

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ**  
**FÁBIO DUARTE SPINA**

**PROPOSTA DE MODELO PARA SIMULAR FALTAS EM**  
**REDE ELÉTRICA DE SERVIÇO UTILIZADA POR**  
**FOGUETES DE SONDAGEM**

**TAUBATÉ - SP**  
**2009**

# **Livros Grátis**

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

Milhares de livros grátis para download.

**FÁBIO DUARTE SPINA**

**PROPOSTA DE MODELO PARA SIMULAR FALTAS EM  
REDE ELÉTRICA DE SERVIÇO UTILIZADA POR  
FOGUETES DE SONDAGEM**

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: Produção.  
Orientador: Prof. Dr. Francisco Carlos Parquet Bizarria

**TAUBATÉ -SP  
2009**

S757p

Spina, Fábio Duarte

Proposta de modelo para simular faltas em rede elétrica de serviço utilizada por foguetes de sondagem. - 2009.  
98f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade de Taubaté, Departamento de Engenharia Mecânica, 2009.

Orientação: Prof. Dr. Francisco Carlos Parquet Bizarria,  
Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Sistemas embarcados. 2. Redes elétricas. 3. Foguetes de sondagem. I. Título.

**FÁBIO DUARTE SPINA**

**PROPOSTA DE MODELO PARA SIMULAR FALTAS EM REDE ELÉTRICA DE  
SERVIÇO UTILIZADA POR FOGUETES DE SONDAGEM**

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: Produção.

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

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

**BANCA EXAMINADORA**

Prof. Dr. Francisco Carlos Parquet Bizarria

UNITAU

Assinatura \_\_\_\_\_

Prof. Dr. José Rubens de Camargo

UNITAU

Assinatura \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Giorgio E. O. Giacaglia

USP

Assinatura \_\_\_\_\_

Dedico este trabalho aos meus pais pela educação, pelo incentivo e apoio em todos os momentos de minha vida, e à minha esposa Ana Maria e aos meus filhos Mariana e Fabrício, pela paciência e incentivo.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Dr. Francisco Carlos Parquet Bizarria, pela orientação durante toda a elaboração deste trabalho.

A Eng<sup>a</sup>. Mara Lúcia Storino Teodoro da Silva, pelo incentivo e apoio durante a elaboração deste trabalho.

Ao IAE e IFI, que viabilizaram a execução deste trabalho.

Aos amigos e companheiros da Divisão de Eletrônica do IAE que, de uma forma direta ou indireta, contribuíram para que este trabalho se concretizasse.

## RESUMO

Este trabalho apresenta propostas de modelos computacionais para representar os principais esquemas de aterramento e equipamentos presentes na rede elétrica de serviço que é utilizada por foguetes de sondagem, com a meta de permitir a verificação operacional e viabilidade técnica no contexto da distribuição de energia elétrica. Nesses modelos são simuladas as condições de operação nominal e em falta, sendo que essa última é realizada em pontos estratégicos da rede elétrica com o propósito de determinar valores máximos de corrente alcançados pelo sistema nessas condições. Os valores de corrente obtidos nessas simulações são principalmente utilizados como referência na escolha do esquema de distribuição da energia elétrica mais adequada para ser utilizado pela rede embarcada em foguetes de sondagem e na determinação de características elétricas mínimas que os equipamentos de bordo devem possuir a fim de atenderem as condições nominais e suportar as possíveis faltas que podem acometer o sistema. Os resultados satisfatórios obtidos nas simulações dos modelos computacionais elaborados para representar os esquemas de aterramento e equipamentos pertencentes à rede elétrica de serviço que é utilizada por foguetes de sondagem, apresentados neste trabalho, indicam que os modelos são consistentes e adequados aos propósitos que se destinam.

**Palavras-chave:** Sistemas embarcados. Redes elétricas. Foguetes de sondagem.

## **ABSTRACT**

### **PROPOSED MODEL TO SIMULATE FAULTS IN THE SERVICE ELECTRICAL NETWORK USED BY SOUNDING ROCKETS**

This work presents the proposals for computational models to represent the main grounding schemes and equipment used in the service electrical network used by sounding rockets with the goal of enabling the operational verification and technical viability in the context of electrical power distribution. In these models are simulated the conditions of nominal operation and in fault, and the latter is carried out at strategic points in the electrical network with the purpose of determining maximum power achieved by the system under these conditions. The current values obtained in these simulations are mainly used as a guide in choosing the distribution of power best suited to be used by the service electrical network and the determination of electrical characteristics requirements that the equipment should possess in order to meet the nominal conditions and support the possible faults that can affect the system. The satisfactory results obtained in the simulations of the computer models designed to represent the grounding schemes and equipment belonging to the service electrical network used by sounding rockets, presented in this paper indicates that the models are consistent and appropriate to the purposes intended.

**Key-words:** Airborne systems. Electrical networks. Sounding rockets.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Família de foguetes de sondagem produzidos pelo IAE	21
Figura 2 – Principais partes do foguete VSB-30 V04	22
Figura 3 – Diagrama da rede elétrica de serviço do VSB-30 V08 MASER 11	25
Figura 4 – Transmissor banda S do veículo VSB-30 V01	28
Figura 5 – Diagrama da rede elétrica de segurança do VSB-30 V01	30
Figura 6 – Unidade de recepção para terminação de vôo	31
Figura 7 – Responder radar	32
Figura 8 – Esquema TN-S	34
Figura 9 – Esquema TN-C	35
Figura 10 – Esquema TN-C-S	36
Figura 11 – Esquema de aterramento IT	36
Figura 12 – Área de trabalho do OrCAD Capture	41
Figura 13 – Proposta de esquema de distribuição de energia para veículo espacial	45
Figura 14 – Diagrama elétrico de comando utilizado no Ariane 5	47
Figura 15 – Circuito de comando pirotécnico	48
Figura 16 – Típico circuito de comando de ordem pirotécnica	49
Figura 17 – Diagrama da rede elétrica de serviço de foguetes de sondagem	50
Figura 18 – Bateria de NiCd utilizada em foguetes de sondagem	52
Figura 19 – Modelo elaborado para as baterias de alimentação	53
Figura 20 – Simulação da condição de curto-circuito na bateria de alimentação	54
Figura 21 – Bateria para acionamento dos pirotécnicos	55
Figura 22 – Iniciadores pirotécnicos desenvolvidos no IAE	56
Figura 23 – Diagrama de uma das linhas pirotécnicas do VSB-30	58
Figura 24 – Transdutor de pressão da série PX5500	59
Figura 25 – Pressão interna do motor do segundo estágio do foguete VSB-30	59
Figura 26 – Placa do módulo de comutação de energia	61
Figura 27 – Diagrama elétrico do módulo de comutação de energia	62
Figura 28 – Modelo para simulação do relé biestável	64
Figura 29 – Modelo para simulação do MCE	65
Figura 30 – Simulação da tensão da bateria de alimentação	65
Figura 31 – Corrente consumida pelos equipamentos de bordo	66
Figura 32 – Diagrama funcional do STA	68
Figura 33 – Tela do editor de modelos do OrCAD PSpice para o relé da linha de fogo	70
Figura 34 – Programação dos tempos da seqüência de eventos na memória	71
Figura 35 – Modelo para simulação do temporizador	72
Figura 36 – Modelo elaborado para simular o STA	73
Figura 37 – Modelo completo de simulação da rede elétrica de serviço e suas interfaces	74
Figura 38 – Tensão de alimentação de bordo em operação normal em IT	76
Figura 39 – Corrente de alimentação de bordo em operação normal em IT	77
Figura 40 – Pulsos de acionamento dos pirotécnicos em condição normal em IT	78
Figura 41 – Seqüência de eventos de vôo do VSB-30 V02	79
Figura 42 – Tensão de alimentação de bordo no vôo do VSB-30 V02	80
Figura 43 – Tensão de alimentação de bordo em operação normal em TN-S	81
Figura 44 – Corrente de bordo em operação normal em TN-S	82
Figura 45 – Pulsos de acionamento dos pirotécnicos em operação normal em TN-S	83
Figura 46 – Tensão de alimentação no esquema IT sob condição de falta	84
Figura 47 – Corrente de alimentação no esquema IT sob condição de falta	85

Figura 48 – Seqüência de eventos no esquema IT sob condição de falta	86
Figura 49 – Tensão de alimentação no esquema TN-S sob condição de falta	88
Figura 50 – Corrente de alimentação no esquema TN-S sob condição de falta	89
Figura 51 – Seqüência de eventos no TN-S sob condição de falta	89
Figura 52 – Seqüência de evento em IT com falta durante acionamento de pirotécnico	91
Figura 53 – Detalhe do pulso durante falta em IT	92
Figura 54 – Seqüência de evento em TN-S com falta durante acionamento de pirotécnico	93
Figura 55 – Detalhe do pulso durante falta em TN-S	94

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Comparação entre esquemas TN e IT	37
Tabela 2 – Valores de baterias de alimentação do VSB-30	52

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A	Ampère
AC	<i>Alternating Current</i> – Corrente Alternada
AEB	Agencia Espacial Brasileira
AEL	Divisão de Eletrônica
BA	Bateria de Alimentação
BC	Banco de Controle
BP	Bateria de Pirotécnico
CDS	Caixa de Segurança
CIP	Conector de Interface Pirotécnica
CLA	Centro de Lançamento de Alcântara
CV	<i>Voltage Converter</i> – Conversor de Tensão
dB	Decibel
DC	<i>Direct Current</i> – Corrente Contínua
DIV	Divisor
DPO	Divisor de Potência
EMTP	<i>Electromagnetic Transients Program</i> – Programa para Transientes Eletromagnéticos
FAE	Fonte de Alimentação Externa
FM	Frequência Modulada
FTR	<i>Flight Terminator Receiver</i> – Receptor de Terminação de Vôo
HDBK	<i>Handbook</i> – Manual
Hz	Hertz
IAE	Instituto de Aeronáutica e Espaço
k	Quilo

kg	Quilograma
km	Quilômetro
M	Mega
mAh	Miliampère hora
MCE	Módulo de Comutação de Energia
MIL	<i>Military</i> – Militar
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i> -Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço
NiCd	Níquel Cádmio
NiMH	Níquel Metal Hidreto
PCM	<i>Pulse Code Modulation</i> – Modulador por Código de Pulso
PE	Condutor de Proteção
PEN	Condutor de Proteção e Neutro
PL	<i>Pay Load</i> – Carga Útil
REG	Rede Elétrica de Segurança
RES	Rede Elétrica de Serviço
RET	Rede Elétrica de Telemetria
RF	Rádio Frequência
RF	Relé de Linha de Fogo
RR	Respondedor Radar
RS	Relé de Segurança
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i> – Sociedade de Engenheiros Automotivos
SPICE	<i>Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis</i> – Programa de Simulação com Ênfase em Circuito Integrado
STA	Módulo de segurança, temporização e atuação

STD	<i>Standard</i> – Norma
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i> – Distorção Harmônica Total
TM	Telemetria
Tr	Transdutor
VEB	<i>Vehicle Equipment Bay</i> – Baia de Equipamento do Veículo
VHF	<i>Very High Frequency</i> – Frequência Muito Alta
VS	Veículo de Sondagem <i>Booster</i>
VTB	<i>Virtual Test Bed</i> – Plataforma de Teste Virtual
W	<i>Watts</i>
$\Omega$	Ohm

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>16</b>
1.1 Descrição do problema	16
1.2 Solução proposta	17
1.3 Objetivos do trabalho	17
1.4 Estrutura do trabalho	18
<b>2 CONCEITOS BÁSICOS</b>	<b>20</b>
2.1 Foguetes de sondagem	20
2.2 Redes elétricas embarcadas	23
2.2.1 Rede elétrica de serviço	24
2.3.2 Rede elétrica de telemetria	27
2.3.2 Rede elétrica de segurança	29
2.3 Esquemas de distribuição de energia de bordo	32
2.3.2 Esquema de aterramento TN	34
2.3.2 Esquema de aterramento IT	36
2.3.3 Comparação entre os esquemas TN e IT	37
2.4 Simulação computacional	37
<b>3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO</b>	<b>43</b>
3.1 Revisão da literatura	43
3.2 Arquitetura atual da rede elétrica de serviço	49
3.3 Modelos funcionais	51
3.3.1 Bateria de alimentação	51
3.3.2 Bateria de pirotécnicos	54
3.3.3 Iniciadores pirotécnicos	56
3.3.4 Transdutor de pressão	58
3.3.5 Módulo de comutação de energia	60
3.3.6 Módulo de segurança, temporização e atuação	67
3.3.7 Modelo para simulação da rede elétrica de serviço	73
3.4 Simulações realizadas	74
3.4.1 Simulação em condições normais de operação em IT	75
3.4.2 Simulação em condições normais de operação em TN-S	80
3.4.3 Esquema IT em condição de falta	83
3.4.4 Esquema TN-S em condição de falta	87
3.4.5 Esquema IT com falta durante acionamento de pirotécnico	90
3.4.6 Esquema TN-S com falta durante acionamento de pirotécnico	92
<b>4 CONCLUSÕES</b>	<b>95</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>96</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Este capítulo é constituído pela descrição do problema, solução proposta, objetivos do trabalho e estrutura do trabalho. A descrição do problema destaca a dificuldade de se projetar e analisar o comportamento funcional da rede elétrica de serviço em foguetes de sondagem. Na solução proposta é salientada a utilização de modelos virtuais para simular o comportamento funcional das redes elétricas integradas em foguetes de sondagem. Nos objetivos do trabalho, são apresentadas as metas que se espera alcançar a partir da elaboração e utilização dos modelos virtuais para análise e verificação da rede elétrica de serviço utilizada por foguetes de sondagem. Na estrutura do trabalho é apresentada a forma adotada para constituição deste trabalho com resumos de cada capítulo.

### 1.1 Descrição do problema

A rede elétrica de serviço participa diretamente da grande maioria dos eventos relacionados com os testes, o lançamento e o vôo de foguetes de sondagem.

A rede elétrica de serviço é responsável por supervisionar, comandar e executar as principais funções internas dos foguetes de sondagem. Decorrente de executar essas funções a elaboração do seu projeto é complexa e exige esforço para efetuar análise dos possíveis modos de operação.

A análise de sistema complexo pode ser realizada de forma analítica, entretanto essa situação é tarefa extremamente árdua, bem como efetuar mudanças e verificar seus resultados.

A utilização de um protótipo pode trazer bons resultados, porém é um método que exige investimentos e demanda muito tempo para sua implementação.

As dificuldades em realizar testes com todos os equipamentos de bordo integrados fisicamente no veículo podem conduzir a erros de projeto, principalmente, quanto ao esquema de distribuição de energia elétrica adotado, devido à ocorrência de incompatibilidades e interferências entre as redes elétricas que trocam sinais entre si.

As não conformidades geradas e o tempo gasto na reparação do sistema, após sua concepção física, podem comprometer potencialmente o cronograma de produção desses veículos, propagando essa situação no âmbito dos compromissos nacionais e internacionais.

## 1.2 Solução proposta

Utilizar protótipos virtuais para representar os principais esquemas de aterramento e equipamentos, aplicados a rede elétrica de serviço utilizada por foguetes de sondagem.

A utilização de modelos virtuais deverá permitir a análise funcional dos esquemas de distribuição de energia utilizados na rede elétrica de serviço, e a determinação de eventuais falhas de concepção nas fases preliminares do projeto sem a necessidade de sua integração física.

## 1.3 Objetivos do trabalho

Esse trabalho tem como principal objetivo propor modelos virtuais e realizar simulações que permitam a verificação operacional e viabilidade técnica no contexto da distribuição de energia elétrica para a rede elétrica de serviço utilizada por foguetes de sondagem.

Os modelos virtuais elaborados deverão representar os esquemas de aterramento e equipamentos utilizados na rede elétrica de serviço de foguetes de sondagem em condição de operação nominal e sob falta.

#### 1.4 Estrutura do trabalho

A introdução apresenta a descrição do problema, a solução proposta, os objetivos do trabalho. A descrição do problema apresenta, resumidamente, as principais características de uma rede elétrica de foguetes de sondagem enfocando a sua complexidade funcional, o que é tarefa difícil analisar e definir o mais apropriado sistema de distribuição de energia de bordo. Na solução proposta é sugerida a utilização de um modelo virtual para analisar os esquemas de distribuição de energia elétrica de bordo visando atender aos requisitos funcionais que levem ao sucesso da missão. Nos objetivos, é estabelecido como meta a elaboração de modelos e simulações para auxiliar verificação operacional e viabilidade técnica no contexto da distribuição de energia elétrica. No item estrutura do trabalho, é mostrada a seqüência prevista para os capítulos desta dissertação com resumos de seus conteúdos.

Nos conceitos básicos são apresentadas considerações elementares sobre foguetes de sondagem, sistemas de distribuição de energia, esquemas de aterramento e características do simulador de circuitos eletrônicos utilizados neste trabalho.

O desenvolvimento contém a revisão da literatura, na qual são apresentados resumos de trabalhos técnicos que guardam relação com a presente dissertação, a proposta de modelo virtual para representar a rede elétrica de serviço utilizada em foguetes de sondagem e a análise dos esquemas de distribuição de energia aplicáveis nessa rede.

Nas conclusões são apresentados, de modo sintético, os principais resultados e as discussões ocasionadas com a elaboração deste trabalho.

## 2 CONCEITOS BÁSICOS

Este capítulo tem como objetivo apresentar revisão de conceitos relacionados com foguetes de sondagem, redes elétricas embarcadas, esquemas de distribuição de energia elétrica de bordo e simulação computacional. Esses conceitos formarão a base teórica mínima necessária para a melhor compreensão do conteúdo, dos componentes, e das terminologias utilizadas no desenvolvimento deste trabalho.

### 2.1 Foguetes de sondagem

Os foguetes de sondagem são veículos utilizados para missões suborbitais de exploração do espaço, capazes de lançar cargas-úteis compostas por experimentos científicos e tecnológicos. O Brasil possui veículos operacionais nessa classe, que suprem boa parte de suas necessidades, com uma história bem-sucedida de lançamentos (AEB, 2009).

O Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE) e a indústria aeroespacial desenvolveram uma família de foguetes de sondagem com capacidade de efetuar missões com cargas úteis científicas com peso máximo de 500 kg em altitudes de até 650 km de apogeu.

Seus propulsores são carregados com propelentes sólidos à base de polibutadieno hidroxilado e com envelopes motores confeccionados em aço SAE 4140 (GUTIERRES, 2006). A Figura 1 apresenta a família de foguetes de sondagem desenvolvida atualmente pelo IAE (DEFESANET, 2009).

Dentre essa família de foguetes, o VSB-30 é o mais recente desenvolvimento feito pelo IAE, sendo o mesmo um foguete bi-estágio, não guiado, estabilizado por empenas e lançado por meio de trilho. Esse veículo possuiu 12 metros de comprimento e

aproximadamente duas toneladas de peso, antes do lançamento, desenvolvido para contribuir com o avanço da ciência ao permitir a execução de experimentos, sejam científicos ou tecnológicos. Suas letras significam Veículo de Sondagem *Booster* 30. A Figura 1 apresenta os foguetes de sondagem desenvolvidos no Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE).

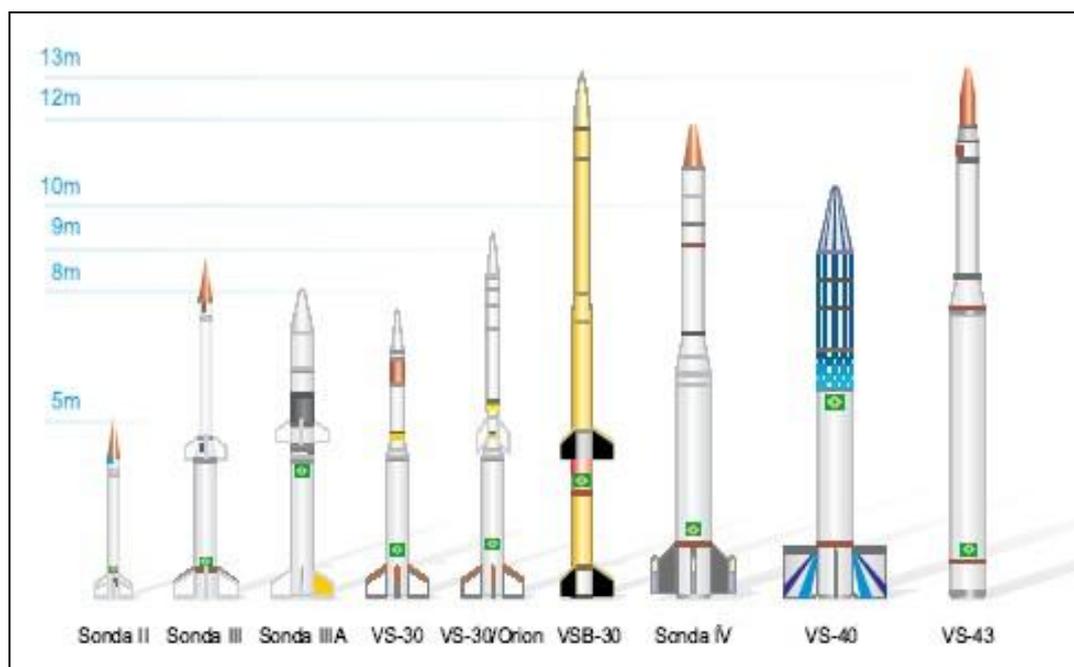


Figura 1 – Família de foguetes de sondagem produzidos pelo IAE (AEB, 2009)

A Figura 2 apresenta as principais partes de uma das configurações do VSB-30, a qual foi utilizada no quarto lançamento desse foguete, na operação denominada Cumã II, ocorrida em 2007, no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA), Maranhão.

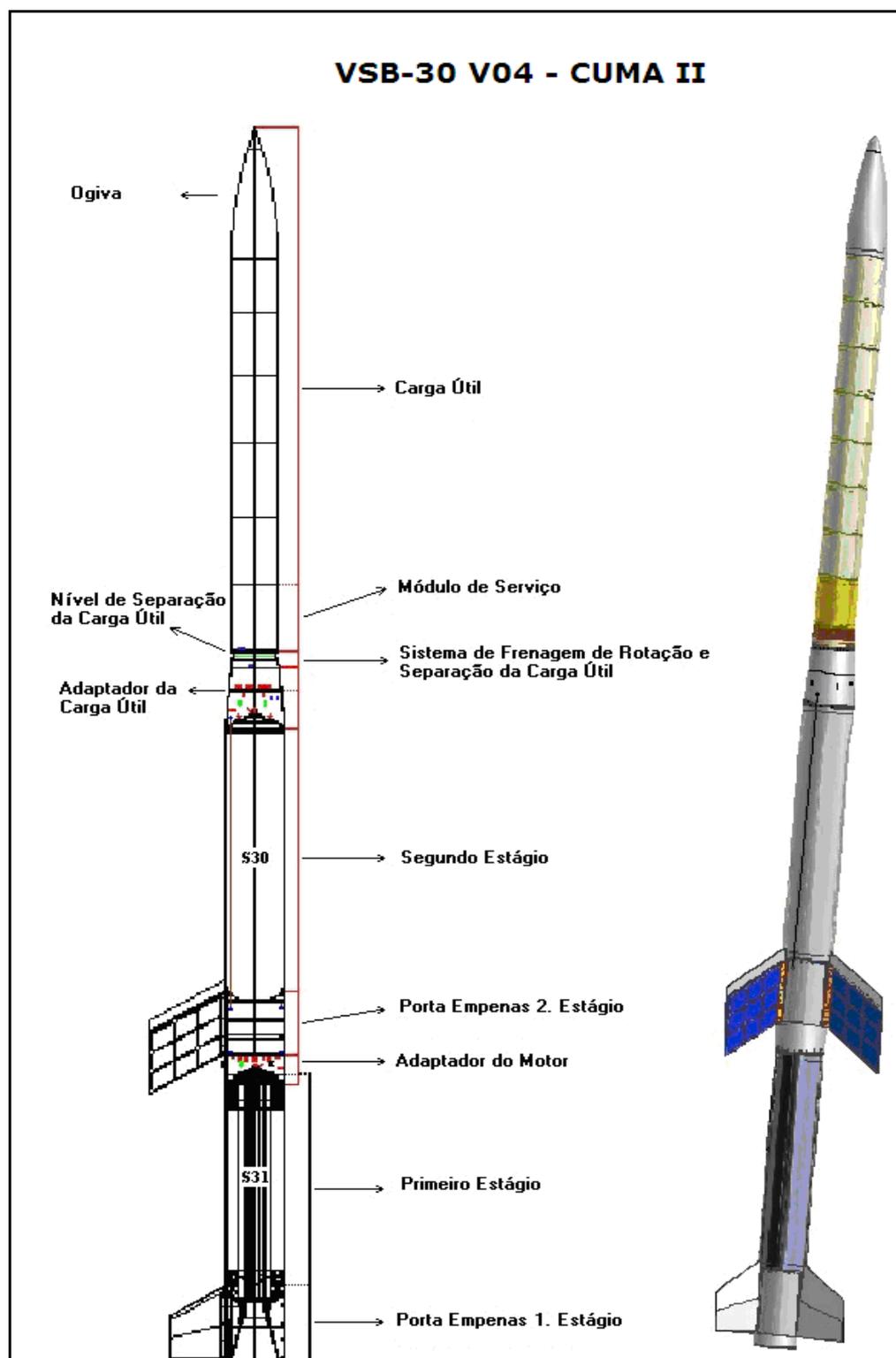


Figura 2 – Principais partes do foguete VS30 V04 (IAE, 2005)

## 2.2 Redes elétricas embarcadas

Um foguete de sondagem pode ser dividido em subsistemas relacionados com as funções executadas pelos mesmos, sendo um desses subsistemas denominado por redes elétricas embarcadas. Pode-se definir uma rede elétrica embarcada em foguetes de sondagem como o sistema elétrico de bordo constituído pelo conjunto de equipamentos eletro-eletrônicos, eletromecânicos e sensores cujas funções estão concentradas para implementar no veículo as tarefas relacionadas com o comando, a supervisão e a segurança necessárias e suficientes para o atendimento total da missão para a qual o foguete se destina.

As redes elétricas de foguetes de sondagem são tipicamente compostas por três subsistemas com funções específicas, sendo denominadas por:

- Rede elétrica de serviço (RES).
- Rede elétrica de telemetria (RET).
- Rede elétrica de segurança (REG).

Como princípio básico, as redes elétricas de Serviço e Segurança devem ser concebidas de modo que existam redundâncias para que a falha de um único sistema, equipamento, circuito ou componente discreto não cause um funcionamento intempestivo ou um não funcionamento que possa acarretar o não cumprimento da missão ou que coloque em risco vidas humanas (WOWK, 1987).

### 2.2.1 Rede elétrica de serviço

A rede elétrica de serviço é o subsistema embarcado que tem como principais funções:

- i) Armazenar e distribuir energia elétrica para os equipamentos de bordo.
- ii) Garantir a segurança e a atuação dos eventos pirotécnicos durante o voo.
- iii) Fornecer energia para os sensores instalados a bordo do foguete.

Na Figura 3 é apresentado o diagrama de blocos da estrutura da rede elétrica de serviço utilizada no foguete de sondagem VSB-30 V08 MASER 11, o qual foi lançado do Centro de Lançamento de Foguetes de Esrange, na Suécia, em maio de 2008 (SPINA, 2008).



No diagrama da Figura 3 podem ser observados os seguintes componentes:

- Banco de controle (BC), é o conjunto formado por todos os equipamentos, incluindo *software*, necessários para controlar, monitorar e fornecer energia elétrica para o veículo quando o mesmo se encontra em solo.
- Baterias de alimentação (BA): são responsáveis por fornecer energia para as alimentações primárias de todos os circuitos, com exceção dos circuitos que atendem a rede elétrica de segurança, durante a fase de vôo do veículo.
- Baterias de pirotécnicos (BP): são responsáveis por fornecer energia para o acionamento dos dispositivos eletropirotécnicos.
- Módulo de comutação de energia (MCE), é responsável pela distribuição da energia primária para a rede elétrica de serviço e para rede elétrica de telemetria. A energia pode ser proveniente das alimentações primárias de bordo ou do banco de controle localizado em solo. A seleção entre alimentação interna, proveniente das baterias, e externa vinda das fontes de alimentação do banco de controle é uma das funções desse circuito. A mencionada seleção é realizada por meio de painel de comando pertencente ao banco de controle.
- Módulo de segurança temporização e atuação (STA): é responsável pelas funções de segurança, temporização e atuação das ordens pirotécnicas. Os comandos gerados pelo circuito de temporização irão atuar nos iniciadores pirotécnicos responsáveis pela geração da seqüência de eventos durante o vôo do foguete. A função de segurança visa garantir que os iniciadores pirotécnicos estejam com seus terminais em curto-circuito, evitando qualquer acionamento intempestivo dos mesmos antes do vôo.
- Conectores de interface pirotécnica (CIP), servem de interface entre o módulo de segurança, temporização e atuação (STA) e os iniciadores pirotécnicos. Sua

função é garantir a ligação correta entre os terminais dos pirotécnicos e as respectivas saídas do STA. Assim em condição de segurança os CIP mantêm em curto-circuito os terminais dos iniciadores pirotécnicos. Esses conectores na condição de voo garantem que as ordens vindas do STA cheguem aos iniciadores pirotécnicos para o acionamento dos mesmos.

- Transdutor de pressão, a rede elétrica de serviço fornece alimentação para este dispositivo que é instalado no domo (tampa superior do motor-foguete) do segundo estágio do VSB-30 e tem por função medir a pressão interna do motor foguete durante a queima do propelente.

### 2.3.2 Rede elétrica de telemetria

A rede elétrica de telemetria tem, basicamente, as seguintes funções que são necessárias para avaliar a missão: aquisição, codificação, modulação e transmissão de todos os dados e sinais de bordo. É composta pelos seguintes blocos funcionais:

- Antenas, conformadas na estrutura externa do veículo, responsáveis pela transmissão do sinal de Rádio Frequência (RF), utilizando sinais na banda S (frequências que vão de 2 GHz a 4 GHz) de frequência.
- Transmissores, são os equipamentos responsáveis por modular os dados a serem transmitidos, utilizando a Modulação em Frequência (FM), para transmissão à estação de telemedidas em solo.
- Codificador, é o equipamento responsável por realizar a aquisição dos dados de bordo do veículo e codificá-los em uma sequência de pulsos, ou em uma modulação por código de pulso (PCM).

- Sensores de monitoração que são responsáveis por medir parâmetros analógicos do veículo como pressão, vibração, temperatura e sensores de indicação de eventos relevantes, como decolagem, separação de estágios, etc.

A Figura 4 apresenta um transmissor de telemetria banda S (faixa de frequência de 2.000 a 4.000 MHz) utilizado no foguete VSB-30 V01, lançado em julho de 2004 do Centro de Lançamento de Alcântara.



Figura 4 – Transmissor banda S do veículo VSB-30 V01 (ALTENBUCHNER, 2004)

### 2.3.2 Rede elétrica de segurança

A Rede Elétrica de Segurança visa garantir a localização do veículo por meio dos radares de solo e a sua destruição quando o mesmo entrar em trajetória que implique risco à pessoa, à propriedade ou ao meio ambiente. A teledestruição, ou destruição remota, será iniciada a partir de comando proveniente de solo e, caso comandada, deverá acionar os pirotécnicos que provocam o rompimento do envelope do motor foguete, causando assim, a perda de pressão interna no motor e a conseqüente descontinuidade do vôo.

A rede elétrica de segurança é composta basicamente pelos seguintes sistemas:

- Sistema de localização do veículo, constituído por um respondedor-radar<sup>1</sup> (*transponder*) e suas antenas.
- Sistema de comando remoto de destruição, responsável por ativar o sistema de destruição do motor foguete em caso de anomalias que comprometam a segurança do vôo. Esse sistema é composto pelos iniciadores pirotécnicos da carga explosiva que irá provocar o rompimento do envelope do motor foguete, receptor de radiofrequência e suas antenas, circuito decodificador de ordens e circuito de atuação e segurança.

A Figura 5 apresenta o diagrama em blocos os elementos presentes na rede elétrica de segurança do foguete VSB-30 V01.

---

<sup>1</sup> Respondedor-radar: equipamento destinado a receber sinais de rádio frequência (RF) provenientes do radar de solo e os retransmitir, visando à localização geográfica do foguete durante o vôo.

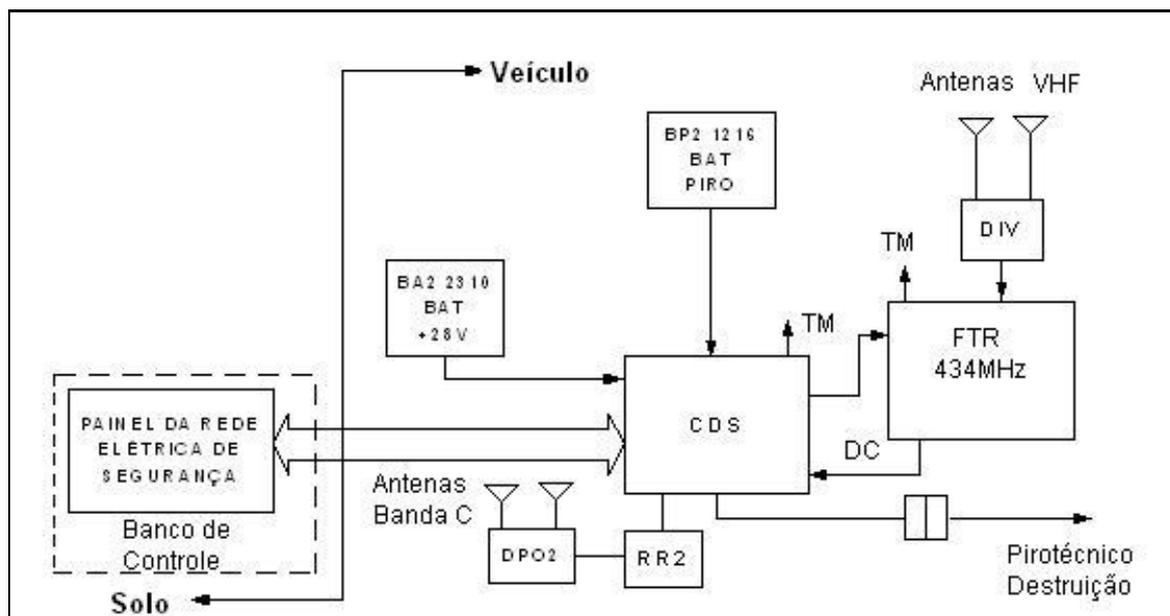


Figura 5 – Diagrama da rede elétrica de segurança do VSB-30 V01 (SILVA, 2004)

Na Figura 5 podem ser identificados os seguintes componentes:

- Painel da rede elétrica de segurança, localizada em solo e nas dependências da casamata, esse painel tem por função monitorar, controlar e fornecer energia para os equipamentos da rede elétrica de segurança quando a mesma se encontrar em alimentação externa.
- Baterias, a rede elétrica de segurança conta com uma bateria especialmente dedicada para sua alimentação funcional e outra bateria com função única de acionar os iniciadores pirotécnicos presentes nessa rede.
- Antenas VHF (*Very High Frequency* – Frequência Muito Alta) e divisor de potência (DIV), as antenas de VHF e seu divisor de potência são sintonizados em frequência próxima de 434 MHz e tem a função de receber os sinais de manutenção e de destruição vindos da estação de telecomando em solo.
- Receptor de terminação de vôo (FTR), esse receptor, como apresentado na Figura 6, é responsável por decodificar as ordens vindas da estação de telecomando em solo.



Figura 6 – Unidade de recepção para terminação de vôo (ALTENBUCHNER, 2004)

- Circuito de destruição (CDS), é responsável pelas funções de segurança e atuação dos iniciadores pirotécnicos, a partir de comandos gerados pelo receptor de terminação de vôo (FTR).
- Responder radar (RR), antenas e divisor de potência (DPO), esses componentes formam o sistema, apresentado na Figura 7, que é responsável por receber e responder aos sinais vindos dos radares instalados nas estações de rastreamento localizadas em solo, operando na faixa de frequência da banda C (faixa de frequência de 3,9 GHz a 6,2 GHz).

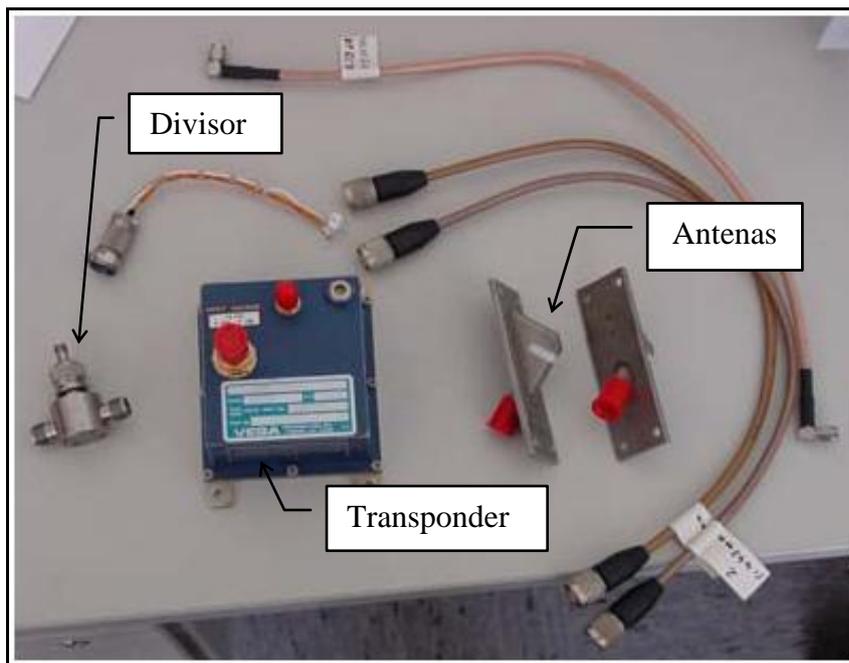


Figura 7 – Responder radar (ALTENBUCHNER, 2004)

### 2.3 Esquemas de distribuição de energia de bordo

Os sistemas elétricos de distribuição são determinados em função do esquema de condutores vivos e esquema de aterramento (NBR 5410, 2004).

Para a classificação no esquema de condutores vivos é considerada a natureza dos equipamentos utilizados quanto ao tipo de suas alimentações, isto é:

a) Corrente alternada:

- Monofásico a 2 condutores.
- Monofásico a 3 condutores.
- Bifásico a 3 condutores.
- Trifásico a 3 condutores.
- Trifásico a 4 condutores.

b) Corrente contínua:

- Dois condutores.
- Três condutores.

Na classificação do esquema de aterramento é levada em consideração a forma como o neutro da fonte de alimentação e as massas das cargas são conectadas em relação à terra.

Para a classificação do esquema de aterramento é utilizada a seguinte nomenclatura:

a) Primeira letra - Situação da alimentação em relação à terra:

- T, quando existe um ponto diretamente aterrado.
- I, é isolado todas as partes vivas em relação à terra ou aterrado um ponto por meio de uma impedância.

b) Segunda letra - Situação das massas das cargas em relação à terra:

- T, massas são diretamente aterradas, independentemente do aterramento eventual de um ponto de alimentação.
- N, as massas são ligadas diretamente à alimentação aterrado (em corrente alternada, o ponto aterrado é normalmente o ponto neutro).

c) Outras letras (eventuais) - Disposição do condutor neutro e do condutor de proteção:

- S, para funções de neutro e de proteção asseguradas por condutores distintos.
- C, as funções de neutro e de proteção combinadas em um único condutor (condutor PEN).

Dependendo do tipo dessas conexões, são obtidos, convencionalmente, três tipos de esquemas de aterramento, os quais são denominados por: TN, TT e IT.

Baseado nas características de condutibilidade elétrica e na estrutura mecânica dos componentes de um foguete de sondagem é considerada apenas a possibilidade de implementação dos esquemas TN e/ou IT (BIZARRIA; BIZARRIA; SPINA, 2009).

### 2.3.2 Esquema de aterramento TN

No esquema de aterramento TN um ponto da alimentação é aterrado, sendo que as massas das cargas são ligadas a esse ponto por meio de condutores de proteção. Nesse esquema toda corrente de falta<sup>2</sup> direta entre fase e neutro provoca o surgimento da corrente de curto-circuito. São considerados três tipos de esquemas TN, de acordo com a disposição do condutor neutro e do condutor de proteção, a saber:

- Esquema TN-S, no qual o condutor neutro e o condutor de proteção são distintos, conforme apresentado na Figura 8.

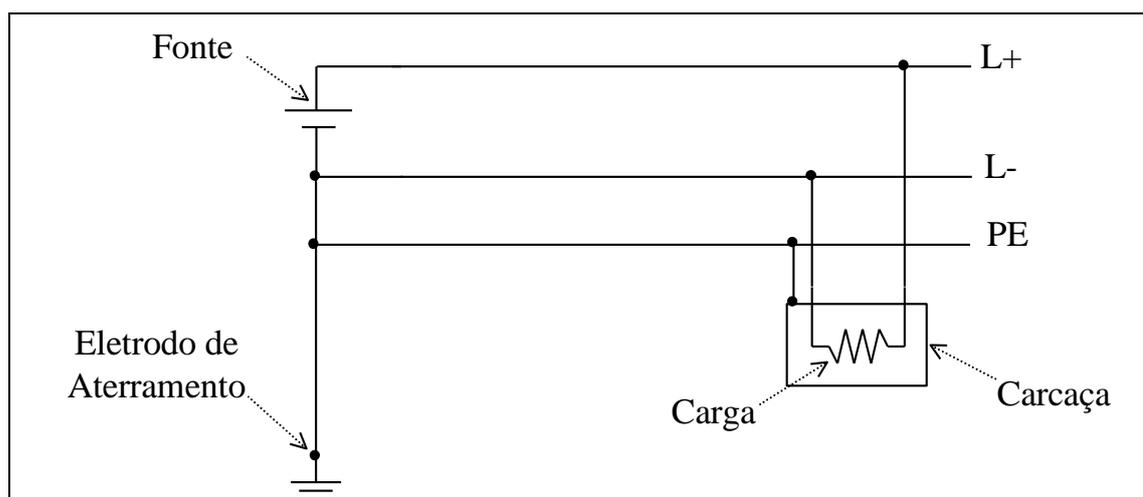


Figura 8 – Esquema TN-S (BIZARRIA; BIZARRIA; SPINA, 2009)

<sup>2</sup> Falta: contato ou arco acidental entre partes vivas sob potenciais diferentes, entre partes vivas e massa (falta para a terra ou falta para a massa, num circuito ou equipamento elétrico).

Na Figura 8 as nomenclaturas possuem os seguintes significados:

- Fonte, fonte de energia elétrica em corrente contínua.
  - L+, linha positiva da fonte de tensão em corrente contínua.
  - L-, linha negativa da fonte de tensão em corrente contínua.
  - PE, condutor de proteção.
  - Eletrodo de Aterramento, definido por condutor ou conjunto de condutores enterrados no solo e eletricamente ligados para a terra, de modo a fazer um aterramento.
- Esquema TN-C, no qual as funções de neutro e de proteção são combinadas em um único condutor (PEN) ao longo de toda a instalação, conforme apresentado na Figura 9.

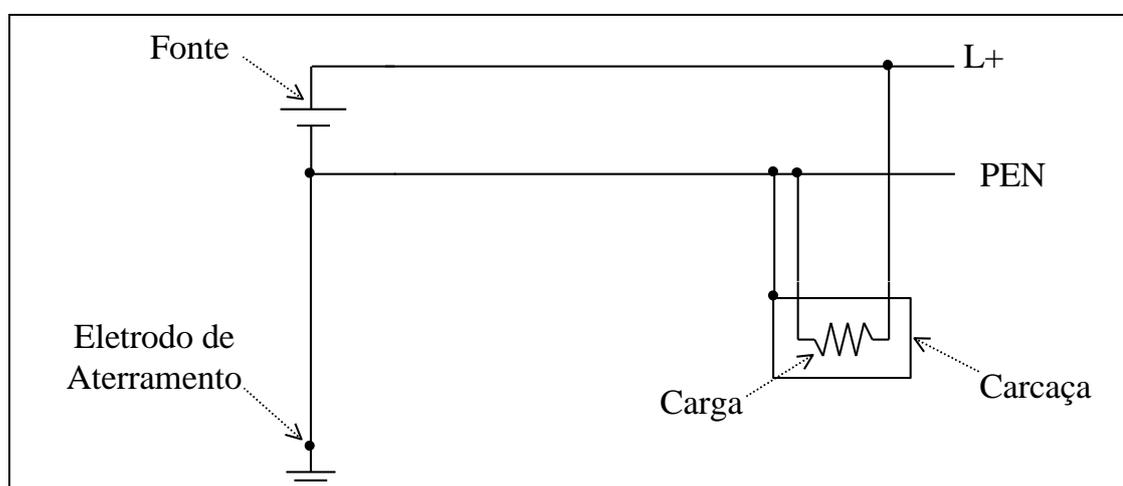


Figura 9 – Esquema TN-C (BIZARRIA; BIZARRIA; SPINA, 2009)

- Esquema TN-C-S, no qual as funções de neutro e de proteção são combinadas em um único condutor em uma parte da instalação, como apresentado na Figura 10.

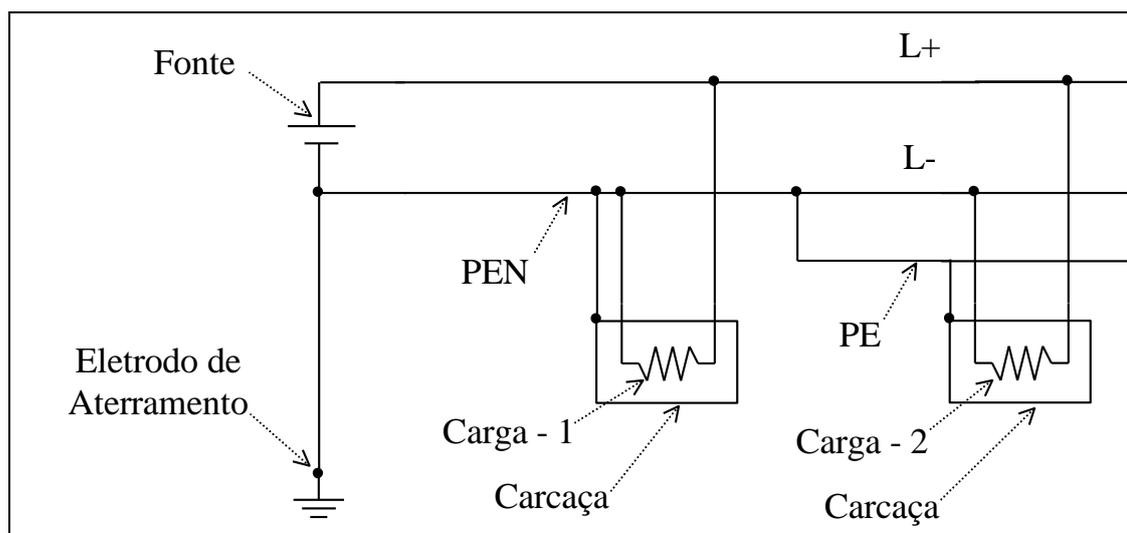


Figura 10 – Esquema TN-C-S (BIZARRIA; BIZARRIA; SPINA, 2009)

### 2.3.2 Esquema de aterramento IT

O Esquema de aterramento IT não possui qualquer ponto da alimentação diretamente aterrado, estando aterradas as massas dos equipamentos pertencentes ao circuito. Nesse esquema, a corrente resultante de uma única falta monofásica para massa não deve ter intensidade suficiente para provocar interrupção no fornecimento de energia para o circuito. A Figura 11 apresenta a representação do esquema IT.

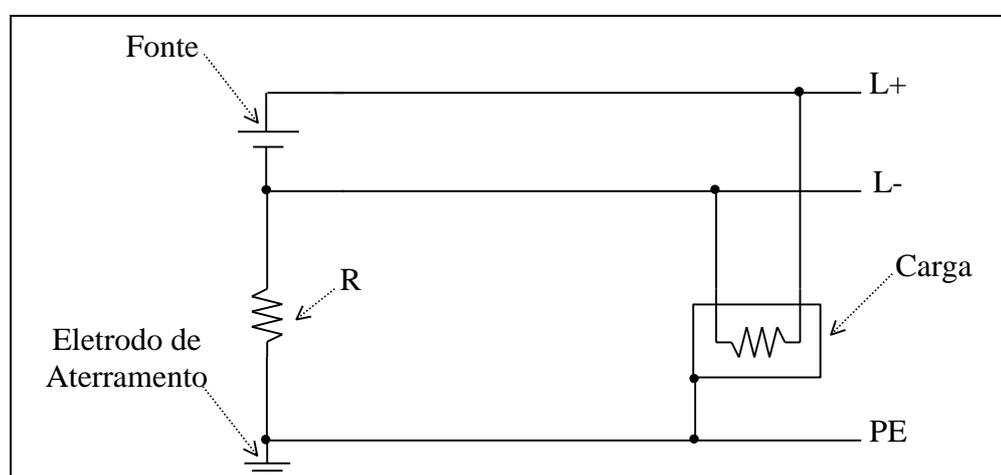


Figura 11 – Esquema de aterramento IT (BIZARRIA; BIZARRIA; SPINA, 2009)

### 2.3.3 Comparação entre os esquemas TN e IT

O comportamento esperado da proteção contra as sobrecorrentes ao ser submetida à primeira falta monofásica direta para a terra, considerando os esquemas de aterramento normalizados, é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Comparação entre esquemas TN e IT

Esquema de aterramento	Atuação de proteção em falta	Corrente de falta esperada
TN	É necessária	Alta
IT	Não é necessária	Muito baixa

### 2.4 Simulação computacional

O ambiente adotado para a elaboração de modelos e realização da simulação de circuitos elétricos e eletrônicos utilizado no desenvolvimento deste trabalho é denominado OrCAD PSpice (PSPICE, 2000), o qual foi desenvolvido originalmente pela empresa Microsim (MICROSIM, 1996).

A Microsim desenvolveu esse ambiente até a versão 8.0, com o nome de Microsim PSpice, e posteriormente vendeu os direitos desse *software* de simulação para a empresa Cadence Design Systems, que mudou seu nome para OrCAD PSpice. O *software* original, Microsim PSpice, responsável pelos cálculos matemáticos do simulador continuou o mesmo, mas o leiaute da tela de edição dos esquemáticos dos circuitos eletrônicos foi alterado para uma versão mais atualizada e com maiores recursos.

O Microsim PSpice foi desenvolvido a partir do SPICE (*Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis* – Programa de Simulação com Ênfase em Circuito Integrado)

desenvolvido pela Universidade da Califórnia, Berkeley, na década de 70 com o objetivo de simular circuitos integrados. Simuladores baseados no SPICE são recursos adequados para simulação de circuitos com ênfase em eletrônica de potência e em sistemas de potência (POMILIO, 1998). Esses programas são capazes de retratar o funcionamento e comportamento de circuitos eletrônicos com grande precisão. São, na verdade, bancadas virtuais de laboratório (VERONESE, 2009).

O OrCAD PSpice trabalha baseado internamente em um sistema de equações diferenciais ordinárias<sup>3</sup> que são resolvidas utilizando-se diferentes técnicas numéricas. Uma equação é escrita para cada nó do circuito, assim o sistema terá “N” equações para os “N” nós do circuito. Para fornecer os dados de formação desse sistema de equações, o PSpice possui uma interface gráfica na qual o usuário, utilizando-se de uma área de trabalho, monta o circuito eletrônico utilizando os símbolos gráficos dos componentes eletrônicos, selecionados nas várias bibliotecas disponíveis no seu ambiente de desenvolvimento.

O OrCAD PSpice é atualmente um dos simuladores mais utilizados na indústria eletrônica, permitindo realizar, principalmente, os seguintes tipos de análises:

#### **Análise DC:**

- Ponto de operação DC.
- Parametrização linearizada dos modelos.
- Função de transferência para pequenos sinais.
- Sensibilidade para pequenos sinais.
- Curvas de transferência DC.

#### **Análise Transiente:**

- Resposta no domínio do tempo.

---

<sup>3</sup> Equação diferencial ordinária: é uma equação cuja incógnita é uma função que aparece na mesma sob a forma das respectivas derivadas e contém apenas funções de uma variável e derivadas daquela mesma variável.

- Análise de sinais em série de Fourier.

#### **Análise AC:**

- Resposta a pequenos sinais no domínio da frequência.
- Análise de ruído.
- Análise de distorção.

Possuí também a capacidade de simular sistemas de sinais mistos, ou seja, circuitos que utilizam simultaneamente sinais analógicos e digitais.

Por meio da **análise DC**, determina-se o ponto de operação quiescente<sup>4</sup> do circuito. Nessa análise, os capacitores são considerados como circuitos abertos e os indutores como curtos-circuitos. Ao final da análise, o programa PSpice fornece as tensões em todos os nós do circuito, as correntes nas fontes de tensão independentes e a potência total quiescente dissipada no circuito. Para a simulação da operação do circuito sob pequenos sinais, os elementos não-lineares do circuito são substituídos por modelos linearizados, obtendo-se assim a resposta do circuito. Os parâmetros dos modelos lineares dependem do ponto de operação calculado. Especificando-se uma variável de saída e uma fonte de entrada, o programa PSpice permite obter também a função de transferência do circuito para pequenos sinais. Além disso, o programa determina a resistência de entrada e de saída do circuito para pequenos sinais. Por meio de um subprograma, ainda é possível obter a sensibilidade de uma determinada variável de saída com relação a qualquer parâmetro do circuito.

A **análise transiente** permite determinar a resposta do circuito em função de sinais variáveis no domínio do tempo. O comportamento no tempo “zero” é obtido pela análise DC; portanto, a análise DC será sempre realizada antes da análise transiente, mesmo que o usuário

---

<sup>4</sup> Ponto de operação quiescente: coordenada de um ponto (x;y) na curva de transferência do elemento ativo do quadripolo, onde o circuito se mantém polarizado, ou estabilizado.

não a solicite. O intervalo de tempo da simulação é determinado pelo usuário, bem como os incrementos ou “passos” de tempo. De fato, o programa determinará internamente um “passo de cálculo” variável, com o objetivo de garantir a precisão dos resultados, sendo que os resultados de saída são interpolados de modo a se acomodarem aos intervalos de tempo determinados pelo usuário. As fontes do circuito podem ser puramente senoidais ou com diferentes formas de variação no tempo. Uma sub-rotina incorporada ao programa permite a obtenção dos coeficientes da série de Fourier<sup>5</sup> de um sinal específico. Com isso, pode-se avaliar a taxa de distorção harmônica (*THD – Total Harmonic Distortion*) de um sinal, desde que tal nível de distorção seja relativamente elevado.

A **análise AC** tem como objetivo determinar a resposta de frequência do circuito. Normalmente especifica-se uma série de valores de frequência, de modo que a análise seja feita de forma repetitiva dentro dessa faixa de variação. Ao final da análise, os resultados podem ser apresentados em magnitude absoluta ou relativa (dB) ou em diagramas com fase, parte real e parte imaginária (diagramas de Bode<sup>6</sup> e de Nichols<sup>7</sup>).

A realização da simulação envolve basicamente três passos:

- A descrição do circuito a ser simulado é feita por meio de um arquivo do tipo texto que contém uma lista dos elementos existentes (ramos do circuito) e seus respectivos nós de ligação. Esse arquivo é denominado por *netlist* e pode ser obtido “manualmente” pelo usuário, a partir de algumas regras de sintaxe simples, ou geradas de modo automático pela interface gráfica do programa denominado OrCAD Capture.

A Figura 12 apresenta a janela de trabalho do OrCAD Capture.

---

<sup>5</sup> Série de Fourier: a série de Fourier é a expansão de um sinal periódico em uma combinação linear de componentes harmônicas discretas.

<sup>6</sup> Diagrama de Bode: gráfico logarítmico da função de transferência de um sistema linear pela frequência.

<sup>7</sup> Diagrama de Nichols: é um gráfico utilizado em processamento de sinais em que o logarítmico da magnitude é apresentado em função da resposta em fase ou frequência.

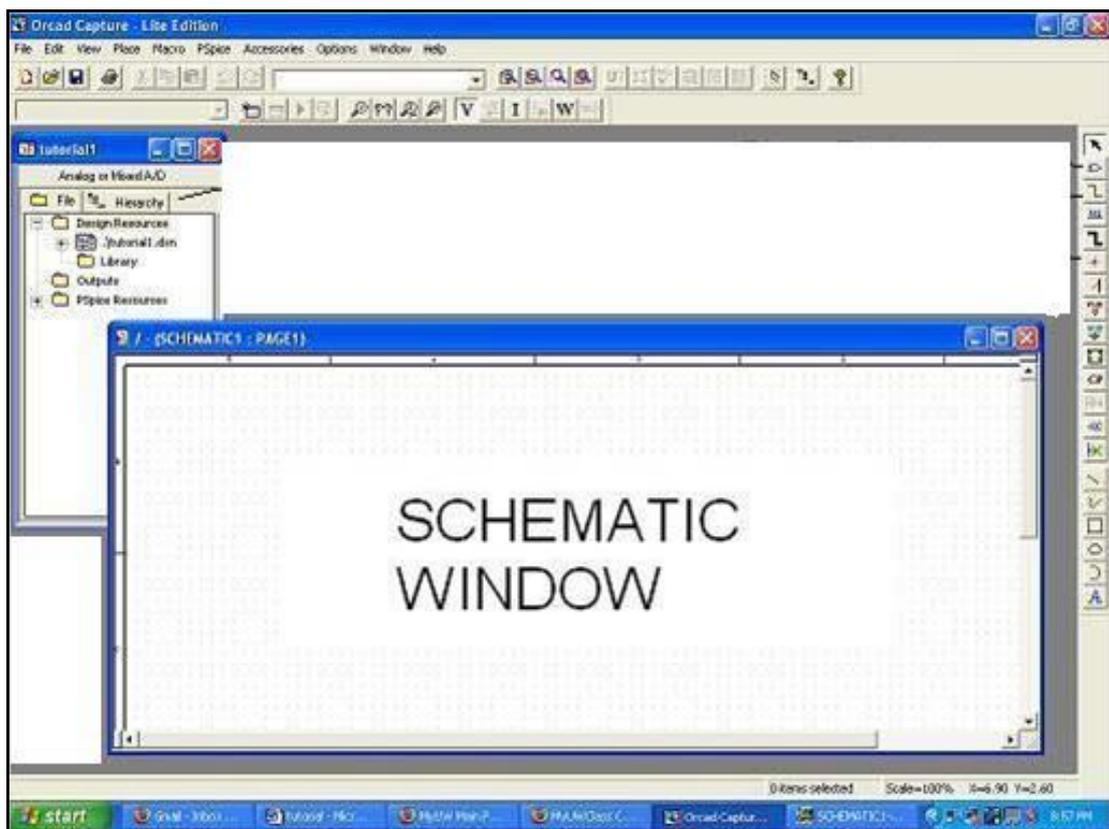


Figura 12 – Área de trabalho do OrCAD Capture (UNIVERSITY OF WASHINGTON, 2009)

- A simulação propriamente dita do circuito é realizada informando-se ao programa OrCADE PSpice o arquivo de *netlist* criado anteriormente utilizando-se o OrCAD Capture. Durante a simulação, o programa gera um arquivo texto contendo mensagens para o usuário e, não existindo erros na descrição do circuito é também gerado um arquivo de resultados em formato adequado para ser lido pelo programa específico denominado Probe.
- A análise dos resultados é apresentada por meio de uma janela denominada Probe. Nessa janela os resultados são apresentados graficamente e pode incluir vários gráficos analógicos e digitais.

No presente trabalho cada equipamento eletrônico pertencente a uma determinada rede elétrica é modelado e testado separadamente, considerando-se, principalmente, suas

características de interface quanto à tensão, corrente e impedância. Uma vez que os equipamentos que formam a rede elétrica estejam integrados e estabelecidas suas interfaces, o ponto de operação do circuito pode ser calculado repetidamente para uma série de condições de faltas no sistema, obtendo-se como resultado os efeitos provocados por cada uma dessas faltas. O Orcad PSpice também permite simulação interativa onde a simulação pode ser pausada, alterar-se determinados parâmetros da simulação, e então continuar a simulação do ponto em que ela foi pausada usando os novos parâmetros de simulação.

### 3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Este capítulo apresenta a revisão da literatura, uma versão atual da arquitetura da rede elétrica de serviço que é utilizada nos foguetes de sondagem desenvolvidos pelo IAE, o modelo proposto para representar essa rede elétrica, as simulações de faltas em pontos estratégicos dessa rede elétrica e os resultados obtidos nessas simulações.

#### 3.1 Revisão da literatura

Em pesquisa realizada, entre 2008 e 2009, foi encontrada quantidade restrita de referências bibliográficas que abordam o tema tratado neste trabalho. A característica dual, pesquisa ou defesa, na tecnologia empregada em foguetes de sondagem faz com que a literatura nessa área seja mantida em sigilo pelos países que têm domínio desse conhecimento. As referências mencionadas nesta subseção correspondem aos sistemas elétricos que guardam relação com a área espacial.

No manual técnico da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) intitulado *Electrical Grounding Architecture for Unmanned Spacecraft* (MULVILLE, 1998), que é uma das fontes relevantes de pesquisa sobre sistemas de distribuição de energia para veículos espaciais não tripulados, são descritos os critérios básicos de projeto para implementação dos esquemas de aterramento utilizados atualmente. Esse manual recomenda as práticas de engenharia que são seguidas para os programas e projetos da NASA. Os dois principais modos de aterramento descritos na mencionada publicação são: aterramento em ponto único e o aterramento em pontos múltiplos.

No modo de aterramento em ponto único, todos os circuitos são aterrados por meio de condutores que efetuam ligações em um único ponto no chassi do veículo.

No modo de aterramento em pontos múltiplos existem mais de um ponto para efetuar o aterramento dos circuitos no chassi do veículo. Segundo o autor, o modo de aterramento mais indicado para veículos espaciais é o derivado do esquema de pontos múltiplos. Nesse modo, não há corrente elétrica circulando na estrutura do veículo e todos os subsistemas têm o mesmo referencial elétrico comum que é a estrutura do veículo. Uma decisão importante descrita nesta publicação se refere à opção de se aterrar ou não para o chassi o retorno das linhas das fontes de alimentação.

O aterramento das linhas de retorno das fontes de alimentação tem como principal vantagem reduzir o ruído em modo comum e a amplitude do ruído irradiado por meio do conjunto de condutores do sistema de potência. Considerando essa configuração, ou seja, com o condutor de retorno da fonte de alimentação aterrado no chassi do veículo, a ocorrência de falta a terra em uma linha que não esteja protegida contra sobrecorrentes, tem potencial suficiente para causar perda total da missão. Por essa razão, o autor recomenda expressamente, que o retorno de potência das fontes de alimentação seja isolado do chassi por meio de uma impedância, com valor alto o suficiente para limitar a corrente elétrica em caso de falta e com valor baixo o suficiente para fornecer uma referência estável para os circuitos envolvidos na malha de alimentação.

A Figura 13 apresenta uma sugestão de esquema de aterramento para um sistema de distribuição de energia de um veículo espacial.

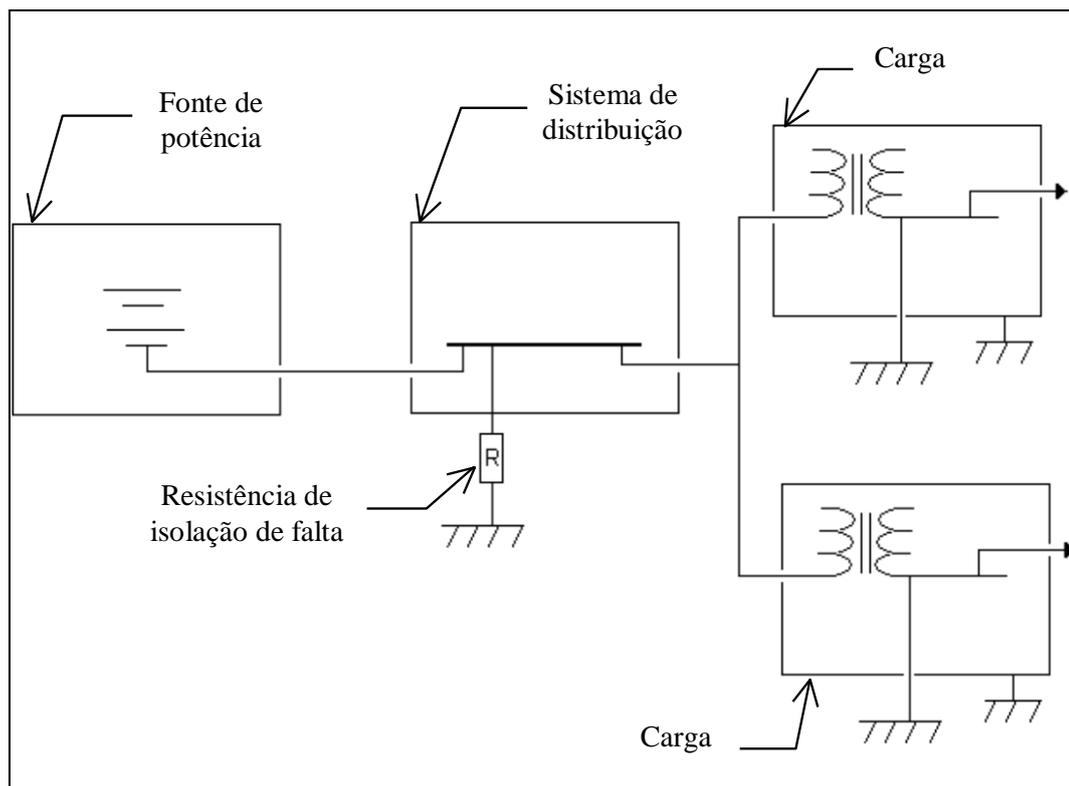


Figura 13 – Proposta de esquema de distribuição de energia para veículo espacial (MULVILLE, 1998)

No trabalho técnico elaborado pelo Centro de Sistemas de Mísseis e Espaço do Comando da Força Aérea dos Estados Unidos da América (LENERTZ, 2005), são descritos os requisitos de projetos para sistemas de potência elétrica operando em corrente contínua para veículos espaciais. Esse documento foi produzido para utilização como ponto de partida para uma atualização das especificações militares utilizadas anteriormente, principalmente nos veículos desenvolvidos pela NASA. Segundo o autor, até então, não existia nenhuma especificação ou norma que gerenciasse de uma forma geral todos os aspectos envolvidos no projeto de sistemas de potência elétrica utilizados em veículos espaciais.

As normas MIL-STD-704E (Características de Potência Elétrica para Aeronaves), MIL-STD-1541A (Requisitos de Compatibilidade Eletromagnética para Sistemas Espaciais), e MIL-STD-1539 (Requisitos de Projeto para Sistemas Espaciais em Potência Elétrica em Corrente Contínua) apresentam vasta quantidade de requisitos, mas foram escritas há muito

tempo, tornando difícil a utilização das técnicas de projeto aplicadas atualmente. No trabalho técnico de Lenertz (2005) é destacada a importância da verificação do cumprimento dos requisitos impostos ao sistema por meio de testes, análises ou simulações. Sobre o gerenciamento das faltas, o autor esclarece que o sistema deve ser livre de pontos de falha únicos para a missão. É recomendado que para analisar a estabilidade do sistema em um determinado modo ou regime de operação seja utilizado um simulador de circuitos eletrônicos.

Um modelo funcional para os circuitos eletrônicos de potência espaciais é apresentado por Tam e Yang (1995). Nesse trabalho, é detalhada uma nova abordagem para modelar componentes eletrônicos de potência de maneira a facilitar os estudos para sistemas espaciais. Para demonstrar a eficácia dessa abordagem é utilizado um sistema de distribuição de potência elétrica de uma estação espacial. O ambiente utilizado para o desenvolvimento do modelo funcional do sistema elétrico é o *software* denominado *Electromagnetic Transients Program* (EMTP). O autor esclarece que a utilização do EMTP viabilizou o desenvolvimento de um modelo, cuja maioria dos componentes empregados está presente em suas próprias bibliotecas, e os modelos mais complexos de dispositivos foram desenvolvidos a partir de seus componentes básicos.

Em Jiang, Liv e Dougal (2003) é apresentado um estudo para o projeto e teste de sistemas de potência de veículos espaciais utilizando o *software* denominado *Virtual Test Bed* (VTB). Esse trabalho destaca a importância da utilização de protótipos virtuais para o melhoramento da arquitetura de sistemas espaciais, para a escolha dos componentes e para melhorar o desempenho do sistema em termos de eficiência, densidade de potência, custo e tempo de vida.

No manual do usuário do veículo espacial Ariane 5 (ARIANE 5, 2008) são apresentados informações relacionadas com a descrição operacional do veículo, o rendimento,

as características vinculadas com a missão, as condições ambientais e a descrição das interfaces do veículo com a carga do usuário. A Figura 14 apresenta o diagrama elétrico de comando utilizado pelo Ariane 5, no qual é possível observar circuitos de alimentação redundantes, proveniente da baia de equipamentos, para atender a carga. A utilização de um conector de segurança (*Safety plug*), com valores de carga de  $100\Omega$  e  $10\text{ W}$ , tem a função de limitar a corrente de alimentação abaixo de um valor preestabelecido, que para o Ariane 5 é de  $500\text{mA}$ . Nessa mesma figura também é possível observar a utilização de isolamento galvânica entre as redes elétricas que trocam sinais entre si, localizadas na baia de equipamentos e no veículo como um todo, o que é realizado por meio da utilização de um conversor de tensão (CV) de  $55\text{V}$  para  $28\text{V}$ .

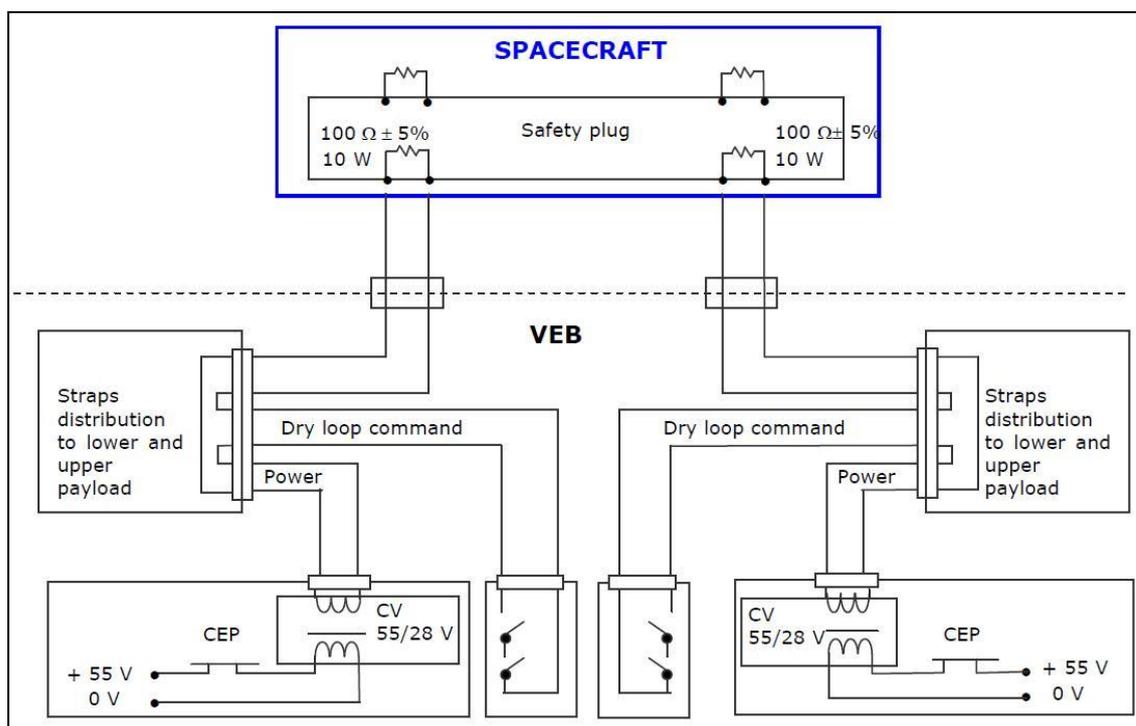


Figura 14 – Diagrama elétrico de comando utilizado no Ariane 5 (ARIANE, 2008)

A estratégia adotada no projeto do veículo espacial Soyus (SOYUS, 2006) é utilizar uma bateria dedicada para atender os circuitos redundantes que efetuam as ordens de acionamento dos iniciadores eletropirotécnicos, conforme é mostrado no diagrama da

Figura 15. Uma resistência de 100 kΩ instalada entre a massa do veículo e a linha de retorno eletropirotécnica é utilizada para garantir o desacoplamento e eventuais cargas eletrostáticas que possam acometer o circuito. As monitorações de operação das linhas pirotécnicas são isoladas de modo galvânico por meio de relés. A linha de retorno da bateria de pirotécnico é isolada da massa do veículo ou é conectada por meio do resistor de 100 kΩ durante o acionamento do iniciador, o que mostra a utilização do esquema de aterramento IT nesse circuito.

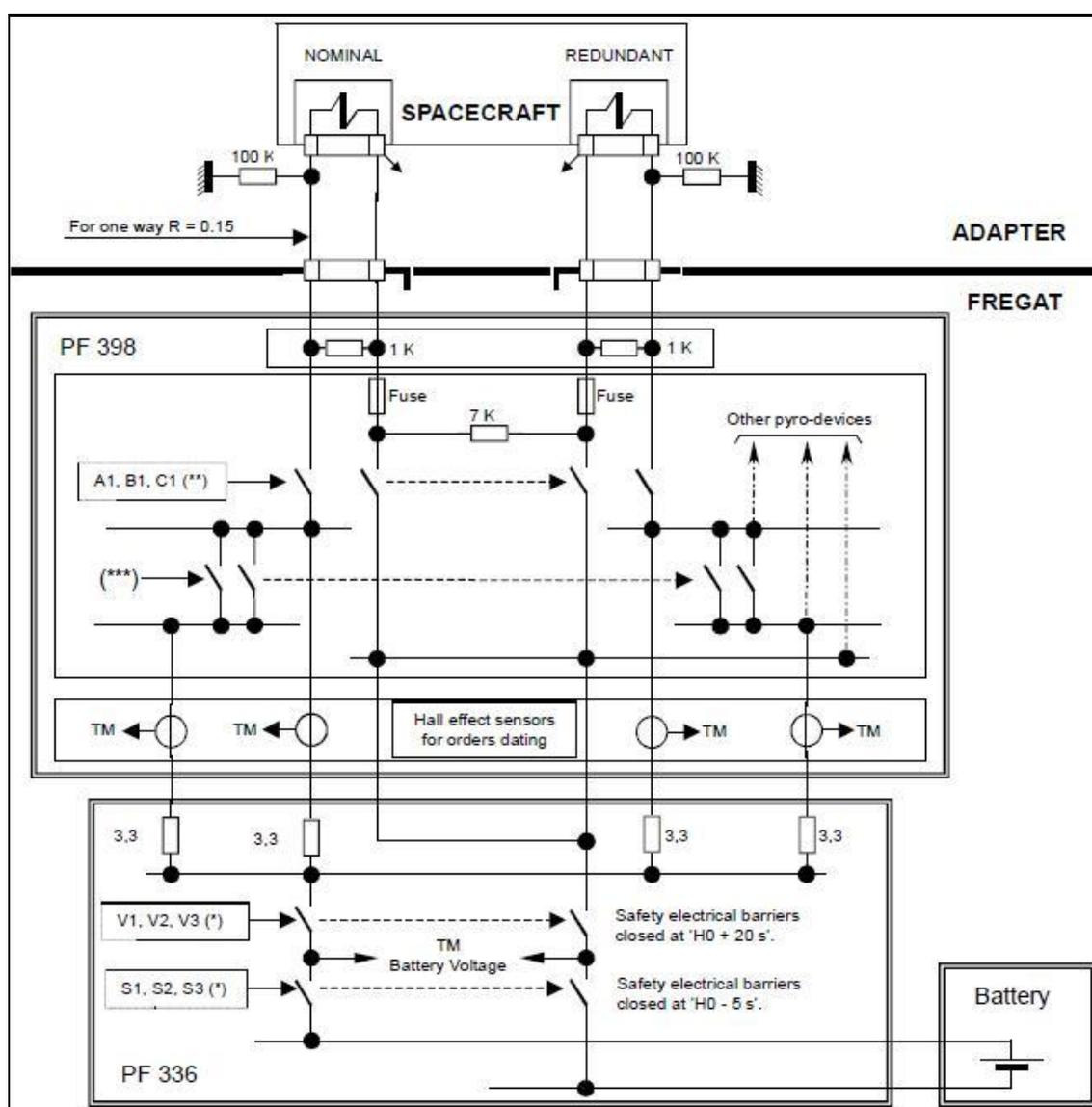


Figura 15 – Circuito de comando pirotécnico (SOYUS, 2006)

O circuito que efetua o acionamento de ordem pirotécnica previsto no veículo Vega (VEGA, 2006) é semelhante ao Ariane 5, exceto pelos parâmetros estabelecidos para as resistências de segurança que são de 2 k $\Omega$  e 0,25 W, conforme é apresentado na Figura 16.

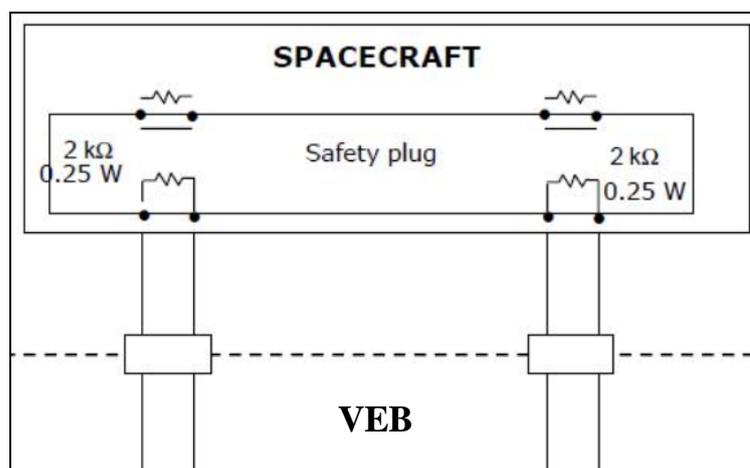


Figura 16 – Típico circuito de comando de ordem pirotécnica (VEGA, 2006)

### 3.2 Arquitetura atual da rede elétrica de serviço

Os principais componentes presentes na arquitetura de uma rede elétrica de serviço, que é empregada em foguetes de sondagem, são apresentados no diagrama da Figura 17.

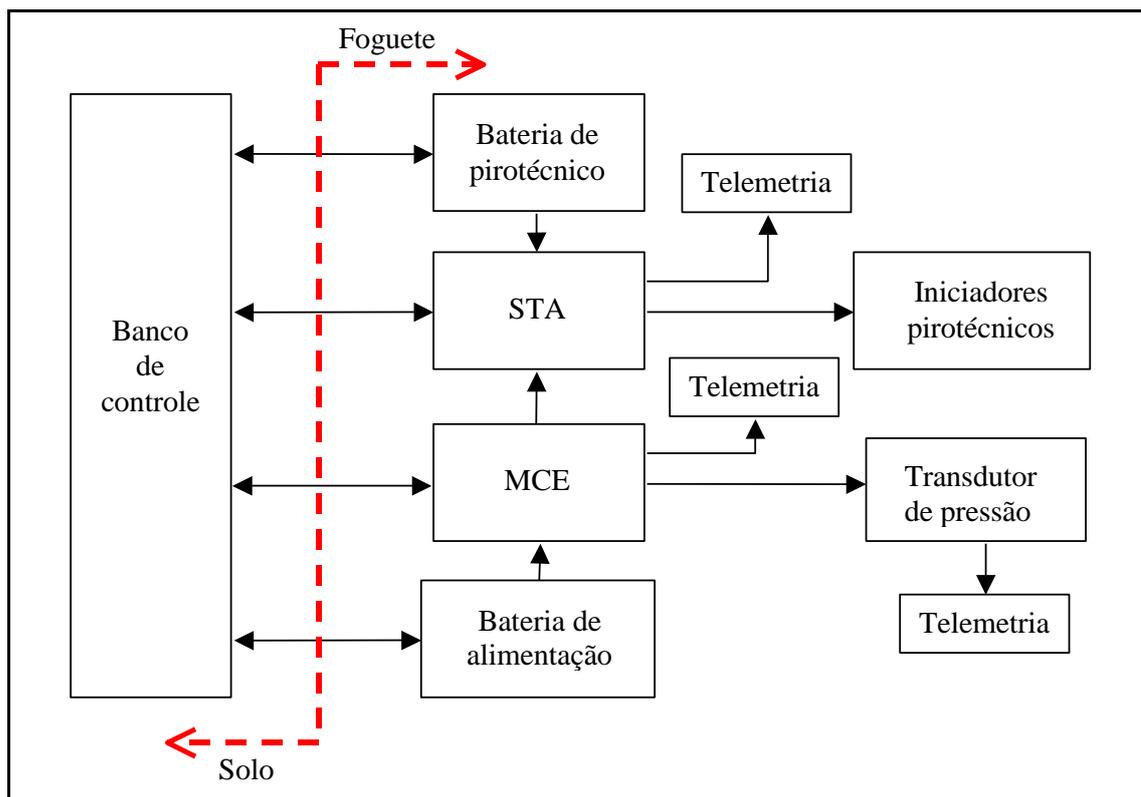


Figura 17 – Diagrama da rede elétrica de serviço de foguetes de sondagem

A rede elétrica escolhida para ser modelada é composta pelos seguintes componentes e interfaces:

- i) Banco de controle.
- ii) Baterias.
- iii) Módulo de segurança; temporização e atuação (STA).
- iv) Módulo de comutação de energia (MCE).
- v) Transdutor de pressão.
- vi) Rede elétrica de telemetria.
- vii) Iniciadores pirotécnicos.

Sistemas complexos são, por definição, difíceis de serem representados visando sua simulação. Existe uma relação direta entre a precisão e a simplicidade do modelo de um sistema complexo (TAM, 1995). Quanto maior a precisão necessária, mais complexa torna-se

o modelo de simulação. Este trabalho tem por objetivo apresentar uma abordagem funcional, principalmente quanto ao esquema de aterramento adotado, de modo que, o comportamento da rede elétrica em condições normais e sob falta, seja simulado corretamente e com precisão. Assim, cada componente e as suas interfaces são modelados e testados separadamente para depois serem integrados e formarem a rede elétrica completa.

### 3.3 Modelos funcionais

A filosofia adotada neste trabalho é elaborar modelo para simulação que tenha a mesma característica funcional do modelo real e desempenhe as mesmas funções que o dispositivo real quando em operação em regime permanente e sob transientes. Nas subseções seguintes, são apresentados os modelos funcionais elaborados para cada componente pertencente a uma rede elétrica de serviço tipicamente utilizada em foguetes de sondagem.

#### 3.3.1 Bateria de alimentação

A capacidade da bateria de alimentação é determinada tomando-se como base no tempo total previsto para o suprimento de energia interna para os equipamentos da rede elétrica na qual a mesma deverá atender durante o tempo de vôo do veículo. Em foguetes de sondagem, essas baterias podem utilizar a tecnologia de células de NiCd (Níquel Cádmio), com tensão nominal de 28V e capacidade de fornecimento de energia de 300 mAh (miliampère hora). A Figura 18 apresenta um modelo deste tipo de bateria utilizada no foguete VSB-30.



Figura 18 – Bateria de NiCd utilizada em foguetes de sondagem

Nas bibliotecas do OrCAD PSpice não há modelos disponíveis que simulem as baterias de NiCd. Dessa forma, foi necessário aplicar o conceito de desenvolver um circuito utilizando os componentes básicos disponíveis nas bibliotecas do simulador que represente funcionalmente uma bateria real de NiCd. Nesse contexto, pode-se representar uma bateria como sendo uma fonte ideal com uma resistência em série, sendo que essa resistência em série representa a resistência interna da bateria.

A Tabela 2 apresenta dados reais de valores da resistência interna das baterias de alimentação obtidos a partir dos modelos utilizados no foguete de sondagem VSB-30.

Tabela 2 – Valores de baterias de alimentação do VSB-30

Item	Corrente de descarga (A)	Tensão da bateria carregada (V)	Resistência interna ( $\Omega$ )
1	0.30	31.32	3.20
2	0.30	30.91	3.37

A Figura 19 apresenta o modelo funcional elaborado por meio do *software* OrCAD Capture para representar as mencionadas baterias de alimentação. Esse modelo poderia ser representado por meio de um polinômio mais complexo a partir da curva de

descarga desse tipo de bateria. Porém, optou-se pelo modelo simplificado, mostrado na Figura 19, devido ao fato de o tempo de vôo do foguete ser muito menor (um minuto) do que o tempo de início de descarga da bateria (cinquenta minutos), onde a curva de tensão pelo tempo não está em um valor constante.

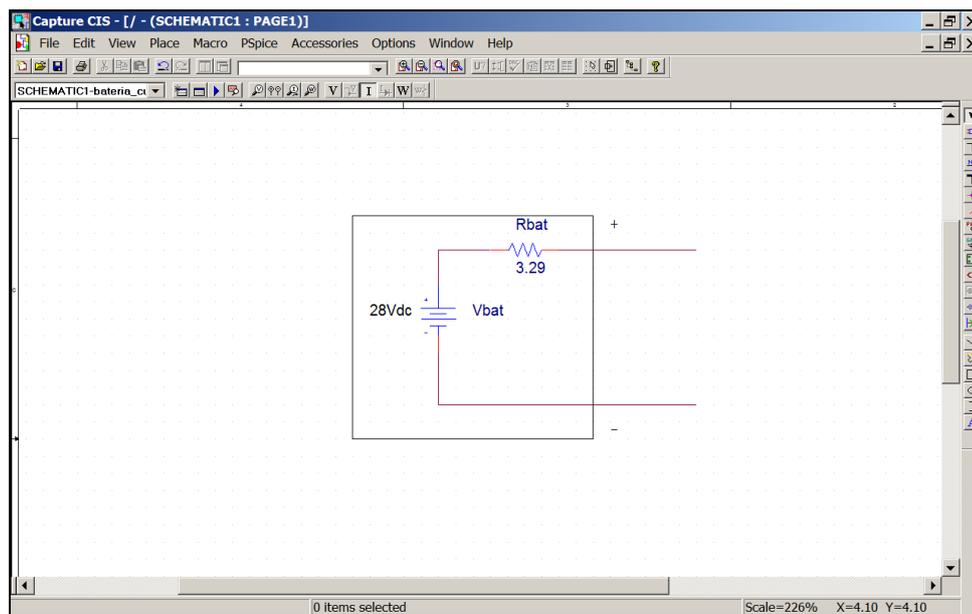


Figura 19 – Modelo elaborado para as baterias de alimentação

Na Figura 20 é apresentado o resultado da simulação quando os terminais de uma bateria de alimentação são submetidos a uma condição de curto-circuito entre seus terminais, produzindo corrente máxima de curto-circuito com valor é de 8,5A.

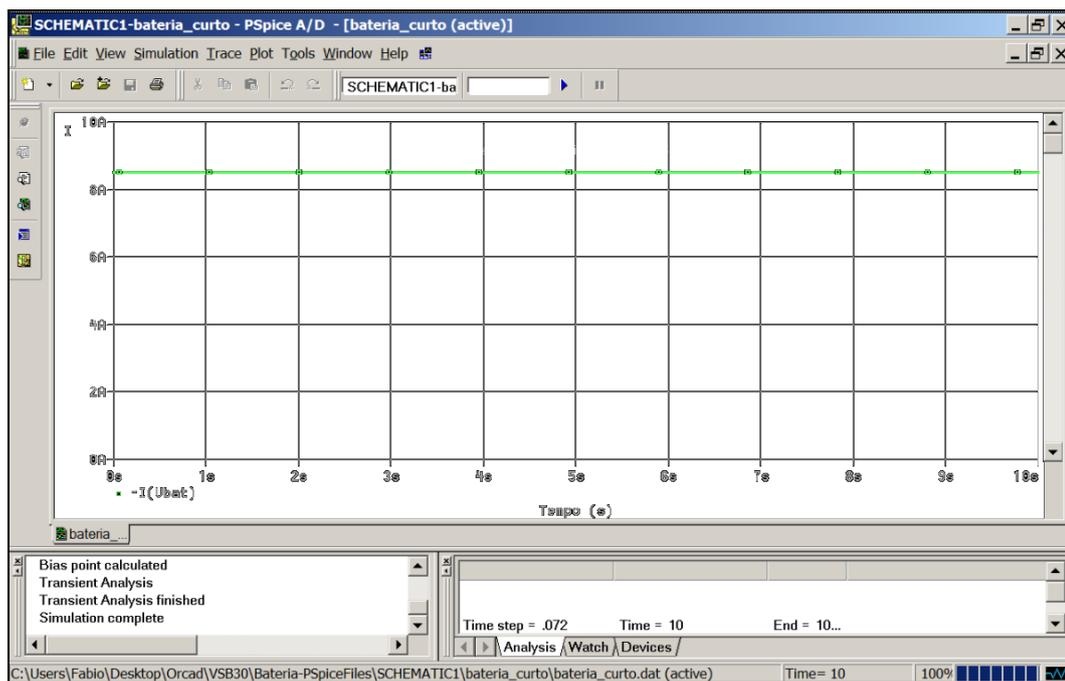


Figura 20 – Simulação da condição de curto-circuito na bateria de alimentação

### 3.3.2 Bateria de pirotécnicos

A bateria de pirotécnicos tem por função fornecer energia para o pulso de corrente (em Ampères) para a atuação dos iniciadores pirotécnicos responsáveis pela seqüência de eventos do foguete, assim como: ignição dos propulsores de rolamento, ignição do segundo estágio, separação da carga útil e liberação do sistema yo-yo (sistema de frenagem de rolamento). Nos foguetes de sondagem atualmente desenvolvidos no Instituto de Aeronáutica e Espaço são utilizadas baterias com tecnologia de células de NiMH (Níquel Metal Hidreto) para atender os circuitos pirotécnicos. A Figura 21 apresenta vista de um conjunto de células que formam uma bateria de pirotécnico.



Figura 21 – Bateria para acionamento dos pirotécnicos

A tensão nominal tipicamente definida para a bateria de pirotécnicos é de 14,4V e sua capacidade de energia de 1,7 Ah. As características de carga e descarga desse tipo de bateria são semelhantes as das baterias de NiCd, com a vantagem de possuir peso e volume menor para a mesma capacidade de energia. Assim como para as baterias de NiCd (Níquel Cádmio) o OrCAD PSpice não possui em suas bibliotecas modelos que simulem as baterias de NiMH (Níquel Metal Hidreto). A solução aqui é a mesma adotada para a bateria de alimentação, ou seja, a bateria de pirotécnicos é representada por uma fonte de tensão ideal com uma resistência em série que equivale à resistência interna da bateria. Esse modelo poderia ser representado por meio de um polinômio mais complexo a partir da curva de descarga desse tipo de bateria. Porém, optou-se pelo modelo simplificado, devido ao fato de o tempo utilização da bateria, pulsos de um segundo por ordem, ser muito menor do que o tempo de início de descarga da bateria (cinquenta minutos), onde a curva de tensão pelo tempo não está em um valor constante.

A resistência interna da bateria de pirotécnicos foi considerada de  $0,48\Omega$  com base em dados práticos obtidos em testes de laboratório.

### 3.3.3 Iniciadores pirotécnicos

O iniciador pirotécnico é definido como o primeiro componente na cadeia pirotécnica ou explosiva que tem por função transformar uma entrada de um sinal elétrico, mecânico ou térmico numa reação explosiva ou pirotécnica (MIL-HDBK-1512, 1997). Os iniciadores pirotécnicos utilizados nos foguetes de sondagem desenvolvidos pelo IAE são acionados por meio de um elemento resistivo instalado no interior do corpo do eletro-explosivo. O elemento resistivo responsável pelo acionamento do eletro-explosivo também é denominado de ponte eletro-pirotécnica, sendo o mesmo a interface entre a rede de serviço e a rede pirotécnica do foguete. A Figura 22 apresenta alguns modelos de iniciadores pirotécnicos fabricados pelo IAE atualmente.



Figura 22 – Iniciadores pirotécnicos desenvolvidos no IAE

Toda interface com a rede pirotécnica é realizada por meio da rede elétrica de serviço com a utilização do módulo de segurança, temporização e atuação (STA). Os iniciadores pirotécnicos possuem a característica elétrica de uma resistência, cujo valor é de  $1\Omega \pm 0,15\Omega$ . Para fins de simulação, um iniciador pirotécnico pode ser representado por meio de um resistor com o valor de resistência conforme anteriormente mencionado.

A corrente máxima que pode circular por um iniciador pirotécnico, sem que o mesmo seja acionado é, por requisito, de 1A durante pelo menos 5 minutos. Assim, o modelo para simulação de um iniciador pirotécnico é elaborado considerando um resistor de  $1\Omega$  e potência máxima de 1W.

Na Figura 23 é apresentado um diagrama que ilustra uma das linhas pirotécnicas do foguete de sondagem VSB-30, em sua configuração de vôo e sem a representação dos trechos internos ao módulo de segurança, temporização e atuação (STA). O sistema pirotécnico possui um zero elétrico de pirotécnicos próprio (pólo negativo da bateria de pirotécnicos), que é referenciado à massa do foguete em um único ponto, em cada linha, por meio de um resistor de  $100\text{ k}\Omega$ , o qual está instalado internamente no STA. Esse resistor tem a função principal de evitar o acúmulo de carga eletrostática nas linhas pirotécnicas.

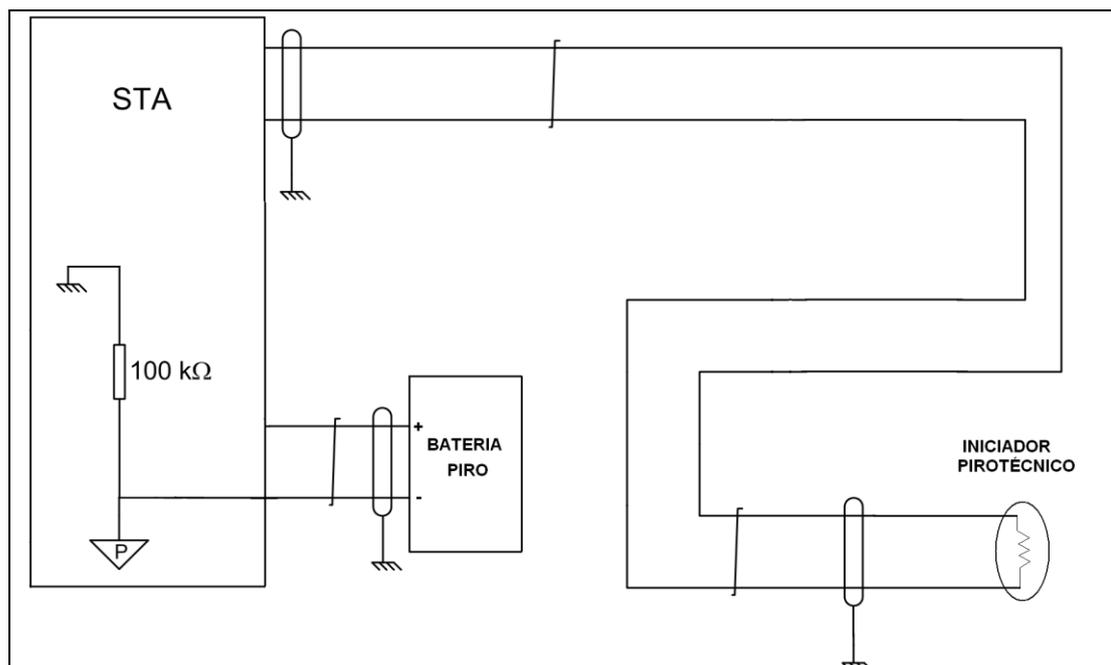


Figura 23 – Diagrama de uma das linhas pirotécnicas do VSB-30

### 3.3.4 Transdutor de pressão

Localizado no domo do motor do segundo estágio do foguete VSB-30, o transdutor de pressão tem por finalidade medir a pressão interna do motor durante o vôo. Esse dispositivo é alimentado por meio do módulo de comutação de energia (MCE) e seu sinal de saída é enviado para a rede elétrica de telemetria que os transmite para as estações de solo. A Figura 24 mostra um exemplo de transdutor utilizado em foguetes de sondagem.



Figura 24 – Transdutor de pressão da série PX5500

Os transdutores de pressão utilizados nos foguetes de sondagem VSB-30 possuem especificação para atender medidas de pressão absoluta na faixa de 0 a 1.500 psi.

A Figura 25 apresenta o gráfico de tendência explicitando valores de pressão obtidos de um transdutor de pressão durante um voo do foguete VSB-30.

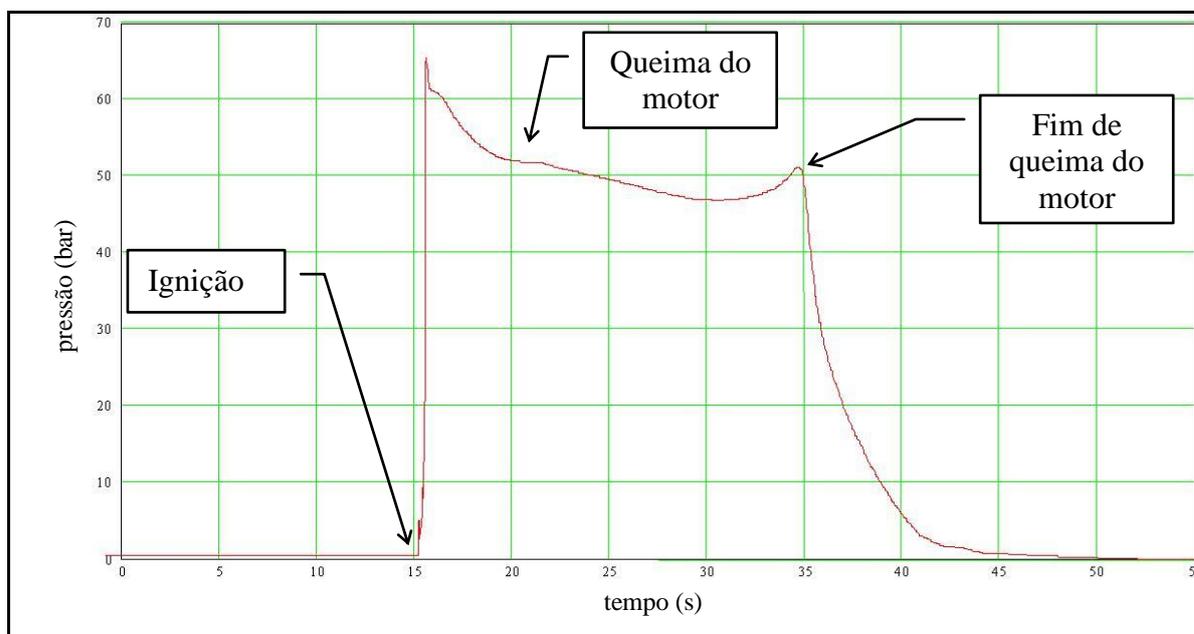


Figura 25 – Pressão interna do motor do segundo estágio do foguete VSB-30 (Ettl, 2006)

### 3.3.5 Módulo de comutação de energia

Os circuitos que formam o módulo de comutação de energia (MCE) têm por função realizar a distribuição de energia primária para os equipamentos da rede de serviço, para a rede de telemetria e para os sensores de bordo do foguete a partir das tensões das baterias de alimentação ou pelo meio das alimentações auxiliares do banco de controle.

Um comando, gerado a partir do banco de controle (BC) possibilita a comutação da alimentação entre as fontes externas desse banco e as baterias de alimentação internas do veículo. O MCE também é responsável por monitorar os valores de tensão e corrente das baterias de alimentação e fornecer esses valores à rede de telemetria. A Figura 26 apresenta uma montagem da placa de circuito impresso previsto para o módulo de comutação de energia, desenvolvido e produzido nos laboratórios do IAE para utilização em foguetes de sondagem.

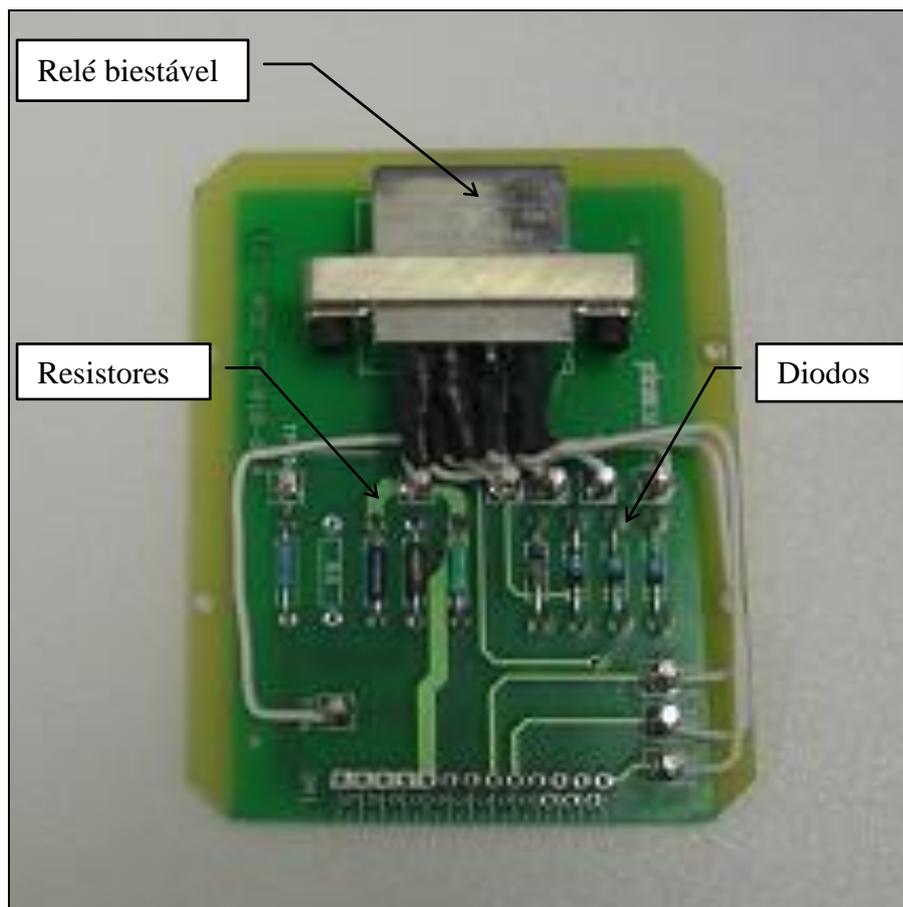


Figura 26 – Placa do módulo de comutação de energia

Na Figura 27 é apresentado o diagrama elétrico do módulo de comutação de energia (MCE), elaborado com a utilização do programa OrCAD Capture. Esse circuito utiliza os seguintes componentes eletrônicos: relé, diodos e resistores.

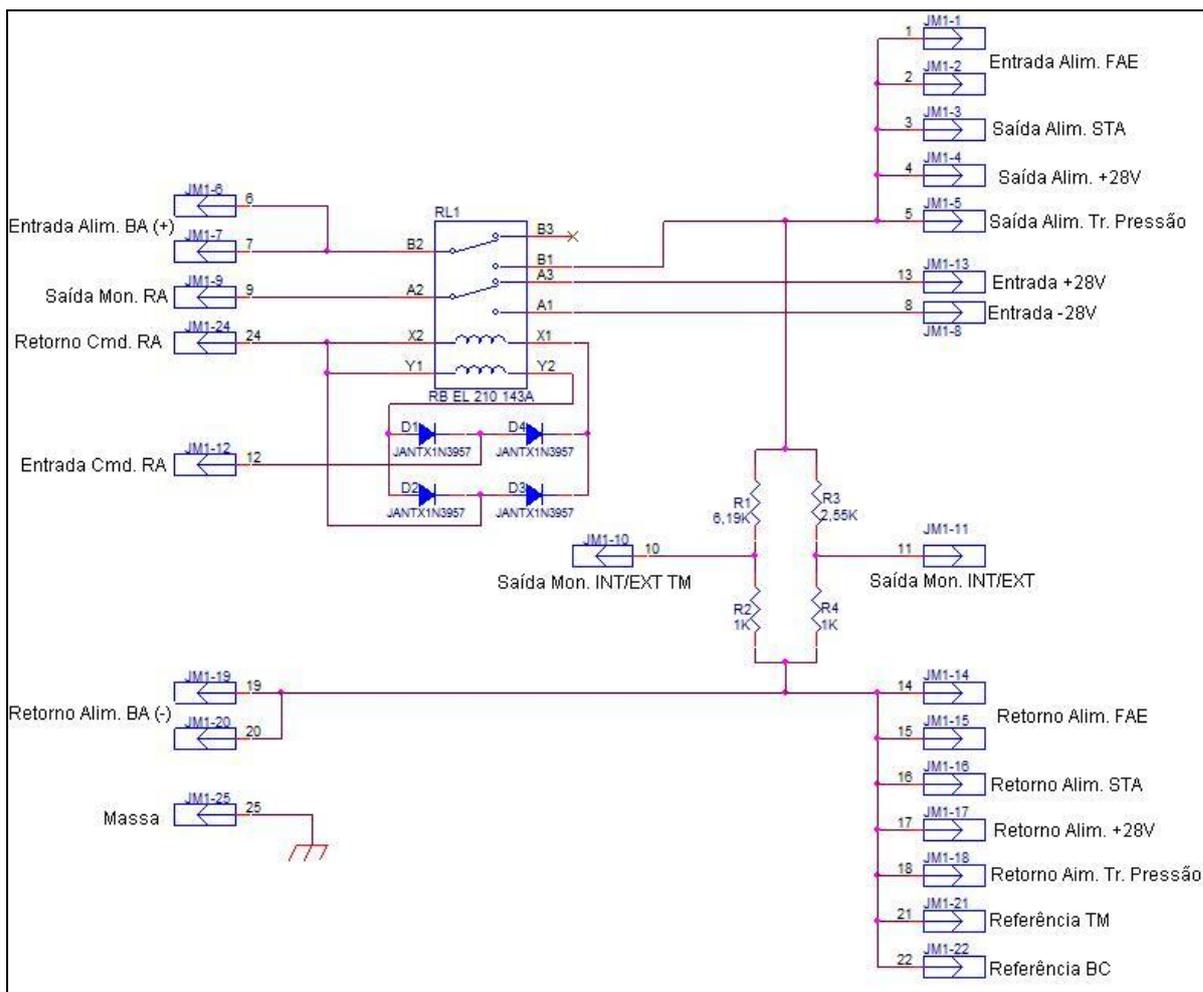


Figura 27 – Diagrama elétrico do módulo de comutação de energia (SPINA, 2008)

Os diodos<sup>8</sup> D2 e D3, representados na Figura 27, têm por função proteger o circuito contra os transitórios causados pelo chaveamento da tensão nas bobinas do relé ( $RL_1$ ), sendo que esses são colocados em paralelo e montados fisicamente o mais próximo possível das bobinas.

Os diodos D1 e D4 têm por função selecionar a bobina do relé ( $RL_1$ ) a ser energizada por meio da tensão de comando de alimentação externa proveniente das fontes do banco de controle. Assim, quando uma tensão positiva de +28V é aplicada aos terminais JM1-12 (Entrada Cmd. RA) e JM1-24 (Retorno Cmd. RA), representados na Figura 27, do módulo de comutação de energia, a alimentação do foguete, por convenção, passa a ser do tipo interna,

<sup>8</sup> Diodo: é um dispositivo ou componente eletrônico composto de material semicondutor usado como condutor unidirecional de corrente elétrica.

ou seja, por meio das baterias de bordo do mesmo. Quando uma tensão negativa de -28V é comandada pelo banco de controle o relé irá comutar seus contatos de posição e o foguete passará a operar com a alimentação externa proveniente das fontes do banco de controle (BC).

O relé RL<sub>1</sub>, representado na Figura 27, utilizado no módulo de comutação de energia é do tipo biestável, com travamento magnético. Cabe esclarecer que o relé biestável é um dispositivo eletromecânico que possui duas posições estáveis de seus contatos, também é denominado de relé por impulso. Quando o acionamento desse relé é cessado, os seus contatos permaneceram no último estado alcançado pelo mesmo.

O OrCAD PSpice não possui biblioteca com circuito equivalente para representar uma relé biestável. Um relé biestável apesar de sua complexidade eletromecânica pode ser eletricamente representado por uma chave controlada. Neste trabalho, utilizou-se uma chave de controle por tempo, uma fonte de tensão convencional e um relé de dois pólos com duas posições. Assim, os dois estados estáveis do relé são obtidos alimentando-se ou retirando-se a alimentação da bobina do relé. Tanto a fonte de alimentação como a chave controlada por tempo localiza-se fisicamente no banco de controle do veículo. A diferença entre o modelo virtual e o modelo real está, principalmente, na necessidade de se manter a alimentação da bobina do relé continuamente para que o mesmo mantenha uma das posições estáveis. Para o modelo real, essa possibilidade é obtida por meio de um pulso de corrente. O circuito utilizado para representar o modelo de simulação do relé biestável é apresentado na Figura 28.

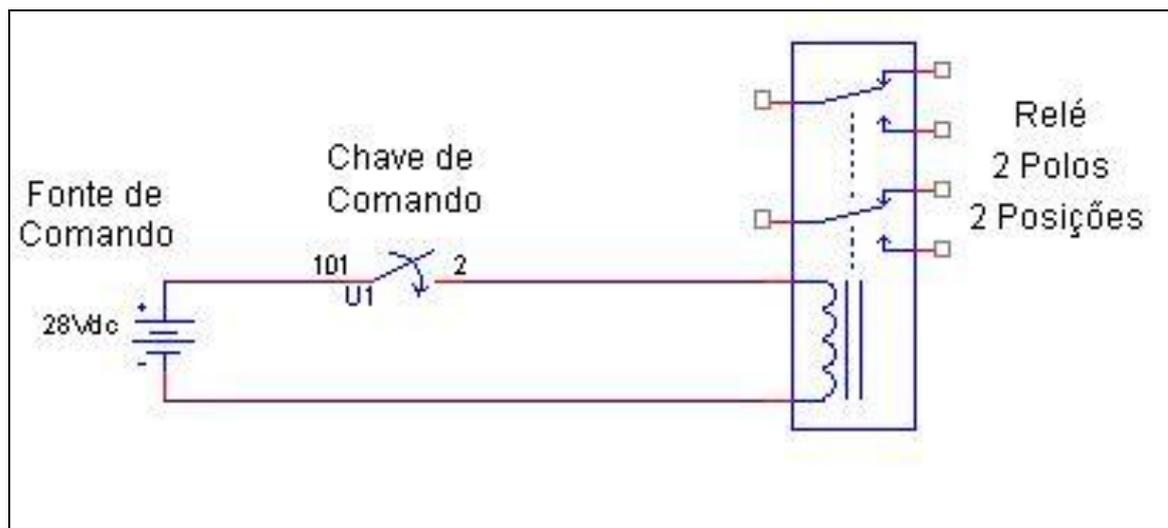


Figura 28 – Modelo para simulação do relé biestável

A partir dos modelos dos componentes elaborados e dos disponíveis nas bibliotecas do OrCAD PSpice um modelo para a simulação eletrônica do módulo de comutação de energia (MCE) foi desenvolvido. A Figura 29 apresenta o modelo elaborado para simular o MCE.

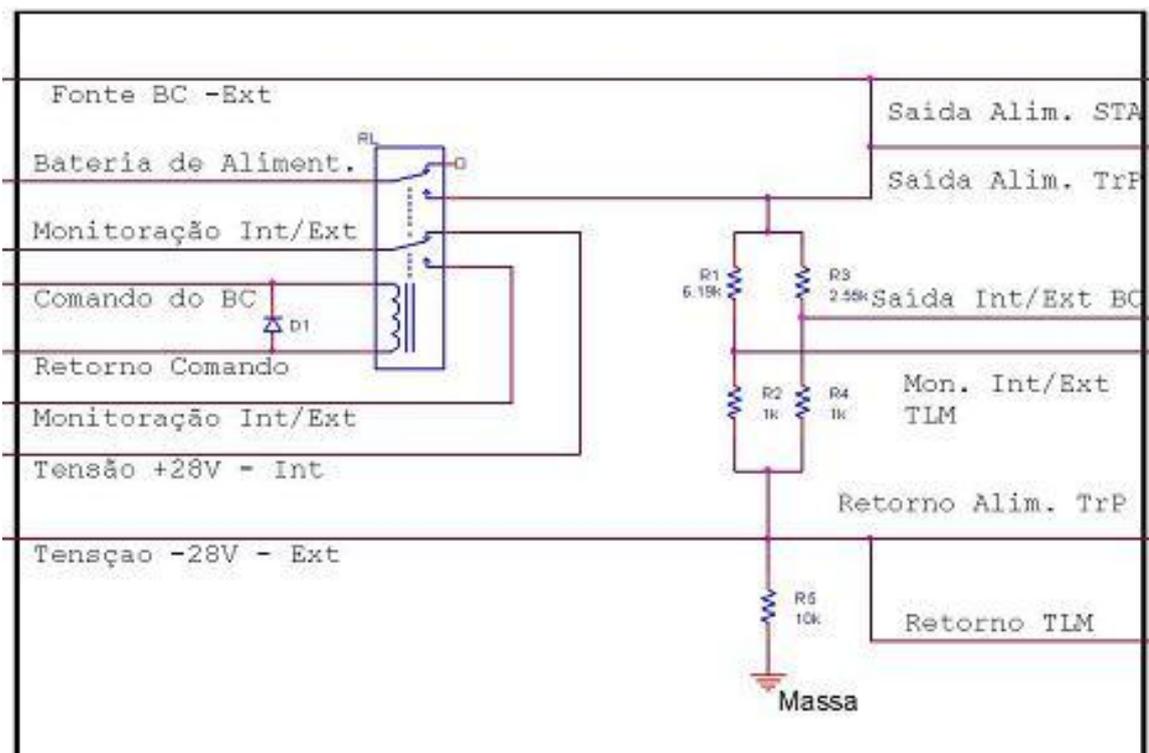


Figura 29 – Modelo para simulação do MCE

Na Figura 30 é apresentado os resultados obtidos da simulação de uma seqüência de eventos que estão relacionados com pré-vôo e vôo, por meio do módulo de comutação de energia (MCE).

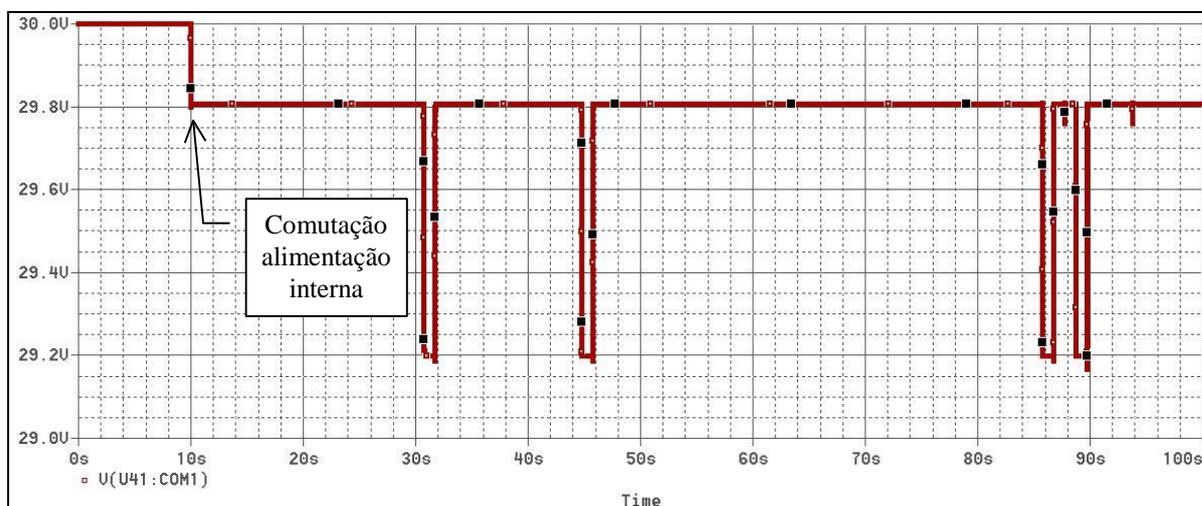


Figura 30 – Simulação da tensão da bateria de alimentação

O gráfico da Figura 30 apresenta a tensão de saída do módulo de comutação de energia (MCE) que irá alimentar os circuitos e dispositivos internos do foguete.

Na execução da seqüência, inicialmente, antes dos 10 segundos, o MCE está programado para alimentação externa. No tempo 10 segundos, o relé biestável do circuito do MCE é comandado, por meio da tensão de controle proveniente do banco de controle, +28V, para a posição de alimentação interna, e os equipamentos de bordo passam a receber energia da bateria de alimentação cujo valor de tensão é de +30V.

Na Figura 31 é apresentada a característica da corrente consumida pelos equipamentos de bordo do VSB-30, a qual é fornecida pela bateria no modo interno e pelas fontes do banco de controle no modo externo, antes e depois da comutação de energia de alimentação externa para alimentação interna pelo módulo de comutação de energia (MCE).

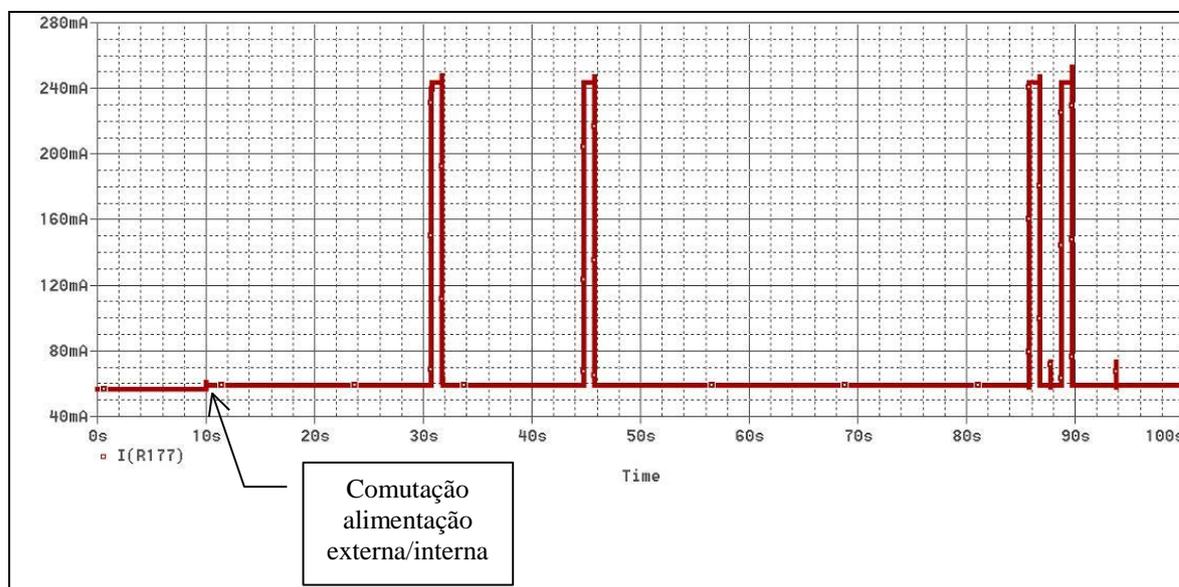


Figura 31 – Corrente consumida pelos equipamentos de bordo

Na Figura 31 pode ser observado que a corrente fornecida pela bateria de alimentação, em condições normais de operação, tem valor de 60 mA e pulsos com picos de 240 mA e

duração de 1 segundo durante o acionamento das ordens pirotécnicas. Os dados apresentados no modelo de simulação estão de acordo com os valores obtidos nos ensaios reais das redes elétricas do foguete VSB-30 (SPINA, 2007).

### 3.3.6 Módulo de segurança, temporização e atuação

Os circuitos que compoem o módulo de segurança, temporização e atuação (STA) são responsáveis pelas funções de temporização, segurança e atuação dos iniciadores pirotécnicos. A iniciação de cada pirotécnico é feita por linhas redundantes, independentes, alimentadas pela bateria de pirotécnico. Na posição denominada segurança, o STA produz curto-circuito nos terminais dos iniciadores pirotécnicos e estabelece o aterramento desse ponto do circuito por meio de uma resistência de 100 k $\Omega$  para a massa.

Quando ocorre a geração de ordem no STA um pulso de corrente adequado comanda a iniciação do eletropirotécnico. Esse pulso de corrente é limitado em 5A, com a meta de garantir a integridade do circuito que atende o eletropirotécnico. O STA também é responsável por indicar à telemetria os instantes de geração das ordens de iniciação dos eletropirotécnicos.

Na Figura 32 é apresentado o diagrama eletrônico funcional que representa o módulo de segurança, temporização e atuação (STA).

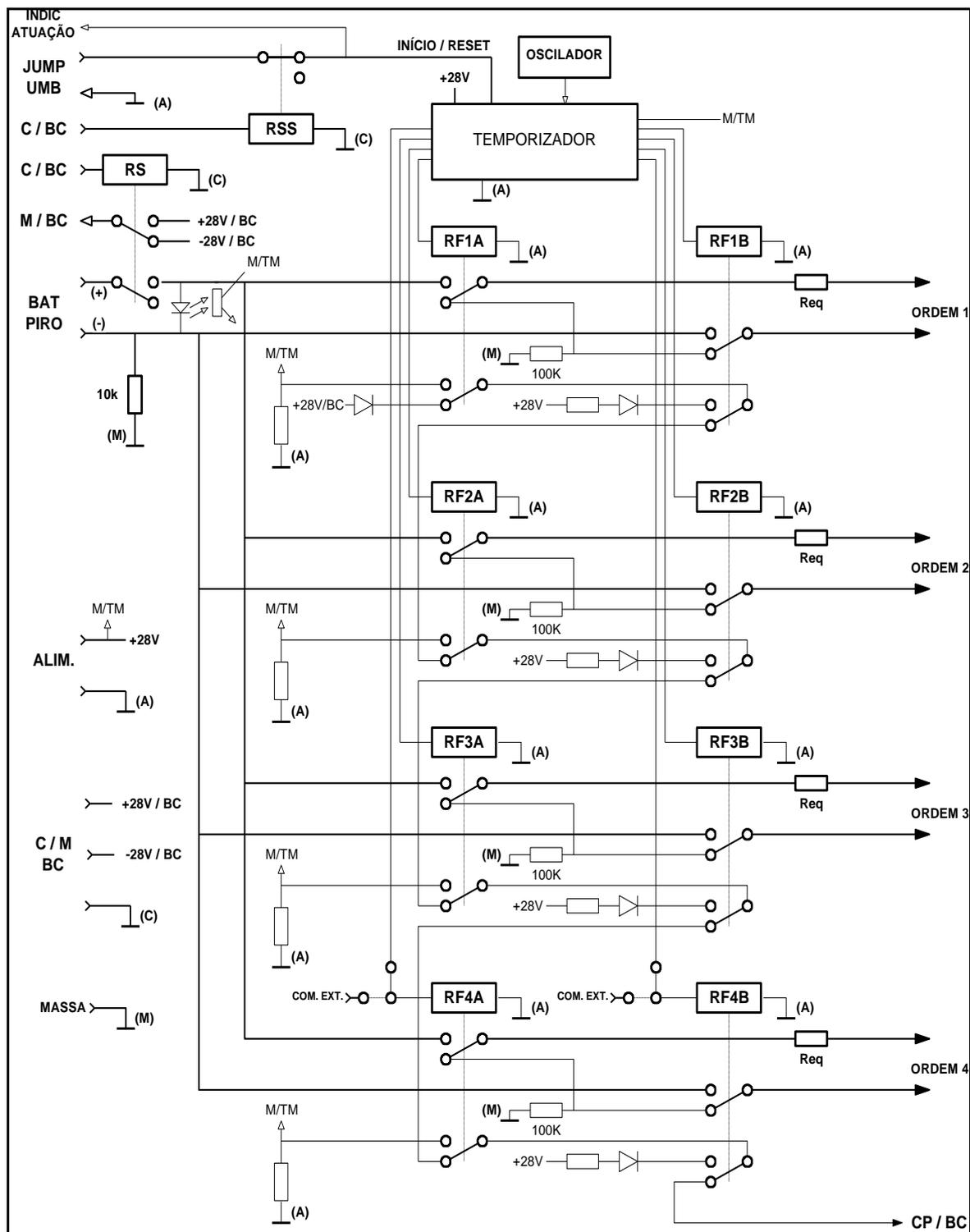


Figura 32 – Diagrama funcional do STA (SILVA, 2004)

No diagrama apresentado na Figura 32 pode-se observar, principalmente, os seguintes componentes: relé de segurança (RS), relés de linha de fogo (RF) e o temporizador.

O relé de segurança (RS) tem por função selecionar a conexão das linhas pirotécnicas entre a bateria de pirotécnico ou para a massa do veículo por meio de uma resistência de 100 k $\Omega$ . A configuração em que o relé de segurança conecta as linhas pirotécnicas à bateria é denominada de “condição ativa”. Quando as linhas pirotécnicas estão aterradas a configuração é denominada “condição passiva”. O relé de segurança é do tipo biestável com travamento magnético, suas características elétricas são idênticas ao relé biestável RL1 utilizado no módulo de comutação de energia (MCE).

O modelo eletrônico para simulação do relé de segurança adotado é o mesmo apresentado anteriormente para o relé RL<sub>1</sub> do módulo de comutação de energia (MCE).

Os relés das linhas de fogo são do tipo dois pólos e duas posições. Para representar esse tipo de relé o OrCAD PSpice possui em suas bibliotecas um modelo de relé que tem características elétricas adequadas ao modelo de relé utilizado no STA. A adequação das características elétricas do modelo virtual do componente é realizada por meio de um utilitário do OrCAD PSpice denominado editor de modelos. Com a utilização desse utilitário é possível alterar as principais características elétricas do modelo do componente a fim de que o mesmo possa efetivamente representar o componente a ser simulado. Na Figura 33 é apresentado um exemplo da tela do editor de modelos do OrCAD Pspice, quando da edição das características elétricas do relé da linha de fogo.

```

* end of relay models
.subckt RELAY_DPDT_BHV coila coilb no1 nc1 com1 no2 nc2 com2
+ PARAMS:
+ T_make = 10mSec ; Time for contact to close when current is turned off/on
+ T_break= 10mSec ; Time for contact to open when current is turned off/on
+ I_pull = 50ma ; Pull-in current
+ I_drop = 35ma ; Drop-out current
+ R_coil = 320 ; Coil resistance
+ L_coil = 5mH ; Coil inductance
+ R_open = 500MEG ; open circuit contact resistance
+ R_close= 0 ; closed circuit contact resistance
+ Contact_match = 1 ; matching of contact make/break/bounce times: 1 = exact
* electrical model of coil
v_winding coila a1 0
r_winding a1 a2 {R_coil}
l_winding a2 coilb {L_coil}
* make a voltage from the current
e_cc cc 0 value = {limit(I(v_winding),-3*I_pull,3*I_pull)}
r_cc cc 0 1k
* use digital to create a switch with hysteresis
o_mag cc 0 relay_1 DGTNET=d digio_1
* by using min/max delay we can use a single N-device to simulate both
* the no and nc contacts.
u_dly1 buf dpwr dgnd d cnt1 relay_2a digio_1 MNTYMXDLY=4
u_dly2 buf dpwr dgnd d cnt2 relay_2b digio_1 MNTYMXDLY=4
n_cnt1 com1 no1 nc1 relay_3 DGTNET=cnt1 digio_1
n_cnt2 com2 no2 nc2 relay_3 DGTNET=cnt2 digio_1
.model relay_1 doutput (
+ s0name="0" s0vlo=(-I_pull) s0vhi={I_pull}
+ s1name="1" s1vlo={I_drop} s1vhi={4*I_pull}
+ s2name="1" s2vlo=(-4*I_pull) s2vhi=(-I_drop)
)

```

Figura 33 – Tela do editor de modelos do OrCAD PSpice para o relé da linha de fogo

O temporizador, apresentado na Figura 35, é responsável por gerar os sinais relacionados com as ordens pirotécnicas de acordo com a seqüência de eventos prevista para o voo do foguete. Esse subsistema é formado por um divisor de frequência, contador e bloco de memória.

O divisor de frequência tem por função receber o sinal gerado por meio de um circuito oscilador a cristal e efetuar as divisões necessárias a fim de se obter a base de tempo adequada e com precisão especificada para o funcionamento do sistema.

O contador é um circuito que executa a varredura do bloco de memória onde estão armazenados os tempos em que devem ocorrer os eventos de voo do foguete.



movimento do foguete em relação a rampa de lançamento no momento da ignição do motor do primeiro estágio do veículo.

O modelo de simulação do temporizador é representado por meio de um gerador de sinal digital ligado a um contador e pelo bloco de memória. A Figura 35 apresenta o modelo para simulação elaborado para o mencionado temporizador.

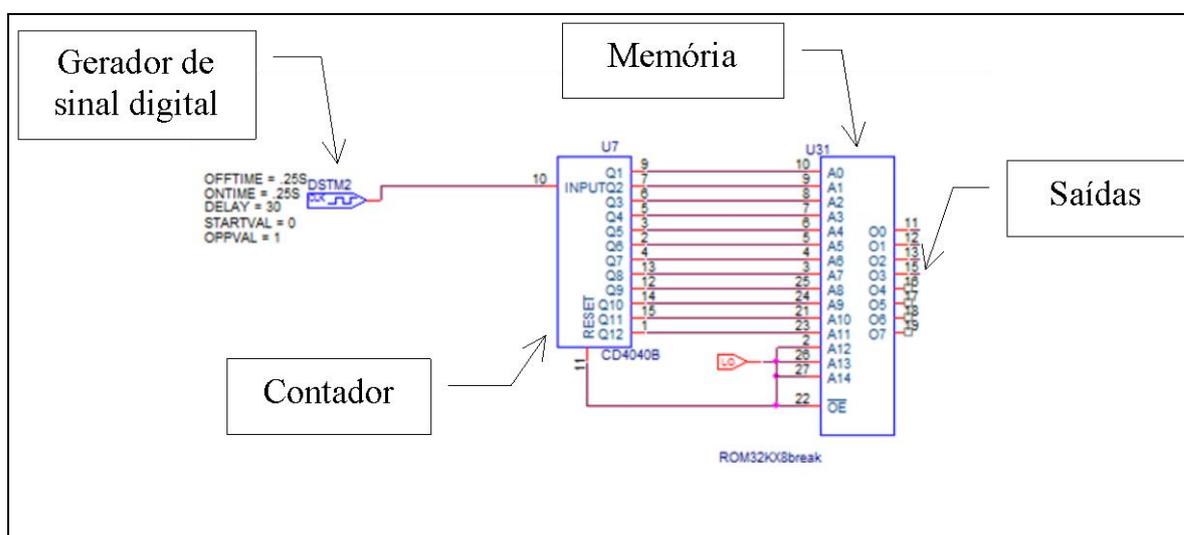


Figura 35 – Modelo para simulação do temporizador

Na Figura 36 é apresentado o modelo completo do módulo de segurança, temporização e atuação (STA), com todos seus componentes integrados.

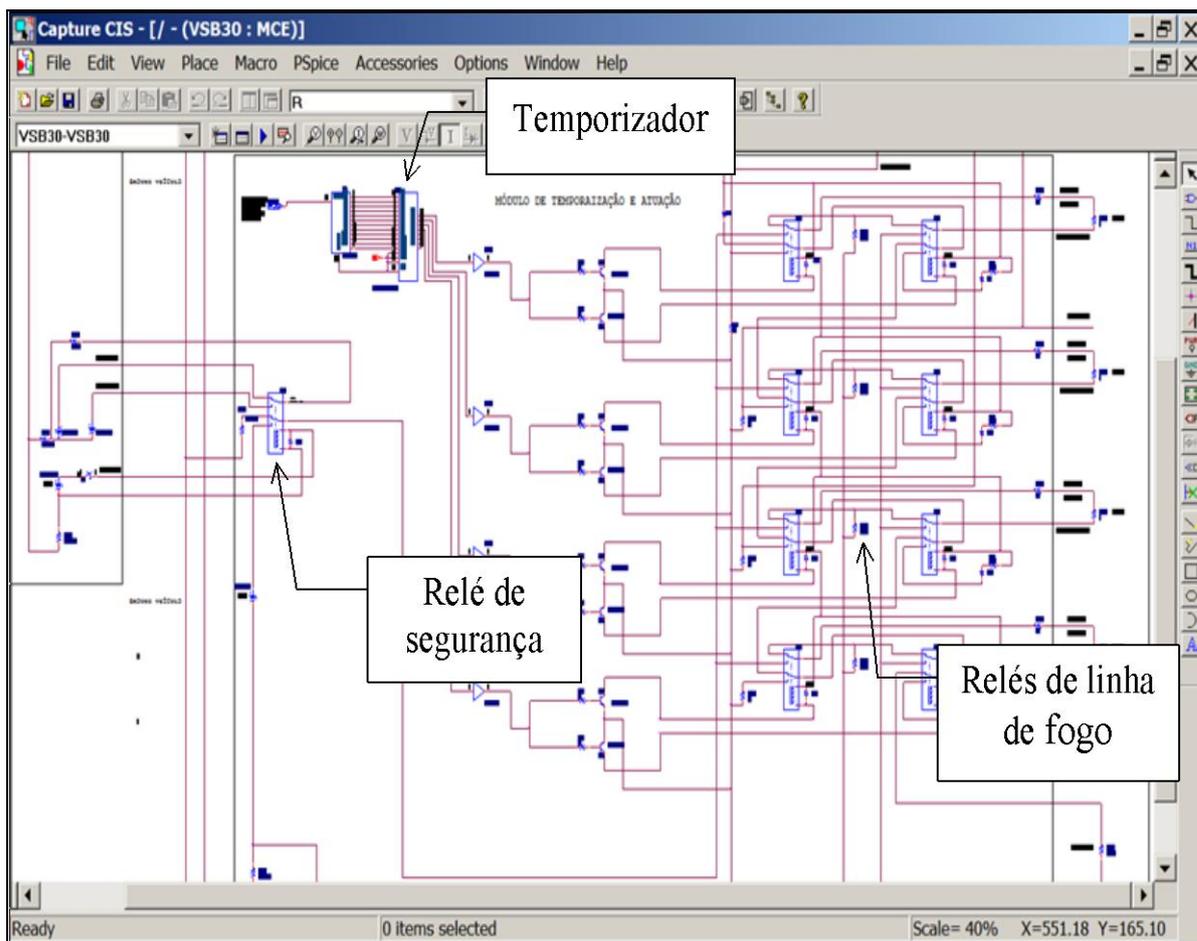


Figura 36 – Modelo elaborado para simular o STA

### 3.3.7 Modelo para simulação da rede elétrica de serviço

O modelo completo para simulação da rede elétrica de serviço consiste nos vários módulos desenvolvidos para simulação integrada e considerando as interfaces. Essas interfaces estão relacionadas com a rede elétrica de telemetria e o banco de controle.

A Figura 37 apresenta o modelo completo elaborado para a simular a rede elétrica de serviço e suas interfaces. Nessa figura podem ser observados todos os blocos desenvolvidos e suas interfaces com a rede elétrica de telemetria e com o banco de controle.

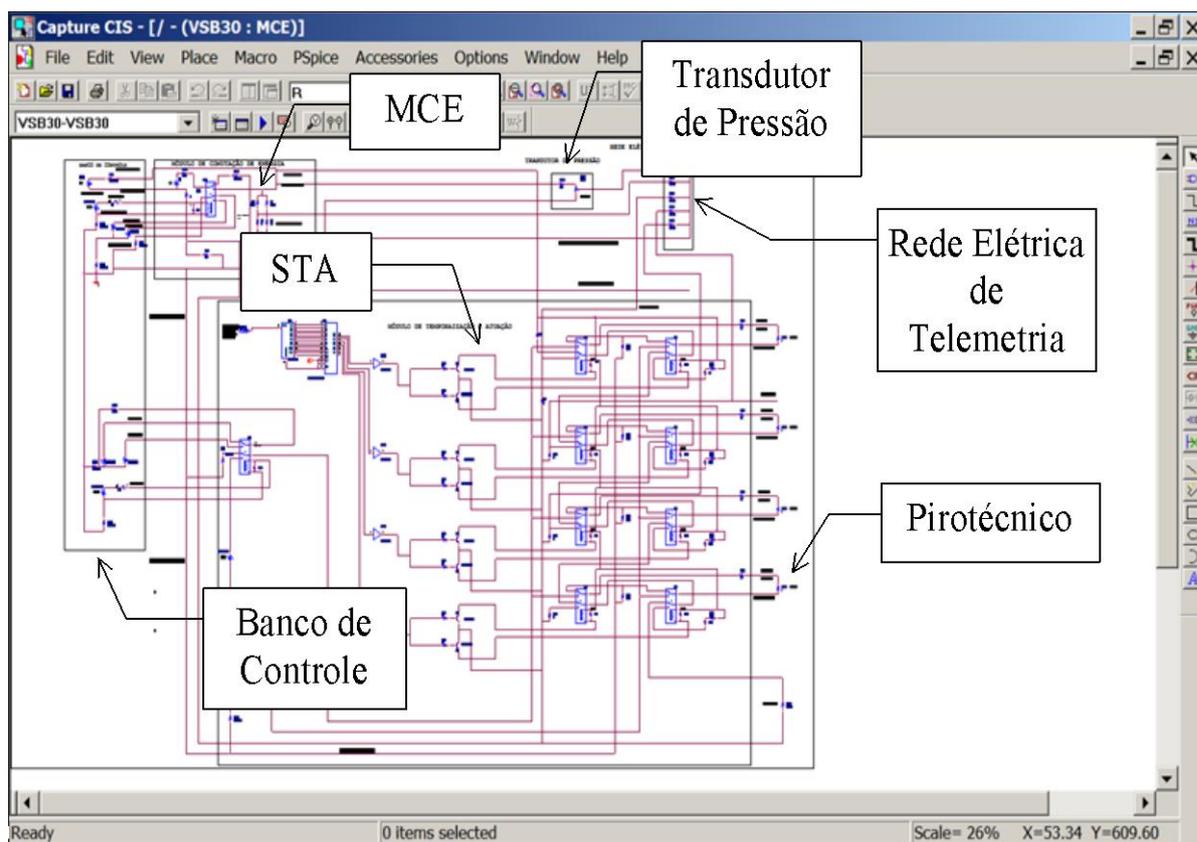


Figura 37 – Modelo completo de simulação da rede elétrica de serviço e suas interfaces

### 3.4 Simulações realizadas

O modelo completo da rede elétrica de serviço é simulado em condições normais de operação e sob condição de falta, considerando-se diferentes configurações para o esquema de aterramento utilizado.

### 3.4.1 Simulação em condições normais de operação em IT

Esta primeira simulação é apresentada com a meta principal de servir como referência para analisar os demais resultados que serão obtidos durante a realização de outras simulações que envolvem diferentes condições de operação do sistema em IT.

Para análise do desempenho do modelo em condição normal de operação uma simulação é realizada durante os 100 segundos iniciais que envolvem o pré-lançamento e voo do foguete com a seguinte seqüência de eventos:

**0 segundo** - Início da simulação.

**10 segundos** - Alimentação é comutada de externa para interna.

**20 segundos** - Linhas pirotécnicas são comutadas da condição passiva para ativa.

**31 segundos** - Ignição do motor primeiro estágio do foguete e ignição do sistema de rolamento.

**46 segundos** - Ignição do segundo estágio do foguete.

**86 segundos** - Acionamento do sistema yo-yo.

**89 segundos** - Separação da carga útil.

Na Figura 38 é apresentado o gráfico com o comportamento da tensão de alimentação de bordo, destacando-se o instante em que ocorre a comutação entre a alimentação externa vinda do banco de controle e a alimentação interna proveniente da bateria de alimentação, evento que ocorre no tempo de 10 segundos.

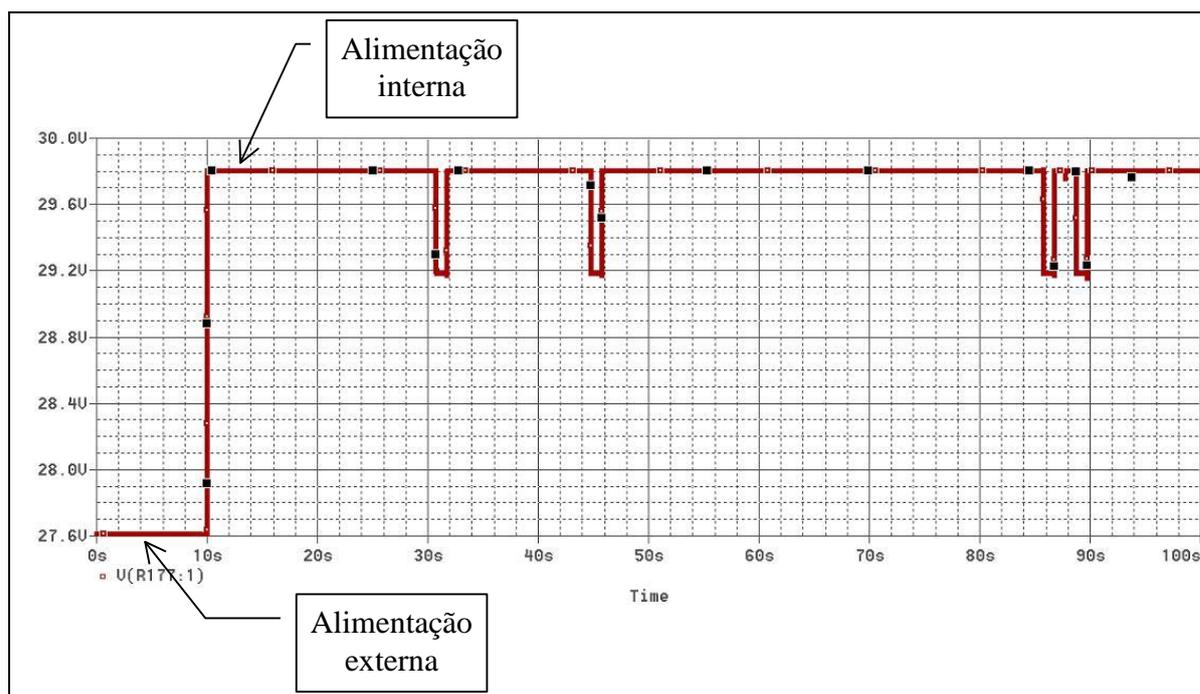


Figura 38 – Tensão de alimentação de bordo em operação normal em IT

A Figura 39 apresenta o gráfico da corrente de alimentação de bordo, mostrando que o consumo de corrente varia de acordo com a fase do vôo do foguete.

Durante a fase de alimentação externa o consumo de corrente é de 57 mA e quando ocorre a comutação para a alimentação interna seu valor passa a ser de 59 mA. Essa diferença se deve ao fato dos valores das alimentações não estarem exatamente no mesmo nível de tensão. A bateria de alimentação, normalmente, tem um valor de tensão mais elevado com relação as fontes do banco de controle. Durante a ocorrência dos eventos de vôo, o consumo passa a ser de 243 mA, em pulsos com duração de um segundo.

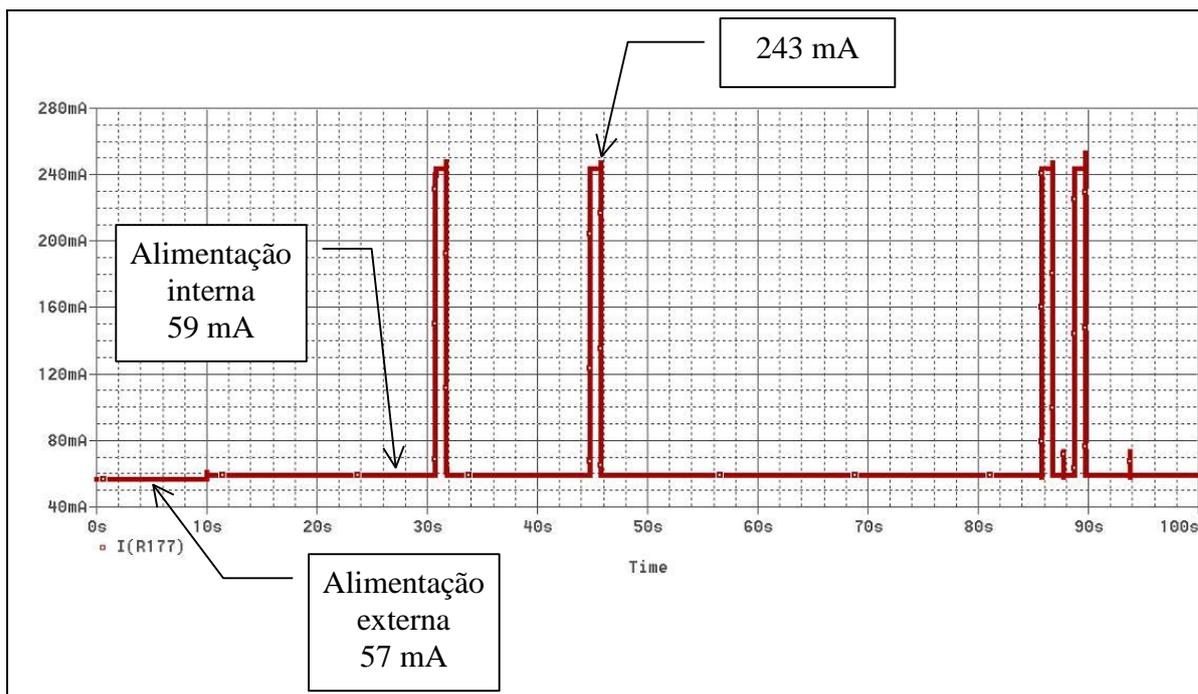


Figura 39 – Corrente de alimentação de bordo em operação normal em IT

A Figura 40 mostra os pulsos de tensão fornecidos pelo módulo de segurança, temporização e atuação (STA) para o acionamento dos eletropirotécnicos. Esses pulsos ocorrem de acordo com a programação definida pelo bloco de memória do módulo de segurança, temporização e atuação (STA) para que os eventos de vôo ocorram como previsto pela missão.

Os valores de tensão para esse acionamento são limitados por meio de um resistor de equalização, colocado em série com cada elemento eletropirotécnico, de modo a limitar sua corrente de acionamento em 5 A.

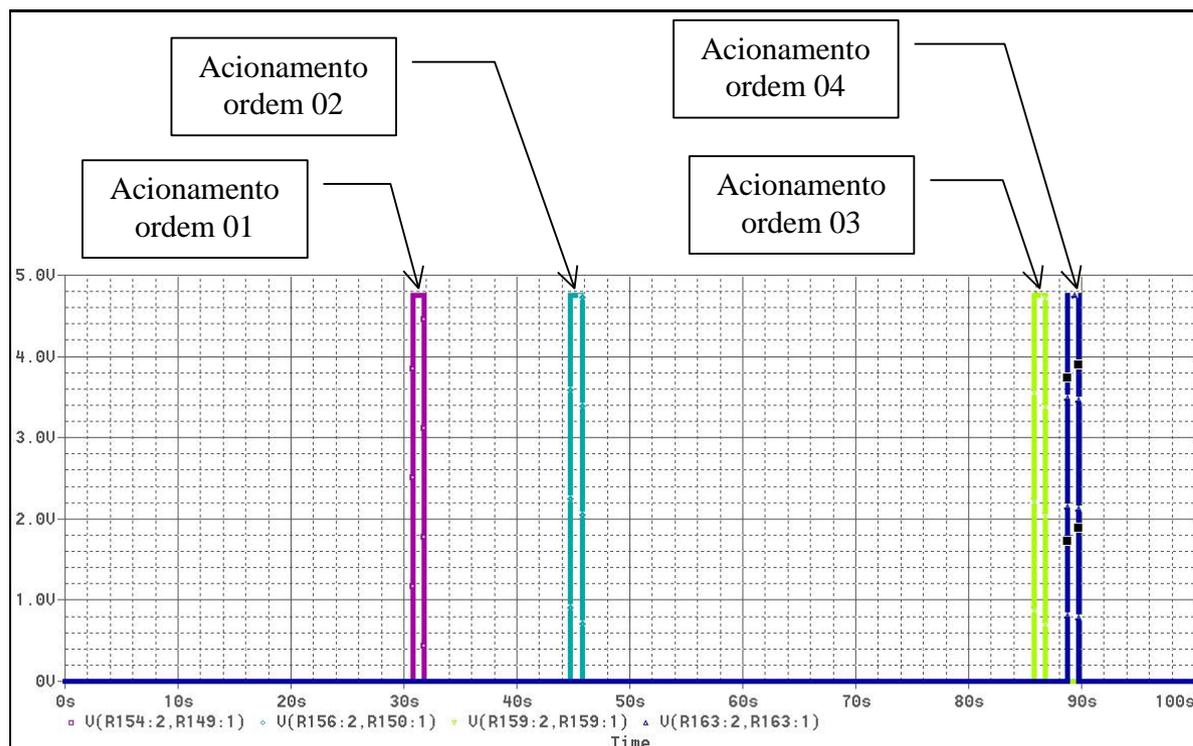


Figura 40 – Pulsos de acionamento dos pirotécnicos em condição normal em IT

Os valores obtidos na simulação dos pulsos de acionamento dos eletropirotécnicos podem ser comparados com os dados de vôo que são apresentados na Figura 41. Esses dados foram obtidos por meio de telemetria, durante o vôo do VSB-30 V02, carga útil Texas 42. Nessa figura, pode ser observado também que os eventos de ignição do segundo estágio ocorrem aos 15 segundos e o acionamento do sistema yo-yo aos 56 segundos.

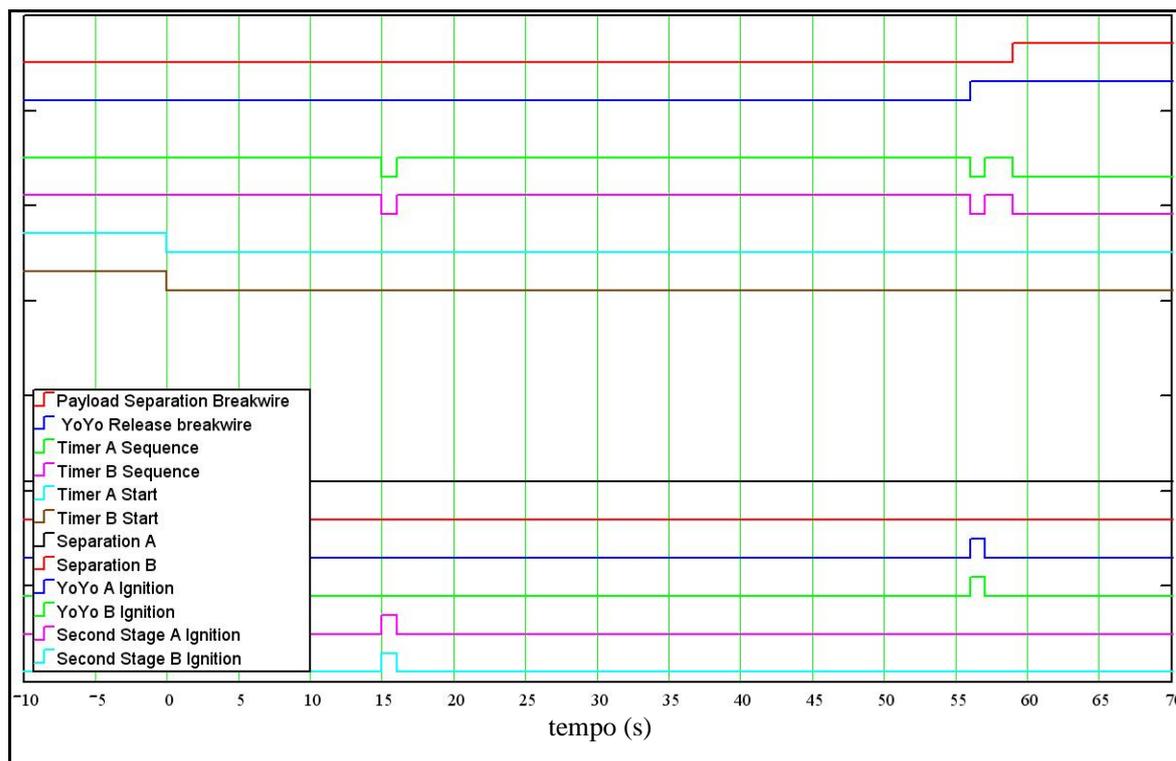


Figura 41 – Seqüência de eventos de vôo do VSB-30 V02 (ETTL, 2006)

A Figura 42 apresenta os dados de vôo do VSB-30, obtidos pela telemetria, relacionados com o comportamento da tensão de alimentação de bordo (Ettl, 2006). Nessa figura, pode ser observado que a tensão de alimentação permanece constante durante todo o período de aquisição dos dados, com pequena queda de tensão durante o acionamento dos eventos de vôo.

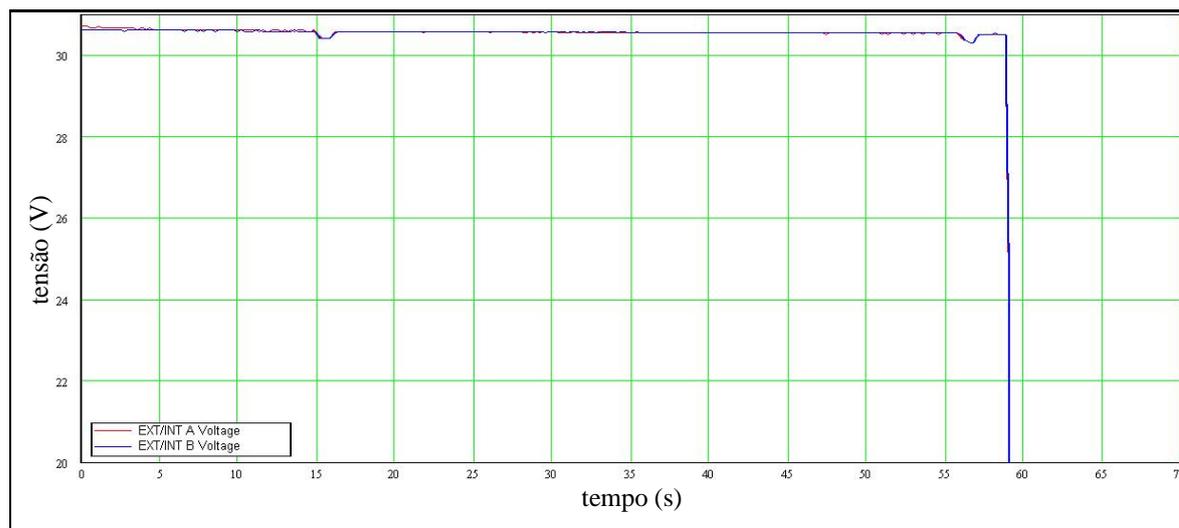


Figura 42 – Tensão de alimentação de bordo no voo do VSB-30 V02 (ETTLL, 2006)

### 3.4.2 Simulação em condições normais de operação em TN-S

Esta simulação é apresentada com a meta principal de servir como referência para analisar os demais resultados que serão obtidos durante a realização de outras simulações que envolvem diferentes condições de operação do sistema em TN-S.

Na Figura 43 é apresentado o gráfico com o comportamento da tensão de alimentação de bordo, em TN-S que em condições normais de operação tem semelhante comportamento do sistema em IT, como pode ser observado na Figura 38.

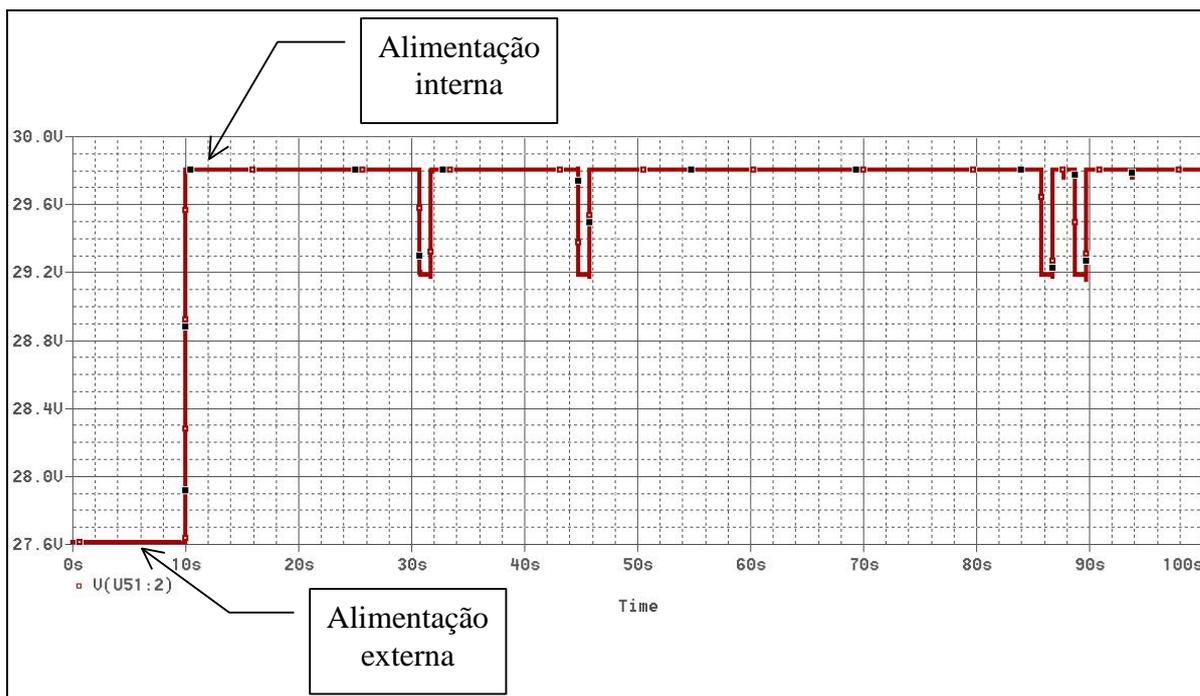


Figura 43 – Tensão de alimentação de bordo em operação normal em TN-S

A Figura 44 apresenta o gráfico da corrente de alimentação de bordo em TN-S, em condição normal de operação, mostrando que o consumo de corrente varia do mesmo modo do o sistema operando em IT.

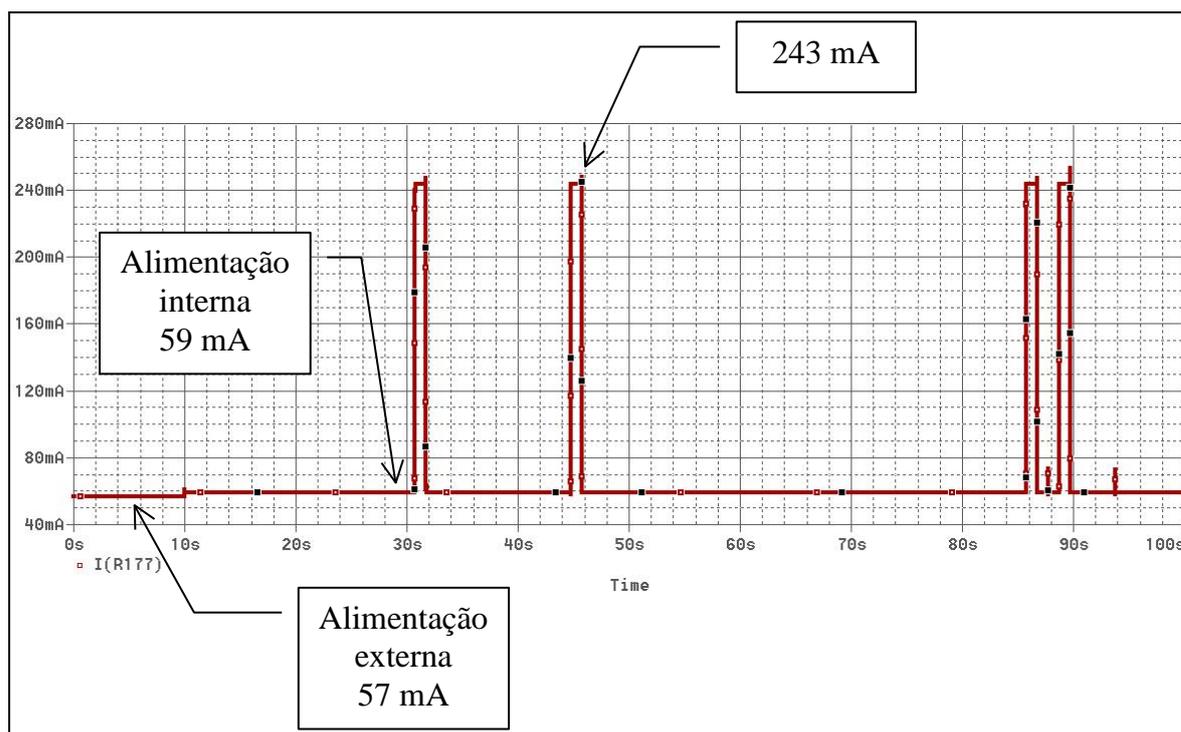


Figura 44 – Corrente de bordo em operação normal em TN-S

A Figura 45 mostra os pulsos de tensão fornecidos pelo módulo de segurança, temporização e atuação (STA) para o acionamento dos eletropirotécnicos em operação normal em TN-S. Esses pulsos ocorrem de acordo com a programação definida pelo bloco de memória do módulo de segurança, temporização e atuação (STA) para que os eventos de vôo ocorram como previsto pela missão.

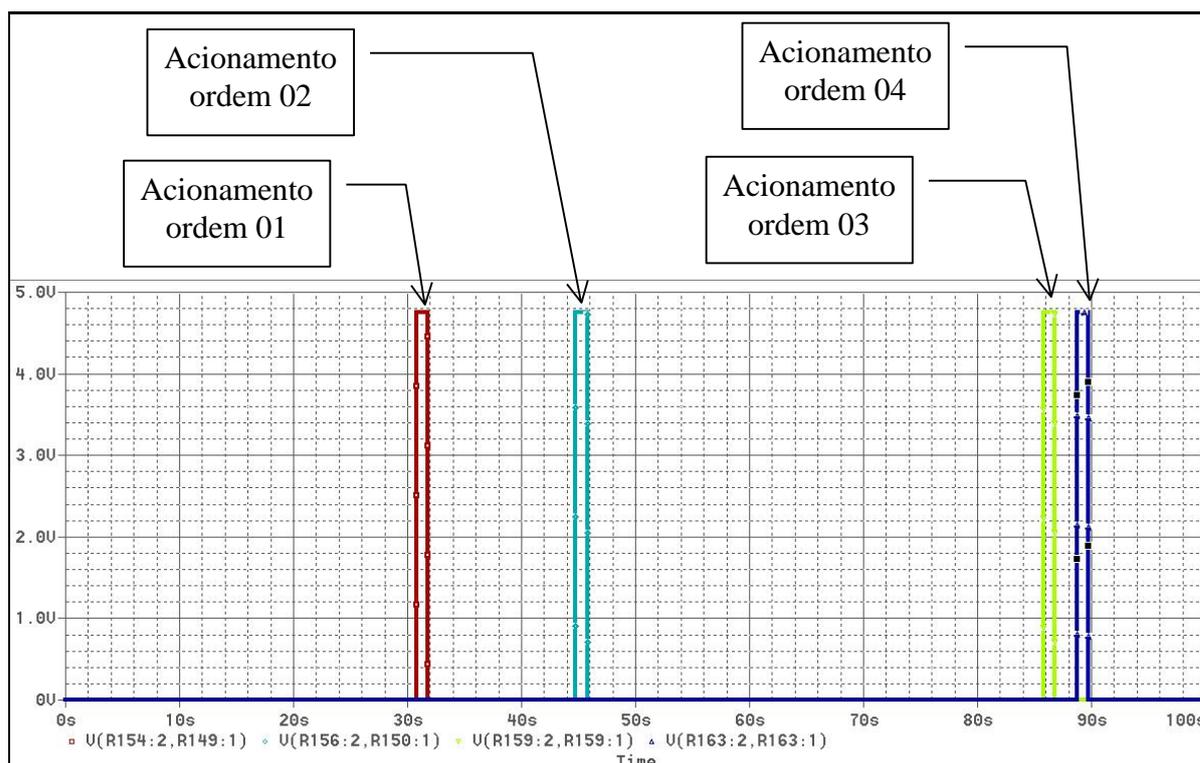


Figura 45 – Pulsos de acionamento dos pirotécnicos em operação normal em TN-S

### 3.4.3 Esquema IT em condição de falta

O modelo desenvolvido, que representa a rede elétrica de serviço e suas interfaces, é submetido a simulação com a adoção do esquema de aterramento IT. Nesse esquema de aterramento não há nenhum ponto da alimentação diretamente aterrado. O pólo negativo da bateria de alimentação é conectado a massa do veículo por meio de uma resistência de 10 k $\Omega$ . Nessa situação, é simulada a ocorrência de uma falta da linha positiva da bateria de alimentação para terra no tempo 15 segundos. Nesse contexto, cabe mencionar que estatisticamente a falta que mais ocorre em sistemas elétricos, independentemente do esquema de aterramento adotado, é a falta da fase para massa (KINDERMANN, 1992).

Na Figura 46 é apresentado o gráfico da tensão de alimentação de bordo com a ocorrência da falta. Observa-se que a tensão se mantém praticamente constante e não sofre variações significativas que possam indicar uma possível falha do sistema. Nesse gráfico, é verificado que o comportamento da tensão de alimentação é praticamente o mesmo do apresentado na Figura 38, o qual apresenta a tensão de alimentação de bordo quando não há a ocorrência de falta.

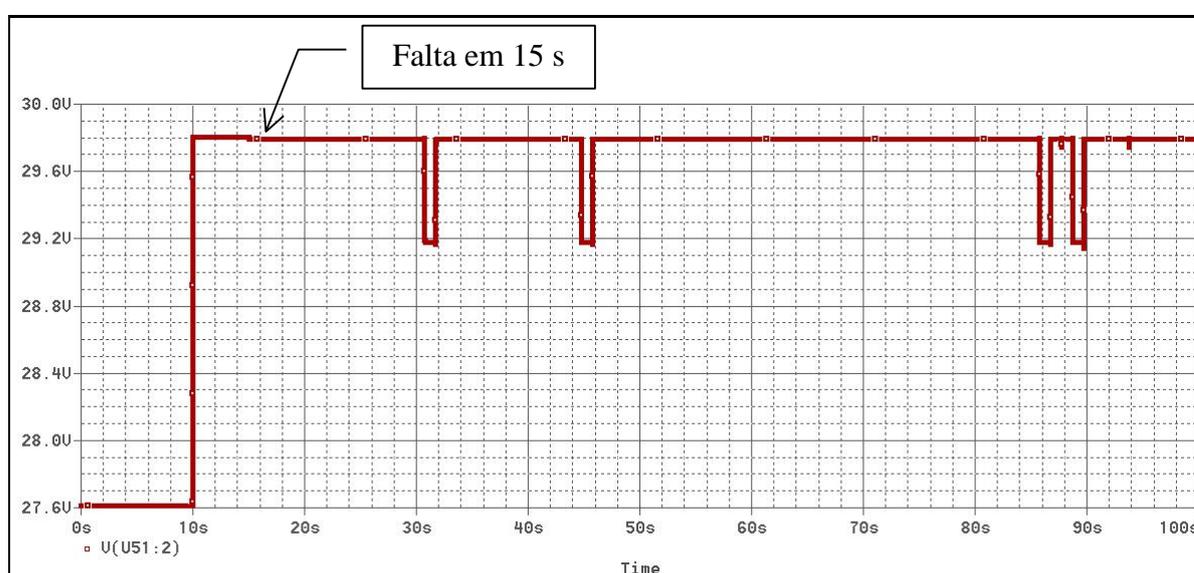


Figura 46 – Tensão de alimentação no esquema IT sob condição de falta

Na Figura 47 é apresentada a corrente de bordo com a ocorrência da falta monofásica para a massa. O comportamento do sistema mostra um pequeno aumento do consumo de corrente após a falta, sendo que essa é limitada pela resistência entre a massa e o pólo negativo da bateria de alimentação conforme previsto no esquema de aterramento IT. A diferença de consumo torna-se insignificante não inviabilizando o funcionamento das redes elétricas com exceção do circuito submetido a falta.

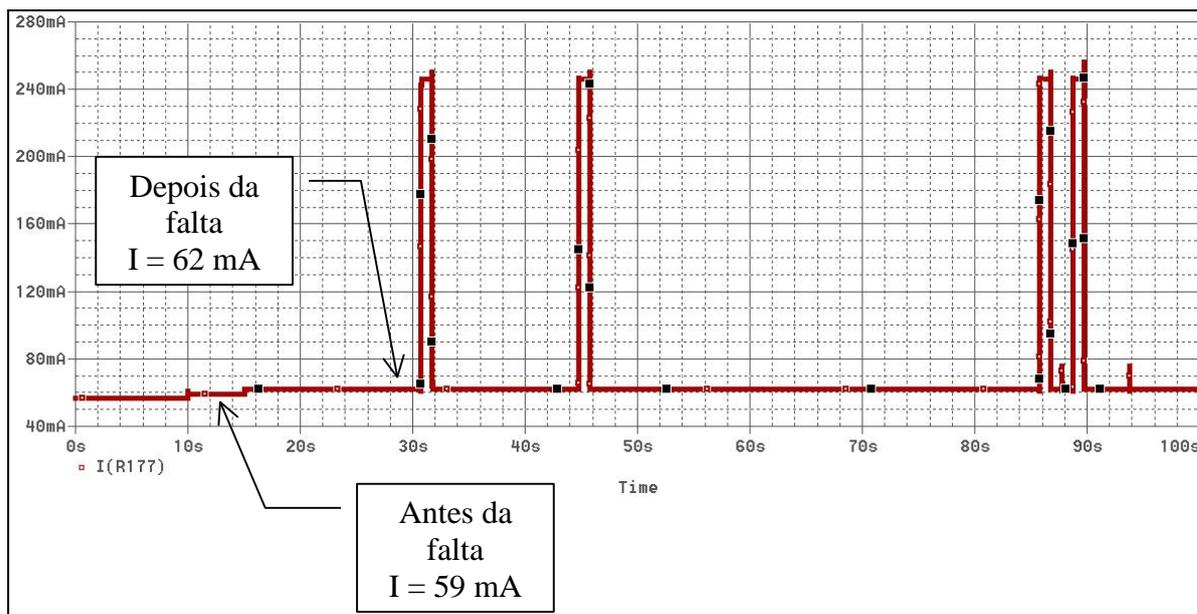


Figura 47 – Corrente de alimentação no esquema IT sob condição de falta

A Figura 48 apresenta a seqüência de eventos de vôo do foguete quando da ocorrência da falta. Os pulsos de acionamento dos eletropirotécnicos ocorrem da maneira programada não comprometendo a missão.

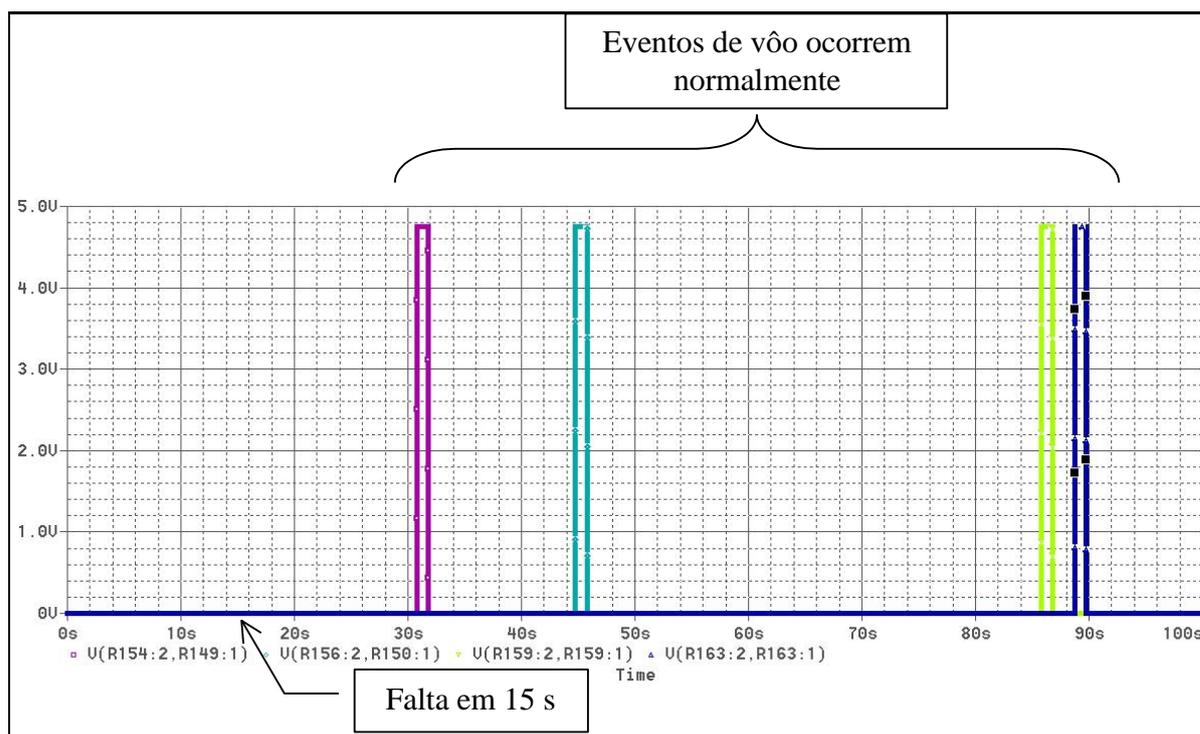


Figura 48 – Sequência de eventos no esquema IT sob condição de falta

Conforme pode ser observado nos resultados obtidos nas simulações, quando da utilização do esquema de aterramento IT, a soma das resistências no caminho da falta resulta em valor elevado. Assim, a corrente de alimentação não sofre variação significativa em seu valor, podendo suprir esse aumento de consumo sem afetar o sistema elétrico.

Devido às características do esquema de aterramento IT a primeira falta que envolve a linha de alimentação para massa não causa interrupção na seqüência de eventos do foguete, como pode ser observado na Figura 48. Nesse contexto, dentre os esquemas de aterramento convencionais o IT é o único que não necessita interromper o fornecimento de energia para o circuito quando submetido à primeira falta para massa (BIZARRIA; BIZARRIA; SPINA, 2009).

A ocorrência de uma segunda falta no Esquema de Aterramento IT deve ser evitada ou ter seus efeitos limitados por meio de proteção contra as sobrecorrentes.

#### 3.4.4 Esquema TN-S em condição de falta

Neste esquema de aterramento, a linha de retorno da bateria de alimentação tem um ponto diretamente aterrado para a massa do foguete e utiliza condutores separados para o condutor de proteção (PE) e o retorno da bateria de alimentação.

O modelo de simulação da rede elétrica de serviço e suas interfaces são colocados sob operação no esquema de aterramento TN-S, com a conexão do terminal negativo da bateria de alimentação com a massa do foguete. Nessa condição é simulada uma falta da linha positiva da bateria de alimentação diretamente para a massa do veículo que está conectada ao condutor de proteção, após os 5 segundos de vôo do foguete.

A Figura 49 apresenta o gráficos da tensão de alimentação, antes e após a ocorrência da falta. Após a ocorrência da falta a tensão de alimentação é interrompida. Observa-se que seu valor vai praticamente a zero volts.

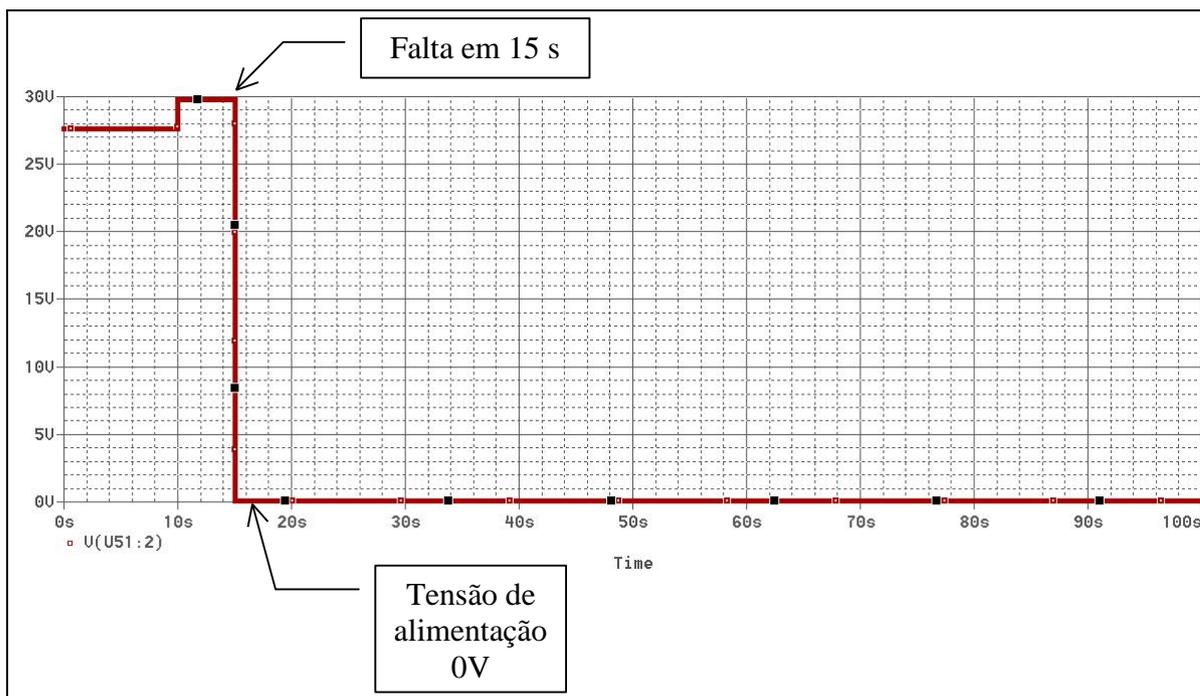


Figura 49 – Tensão de alimentação no esquema TN-S sob condição de falta

A Figura 50 apresenta os efeitos causados pela falta na corrente de alimentação quando o sistema adota o esquema TN-S. Após a ocorrência da falta é produzida a corrente de curto-circuito com um valor de 8,9 A.

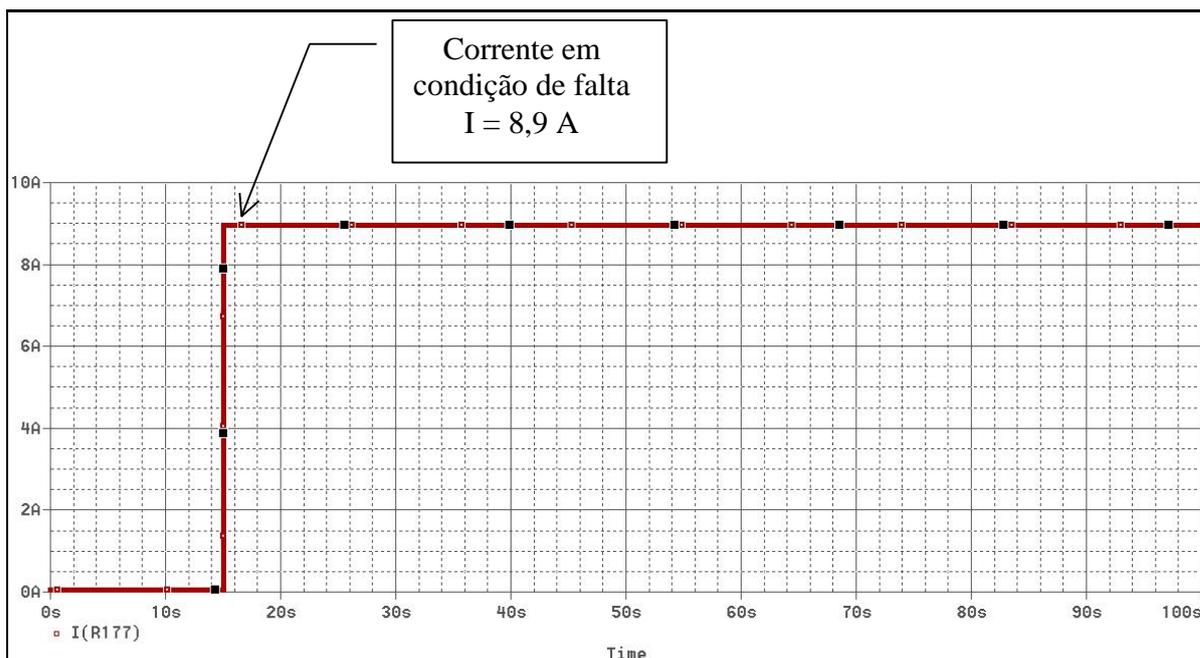


Figura 50 – Corrente de alimentação no esquema TN-S sob condição de falta

Devido a corrente de curto-circuito, provocada pela falta para massa do foguete, quando o sistema opera no modo TN-S os eventos de vôo não ocorrem, como pode ser observado nos resultados da simulação apresentados na Figura 51.

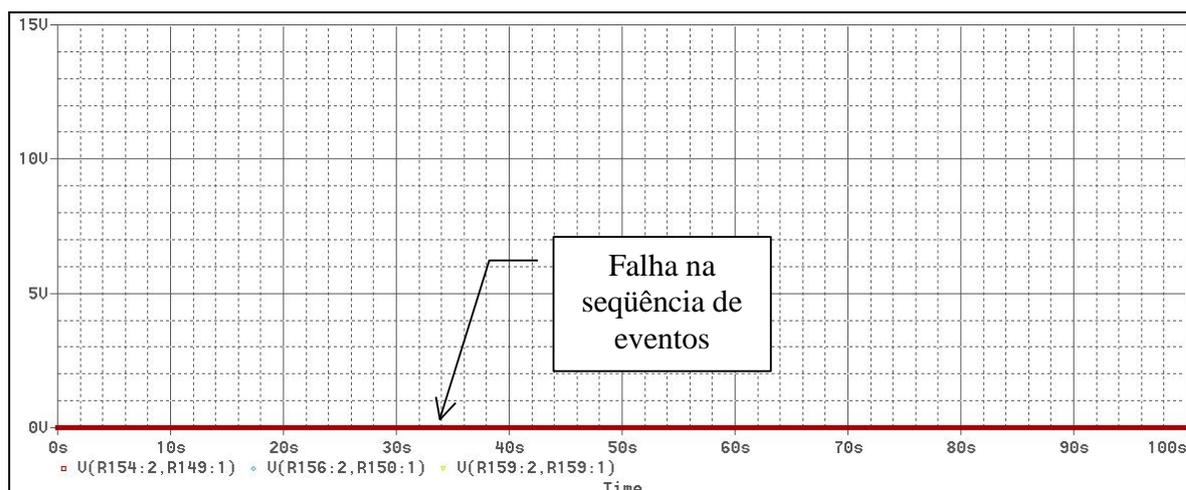


Figura 51 – Seqüência de eventos no TN-S sob condição de falta

Pode ser observado na Figura 51 que na condição de operação da rede elétrica de serviço com a utilização do esquema de aterramento TN-S, em condição de falta única para terra, os efeitos causados pela corrente de curto-circuito podem comprometer a missão.

#### 3.4.5 Esquema IT com falta durante acionamento de pirotécnico

Com o sistema em IT, é simulada a ocorrência de uma falta da linha positiva da bateria de alimentação para terra no tempo 31 s que é o momento em que ocorre o acionamento do dispositivo pirotécnico que executa os eventos de iniciação do motor primeiro estágio do foguete e ignição do sistema de rolamento.

A Figura 52 apresenta a seqüência de eventos de vôo do foguete quando da ocorrência da falta sob estas condições. A falta ocorre no instante 31,2 s e termina 31,7 s com uma duração de 0,5 s. Observa-se que os pulsos de acionamento do eletropirotécnico ocorre da maneira programada não comprometendo a seqüência de eventos.

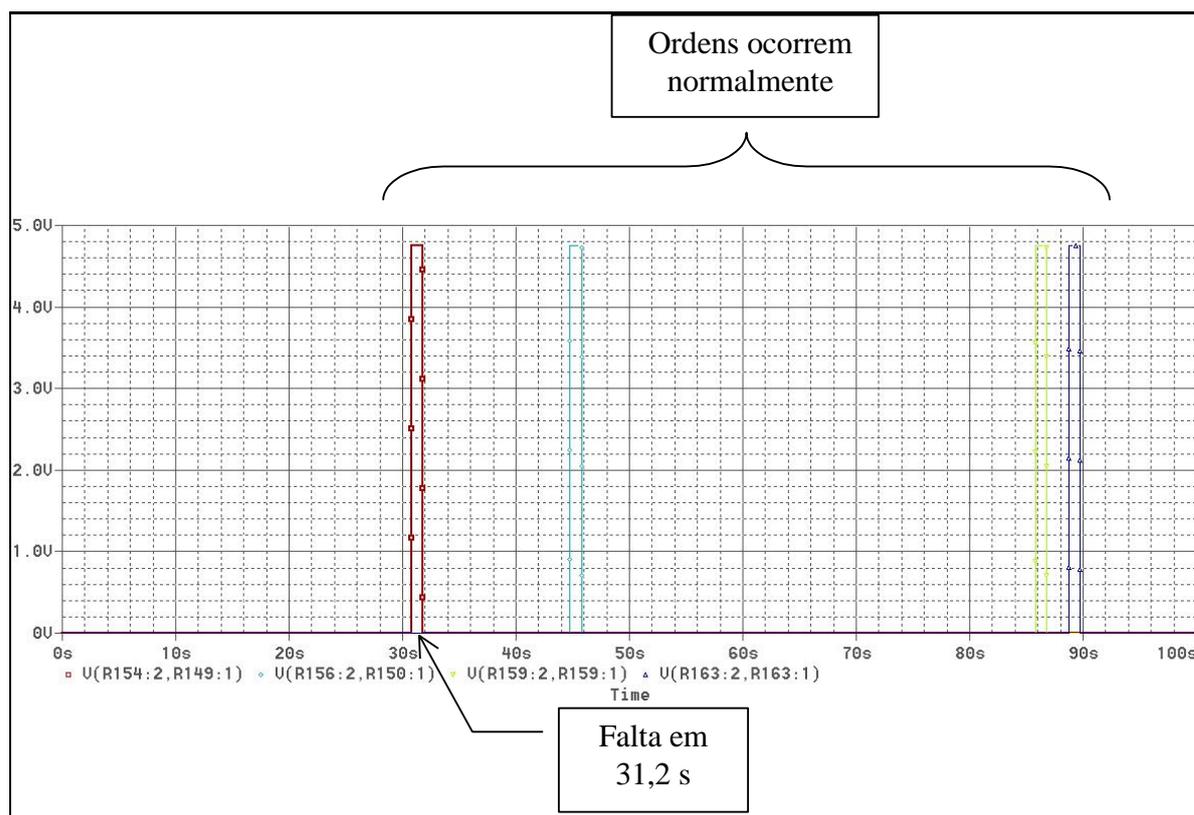


Figura 52 – Sequência de evento em IT com falta durante acionamento de pirotécnico

A Figura 53 mostra em maior detalhe que no momento de ocorrência da falta o pulso de acionamento do dispositivo pirotécnico não sofre perturbação.

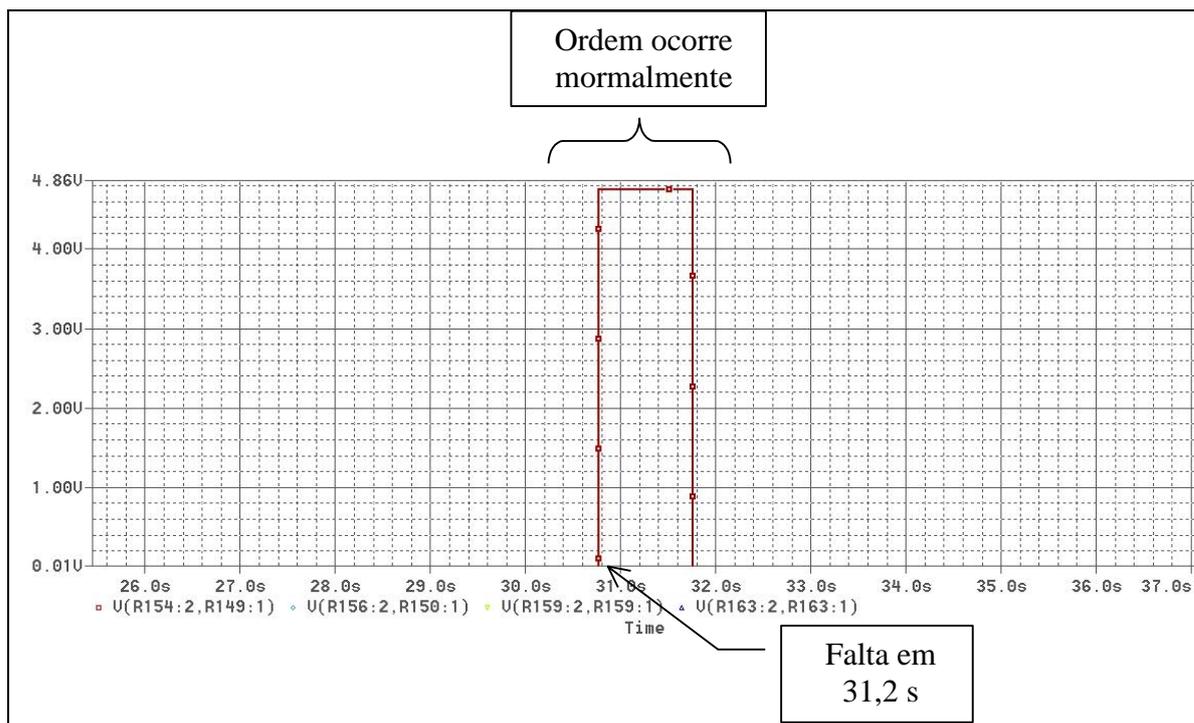


Figura 53 – Detalhe do pulso durante falta em IT

### 3.4.6 Esquema TN-S com falta durante acionamento de pirotécnico

O modelo de simulação da rede elétrica de serviço e suas interfaces são colocados sob operação no esquema de aterramento TN-S, com a conexão do terminal negativo da bateria de alimentação com a massa do foguete. Nessa condição é simulada uma falta da linha positiva da bateria de alimentação diretamente para a massa do veículo que está conectada ao condutor de proteção no tempo 31 s que é o momento em que ocorre o acionamento do dispositivo pirotécnico que executa os eventos de ignição do motor primeiro estágio do foguete e ignição do sistema de rolamento.

A Figura 54 apresenta a seqüência de eventos de vôo do foguete quando da ocorrência da falta sob estas condições. A falta ocorre no instante 31,2 s e termina 31,7 s com uma duração de 0,5 s. Observa-se que os pulsos de acionamento do eletropirotécnico ocorre da

maneira programada, porém o pulso de acionamento da primeira ordem sofre uma interrupção.

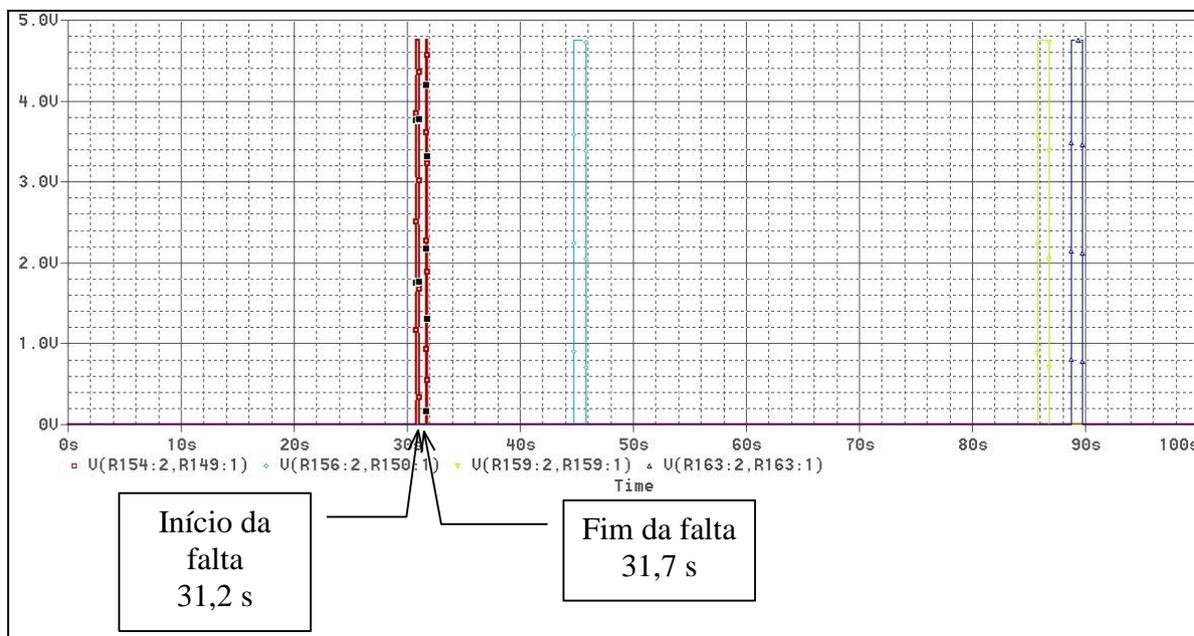


Figura 54 – Sequência de evento em TN-S com falha durante acionamento de pirotécnico

A Figura 55 mostra em maior detalhe que no momento de ocorrência da falha o pulso de acionamento do dispositivo pirotécnico sofre uma interrupção. A interrupção do pulso de acionamento do pirotécnico ocorre durante todo o tempo em que o sistema opera em falta. Isso é devido à alta corrente de curto-circuito provocada pela falha que é característica do sistema em TN-S.

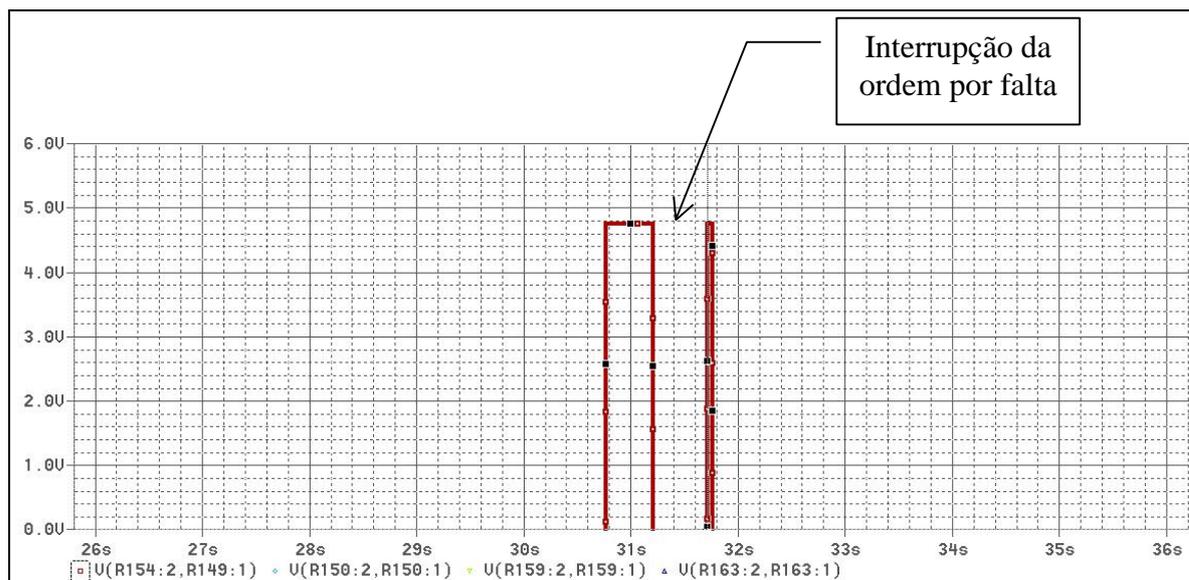


Figura 55 – Detalhe do pulso durante falta em TN-S

## 4 CONCLUSÕES

Os resultados apresentados neste trabalho mostram que os objetivos propostos foram alcançados, principalmente aqueles relacionados com a elaboração de modelos virtuais e a realização de simulações para constatar a viabilidade técnica e operacional no contexto da distribuição de energia para a rede elétrica de serviço utilizada em foguetes de sondagem.

Os valores obtidos nas simulações realizadas para determinar as correntes de falta no esquema de aterramento IT e TN, podem ser utilizados como uma referência na elaboração de especificações dos elementos de proteção contra as sobrecorrentes para os circuitos do sistema.

A utilização do esquema de aterramento IT, para a rede elétrica de serviço embarcada em foguetes de sondagem, é a mais adequada quando a meta está concentrada na manutenção do suprimento de energia elétrica e na preservação da integridade dos componentes e equipamentos dessa rede sob condição de manifestação de falta para carcaça.

Decorrente da semelhança entre os componentes utilizados nas redes elétricas de foguetes de sondagem e veículos lançadores, desenvolvidos pelo Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), os modelos virtuais elaborados neste trabalho podem, com a execução de adequações, serem aplicados para representar sistemas mais complexos como aqueles utilizados nas redes elétricas de veículos lançadores de satélites.

## REFERÊNCIAS

- Agência Espacial Brasileira. **Foguetes de Sondagem**: Disponível em: <<http://www.aeb.gov.br/indexx.php?secao=lancadores>>. Acesso em 14/07/2009.
- ALTENBUCHNER, L. **VSB-30 Payload Documentation**. Germany: German Aerospace Center (DLR), 2004.
- ARIANE 5, **Ariane 5 User's Manual**: Issue 5, Revision 0, Ariane Space, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT. NBR 5410 - Instalações Elétricas de Baixa Tensão**. 2004.
- BIZARRIA, F. C. P. ; BIZARRIA, J. W. ; SPINA, F. D. **Techniques Applied in Electrical Power Distribution for Sounding Rockets**. Gramado: 20<sup>th</sup> International Congress of Mechanical Engineering, 2009.
- CADENCE, **Cadence Design System**. Disponível em: <<http://www.cadence.com/us/pages/default.aspx>>. Acesso em 16/08/2009.
- COTRIM, A. A. M. B. **Instalações elétricas**. 4 ed. São Paulo: Prentice Hall, 2003.
- DEFESANET. **Foguetes de Sondagem**. Disponível em: <<http://www.defesanet.com.br/imagens/space/aeb/vsb30.jpg>>. Acesso em 14/07/2009.
- ETLL, J. **Post Flight Report Texux 42 Preliminary Version**. Germany: German Aerospace Center (DLR), 2006.
- GUTIERRES, K. **Foguete Brasileiro Tipo Exportação**, Jornal FNE (Federação Nacional dos Engenheiros), edição 44, 2006.
- INSTITUTO DE AERONÁUTICA E ESPAÇO. **Desenho Ilustrativo do VSB-30**. São José dos Campos: 2005.
- JIANG, Z. ; LIU S. ; DOUGAL, R. A. **Design and Testing of Spacecraft Power Systems Using VTB**. USA: IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1995.
- KINDERMANN, G. **Curto-Circuito**. Porto Alegre: Sagra D/C Luzzatto, PP 139 -142, 1992.
- LENERTZ, B. A. **Electrical Power System, Direct Current, Space Vehicle Design Requeriments**. USA: Space and Missile System Center, Aerospace Report, 2005.
- MICROSIM, **Microsim Pspice User's Guide**. USA: Microsim Coporation, 1996.
- MILITARY HANDBOOK. **MIL-HDBK-1512 - Electroexplosive Subsystems, Electrically Initiated, Design Requirements and Test Methods**. USA: Department of Defense, 1997.

MILITARY STANDARD. **MIL-STD-1539 – Electrical Power, Direct Current, Space Vehicle Design Requirements**. USA: Department of Defense, 1988.

MILITARY STANDARD. **MIL-STD-1541A – Electromagnetic Compatibility Requerements for Space Systems**. USA: Department of Defense, 1987.

MILITARY STANDARD. **MIL-STD-704E – Aircraft Electric Power System**. USA: Department of Defense, 1991.

MULVILLE, D. R. **Electrical Grounding Architeture for Unmanned Spacecraft**. USA: NASA Technical Handbook, 1998.

POMILIO, J. A. **Synthesizing Variant Impedances in Spice**. USA: IEEE Potentials, 1998.

PSPICE, **Pspice Tutorial**. Disponível em: <[http://students.washington.edu/hknee/docs/HKN\\_PSPICE\\_Tutorial.pdf](http://students.washington.edu/hknee/docs/HKN_PSPICE_Tutorial.pdf)>. Acesso em 14/07/2009.

PSPICE, **Pspice User´s Guide**. USA: Cadence Design System, 2000.

SILVA, M. A. T. **Definição das Redes Elétricas do VSB-30 V01**. São José dos Campos: Instituto de Aeronáutica e Espaço, 2004.

SOYUS, **Soyus User´s Manual from the Guiana Space Center**. Issue 1, Revision 0, Ariane Space, 2006.

SPINA, F. D. **Definição das Redes Elétricas do VSB-30 V08 MASER 11**. São José dos Campos: Instituto de Aeronáutica e Espaço, 2008.

SPINA, F. D. **Relatório de Ensaios de Aceitação das Redes Elétricas Integradas do VSB-30 V04**. São José dos Campos: Instituto de Aeronáutica e Espaço, 2007.

TAM, K. S. ; YANG, L. **Functional Models for Space Power Electronic Circuit**. USA: IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 31, No. 1, 1995.

VEGA, **User´s Manual**. Issue 3, Revision 0, Arianespace, 2006.

VERONESE, P. R. **Apostila de Simuladores de Circuitos Eletrônicos**. SEL-EESC-USP. Disponível em: <<http://www.sel.eesc.usp.br/sasel/integra/Downloads/Material/F4nicos.pdf>>. Acesso em 25/08/2009.

WOWK, A. **Especificação de Regras Gerais para Concepção e Ensaios das Redes Elétricas**. São José dos Campos: Instituto de Aeronáutica e Espaço, 1987.

Autorizo cópia total ou parcial desta obra, apenas para fins de estudo e pesquisa, sendo expressamente vedado qualquer tipo de reprodução para fins comerciais sem prévia autorização específica do autor.

Fábio Duarte Spina

Taubaté, dezembro de 2009.

# 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](#)