

# Simulação de faltas no modelo proposto para projeto de distribuição de energia elétrica em plataforma de lançamento de foguetes

Francisco Carlos Parquet Bizarria<sup>1,2</sup>   José Walter Parquet Bizarria<sup>1</sup>   Francisco Yamanaka<sup>2</sup>  
fcpb@iae.cta.br   jwpbiz@gmail.com   yamanaka@iae.cta.br

1 Universidade de Taubaté (UNITAU) - Taubaté - SP/Brasil

2 Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE) - São José dos Campos - SP/Brasil

## RESUMO

*Este trabalho apresenta uma proposta de modelo virtual para o Projeto Básico de distribuição de energia elétrica que é aplicado em versão atualizada do Sistema Plataforma de Lançamento. Esse sistema plataforma é o complexo que atenderá as operações de integração, testes e lançamento do Veículo Lançador de Satélite, que está em fase de desenvolvimento no Instituto de Aeronáutica e Espaço. Nesse modelo são simuladas faltas, em pontos estratégicos, com a meta de estimar os valores alcançados pelas correntes de curto-circuito e tensões elétricas, os quais servirão de referências para auxiliar a elaboração de especificação, dimensionamento de dispositivos de proteção e condutores elétricos destinados ao Projeto Executivo desse sistema de distribuição. Os resultados apresentados nas simulações computacionais dessas faltas, são consistentes com o tipo de sistema de distribuição elétrica adotado para a mencionada plataforma, condição que ratifica o modelo proposto neste trabalho.*

Palavras-Chave: Plataforma de Lançamento de Foguetes. Distribuição de Energia Elétrica. Simulação de Faltas.

## 1. INTRODUÇÃO

No Setor de Preparação e Lançamento (SPL) do Centro de Lançamento de Alcântara (CLA), está localizado o Sistema Plataforma de Lançamento. Essa plataforma é o complexo utilizado para realizar tarefas relacionadas, principalmente, com a integração, os testes e o lançamento do Veículo Lançador de Satélites (VLS), o qual está sendo atualmente desenvolvido pelo Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE).

Na composição desse complexo está previsto a Torre Móvel de Integração (TMI), Torre de Umbilicais (TU), Mesa de Lançamento (ML), Sala de Interface (SI) e Casa de Equipamento e Apoio (CEA), que são instalações necessárias para atender os usuários na realização das mencionadas tarefas. A Figura 1 apresenta vista aérea da primeira versão do aludido Sistema Plataforma de Lançamento.

Para atender o lançamento do próximo VLS, esse complexo será reativado com implementação de alterações sistêmicas na distribuição de energia elétrica e automatização de operações. Nesse sentido, foi elaborado um Projeto Básico para atender a nova versão do sistema elétrico de potência e da automatização, sendo que nesse projeto não estão explicitados valores de corrente pertinentes às faltas, em pontos estratégicos desse sistema. Esses valores são necessários para elaborar a especificação de equipamentos, realizar o dimensionamento de circuitos e determinar as proteções contra as sobrecorrentes. Esse dimensionamento visa, principalmente, estabelecer características mecânicas e elétricas adequadas para que essas proteções suportem os efeitos dinâmicos e térmicos provocados por sobrecorrentes oriundas de faltas que podem acometer o sistema elétrico.



Figura 1. Vista aérea do Sistema Plataforma de Lançamento.

A correta determinação das aludidas características mecânicas e elétricas é ação fundamental para evitar que as proteções contra as sobrecorrentes se tornem potenciais focos iniciadores de incêndios, quando forem submetidas às faltas elétricas, YAMANAKA (2006).

Nesse contexto, este trabalho apresenta estudo para determinação das correntes de falta, trifásica franca e monofásica para a terra, em pontos estratégicos da rede elétrica de potência prevista para o Sistema Plataforma de Lançamento, por meio da elaboração de modelo elétrico em *software* dedicado a esse fim. Cabe mencionar que os mencionados pontos estratégicos são principalmente aqueles previstos para acomodarem proteções contra as sobrecorrentes nos circuitos principais e intermediários.

## 2. OBJETIVOS DO TRABALHO

Propor modelo virtual que represente o sistema elétrico de potência previsto para o Sistema Plataforma de Lançamento, com a meta de estimar os valores de corrente e sobretensões provocadas por faltas estabelecidas em pontos estratégicos desse sistema.

Verificar o comportamento operacional do esquema de distribuição de energia elétrica, adotado para o Sistema Plataforma de Lançamento, quando submetido à primeira falta monofásica para a terra e trifásica franca.

## 3. DESENVOLVIMENTO

O diagrama unifilar que representa o sistema elétrico de potência proposto no Projeto Básico para o Sistema Plataforma de Lançamento do VLS, explicitando os principais componentes previstos a partir da proteção contra as sobrecorrentes, instalada no primário do Transformador de Separação (TS), até os quadros que atendem as cargas mais relevantes dessa plataforma, é apresentado na Figura 2.

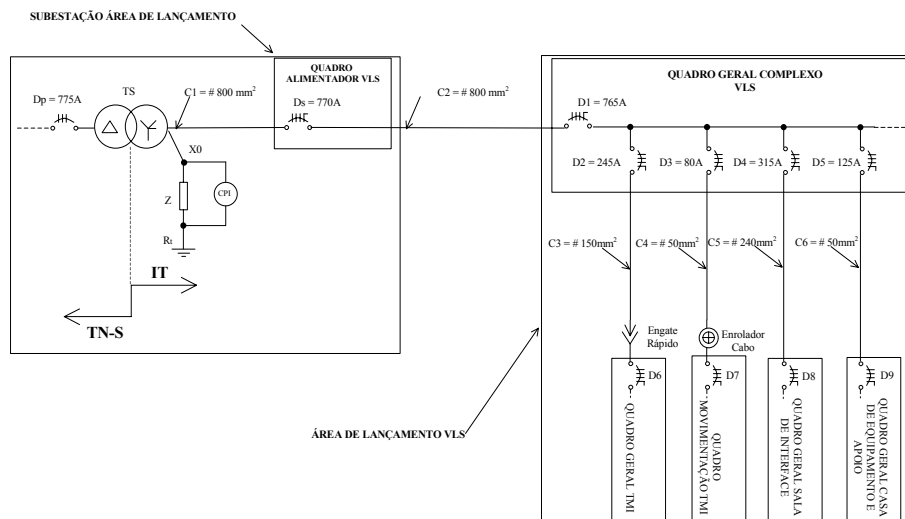


Figura 2. Diagrama unifilar previsto para a Plataforma de Lançamento.

### 3.1. DESCRIÇÃO DO DIAGRAMA UNIFILAR

A descrição dos principais elementos previstos no diagrama unifilar, mostrado na Figura 2, é apresentada nesta subseção do presente trabalho, com a meta de auxiliar a tarefa de entendimento dos respectivos modelos elaborados no ambiente de desenvolvimento do *software* escolhido para esse fim.

A principal função da proteção contra as sobrecorrentes ( $D_p$ ), prevista no primário do Transformador de Separação (TS), é limitar os efeitos ocasionados por faltas no circuito (C1) que atende o Quadro Alimentador VLS e no mencionado transformador.

O Transformador de Separação (TS) está configurado em triângulo no primário e estrela no secundário, com neutro acessível, sendo que esse é utilizado para realizar a mudança do esquema de aterramento de TN-S para IT. Essa mudança de esquema tem por principal objetivo munir o sistema elétrico da plataforma com a propriedade de limitar a corrente provocada pela primeira falta para a terra, COTRIM (2003).

A Impedância de limitação ( $Z$ ) está instalada entre o ponto comum ( $X_0$ ) do secundário do Transformador de Separação (TS) e o eletrodo de terra da fonte ( $R_t$ ). Essa impedância tem por função limitar a intensidade da corrente de falta entre fase e a terra.

O Controlador Permanente de Isolamento (CPI), instalado entre os mesmos pontos da Impedância de limitação ( $Z$ ), tem a função de medir, de modo constante, a isolamento dos condutores vivos do sistema de potência em relação ao eletrodo de terra da fonte ( $R_t$ ). O valor obtido nessa medida é referência para o operador do sistema identificar a situação de existência de falta, para a terra, no sistema de potência como um todo. Cabe destacar que esse supervisor não é capaz de informar o ponto exato do sistema elétrico que está acometido por falta, HOFHEINZ (2000).

O circuito (C1) é o meio físico que deve transportar a potência disponível no Transformador de Separação (TS) para o Quadro Alimentador VLS, com o mínimo de perdas e custo de implantação adequado.

O dispositivo de proteção contra as sobrecorrentes ( $D_s$ ), com quatro pólos, tem a função de proteger os barramentos de fase com potenciais diferentes e de neutro, do Quadro Alimentador VLS, contra as possíveis manifestações de sobrecargas e curtos-circuitos. Essa proteção também estende para o circuito que transporta energia elétrica para a Plataforma de Lançamento do VLS.

O circuito (C2), representado na Figura 2, deve transportar a potência disponível no Quadro Alimentador VLS para o Quadro Geral Complexo VLS, com o mínimo de perdas e custo acessível de implantação.

Quadro Geral Complexo VLS, tem como principal função abrigar as proteções dos circuitos que atendem o: i) Quadro Geral TMI, ii) Quadro Movimentação TMI, iii) Quadro Geral Sala de Interface e iv) Quadro Geral Casa de Equipamento e Apoio, conforme indicado na Figura 2.

O dispositivo de proteção contra as sobrecorrentes (D1), com quatro pólos, mostrado na Figura 2, tem a função de proteger as linhas de fase e neutro, do Quadro Geral Complexo VLS, contra as manifestações de sobrecargas e curtos-circuitos, possíveis de acometer essas linhas.

No ramal que fornece energia para o Quadro Geral TMI, representado na Figura 2, está previsto dispositivo de proteção contra as sobrecorrentes (D2).

O circuito (C3), representado na Figura 2, tem por objetivo transferir a potência do Quadro Geral Complexo VLS para o Quadro Geral TMI, com o mínimo de perdas e custo acessível. Cabe destacar que nesse circuito está previsto dispositivo de Engate Rápido, o qual é destinado a interromper o fornecimento de energia para esse quadro quando a TMI for deslocada para a posição mais afastada do veículo. Essa posição (P2) está representada na Figura 1 e é denominada por posição de lançamento do VLS.

No ramal que fornece energia para o Quadro Movimentação TMI, mostrado na Figura 2, está previsto dispositivo de proteção contra as sobrecorrentes (D3).

O circuito (C4), representado na Figura 2, transfere a potência do Quadro Geral Complexo VLS para o Quadro Movimentação TMI, com o mínimo de perdas e custo acessível. Cabe destacar que nesse circuito está previsto um enrolador de cabo motorizado (Enrolador Cabo), com regulagem automática de tensão mecânica, a fim de permitir o suprimento de energia para os equipamentos elétricos responsáveis pela movimentação da TMI. Esse suprimento de energia tem o objetivo de permitir o deslocamento da TMI pelas posições de integração (P0), testes (P1) e lançamento (P2) do VLS, conforme a necessidade da atividade. Essas posições são mostradas na Figura 1.

No ramal que fornece energia para o Quadro Geral Sala de Interface, representado na Figura 2, está previsto dispositivo de proteção contra as sobrecorrentes (D4).

De modo semelhante ao anterior, no ramal que fornece energia para o Quadro Geral Casa de Equipamento e Apoio está previsto dispositivo de proteção contra as sobrecorrentes (D5).

Os circuitos C5 e C6, representados na Figura 2, são responsáveis por transferir a potência do Quadro Geral Complexo VLS para o Quadro Geral Sala de Interface e Quadro Geral Casa de Equipamento e Apoio, respectivamente, com o mínimo de perdas e custos acessíveis.

As secções transversais, indicadas no diagrama unifilar da Figura 2, foram obtidas pelos seguintes critérios de dimensionamento: i) capacidade de condução de corrente, ii) queda de tensão e iii) sobrecarga, COTRIM (1985).

### 3.2. MODELAGEM DO SISTEMA

O *software* escolhido para elaborar o modelo do diagrama unifilar apresentado na Figura 2 e efetuar as simulações de faltas, em pontos estratégicos, com a meta de determinar a magnitude da corrente gerada por essas faltas é intitulado por Micro-Cap IV, SPECTRUM (1992).

Os modelos elaborados para representar o Transformador de Separação (TS) e os condutores do circuito C1, C2 e C3, são apresentados na Figura 3. Nesse modelo é considerada impedância série para o mencionado transformador e os circuitos.

Na Figura 3 é apresentado o modelo proposto do transformador de separação, da carga representativa do consumo da Plataforma de Lançamento, da resistência do eletrodo de aterramento da fonte, da resistência do eletrodo de aterramento da carga e das chaves para simulação de faltas no secundário desse transformador.

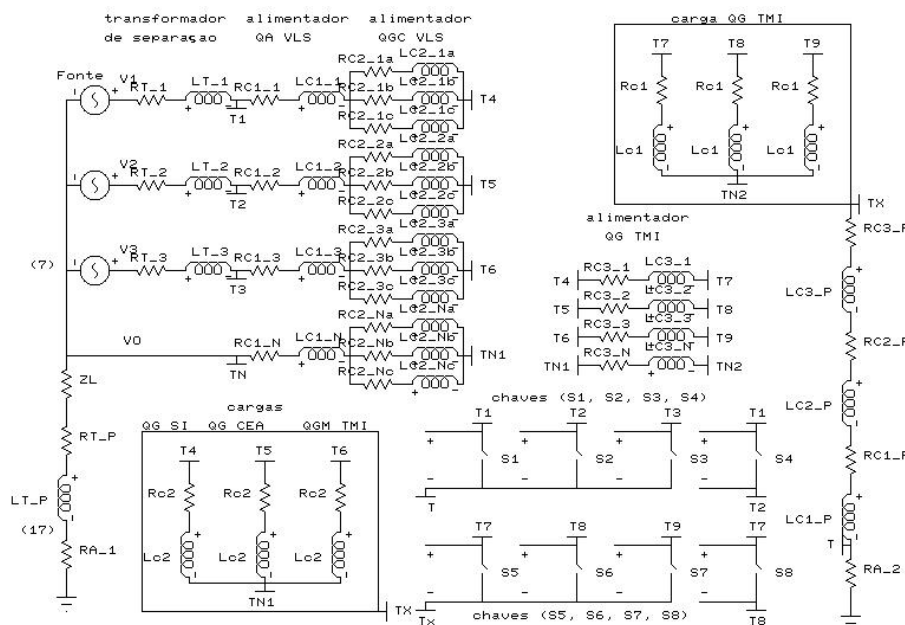


Figura 3. Modelo proposto para a Plataforma de Lançamento.

Nessa figura as fontes (V1, V2 e V3) e referência (V0) associadas com as resistências (RT\_1, RT\_2 e RT\_3) e indutâncias (LT\_1, LT\_2 e LT\_3) representam o secundário do Transformador de Separação (TS), trifásico com neutro acessível, configurado em estrela e com núcleo envolvente, sendo que as demais nomenclaturas possuem os seguintes significados:

- V1, fonte de tensão com 220 V, com defasamento de  $0^\circ$ .
- V2, fonte de tensão com 220 V, com defasamento de  $120^\circ$ .
- V3, fonte de tensão com 220 V, com defasamento de  $-120^\circ$ .
- S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8 chaves para estabelecerem regime de curto-circuito.
- V0, ponto neutro do transformador.
- F, frequência 60 Hz.
- T1, T2, T3, etc., pontos de conexão.
- RT\_1, RT\_2 e RT\_3, resistências do transformador.
- LT\_1, LT\_2 e LT\_3, indutâncias do transformador.
- RC1\_1, RC1\_2 e RC1\_3, resistência do condutor de alimentação do QA\_VLS.
- LC1\_1, LC1\_2 e LC1\_3, indutância do condutor de alimentação do QA\_VLS.

- RC2\_1a, RC2\_1b, RC2\_1c, RC2\_2a, RC2\_2b, RC2\_2c, RC2\_3a, RC2\_3b, RC2\_3c, RC2\_Na, RC2\_Nb, RC2\_Nc, resistências do circuito de alimentação do QGC\_VLS.
- LC2\_1a, LC2\_1b, LC2\_1c, LC2\_2a, LC2\_2b, LC2\_2c, LC2\_3a, LC2\_3b, LC2\_3c, LC2\_Na, LC2\_Nb, LC2\_Nc, indutâncias do circuito de alimentação do QGC\_VLS.
- RC3\_1, RC3\_2, RC3\_3 e RC3\_N, resistências do circuito do QG\_TMI.
- LC3\_1, LC3\_2, LC3\_3 e LC3\_N, indutâncias do circuito do QG\_TMI.
- Rc1, resistência, por fase, de carga representativa do QG\_TMI.
- Lc1, indutância, por fase, de carga representativa do QG\_TMI.
- Rc2, resistência, por fase, de carga representativa do QG\_SI, QG\_CEA e QGM\_TMI.
- Lc2, indutância, por fase, de carga representativa do QG\_SI, QG\_CEA e QGM\_TMI.
- RA\_1 e RA\_2, resistências do eletrodo de aterramento da fonte e carga.
- RT\_P, RC1\_P, RC2\_P e RC3, resistências condutores de proteção.
- LT\_P, LC1\_P, LC2\_P e LC3\_P, indutâncias condutores de proteção.

### 3.3. SIMULAÇÃO DE FALTAS

A simulação de faltas no modelo que representa o sistema elétrico da mencionada plataforma é realizada com a presença de duas principais cargas instaladas nos terminais dos circuitos alimentadores C2 e C3, conforme mostrado na Figura 3. A primeira carga é equilibrada, trifásica e com capacidade de provocar circulação de corrente proporcional à potência consumida pelo Quadro Geral TMI (QG\_TMI), nos terminais (T7, T8, T9 e TN2). A segunda, também é equilibrada e trifásica, porém foi dimensionada para provocar circulação de corrente proporcional à potência consumida pelo Quadro Movimentação TMI, Quadro Geral Sala de Interface e Quadro Geral Casa de Equipamento e Apoio, nos terminais (T4, T5, T6 e TN1) previstos no modelo proposto na Figura 3.

Nesse modelo também é considerado o efeito provocado pela indutância mútua entre os condutores que pertencem ao circuito C1, C2 e C3. O coeficiente de acoplamento adotado para essa indutância, considera que a forma prevista para instalação de condutores e os tipos de dutos a serem utilizados sejam capazes de minimizar o acoplamento de campo magnético.

Em função de sua importância para o dimensionamento de proteções e condutores do sistema elétrico da mencionada plataforma, são apresentados neste trabalho os valores de correntes obtidos com a simulação de faltas do tipo trifásica franca e monofásica para a terra em pontos relacionados com o Transformador de Separação e circuito que atende o Quadro Geral TMI.

Nesse contexto, impondo-se baixa impedância nos terminais T1, T2 e T3 do modelo proposto para o Transformador de Separação (TS), contido na Figura 3, pode-se determinar a corrente de curto-circuito, trifásica franca, possível de ocorrer no secundário desse transformador. Nessa figura as chaves S1, S2 e S3 são os componentes que estabelecem essa condição de curto-circuito no secundário desse transformador. Essas chaves, decorrente das condições determinadas pelo ambiente de simulação adotado, possuem o valor de  $10^{-3} \Omega$  como aquele característico de resistência em estado fechado e para o estado aberto de  $10^9 \Omega$ . Nessa figura, essas chaves estão programadas para estabelecer curto-circuito, no secundário desse transformador, em período de tempo compreendido entre 0,032 e 0,2 segundo.

A Figura 4 mostra os resultados obtidos na simulação de falta trifásica franca no secundário do Transformador de Separação (TS).

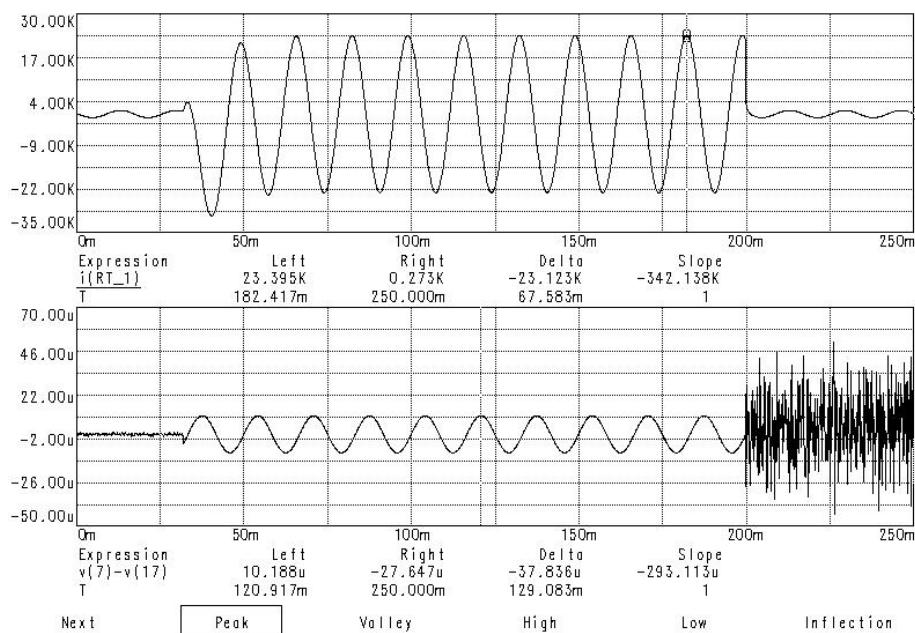


Figura 4. Falta trifásica no Transformador de Separação.

Nessa figura pode ser observado o valor de 23,395 kA, como o máximo instantâneo alcançado pela corrente de fase, e 10,188 mV, como o máximo instantâneo alcançado pela tensão entre o eletrodo da fonte e referência do transformador, no período de tempo em que as chaves S1, S2 e S3 estabeleceram a mencionada falta.

Estabelecendo baixa impedância entre os terminais T1 e T do modelo apresentado na Figura 3, pode-se determinar a corrente de curto-circuito monofásica para a terra, franca, possível de ocorrer nesses pontos do circuito. Nessa figura a chave S1 estabelece o curto-circuito monofásico para a terra no secundário do Transformador de Separação (TS).

A Figura 5 mostra os resultados obtidos na simulação de falta monofásica para a terra no secundário do Transformador de Separação (TS). Nessa figura pode ser observado o valor de 75,794 mA, como o máximo instantâneo alcançado pela corrente de fase, e 303,203 V, como o máximo instantâneo alcançado pela tensão entre o eletrodo da fonte e referência do transformador, no período de tempo em que a chave S1 estabelece a mencionada falta.

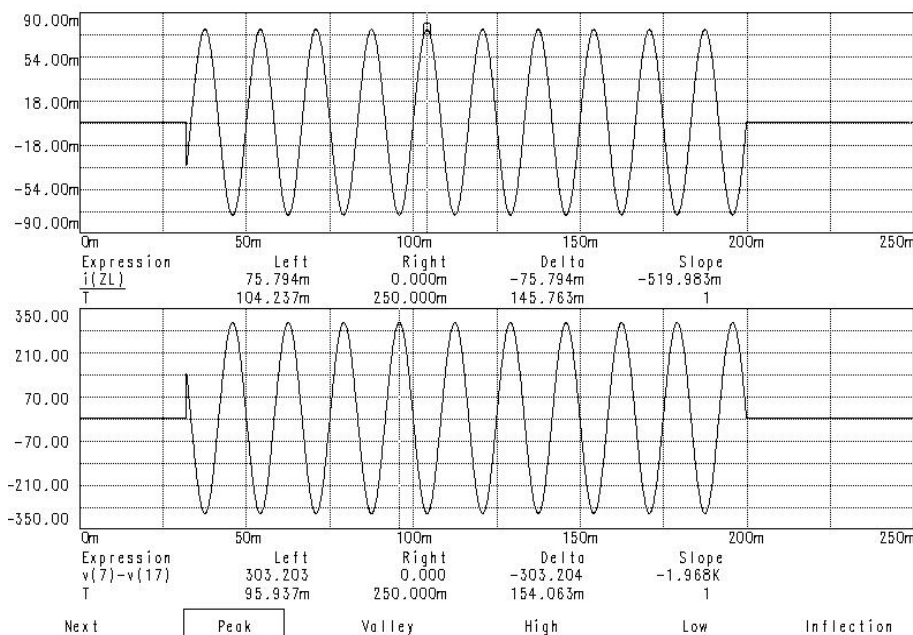


Figura 5. Falta monofásica no Transformador de Separação.

Estabelecendo baixa impedância nos terminais T7, T8 e T9 do modelo proposto para a alimentação do Quadro Geral TMI, representado na Figura 3, pode-se determinar a corrente de curto-circuito, trifásica franca, possível de ocorrer no final do circuito (C3) que atende o Quadro Geral TMI.

Nessa figura as chaves S5, S6 e S7 são os componentes que estabelecem a condição de curto-circuito no barramentos de entrada do Quadro Geral TMI, sendo que essas estão programadas para estabelecer essa condição em período de tempo compreendido entre 0,032 e 0,2 segundo.

A Figura 6 apresenta os resultados obtidos na simulação de falta trifásica franca nos barramentos de entrada do Quadro Geral TMI. Nessa figura pode ser observado o valor de 8,773 kA, como o máximo instantâneo alcançado pela corrente de fase, e 9,842 mV, como o máximo instantâneo alcançado pela tensão entre o eletrodo da fonte e referência do transformador, no período de tempo em que as chaves S5, S6 e S7 estabeleceram a mencionada falta.



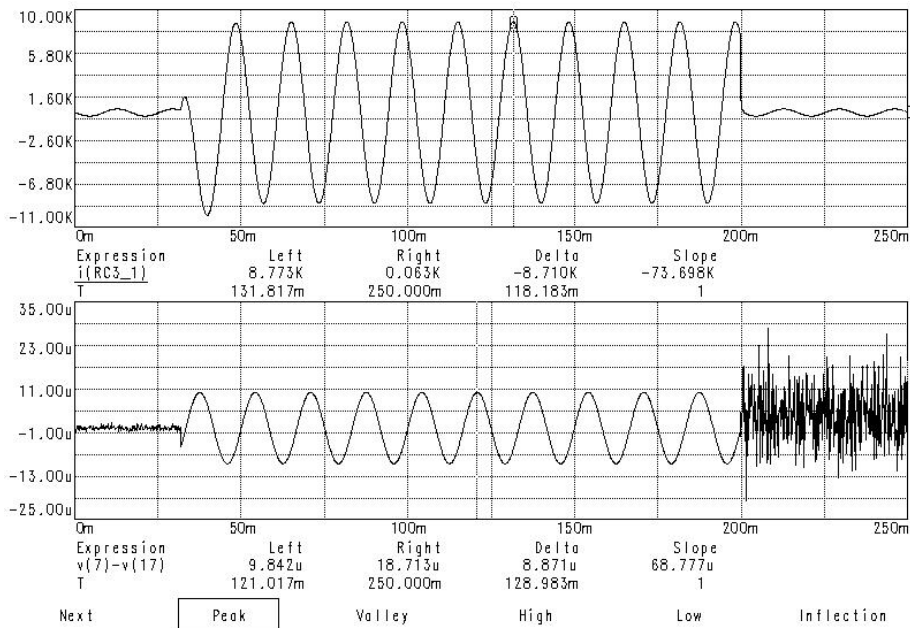


Figura 6. Falta trifásica no circuito do Quadro Geral TMI.

Estabelecendo baixa impedância entre os terminais T7 e Tx do modelo apresentado na Figura 3, pode-se determinar a corrente de curto-circuito monofásica para a terra, franca, possível de ocorrer nesses pontos do circuito. Nessa figura a chave S5 estabelece o curto-circuito monofásico para a terra no barramento de entrada do Quadro Geral TMI.

A Figura 7 mostra os resultados obtidos na simulação de falta monofásica para a terra no barramento de entrada do Quadro Geral TMI. Nessa figura pode ser observado o valor de 73,256 mA, como o máximo instantâneo alcançado pela corrente de fase, e 293,049 V, como o máximo instantâneo alcançado pela tensão entre o eletrodo da fonte e referência do transformador, no período de tempo em que a chave S5 estabeleceu a mencionada falta.

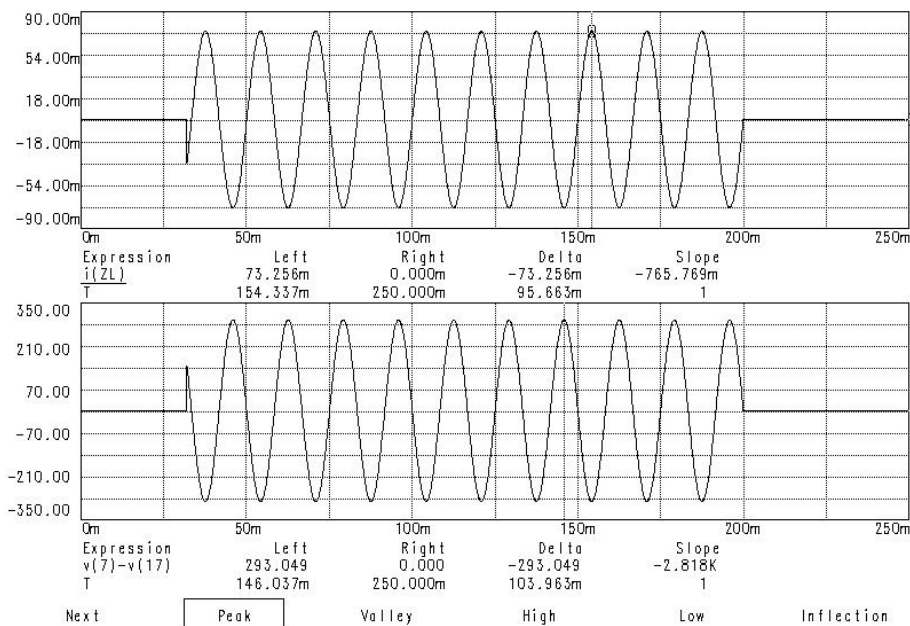


Figura 7. Falta monofásica no Quadro Geral TMI.

#### 4. CONCLUSÕES

Os objetivos previstos neste trabalho foram alcançados em toda a sua plenitude, principalmente, no que concerne à elaboração de modelo representativo do sistema elétrico de potência previsto para a Plataforma de Lançamento de Veículos Espaciais por meio de *software* dedicado a esse fim.

A determinação das intensidades das correntes de faltas e sobretensões, em pontos estratégicos desse modelo, poderão ser utilizadas como referência para efetuar as especificações de dispositivos de proteção e condutores previstos na fase de elaboração do Projeto Executivo da mencionada plataforma.

O modelo elaborado permite realizar alterações, em função de possíveis modificações nos valores atuais estipulados para as potências das cargas do sistema, de modo a determinar novos valores de seções transversais e características nominais de dispositivos de proteção.

A representatividade observada no modelo elaborado neste trabalho favorece o entendimento operacional do sistema e possibilita a rápida inserção de novas cargas e/ou características nos componentes de transformação, transporte e consumo de energia.

Os resultados obtidos nas simulações realizadas confirmaram a capacidade que o esquema de aterramento IT possui em limitar o valor da corrente monofásica para a terra. Essa característica é condição necessária para minimizar as conseqüências ocasionadas pela manifestação de falta para a terra no sistema elétrico que atenderá o Sistema Plataforma de Lançamento.

#### 5. REFERÊNCIAS

YAMANAKA, F. Análise de faltas em modelo representativo de sistema elétrico proposto para plataforma de lançamento de veículos espaciais. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

COTRIM, A. A. M. B. Instalações elétricas, 4<sup>a</sup> edição; revisão e adaptação em conformidade com a NBR 5410: Geraldo Kindermann - São Paulo: Prentice Hall, 2003.

HOFHEINZ, W. Protective Measures with Insulation Monitoring, 2nd edition, VDE VERLAG - Berlin – Offenbach, 2000.

COTRIM, A. A. M. B. Manual de instalações elétricas, 2<sup>a</sup> edição. São Paulo: McGraw-Hill, 1985.

SPECTRUM. Micro-Cap IV: Electronic circuit analysis program: reference manual. [S.l.], 1992.