

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ – UNITAU**

**FRANCISCO ANTONIO VISCONTI JUNIOR**

**PROPOSTA DE GERADOR DE ORDENS PIROTÉCNICAS  
BASEADO EM LÓGICA PROGRAMÁVEL ESTRUTURADA**

**TAUBATÉ - SP**

**2007**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ – UNITAU**

**FRANCISCO ANTONIO VISCONTI JUNIOR**

**PROPOSTA DE GERADOR DE ORDENS PIROTÉCNICAS  
BASEADO EM LÓGICA PROGRAMÁVEL ESTRUTURADA**

Dissertação apresentada para obtenção do  
Título de Mestre pelo Curso de Pós-  
Graduação do Departamento de Engenharia  
Mecânica da Universidade de Taubaté.

Área de Concentração: Automação Industrial  
e Robótica.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Carlos  
Parquet Bizarria

**TAUBATÉ - SP**

**2007**

V825p

VISCONTI JUNIOR, Francisco Antonio.

Proposta de Gerador de Ordens Pirotécnicas Baseado em Lógica Programável Estruturada./ Francisco Antonio Visconti Junior. – Taubaté: Unitau, 2007.

89 f.: il;30 cm.

Dissertação (Mestrado) – Universidade de Taubaté. Faculdade de Engenharia Mecânica. Curso de Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Carlos Parquet Bizarria.

1. Gerador de Ordens Pirotécnicas. 2. Foguetes de Sondagens. 3. Lógica Programável Estruturada – Mestrado. I. Universidade de Taubaté. Departamento de Engenharia Mecânica. II. Título.

CDD(21) 005.133

**FRANCISCO ANTONIO VISCONTI JUNIOR**

**PROPOSTA DE GERADOR DE ORDENS PIROTÉCNICAS BASEADO EM LÓGICA  
PROGRAMÁVEL ESTRUTURADA**

Dissertação apresentada para obtenção do  
Título de Mestre pelo Curso de Pós-  
Graduação do Departamento de  
Engenharia Mecânica da Universidade de  
Taubaté.

Área de Concentração: Automação  
Industrial e Robótica.

Data: \_\_\_\_\_

Resultado: \_\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

Prof. Dr. Francisco Carlos Parquet Bizarria

UNITAU

Assinatura \_\_\_\_\_

Profa. Dra. Emília Villani

ITA

Assinatura \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Eduardo Hidenori Enari

UNITAU

Assinatura \_\_\_\_\_

Dedico este trabalho principalmente a Deus, por ter me agraciado com pais incansavelmente dedicados e extremamente preocupados em sempre dar formação social, educacional e moral aos filhos.

Aos meus pais, pelo incentivo e pela ajuda dada durante todos esses anos de minha vida.

Dedico também à minha esposa Simone e meus queridos filhos, Tiago, Júlia e Pedro Henrique grandes incentivadores e cooperadores para a conclusão com êxito deste novo desafio.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço inicialmente e principalmente ao grande incentivador, excelente professor e incomparável orientador, Prof. Dr. Francisco Carlos Parquet Bizarria, sem o qual, este trabalho jamais teria sequer iniciado.

À minha irmã, Mônica Visconti de Melo, pelas preciosas revisões iniciais.

Aos técnicos e amigos: Cláudio Alberto Nogueira, Rafael Ribeiro D'Angelo, Mauro Cezar da Silva, Sóstenes Pereira de Carvalho, Carlos Renato dos Santos e Manuel Martinez Gamallo pelos precisos e de excelente qualidade trabalhos realizados na confecção do protótipo e dos meios de ensaios.

Aos amigos e companheiros de mestrado Wilson Stanisce Corrêa e Jairo Ferreira dos Santos Filho, pela união e companheirismo.

Ao amigo Vicente César Thomaz de Aquino pela preciosa colaboração na revisão de parte da dissertação.

Ao Instituto de Aeronáutica e Espaço por dispor dos meios físicos empregados neste trabalho.

Aos professores pelos conhecimentos transmitidos e aos companheiros de sala e que de alguma forma contribuíram para o término deste trabalho.

## RESUMO

Os módulos dedicados à geração e ativação de ordens pirotécnicas que são integrados nas redes elétricas embarcadas nos foguetes de sondagem, atualmente desenvolvidos pelo Instituto de Aeronáutica e Espaço, utilizam circuitos eletrônicos com componentes lógicos de limitada flexibilidade em configuração. Essa limitação pode comprometer principalmente o tempo, o custo e os ensaios envolvidos durante a fase de desenvolvimento desses módulos, especialmente quando há necessidade de efetuar modificações funcionais nesses circuitos eletrônicos. Uma outra consequência dessa limitação pode ser observada na fase de operação, quando as características impostas pela missão de lançamento do foguete exigem modificações que envolvem os tempos de ativação das ordens pirotécnicas. Nesse contexto, este trabalho apresenta uma proposta que prevê a utilização de componente eletrônico baseado em lógica programável estruturada na arquitetura sistêmica que atende esses módulos, com a meta de minimizar as mencionadas limitações e causar pouco impacto de implementação no atual sistema. Os resultados obtidos nos ensaios realizados com o protótipo desenvolvido para avaliar essa arquitetura foram satisfatórios. Esses resultados mostram que a proposta de utilização de lógica programável estruturada na arquitetura desses módulos pode ser levada a efeito para a finalidade a qual se destina.

**Palavras-chave:** Gerador de Ordens Pirotécnicas. Foguetes de Sondagens. Lógica Programável Estruturada.



## ABSTRACT

Currently the modules dedicated to activation of pyrotechnical orders, which are used on electrical networks of sounding rockets, as developed by Aeronautical and Space Institute, use on their electronic circuits, logic components with limited configuration flexibility. This limitation compromises mainly time, cost and testing involved in the development phase of these modules, especially when there is the necessity to make systemic modifications on these electronic circuits. Another consequence arising from such limitation can be detected in the operational phase, in which the characteristics as imposed by mission demand modification that can involve the activation times of the pyrotechnical orders. In that context, this study sets forth a proposal for the use of a configuration-flexible logic system, in the development of sounding rockets on-board modules with the objective to minimize the afore mentioned limitations. The results obtained from the testing carried out on the prototype developed to evaluate this module were satisfactory. These results show that the proposal herein can be implemented for the end it is intended for.

**Keywords:** Pyrotechnical Orders Generator. Sounding Rockets. Programmable Logic.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - TEMPORIZADOR ELETROMECAÂNICO. ....	14
FIGURA 2 – SISTEMA DE APAGAMENTO E GRAVAÇÃO DE MEMÓRIAS. ....	15
FIGURA 3 – FOGUETE VSB-30 INTEGRADO NO LANÇADOR. ....	17
FIGURA 4 – VISTA DO MÓDULO DIANTEIRO DO SEGUNDO ESTÁGIO DO FOGUETE VSB-30 ..... 18	18
FIGURA 5 – PRIMEIRA FASE DE DESMONTAGEM DO SISTEMA GERADOR DE ORDENS. ....	18
FIGURA 6 – SEGUNDA FASE DE DESMONTAGEM DO SISTEMA GERADOR DE ORDENS. ....	19
FIGURA 7 – MEMÓRIA NÃO-VOLÁTIL RETIRADA DA DO SOQUETE. ....	19
FIGURA 8 – EQUIPAMENTOS PARA PROGRAMAÇÃO DE MEMÓRIA NÃO-VOLÁTIL. ....	20
FIGURA 9 – ARQUITETURA DE COMANDO E AQUISIÇÃO DE DADOS (ASAKA, 2006). ....	23
FIGURA 10 – DIAGRAMA DO SVALBARD. VERSÕES (A) E (B) (BEZERRA, 1999). ....	25
FIGURA 11 – FOGUETES DE SONDAGEM PRODUZIDOS PELO IAE (IAE, 2006). ....	28
FIGURA 12 – PARTES DO FOGUETE VSB-30 (IAE, 2005). ....	29
FIGURA 13 – EXEMPLO DE MOTOR CARREGADO (DORE, 2005). ....	30
FIGURA 14 – IMPULSORES DE ROLAMENTO. ....	31
FIGURA 15 – EFEITO CAUSADO PELOS IMPULSORES DE ROLAMENTO (VISCONTI, 2005-A). ....	32
FIGURA 16 – EMPENAS INSTALADAS NO FOGUETE. ....	33
FIGURA 17 – EXEMPLO DE SISTEMA DE FRENAGEM DE ROLAMENTO. ....	34
FIGURA 18 – DECREMENTO DE ROTAÇÃO POR EFEITO DO YO-YO (VISCONTI, 2005-B). ....	34
FIGURA 19 – EXEMPLO DE MÓDULO DE SEPARAÇÃO. ....	35
FIGURA 20 – DESMEMBRAMENTO DAS REDES ELÉTRICAS EMBARCADAS. ....	36
FIGURA 21 – BATERIA FUNCIONAL. ....	38
FIGURA 22 – SENSORES UTILIZADOS EM FOGUETES DE SONDAGEM. ....	39
FIGURA 23 – DISPOSITIVO ELETROPIROTÉCNICO. ....	41
FIGURA 24 – FONTES DE ENERGIA ELÉTRICA PARA PIROTÉCNICOS. ....	41
FIGURA 25 – DIAGRAMA DO CIRCUITO GERADOR DE ORDENS PIROTÉCNICAS (VISCONTI, 2005-A) 43	43
FIGURA 26 – DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE UM PLA. ....	47
FIGURA 27 – MATRIZ PROGRAMÁVEL DE ANDS E ORs (ALTERA, 2006). ....	50
FIGURA 28 – DIAGRAMA FUNCIONAL DE MEMÓRIA 16 x 1 BIT (ALTERA, 2006). ....	51
FIGURA 29 – ELEMENTO DE CÉLULA LÓGICA DE CPLD (ALTERA, 2006). ....	52
FIGURA 30 – ELEMENTO <i>CARRY CHAIN</i> (ALTERA, 2006). ....	53
FIGURA 31 – ELEMENTO <i>CASCADE CHAIN</i> (ALTERA, 2006). ....	54
FIGURA 32 – ELEMENTO DO FPGA (ALTERA, 2006). ....	55
FIGURA 33 – BLOCO DE ENTRADA E SAÍDA (ALTERA, 2006). ....	56
FIGURA 34 – CONEXÕES CÉLULA VERSUS BARRAMENTOS - CPLD (ALTERA, 2006). ....	57
FIGURA 35 – BARRAMENTO DE CPLD E FPGA (ZAGHETO, 2001). ....	58
FIGURA 36 – ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DE PROJETO (COSTA, 2005). ....	60
FIGURA 37 – ARQUITETURA DO ATUAL CIRCUITO GERADOR DE ORDENS. ....	63
FIGURA 38 – PROPOSTA DE ARQUITETURA PARA CIRCUITO GERADOR DE ORDENS. ....	66
FIGURA 39 – SINAIS APRESENTADOS PARA O BLOCO BUFFER. ....	67
FIGURA 40 – ESTRUTURA DO MACROBLOCO LÓGICA PROGRAMÁVEL ESTRUTURADA. ....	68
FIGURA 41 – PARAMETRIZAÇÃO E PROGRAMAÇÃO DE LPM_COUNTER. ....	71
FIGURA 42 – PARAMETRIZAÇÃO E PROGRAMAÇÃO DO BLOCÓ GERADOR DE ORDEM. ....	73
FIGURA 43 – SINAIS RELACIONADOS AO PRIMEIRO TIPO DE ENSAIO PRÁTICO. ....	78
FIGURA 44 – SINAIS RELACIONADOS AO SEGUNDO TIPO DE ENSAIO PRÁTICO. ....	78
FIGURA 45 – ARQUITETURA PARA ENSAIOS PRÁTICOS. ....	79
FIGURA 46 – VISTA DO CONJUNTO UTILIZADO NOS ENSAIOS. ....	80
FIGURA 47 – DADOS A SEREM CARREGADOS NAS MACRO-FUNÇÕES LPM_COUNTER. ....	81

FIGURA 48 – PARAMETRIZAÇÃO PARA ATIVAÇÃO E DESLIGAMENTO DE EVENTO.....	82
FIGURA 49 – INTERFACE DESENVOLVIDA PARA PROGRAMAÇÃO DO TEMPORIZADOR. ....	83
FIGURA 50 – RESULTADOS OBTIDOS NO PRIMEIRO ENSAIO PRÁTICO.....	85
FIGURA 51 – RESULTADOS OBTIDOS NO SEGUNDO ENSAIO PRÁTICO.....	86
FIGURA 52 – TEMPOS DE ATIVAÇÃO E DURAÇÃO DA ORDEM 1 (SEGUNDO ENSAIO PRÁTICO).....	86

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEB	Agência Espacial Brasileira.
ASICs	<i>Application Specific Integrated Circuits.</i>
BF	Bateria Funcional.
BP	Bateria de Pirotécnicos.
CMOS	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor.</i>
CP	Condição Passiva.
CPLD	<i>Complex Programmable Logic Devices.</i>
DC	<i>Direct Current.</i>
DLR	<i>Deutsches Zentrum Fur Luft Und Raumfahrt.</i>
EDA	<i>Eletronic Design Automation.</i>
FPGA	<i>Field Programmable Gate Array.</i>
HCPLD	<i>High-Density Complex Programmable Logic Device.</i>
IAE	Instituto de Aeronáutica e Espaço.
JTEG	<i>Joint Test Action Group.</i>
LAB	<i>Logic Array Block.</i>
LE	<i>Logic Elements.</i>
LUT	<i>Look-Up Table.</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration.</i>
PCM	<i>Pulse Code Modulation.</i>
PLA	<i>Programmables Logic Array.</i>
PLD	<i>Programmable Logic Devices.</i>
Req	Resistores de Equalização.
RF	Relé da Linha de Fogo.

SPLD	<i>Simple Programmable Logic Device.</i>
Vdc	Tensão em corrente contínua
VHDL	<i>VHSIC Hardware Description Language.</i>
VHSIC	<i>Very High Speed Integrated Circuit.</i>
VLS	Veículo Lançador de Satélites.
VSB-30	Veículo de Sondagem <i>Booster</i> – 30.

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1 Descrição do Problema .....	13
1.2 Solução Proposta .....	21
1.3 Objetivos do Trabalho .....	21
1.4 Revisão Bibliográfica .....	22
1.5 Estrutura do Trabalho .....	25
<b>CAPÍTULO 2 - CONCEITOS BÁSICOS.....</b>	<b>27</b>
2.1 Foguetes de Sondagem .....	27
2.1.1 Componentes dos Foguetes de Sondagem.....	30
2.1.1.1 Propelente Sólido.....	30
2.1.1.2 Impulsores de Rolamento .....	31
2.1.1.3 Empenas.....	32
2.1.1.4 Sistema de Frenagem de Rolamento .....	33
2.1.1.5 Módulo de Separação da Carga Útil.....	35
2.2 Redes Elétricas Embarcadas .....	36
2.2.1 Rede Elétrica de Telemedidas .....	36
2.2.2 Rede Elétrica de Segurança .....	37
2.2.3 Rede Elétrica de Serviço.....	37
2.2.3.1 Suprimento de Energia .....	38
2.2.3.2 Sensores .....	39
2.2.3.3 Seqüenciamento de Eventos .....	39
2.2.3.3.1 Eventos Pirotécnicos.....	40
2.2.3.3.2 Dispositivos Eletropirotécnicos.....	40
2.2.3.3.3 Fontes de Energia .....	41
2.2.3.3.4 Circuito Gerador de Ordens Pirotécnicas .....	42
2.3 Lógica Programável Estruturada .....	45
2.3.1 Dispositivos Lógicos Programáveis Simples .....	46
2.3.2 Dispositivos Lógicos Programáveis de Alta Complexidade .....	47
2.3.2.1 Dispositivos Lógicos Programáveis Complexos .....	48
2.3.2.1.1 Célula Lógica.....	49
2.3.2.1.2 Look-Up Table .....	50
2.3.2.1.3 Estrutura Interna de Células - CPLD .....	52
2.3.2.1.4 Estrutura Interna de Células - FPGA.....	54
2.3.2.1.5 Blocos de Entrada e Saída .....	55
2.3.2.1.6 Estruturas de Interconexão .....	56
2.3.2.1.7 Características das Estruturas .....	58
2.3.2.1.8 Ambiente de Desenvolvimento .....	59
<b>CAPÍTULO 3 - DESENVOLVIMENTO.....</b>	<b>62</b>
3.1 Atual Circuito Gerador de Ordens Pirotécnicas .....	62
3.2 Arquitetura Proposta para o Circuito Gerador de Ordens Pirotécnicas.....	65
3.2.1 Macrobloco Lógica Programável Estruturada .....	66

3.2.1.1	Componentes do Macrobloco Lógica Programável Estruturada.....	67
3.2.1.2	Escolha e Programação do Macrobloco Lógica Programável Estruturada .....	70
3.2.1.2.1	Expressões para Frequências e Linhas de Barramento.....	75
3.3	Ensaio Prático e Resultados.....	77
3.3.1	Curvas de Tempo para Ensaio Prático.....	77
3.3.2	Arquitetura para os Ensaio Prático .....	79
3.3.3	Resultados dos Ensaio Prático.....	84
3.3.3.1	Primeiro Ensaio Prático.....	85
3.3.3.2	Segundo Ensaio Prático.....	85
<b>CAPÍTULO 4 - CONCLUSÕES.....</b>		<b>87</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>		<b>88</b>

## **CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO**

Este capítulo é constituído pela descrição do problema, pela solução proposta, pelos objetivos do trabalho, pela revisão bibliográfica e pela estrutura do trabalho. Na descrição do problema são apresentadas as limitações observadas no atual modo de funcionamento dos módulos geradores de ordens pirotécnicas utilizados nos foguetes de sondagem. A solução proposta enfatiza uma nova abordagem de arquitetura de sistema para esses módulos, tendo como referência características operacionais impostas pelo lançamento. Nos objetivos do trabalho são apresentadas as metas de melhorias que se deseja alcançar, para os mencionados módulos, a partir da utilização de novas tecnologias em sistemas digitais reprogramáveis disponíveis no mercado. Na revisão bibliográfica são apresentados resumos de artigos técnicos que guardam relação com o presente trabalho. A estrutura do trabalho mostra as partes que formam esta dissertação, com breve descrição de conteúdos dos capítulos previstos.

### **1.1 Descrição do Problema**

Muitos experimentos científicos que necessitam ser realizados em ambiente de microgravidade<sup>1</sup> utilizam os foguetes de sondagem como meio para obter esse ambiente. Esses foguetes são utilizados, principalmente, por apresentarem como características básicas a

---

<sup>1</sup> Microgravidade - valores de gravidade próximos de zero.



rapidez de montagem, o tempo reduzido em procedimentos que precedem os lançamentos, o custo acessível e o risco operacional moderado.

Para que se possa obter esse ambiente de microgravidade, por período de tempo previsto em especificação de missão de lançamento desse foguete, é necessário realizar a seqüência preestabelecida de eventos, durante as diversas fases de vôo. A execução dessa seqüência, até a presente data, pode ser realizada a partir de temporizadores eletromecânicos (CLIFFORD, 1972). Esses temporizadores, embora confiáveis, possuem custo elevado por utilizarem componentes mecânicos de pequenas dimensões, de alta precisão e de difícil integração, por isso necessitam de mão-de-obra qualificada para a produção dos mesmos. A Figura 1 mostra exemplo de temporizador eletromecânico, tipicamente, utilizado em foguetes de sondagem.



Figura 1 - Temporizador eletromecânico.

Com o avanço tecnológico da eletrônica digital o desenvolvimento de módulos geradores de ordens pirotécnicas<sup>2</sup>, para foguetes de sondagem, tornou-se mais acessível, preciso e de repetição simplificada.

---

<sup>2</sup> Geradores de ordens pirotécnicas – Dispositivos dedicados à geração de seqüência de comandos, em períodos de tempos preestabelecidos, para a execução de eventos durante o vôo de foguetes.

Decorrente desse avanço, esses módulos passaram a utilizar em seus projetos: circuitos osciladores, divisores de frequência, contadores e memória não-volátil<sup>3</sup>, sendo que nessa última o tempo de ativação de ordem é gravado em posições específicas que correspondem a cada evento. A Figura 2 mostra exemplo de sistema utilizado no apagamento e na gravação dessas memórias.

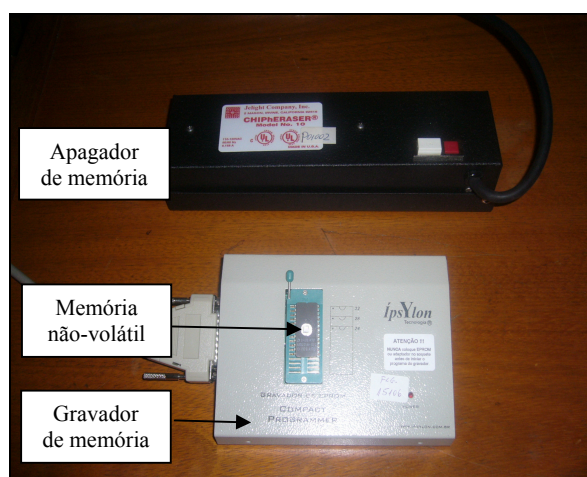


Figura 2 – Sistema de apagamento e gravação de memórias.

Atualmente a soltura do cabo umbilical<sup>4</sup> é referência utilizada para iniciar a cronologia de execução de eventos relacionados com acionamentos de ordens pirotécnicas. Essa cronologia é obtida por meio de cálculos que consideram principalmente parâmetros relacionados com condições climáticas. Essas condições são obtidas a partir de banco de dados dedicados e relacionados ao local de lançamento.

Em que pese esse avanço tecnológico nas arquiteturas sistêmicas desses módulos geradores de ordens, os mesmos permaneceram não flexíveis, principalmente, com relação à modificação de função e forma utilizada para apagamento e gravação dos tempos de ativação

<sup>3</sup> Memória não-volátil – memória que retém os dados gravados mesmo quando a energia é desligada.

<sup>4</sup> Cabo umbilical – condutores e conectores destinados a permitir a comunicação entre equipamento de solo e o foguete instalado no lançador. Esses conectores são automaticamente separados com o deslocamento do foguete no lançamento.

de eventos pirotécnicos. Para exemplificar as conseqüências provocadas por esse limite de flexibilidade e forma de apagamento e gravação de eventos, são apresentadas as seguintes hipóteses:

- I. No decorrer de uma campanha de lançamento há necessidade de alterar os tempos de execução das ordens pirotécnicas, para módulos que utilizam memória não-volátil.
- II. Deseja-se uma nova configuração de decisão de ativação das ordens pirotécnicas que considere o estado alcançado por novos parâmetros relacionados com a missão do foguete.

Para atender a primeira hipótese é necessária a execução de procedimento que considera, no mínimo, os seguintes passos:

- Retirada de módulo do foguete.
- Desmontagem mecânica de módulo.
- Retirada de memória não-volátil da placa de circuito impresso.
- Apagamento de dados contidos nos endereços de memória.
- Gravação de nova cronologia de vôo nos endereços pertinentes.
- Instalação de memória na placa de circuito impresso.
- Montagem mecânica do módulo.
- Realização de ensaio funcional.
- Instalação de módulo no foguete.

Uma vista do foguete VSB-30 (AEB, 2006), totalmente integrado e pronto para lançamento, é apresentado na Figura 3. Nessa figura pode-se observar o Módulo Dianteiro do Segundo Estágio, no qual estão instalados os equipamentos de Geração de Ordens Pirotécnicas.



Figura 3 – Fogete VSB-30 integrado no lançador.

Com o objetivo de atender o procedimento de desmontagem para efetuar alterações dos dados da seqüência de eventos é necessário retirar esse foguete do lançador e colocá-lo em local dedicado à realização dessa tarefa. Na Figura 4 é apresentado vista dos equipamentos responsáveis pela geração dos comandos e execução das ordens pirotécnicas em vôo, ainda instalados no do Módulo Dianteiro do Segundo Estágio de um foguete VSB-30.



Figura 4 – Vista do Módulo Dianteiro do Segundo Estágio do foguete VSB-30.

A Figura 5 mostra exemplo de sistema gerador de ordens retirado do foguete de sondagem e na primeira fase de desmontagem com a meta de realizar apagamento, teste e gravação de novos dados que corresponderão com a missão de lançamento.

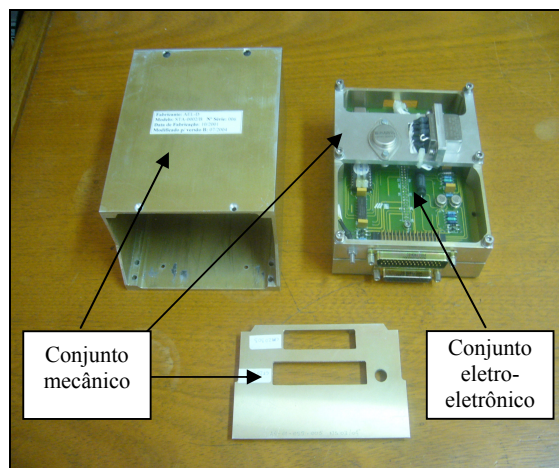


Figura 5 – Primeira fase de desmontagem do sistema gerador de ordens.

A segunda fase de desmontagem do equipamento Gerador de Ordens Pirotécnicas, é mostrada na Figura 6. Nessa figura pode ser observada a placa reguladora de tensão, placa de relés e a placa geradora de ordens.

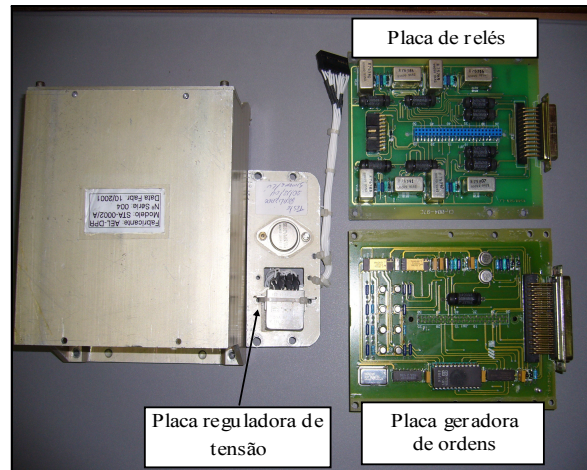


Figura 6 – Segunda fase de desmontagem do sistema gerador de ordens.

Um detalhe da memória não-volátil retirada do soquete na placa de circuito impresso, do equipamento gerador de ordens, é apresentada na Figura 7.

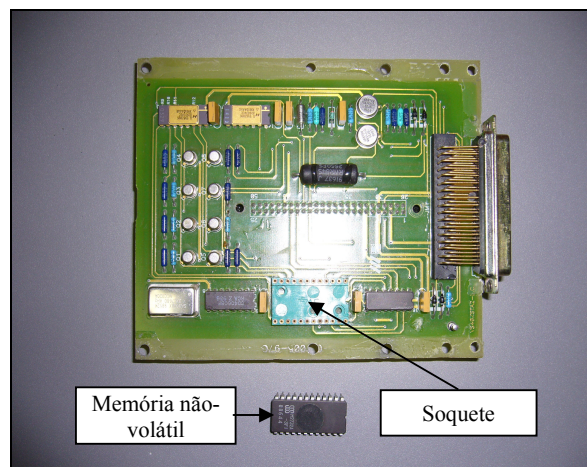


Figura 7 – Memória não-volátil retirada da do soquete.

A Figura 8, mostra vista do conjunto de equipamentos necessários para a realização de apagamento, teste de conteúdo e gravação de dados relacionados com eventos de vôo de foguete de sondagem.

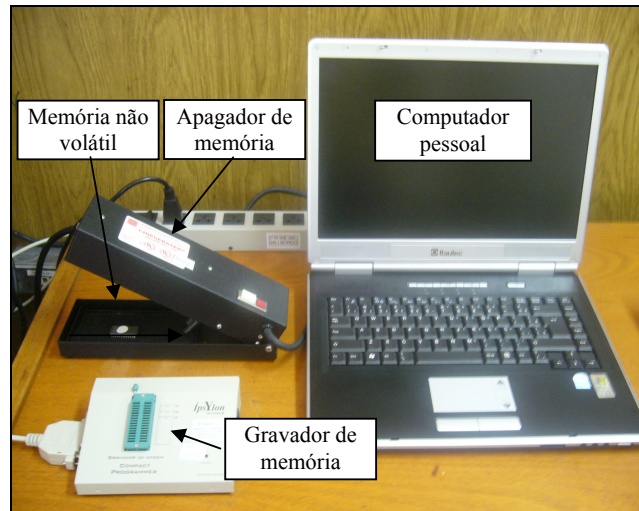


Figura 8 – Equipamentos para programação de memória não-volátil.

Na segunda hipótese é necessária, no mínimo, a execução dos passos seguintes:

- Desenvolvimento de um novo projeto de módulo.
- Prototipagem do modelo de desenvolvimento.
- Realização de ensaios de desenvolvimento.
- Fabricação do modelo de qualificação.
- Realização de ensaios de qualificação.
- Produção do modelo de voo.
- Realização de ensaios de aceitação.

Em ambas hipóteses podem ser identificados limites relacionados ao tempo de implementação e custos envolvidos. Em função desses limites se faz necessário o estudo de novas arquiteturas que permitam o desenvolvimento desses módulos visando à minimização das conseqüências observadas nas aludidas hipóteses.

## 1.2 Solução Proposta

Utilizar na arquitetura sistêmica dos módulos Geradores de Ordens Pirotécnicas dispositivos com flexibilidade na sua configuração e com programação remota. Esses dispositivos deverão permitir, principalmente, a modificação na lógica de operação, no endereçamento de sinais, nos sentidos de fluxo e mudança de estado de sinais, de modo remoto, sem exigir alterações significativas na placa de montagem e objetivando a minimização dos limites apresentados.

A utilização desses dispositivos, nos módulos Geradores de Ordens Pirotécnicas, deverá tornar possível inclusão de sinais oriundos de elementos sensores provenientes de diferentes eventos físicos na decisão de ativação das ordens, sem a necessidade de efetuar mudanças de *hardware*. Essa inclusão deverá manter inalterado o circuito de suprimento de potência para os elementos eletropirotécnicos, bem como, possibilitar mudanças na programação dos tempos de execução das ordens pirotécnicas sem a necessidade de desmontagem desses módulos.

## 1.3 Objetivos do Trabalho

A principal meta deste trabalho está concentrada no estudo para a utilização de dispositivos baseados em lógica programável estruturada na arquitetura de sistema dos módulos Geradores de Ordens Pirotécnicas, presentes em foguetes de sondagem, com o mínimo impacto na sua atual configuração.



Esses dispositivos deverão permitir que os tempos, relativos às ordens, sejam programados em solo, de modo remoto e dentro de cronologia que precede o lançamento.

A adoção dessa arquitetura deverá privilegiar a flexibilidade funcional, a facilidade na gravação dos tempos de execução das ordens, a minimização de custos de desenvolvimento, a redução no tempo de desenvolvimento, a qualificação de novas tecnologias em ambientes não convencionais, o aumento de segurança em solo e o desempenho do sistema em vôo.

Validar essa proposta de arquitetura por meio da implementação de um protótipo de Gerador de Ordens Pirotécnicas, com arquitetura baseada em Lógica Programável Estruturada, o qual deverá ser flexível em configuração.

## **1.4 Revisão Bibliográfica**

Em pesquisa realizada entre o ano de 2005 e 2006, foi observada limitada quantidade de trabalhos relacionados com a utilização de Lógica Programável Estruturada aplicada diretamente ao controle de atitude ou da ativação de eventos pirotécnicos em vôo, de foguetes de sondagem. Em função disso é apresentado nesta subseção dois trabalhos relacionados com foguetes de sondagem.

No primeiro é abordada uma proposta de concepção de Módulo de Interface, utilizando dispositivos lógicos com flexibilidade na configuração, para executar comandos de monitoração e comutação de relés instalados em sistemas elétricos presentes em foguetes de sondagem. Esse Módulo de Interface foi elaborado de modo a permitir que o Banco de Controle<sup>5</sup> comande remotamente os módulos da Rede Elétrica do veículo via comunicação

---

<sup>5</sup> Banco de Controle – conjunto de equipamentos de apoio em solo.

serial. O referido trabalho intitulado “Concepção de um Módulo de Interface para Veículos de Sondagem Utilizando Dispositivos Lógicos Reconfiguráveis”, apresenta os ganhos quanto à possibilidade de se flexibilizar a configuração do Banco de Controle em função das necessidades e particularidades de cada foguete de sondagem em cada missão de lançamento (ASAKA, 2006). Nesse trabalho também é apresentada a melhoria obtida em função do registro de eventos, a geração de alertas em caso de anomalias ou de seqüências indevidas de comandos e principalmente a redução no número de condutores do cabo umbilical.

Cabe mencionar que nessa proposta de interface, a implementação de dispositivos baseados em Lógica Programável Estruturada embarcados em foguetes de sondagem, não possui ações durante o voo do foguete, limitando-se a comandos e medições efetuados durante o processo de preparação para voo. A Figura 9 mostra o Módulo de Interface integrado na arquitetura de comando e aquisição de dados de foguete de sondagem.

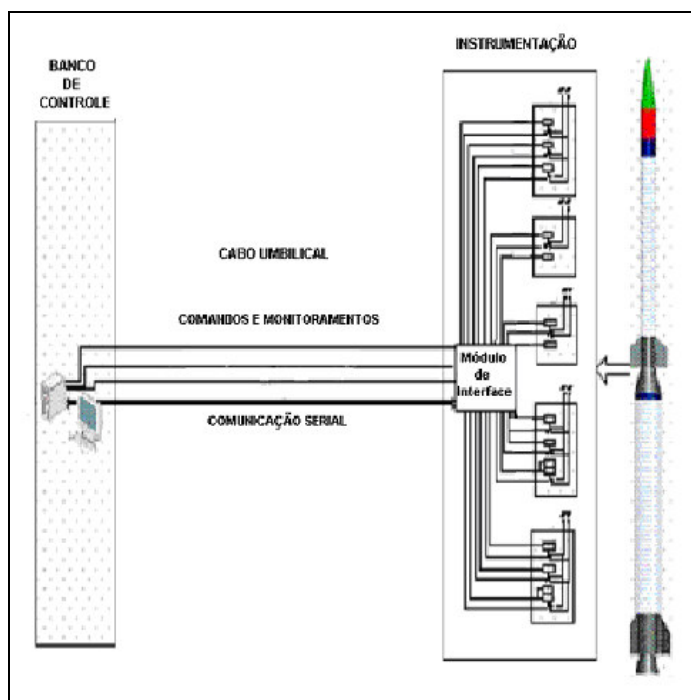


Figura 9 – Arquitetura de comando e aquisição de dados (ASAKA, 2006).

O segundo trabalho está relacionado ao desenvolvimento de novos sistemas computacionais embarcados em cargas-úteis, nos quais são analisados os ganhos que se poderia obter na hipótese de substituir os sistemas digitais implementados de forma convencional, utilizados na década de 90, por módulos baseados em lógica programável estruturada (BEZERRA, 1999). O caso estudado nesse trabalho baseia-se no voo de um foguete de sondagem, da Agência Espacial Americana (NASA- *National Aeronautics and Space Administration.*), contendo módulo de instrumentação denominado SVALBARD, lançado a partir de Spitzbergen, Noruega, em 1997. Nesse módulo foram previstos aplicações que utilizam microcontroladores, com processamento em tempo real, em experimento científico para o *Space Science Centre*<sup>6</sup> da Universidade de Sussex, Inglaterra.

Esse estudo propõe a substituição de sistemas que utilizam microcontroladores, embarcado em foguete de sondagem, por módulos baseados em Lógica Programável Estruturada. Essa substituição, segundo o autor, poderá acarretar ganhos em tempo de processamento, facilidade de programação, simplicidade de implementação de circuitos em placas de circuito impresso e a utilização de funções específicas, diferentemente dos microcontroladores, onde a aplicação deve se adaptar aos recursos disponíveis pelo componente.

Na Figura 10, a versão (a) mostra o diagrama em blocos dos componentes do módulo SVALBARD na sua versão original, com microcontroladores e a versão (b) apresenta a configuração proposta com a utilização de Lógica Programável Estruturada, a qual é representada por um FPGA (*Field Programmable Gate Array*, arranjo de portas programáveis em campo) (BEZERRA, 1999).

---

<sup>6</sup> *Space Science Centre* – Centro de Ciência Espacial

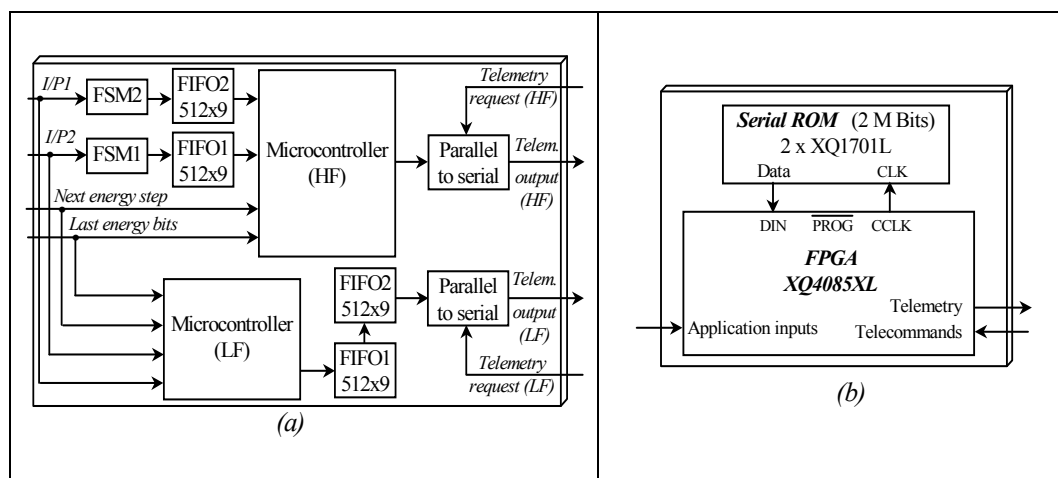


Figura 10 – Diagrama do SVALBARD. Versões (a) e (b) (BEZERRA, 1999).

## 1.5 Estrutura do Trabalho

A estrutura do trabalho mostra as partes que formam esta dissertação, com breve descrição de conteúdos dos capítulos previstos.

O capítulo 1 é composto pela descrição do problema, pela solução proposta, pelos objetivos do trabalho e pela revisão bibliográfica. Na caracterização do problema, são apresentadas, de maneira resumida as dificuldades hoje existentes para a modificação dos tempos de ativação das ordens pirotécnicas durante o processo de preparação para o lançamento de foguetes de sondagem. Quanto à solução proposta, é apresentada uma arquitetura baseada em Lógica Programável Estruturada, a qual enfatiza uma nova abordagem de arquitetura sistêmica, para esses módulos, tendo como referência características operacionais impostas pelo lançamento. No item relativo aos objetivos, são apresentados os benefícios que se deseja obter com o desempenho da arquitetura proposta, utilizando novas tecnologias, em sistemas digitais reprogramáveis disponíveis no mercado. Na revisão

bibliográfica são apresentados resumos de artigos técnicos que guardam relação com o presente trabalho.

No capítulo 2, tem-se a descrição dos conceitos básicos sobre foguetes de sondagem, redes elétricas embarcadas, circuito gerador de ordens pirotécnicas e Lógica Programável Estruturada. Esse capítulo tem por objetivo principal apresentar os conceitos básicos que o leitor deverá possuir para compreender os termos e conceitos utilizados neste trabalho.

O capítulo 3 contém o desenvolvimento do trabalho, no qual o principal destaque está na proposta de utilização de lógica programável estruturada, na arquitetura de sistema dos equipamentos Geradores de Ordens Pirotécnicas, como substituição às memórias não-voláteis atualmente utilizadas nesses sistemas. Essa proposta visa promover soluções para a gravação dos tempos de acionamento das ordens pirotécnicas de forma remota e com mínimo de impacto na execução da missão de lançamento, além de incrementar a flexibilidade do sistema. Valida-se a proposta deste trabalho por meio da implementação de um protótipo de equipamento Gerador de Ordens Pirotécnicas com arquitetura baseada em Lógica Programável Estruturada, o qual deverá ser re-configurável pelo usuário final, por meio de macro-instruções.

No capítulo 4, são mostradas as conclusões do trabalho e indicações para trabalhos futuros.

## **CAPÍTULO 2 - CONCEITOS BÁSICOS**

Este capítulo tem como objetivo apresentar, os principais conceitos relacionados com foguetes de sondagem, redes elétricas embarcadas, sistema Gerador de Ordens Pirotécnicas e Lógica Programável Estruturada. Esses conceitos formarão a base teórica necessária para o leitor compreender o conteúdo e as terminologias utilizadas no desenvolvimento deste trabalho.

### **2.1 Foguetes de Sondagem**

Os foguetes de sondagem são veículos lançadores de pequeno porte, usados para missões suborbitais de exploração do espaço, capazes de lançar cargas úteis compostas por experimentos científicos e tecnológicos (MILESKI, 2006).

A proposta dos foguetes espaciais foi cientificamente concebida por dois físicos: um russo, Konstantin Eduardo Ziolkowski (1857-1935) e outro o norte-americano Robert Hutschings Goddard (1882-1945). No dia 16 de março de 1926, Goddard lançou o primeiro foguete movido à gasolina e oxigênio líquidos.

Cinco anos mais tarde, no dia 13 de março de 1931, o engenheiro alemão Reinhold Tiling conseguiu patentear uma tecnologia que hoje está sendo redescoberta pela astronáutica: o foguete reutilizável, movido a propelente sólido. O combustível sólido utilizado por Tiling era uma mistura de perclorato de amônio com pó de alumínio, que reage a

temperaturas de 2000°C a 3000°C. É o tipo de explosivo usado para a propulsão controlada de corpos sólidos, como, por exemplo, os foguetes espaciais empregados no lançamento de satélites. (IAE, 2006).

Os foguetes de sondagem podem ser: monoestágio ou bi-estágio, utilizados principalmente para a realização de experimentos científicos com baixo custo, risco moderado, rapidez de montagem e tempo reduzido em procedimentos que precedem os lançamentos (AEB, 2006).

Os tipos de foguetes de sondagem até então desenvolvidos e produzidos pelo Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), são impulsionados por propelente sólido. Um exemplo de família de foguetes de sondagem desenvolvida e produzida pelo referido Instituto é apresentada na Figura 11.

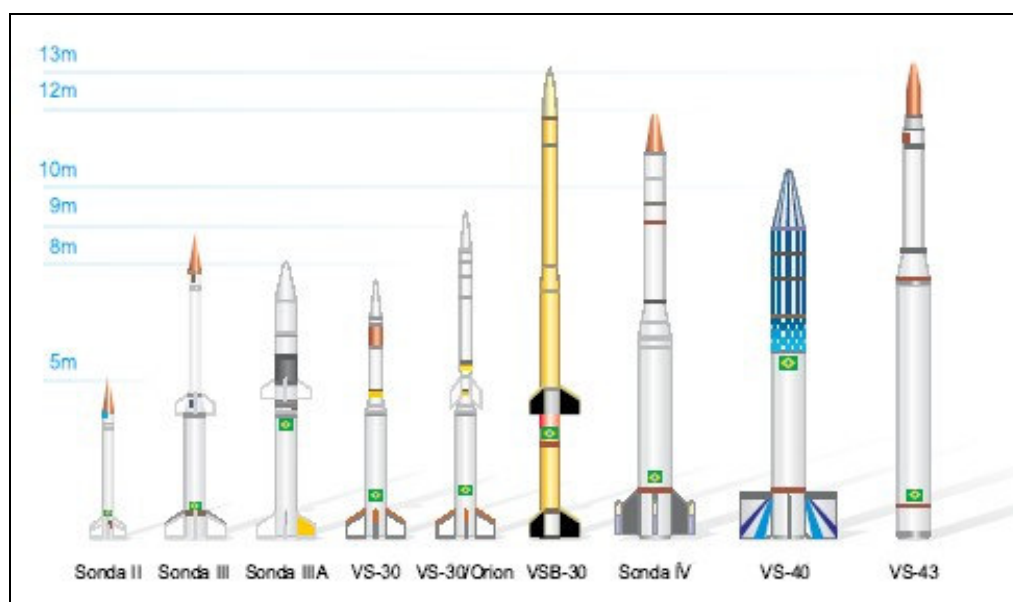


Figura 11 – Foguetes de sondagem produzidos pelo IAE (IAE, 2006).

Dentre os vários modelos desenvolvidos no IAE, o mais recente é denominado por VSB-30. Esse é um foguete de sondagem, biestágio, que utiliza propelente sólido em ambos

estágios, estabilizado em rolamento (estabilidade giroscópica<sup>7</sup>) sem controle de atitude<sup>8</sup> ou de guiagem<sup>9</sup> durante as duas fases propulsadas. Por ser um foguete de grande aceleração inicial, utiliza impulsores auxiliares de rolamento, além de empenas no primeiro e segundo estágios.

O VSB-30 utiliza sistemas eletrônicos convencionais para ativação de ordens pirotécnicas, ignição dos impulsores de rolamento do primeiro estágio, ignição do segundo estágio, ativação do sistema de frenagem de rolamento e ativação da ordem de separação de carga útil. A Figura 12 mostra as principais partes que o compõe esse foguete.

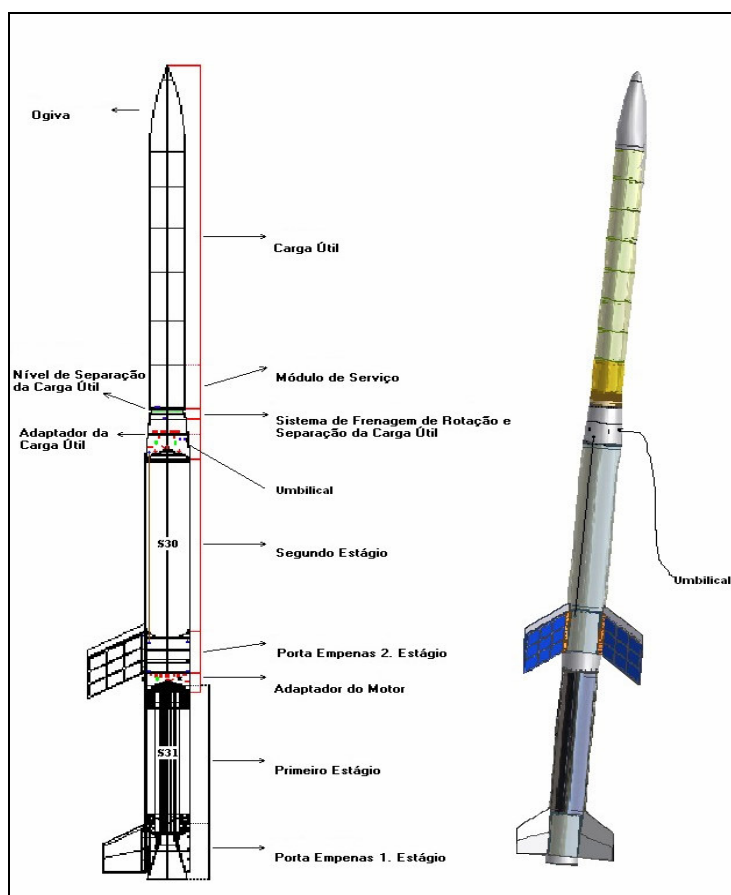


Figura 12 – Partes do foguete VSB-30 (IAE, 2005).

<sup>7</sup> Estabilidade giroscópica – é obtida com a indução de rotação utilizada em foguetes não controlados, com o objetivo de minimizar a dispersão do ponto de impacto do foguete.

<sup>8</sup> Controle de atitude - é definido como a capacidade de controlar a trajetória pré-estabelecida de um foguete em um plano.

<sup>9</sup> Guiagem – é definido como a capacidade de controlar a trajetória de um foguete.



## 2.1.1 Componentes dos Foguetes de Sondagem

Esta subseção apresenta os principais conceitos sobre os componentes utilizados nos foguetes de sondagem.

### 2.1.1.1 Propelente Sólido

O propelente é constituído de uma resina que tem as seguintes funções:

- Definir uma forma ao propelente após a cura.
- Abrigar o oxidante, o alumínio em pó e os aditivos.
- Queimar sob a ação do oxidante.

O propelente é produzido de forma pastosa e é vertido dentro do envelope motor, o qual deverá estar equipado com as proteções térmicas. O conjunto é curado sob vácuo, para eliminação de bolhas (PALMÉRIO, 2002). A Figura 13 apresenta vista de motor foguete carregado com propelente sólido, sendo que esse propelente teve sua configuração executada em forma de estrela (DORE, 2005).



Figura 13 – Exemplo de motor carregado (DORE, 2005).

### 2.1.1.2 Impulsores de Rolamento

São motores de pequenas dimensões, carregados com propelente sólido, utilizados para gerar incremento de velocidade angular em rolamento durante a fase propulsada do primeiro estágio, conforme detalhe mostrado na Figura 14.

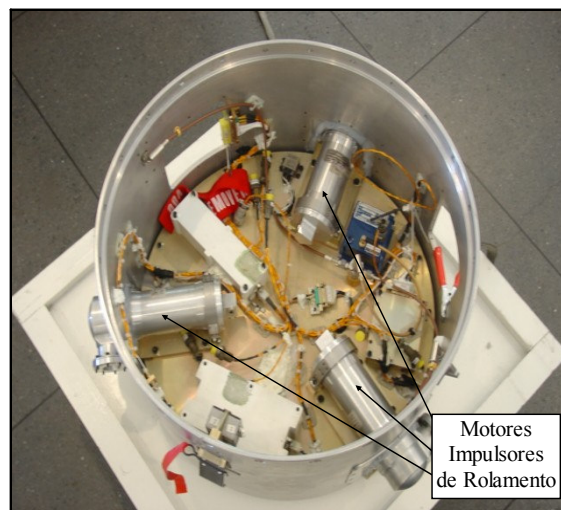


Figura 14 – Impulsores de Rolamento.

Além das empenas, como será apresentado na próxima subseção, é necessária a utilização desses impulsores para se obter estabilidade giroscópica de forma rápida e assim, tornar o foguete estável durante o seu voo. O gráfico apresentado na Figura 15 mostra dados recuperados de voo, colhidos pela telemetria de um foguete de sondagem VSB-30, no qual pode ser observado o rápido aumento de velocidade angular no eixo de rolamento do foguete devido à ignição dos impulsores de rolamento. Essa situação é observada logo após a decolagem do foguete (VISCONTI, 2005-A).

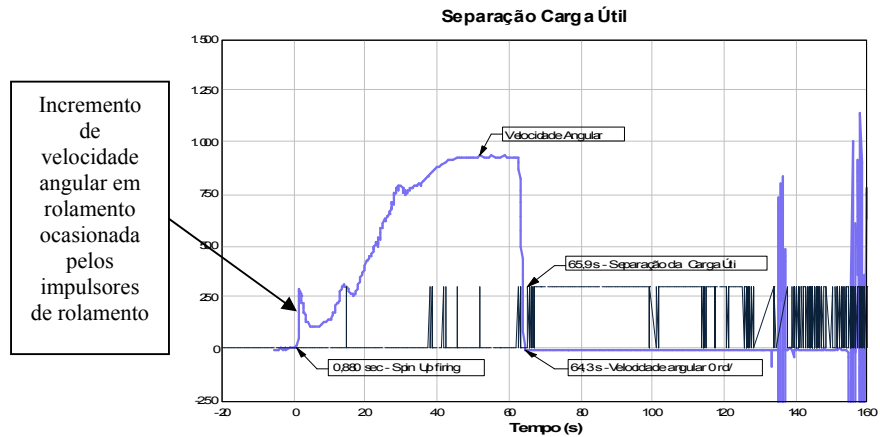


Figura 15 – Efeito causado pelos impulsores de rolagem (VISCONTI, 2005-A).

### 2.1.1.3 Empenas

As empenas desempenham papel na aerodinâmica do veículo, trazendo o centro de pressão em sua direção. Sua forma varia de acordo com os requisitos de estabilidade estática e dinâmica de cada veículo. Mesmo em alguns veículos controlados, as empenas podem ser necessárias para diminuir a margem estática<sup>10</sup>, exigindo menor torque de controle. A Figura 16 mostra as empenas do primeiro e segundo estágios instaladas em um foguete Sonda III (AEB, 2006).

<sup>10</sup> Margem estática – distância entre o centro de gravidade e o centro de pressão em um foguete.



Figura 16 – Empenas instaladas no foguete.

#### 2.1.1.4 Sistema de Frenagem de Rolamento

Para efetuar a separação de cargas úteis nos foguetes de sondagem há necessidade de que a sua velocidade angular no eixo de rolamento seja minimizada ou anulada, essa situação é exigida para obter êxito na missão. Uma das formas de minimizar essa velocidade angular é por meio do uso de módulo denominado por Sistema de Frenagem de Rolamento (Yo-Yo). Esse sistema consiste de duas massas presas nas extremidades de dois cabos enrolados em torno do corpo a ser freado, conforme detalhe apresentado na Figura 17.

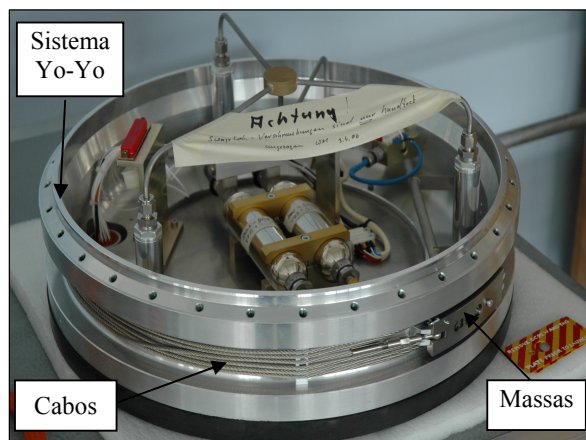


Figura 17 – Exemplo de Sistema de Frenagem de Rolamento.

No período de tempo previsto, as massas do sistema de frenagem são liberadas, desenrolando os cabos e reduzindo a velocidade de rotação do conjunto, pelo princípio da conservação do momento angular. Quando os cabos estão inteiramente esticados, esses são cortados ou se desprendem automaticamente, ficando a carga útil com a velocidade de rotação residual (PALMÉRIO, 2002). Os dados colhidos em vôo de um foguete VSB-30, por meio da telemetria de bordo, são apresentados no gráfico da Figura 18. Nesse gráfico pode-se observar o decréscimo da velocidade angular no eixo de rotação do foguete, logo após o acionamento do Yo-Yo.

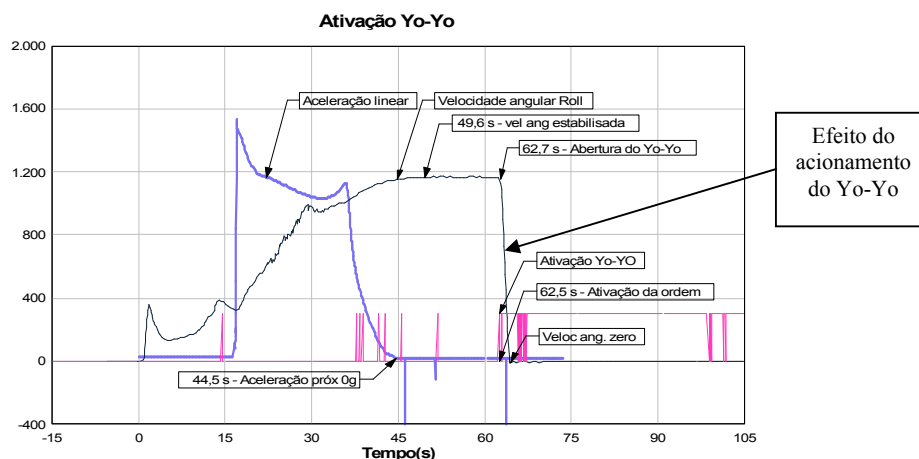


Figura 18 – Decremento de rotação por efeito do Yo-Yo (VISCONTI, 2005-B).

### 2.1.1.5 Módulo de Separação da Carga Útil

O Módulo de Separação da Carga Útil<sup>11</sup> é parte integrante do foguete, que tem o objetivo de promover, a partir de uma ordem pirotécnica, a separação entre o último estágio propulsado de um foguete de sondagem e a sua Carga Útil. Esse módulo é composto de elementos eletropirotécnicos, previstos na cinta de separação, garrafas de pressurização e pistões, utilizados para impulsionar o módulo da Carga Útil no momento da separação, evitando assim, perturbações indesejadas nesse momento. A Figura 19 apresenta exemplo de conjunto integrado de um Módulo de Separação da Carga Útil.

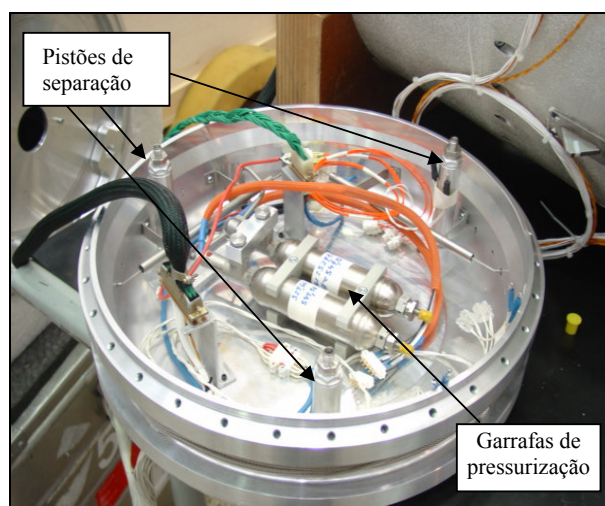


Figura 19 – Exemplo de módulo de separação.

---

<sup>11</sup> Carga útil – compartimentos instalados acima do último estágio propulsado de foguetes de sondagem, onde se encontram instalados os mais diversos experimentos científicos.

## 2.2 Redes Eléctricas Embarcadas

O foguete de sondagem pode ser dividido em subsistemas, segundo as funções executadas pelos mesmos. Um desses subsistemas está relacionado com as Redes Eléctricas embarcadas. Essa rede pode ser desmembrada em Rede de Serviço, Telemédidas e Segurança, conforme diagrama apresentado na Figura 20.

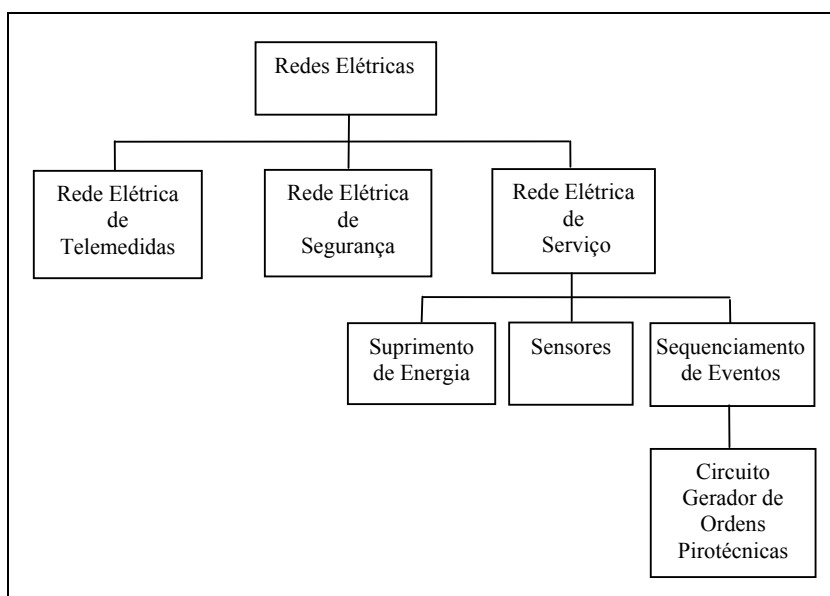


Figura 20 – Desmembramento das Redes Eléctricas Embarcadas.

### 2.2.1 Rede Eléctrica de Telemédidas

Essa rede é responsável pela aquisição e envio dos dados de bordo para uma determinada estação, localizada em terra, a qual é denominada por Telemédidas. Essa aquisição e envio de dados é realizada por meio de sistema de Modulação por Código de Pulso (*Pulse Code Modulation* - PCM) e transmissor de rádio frequência respectivamente.

Pela interpretação desses dados é possível obter informações sobre desempenho do foguete e dos experimentos nele embarcados.

### **2.2.2 Rede Elétrica de Segurança**

Essa rede é responsável pela finalização antecipada do vôo do foguete e pela emissão de sinais que facilitem o rastreamento do foguete pelo sistema radar instalado em solo.

A ordem de finalização pode ser gerada pelo próprio foguete ou remotamente por ação de operadores em solo. A ordem é gerada pelo próprio foguete quando ocorrer eventos como, por exemplo, relacionados com separação intempestiva entre estágios, os quais são de difícil identificação imediata pelo operador em solo. As ordens são enviadas de solo quando, por exemplo, ocorrer desvio da trajetória prevista para o vôo do foguete. Essa situação pode colocar em risco áreas habitadas ou não permitidas para queda de partes do foguete. Essa rede pode incluir um equipamento denominado por Responder Radar, o qual facilita o rastreamento do foguete durante o seu vôo.

### **2.2.3 Rede Elétrica de Serviço**

A Rede Elétrica de Serviço é dividida em três subsistemas denominados por Suprimento de Energia, Seqüenciamento de Eventos e Sensores. Esses subsistemas são responsáveis: i) pelo suprimento e distribuição de energia elétrica durante o vôo do foguete, ii) pelo monitoramento de parâmetros físicos relacionados ao desempenho do foguete e iii) pela geração de ordens e execução dos eventos eletropiro-técnicos previstos para o vôo.



### 2.2.3.1 Suprimento de Energia

Durante o processo de preparação para lançamento, as Redes Elétricas do foguete utilizam energia elétrica proveniente do Banco de Controle. Essa energia é fornecida por fontes de tensão, em corrente contínua, denominadas por Fontes de Alimentações Externas. A energia dessas fontes é transmitida por meio dos cabos umbilicais e distribuída internamente para as diversas cargas instaladas no foguete. Durante a fase de vôo, o fornecimento de energia elétrica é realizado por meio de Baterias Funcionais<sup>12</sup> instaladas a bordo do foguete, conforme exemplo apresentado na Figura 21. O Suprimento de Energia é responsável também pela realização da comutação da fonte de alimentação externa para interna, comando esse, realizado pelo Banco de Controle em instantes que antecedem o lançamento do foguete.



Figura 21 – Bateria Funcional.

---

<sup>12</sup> Baterias Funcionais – são conjuntos de células (acumuladores de energia elétrica) ligadas entre si, de forma a fornecer tensões nominais adequadas para os equipamentos de bordo, durante o vôo do foguete.

### 2.2.3.2 Sensores

O subsistema Sensores é responsável pelo monitoramento de parâmetros físicos relacionados ao desempenho do foguete, tais como: velocidade angular, pressão barométrica e absoluta dentre outros. Atualmente, no foguete VSB-30, restringem-se aos monitoramentos de pressões das câmaras de combustão dos motores do primeiro e segundo estágios. Exemplos desses sensores são mostrados na Figura 22.

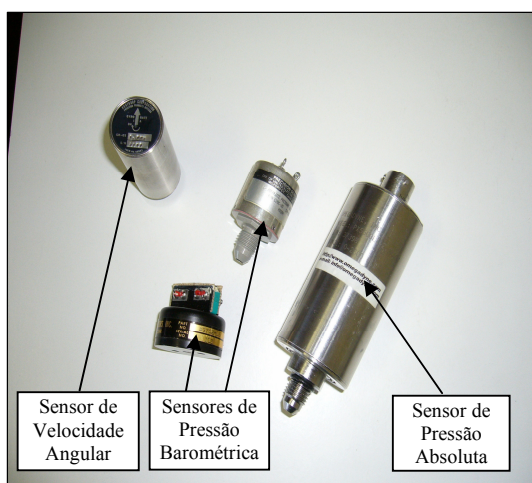


Figura 22 – Sensores utilizados em foguetes de sondagem.

### 2.2.3.3 Seqüenciamento de Eventos

O subsistema Seqüenciamento de Eventos é o responsável pela segurança em solo, durante o processo de preparação para o lançamento do foguete, e execução dos eventos pirotécnicos previstos para o vôo. Esse subsistema é composto por dispositivos eletropirotécnicos, fontes de energia e circuito gerador de ordens pirotécnicas.

A execução dos eventos pirotécnicos deve desencadear sistemas de separação de estágios, ignição de motores foguetes, destruição ou outro evento necessário para a realização completa da missão.

#### 2.2.3.3.1 Eventos Pirotécnicos

Os Eventos Pirotécnicos podem ser definidos como seqüência de comandos preestabelecidos e provenientes de circuitos eletro-eletrônicos que determinam o fluxo de corrente elétrica adequada, derivado das baterias de pirotécnicos, até os elementos eletropirotécnicos, no sentido de sensibilizá-los.

#### 2.2.3.3.2 Dispositivos Eletropirotécnicos

Esses dispositivos são componentes acionados por meio de corrente elétrica que inicia o processo químico de estímulo de uma carga explosiva, com isso possibilita a execução de eventos durante o vôo do foguete (PINHEIRO, 2005).

A Figura 23 apresenta um exemplo de dispositivo eletropirotécnico utilizado no acionamento de piroválvulas<sup>13</sup>.

---

<sup>13</sup> Piroválvulas – válvulas eletromecânicas que mudam de estado em função do acionamento de elementos pirotécnicos.



Figura 23 – Dispositivo eletropirotécnico.

#### 2.2.3.3.3 Fontes de Energia

As fontes químicas, de energia elétrica, utilizadas no Seqüenciamento de Eventos são formadas por conjuntos de células adequadamente agrupadas. Esses conjuntos quando integrados ao sistema elétrico do foguete devem ser configurados de modo redundante e estarem fisicamente separados. Essas fontes fornecem energia elétrica aos elementos eletropirotécnicos instalados a bordo do foguete. A Figura 24 mostra exemplo de conjunto integrado e destinado ao atendimento de eletropirotécnicos.

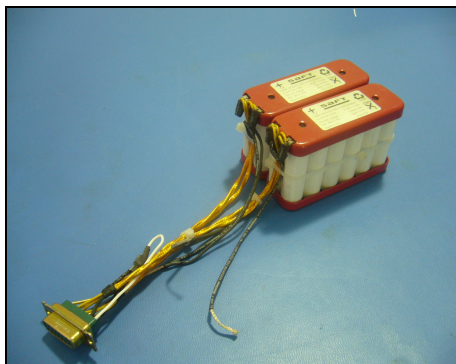


Figura 24 – Fontes de energia elétrica para pirotécnicos.

#### 2.2.3.3.4 Circuito Gerador de Ordens Pirotécnicas

O Circuito Gerador de Ordens Pirotécnicas é um dispositivo eletro-eletrônico, atualmente utilizado em foguetes de sondagem desenvolvidos pelo Instituto de Aeronáutica e Espaço, tendo como principal função a ativação dos eventos pirotécnicos que ocorrerão de forma seqüencial durante o vôo do foguete. Os tempos de acionamento desses eventos são previamente calculados e gravados em memória não-volátil, a qual é atualmente parte integrante do Circuito Gerador de Ordens Pirotécnicas.

Esse circuito pode ser disparado por banco de controle, o qual fornece um sinal de comando em solo que equivale à soltura do cabo umbilical ou em vôo pela efetiva soltura desse cabo, situação que ocorre na decolagem do veículo. Por se tratar de um dispositivo que aciona eventos pirotécnicos, principalmente a ignição de motores foguetes, deve-se salientar a função segurança. Nesse contexto devem ser observados todos os cuidados com a segurança em solo e durante o vôo, para que não ocorram falhas intempestivas durante todo o processo, situação com potencial de ocasionar perda de missão ou até riscos de acidentes durante a preparação do veículo.

O diagrama elétrico representativo do circuito elétrico do Gerador de Ordens Pirotécnicas atualmente utilizado no foguete de sondagem VSB-30 é apresentado na Figura 25.

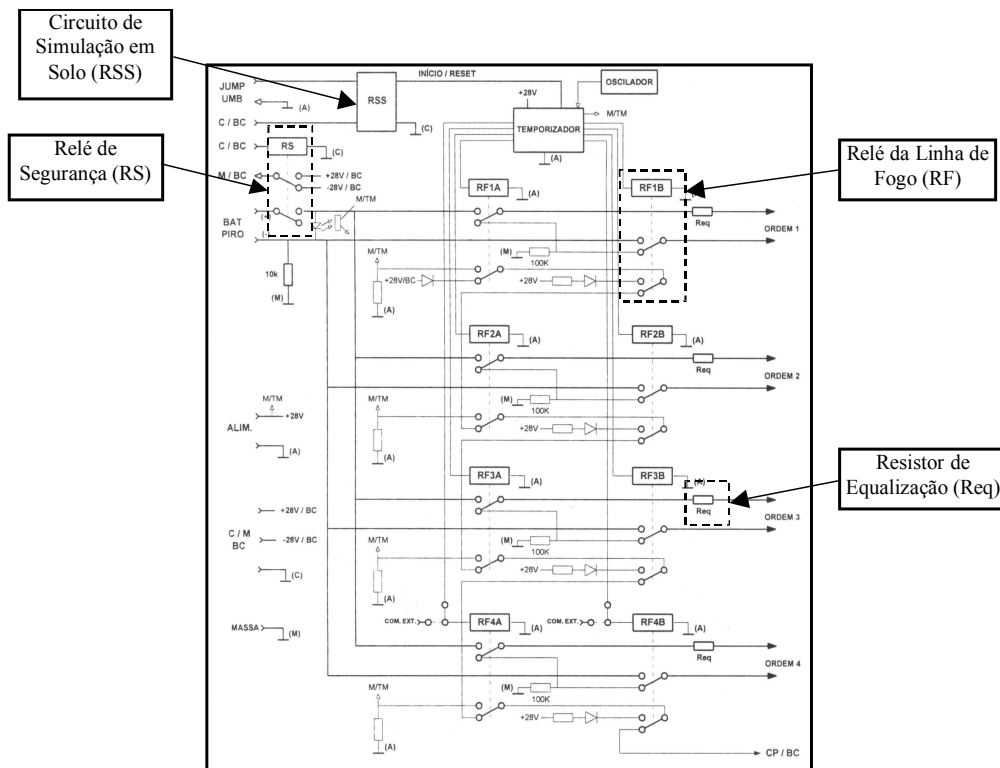


Figura 25 – Diagrama do circuito Gerador de Ordens Pirotécnicas (VISCONTI, 2005-A).

As principais partes que compõem o circuito apresentado no diagrama da Figura 25 são: o Relé de Segurança (RS), o Temporizador, o circuito de Simulação em Solo (RSS), os Relés de Linha de Fogo (RF)<sup>14</sup> e os Resistores de Equalização (Req).

O Relé de Segurança tem por essencial função impedir a passagem de energia elétrica para os relés da Linha de Fogo, em condições pré-estabelecidas. Esse relé é do tipo biestável e tipicamente possui dois conjuntos de contatos reversíveis, dos quais um conjunto é instalado em configuração série no circuito formado entre a Bateria de Pirotécnicos e Linha de Fogo. As posições que esse relé pode assumir são denominadas por: Segurança e Armada. Na posição de Segurança não é permitida que a bateria de pirotécnicos seja conectada ao elemento eletropirotécnico, mesmo na hipótese de acionamento dos relés de Linha de Fogo.

<sup>14</sup> Linha de Fogo – circuito que atende diretamente os eletropirotécnicos destinados à realização de eventos pirotécnicos.

Na posição Armada, esse relé estabelece condição para permitir que a bateria de pirotécnicos seja conectada, por meio dos relés da Linha de Fogo, ao elemento eletropirotécnico. Essa condição é denominada por posição de vôo. O Relé de Segurança é comandado e monitorado em solo, pelo Banco de Controle, sendo que para a realização do monitoramento é utilizado um conjunto de contatos exclusivos para essa tarefa.

O Temporizador é um circuito eletrônico formado por divisor de frequência, contador e memória não-volátil. Nesse circuito o divisor de frequência realiza a divisão do tempo gerado pelo oscilador segundo uma base de tempo preestabelecida. O contador gera seqüência de sinais para um barramento que é destinado ao endereçamento de memória, os quais estão relacionados com a quantidade de variações alcançadas pelo mencionado divisor. Na memória não-volátil são gravados os dados correspondentes aos tempos de ativação e duração das ordens relativas à missão do foguete. Esse Temporizador pode ser iniciado por um sinal de simulação oriundo do Banco de Controle ou pela soltura do cabo umbilical, sendo que esse último ocorre na decolagem do veículo.

O Circuito de Simulação em Solo gera o mencionado sinal de simulação que tem por finalidade permitir que o operador avalie a integridade funcional do Circuito Gerador de Ordens, durante a fase de testes da Rede Elétrica do foguete.

Os Relés de Linha de Fogo são previstos aos pares para cada evento pirotécnico, sendo que um relé é instalado na linha positiva e outro na linha negativa do circuito que atende o eletropirotécnico. São comandados simultaneamente pelo Temporizador e tem a função de efetuar a atuação dos eletropirotécnicos, em conformidade com os tempos de atuação e duração programados para o vôo do foguete. Esses relés são do tipo monoestável<sup>15</sup> e com dois conjuntos de contatos reversíveis. Um desses conjuntos é utilizado para permitir a passagem

---

<sup>15</sup> Monoestável – circuito que tem dois estados, em que, somente um deles é estável.

da corrente elétrica para o elemento eletropirotécnico. O outro conjunto é de uso exclusivo para a realização do monitoramento da condição passiva<sup>16</sup> pelo Banco de Controle.

Os Resistores de Equalização têm a função de adequar as intensidades de correntes que circulam em circuitos de diferentes comprimentos que atendem os eletropirotécnicos e limitar a energia drenada da bateria na hipótese de manifestação de curto-circuito nos terminais internos do elemento eletropirotécnico.

## 2.3 Lógica Programável Estruturada

Os circuitos integrados digitais implementados em pastilha de silício podem ser classificados como circuitos digitais padrões ou Circuitos Digitais de Aplicação Específica (*Application Specific Integrated Circuits* - ASICs). Os Circuitos Digitais de Aplicação Específica são constituídos por portas lógicas<sup>17</sup> e necessitam de vários componentes externos para a realização de uma função específica (WAKERLEY, 2000).

Nas últimas décadas o desenvolvimento de projetos de circuitos digitais tem evoluído rapidamente, decorrente disso o aprimoramento dos Dispositivos Lógicos Programáveis (*Programmable Logic Devices* - PLDs) tem simplificado e acelerado todo o ciclo de projeto (ARAGÃO, 1998).

Esses dispositivos são circuitos integrados (CIs) que podem ser configurados pelo próprio usuário, não apresentam função lógica definida, até que sejam configurados, situação

---

<sup>16</sup> Condição passiva – indicação enviada para o Banco de Controle relacionada ao estado de repouso de todos os relés da Linha de Fogo. Essa indicação é obtida por meio de configuração série que envolve esses contatos.

<sup>17</sup> Porta lógica – circuito eletrônico que aplica um operador lógico para um sinal de entrada e produz uma saída.



adequada para atender possíveis mudanças relacionadas com a fase desenvolvimento, minimizar o ciclo de projeto e diminuir os custos diretos (TEIXEIRA, 2002).

Nesse contexto, os PLDs podem ser classificados em função do número de portas lógicas que comportam, como descrito a seguir (ZAGHETTO et al., 2001):

- Dispositivos Lógicos Programáveis Simples (*Simple Programmable Logic Devices - SPLDs*).
- Dispositivos Lógicos de Alta Complexidade (*High Complex Programmable Logic Devices - HCPLDs*).

### 2.3.1 Dispositivos Lógicos Programáveis Simples

Os Dispositivos Lógicos Programáveis Simples de baixa capacidade contêm, tipicamente, menos de 600 portas lógicas, fabricados com tecnologia CMOS<sup>18</sup>, possuem em seu interior diversas portas lógicas, flip-flops<sup>19</sup> e registradores<sup>20</sup>, que oferecem uma forma flexível de arranjo desses componentes no nível de *hardware*. Com isso, diversas portas lógicas podem ser substituídas por um único circuito integrado, trazendo como consequência, menor consumo, minimização de área utilizada na placa de montagem e eliminação de interconexões entre componentes. Além disso, o fato de ser reconfigurável permite alterar o circuito lógico sem a necessidade de efetuar mudanças nessa placa.

---

<sup>18</sup> *Complementary Metal Oxide Semiconductor* (CMOS) - trata-se de uma família de circuitos integrados, que tem seus circuitos construídos por transistores MOS-FET (*Metal Oxide Semiconductor- Field Effect Transistor*) do tipo canal N ou canal P.

<sup>19</sup> Flip-flop - conjunto digital pulsado capaz de servir como uma memória de um bit.

<sup>20</sup> Registrador - é o circuito ou dispositivo que efetua o registro de um dado ou um evento.

Os Arranjos Lógicos Programáveis (*Programmables Logic Arrays - PLAs*) foram os primeiros Dispositivos Lógicos Programáveis Simples desenvolvidos especificamente para a implementação de circuitos lógicos. A arquitetura desses dispositivos consiste de uma grande matriz de caminhos entre os pinos de entrada e saída, com portas lógicas e uma ligação-fusível em cada ponto de conexão, que podem ser interrompidas ou não quando definida a programação de uma função de entrada para a saída. A Figura 26 mostra o plano AND e OR de um Arranjo Lógico Programável.

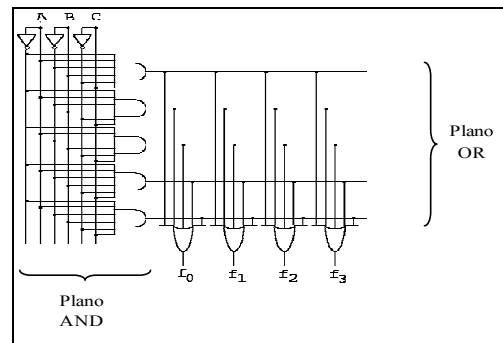


Figura 26 – Diagrama simplificado de um PLA.

A tecnologia utilizada nesses dispositivos também apresenta algumas limitações relacionadas principalmente com custo elevado para fabricação e baixo desempenho relacionado com a velocidade de propagação dos sinais elétricos (TEIXEIRA, 2002).

### 2.3.2 Dispositivos Lógicos Programáveis de Alta Complexidade

Esses dispositivos contêm tipicamente mais do que 600 portas lógicas, sendo que a complexidade de sua arquitetura está diretamente relacionada com a quantidade dessas portas.

Os dispositivos mais modernos podem atingir cerca de 250.000 portas e englobam os Dispositivos Lógicos Programáveis Complexos (*Complex Programmable Logic Devices* - CPLDs<sup>21</sup>) e Arranjos de Portas Programáveis em Campo (*Field Programmable Gate Arrays* - FPGAs<sup>22</sup>), todos fabricados com tecnologia CMOS (COSTA, 2006).

### 2.3.2.1 Dispositivos Lógicos Programáveis Complexos

A arquitetura desses dispositivos é formada por várias estruturas repetidas, as quais são denominadas por Células Lógicas. Em cada uma dessas células estão previstos elementos com capacidade de implementar lógica combinacional<sup>23</sup> e *Latches*<sup>24</sup>. A combinação desses elementos com os *Latches* formam conjuntos que permitem realizar aplicações de lógica seqüencial<sup>25</sup>.

Interligando esses conjuntos são previstos multiplexadores programáveis que realizam a conexão entre: i) os mencionados elementos e os *Latches* e ii) esses conjuntos com o exterior da célula. Essa situação pode ocorrer para outra célula ou para barramentos (BARR, 1999).

O barramento é a via que promove a interligação entre as células. São conexões físicas, trilhas metalizadas, disponíveis no interior do circuito integrado. Dependendo do tipo de PLD envolvido, de sua complexidade e do seu fabricante, existem diferentes recursos e

---

<sup>21</sup> *Complex Programmable Logic Device* (CPLD) – dispositivo PLD de alta complexidade.

<sup>22</sup> *Field Programmable Gate Array* (FPGA) – dispositivo PLD que suporta tanto a implementação de circuitos lógicos relativamente grandes como processadores e blocos simples como flip-flops.

<sup>23</sup> Lógica combinacional – função lógica constituída de um número de portas lógicas separadas.

<sup>24</sup> *Latch* – componente que mantém uma condição de saída até que receba um sinal de entrada para mudar.

<sup>25</sup> Lógica seqüencial – circuito lógico cuja saída depende do estado lógico das entradas e estados anteriores armazenados.

modos de conexão. Esses modos de conexão podem ser segmentados para os FPGAs e contínuos aplicados aos CPLDs.

Os blocos de entrada e saída são os meios utilizados para realizar a interconexão com os componentes externos. A função desses blocos está concentrada em conectar as linhas pertinentes das células aos pinos do circuito integrado.

#### 2.3.2.1.1 Célula Lógica

A Célula Lógica é identificada como o conjunto ou bloco lógico que possui conexão com os barramentos do circuito integrado.

No interior de cada célula podem ser encontrados dois tipos possíveis para implementação de lógica combinacional: i) matriz de ANDs e ORs, ii) *Look-Up Table*<sup>26</sup>. Esse último tipo é preferido para PLD com maior complexidade, principalmente pela sua dupla funcionalidade, ou seja, memória ou gerador de função lógica.

A matriz programável de ANDs e ORs é utilizada em PLDs mais simples. Essa matriz implementa função lógica pela soma de produtos representada em mintermos<sup>27</sup>. Por meio do processo de configuração ou programação é definindo quais variáveis farão parte do mintermo em questão. Posteriormente a essa ação são configurados quais mintermos que serão considerados na porta OR, realizando assim a soma dos mintermos desejados. A Figura 27 mostra exemplo prático de matriz programável de ANDs e ORs.

---

<sup>26</sup> *Look Up Table* (LUT) – um tipo de bloco lógico que contém células de armazenamento, utilizadas para implementar pequenas funções lógicas.

<sup>27</sup> Mintermos – é um termo produto que vale um em apenas um ponto do domínio de uma função.

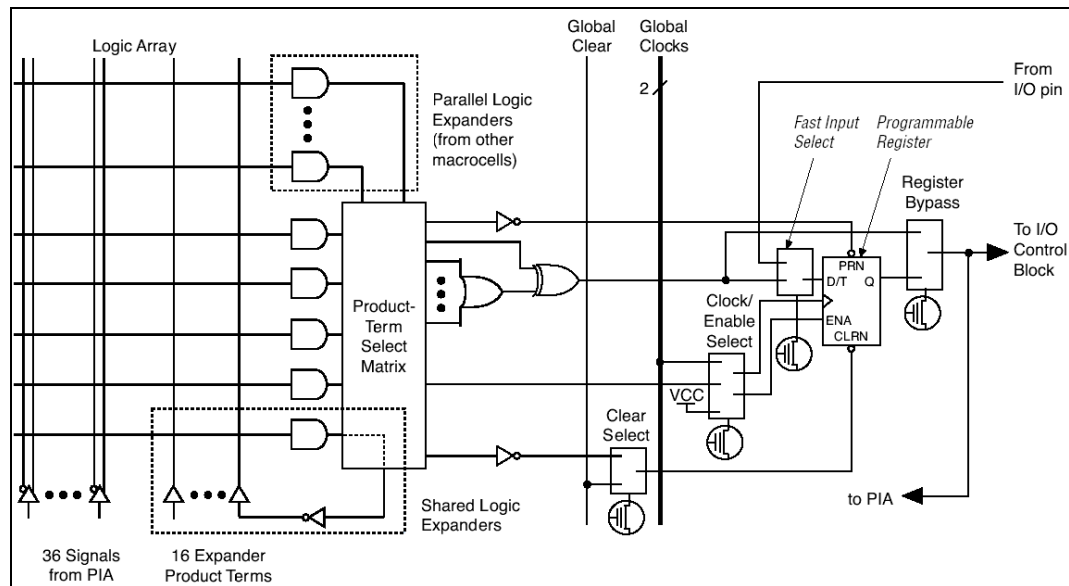


Figura 27 – Matriz programável de ANDs e ORs (ALTERA, 2006).

Em funções mais complexas pode ser necessária a configuração em cascata de mintermos. Essa configuração, por apresentar vários níveis lógicos envolvidos, acarreta maior atraso no sinal de saída, assim como eventuais problemas de falha repentina (*glitch*<sup>28</sup>) (ZAGHETTO, 2001).

### 2.3.2.1.2 Look-Up Table

A Look-Up Table (LUT) pode ser definida como uma memória pré-programada que fornece uma saída a partir de um conjunto de variáveis de entrada. Dessa forma, de modo diferente da matriz de AND e OR, que produz para cada entrada um valor de saída baseada na função lógica programada, a LUT utiliza a tabela-verdade da função que nela foi programada (ZAGHETTO, 2001).

<sup>28</sup> *Glitch* – qualquer ação ou evento que cause a falha repentina de um computador ou equipamento.

A Figura 28 apresenta o diagrama funcional de uma memória de 16 posições de endereços, por um bit<sup>29</sup> de dado. Essa memória pode ser utilizada como uma LUT de quatro bits, ou seja, 16 são as possibilidades da tabela-verdade de qualquer função de quatro variáveis.

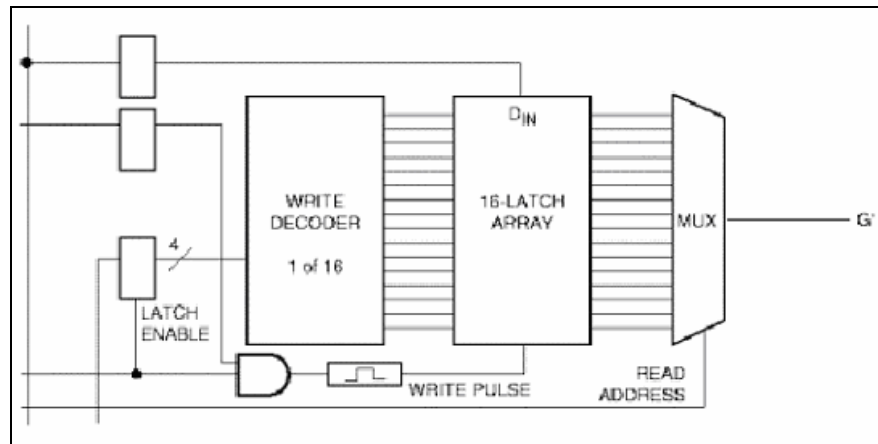


Figura 28 – Diagrama funcional de memória 16 x 1 bit (ALTERA, 2006).

Uma memória pode ser considerada como um conjunto de *Latches* possíveis de serem selecionados. No diagrama apresentado na Figura 28 são representados 16 *Latches* que podem ser selecionados para leitura, por meio do endereço de leitura, e para escrita, via endereço de escrita. Para programar essa memória é necessário colocar os sinais relacionados com as variáveis de entrada da função no endereço de escrita e o valor correspondente à saída desejada na linha denominada por “D<sub>IN</sub>”. Para leitura, é necessário colocar as mencionadas variáveis no endereço de leitura e o valor da função deve ser obtido na linha denominada por “G”.

É necessário que o bloco de memória seja configurado apenas para leitura quando for utilizado como uma LUT. Em função da arquitetura da LUT não realizar combinação lógica

<sup>29</sup> Bit – *binary digit* (dígito binário), menor unidade na notação numérica binária, que pode ter o valor zero ou um.

das variáveis de entrada, o atraso da função lógica depende apenas do tempo de leitura da memória que a implementa. Além dessa característica é acrescida a facilidade de programação, versatilidade e dupla funcionalidade, ou seja, uma mesma estrutura pode implementar tanto uma LUT quanto um Registrador ou *Latch*.

### 2.3.2.1.3 Estrutura Interna de Células - CPLD

Nos CPLDs mais complexos cada Célula Lógica (*Logic Array Block - LAB*), é constituída por unidades básicas denominadas por Elementos Lógicos (*Logic Elements - LE*). Esses elementos possuem LUTs, Flip-Flops e lógicas para interconexão entre elementos lógicos adjacentes, denominados por *Carry Chain* e *Cascade Chain*, conforme apresentado na Figura 29 (ALTERA, 2006).

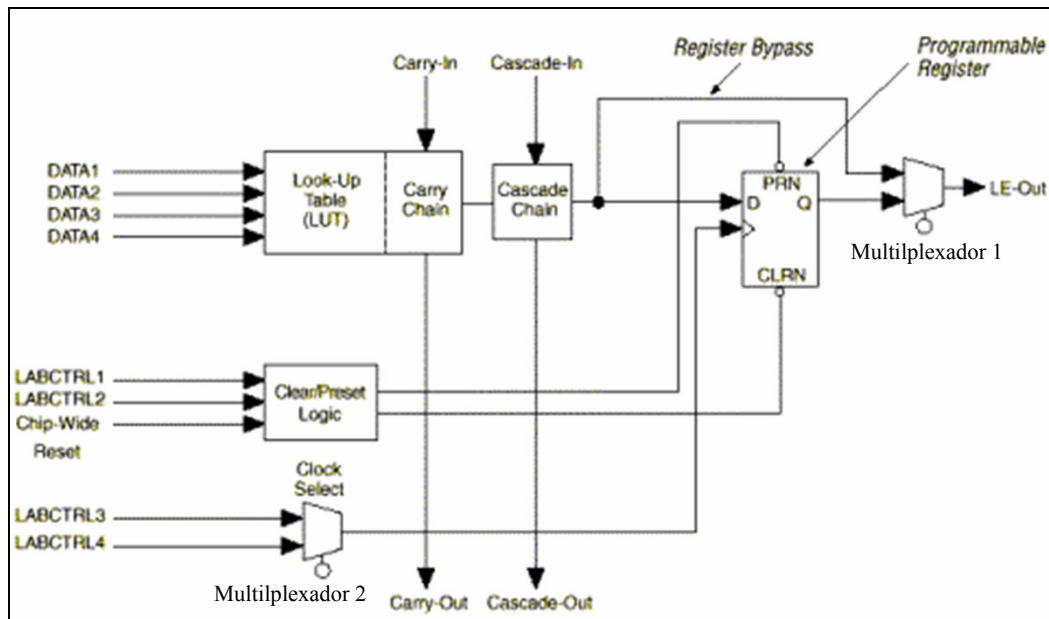


Figura 29 – Elemento de Célula Lógica de CPLD (ALTERA, 2006).

O elemento *Carry Chain* produz a propagação de *Carry*<sup>30</sup> rápida. Essa propagação permite implementar funções combinacionais das entradas com o *Carry* do mencionado elemento lógico, conforme apresentado na Figura 30.

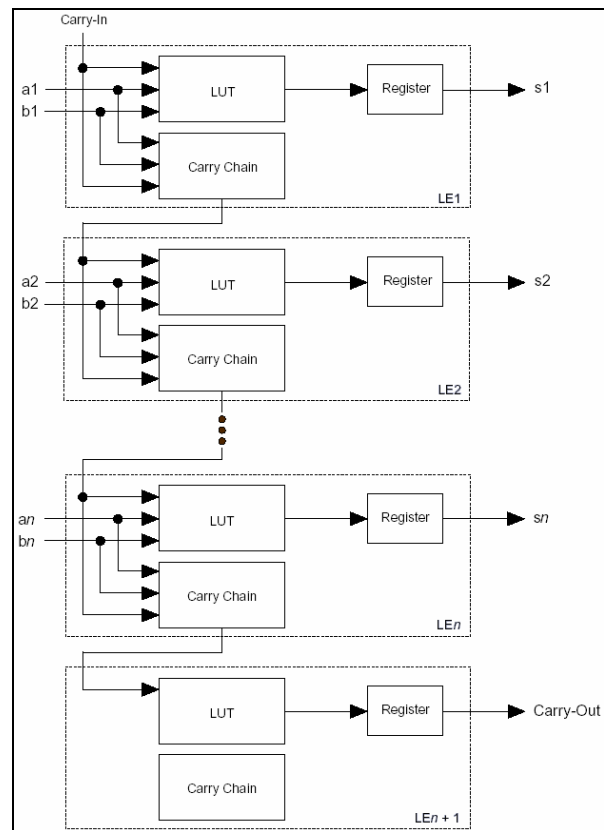


Figura 30 – Elemento *Carry Chain* (ALTERA, 2006).

O *Cascade Chain* baseia-se em portas AND ou OR que podem combinar dados provenientes de LUTs de diferentes Elementos Lógicos, conforme apresentado na Figura 31. Desse modo, podem ser implementadas combinações de mintermos (AND) ou maxtermos<sup>31</sup> (OR) por configuração em cascata das saídas dos diferentes Elementos Lógicos, ou seja, utilizando portas AND ou OR.

<sup>30</sup> *Carry* – transporte, dígito extra devido ao resultado de uma soma ser maior que a base do número usado.

<sup>31</sup> Maxtermos – é o termo-soma no qual cada variável de entrada aparece exatamente uma vez, sendo essa variável complementada se a variável tem valor um naquela combinação de entradas e não-complementada se a variável tem valor zero.



Dois multiplexadores programáveis, que atendem o Elemento Lógico, podem ser observados na Figura 29. Um desses multiplexadores (*Register Bypass*) tem a função de executar a comutação de utilização desse elemento de lógica combinacional para lógica seqüencial. O outro multiplexador é utilizado para efetuar definições do bloco de memória.

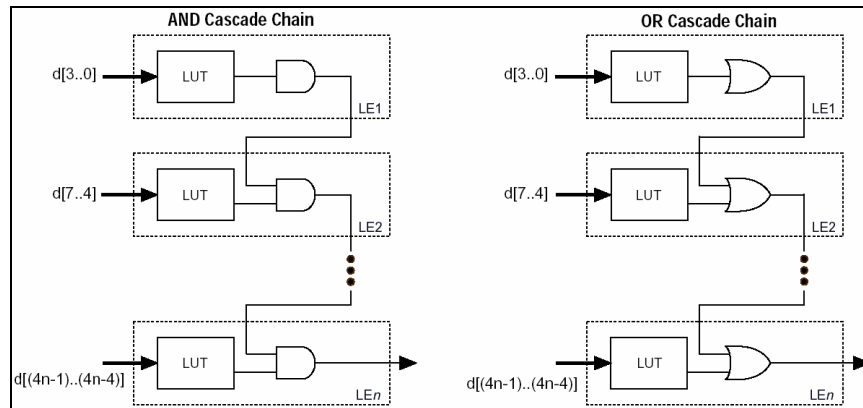


Figura 31 – Elemento *Cascade Chain* (ALTERA, 2006).

#### 2.3.2.1.4 Estrutura Interna de Células - FPGA

Nesse tipo de arquitetura está previsto em cada célula: duas LUTs, um Flip-Flop e vários multiplexadores destinados a seleção do modo de operação, ou seja, seleção para realizar lógica combinacional ou lógica seqüencial. Nesse sentido a Figura 32 mostra as ligações da célula com os barramentos e da célula com outras células. Nessa figura é possível observar que podem ser definidas as conexões entre os barramentos no interior da célula.

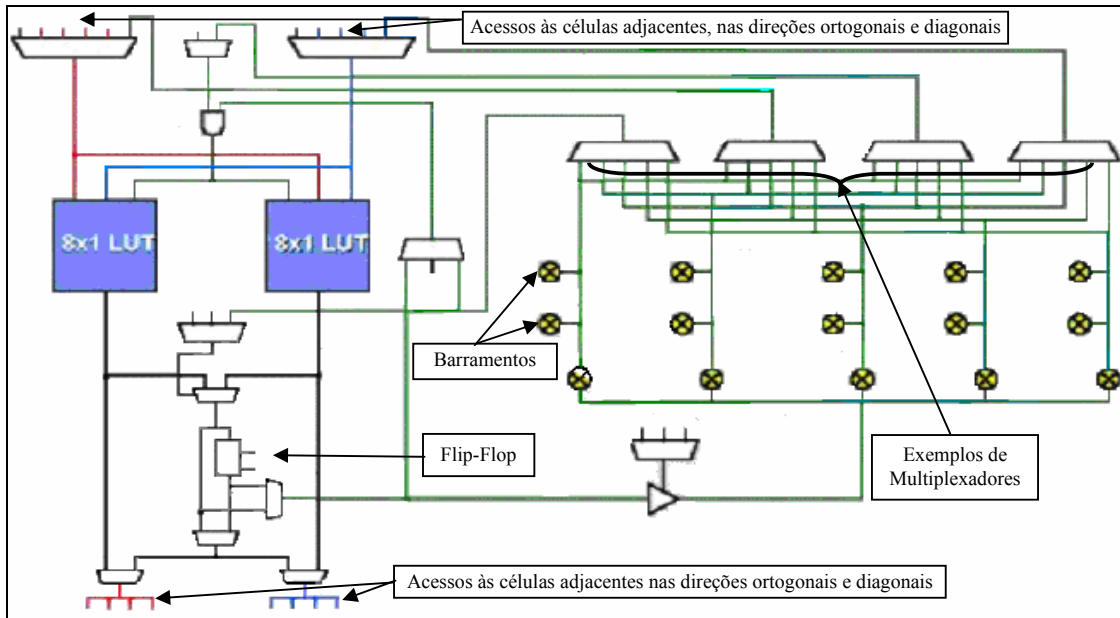


Figura 32 – Elemento do FPGA (ALTERA, 2006).

### 2.3.2.1.5 Blocos de Entrada e Saída

Os blocos de entrada e saída conectam a lógica implementada no interior do PLD aos dispositivos externos. Esses blocos consistem, principalmente, de dois sistemas TRI-STATES<sup>32</sup>, sendo que um que opera para a entrada de dados e outro que opera para a saída. Como ambos TRI-STATES são programáveis, pode-se definir um pino de conexão do circuito integrado como entrada, saída ou ambas, nesse último caso é denominado por comunicação bidirecional.

Com a meta de permitir a realização de interface com componentes de diferentes tecnologias, velocidades e lógicas, existem blocos internos destinados ao controle de *Delay*<sup>33</sup>,

<sup>32</sup> TRI-STATE – estado de alta impedância. Circuitos que possuem essa característica são desenvolvidos para trabalhar com barramentos onde saídas de diversos circuitos são ligadas juntas.

<sup>33</sup> Delay - retardo de sinais em circuitos eletrônicos.

*Slew Rate*<sup>34</sup>, nível de tensão e polaridade dos sinais de entrada e saída. De modo complementar a essas características tem-se a lógica de PULL-UP<sup>35</sup> ou PULL-DOWN<sup>36</sup> na qual se pode definir preliminarmente uma entrada em alto ou baixo, minimizando o número de conexões externas do circuito integrado. A Figura 33 mostra exemplo de bloco de entrada e saída.

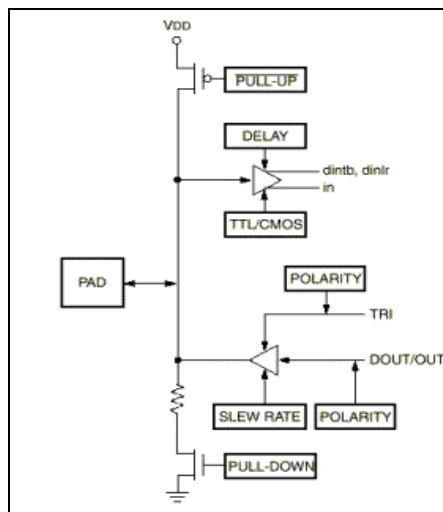


Figura 33 – Bloco de entrada e saída (ALTERA, 2006).

#### 2.3.2.1.6 Estruturas de Interconexão

Para conexão entre as próprias células e entre as células e os blocos de saída, os HCPLDs possuem estruturas denominadas como barramentos. Nesse contexto, para os CPLDs mais complexos e para os FPGA são previstos barramentos horizontais e verticais adjacentes a cada célula.

<sup>34</sup> *Slew Rate* – taxa de variação do sinal de saída de um amplificador por unidade de tempo.

<sup>35</sup> *Pull-up* – circuito que assegura o nível lógico 1 em uma entrada de uma porta lógica.

<sup>36</sup> *Pull-down* – circuito que assegura em uma entrada de uma porta lógica o nível lógico 0.

Uma primeira diferença entre os CPLDs e os FPGAs está na granularidade<sup>37</sup> de suas células. Um FPGA é mais granular que um CPLD, pois nesse último podem-se ter dez Elementos Lógicos conectáveis entre si, em cada célula, enquanto que em um FPGA possui equivalentemente um Elemento Lógico por célula.

Devido a essa maior granularidade pode-se verificar que para o FPGA existe forte dependência do roteamento, o que pode ser inclusive percebido pelo elevado número de multiplexadores por célula. Em um FPGA a definição das variáveis de entrada é realizada internamente enquanto que em um CPLD, essa é feita externamente.

A disposição de células e barramentos de um CPLD é mostrado na Figura 34.

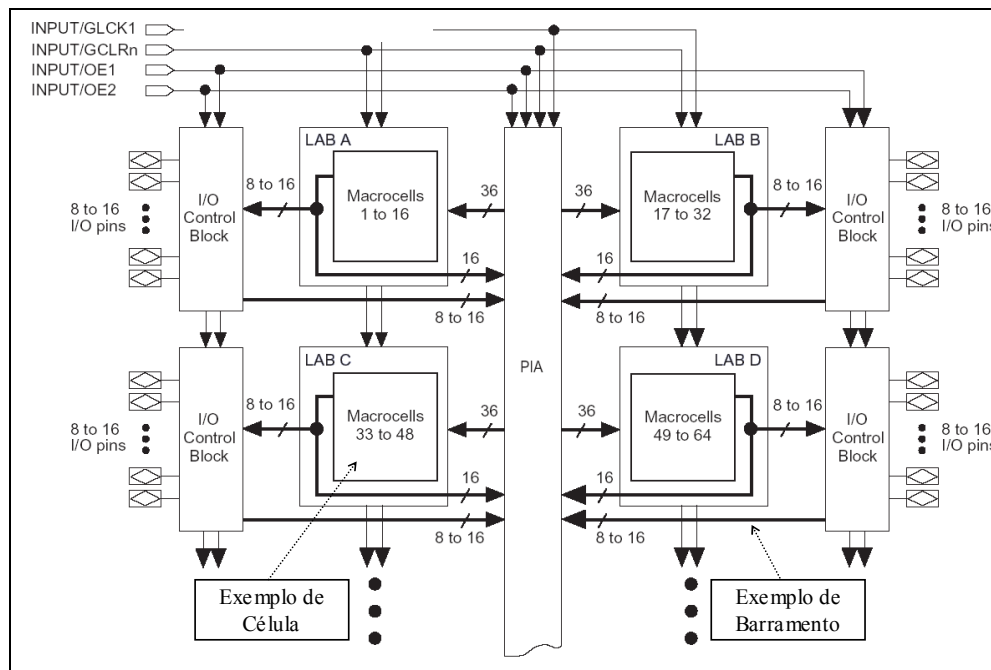


Figura 34 – Conexões célula versus barramentos - CPLD (ALTERA, 2006).

<sup>37</sup> Granularidade – característica relacionada com a menor unidade configurável dos dispositivos de lógica programável estruturada.

### 2.3.2.1.7 Características das Estruturas

A diferença fundamental entre o CPLD e FPGA está na estrutura de constituição dos barramentos. Um CPLD é constituído por barramentos contínuos enquanto que o FPGA por barramentos segmentados.

Um barramento contínuo é constituído por linhas de metal de comprimento uniforme que atravessam o integrado no comprimento e na largura (vertical x horizontal). Assim, a resistência e a capacitância de todas as interconexões é fixa, fazendo com que os intervalos de propagação entre quaisquer duas células lógicas do dispositivo seja constante.

Um barramento segmentado é constituído por vários segmentos de metal que também atravessam o integrado nas direções horizontal e vertical. Esses segmentos podem ser conectados de diversas maneiras por meio de chaves lógicas programáveis existentes entre eles. Assim, o número de segmentos requeridos para conexão entre duas células não é constante ou previsível, depende principalmente da disposição das células e das múltiplas possibilidades de interconexão entre elas. Como não é possível determinar, antes do roteamento (interconexão das células), o número de segmentos requeridos para conexão entre células, não se pode quantificar os atrasos de propagação. A Figura 35 mostra exemplo de barramento de CPLD e FPGA.

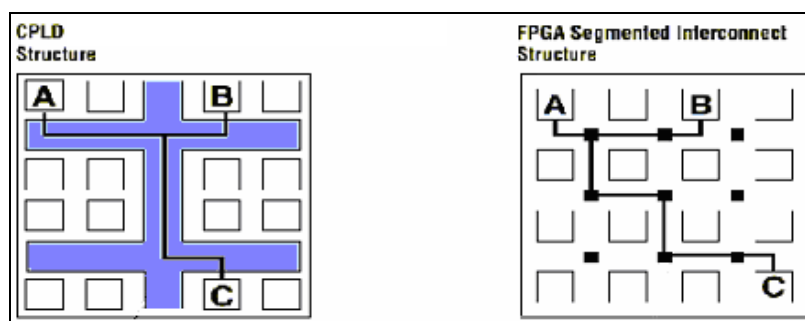


Figura 35 – Barramento de CPLD e FPGA (ZAGHETO, 2001).

A menor granularidade do CPLD, juntamente com sua estrutura de conexão contínua, facilita sua programação, possibilita melhor rendimento do sistema e permite melhor utilização das células lógicas para certas aplicações. A estrutura contínua permite ainda que pequenas modificações na lógica sejam feitas sem degradação no rendimento. Como um FPGA depende principalmente do roteamento, essas mesmas modificações poderiam acarretar na queda sensíveis de rendimento devido à necessidade de um novo roteamento. Por outro lado, a granularidade do FPGA dá uma grande flexibilidade e pode ser desejável em certas aplicações (ALTERA, 1995).

#### 2.3.2.1.8 Ambiente de Desenvolvimento.

O ambiente integrado para desenvolvimento de sistemas baseados em Lógica Programável Estruturada é atualmente denominado por EDA (*Electronic Design Automation* – Automação de Projeto Eletrônico). Nesse ambiente são executados processos relacionados com as seguintes etapas: i) especificação e entrada do projeto, ii) síntese e mapeamento da tecnologia, iii) posicionamento e roteamento, iv) verificação e teste, v) programação de dispositivo. A Figura 36 mostra diagrama em blocos que relaciona essas etapas.

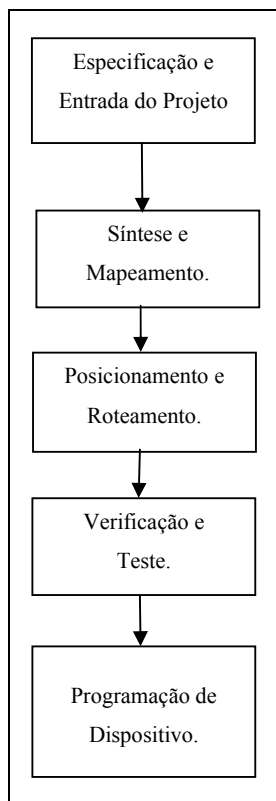


Figura 36 – Etapas de desenvolvimento de projeto (COSTA, 2005).

Nessa figura as etapas relacionadas com a especificação e entrada do projeto destinam-se a identificar os dispositivos e respectivos sinais que interagem com o circuito durante a fase projeto. Após a identificação desses sinais de interface é especificada a sua funcionalidade, mantendo o foco concentrado na evidência de dependência entre os sinais de saída e os de entrada. As descrições de alto nível são as mais apropriadas para esse tipo de especificação, tanto as gráficas quanto as textuais para o nível do algoritmo. Essas descrições podem ser implementadas em função de características peculiares impostas por cada fabricante de dispositivo, as quais estão relacionadas com portas lógicas e macrofunções oferecidas por bibliotecas ou em linguagem de descrição de *hardware* (ARAGÃO, 1998).

Na etapa de Síntese é gerada automaticamente uma representação otimizada do circuito no nível lógico que satisfaça as restrições estabelecidas pelo projetista, a partir da

linguagem de descrição de *hardware*. Essa etapa é composta pela Tradução, Otimização e Mapeamento. Na Tradução a representação em linguagem de descrição de *hardware* é traduzida para uma representação interna que pode ser mapeada em componentes genéricos, como portas lógicas, flip-flops, somadores, multiplexadores e outros, pelo aplicativo que executa a síntese. A Otimização é caracterizada pela análise e otimização da mencionada representação interna, com a meta de minimizar a área e/ou o tempo de propagação dos sinais no circuito. Na fase de Mapeamento tecnológico, essa representação otimizada é automaticamente mapeada para componentes específicos da biblioteca relacionada com tecnologia utilizada no projeto (ROCHA, 2007).

O Posicionamento e Roteamento são processos reciprocamente dependentes. No Posicionamento são atribuídos componentes físicos, relacionados ao dispositivo, com os componentes lógicos do projeto. A tarefa de atribuição de trilhas e elementos programáveis com o objetivo de realizar interconexão de componentes é denominada por Roteamento.

A simulação é o recurso mais empregado para atender a fase de Verificação. Esse recurso pode ser utilizado na fase inicial do desenvolvimento do projeto e na que antecede a programação do dispositivo. Na fase inicial a meta está concentrada na verificação funcional do projeto e na que antecede a programação às restrições de temporização. O Teste tem por finalidade principal identificar a existência de não-conformidades que podem ocorrer quando da produção ou do manuseio inadequado do componente eletrônico, pois esses são dispositivos sensíveis a descargas eletrostáticas.

A Programação consiste em carregar o dispositivo com os dados programados e no padrão que depende basicamente do tipo de tecnologia escolhida para implementar o circuito. Essa programação permite implementar fisicamente o circuito digital pretendido por meio da configuração e interligação dos recursos internos do dispositivo (ROCHA, 2007).



## **CAPÍTULO 3 - DESENVOLVIMENTO**

Este capítulo apresenta a arquitetura atual sistema Gerador de Ordens Pirotécnicas utilizado em foguetes de sondagem, uma nova proposta de arquitetura para esse sistema, um protótipo desenvolvido para validar a referida arquitetura e os resultados obtidos nos ensaios executados com esse protótipo.

### **3.1 Atual Circuito Gerador de Ordens Pirotécnicas**

O atual circuito gerador de ordens pirotécnicas utilizado nos foguetes de sondagem, desenvolvidos no Instituto de Aeronáutica e Espaço, é um equipamento eletrônico que tem como principal função a ativação dos eventos pirotécnicos previstos para ocorrer durante o voo desses foguetes. Os principais componentes representativos dessa arquitetura são mostrados na Figura 37.

O bloco intitulado por Oscilador, mostrado nessa figura, tem por finalidade fornecer sinal relacionado com a base de tempo que é necessária para a operação do circuito, de modo a atender a precisão e uniformidade exigida para aplicação. Geralmente nesse bloco é utilizado um componente eletro-mecânico, como o cristal de quartzo, para gerar os sinais elétricos, alternados e em frequências desejadas. Outros tipos de soluções podem ser também admitidos, como circuitos ressonantes e osciladores baseados no par resistor-capacitor.

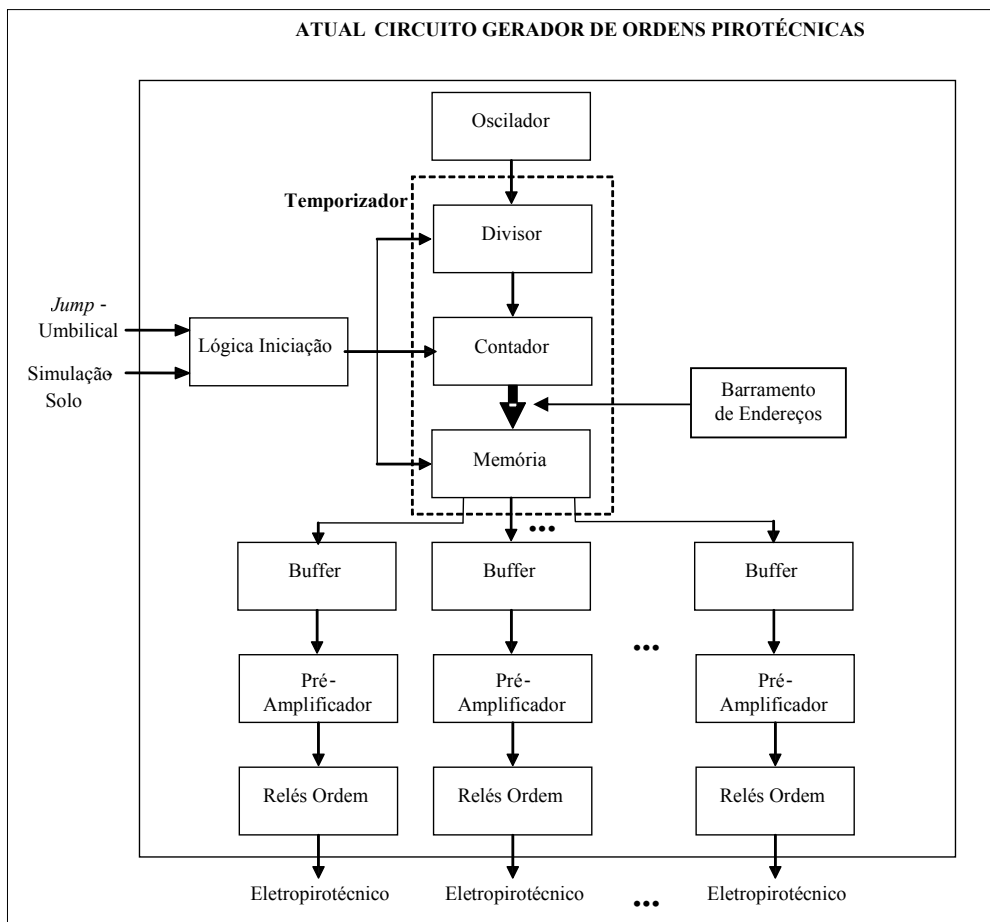


Figura 37 – Arquitetura do atual circuito gerador de ordens.

Nesse circuito está previsto um macrobloco intitulado por Temporizador, o qual tem como principal função gerar os sinais, em baixa corrente, relacionados com as ordens pirotécnicas. Esse macrobloco é formado por bloco: Divisor, Contador e Memória.

O Divisor tem por função receber o sinal elétrico proveniente do oscilador e realizar as divisões necessárias, de forma a se obter a base de tempo desejada e com a precisão especificada para a operação do sistema.

Em sincronismo com o sinal recebido desse divisor está o bloco Contador que tem a função de gerar as linhas de sinais em binário, de modo crescente e cíclico para atender o barramento de endereços da memória. Essa ação visa efetuar a varredura de todos os

endereços que contêm os dados previamente programados para o vôo do foguete de sondagem.

No bloco Memória são gravados os dados referentes aos tempos de acionamento dos eventos em vôo, relacionados com a missão do foguete. No atual circuito gerador de ordens essa memória é do tipo não-volátil e reprogramável. Para efetuar a tarefa de programação dessa memória é necessário realizar uma seqüência específica de atividades. Nessa seqüência está prevista, entre outras atividades, a desmontagem desse circuito para efetuar a programação, conforme mencionado no Capítulo 1, Descrição do Problema.

A liberação para o pleno funcionamento do bloco Divisor, Contador e Memória é efetuado pelo bloco intitulado por Lógica Iniciação. Essa liberação pode ser realizada por comando oriundo de Banco de Controle ou por soltura de cabo umbilical. A finalidade de efetuar a liberação por meio de sinal proveniente de Banco de Controle está relacionada com a necessidade de efetuar testes no circuito gerador de ordens, nos momentos que precedem o lançamento do foguete. Na soltura do cabo umbilical, ação que se dá pelo movimento relativo do foguete em relação ao trilho de lançamento<sup>38</sup>, a finalidade está concentrada em realizar efetivamente as atividades pirotécnicas relacionadas com o vôo do foguete, conforme estabelecido pela missão.

Os níveis de correntes dos sinais apresentados no barramento de dados da memória não são adequados para serem diretamente aplicados na atuação das bobinas dos relés de ordem. Em função disso é necessário utilizar os blocos designados por Buffer e Pré-amplificador. O bloco Buffer realiza a isolação, por alta impedância<sup>39</sup> e efetua o primeiro nível de adequação dos níveis de correntes dos sinais presentes nas saídas da memória com aqueles necessários para atender as entradas do bloco Relés de Ordem. O bloco Pré-Amplificador, por sua vez, efetua o segundo nível de adequação de correntes dos sinais que

---

<sup>38</sup> Trilho de lançamento – parte da estrutura que serve de apoio mecânico para posicionamento e lançamento de foguete de sondagem.

<sup>39</sup> Impedância – oposição à circulação de corrente elétrica alternada.

serão diretamente aplicados nas bobinas dos relés de ordem, ou seja, esse efetivamente fornece a potência necessária para atuar, quando necessário, as bobinas dos relés de ativação de ordem.

O bloco intitulado por Relés de Ordem são dispositivos eletromecânicos instalados na linha de fogo. Esses têm por principal função efetuar a circulação de corrente entre as baterias de pirotécnicos e os circuitos atendem os dispositivos eletropirotécnicos, em função das ordens originadas pelo Temporizador. Os relés de ordem são tipo monoestável e dotados de separação galvânica entre os seus contatos principais e a sua bobina, minimizando assim interações entre o circuito de comando e o de potência.

### **3.2 Arquitetura Proposta para o Circuito Gerador de Ordens Pirotécnicas**

Os principais componentes representativos da arquitetura proposta para sistema gerador de ordens pirotécnicas, baseado em Lógica Programável Estruturada, aplicado em foguetes de sondagem, são mostrados na Figura 38.

Ao se comparar os blocos dessa figura com os da Figura 37 é possível observar que a mudança mais expressiva está no macrobloco Temporizador. Nessa nova proposta de arquitetura as funções executadas pelos blocos: Divisor, Contador e Memória são efetuados por um único bloco denominado por Lógica Programável Estruturada. Esse bloco, além de executar as mencionadas funções, deverá também permitir: i) a programação de eventos pirotécnicos de forma remota, ii) a mudança de funções e níveis de acionamentos das linhas

relacionadas com esse macrobloco, iii) a inclusão de sinais condicionais para execução de eventos, sem exigir a desmontagem do circuito.

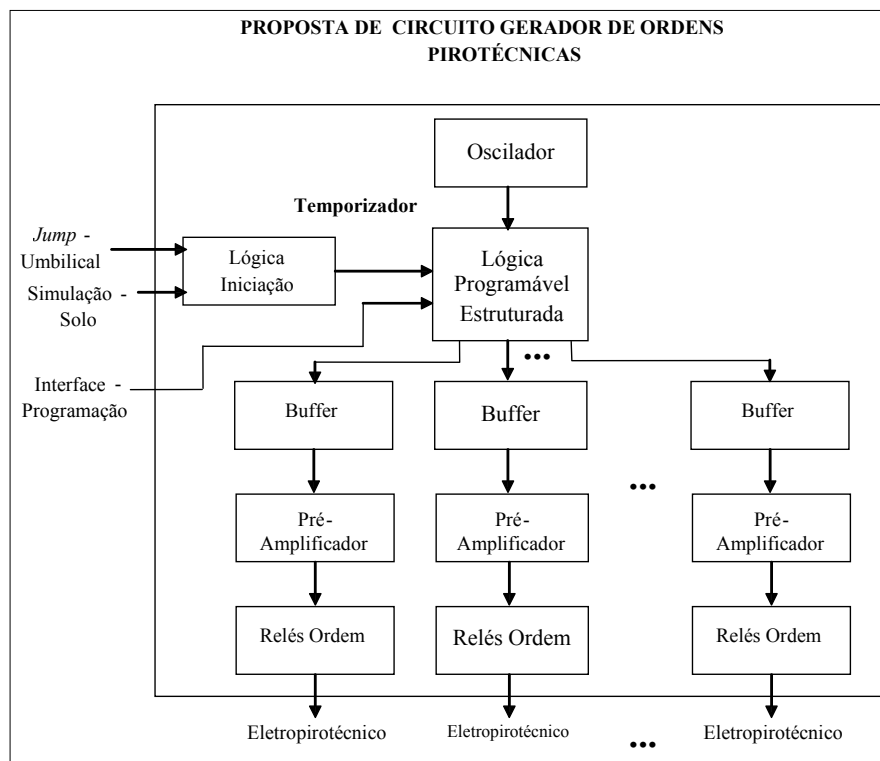


Figura 38 – Proposta de arquitetura para circuito gerador de ordens.

### 3.2.1 Macrobloco Lógica Programável Estruturada

A função principal do macrobloco Lógica Programável Estruturada está concentrada em transformar o sinal gerado pelo bloco Oscilador, a partir de condição definida pelo bloco Lógica Iniciação, em sinais relacionados com os eventos programados e adequados para sensibilizar as linhas de entrada do bloco Buffer. Um exemplo típico desses sinais é mostrado no gráfico de tempos, para quatro ordens, apresentado na Figura 39.

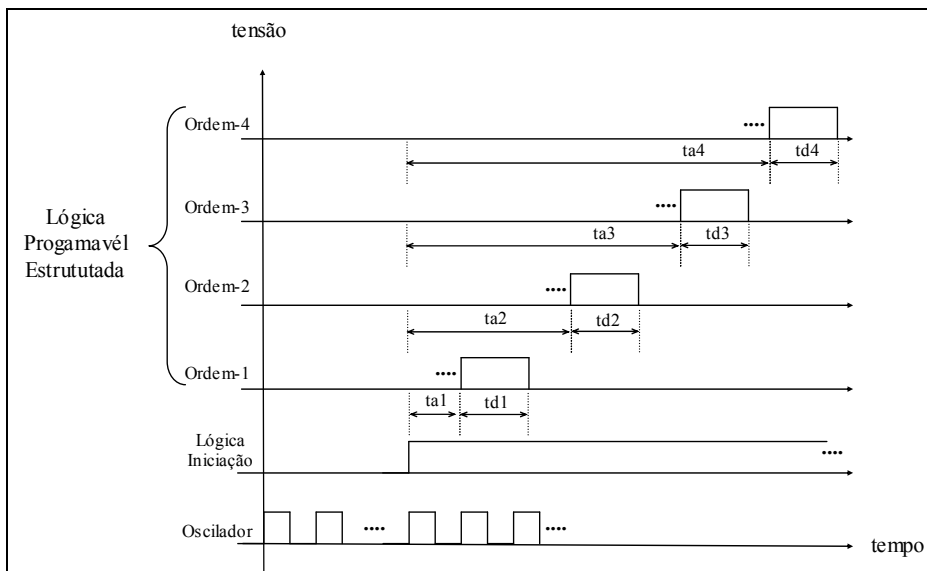


Figura 39 – Sinais apresentados para o bloco Buffer.

Nessa figura pode ser observado que o bloco Lógica Iniciação é responsável por iniciar o processo de geração sinais relacionados com as ordens do circuito. A atuação dessas ordens deve atender tempos pré-definidos que estão relacionados com o tipo de missão do foguete. Nesse contexto, conforme apresentado nessa figura, o circuito deverá ser capaz de aceitar a programação dos tempos ativação ( $ta_1, 2, 3$  e  $4$ ) e duração ( $td_1, 2, 3$  e  $4$ ) relacionados com os eventos pirotécnicos.

### 3.2.1.1 Componentes do Macrobloco Lógica Programável Estruturada

A estrutura prevista para o macrobloco Lógica Programável Estruturada, com a meta de gerar inclusive os sinais apresentados na Figura 39, utiliza principalmente circuitos com capacidade de efetuar funções relacionadas com: divisão de frequência, contagem,

movimentação, comparação e lógica, conforme apresentado no diagrama de blocos da Figura 40.

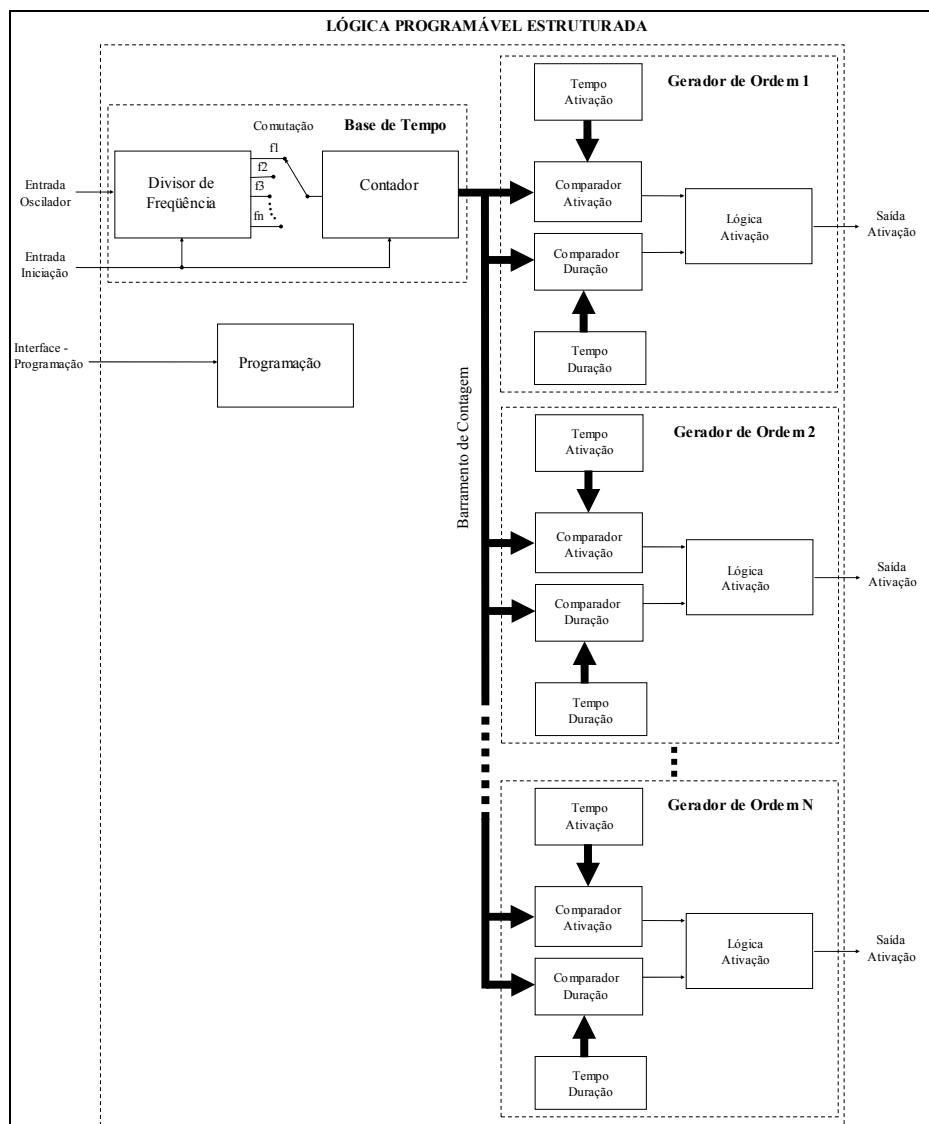


Figura 40 – Estrutura do macrobloco Lógica Programável Estruturada.

Na Figura 40 o bloco denominado Base de Tempo tem duas principais finalidades no macrobloco Lógica Programável Estruturada. A primeira é efetuada pelo Divisor de Freqüências e está relacionada com a adequação de freqüências, que podem ser estabelecidas pela Entrada Oscilador, com a base de tempo que possibilite a programação de todos os

blocos Geradores de Ordens. Esse recurso é necessário para permitir que o circuito opere com osciladores de frequências distintas e assegure características mínimas de precisão de tempo para ativar os eventos. A segunda finalidade é executada pelo Contador e está relacionada com a precisão que poderá ser obtida pelos Comparadores (Ativação e Duração) contidos nos blocos Geradores de Ordens. A precisão do mencionado recurso é alcançada pela correta determinação das linhas que farão parte do Barramento de Contagem. Na determinação do número dessas linhas é considerada a frequência da Entrada Oscilador e precisão imposta pela ativação de cada evento programado.

Na Figura 40 os blocos denominados por Gerador de Ordem 1, 2 até N têm por principal finalidade gerar sinais de comandos relacionados com os eventos programados, nos tempos de ativação e nas durações previstas para a missão do foguete. Nesse contexto o Gerador de Ordem é composto pelos seguintes blocos: Tempo Ativação, Comparador Ativação, Tempo Duração, Comparador Duração e Lógica Ativação.

O bloco Tempo Ativação tem por função permitir que o operador efetue a programação do tempo inicial para a ativação do evento pirotécnico. De modo análogo o bloco Tempo Duração permite ao operador efetuar a programação do tempo final de ativação do evento.

O bloco Comparador Ativação utiliza o valor armazenado no bloco Tempo Ativação para efetuar sucessivas comparações com os valores alcançados pelo Barramento de Contagem, até identificar a condição de ativação especificada, para em seguida enviar sinal relacionado com essa condição para o bloco Lógica Ativação. De maneira análoga ocorre com o bloco Comparador Duração para identificar a condição de finalização de ativação.

O bloco Lógica Ativação utiliza os sinais enviados pelo Comparador Ativação e Duração para compor operação lógica capaz de gerar sinal adequado de comando para o evento pirotécnico.



### 3.2.1.2 Escolha e Programação do Macrobloco Lógica Programável Estruturada

Na escolha do dispositivo capaz de realizar a função do macrobloco Lógica Programável Estruturada foram considerados os aspectos sistêmicos relacionados com: i) a viabilidade de implementação do *hardware*, ii) as funções disponíveis nas bibliotecas de componentes, iii) a possibilidade de programação em ambiente integrado de desenvolvimento, iv) a disponibilidade de componentes para aquisição no mercado nacional. Nesse contexto optou-se pela utilização do sistema MAX 7000 e do ambiente de programação MAX+plus®II, da empresa Altera (ALTERA, 2006).

O ambiente de programação MAX+plus®II dispõe de mega-funções com capacidade de desempenhar as funções de cada bloco contido na Figura 40. Essas mega-funções são denominadas: LPM<sup>40</sup>\_COUNTER, LPM\_COMPARE e LPM\_CONSTANT, as quais para a finalidade deste trabalho foram associadas com portas lógicas.

A mega-função intitulada LPM\_COUNTER realiza duas tarefas distintas no bloco de Base de Tempo, apresentado na Figura 40. A primeira está relacionada com a adequação de frequência entre a Entrada Oscilador e o bloco Contador. Nessa tarefa é realizada a escolha de uma linha de frequência ( $f_1, 2, 3, \dots, n$ ), na saída do bloco Divisor de Frequência, capaz de fornecer o tempo mínimo adequado para a operação do sistema. A segunda busca determinar a quantidade de linhas, na saída do bloco Contador, apropriada à precisão exigida para efetuar as comparações relacionadas com o tempo de ativação e duração dos eventos. A realização dessas tarefas define a quantidade de linhas do Barramento de Contagem e a Base de Tempo para o funcionamento do sistema.

A parametrização e programação dessa mega-função, no ambiente de desenvolvimento e programação que atende o sistema MAX 7000, para o bloco Divisor de Frequência e

---

<sup>40</sup> LPM – *Library of Parameterized Modules*, em português Biblioteca de Módulos Parametrizados.

Contador, relacionada com o protótipo desenvolvido para este trabalho, é apresentada na Figura 41.

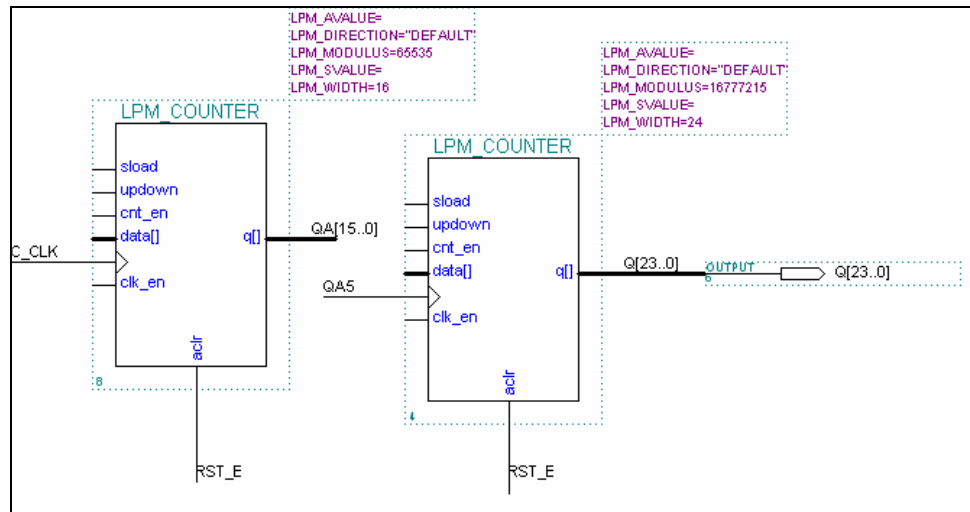


Figura 41 – Parametrização e programação de LPM\_COUNTER.

Os parâmetros da mega-função LPM\_COUNTER, apresentada nessa figura, possuem as seguintes definições:

**LPM\_AVALUE** – valor de constante que é carregada a partir da ativação de sinal indicador de entrada assíncrona.

**LPM\_DIRECTION** – contagem crescente ou decrescente, caso não seja programada, assume a condição de contagem crescente.

**LPM\_MODULUS** – valor máximo de contagem desejado mais um.

**LPM\_SVALUE** – valor de constante que é carregada a partir da ativação de sinal indicador de entrada síncrona.

**LPM\_WIDTH** – número de bits do contador, ou o número de linhas de sinais das portas de saída e entrada de dados, caso essas sejam utilizadas.

**sload** – carregamento de dados será síncrono. Carrega o contador a partir do próximo pulso de subida da base de tempo.

**updown** – entrada que indica para o contador a direção de contagem.

**cnt\_en** – entrada que tem por função liberar o processo de contagem do contador.

**data[]** – linhas de entrada de dados em forma paralela no contador.

**c\_clock** – entrada de frequência no contador, ativado quando da subida do sinal.

**clk\_en** – entrada que tem por função liberar o contador a partir de sinal de frequência.

Habilita todas as atividades síncronas.

**aclr** – entrada, assíncrona, que possibilita o início de contagem.

**q[]** – linha(s) de dado(s) de saída do contador.

A mega-função intitulada LPM\_COMPARE, apresentada na Figura 40, tem por função efetuar a comparação entre o valor presente no Barramento de Contagem e o valor contido na mega-função LPM\_CONSTANT.

A parametrização e programação da mega-função LPM\_COMPARE e LPM\_CONSTANT, no ambiente de desenvolvimento e programação que atende o sistema MAX 7000, para o bloco Gerador de Ordem, relacionada com o protótipo desenvolvido para este trabalho, é apresentada na Figura 42.

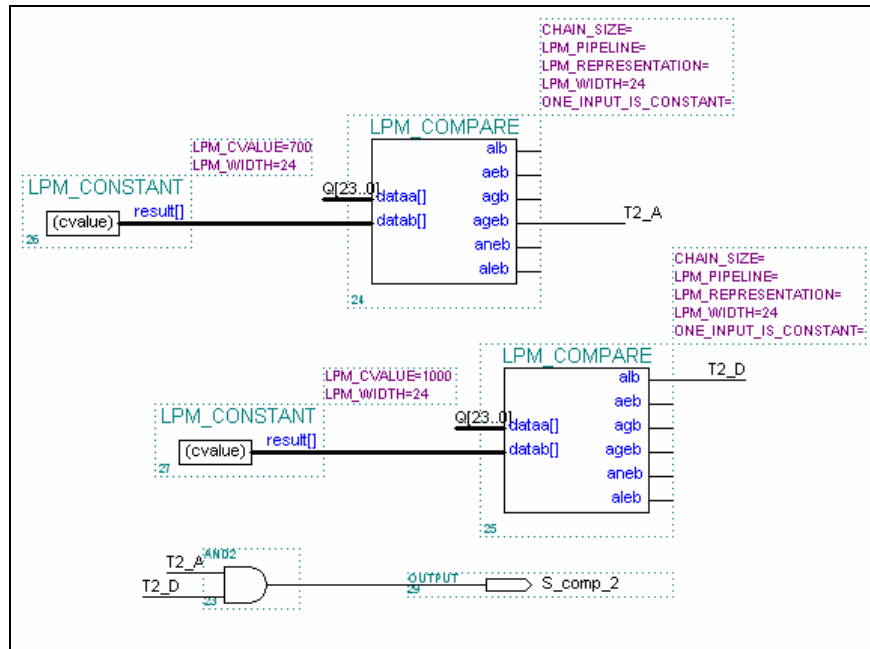


Figura 42 – Parametrização e programação do bloco Gerador de Ordem.

Os parâmetros da mega-função LPM\_COMPARE, apresentada nessa figura, possuem as seguintes definições:

**CHAIN\_SIZE** – comprimento máximo permitido de *carry chains* ou *cascade chains* (valor padrão igual a oito).

**LPM\_PIPELINE** – especifica o tempo de permanência das saídas do comparador em função do número de pulsos da base de tempo.

**LPM\_REPRESENTATION** – especifica o tipo de comparação a ser efetuada, ou seja, se a comparação dos valores será em módulo ou com sinal.

**LPM\_WIDTH** – número de linhas do comparador, ou seja, número de linhas de sinais de entrada de dados.

**ONE\_INPUT\_IS\_CONSTANT** – otimiza a comparação caso uma das entradas seja constante.

**dataa[]** – sinais de entrada de dados que serão comparados com datab[].

**dataa[]** – sinais de entrada de dados que serão comparados com dataa[].

**clock** – sinal de referência de tempo quando da utilização do parâmetro LPM\_PIPELINE.

**aclr** – entrada, assíncrona, que possibilita o início de comparação.

**alb** – saída ativa em nível alto, quando o valor contido na entrada dataa[] for menor que o contido na entrada datab[].

**aeb** – saída ativa em nível alto, quando o valor contido na entrada dataa[] for igual ao contido na entrada datab[].

**agb** – saída ativa em nível alto, quando o valor contido na entrada dataa[] for maior que o contido na entrada datab[].

**ageb** – saída ativa em nível alto, quando o valor contido na entrada dataa[] for maior ou igual ao contido na entrada datab[].

**aneb** – saída ativa em nível alto, quando o valor contido na entrada dataa[] for diferente do contido na entrada datab[].

**aleb** - saída ativa em nível alto, quando o valor contido na entrada dataa[] for menor ou igual ao contido na entrada datab[].

Para os parâmetros da mega-função LPM\_CONSTANT, apresentada na Figura 42, possuem as definições que se seguem:

**LPM\_CVALUE** - valor de constante que é carregada.

**LPM\_WIDTH** – define o número de bits da constante, ou o número de linhas de sinais da saída de dados.

**result[]** – sinal de saída de valor definido em LPM\_CVALUE.

A função primária AND, apresentada na Figura 42, efetua operação lógica do tipo serial entre as saídas dos comparadores, responsáveis pela geração dos tempos de ativação e duração, estabelecendo, dessa forma, sinal de acionamento para realização de evento pirotécnico.

#### 3.2.1.2.1 Expressões para Frequências e Linhas de Barramento

A determinação da quantidade de linhas na saída (QA[15..0]) da mega-função LPM\_COUNTER, correspondente ao bloco Divisor de Frequência, apresentada na Figura 41, considerou a possibilidade do sistema trabalhar com variação de frequência de unidades até milhões de ciclos por segundos, na Entrada Oscilador. A expressão seguinte relaciona essa possibilidade de frequências.

$f_d = f_{osc} / 2^N$ , na qual:

$f_d$ , frequência desejada em Hertz<sup>41</sup>.

$f_{osc}$ , frequência do oscilador em Hertz.

N, expoente em valor inteiro que pode variar entre zero e 15.

A quantidade de linhas na saída do bloco Contador (Q[23..0]), é determinada para atender todo o período de ocorrência de eventos, com a precisão exigida nas comparações relacionadas com os mesmos. Nesse contexto, a quantidade de linhas de saída relacionadas com o maior tempo previsto para ocorrência dos eventos ( $T_{max}$ ), com a precisão especificada

---

<sup>41</sup> Hertz - unidade de frequência relacionada com a variação de um ciclo por segundo.

$(1/f_d)$ , que deve ser definido para a mega-função LPM\_COUNTER, mostrada na Figura 41, conforme expressão apresentada a seguir:

$$T_{\max} = 2^M \cdot 1/f_d,$$

$$M = [\log (T_{\max} \cdot f_d)] / \log 2, \text{ na qual:}$$

$T_{\max}$ , tempo máximo para contagem de evento, em segundos.

$M$ , expoente em valor inteiro que pode variar entre zero e 23, sendo que esse determina a quantidade de linhas no Barramento de Contagem.

$f_d$ , frequência desejada, em Hertz.

O valor que deverá ser carregado na mega-função LPM\_CONSTANT, apresentada na Figura 42, é definido para o tempo de ativação e desligamento do evento pirotécnico. As expressões que determinam os parâmetros para a ativação e o desligamento do evento pirotécnico são apresentadas a seguir.

$$K_{ta} = t_a \cdot f_d$$

$$K_{tdes} = t_{des} \cdot f_d, \text{ para:}$$

$K_{ta}$ , constante em valor inteiro que pode variar entre zero e 16777216, sendo que essa determina o tempo de ativação do evento pirotécnico.

$K_{tdes}$ , constante em valor inteiro que pode variar entre zero e 16777216, que determina o tempo de desligamento do evento pirotécnico.

$t_a$ , tempo de ativação da ordem pirotécnica.

$t_{des}$ , tempo de desligamento da ordem pirotécnica.

$f_d$ , frequência desejada, em Hertz.

### **3.3 Ensaios Práticos e Resultados**

Os ensaios práticos necessários para avaliar a eficácia da proposta deste trabalho foram realizados em três principais etapas. Na primeira etapa idealizou-se dois diagramas de tempo relacionados respectivamente com os ensaios efetuados no desenvolvimento de circuitos Geradores de Ordens Pirotécnicas e com os tempos efetivos de acionamento de ordens pirotécnicas durante um vôo típico de foguetes de sondagem. A segunda etapa foi concentrada na determinação de arquitetura capaz de atender os requisitos necessários ao ensaio, na programação de parâmetros relacionados com os eventos do Gerador de Ordens Pirotécnicas e na realização dos ensaios. A terceira etapa apresenta os resultados obtidos nos ensaios.

#### **3.3.1 Curvas de Tempo para Ensaios Práticos.**

A Figura 43 apresenta o diagrama de tempo que o Gerador de Ordens Pirotécnicas, proposto neste trabalho, deverá apresentar em suas saídas, durante a realização do primeiro tipo de ensaio prático, para refletir as condições semelhantes àquelas aplicadas no desenvolvimento de um circuito Gerador de Ordens Pirotécnicas que não utiliza a arquitetura proposta neste trabalho.

A forma de onda prevista nessa figura deverá ser repetida pelo gerador de ordens, submetido ao ensaio, para verificar a capacidade desse gerador em ativar ordens pirotécnicas de forma cíclica e por longo período de tempo.



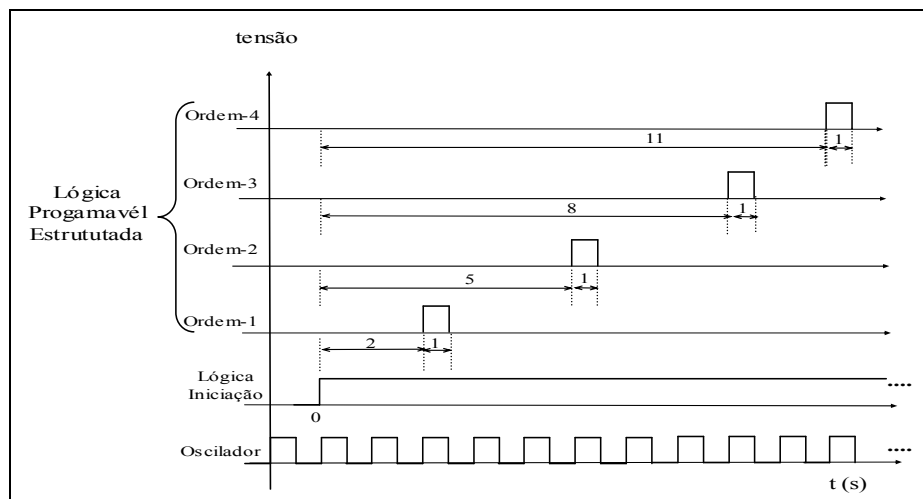


Figura 43 – Sinais relacionados ao primeiro tipo de ensaio prático.

No segundo tipo de ensaio prático o objetivo está concentrado em avaliar a capacidade do gerador de ordens proposto neste trabalho em aplicar as ordens pirotécnicas durante um vôo típico de foguetes de sondagem. Nesse contexto, esse gerador deverá apresentar em suas saídas sinais em conformidade com os mostrados na Figura 44.

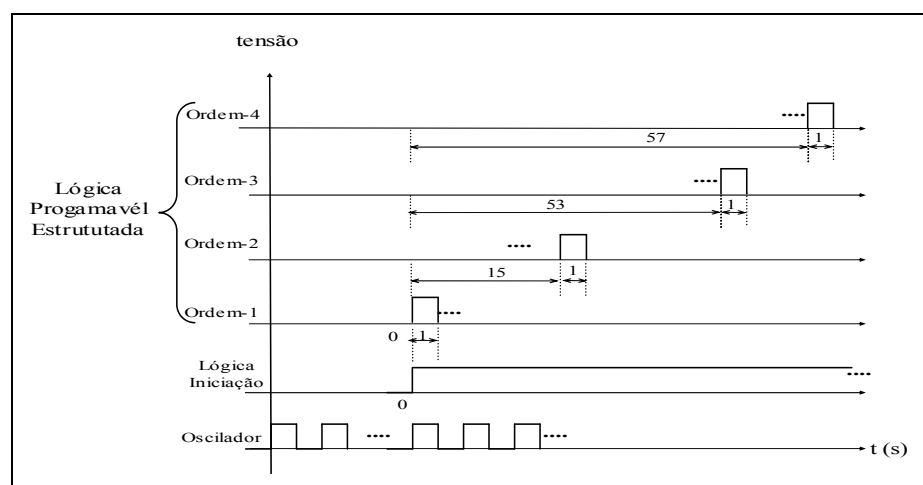


Figura 44 – Sinais relacionados ao segundo tipo de ensaio prático.

### 3.3.2 Arquitetura para os Ensaio Práticos

O esquema de ligações apresentado na Figura 45 representa a arquitetura idealizada para a realização dos Ensaio Práticos.

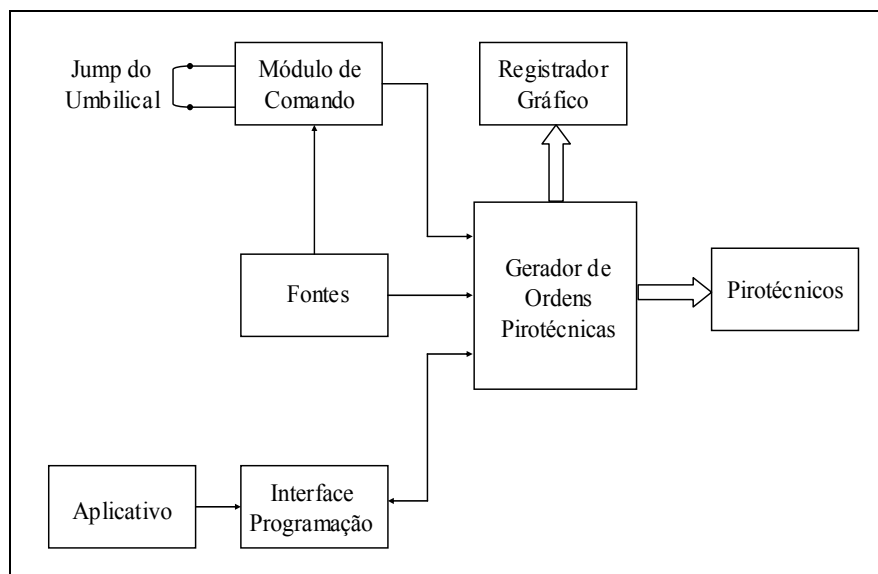


Figura 45 – Arquitetura para ensaios práticos.

Com os blocos definidos na arquitetura, mostrada nessa figura, foi determinado os meios físicos necessários e montado o conjunto capaz de realizar e registrar os resultados dos ensaios. Uma vista do conjunto montado a partir dessa arquitetura é mostrado na Figura 46.

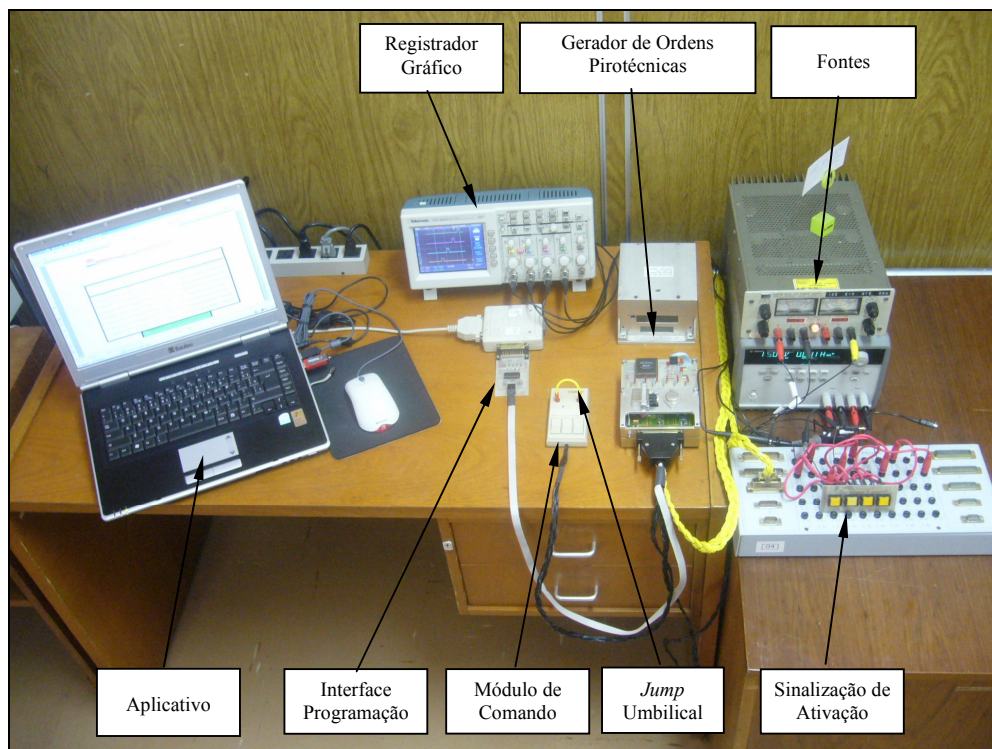


Figura 46 – Vista do conjunto utilizado nos ensaios.

No conjunto montado para realizar os ensaios práticos, mostrado nessa figura, o bloco intitulado por Módulo de Comando é responsável por efetuar o acionamento do Relé de Segurança contido no Gerador de Ordens Pirotécnicas e simular a soltura do cabo umbilical (*Jump* do Umbilical). Na realização dos ensaios práticos o Relé de Segurança foi posicionado para o estado Armado, sendo que esse estado reflete a condição utilizada para o vôo do foguete. O estado denominado por Segurança pressupõe a condição relacionada com as fases de preparação para o lançamento do foguete.

Nessa figura o bloco denominado por Fontes representa os quatro tipos de suprimentos de energia elétrica, em corrente contínua, necessárias para atenderem o funcionamento do equipamento Gerador de Ordens. Esse bloco dispõe de linha com tensão em: i) +28,0 Vdc<sup>42</sup>

<sup>42</sup> Vdc – tensão em corrente contínua.

para alimentação funcional, ii) +28,0 Vdc e -28,0Vdc para simular alimentação proveniente do Banco de Controle, iii) +15Vdc relacionada com as baterias de pirotécnicos.

O bloco intitulado Aplicativo, mostrado na Figura 46, representa o ambiente utilizado para: i) configuração de função e sinais do Gerador de Ordens, ii) programação dos tempos de ativação e duração dos eventos pirotécnicos. Nesse contexto, os quadros apresentados na Figura 47 e na Figura 48, discriminam os valores dos parâmetros que foram programados no macrobloco de Lógica Programável Estruturada, a partir das expressões apresentadas no item 3.2.1.2.1, de modo que esse macrobloco execute os tempos de ativação e duração segundo os tipos de ensaios contidos na Figura 43 e Figura 44, distintamente.

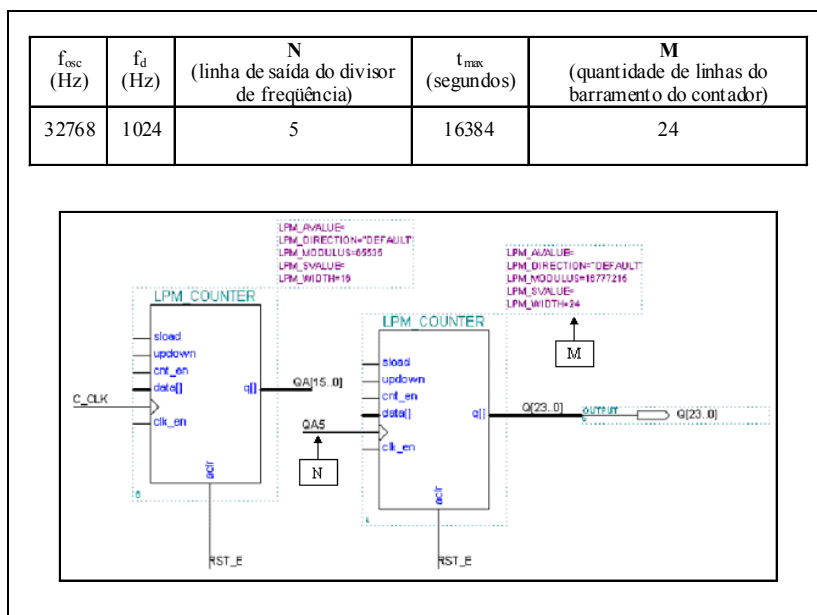


Figura 47 – Dados a serem carregados nas macro-funções LPM\_COUNTER.

A Figura 47 apresenta a linha de saída do bloco Divisor que foi determinada pelo parâmetro N, com a meta de fornecer a frequência desejada ( $f_d$ ) na entrada (QA 5) do bloco Contador. Essa figura também mostra o valor M que deverá ser carregado no campo LPM\_WIDTH para definir a quantidade linhas do Barramento de Contagem, a fim de atender

o maior tempo previsto para o evento. As funções desempenhadas por esses blocos são programadas em duas macro-funções LPM\_COUNTER, as quais são interligadas.

Os quadros contidos na Figura 48 apresentam os valores de tempo de ativação e desligamento de quatro ordens pirotécnicas, que deverão ser programadas por meio dos parâmetros  $K_{ta}$  e  $K_{tdes}$  para a realizar os dois ensaios apresentados neste trabalho.

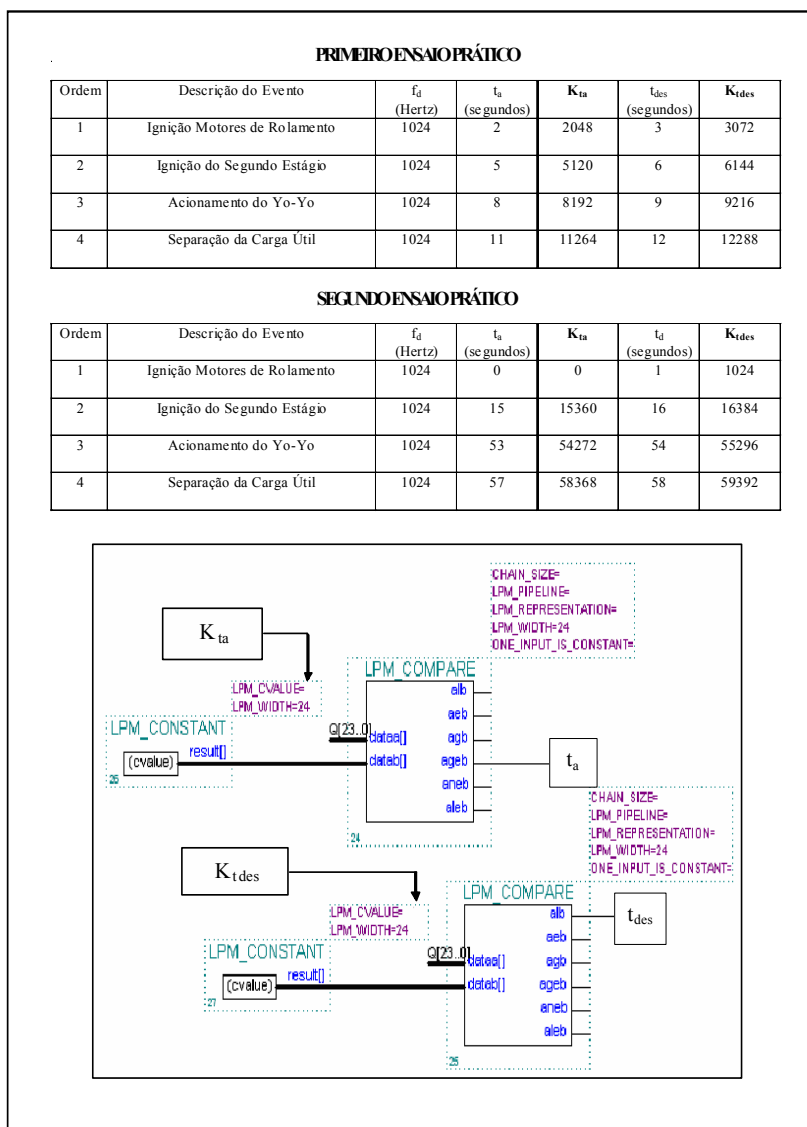


Figura 48 – Parametrização para ativação e desligamento de evento.

O parâmetro  $K_{ta}$  é o valor a ser carregado no campo LPM\_CVALUE, da macrofunção LPM\_CONSTANT relacionada com a tarefa de ativação, que determina o tempo de ativação ( $t_a$ ) do evento pirotécnico para uma determinada ordem. De modo análogo o parâmetro  $K_{tdes}$  determina o tempo de desligamento ( $t_{des}$ ). Cabe mencionar que esses parâmetros deverão ser carregados distintamente para cada conjunto das mencionadas macro-funções relacionadas com a ativação e o desligamento de cada ordem pirotécnica prevista.

A tarefa de gravação da configuração do sistema, do tempo de ativação e duração é realizada pelo bloco denominado Interface Programação, representado na Figura 45.

Neste trabalho optou-se em realizar a programação de componente por meio da interface JTEG (*Joint Test Action Group*). Essa opção considerou principalmente as características que essa interface possui em assegurar a integridade dos componentes programados e a interconexões entre esses componentes e a placa de circuito impresso (ALTERA, 1998). A Figura 49 mostra vista do módulo elaborado para a realização da programação de dispositivo utilizado nos ensaios práticos, baseado na interface JTEG.

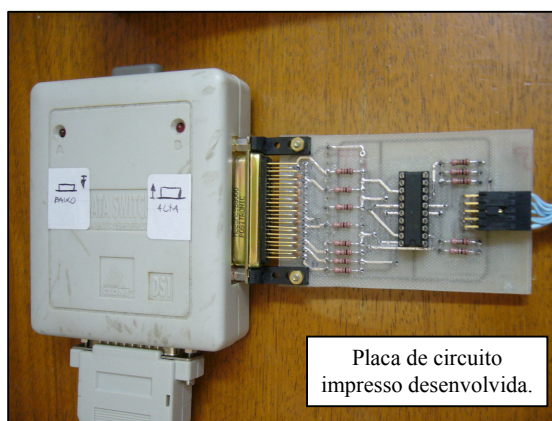


Figura 49 – Interface desenvolvida para programação do Temporizador.

Para efetuar a aquisição e registro das informações obtidas durante o ensaio é previsto na arquitetura mostrada na Figura 45 o bloco denominado por Registrador Gráfico. Esse

registrador foi escolhido com capacidade de armazenamento de informações, número de canais de aquisição de dados suficientes para atender as ordens, escalas adequadas para leituras de tensão e tempo de ocorrência das ordens.

O bloco Pirotécnicos, contido na Figura 45, representa as cargas que o equipamento deverá acionar durante a sua operação. Essas cargas no foguete são elementos eletropirotécnicos utilizados para iniciação dos eventos pirotécnicos previstos para a missão do foguete. Nesse ensaio foram utilizadas sinalizações visuais, instaladas nas saídas do equipamento, para simular a operação dos elementos eletropirotécnicos.

O bloco denominado Gerador de Ordens Pirotécnicas, apresentado na Figura 45, representa o equipamento com arquitetura flexível, baseado em Lógica Programável Estrutura, capaz de acionar os eletropirotécnicos nos tempos preestabelecidos pela missão.

### **3.3.3 Resultados dos Ensaio Práticos**

Foram realizados dois tipos de ensaios práticos. O primeiro foi concentrado na verificação da capacidade do sistema em gerar ordens pirotécnicas de modo seqüencial e repetitivo com o objetivo de avaliar a robustez e repetibilidade durante um longo período de tempo. No segundo, foi verificada a flexibilidade do sistema quanto à capacidade de suportar modificação dos tempos de programação. Nesse contexto utilizou-se como exemplo os tempos de ativação de ordens pirotécnicas previstos em vôo do foguete VSB-30.

### 3.3.3.1 Primeiro Ensaio Prático.

O resultado obtido no primeiro ensaio prático realizado com o Gerador de Ordens Pirotécnicas, baseado em Lógica Programável Estruturada, é apresentado na Figura 50.

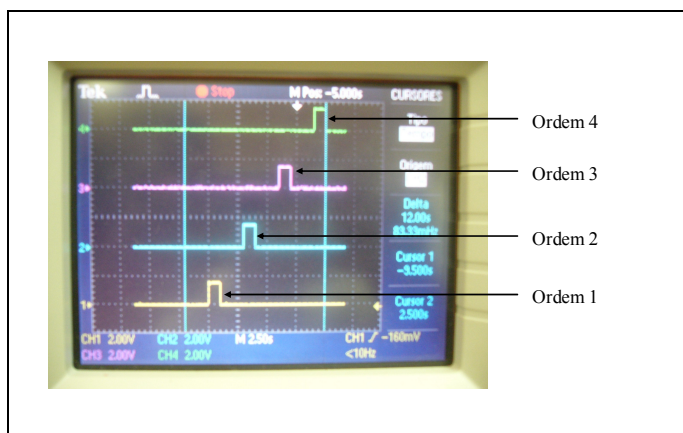


Figura 50 – Resultados obtidos no primeiro ensaio prático.

Essa figura mostra que o gerador proposto neste trabalho é capaz de gerar ordens pirotécnicas de modo seqüencial, de forma repetitiva e que atendem os padrões preestabelecidos.

### 3.3.3.2 Segundo Ensaio Prático.

A Figura 51 apresenta o resultado obtido no segundo tipo de ensaio prático. Esse resultado está em conformidade com o diagrama de tempos contido na Figura 44 e caracteriza os tempos de ativação de ordens pirotécnicas utilizados em vôo do foguete VSB-30.



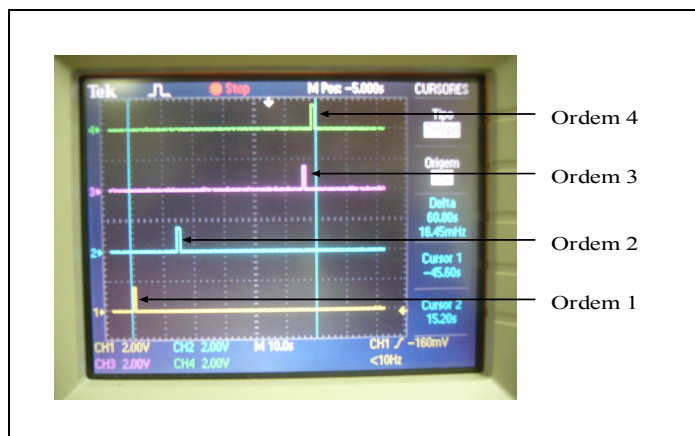


Figura 51 – Resultados obtidos no segundo ensaio prático.

O valor de precisão estabelecido para a realização dos ensaios apresentados neste trabalho foi de um milissegundo (0,001 s). Esse valor foi alcançado com a escolha da linha número cinco na saída do Divisor de Frequência, a qual está indicada na Figura 47, no campo intitulado por N (linha de saída do divisor de frequência). A programação dessa linha estabelece para o circuito digital do Gerador de Ordens Pirotécnicas período de 0,0009765 s, ou seja, 2,4% mais preciso que o proposto. A Figura 52 apresenta os valores obtidos no segundo ensaio prático, relacionados com o tempo de ativação e tempo de duração da primeira ordem, onde pode ser observado um exemplo da exatidão dos valores de tempo obtidos.

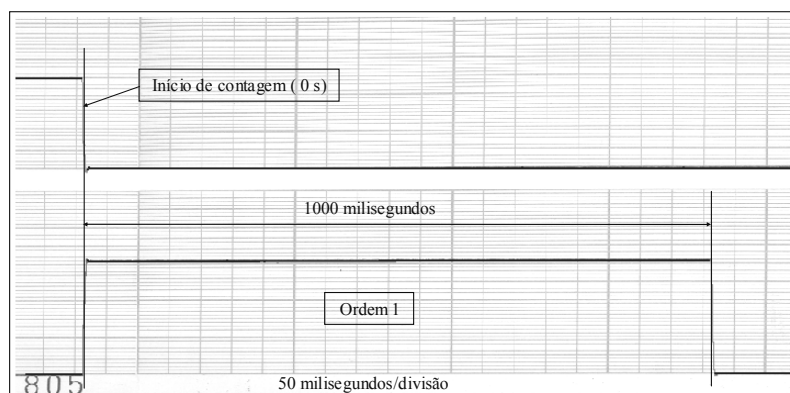


Figura 52 – Tempos de ativação e duração da Ordem 1 (segundo ensaio prático).

## **CAPÍTULO 4 - CONCLUSÕES**

Os resultados positivos obtidos na realização dos ensaios práticos com protótipo desenvolvido mostram que a adoção de dispositivo baseado em Lógica Programável Estruturada na arquitetura de sistêmica dos módulos Geradores de Ordens Pirotécnicas, presentes atualmente nos foguetes de sondagem, permite a programação remota de eventos pirotécnicos, possibilita a modificação de sua função, admite a inclusão de sinais oriundos de novos sensores na lógica de operação e causa pouco impacto de implementação na atual configuração utilizada para esses módulos.

A função desempenhada pelo bloco Divisor, Contador e Memória presente na atual configuração utilizada para esses módulos foi absorvida pelo macrobloco Lógica Programável Estruturada. Essa característica minimiza manifestação de não-conformidades relacionadas principalmente com conexões, soldagens e barramentos.

A flexibilidade observada na configuração de funções e sinais com a utilização de dispositivo de Lógica Programável Estruturada permitirá a inclusão de novos sensores aplicados à missão que possibilitem o aumento da segurança em solo e melhoria de desempenho do foguete em vôo.

Uma das dificuldades observadas durante a elaboração desse trabalho está relacionada com a realização de ensaios práticos. Nessa fase é necessário integrar o módulo proposto com os equipamentos, as interfaces e as redes previstas para o vôo do foguete. Essa situação exigiu cuidados especiais para não danificar as partes envolvidas nos ensaios.

Como proposta de trabalho futuro é sugerida a realização de atividades que visem evolução do protótipo apresentado nesta dissertação para modelo vôo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AEB-AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA, (2006). Foguetes de Sondagem. Disponível em <<http://www.aeb.gov.br>>. Acesso em 16/07/2006.

ALTERA Corp., (1995). CPLDs vs FPGAs – Comparing High Capacity Programmable Logic. Product Information Bulletin 18, ver.1.

ALTERA Corp., (1998). FLEX 10K Embedded Programmable Logic Family. Data Sheet. Ver.3.1.1.

ALTERA Corp., (2006). Lpm\_Counter Megafunction – User Guide. Ver1. Disponível em <<http://www.altera.com>>. Acesso em 03/05/2006.

ARAGÃO, A. C. O. S.,(1998). Uma arquitetura sistólica para solução de sistemas lineares implementada com circuitos FPGAs. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

ASAKA, E.; D'AMORE R., (2006). Concepção de um Modulo de Interface para Veículos de Sondagem Utilizando Dispositivos Lógicos Reconfiguráveis. In IX Simpósio IMAPS Brasil 2006.

BARR, Michael, (1999), Programmable Logic: What's it to Ya?, embedded Systems Programming, june 1999, pp. 75-84.

BEZERRA, E. A.; GOUGH, Michael Paul; BUCKLEY, A. (1999). A VHDL Implementation of an on-board ACF application targeting FPGAs. In: MAPLD'99 – 2<sup>nd</sup> Annual Military and Aerospace Applications of Programmable Devices and Thecnologies Conference, 1999, Maryland.

CLIFFORD, C.G.JR; EDWARD, A.H.; RONALD, E.B. (1972) – ROTARY STEPPING MECHANISM patents 1.ic.gc.ca. Disponível em <<http://scholar.google.com/scholar?hl=pt-BR&lr=&q=LEDEX&lr=>>>. Acesso em 03/03/2007.

COSTA, C., (2005). “Controlador Baseado em Lógica Programável Estruturada”. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Taubaté, Brasil.

DORE, EDUARDO RODA, (2005). PLANO DE MONTAGEM DO FOGUETE DE SONDAGEM VSB-30 V01. Cód. 528-000000;B5001, revisão A de 15/03/2005.

INSTITUTO DE AERONÁUTICA E ESPAÇO, (2005). Divisão de Projetos, IAE-ASE, Desenho Ilustrativo do VSB-30. 11/11/2005.

INSTITUTO DE AERONÁUTICA E ESPAÇO, (2006). Foguetes de Sondagem. Disponível em <<http://www.iae.cta.br/AtividadesEspaciais/foguetedesondagem.html>>. Acesso em 15/11/2006.

MILESKI, ANDRÉ M., (2006). Artigo publicado na revista Defesanet, <<http://.defesanet.com.br>>. Acesso em 24/07/2006.

PALMÉRIO, A. F., (2002). “Introdução à Engenharia de Foguetes” Apostila de Curso realizado no Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), Brasil.

PINHEIRO, A. P. M., (2005). “Sistemas Eletropirotécnicos”, Apostila de Curso realizado no Instituto de Tecnológico de Aeronáutica (ITA), Brasil.

ROCHA, JOSÉ F., MARTINS, JOÃO F., FERNANDES, MIGUEL, (2007). Projecto de Circuitos Integrados Digitais Utilizando VHDL Instituto Superior de Engenharia de Lisboa – Departamento de Engenharia da Electrónica e das Comunicações. Disponível em <[http://www.diet.isel.pt/jetc05/JETC99/pdf/art\\_65.pdf](http://www.diet.isel.pt/jetc05/JETC99/pdf/art_65.pdf)>. Acesso em 02/02/2007.

TEIXEIRA, M. A., (2002). Técnicas de Reconfigurabilidade dos FPGAs da Família APEX 20K Altera. Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, São Carlos. Disponível em <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/55/55134/tde-11092002-164901/publico/texto.pdf>>. Acesso em 09/01/2004.

VISCONTI, FRANCISCO A. JR., (2005-a). Relatório de Análise Pós-Vôo do VSB-30 V01. Doc. 528-300000/B6001 de 04/04/2005.

VISCONTI, FRANCISCO A. JR., (2005-b). Definição da Rede Elétrica do VSB-30 V02 e V03. Cod. 528-300000/B3002 de 13/04/2005.

WAKERLEY, J. F., (2000). Digital Design – principles & practices. 3<sup>rd</sup>. New Jersey: Prentice Hall, 2000.

ZAGHETTO, A.; PRADO, A. C.; TAVARES, A. (2001). Trabalho sobre Dispositivos Lógicos programáveis – FPGA. Departamento de Engenharia Eletrônica e de Computação, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em <[http://www.gta.ufrj.br/grad/01\\_1/pld/hcpld.htm](http://www.gta.ufrj.br/grad/01_1/pld/hcpld.htm)>. Acesso em 04/08/2006.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)