

**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**

**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>

## 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 Requirements 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 Architecture 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.