrumentação, mostrado na Figura 2.23:



**Figura 2.23** - Amplificador de Instrumentação para medida da queda de tensão em  $R_E$

O amplificador de instrumentação foi escolhido por ter uma impedância de entrada muito alta (teoricamente infinita), evitando a atenuação de sinal na saída do mux ( $V_{RE+}$  e  $V_{RE-}$ ) e também por ter um fácil ajuste de ganho, pela variação do potenciômetro digital. O ganho pode ser calculado pela expressão (2.41):

$$V_R = \frac{2R_{31} + R_{DIGPOT\_RE}}{R_{DIGPOT\_RE}} \cdot \frac{R_{34}}{R_{33}} (V_{RE-} - V_{RE+}) \quad (2.41)$$

A expressão (2.41) é válida se:  $R_{31} = R_{32}$ ,  $R_{33} = R_{35}$  e  $R_{34} = R_{36}$ .

Dessa forma, podemos calcular qual será o ganho mínimo desse amplificador, que acontecerá quando o potenciômetro estiver com seu valor máximo:  $10k\Omega$ :

$$V_R' = \frac{2 \cdot 12k\Omega + 10k\Omega}{10k\Omega} \cdot \frac{12k\Omega}{12k\Omega} (V_{RE-} - V_{RE+}) \approx 2,5 \cdot (V_{RE-} - V_{RE+})$$

O ganho desse amplificador será definido no primeiro instante da realização das medidas. Uma vez escolhidas a faixa de corrente de base (ou tensões  $V_{GS}$ ) e tensão máxima  $V_{CE}$  ( $V_{DS}$ ) que serão utilizadas, a unidade de controle fará um teste para ajustar o maior ganho (através da variação do potenciômetro digital) que faça a tensão de saída  $V_R$  se aproximar de 5V (limite do ADC). Assim a resolução da medida maximizará.

Um módulo inversor de ganho unitário foi introduzido na saída, para gerar a tensão  $V_{R-}$ . Pois em alguns casos a tensão de saída do amplificador de instrumentação será negativa, sendo necessário transformá-la em positiva devido ao funcionamento do ADC. A escolha de qual tensão utilizar,  $V_R$  ou  $V_{R-}$ , será feita por outro multiplexador analógico (ANALOG1).

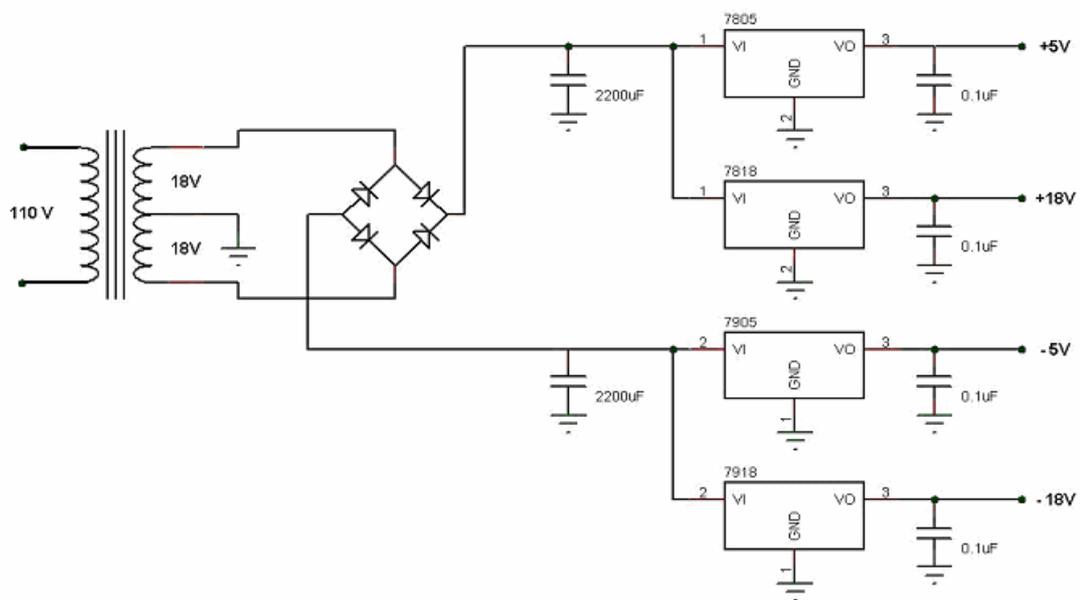
Para garantir que nenhuma tensão muito maior que 5V ou muito menor que 0V chegue ao pino do ADC, foi colocado na saída do mux um par de diodos. Assim, qualquer tensão maior que aproximadamente 5,6V será limitada pela a fonte de +5V e qualquer tensão menor que aproximadamente -0.6V será absorvida para a terra.

Uma figura com o circuito completo, com todos esses módulos interligados, está ao final do documento, no anexo I.

### **2.3.6. Fonte de Alimentação**

Para alimentar o circuito com todos os níveis de tensões exigidos, foi preciso projetar uma fonte de alimentação com quatro tensões de saída diferentes. Os amplificadores operacionais utilizam fontes simétricas de  $+18V_{DC}$  e  $-18V_{DC}$ . O multiplexador analógico utiliza fontes simétricas de  $+5V_{DC}$  e  $-5V_{DC}$ . Os DACs utilizam  $+5V_{DC}$ ,  $+18V_{DC}$  e  $-18V_{DC}$ . Os demais circuitos integrados utilizam  $+5V_{DC}$ .

Assim, foi montada uma fonte que atendesse a esses requisitos. A Figura 2.24 mostra o circuito:



**Figura 2.24** - Fonte de Alimentação

O projeto é bem simples devido à utilização de circuitos integrados reguladores de tensão. Esses reguladores funcionam com tensões de entrada não reguladas até o valor máximo de  $|35V|$  para  $V_o$  de 5V a 18V e suportam mais de 1A de corrente contínua. Para atingir esses valores, foi utilizado um transformador de 110/220V para 18+18V, 2A. Esse transformador tem uma tensão de saída pico-a-pico de  $18 \cdot \sqrt{2}$ , que é aproximadamente 25V. Após o transformador, foi colocada uma ponte de diodos para retificar o sinal e logo após um capacitor de  $2200\mu F$  40V para filtrar a tensão. Porém essa configuração possui um pequeno *ripple* que os reguladores conseguem “retirar” e acertar a tensão de saída para os valores desejados sem oscilações.

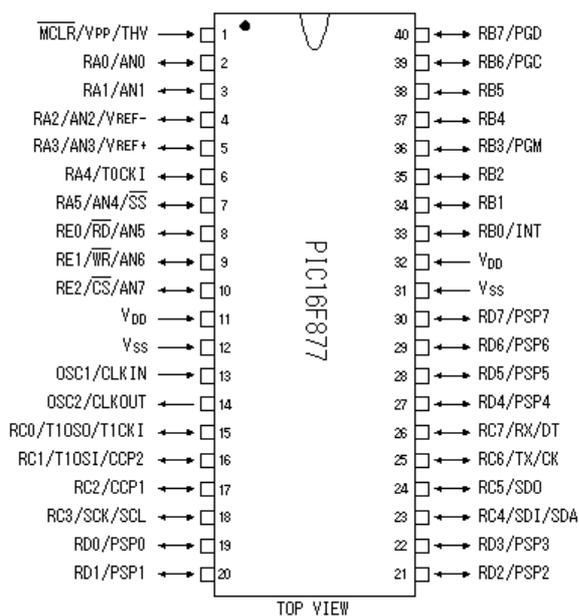
## 2.4. Microcontrolador

Para fazer o papel de unidade de controle automático nesse projeto foi escolhido um microcontrolador da família PIC, o PIC16F877A. Ele é um microcontrolador da família de 8 bits e núcleo de 14 bits fabricado pela *Microchip Technology*. Possui memória *Flash* de programa com 8192 palavras de 14 bits, memória RAM com 368 Bytes e memória EEPROM com 256 Bytes. Possui 5 portas de entrada e saída: uma de 5 pinos (PORTA), três de 8 pinos (PORTB, PORTC e PORTD) e uma de 3 pinos (PORTE). Sua frequência de operação vai até 20MHz, resultando em uma velocidade de processamento de 5 MIPS. Seu conjunto de instruções RISC se

compõe de 35 instruções. Pode funcionar com alimentação de 2V a 5,5V. Nesse projeto foi utilizada a frequência de operação de 4MHz, gerado por um cristal externo e foi utilizada a tensão de alimentação de 5V.

O PIC16F877A possui um conjunto de periféricos muito interessantes:

- Um conversor Analógico-Digital de 10 bits com 8 entradas multiplexadas
- Três *timers* (um de 8 bits e dois de 16 bits)
- Comparadores Analógicos
- USART
- Controladores de comunicação MSSP (I<sup>2</sup>C e SPI)
- Controladores PWM
- *Watchdog* timer
- Detectores de falha na alimentação



**Figura 2.25** - Diagrama de Pinos do PIC16F877/ PIC16F877A

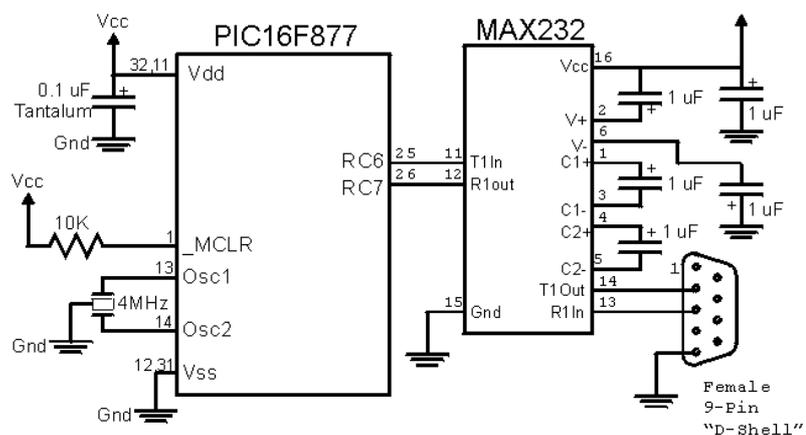
O PIC pode ser programado em linguagem mnemônica (assembly) ou utilizando-se compiladores de linguagem de alto nível (Pascal, C, Basic) que geram um código binário que é gravado na memória de programa desses microcontroladores. Para tal procedimento, utiliza-se um dispositivo especial (gravador) acoplado a um PC. Como ferramentas de desenvolvimento,

encontram-se disponíveis: gravadores, depuradores, emuladores, placas de protótipos, etc. Foi utilizada a linguagem C para programar o PIC, utilizando o compilador PICC e para transferir o arquivo binário para PIC, foi utilizado o MPLab. O gravador utilizado foi o McPlus, da Labtools, que é um gravador de baixo custo e capaz de gravar várias famílias de PIC's.

De seus 5 conjuntos de portas disponíveis, foram utilizados integralmente dois, para acoplar conversores Digitais-Analógico. Outras portas foram utilizadas como: um pino para entrada do ADC, dois pinos para interface de comunicação serial (RS232) e quatro pinos para a interface SPI. Foram também utilizados mais dois pinos para controles do hardware, num total de 25 pinos de entrada e saída utilizados do PIC.

### **Comunicação com a Porta Serial:**

Para fazer a comunicação entre o software e o hardware, foi utilizada a porta serial do computador. Para o PIC poder entender os dados recebidos pela porta serial e vice-versa, foi utilizado o circuito integrado MAX232, que é um conversor de sinais RS232/TTL. Na Figura 2.26 podemos ver como foi realizada a montagem desta parte do circuito ([4], página 20):



**Figura 2.26 - PIC e a ligação com a Porta Serial**

### **Conversor Analógico-Digital (ADC):**

O fato de possuir conversor Analógico-Digital interno foi um dos fatores determinantes para a escolha do PIC16F877A, pois assim não foi preciso adicionar mais um módulo ao circuito principal, deixando-o mais simples. Ele foi utilizado para representar, de maneira digital, as

tensões dos pontos importantes do circuito, de onde saíram as principais informações sobre o transistor em teste para serem processadas posteriormente no software.

O conversor interno possui 8 canais (AN0...AN7) com 10 bits de resolução cada. Por software, podem-se escolher quais canais utilizar, deixando assim, os outros pinos livres para outras aplicações.

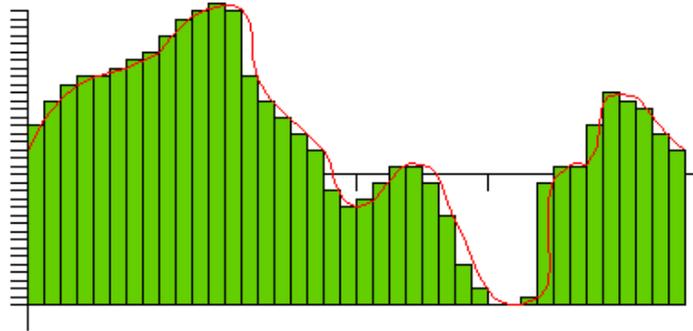
Para que o conversor possa gerar uma representação digital de uma tensão, é preciso que ele tenha uma tensão de referência. Essa tensão representa o valor máximo de entrada, ou seja, no conversor, quando a tensão de entrada coincidir com a tensão de referência, a saída do conversor terá todos os seus bits iguais a 1. No caso do PIC, a tensão de referência pode ser a tensão de alimentação do PIC ou então, uma outra qualquer, colocada nos pinos  $V_{ref+}$  e  $V_{ref-}$  contanto que estejam no intervalo de 0 a 5V. Nesse projeto, foi utilizada a tensão de alimentação do PIC como referência. A Tabela 2 mostra todas as configurações possíveis dos pinos do ADC do PIC16F877A ([4], página 209):

| PCFG3:<br>PCFG0 | AN7 <sup>(1)</sup><br>RE2 | AN6 <sup>(1)</sup><br>RE1 | AN5 <sup>(1)</sup><br>RE0 | AN4<br>RA5 | AN3<br>RA3 | AN2<br>RA2 | AN1<br>RA1 | AN0<br>RA0 | VREF+ | VREF- | CHAN/<br>Refs <sup>(2)</sup> |
|-----------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------|-------|------------------------------|
| 0000            | A                         | A                         | A                         | A          | A          | A          | A          | A          | VDD   | VSS   | 8/0                          |
| 0001            | A                         | A                         | A                         | A          | VREF+      | A          | A          | A          | RA3   | VSS   | 7/1                          |
| 0010            | D                         | D                         | D                         | A          | A          | A          | A          | A          | VDD   | VSS   | 5/0                          |
| 0011            | D                         | D                         | D                         | A          | VREF+      | A          | A          | A          | RA3   | VSS   | 4/1                          |
| 0100            | D                         | D                         | D                         | D          | A          | D          | A          | A          | VDD   | VSS   | 3/0                          |
| 0101            | D                         | D                         | D                         | D          | VREF+      | D          | A          | A          | RA3   | VSS   | 2/1                          |
| 011x            | D                         | D                         | D                         | D          | D          | D          | D          | D          | VDD   | VSS   | 0/0                          |
| 1000            | A                         | A                         | A                         | A          | VREF+      | VREF-      | A          | A          | RA3   | RA2   | 6/2                          |
| 1001            | D                         | D                         | A                         | A          | A          | A          | A          | A          | VDD   | VSS   | 6/0                          |
| 1010            | D                         | D                         | A                         | A          | VREF+      | A          | A          | A          | RA3   | VSS   | 5/1                          |
| 1011            | D                         | D                         | A                         | A          | VREF+      | VREF-      | A          | A          | RA3   | RA2   | 4/2                          |
| 1100            | D                         | D                         | D                         | A          | VREF+      | VREF-      | A          | A          | RA3   | RA2   | 3/2                          |
| 1101            | D                         | D                         | D                         | D          | VREF+      | VREF-      | A          | A          | RA3   | RA2   | 2/2                          |
| 1110            | D                         | D                         | D                         | D          | D          | D          | D          | A          | VDD   | VSS   | 1/0                          |
| 1111            | D                         | D                         | D                         | D          | VREF+      | VREF-      | D          | A          | RA3   | RA2   | 1/2                          |

A = Analog input    D = Digital I/O

**Tabela 2** - Configurações do ADC

Pela sua natureza, um ADC introduz um erro de quantificação, que representa a informação que é perdida. Para um sinal contínuo existe um número infinito de tensões, mas um número finito de valores convertidos pelo ADC. O aumento da resolução diminui a informação perdida devido a erros de quantificação.



**Figura 2.27 - Conversão Analógica-Digital**

Como o conversor do PIC possui 10 bits, sua saída pode variar de 0 até 1023 ( $2^{10} = 1024$  valores), onde 0 (0000000000) representa '0 Volts' e 1023 (1111111111) representa '5 Volts'. Dessa maneira podemos calcular qual a sua resolução:

$$R = \frac{5V}{1023} \approx 0,00489V$$

Ou seja, cada incremento no vetor de saída do ADC vale aproximadamente 5mV, em outras palavras, o ADC é sensível a mudanças de tensão de 5mV na sua entrada.

### ***Interface SPI:***

Outra característica muito importante desse PIC é que ele possui uma interface *SPI*, que é um protocolo de comunicação que foi utilizado para o microcontrolador se comunicar e controlar o valor da resistência de dois potenciômetros digitais.

*SPI* é um protocolo síncrono de comunicação serial que opera em *Full-Duplex*, os dispositivos se comunicam de maneira mestre-escravo onde o dispositivo mestre inicia a comunicação. Múltiplos escravos podem ser adicionados na comunicação, cada um com sua própria linha de seleção (*chip select*). Esse protocolo utiliza apenas três fios para que a comunicação aconteça, um de *clock*, um de dados e um *chip select* para cada dispositivo escravo.

Nesse projeto, o dispositivo mestre é o microcontrolador e os escravos são os potenciômetros digitais.

Os potenciômetros digitais escolhidos para esse projeto foram do modelo MCP41010, que são potenciômetros de 10kΩ e 8 bits de resolução. Logo, esses potenciômetros podem variar sua resistência em 256 valores diferentes. Para cada dispositivo, podemos calcular o valor de suas

duas resistências  $R_A$  e  $R_B$  da forma:

$$R_A = 10k\Omega \frac{256 - D_n}{256} \quad \text{e} \quad R_B = 10k\Omega \frac{D_n}{256}$$

Onde  $D_n$  é o valor decimal enviado pelo microcontrolador.

Também podemos saber o valor de cada incremento da resistência de cada um desses resistores:

$$R_{INC} = \frac{10k\Omega}{255} \approx 0,039k\Omega$$

Ou seja, cada incremento da resistência vale aproximadamente  $39\Omega$ . A Figura 2.28 mostra a maneira como o potenciômetro foi ligado ao microcontrolador:

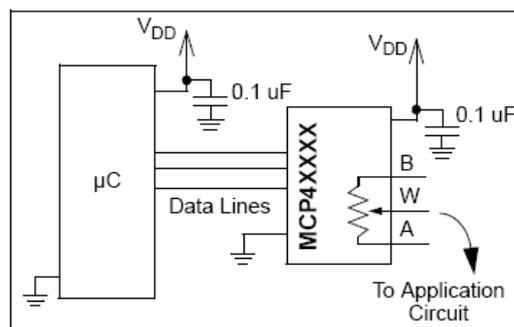
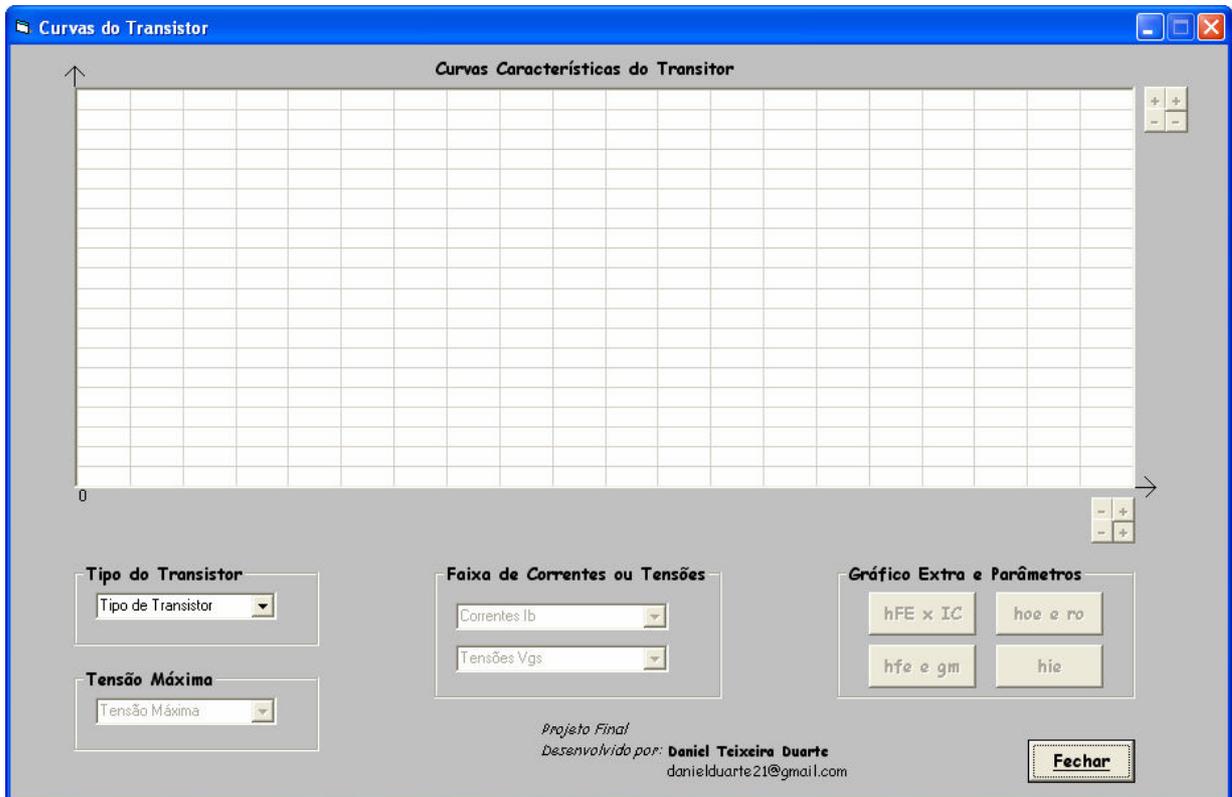


Figura 2.28 - Potenciômetro Digital com Microcontrolador

## 2.5. Software

Esse tópico discutirá como o software foi implementado, assim como todas as características pertinentes ao seu funcionamento. Serão apresentadas todas as telas do programa, suas funções específicas e como foram construídas. Também será discutido o protocolo de comunicação entre o *software* e o *hardware*.

A Figura 2.29 ilustra a tela inicial do programa. Essa é também a tela principal, onde os parâmetros iniciais são escolhidos pelo usuário para início das medidas das características do transistor.



**Figura 2.29** - Tela Inicial do *Software*

Nessa tela também será traçado o gráfico principal do equipamento - “*Curvas características do Transistor*”:  $I_C \times V_{CE}$  ou  $I_D \times V_{DS}$  - e de onde se pode escolher visualizar outras telas com outros gráficos ou parâmetros.

### ***Escolha dos Parâmetros Iniciais***

Para o começo das medidas, o usuário deverá primeiramente selecionar qual tipo de transistor será testado, podendo este ser um BJT NPN ou PNP, MOSFET ou JFET canal N ou canal P.

Logo após, deverá escolher a tensão máxima de  $V_{CE}$ , no caso de um BJT ou  $V_{DS}$  no caso de um FET. Essa tensão pode ser de 3,7V, 7,4V, 11V ou 15V.

Depois de escolher a tensão máxima de coletor, a caixa de seleção (“*combo box*”) da escolha da faixa de corrente de base ( $I_B$ ) ou faixa de tensão  $V_{GS}$  será liberada, dependendo do tipo de transistor escolhido.

Agora, o usuário deve escolher qual a faixa de corrente de base ou tensão  $V_{GS}$  quer utilizar para realizar as medidas. Cada uma delas será dividida em oito partes, sendo os valores reais muito próximos ao mínimo e ao máximo dos limites da faixa escolhida.

A partir daí, o programa enviará para o circuito, através da porta serial, os dados de acordo com a escolha do usuário e ficará aguardando a resposta para poder traçar os gráficos e calcular os parâmetros.

### ***Comunicação (Protocolo utilizado)***

Como já explicado nos tópicos anteriores, a comunicação *software-hardware* se dará através da porta serial (RS-232) do computador. Ao iniciar o programa, o usuário deverá informar qual porta serial será utilizada.



**Figura 2.30** - Escolha da Porta Serial

Para que a comunicação aconteça, alguns parâmetros da porta serial devem ser configurados de forma idêntica dos dois lados. Para isso, foram escolhidas as seguintes configurações:

- Taxa de transferência (*baud rate*): 9600 bps
- Bit de paridade: Não
- Bits de dados: 8
- Stop Bit: 1

Ainda assim, foi preciso criar um protocolo de comunicação para que cada parte do equipamento interprete os comandos de controle perfeitamente. Esse protocolo que gerencia a comunicação será baseado em *strings* de comandos.

### Dados enviados

Assim que todos os parâmetros iniciais forem escolhidos, o programa enviará para o circuito uma *string* com cinco caracteres. O primeiro caractere representa o tipo de *string* e dependendo desse caractere, os seguintes terão significados diferentes. A Tabela 3 mostra como podem ser formadas as *strings* de comando:

| 1º caractere | 2º caractere       | 3º caractere      | 4º caractere              | 5º caractere |
|--------------|--------------------|-------------------|---------------------------|--------------|
| R            | Tipo de transistor | Faixa de corrente | Tensão máxima de $V_{CE}$ | Fim de linha |
| R            | Tipo de transistor | Faixa de tensão   | Tensão máxima de $V_{DS}$ | Fim de linha |
| H            | Tipo de transistor | Faixa de corrente | Tensão $V_{CE}$ definida  | Fim de linha |
| H            | Tipo de transistor | Faixa de tensão   | Tensão $V_{DS}$ definida  | Fim de linha |

Tabela 3 - String de Comando Enviada

O primeiro caractere, que representa o tipo de *string*, pode ser de dois tipos diferentes: ‘H’ ou ‘R’. Através desse caractere, o PIC escolherá qual tipo de configuração deverá fazer no circuito e quais medidas realizar. Se for ‘R’, serão feitas as medidas principais, se for ‘H’, fará as medidas relativas à obtenção do parâmetro  $h_{fe}$  (para o BJT) ou  $g_m$  (para o FET).

O segundo caractere é um algarismo que representa o tipo de transistor, esse algarismo é o índice da “*combo box*” da escolha do transistor e pode variar de 0 a 5. A Tabela 4 mostra a relação entre o índice e o tipo de transistor:

| Índice | 2º caractere   |
|--------|----------------|
| 0      | BJT NPN        |
| 1      | BJT PNP        |
| 2      | MOSFET Canal N |
| 3      | MOSFET Canal P |
| 4      | JFET Canal N   |
| 5      | JFET Canal P   |

Tabela 4 - Tipo de Transistor

O terceiro caractere representa a faixa de corrente de base ou tensão  $V_{GS}$  escolhida para testar o transistor e pode variar de 0 a 9 e de A à F, conforme a Tabela 5:

| Caractere | Faixa de Corrente $I_B$   | Faixa de Tensão $V_{GS}$ |
|-----------|---------------------------|--------------------------|
| 0         | 10 $\mu$ A – 80 $\mu$ A   | 0 V – 1 V                |
| 1         | 90 $\mu$ A – 160 $\mu$ A  | 1 V – 2 V                |
| 2         | 170 $\mu$ A – 240 $\mu$ A | 2 V – 3 V                |
| 3         | 250 $\mu$ A – 320 $\mu$ A | 3 V – 4 V                |
| 4         | 330 $\mu$ A – 400 $\mu$ A | 4 V – 5 V                |
| 5         | 410 $\mu$ A – 470 $\mu$ A | 5 V – 6 V                |
| 6         | 480 $\mu$ A – 550 $\mu$ A | 6 V – 7 V                |
| 7         | 560 $\mu$ A – 630 $\mu$ A | 7 V – 8 V                |
| 8         | 640 $\mu$ A – 710 $\mu$ A | 8 V – 9 V                |
| 9         | 720 $\mu$ A – 790 $\mu$ A | 9 V – 10 V               |
| A         | 800 $\mu$ A – 860 $\mu$ A | 10 V – 11 V              |
| B         | 870 $\mu$ A – 930 $\mu$ A | 11 V – 12 V              |
| C         | 940 $\mu$ A – 1,1 mA      | 12 V – 13 V              |
| D         | 1 mA – 2 mA               | 13 V – 14 V              |
| E         | 2 mA – 3 mA               | 14 V – 15 V              |
| F         | 3 mA – 5 mA               | 15 V – 16 V              |

**Tabela 5** - Faixa de Corrente  $I_B$  ou de Tensão  $V_{GS}$

O quarto caractere é um algarismo que representa a tensão máxima de  $V_{CE}$  ou  $V_{DS}$  que será utilizada para realizar as medidas principais, conforme a Tabela 6:

| Caractere | Tensão Máxima de $V_{CE}$ ou $V_{DS}$ |
|-----------|---------------------------------------|
| 0         | 3,7 V                                 |
| 1         | 7,4 V                                 |
| 2         | 11 V                                  |
| 3         | 15 V                                  |

**Tabela 6** - Tensão Máxima de  $V_{CE}$  ou  $V_{DS}$

O quarto caractere também pode representar qual tensão de  $V_{CE}$  será utilizada para a medida do parâmetro  $h_{fe}$  ou qual a tensão de  $V_{DS}$  será utilizada para medida do parâmetro  $g_m$ . Esse valor varia dependendo da escolha anterior de qual tensão máxima de  $V_{CE}$  ou  $V_{DS}$  foi utilizada para a primeira medida. A Tabela 7 mostra a relação entre esse caractere e o valor da tensão escolhida:

| Caractere | Tensão Máxima de $V_{CE}$ ou $V_{DS}$ |        |         |         |
|-----------|---------------------------------------|--------|---------|---------|
|           | 3,7 V                                 | 7,4 V  | 11 V    | 15 V    |
| 0         | 0,46 V                                | 0,93 V | 1,38 V  | 1,88 V  |
| 1         | 0,93 V                                | 1,85 V | 2,75 V  | 3,75 V  |
| 2         | 1,39 V                                | 2,78 V | 4,13 V  | 5,63 V  |
| 3         | 1,85 V                                | 3,70 V | 5,50 V  | 7,50 V  |
| 4         | 2,31 V                                | 4,63 V | 6,88 V  | 9,38 V  |
| 5         | 2,78 V                                | 5,55 V | 8,25 V  | 11,25 V |
| 6         | 3,24 V                                | 6,48 V | 9,63 V  | 13,13 V |
| 7         | 3,70 V                                | 7,40 V | 11,00 V | 15,00 V |

**Tabela 7** - Tensão  $V_{CE}$  ou  $V_{DS}$  para Medida de  $h_{fe}$  ou  $g_m$

O quinto e último caractere é apenas um fim de linha, para informar que a *string* de comando acabou.

### ***Interpretação dos Dados Recebidos***

Após a realização das medidas, o PIC deverá enviar as informações ao programa para que este possa fazer as contas e gerar os gráficos e tabelas. A *string* de retorno contendo essas informações também será formada por cinco caracteres, entretanto, a configuração dessa *string* se dará de uma forma diferente. O primeiro caractere informa qual o tipo de dado que segue e os outros quatro representam a leitura do conversor analógico-digital, que como possui 10 bits de resolução, seu valor pode variar entre 0 e 1023, ou o valor do potenciômetro digital que controla o ganho do amplificador de instrumentação para medida da queda de tensão no resistor de coletor, que pode variar de 0 a 255. A Tabela 8 define a representação da *string* de retorno:

| <b>1º Caractere</b> | <b>Demais caracteres (Dados)</b>   |
|---------------------|--|
| I                   | Leitura do ADC para tensão no resistor de emissor (0000 a 1023)                                |
| P                   | Valor do potenciômetro digital (0000 a 0255)   |
| i                   | Leitura do ADC para tensão no resistor de emissor na medida de $h_{fe}$ ou $g_m$ (0000 a 1023) |

**Tabela 8** - String de Retorno

Para realizar todos os cálculos, o software deverá esperar por todas as *strings* de retorno. No caso das medidas principais, serão 257 *strings*. Serão 32 para  $V_{RE}$  para cada  $I_B$  ou  $V_{GS}$  mais uma para o valor do potenciômetro. Para a medida de  $h_{fe}$  (ou  $g_m$ ), serão 16 *strings* para o valor de  $V_{RE}$  (um par de medidas para cada  $I_B$  ou  $V_{GS}$ ).

### ***Gráficos Gerados***

Como já foi dito anteriormente, esse equipamento é capaz de gerar dois gráficos diferentes para o BJT:  $I_C \times V_{CE}$  e  $h_{FE} \times I_C$  e um para o FET:  $I_D \times V_{DS}$ . Esses gráficos são detalhados mais à frente.

Após receber todos os dados do circuito e separá-los por função, o programa começará a realizar as contas para gerar os gráficos e calcular os parâmetros. Assim que finalizar essa etapa, o programa desenhará na tela principal o gráfico  $I_C \times V_{CE}$  ou  $I_D \times V_{DS}$ , como pode ser visto na Figura 2.31 e na Figura 2.32:

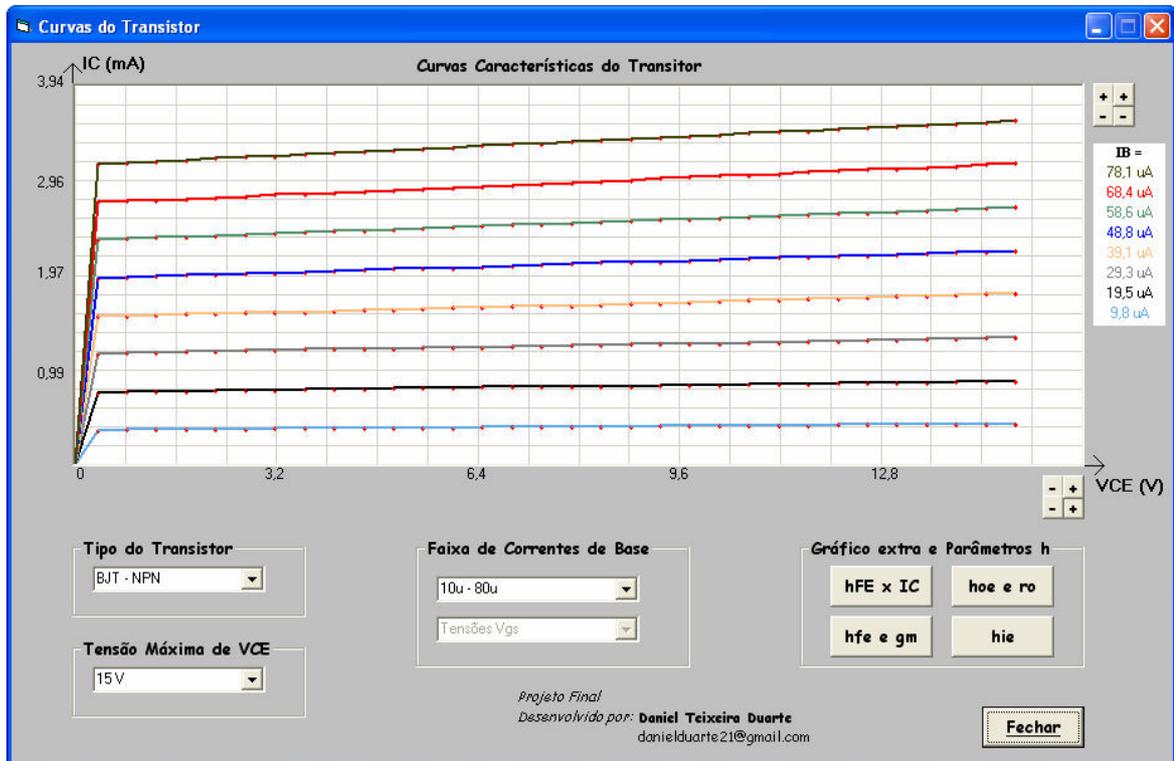


Figura 2.31 - Gráfico  $I_C \times V_{CE}$

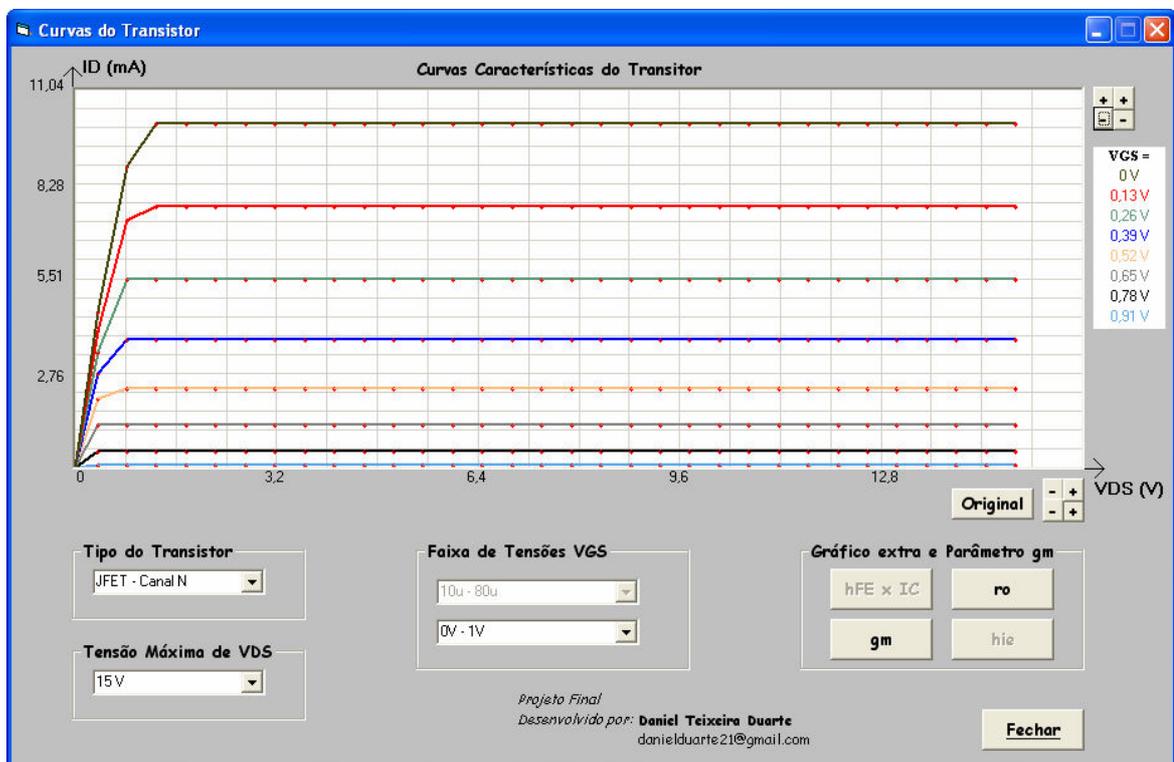


Figura 2.32 - Gráfico  $I_D \times V_{DS}$

Agora os botões para visualização do gráfico  $h_{FE} \times I_C$  (para o teste de um BJT) e dos parâmetros serão liberados. Também será possível, a partir dessa tela, dar zoom horizontal e vertical, assim como deslocar o gráfico nessas direções (ao passar o mouse sobre os botões de zoom ou de deslocamento, uma “dica” aparecerá para informar a função de tal botão – botões de ‘+’ e ‘-’ do lado direito da figura). Se for utilizado o botão de zoom ou deslocamento, o botão de desenho do gráfico original será habilitado, como na Figura 2.32.

O gráfico aparece com uma cor para cada  $I_B$  da faixa de corrente escolhida ou para cada  $V_{GS}$  e a legenda ao lado aparece com as mesmas cores para uma fácil identificação.

Ao passar o *mouse* pelo gráfico, este mostrará as coordenadas (x,y), facilitando identificação do ponto indicado.

Para uma melhor resolução do gráfico na região próxima à saturação, pode-se testar o transistor com uma tensão  $V_{CE}$  menor, assim como na Figura 2.33:

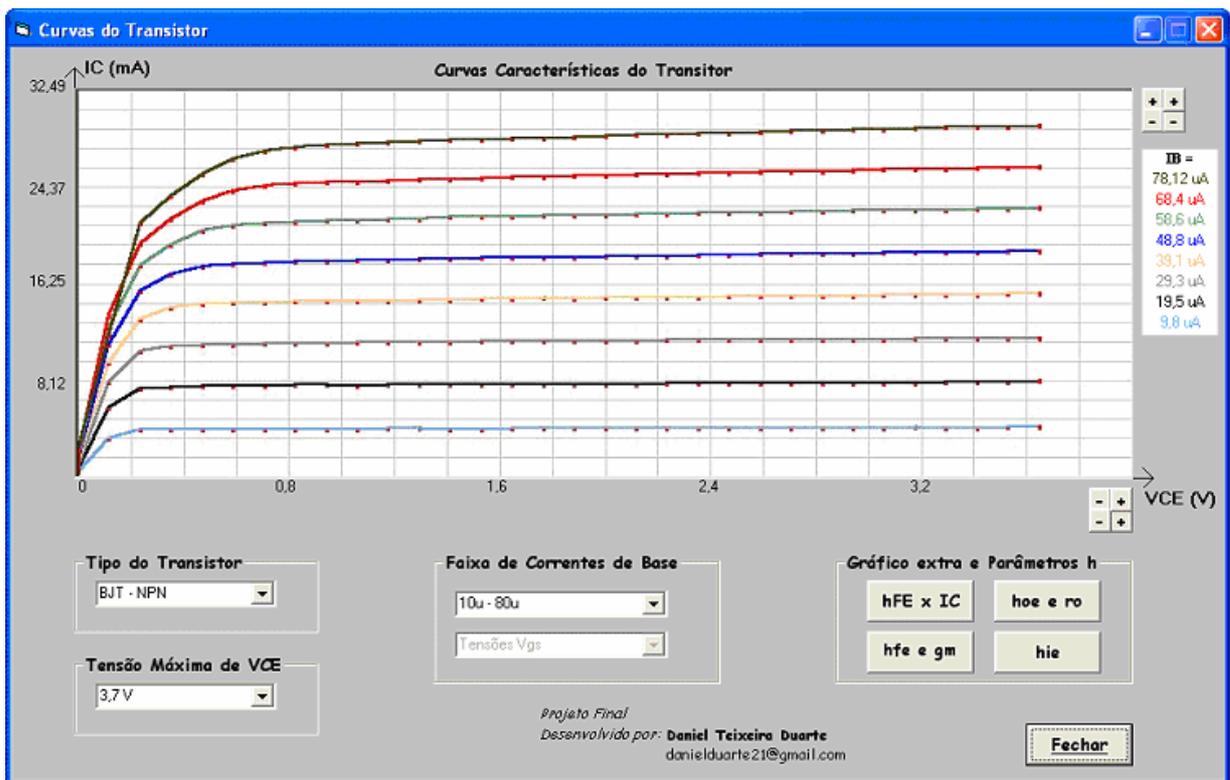


Figura 2.33 - Gráfico  $I_C \times V_{CE}$  com melhor resolução na região de saturação

Dessa forma, a região de saturação fica com mais pontos, melhorando a identificação de onde as curvas começam a entrar na região ativa.

Outro gráfico que é gerado, é o de  $h_{FE} \times I_C$ . Esse pode ser acessado ao clicar em um botão específico na tela principal. Uma outra tela aparecerá, e nela, o usuário deverá escolher para qual valor de  $V_{CE}$  o gráfico deve ser gerado. A partir daí, o programa irá aos dados recebidos e gerará a curva que representa o ganho de corrente contínua ( $h_{FE}$ , ou  $\beta_{DC}$ ) em função da corrente de coletor.

O gráfico possui uma linha com os 8 pontos coloridos representando os pontos exatos medidos no circuito, um para cada  $I_B$ . Da mesma forma que o gráfico anterior, ao passar o *mouse* sobre a tela, ele indicará as coordenadas (x,y). A Figura 2.34 mostra a tela deste gráfico:

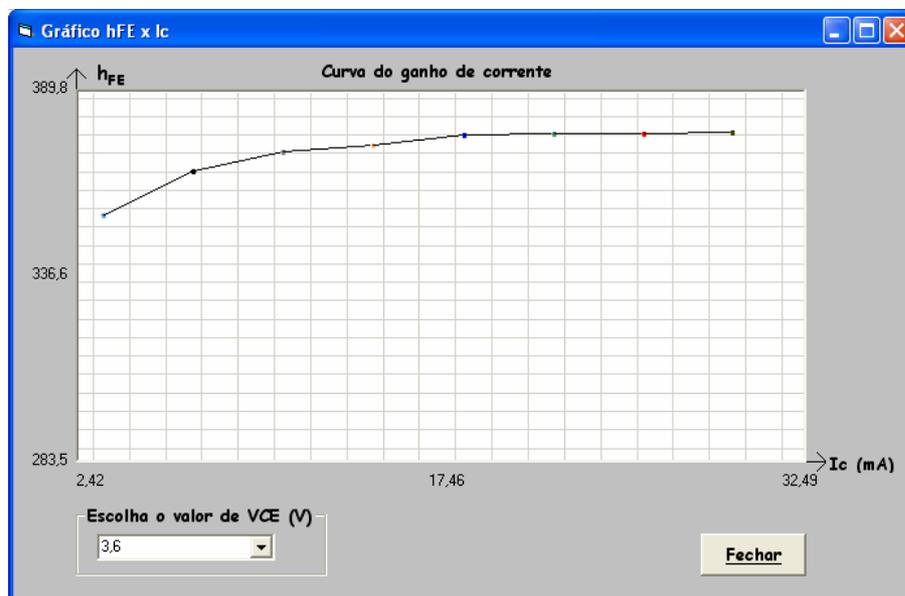


Figura 2.34 - Gráfico  $h_{FE} \times I_C$

### Parâmetros Calculados

Nesse projeto, além dos gráficos gerados, serão calculados mais três parâmetros híbridos do transistor BJT:  $h_{fe}$ ,  $h_{ie}$  e  $h_{oe}$ . Além da transcondutância  $g_m$  e a resistência de saída  $r_o$  para o BJT e para o FET. Todos esses serão apresentados em forma de tabelas, com valores separados para cada corrente  $I_B$  ou tensão  $V_{GS}$  distinta.

O primeiro parâmetro a ser mostrado será  $h_{oe}$ . Este pode ser calculado pela definição descrita na seção 2.1 sobre os parâmetros híbridos do transistor, e representada novamente aqui:

$$h_{oe} \equiv \left. \frac{\partial i_C}{\partial v_{CE}} \right|_{I_B} \equiv \left. \frac{\Delta i_C}{\Delta v_{CE}} \right|_{I_B} \quad (2.42)$$

Como descrito anteriormente,  $h_{oe}$  equivale ao inverso da resistência de saída do BJT (ou FET) vista pelo coletor (ou Dreno),  $r_o$ . Para facilitar,  $r_o$  também aparecerá como mais uma coluna da tabela.

Pode-se entender por  $h_{oe}$  também como a inclinação da curva do gráfico  $I_C \times V_{CE}$  na região ativa do BJT. Dessa forma, para calcular esse parâmetro, o programa escolhe um  $V_{CE}$  que se encontre na região ativa e assim  $\Delta V_{CE}$  pode ser calculado pela diferença entre esse ponto e o último ponto da curva. Da mesma forma,  $\Delta I_C$  é calculado pela diferença dos pontos equivalentes no vetor de  $I_C$ . Essas contas serão feitas para cada valor de  $I_B$ . Depois de calculados os valores de  $h_{oe}$ , o valor de  $r_o$  também é calculado e exibido na tabela.

Para o transistor FET, a resistência  $r_o$  possui a mesma interpretação, porém,  $h_{oe}$  não é usual para esse tipo de transistor. Dessa forma, quando o transistor de teste for um FET, a coluna  $h_{oe}$  ficará sem valores.

Para ver a tabela dos parâmetros  $h_{oe}$  e  $r_o$ , basta clicar no botão específico na tela principal do programa após a realização das medidas e escolher um  $V_{CE}$ . A Figura 2.35 representa a tela que será exibida:

| IC      | hoe      | ro         |
|---------|----------|------------|
| 1,8 mA  | 13 uS    | 77 kahms   |
| 3,7 mA  | 32,5 uS  | 30,8 kahms |
| 5,6 mA  | 51,9 uS  | 19,3 kahms |
| 7,6 mA  | 71,4 uS  | 14 kahms   |
| 9,5 mA  | 84,4 uS  | 11,9 kahms |
| 11,5 mA | 103,9 uS | 9,6 kahms  |
| 13,4 mA | 129,8 uS | 7,7 kahms  |
| 15,3 mA | 142,8 uS | 7 kahms    |

Escolha o valor de VCE (V)

7.4

Fechar

Figura 2.35 - Cálculo de  $h_{oe}$  e  $r_o$

O segundo parâmetro híbrido a ser mostrado pelo equipamento será  $h_{fe}$ . Esse parâmetro pode ser calculado pela definição mostrada também no capítulo sobre os parâmetros híbridos do transistor e que é rerepresentada aqui pela equação (2.43):

$$h_{fe} \equiv \left. \frac{\partial i_C}{\partial i_B} \right|_{V_{CE}} \equiv \left. \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} \right|_{V_{CE}} \quad (2.43)$$

Para realizar essa medida, o *software* deverá enviar para o circuito o valor de  $V_{CE}$  para qual deve ser feita a medida. Depois dessa etapa, o circuito, então, fará pequenas variações de  $v_{bb}$  a fim de gerar correntes de base próximas aos valores gerados para as medidas principais. Essa variação é próxima de  $5\mu A$ . Assim, serão medidos dois valores de  $I_C$  para cada valor de  $I_B$  principal.

Depois de enviados os dados para o programa, esse poderá calcular  $\Delta i_B$  pela variação causada em  $v_{bb}$ , já que dessa forma, serão conhecidos os dois valores de  $I_B$  que deverão ser gerados no circuito, e  $\Delta i_C$  pela diferença dos valores de  $I_C$  recebidos.

De maneira similar, o parâmetro  $g_m$  é calculado para o FET. A equação que calcula esse parâmetro é repetida aqui por conveniência:

$$g_m \equiv \frac{\Delta i_D}{\Delta v_{GS}} \quad (2.44)$$

O *software* envia o valor de  $V_{DS}$  e, ao invés de gerar variações de correntes de base, o circuito fará variações da tensão  $V_{GS}$ . Essa variação é próxima de  $260mV$ . A variação  $\Delta v_{GS}$  já é conhecida, então o programa calcula  $\Delta i_D$  pela diferença dos valores  $I_D$  recebidos.

O parâmetro  $g_m$  para o BJT é representado pela equação (2.45):

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} \quad (2.45)$$

O parâmetro  $g_m$  para o BJT será calculado junto com o parâmetro  $h_{fe}$ .  $I_C$  representa o nível médio da corrente de coletor  $i_C$  que será medida e  $V_T$ , representa a tensão térmica do transistor e vale aproximadamente  $26mV$  para a temperatura ambiente de  $27^\circ C$ .

Para ver a tabela com os valores de  $h_{fe}$  e  $g_m$ , basta clicar no botão específico na tela principal do programa após a realização das medidas. A Figura 2.36 representa a tela que será exibida:

| IC       | hfe | gm          |
|----------|-----|-------------|
| 1,76 mA  | 199 | 67,67 mA/V  |
| 3,74 mA  | 194 | 143,81 mA/V |
| 5,67 mA  | 199 | 218,06 mA/V |
| 7,6 mA   | 194 | 292,32 mA/V |
| 9,51 mA  | 194 | 365,63 mA/V |
| 11,44 mA | 199 | 439,88 mA/V |
| 13,37 mA | 194 | 514,14 mA/V |
| 15,27 mA | 194 | 587,45 mA/V |

Escolha o valor de VCE (V): 7.4

Fechar

Figura 2.36 - Cálculo de  $h_{fe}$  e  $g_m$

O parâmetro  $h_{fe}$ , assim como  $h_{oe}$ , também não faz sentido para o transistor FET. Por isso, para esse tipo de transistor, a coluna  $h_{fe}$  ficará em branco.

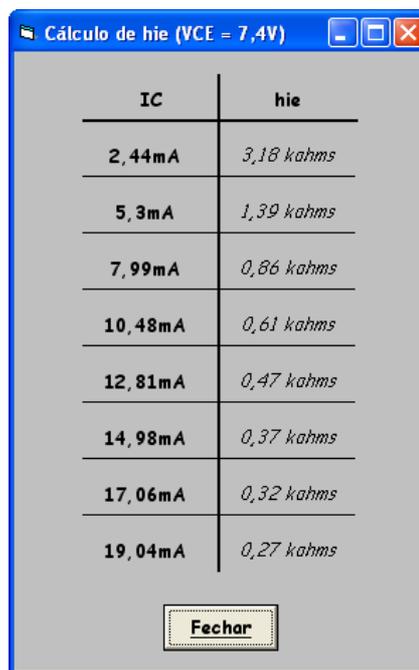
O último parâmetro híbrido a ser mostrado será  $h_{ie}$ . Esse parâmetro, como já foi dito anteriormente, representa a resistência de entrada do BJT vista pela base, e é representada também por  $r_\pi$  no modelo  $\pi$ -híbrido.  $r_\pi$  pode ser calculado pelas seguintes fórmulas definidas no capítulo sobre o modelo de pequenos sinais do transistor:

$$r_\pi \equiv \frac{v_{be}}{i_b} \quad (2.46); \quad r_\pi = \frac{h_{fe}}{g_m} \quad (2.47); \quad r_\pi = h_{fe} \cdot \frac{V_T}{I_C} \quad (2.48)$$

Por uma questão de conveniência, foi escolhida a fórmula (2.48) para calcular o valor de

$r_{\pi}$ , já que  $I_C$  e  $V_T$  são conhecidos e  $h_{fe}$  já foi calculado.

Para ver a tabela com os valores de  $h_{ie}$  ( $r_{\pi}$ ), basta clicar no botão específico na tela principal do programa após a realização das medidas de  $h_{fe}$ . A tabela irá conter, para um determinado valor de  $V_{CE}$  (utilizado para o cálculo do parâmetro  $h_{fe}$ ), um valor de  $h_{ie}$  para cada  $I_C$ . A Figura 2.37 ilustra a tela que será exibida:



| <b>IC</b>      | <b>hie</b>        |
|----------------|-------------------|
| <b>2,44mA</b>  | <i>3,18 kohms</i> |
| <b>5,3mA</b>   | <i>1,39 kohms</i> |
| <b>7,99mA</b>  | <i>0,86 kohms</i> |
| <b>10,48mA</b> | <i>0,61 kohms</i> |
| <b>12,81mA</b> | <i>0,47 kohms</i> |
| <b>14,98mA</b> | <i>0,37 kohms</i> |
| <b>17,06mA</b> | <i>0,32 kohms</i> |
| <b>19,04mA</b> | <i>0,27 kohms</i> |

**Fechar**

Figura 2.37 - Cálculo de  $h_{ie}$  ( $r_{\pi}$ )

## 2.6. Softwares Utilizados

Para desenvolver esse projeto alguns softwares foram utilizados tanto para o desenvolvimento do projeto como para a realização de testes e simulações dos circuitos eletrônicos.

A utilização de softwares de simulação gera uma grande facilidade, pois dessa forma o projeto pode ser desenvolvido e testado simultaneamente. Várias partes podem ser testadas separadamente e logo depois simuladas em conjunto, assim, pode-se consertar algum erro ou problema de integração desses circuitos. Foram utilizados dois programas de simulação de

circuitos: *Orcad Pspice*, e o *Proteus VSM*.

O *Orcad Pspice* é uma versão de programa baseado no SPICE (*Simulated Program with Integrated Circuits Emphasis*, ou Programa de Simulação com Ênfase em Circuitos Integrados). É uma poderosa ferramenta usada para testar, e antever comportamento de circuitos contendo circuitos integrados, resistores, transistores, capacitores, diodos e outros componentes elétricos e eletrônicos. É também o programa mais confiável de simulação de circuitos disponível no mercado, porém não conta com dispositivos mais sofisticados, como um microcontrolador, não é possível assim simular a parte de inteligência do projeto. Mesmo assim, foi utilizado para testar as outras partes e a integração dessas. Foi utilizada a versão 9.2 desse software.

O outro programa utilizado foi o *Proteus Virtual System Modelling*. Este também é um ótimo programa de simulação de circuitos analógicos baseado em SPICE, e conta com uma grande vantagem sobre o *Orcad*, pois ele pode simular o funcionamento de microcontroladores, basta que nas opções do dispositivo (no caso desse projeto, um PIC16F877A), indique qual arquivo binário (".hex") se deseja utilizar. Ele também conta com um dispositivo que simula a porta serial e assim pode se comunicar com o "mundo externo" como se fosse um *hardware* de verdade. Outra vantagem do *Proteus VSM* é que ele faz as simulações em tempo real. Primeiramente foi utilizada a versão 6.9 SP4 (*service pack 4*) e posteriormente a versão 7.1 SP2 desse software. Para desenvolver a placa de circuito impresso, também foi utilizado esse software, que assim como o *Orcad* é capaz de gerar de forma manual ou automática o layout para a placa.

Para programar o microcontrolador, foi utilizado o CCS PIC C COMPILER ou PCW, um compilador altamente utilizado pelos programadores nos dias atuais e que utiliza a linguagem C e não assembly. A linguagem C, apesar de gerar códigos maiores (gastam mais memória) do que os escritos em assembly, apresenta algumas vantagens. Uma vantagem da linguagem C está no fato da geração de código para uma situação complexa ser muito mais simples que a geração por uma instrução de linguagem de máquina. A linguagem C permite também que os programas possam ser escritos de forma estruturada, facilitando a manutenção e aumentando o reaproveitamento de trechos já escritos do programa. A desvantagem da linguagem C pode ser contornada, um programador experiente pode gerar os programas em linguagem C, refinando posteriormente com otimizações que tragam um menor custo de memória, muito próximo ao que seria gerado se o

programa fosse escrito em assembly. Foi utilizada a versão 4.0.13 desse software.

Para transferir o programa para o microcontrolador, foi utilizado o MpLab. Essa é uma ferramenta gratuita da Microchip, fabricante do microcontrolador PIC. Sua principal característica é a total integração de seus módulos com o ambiente Windows, permitindo a fácil cópia de arquivos e trechos de arquivos de um aplicativo para outro. Porém, nesse projeto só foi utilizado para transferir o arquivo para o PIC, visto que o programa foi desenvolvido pelo PICC. Foi utilizada a versão 6.61 e posteriormente a versão 7.40 desse software.

Para o desenvolvimento da interface com o usuário, foi escolhido o *Visual Basic* (VB). O *Visual Basic* é uma linguagem programação produzida pela empresa Microsoft, e é parte integrante do pacote *Microsoft Visual Studio*. Ele é um aperfeiçoamento do BASIC. A linguagem é dirigida por eventos (*event driven*) e possui também um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE - *Integrated Development Environment*) totalmente gráfico, facilitando enormemente a construção da interface das aplicações. Foi utilizada a versão 6.0 desse software.

Para realizar simulações em tempo real com os circuitos desenhados no *Proteus* e com o programa desenvolvido no *Visual Basic*, foi utilizado o programa *Virtual Serial Port Driver*. Esse programa dá a opção do usuário criar duas portas seriais virtuais interligadas em seu computador, evitando o uso de um cabo serial nulo. Também porque nem todos os computadores possuem duas portas seriais, ou então evitar que o usuário tenha que desligar algum dispositivo que esteja usando uma de suas portas. Dessa forma, o *Visual Basic* e o *Proteus* direcionavam os dados a serem trocados, cada um para a porta serial para qual estava configurado, então, através da conexão virtual, os dados chegavam ao destino e poderiam ser futuramente processados normalmente sem intervenção manual. Foi utilizada a versão 6.0 desse software.

### 3. Construção do Equipamento

#### *Montagem em Protoboard*

Para testar o circuito projetado, além das simulações de computador, fez-se necessário à montagem física para garantir o funcionamento correto do circuito e de ajustes de calibração e melhora na relação sinal/ruído.

Depois de montado, várias vezes o projeto precisou ser modificado devido às inconsistências nos circuitos. Alguns apresentaram instabilidade e outros sofreram mais com ruídos e aquecimento. Pontos que os softwares de simulação não apontavam, pois sempre foram testados apresentando um ambiente ideal, com os componentes sempre com o valor exato, algo que é muito difícil de encontrar nos componentes comerciais, visto que suas faixas de tolerância variam de 5% a 10%.

Uma grande dificuldade desse tipo de montagem é conseguir espalhar os componentes de maneira a evitar uma confusão de fios passando de um lado para outro sem necessidade, visto que isso implicaria numa fonte de ruídos e de problemas por mau contato. Para isso, foram utilizadas três *protoboards*, garantindo que assim os componentes ficassem bem organizados.

Porém, esse tipo de montagem ainda gera um grande problema de ruído, pois são centenas de ligações para uma mesma conexão, o que gera várias pequenas resistências de contato, criando assim diferenças de potencial para uma mesma ligação. Para amenizar esse problema, alguns capacitores foram estrategicamente posicionados para garantir que pelo menos a alimentação do circuito estivesse chegando sem ruídos e sem muita diferença de potencial de um ponto a outro.

#### *Validação dos Resultados dos Testes*

Depois de montado na *protoboard*, foram realizados testes para validar se todas as medidas feitas pelo conjunto *hardware-software* estão de acordo com a realidade, ou seja, se os valores medidos representam os parâmetros corretos dos transistores com um mínimo de erro.

Para isso foram utilizados três transistores diferentes: BC548, TIP31 e MPF102. Esses são

os transistores mais utilizados nos laboratórios da faculdade para a realização das aulas práticas das disciplinas de eletrônica. São dois BJT NPN, um de baixa corrente e outro de potência mais elevada e por último um JFET Canal N.

Os testes foram realizados da seguinte forma: foram anotados os resultados do conjunto *hardware-software* e logo após foram feitas medidas manuais abrindo parte do circuito, colocando sinais de testes e medindo os pontos necessários. Para as medidas manuais, foram utilizados dois aparelhos: para medidas de corrente contínua foi utilizado o multímetro *DMM912* da *Tektronix*, e para as medidas de corrente alternada, o osciloscópio digital *TDS1012B*, também da *Tektronix*.

Para a medida dos parâmetros  $h_{FE}$ ,  $h_{fe}$  e  $h_{ie}$  do BJT, o circuito foi aberto no *jumper*  $J_{T2}$  (Anexo I) e colocada ali uma fonte de tensão senoidal, com frequência de 1kHz, e com um determinado nível médio e o coletor foi ligado em  $+5V_{DC}$ . Foram então feitas as medidas da queda tensão no resistor  $R_{24}$ , tanto em modo alternado como contínuo. As próximas tabelas mostram os resultados das medidas, dos valores provenientes do software assim como os erros percentuais relativos a esses valores para dois exemplares distintos de cada modelo de transistor:

| BC548 (1) |               |               |               |               |                   |                   |               |               |               |          |          |                           |
|-----------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|----------|----------|---------------------------|
|           | $V_B$<br>(mV) | $V_b$<br>(mA) | $I_B$<br>(uA) | $I_b$<br>(uA) | $V_{R24}$<br>(mV) | $V_{r24}$<br>(mV) | $I_E$<br>(mA) | $I_e$<br>(mA) | $I_C$<br>(mA) | $h_{FE}$ | $h_{fe}$ | $h_{ie}$<br>(k $\Omega$ ) |
| Manual    | 34,0          | 34,0          | 10,3          | 10,3          | 34,6              | 37,8              | 3,46          | 3,78          | 3,45          | 335      | 366      | 2,76                      |
| Soft.     | 32,3          | 32,3          | 9,8           | 9,8           | -                 | -                 | -             | -             | 3,51          | 359      | 390      | 2,89                      |
| Erro      | -             | -             | -             | -             | -                 | -                 | -             | -             | 1,7%          | 7,1%     | 6,6%     | 4,7%                      |

Tabela 9 - Medidas do BC548 (1)

| BC548 (2) |               |               |               |               |                   |                   |               |               |               |          |          |                           |
|-----------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|----------|----------|---------------------------|
|           | $V_B$<br>(mV) | $V_b$<br>(mA) | $I_B$<br>(uA) | $I_b$<br>(uA) | $V_{R24}$<br>(mV) | $V_{r24}$<br>(mV) | $I_E$<br>(mA) | $I_e$<br>(mA) | $I_C$<br>(mA) | $h_{FE}$ | $h_{fe}$ | $h_{ie}$<br>(k $\Omega$ ) |
| Manual    | 32,3          | 31,7          | 9,8           | 9,6           | 42,6              | 43,2              | 4,26          | 4,32          | 4,25          | 434      | 449      | 2,75                      |
| Soft.     | 32,3          | 32,3          | 9,8           | 9,8           | -                 | -                 | -             | -             | 4,45          | 454      | 479      | 2,80                      |
| Erro      | -             | -             | -             | -             | -                 | -                 | -             | -             | 4,7%          | 4,7%     | 6,7%     | 1,9%                      |

Tabela 10 - Medidas do BC548 (2)

| TIP31 (1) |               |               |               |               |                   |                   |               |               |               |          |          |                          |
|-----------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|----------|----------|--------------------------|
|           | $V_B$<br>(mV) | $V_b$<br>(mA) | $I_B$<br>(uA) | $I_b$<br>(uA) | $V_{R24}$<br>(mV) | $V_{r24}$<br>(mV) | $I_E$<br>(mA) | $I_e$<br>(mA) | $I_C$<br>(mA) | $h_{FE}$ | $h_{fe}$ | $h_{ie}$<br>( $\Omega$ ) |
| Manual    | 267           | 34            | 81            | 10,3          | 68,8              | 11,88             | 6,88          | 1,188         | 6,80          | 84       | 114      | 437                      |
| Soft.     | 260           | 32,3          | 78,8          | 9,8           | -                 | -                 | -             | -             | 6,92          | 87,81    | 122      | 458                      |
| Erro      | -             | -             | -             | -             | -                 | -                 | -             | -             | 1,8%          | 4,6%     | 6,7%     | 4,8%                     |

Tabela 11 - Medidas do TIP31 (1)

| TIP31 (2) |               |               |               |               |                   |                   |               |               |               |          |          |                          |
|-----------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|----------|----------|--------------------------|
|           | $V_B$<br>(mV) | $V_b$<br>(mA) | $I_B$<br>(uA) | $I_b$<br>(uA) | $V_{R24}$<br>(mV) | $V_{r24}$<br>(mV) | $I_E$<br>(mA) | $I_e$<br>(mA) | $I_C$<br>(mA) | $h_{FE}$ | $h_{fe}$ | $h_{ie}$<br>( $\Omega$ ) |
| Manual    | 267           | 34            | 81            | 10,3          | 63,7              | 10,3              | 6,37          | 1,03          | 6,29          | 78       | 99       | 409                      |
| Soft.     | 260           | 32,3          | 78,8          | 9,8           | -                 | -                 | -             | -             | 6,45          | 82       | 105      | 423                      |
| Erro      | -             | -             | -             | -             | -                 | -                 | -             | -             | 2,6%          | 5,4%     | 6,1%     | 3,4%                     |

Tabela 12 - Medidas do TIP31 (2)

| MPF102 (1) |                 |                  |                  |                  |               |               |               |
|------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|---------------|---------------|---------------|
|            | $V_{GS}$<br>(V) | $V_{gs}$<br>(mA) | $V_{RS}$<br>(mV) | $V_{rs}$<br>(mV) | $I_D$<br>(mA) | $I_d$<br>(mA) | $g_m$<br>(mS) |
| Manual     | -0,91           | 264              | 64               | 10,7             | 6,40          | 1,07          | 4,06          |
| Soft.      | -0,91           | 260              | -                | -                | 6,2           | -             | 3,92          |
| Erro       | -               | -                | -                | -                | -3,13%        | -             | -3,46%        |

Tabela 13 - Medida do MPF102 (1)

| MPF102 (2) |                 |                  |                  |                  |               |               |               |
|------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|---------------|---------------|---------------|
|            | $V_{GS}$<br>(V) | $V_{gs}$<br>(mA) | $V_{RS}$<br>(mV) | $V_{rs}$<br>(mV) | $I_D$<br>(mA) | $I_d$<br>(mA) | $g_m$<br>(mS) |
| Manual     | -0,91           | 264              | 44               | 8,75             | 4,40          | 0,875         | 3,31          |
| Soft.      | -0,91           | 260              | -                | -                | -             | -             | 3,15          |
| Erro       | -               | -                | -                | -                | -4,55%        | -             | -4,96%        |

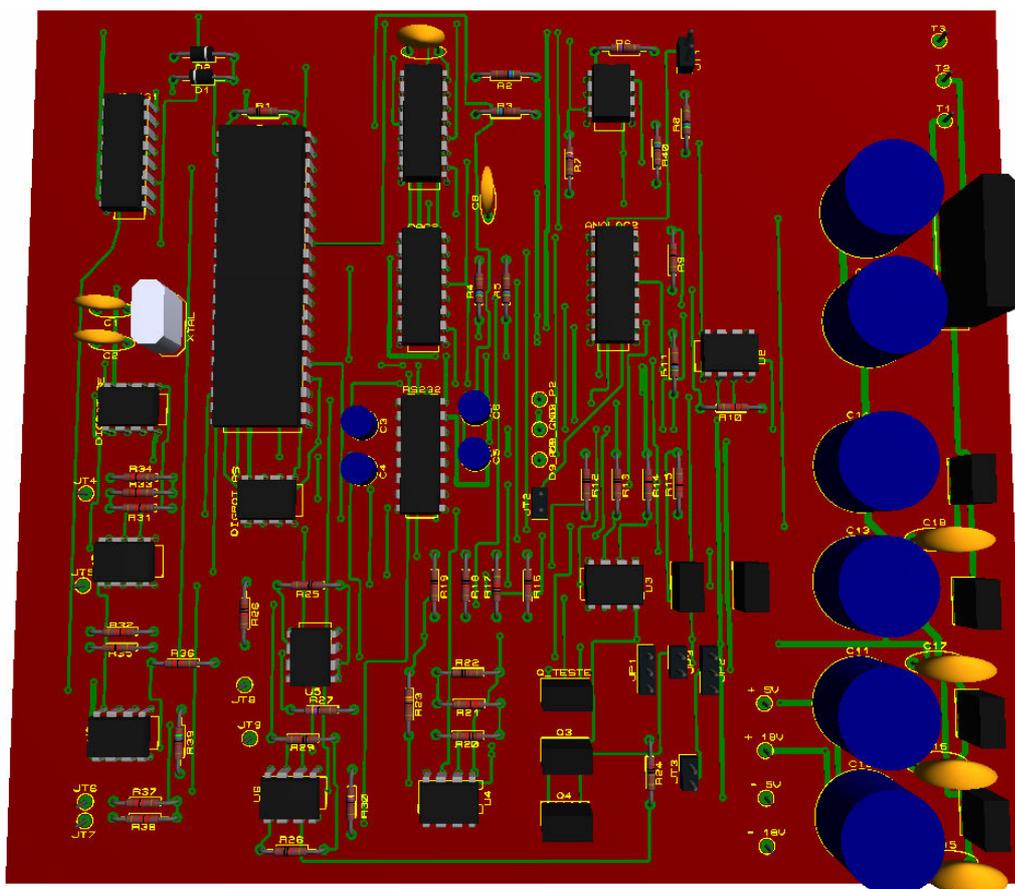
Tabela 14 - Medidas do MPF102 (2)

Na conclusão, no tópico sobre resultados, serão discutidos os motivos da discrepância entre os valores medidos manualmente e os valores medidos através do software, assim como uma maneira minimizar essa diferença.

### ***Desenvolvimento da Placa de Circuito Impresso***

Depois de finalizado o projeto e após os testes com a montagem em *Protoboard*, foi desenvolvido o layout para a placa de circuito impresso. Como dito anteriormente, o layout foi projetado utilizando o Software *Proteus*.

Através desse software, pode-se ver uma animação gráfica em três dimensões de como a placa ficará depois de pronta. A Figura 3.1 ilustra essa animação:



**Figura 3.1 - Animação 3D da Placa de Circuito Impresso**

Também é possível ver as imagens das trilhas da parte inferior e superior da placa:

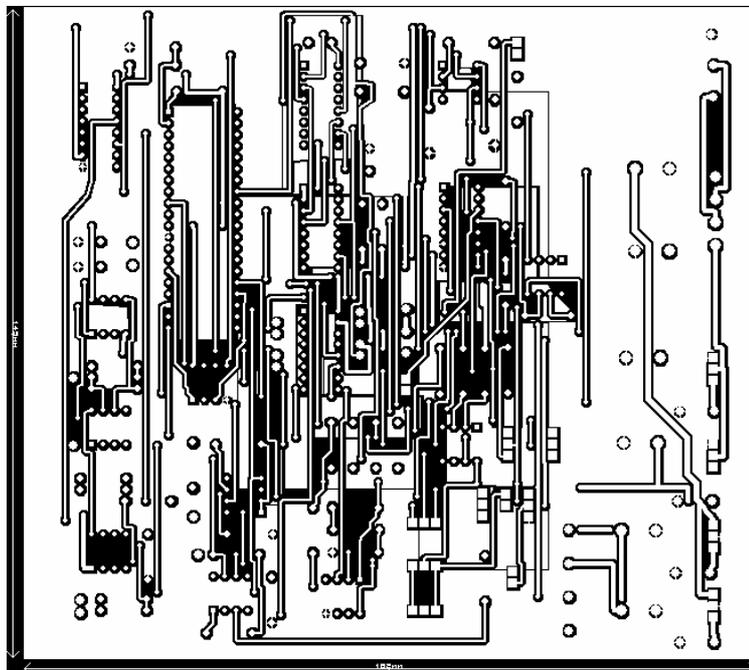


Figura 3.2 - Trilhas da Parte Superior da Placa

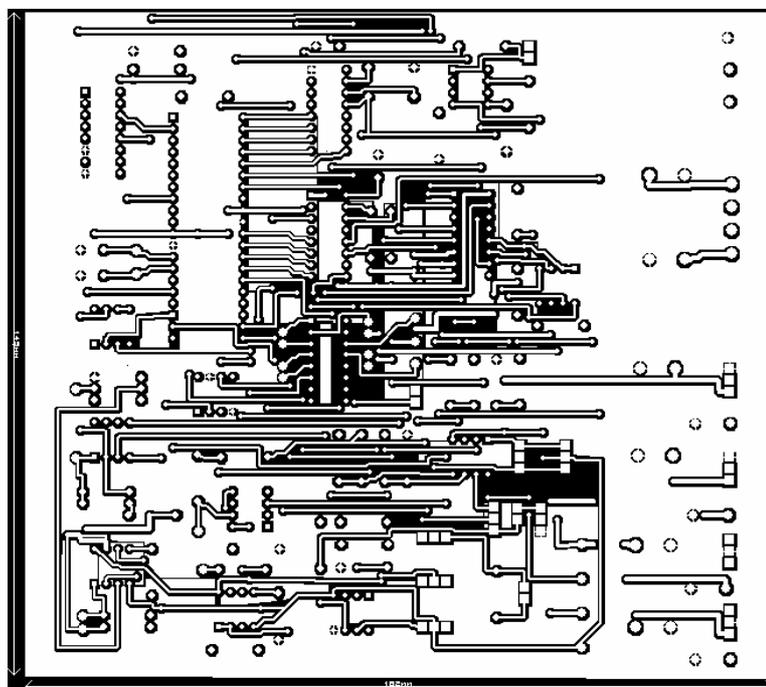


Figura 3.3 - Trilhas da Parte Inferior da Placa



O *Proteus* ainda é capaz de gerar arquivos *Gerber*, esses são arquivos padrão para fabricação industrial de placas de circuito impresso. Os arquivos Gerber são do tipo texto e informam o posicionamento das trilhas, ilhas e furos, assim como todas as dimensões necessárias para uma máquina (fresa) produzir a placa.

Os arquivos Gerber necessários para produzir a placa são:

- Parte inferior da placa (trilhas e ilhas);
- Parte superior da placa (trilhas e ilhas) e;
- Diagrama de furos (diâmetro e posicionamento dos furos).

Ainda é possível gerar o arquivo do *silk screen*, ou seja, um “adesivo” com o desenho do posicionamento dos componentes na placa.

### *Lista de Componentes*

| <b>Lista de Materiais</b>     |                          |                   |  |
|-------------------------------|--------------------------|-------------------|--|
| <b>Tipo</b>                   | <b>Valor/<br/>Modelo</b> | <b>Quantidade</b> | <b>Referência</b>                                  |
| Resistor 1/4W                 | 10Ω                      | 1                 | R24  |
| Resistor 1/8W                 | 1kΩ                      | 1                 | R22  |
| Resistor 1/8W                 | 10kΩ                     | 12                | R1,R12,R13,R16,R17,R18,<br>R19,R20,R25,R26,R28,R29 |
| Resistor 1/8W                 | 12kΩ                     | 12                | R9,R10,R14,R15,R31,R32,<br>R33,R34,R35,R36,R37,R38 |
| Resistor 1/8W                 | 22kΩ                     | 1                 | R21  |
| Resistor 1/8W                 | 3,3kΩ                    | 1                 | R23  |
| Resistor 1/8W                 | 4,7kΩ                    | 4                 | R6,R7,R27,R30                                      |
| Resistor 1/8W                 | 5,6kΩ                    | 8                 | R2,R3,R4,R5,R8,R11,R39,R40                         |
| Resistor 1/8W                 | 470Ω                     | 1                 | --   |
| Capacitor Eletrolítico Radial | 2200μF<br>35 V           | 6                 | C9,C10,C11,C12,C13,C14                             |
| Capacitor Eletrolítico Radial | 1μF<br>250 V             | 4                 | C3,C4,C5,C6  |
| Capacitor Cerâmico            | 10pF                     | 2                 | C1,C2  |
| Capacitor Cerâmico            | 10nF                     | 2                 | C7,C8  |

|                          |                          |    |                         |
|--------------------------|--------------------------|----|-------------------------|
| Capacitor Cerâmico       | 100nF                    | 4  | C15,C16,C17,C18         |
| Diodo                    | 1N4148                   | 2  | D1,D2                   |
| Amplificador Operacional | TL072                    | 8  | U1,U2,U3,U4,U5,U6,U7,U8 |
| Regulador de Tensão      | LM7805                   | 1  | 7805                    |
| Regulador de Tensão      | LM7818                   | 1  | 7818                    |
| Regulador de Tensão      | LM7905                   | 1  | 7905                    |
| Regulador de Tensão      | LM7918                   | 1  | 7918                    |
| Chave Analógica          | MC14053                  | 2  | ANALOG1, ANALOG2        |
| DAC                      | DAC0800                  | 2  | DAC1,DAC2               |
| PIC                      | 16F877A                  | 1  | PIC                     |
| Potenciômetro Digital    | MCP41010                 | 2  | DIGPOT_RB, DIGPOT_RE    |
| Ponte Retificadora       | SKB2                     | 1  | PONTE                   |
| Conversor RS232          | ICL232                   | 1  | RS232                   |
| Cristal                  | 4Mhz                     | 1  | XTAL                    |
| Transistor               | TIP31                    | 2  | Q1,Q3                   |
| Transistor               | TIP32                    | 2  | Q2,Q4                   |
| Transformador            | 18+18 2A                 | 1  | --                      |
| Chave 2 posições         | --                       | 1  | --                      |
| Placa Dupla Face         | 150 mm x 200 mm          | 1  | --                      |
| Caixa Plástica           | 200 mm x 200 mm x 100 mm | 1  | --                      |
| Cabo 3 vias              | 2m                       | 1  | --                      |
| DB9                      | Fêmea                    | 2  | --                      |
| DB9                      | Macho                    | 1  | --                      |
| Tomada 2 pinos           | Macho                    | 1  | --                      |
| Soquete                  | 40 pinos                 | 1  | --                      |
| Soquete                  | 16 pinos                 | 5  | --                      |
| Soquete                  | 8 pinos                  | 10 | --                      |
| Parafuso fenda cruzada   | M3 x 0,5                 | 4  | --                      |

|                        |          |    |    |
|------------------------|----------|----|----|
| Fusível                | 500mA    | 1  | -- |
| Porta fusível          | --       | 1  | -- |
| Led                    | Vermelho | 1  | -- |
| Porta Led              | --       | 1  | -- |
| Cabo duplo             | 2m       | 1  | -- |
| Pino Jumper<br>simples | --       | 10 | -- |

**Tabela 15** - Lista de Componentes

## 4. Conclusão

Nesse capítulo serão discutidos os resultados obtidos através do protótipo montado em *Protoboard*, assim como possíveis mudanças que venham a melhorar o desempenho do equipamento, ou mesmo torná-lo mais moderno.

### *Resultados*

Como revelado pelos testes explicados na seção Construção do Equipamento, o protótipo apresentou uma faixa de erros baixa, máxima de 7,1% em relação às medidas realizadas com os equipamentos do laboratório. Essa disparidade possui algumas explicações.

A primeira delas é que até esses aparelhos do laboratório possuem uma faixa de erro de suas medidas e que, se somadas ao erro do protótipo, podem ocasionar numa disparidade maior. Para uma mesma medida, ao realizá-la com o multímetro e com o osciloscópio dois valores diferentes foram obtidos. Por isso, para as medidas de corrente contínua foi escolhido o multímetro e para corrente alternada, o osciloscópio, pois esses são mais confiáveis nessas situações.

A segunda delas é que como os testes foram realizados em *protoboard*, as capacitâncias parasitas ali presentes criaram um ruído de fundo muito alto e mesmo com o teste realizando médias para tentar minimizar esse efeito, quando realizadas duas medidas seguidas, os resultados apresentaram pequenas variações. Essas capacitâncias já seriam eliminadas com a montagem do circuito em uma placa de circuito impresso com plano de terra, assim como foi projetada.

Outra explicação é que os circuitos não foram perfeitamente calibrados, ou seja, vários ganhos de amplificadores, ou mesmo resistores de ajuste de *offset* e dos níveis dos conversores D/A não estavam com o valor exato, alguns apresentaram uma diferença mínima, mas que se somada aos outros erros, podem fazer as medidas divergirem. Esses resistores devem ser ajustados de melhor forma para a montagem final do equipamento na placa.

Para as medidas foram utilizados sinais de teste com valores muito baixos de tensão e a fonte de sinal apresentou um ruído muito alto. Para esse sinal ser medido pelo osciloscópio, foi necessário utilizar média de 128 amostras e mesmo assim, os valores apresentaram uma pequena

variação, porém apenas um valor pôde ser utilizado para realizar as contas. Esse valor foi o que se mantinha por mais tempo na tela do osciloscópio.

Contudo, podemos chegar à conclusão que o protótipo apresenta valores muito confiáveis e que com a construção do equipamento definitivo (em placa de circuito impresso) esses valores deverão ser mais precisos. Desta forma, os projetos que necessitam de um modelo teórico de transistor poderão utilizar um modelo com valores muito próximos da realidade, sem ter que realizar diversas medidas ou tomar providências para contornar as variações apresentadas pelos manuais desses dispositivos.

### ***Mudanças Futuras no Projeto***

Futuramente uma possível mudança para esse projeto seria a utilização da porta USB do computador no lugar da porta Serial, pois a porta USB é uma interface mais moderna e mais rápida (maior taxa de bits/s). A introdução desse módulo USB no projeto pode ser feita através de um chip que simula a porta serial. Essa mudança não afeta diretamente a maneira do *hardware* funcionar, visto que esse chip pode ser utilizado logo após a saída serial do circuito. Na parte do software causaria uma mudança, pois um programa a mais (*driver* para o chip USB) deveria ser instalado no computador e assim o código deveria ser adaptado para trocar as informações através desse *driver*, e não mais pela porta serial.

Outra possível mudança poderia ser o desenvolvimento de um novo programa utilizando uma linguagem multi-plataforma como, por exemplo, C++ ou Java, pois o Visual Basic foi desenvolvido para funcionar em ambiente Windows, o que não significa um impedimento para a utilização do projeto, pois o Windows é o Sistema Operacional mais utilizado no mundo. Mas com um programa desenvolvido em uma linguagem multi-plataforma, sua utilização seria ampliada.

Uma possível mudança poderia ocorrer na forma como os dados são medidos pelo equipamento. Medidas pulsadas poderiam ser utilizadas para evitar que o dispositivo (transistor) venha a aquecer distorcendo menos as medidas. Porém, isso implicaria numa demora acentuada na aquisição dos dados, mas se o tempo não for um parâmetro importante para quem for realizar os testes, pode ser então desenvolvido um programa paralelo que realize esse tipo de medida quando o usuário desejar.

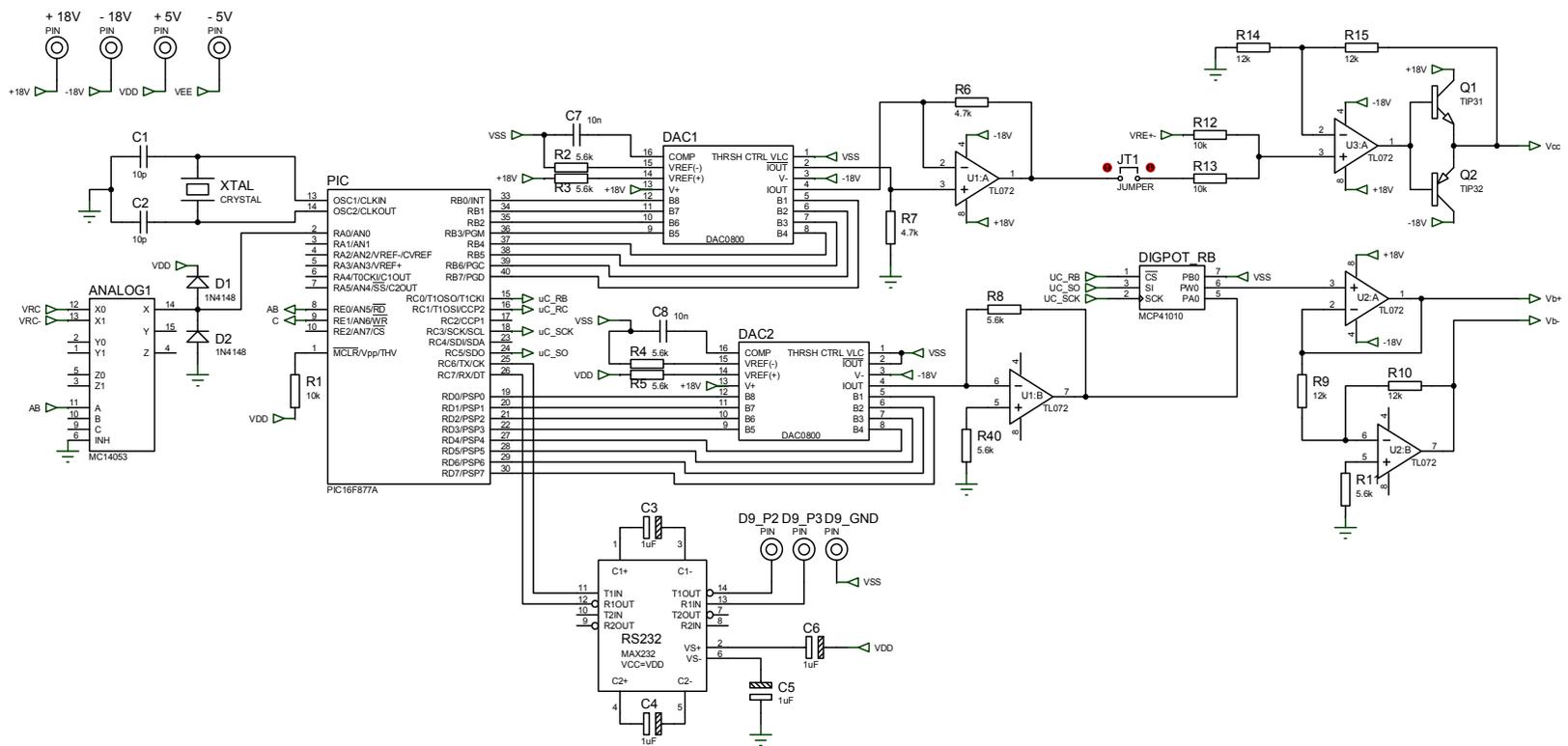
## 5. Bibliografia

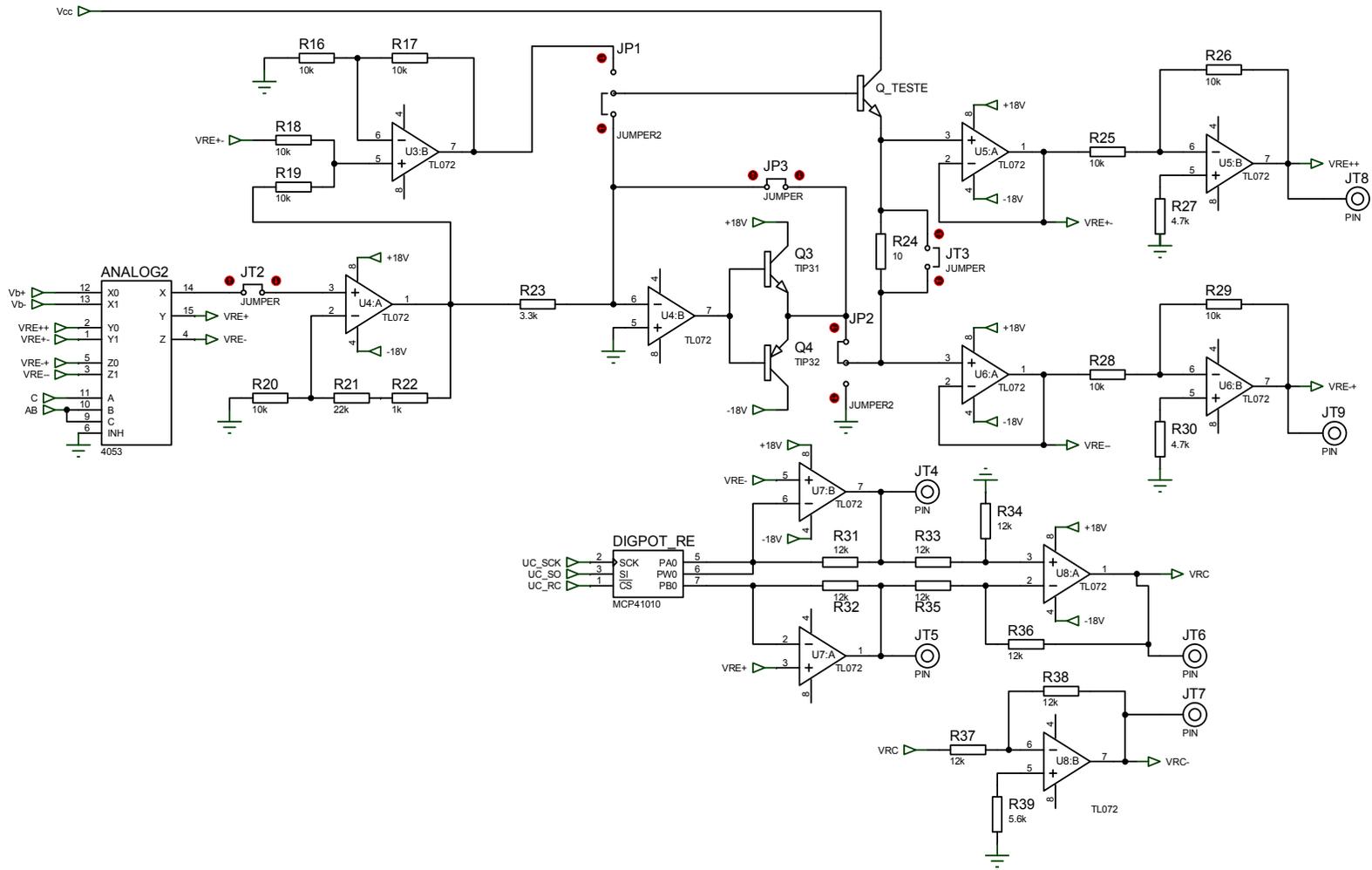
- [1] **Transistor – Wikipedia.**  
Disponível em: < <http://pt.wikipedia.org/wiki/Trans%C3%ADstor>> 28 Agosto 2007
- [2] MILLMAN, J.; HALKIAS, C. C. *Eletronic Devices and Circuits*. International Student Ed. New York: McGraw-Hill, 1967.
- [3] SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. *Microeletrônica*. 4. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2000.
- [4] PEREIRA, Fabio. *Microcontroladores PIC – Programação em C*. 6. ed. São Paulo: Érica, 2006.

## 6. Referências Extras

- [5] **Conectando 8 teclados na porta serial através de um microcontrolador PIC 16f877 para controle de acessos.**  
Disponível em: <<http://www.rogercom.com/index.htm>> 18 junho 2007
- [6] **Desenhando gráficos e funções.**  
Disponível em:  
<<http://www.clubedainformatica.com.br/documentos/mostraartigo.php?artigo=133>>  
18 junho 2007
- [7] **Pickbook.**  
Disponível em: <<http://www.mikroe.com/pt/product/books/picbook/00.htm>>  
18 junho 2007
- [8] **Understanding and Using Visual Basic Part 5.**  
Disponível em: <[http://www.rentron.com/sending\\_data.htm](http://www.rentron.com/sending_data.htm)> 18 junho 2007
- [9] **Understanding and Using Visual Basic Part 6.**  
Disponível em: <[http://www.rentron.com/receiving\\_data.htm](http://www.rentron.com/receiving_data.htm)> 18 junho 2007
- [10] **Visual Basic e a Comunicação Paralela e Serial.**  
Disponível em: <<http://www.macoratti.net/vbserial.htm>> 18 junho 2007
- [11] **WinPicProg PIC Tutorial.**  
Disponível em: <[http://www.winpicprog.co.uk/pic\\_tutorial.htm](http://www.winpicprog.co.uk/pic_tutorial.htm)> 18 junho 2007

# Anexo I - Circuito Completo





## Anexo II – Foto da *Protoboard*

