

APLICAÇÃO DE FMECA EM CIRCUITO DE VIA DE CORRENTE CONTÍNUA

Messias da Silva Carvalho
Jorge Guimarães (Orientador)

MRS Logística S.A.
Instituto Militar de Engenharia

RESUMO

Em consequência da crescente demanda de transporte ferroviário na região da Baixada Santista e com um mercado cada vez mais competitivo, é essencial que a manutenção dos ativos instalados ao longo da malha ferroviária seja realizada de forma a garantir a disponibilidade destes para a operação. Existem três grupos principais de ativos na MRS: *via permanente, eletroeletrônica e material rodante*. Foi selecionado dentro do grupo *eletroeletrônica*, o ativo que possui o maior número de falhas para a aplicação da ferramenta FMECA (*Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*) com foco na identificação do modo de falha mais crítico. Com base no banco de dados da MRS, foi constatado que as falhas de circuito de via representam 35% do total pertencentes ao grupo *eletroeletrônica*. O principal resultado deste trabalho foi identificar o modo de falha mais crítico do sistema.

Palavras-chave: Circuito de via. Falhas.

ABSTRACT

As a result of the growing rail transportation demand in the Baixada Santista region and with an increasingly competitive market, it is essential that the maintenance of the assets installed along the railway network is performed to ensure their availability for operation. There are three main groups of assets in MRS: permanent way, electronics and rolling stock. It was selected within the electronics group, the asset that has the largest number of failures for the application of FMECA tool (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis) focused on the identification of the most critical failure mode. Based on the MRS database, it was found that the track circuit failures represent 35% of total belonging to the electronics group. The main result of this work was to identify the most critical failure mode of the system.

Keywords: Track circuits. Failures.

1. INTRODUÇÃO

A região da Baixada Santista tem sido contemplada com investimentos expressivos no setor de sinalização, onde predominam os circuitos de via de corrente contínua. Com base no relatório de falhas da área de eletroeletrônica de São Paulo, responsável pela manutenção dos ativos da região em questão, as falhas relacionadas ao circuito de via tem sido as de maior recorrência e impacto operacional.

Este artigo tem por objetivo apresentar os principais componentes do circuito de via de corrente contínua e através da aplicação do método de análise da criticidade dos modos e efeitos das falhas (FMECA - *Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*), identificar o modo de falha mais crítico deste sistema.

1.1. Definição do sistema

Existem vários tipos de circuito de via, distinguidos por suas características construtivas e tipo de corrente ou sinal elétrico que fazem circular nos trilhos.

O circuito de via é um circuito elétrico que tem como condutores os trilhos da ferrovia. É utilizado para detectar a presença do trem na via, a partir do curto circuito provocado pelos rodeiros deste trem nos trilhos. O circuito de via de corrente contínua caracteriza-se por sua fonte de energia em corrente contínua, utilizando-se de retificador.

Na figura 1 mostra um circuito de via sem a presença de um trem.

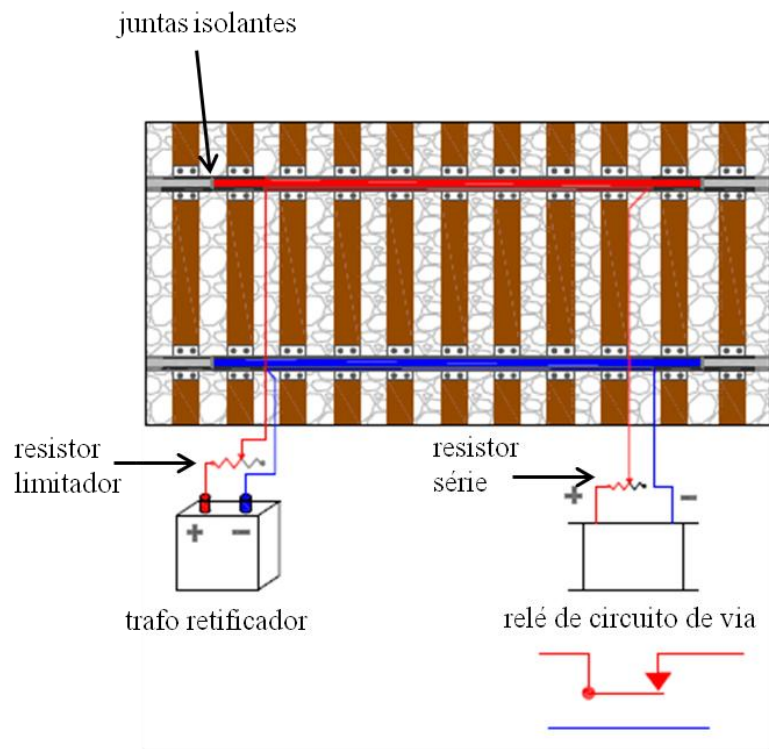


Figura 1: Circuito de via sem a presença de um trem

Na figura 2 mostra um circuito de via operando com a presença do rodeiro de um trem.

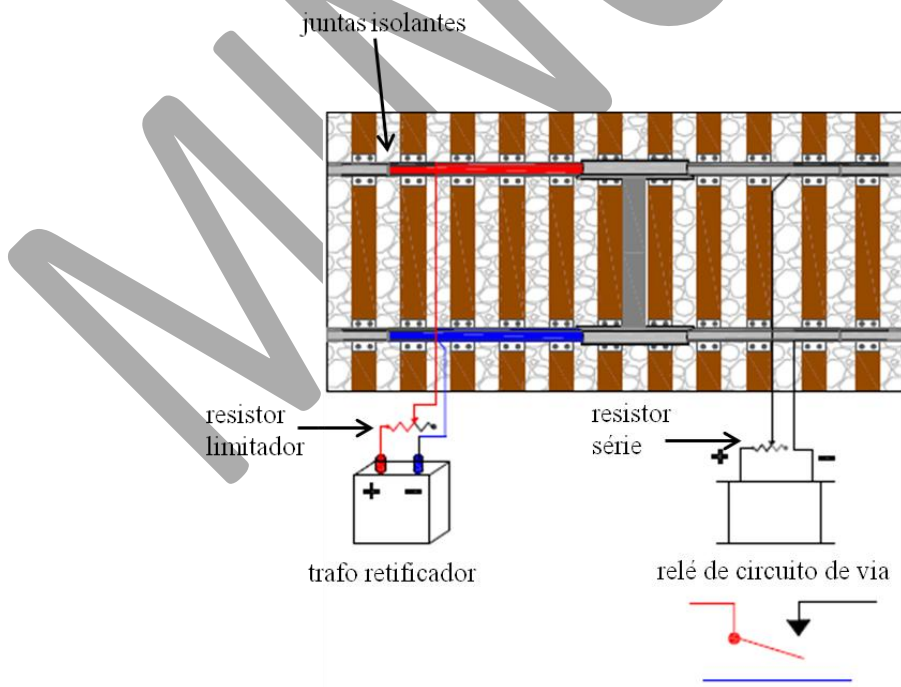


Figura 2: Circuito de via operando com a presença do rodeiro de um trem

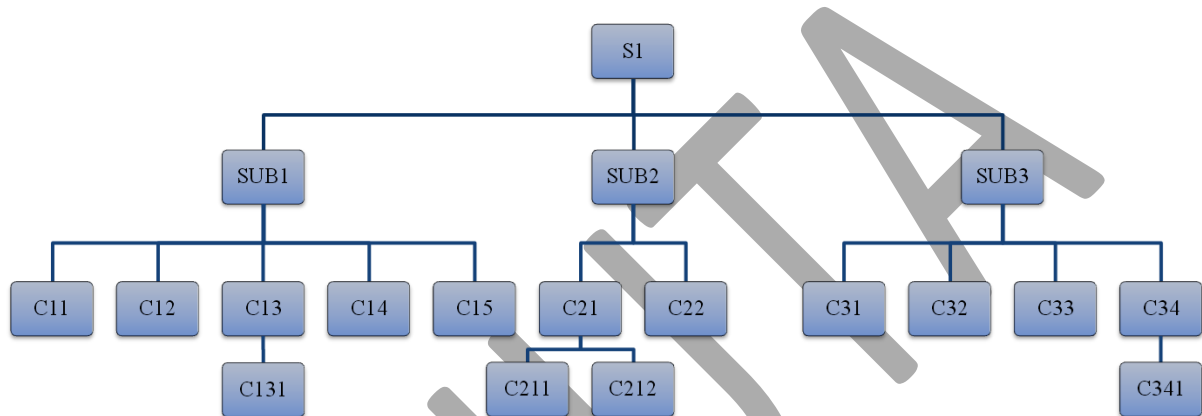
Na figura 1, a corrente circula pelos trilhos, energiza o relé de via e retorna à fonte. O relé de via energizado mantém fechado seu contato frontal (front) e aberto seu contato traseiro (back), indicando que o circuito de via está livre, sem a presença de trem.

Na figura 2, a corrente circula pelos trilhos até o curto-circuito provocado pelo rodeiro do trem e retorna à fonte, passando pela resistência limitadora de corrente. Não há energia no relé de via e este desopera, mantendo seu contato frontal (front) aberto e fechando seu contato traseiro (back). Assim a lâmpada vermelha se acenderá, indicando que o circuito de via está ocupado pela presença de um trem.

1.2. Hierarquização do sistema

O sistema foi dividido em três subsistemas: transmissão, meio de transmissão e recepção.

A figura 3 mostra os subsistemas e seus componentes.



S1	CIRCUITO DE VIA CC
SUB 1	TRANSMISSÃO
SUB 2	MEIO DE TRANSMISSÃO
SUB 3	RECEPÇÃO
COM 11	TRAFORRETIFICADOR
COM 12	BATERIA
COM 13	CABO E FIAÇÃO
COM 131	CONEXÃO E TERMINAL
COM 14	CENTELHADOR
COM 15	RESISTOR LIMITADOR
COM 21	TRILHO
COM 22	LASTRO
COM 211	JUNTA ISOLANTE
COM 212	RAIL BOND
COM 31	RELÉ
COM 32	RESISTOR SÉRIE
COM 33	CENTELHADOR
COM 34	CABO E FIAÇÃO
COM 341	CONEXÃO E TERMINAL

Figura 3: Hierarquização do sistema

2. DETALHANDO AS FUNÇÕES DOS COMPONENTES DOS SUBSISTEMAS

Os subsistemas são compostos pelos seguintes componentes:

- Componente 11 – trafo retificador: tem como função transformar a corrente alternada em contínua e fornecer energia elétrica para alimentação do relé que compõe o circuito de via.
- Componente 12 – bateria: a bateria é ligada em paralelo ao trafo retificador e tem como função suprir o circuito na falta de energia.
- Componente 13 e 34 – cabo e fiação: tem como função conduzir a corrente elétrica.

- d) Componentes 14 e 33 – centelhador: são instalados entre os equipamentos elétricos e as conexões com os trilhos. Tem como função proteger os equipamentos elétricos contra descargas atmosféricas.
- e) Componentes 15 – resistor limitador: é ligado em série tem como função limitar a corrente de curto-circuito gerada no momento em que o rodeiro do trem ocupa o circuito, a fim de proteger o trafo retificador.
- f) Componentes 131 e 341 – conexão e terminal: existem vários tipos de conectores e terminais. Os mais utilizados são: conector com pino tipo canal, conector prensado na alma do trilho e terminal olhal. Estes têm como função permitir a conexão ou desconexão dos cabos e fiação.
- g) Componente 21 – trilho: são instalados em paralelo e isolados entre si e da terra através de dormentes incrustados em um lastro. Tem como função conduzir a corrente elétrica.
- h) Componente 22 – lastro: tem como função isolar os trilhos entre si. Os trilhos são os condutores elétricos e o lastro é a isolação destes condutores.
- i) Componente 211 – junta isolante: tem como função isolar eletricamente dois circuitos de via adjacentes.
- j) Componente 212 – rail bond: tem como função conectar eletricamente os trilhos na região das talas secas (talas de junção).
- k) Componente 31 – relé: tem como função detectar a presença do trem (ocupação do circuito de via) toda vez que for desenergizado, através de seus contatos.
- l) Componente 32 – resistor série: tem como função permitir a regulagem (ajustes) do circuito de via.

2.1. Operações de manutenção do sistema

A tabela 1 apresenta todas as operações realizadas na manutenção do circuito de via de corrente contínua, com ciclo de 30 dias.

Tabela 1: Descrição das atividades de manutenção

DESCRIÇÃO DAS ATIVIDADES
Fazer teste ocupação com shunt padrão 0,06ohm nas extremidades do CDV. Em caso de irregularidade comunicar imediatamente superior imediato.
Examinar conexão/trilho e bondeamento. Se necessário corrigir irregularidade ou programar manutenção abrindo solicitação no sistema.
Fazer a limpeza externa dos invólucros dos relés.
Fazer inspeção da fiação verificando fios desencapados, oxidados, fios de cabo fora do conector. Se necessário corrigir irregularidade ou programar manutenção abrindo solicitação no sistema e fazer teste ocupação.
Fazer teste ocupação com shunt padrão 0,06ohm nas extremidades do CDV. Em caso de irregularidade comunicar imediatamente superior imediato.
Inspeção visual da junta isolante, topo e montagem, comunicar V.P. irregularidades.
Inspeccionar quebras e rachaduras dos relés. Se necessário trocar algum relé shelf, programar manutenção abrindo solicitação no sistema e fazer teste operacional.

Inspeccionar relés quanto à presença de detritos, partes soltas ou frouxas no interior ou vidro quebrado do invólucro. Abrir solicitação para trocar o relé caso constatado e enviar ao laboratório. Fazer teste operacional na troca.
Limpeza e verificar estado geral dos vasos.
Medir tensões no c.v.d e registrar os valores encontrados. Encaminhar os valores encontrados ao responsável técnico da coordenação e engenharia para análise e ajustes se necessário.
Testar isolamento dos cabos externos. Se necessário, corrigir irregularidade ou programar manutenção abrindo solicitação no sistema.
Verificar a presença de oxidação no interior dos relés examinar vedação na parte externa dos mesmos. Abrir solicitação para troca do relé caso constatada e enviar ao laboratório. Fazer teste operacional caso troque o relé.
Verificar acúmulo de oxidação nos trilhos que possa impedir a detecção de trem pelo CDV. Comunicar irregularidade ao ccm caso constatada.
Verificar e registrar tensão sem AC por 15 minutos e tensão de flutuação das baterias. Se necessário corrigir irregularidade ou programar manutenção abrindo solicitação no sistema.
Verificar fiação, conexões e terminais da bateria, do retificador/carregador e led's de status do carregador se houver. Lubrificar terminais da bateria. Se necessário, corrigir irregularidade ou abrir solicitação no sistema para correção.
Verificar nível do eletrólito, completar se necessário.
Verificar polaridade do circuito de via com o circuito adjacente, comunicar irregularidade ao responsável técnico para análise e ajustes se necessário.

3. IDENTIFICAÇÃO DOS MODOS DE FALHAS E SEUS EFEITOS

Segundo LAFRAIA (2001), modo de falha é o conjunto de efeitos pelos quais uma falha é observada.

Foram extraídas do relatório de falhas da MRS todas as principais anomalias detectadas referentes ao sistema objeto deste trabalho “Circuito de Via de Corrente Contínua”.

A tabela 2 apresenta os principais componentes e seus respectivos modos de falhas.

Tabela 2: Modos de Falha extraídos do Discoverer EBS (software utilizado na MRS para controle de manutenção)

COMPONENTE	MODOS DE FALHA
TRAFO RETIFICADOR	ENROLAMENTO ABERTO
	ENROLAMENTO EM CURTO
BATERIA	CURTO CIRCUITO
RESISTOR	ABERTO
CENTELHADOR	CURTO CIRCUITO
CABO E FIAÇÃO	BAIXA ISOLAÇÃO

	PARTIDO
CONEXÕES E TERMINAIS	MAU CONTATO
TRILHO	PARTIDO
	CURTO CIRCUITO
RAIL BOND	PARTIDO
LASTRO	CONTAMINADO/ALAGADO (BAIXA RESISTÊNCIA DE LASTRO)
JUNTA ISOLANTE	CURTO CIRCUITO
RELÉ	BOBINA EM CURTO
	CONTATO COM ALTA RESISTÊNCIA

4. IDENTIFICAÇÃO DOS EFEITOS DAS FALHAS

Foi reunido o grupo de implantação da FMECA e feito um brainstorming para identificação dos efeitos das falhas.

Como se trata de um circuito elétrico fechado, a falha de qualquer um dos componentes acarretará na ocupação do circuito de via.

5. IDENTIFICAÇÃO DAS CAUSAS DAS FALHAS

Para auxiliar na identificação das causas, foi aplicada a ferramenta *FTA (Fault Tree Analysis)* ou *Árvore de Falha*.

A análise de árvore de falhas, permiti calcular a probabilidade de que um evento desejado ocorra de acordo com as probabilidades de falhas das suas causas raiz (LAFRAIA, 2001). É um processo dedutivo e pode ser utilizado para avaliação de riscos (ERICSON, 1999).

A árvore de falhas é montada à partir de um evento topo até os eventos básicos. Seguem as características dos elementos segundo CLEMENS (1993):

- Evento topo: representa o evento a ser estudado, evento previsível e indesejado;
- Evento intermediário: representa um estado do sistema causado pelos eventos básicos;
- Evento básico: falha inicial e que limita a análise;
- Porta lógica OU: produz uma saída verdadeira quando qualquer uma de suas entradas for verdadeira;
- Porta lógica E: produz uma saída verdadeira quando todas as suas entradas forem verdadeiras.

A figura 4 mostra a árvore de falhas do circuito de via de corrente contínua.

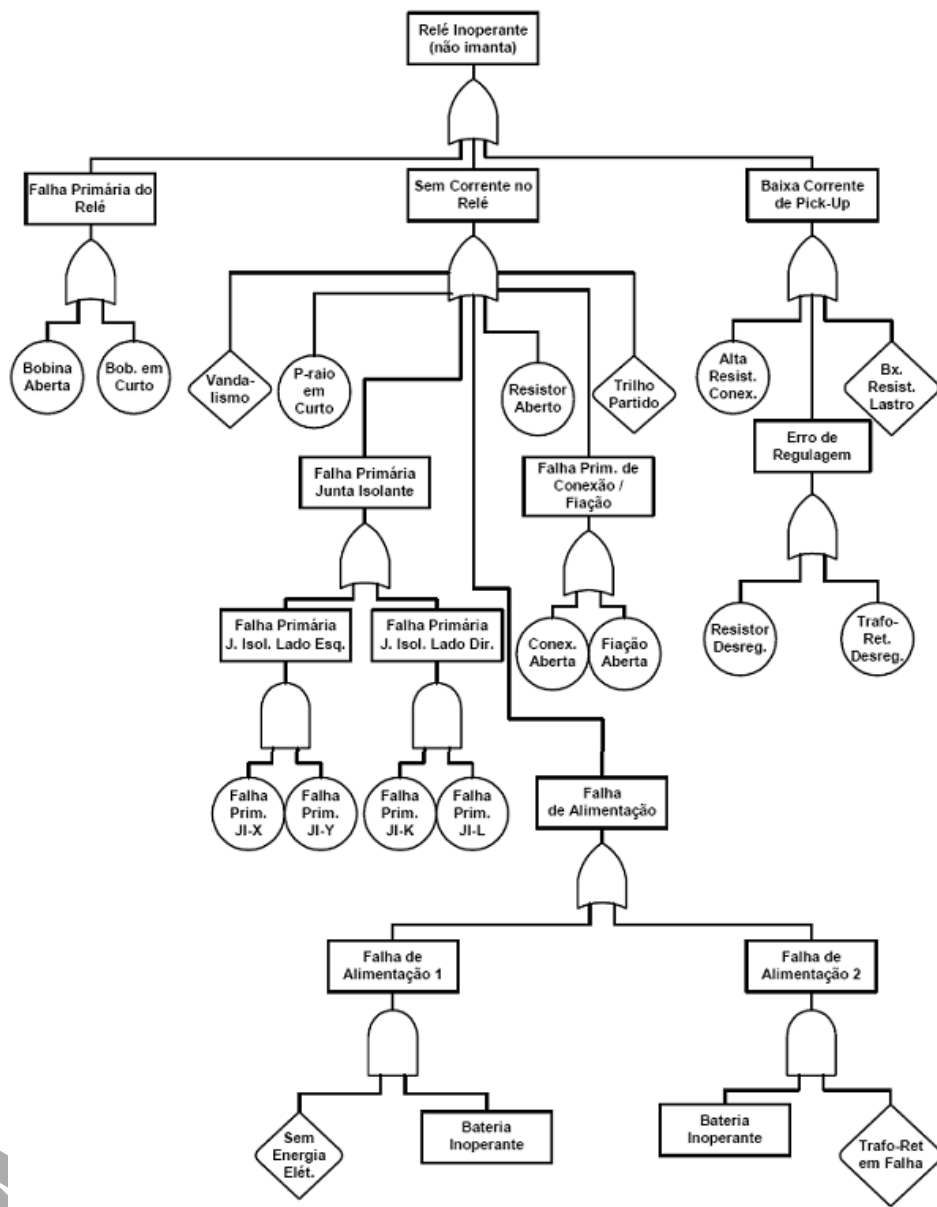


Figura 4: FTA (Fault Tree Analysis) ou *Árvore de Falha*

A tabela 3 mostra os modos, efeitos e as causas detectadas.

Tabela 3: Modos, Efeitos e Causas das Falhas

COMPONENTE	MODO DE FALHA	EFEITOS DA FALHA	CAUSA DA FALHA
TRAFO RETIFICADOR	ENROLAMENTO ABERTO	CIRCUITO DE VIA OCUPADO INDEVIDAMENTE	DESCARGA ATMOSFÉRICA
	ENROLAMENTO EM CURTO		SOBRECORRENTE
BATERIA	CURTO CIRCUITO		SOBRECORRENTE
RESISTOR	ABERTO		SOBRECORRENTE
CENTELHADOR	CURTO CIRCUITO		DESCARGA ATMOSFÉRICA
CABO E FIAÇÃO	BAIXA ISOLAÇÃO		DEGRADAÇÃO DO MATERIAL (VIDA ÚTIL)
	PARTIDO		AÇÃO DE TERCEIROS
CONEXÕES E TERMINAIS	MAU CONTATO		CONEXÃO MAU APERTADA (SOLTA)
			RESÍDUOS CONTAMINANTES (SUJEIRA)
TRILHO	PARTIDO		DEFEITO SUPERFICIAL
			PROCESSO DE FABRICAÇÃO
	CURTO CIRCUITO		ERRO EXECUÇÃO SOLDA ELÉTRICA E ALUMINOTÉRMICA
RAIL BOND	PARTIDO		FECHAMENTO POR OBJETO
			AÇÃO DE TERCEIROS
LASTRO	CONTAMINADO/ALAGADO (BAIXA RESISTÊNCIA DE LASTRO)		CORROSÃO EXCESSIVA
			DEGRADAÇÃO DO LASTRO POR ABRASÃO DEVIDO TRÁFEGO
			BOLSÕES DEVIDO DEFORMAÇÃO DA PLATAFORMA FERROVIÁRIA
			MATERIAL INADEQUADO NO SUBLASTRO
			FALHA NO SISTEMA DE MACRO DRENAGEM
JUNTA ISOLANTE	CURTO CIRCUITO		DEGRADAÇÃO DEVIDO TRÁFEGO
		AMASSAMENTO DA JUNTA	
RELÉ	BOBINA EM CURTO	PERDA MATERIAL ISOLANTE	
	CONTATO COM ALTA RESISTÊNCIA	SOBRECORRENTE	
		RESÍDUOS CONTAMINANTES (SUJEIRA)	

6. IDENTIFICAÇÃO DOS MEIOS PARA DETECÇÃO DAS FALHAS

A tabela 4 mostra os modos de detecção para cada modo de falha.

Tabela 4: Modos de detecção das falhas

COMPONENTE	MODO DE FALHA	EFEITOS DA FALHA	CAUSADA FALHA	MODO DE DETECÇÃO	
TRAFO RETIFICADOR	ENROLAMENTO ABERTO	CIRCUITO DE VIA OCUPADO INDEVIDAMENTE	DESCARGA ATMOSFÉRICA	MEDIÇÃO COM MULTÍMETRO	
	ENROLAMENTO EM CURTO		SOBRECORRENTE		
BATERIA	CURTO CIRCUITO		SOBRECORRENTE		
RESISTOR	ABERTO		SOBRECORRENTE		
CENTELHADOR	CURTO CIRCUITO		DESCARGA ATMOSFÉRICA	MEGAGEM DOS CONDUTORES	
CABO E FIAÇÃO	BAIXA ISOLAÇÃO		DEGRADAÇÃO DO MATERIAL (VIDA ÚTIL)	AÇÃO DE TERCEIROS	INSPEÇÃO VISUAL
	PARTIDO		CONEXÃO MAU APERTADA (SOLTA)	RESÍDUOS CONTAMINANTES (SUJEIRA)	MEDIÇÃO COM MULTÍMETRO
CONEXÕES E TERMINAIS	MAU CONTATO		DEFEITO SUPERFICIAL	PROCESSO DE FABRICAÇÃO	ULTRASOM
			ERRO EXECUÇÃO SOLDA ELÉTRICA E ALUMINOTÉRMICA	FECHAMENTO POR OBJETO	
TRILHO	PARTIDO		AÇÃO DE TERCEIROS	INSPEÇÃO VISUAL	
			CORROSÃO EXCESSIVA	INSPEÇÃO VISUAL	
RAIL BOND	PARTIDO		DEGRADAÇÃO DO LASTRO POR ABRASÃO DEVIDO TRÁFEGO	INSPEÇÃO VISUAL	
			BOLSÕES DEVIDO DEFORMAÇÃO DA PLATAFORMA FERROVIÁRIA		
LASTRO	CONTAMINADO/ALAGADO (BAIXA RESISTÊNCIA DE LASTRO)		MATERIAL INADEQUADO NO SUBLASTRO		
			FALHA NO SISTEMA DE MACRO DRENAGEM		
			DEGRADAÇÃO DEVIDO TRÁFEGO		
JUNTA ISOLANTE	CURTO CIRCUITO		AMASSAMENTO DA JUNTA	TALÍMETRO	
			PERDA MATERIAL ISOLANTE	MEDIÇÃO COM MULTÍMETRO	
RELÉ	BOBINA EM CURTO		SOBRECORRENTE	MEDIÇÃO COM MULTÍMETRO	
	CONTATO COM ALTA RESISTÊNCIA		RESÍDUOS CONTAMINANTES (SUJEIRA)	MEDIÇÃO COM MULTÍMETRO	

7. ANÁLISE DE CRITIDADE

A análise de criticidade ou de risco “é o processo ou procedimento para identificar, caracterizar, quantificar e avaliar os riscos e seu significado” (LAFRAIA, 2001).

O risco pode ser calculado pela seguinte fórmula (LAFRAIA, 2001):

$$\text{RPN} = \text{Peso da Severidade} \times \text{Peso da Frequência} \times \text{Peso da Detecção} \quad (1)$$

em que RPN: (*Risk Priority Number*)

Severidade: gravidade das consequências da falha;

Frequência: quão frequente cada componente falha;

Detecção: a probabilidade de uma falha ser detectada.

Os modos de falhas apresentados na tabela 2 foram extraídos do banco de dados da MRS, do período de janeiro de 2013 a junho de 2015. A figura 5 mostra o gráfico destes modos de falhas.

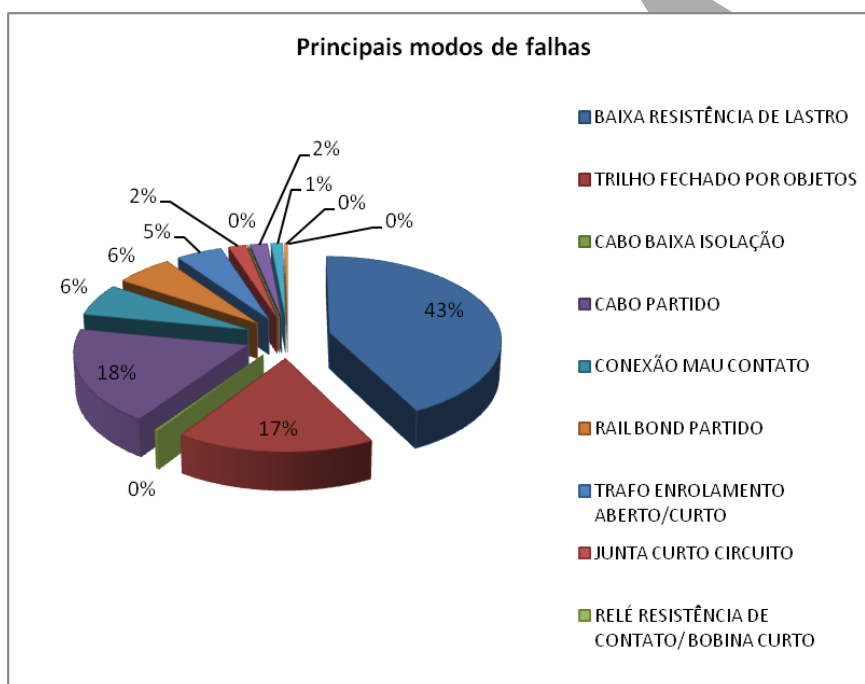


Figura 5: Gráfico dos modos de falhas de 2013 a 2015

Na análise dos modos de falhas, foi identificado um erro no input dos dados quanto ao modo de falha “resistor desregulado”. Este modo de falha foi corrigido e considerado como “baixa resistência de lastro”.

Foram considerados na análise da severidade:

- os efeitos das falhas, levando em consideração o conceito de falha segura (*fail safe*);
- custos de reparo;
- tempo de reparo.

A tabela 6 mostra a matriz de severidade, frequência e detecção.

Tabela 6: Tabela de referência para a análise da criticidade (Adaptado de SEIXAS, 2001)

SEVERIDADE	NEGLIGENTE	BAIXA	MODERADA	ALTA	MUITO ALTA
	1	2 a 3	4 a 6	7 a 8	9 a 10
EFEITO DO MODO DE FALHA	O usuário provavelmente não irá notar a falha	O usuário irá notar uma leve deterioração do desempenho do sistema.	Este modo de falha irá provocar uma certa insatisfação do usuário.	Neste modo irá causar uma alta insatisfação do cliente por exemplo sistema inoperante.	Este modo afeta o sistema de segurança do sistema ou não cumpre as normas do governo.
CUSTO DE REPARO	Sem custo de reparo	Custo até R\$ 500	Custo entre R\$ 500 e R\$ 2.500	Custo entre R\$ 2.500 e 5.000	Custo acima de R\$ 5.000
TEMPO DE REPARO	De 5 a 30 min	De 30 a 60min	De 60 a 90 min	De 90 a 240 min	Acima de 240 min
FREQUÊNCIA	REMOTA	BAIXA	MODERADA	ALTA	MUITO ALTA
	1	2 a 3	4 a 6	7 a 8	9 a 10
FREQUENCIA	Falhas são improváveis.	Poucas falhas.	Falhas Ocasionais.	Falhas repetitivas.	Falhas quase inevitáveis.
	1 a 5%	5 a 15%	15 a 30%	30 a 40%	40 a 50%
EFEITO	MUITO ALTA	ALTA	MODERADA	BAIXA	MUITO BAIXA
	1 a 2	3 a 4	5 a 6	7 a 8	9 a 10
PROBABILIDADE	Procedimento de verificação (FV) do projeto ou controle do processo (CP) em uso que irão certamente detectar falha.	FV ou CP tem uma boa chance de detectar um modo potencial de falha	FV ou CP podem detectar um modo potencial de falha	FV ou CP provavelmente não irá detectar um modo potencial de falha	FV ou CP tem uma probabilidade muito baixa de detectar um modo de falha. FV ou CP não irá detectar um possível modo de falha

8. IDENTIFICAÇÃO DO COMPONENTE CRÍTICO

A tabela 7 apresenta os resultados finais após análise feita pelo grupo multidisciplinar formado por especialistas e técnicos das áreas de eletroeletrônica e via permanente.

Tabela 7: Análise da criticidade – Resultado final

COMPONENTE	MODO DE FALHA	EFEITO	CUSTO REPARO	TEMPO REPARO	SEVERIDADE	FREQUÊNCIA	DETECÇÃO	RPN
TRAFO RETIFICADOR	ENROLAMENTO ABERTO	8	4	1	4	2	10	160
	ENROLAMENTO EM CURTO	8	3	1	4	1	10	80
BATERIA	CURTO CIRCUITO	8	2	1	4	1	10	80
RESISTOR	ABERTO	8	2	1	4	1	10	80
CENTELHADOR	CURTO CIRCUITO	8	2	1	4	1	10	80
CABO E FIAÇÃO	BAIXA ISOLAÇÃO	9	9	4	7	1	1	9
	PARTIDO	8	9	4	7	5	10	400
CONEXÕES E TERMINAIS	MAU CONTATO	8	1	1	3	1	2	16
TRILHO	PARTIDO	9	9	7	8	1	3	27
	CURTO CIRCUITO	8	1	1	3	3	2	48
RAIL BOND	PARTIDO	8	1	1	3	2	2	32
LASTRO	CONTAMINADO/ALAGADO (BAIXA RESISTÊNCIA DE LASTRO)	9	9	8	9	8	6	432
JUNTA ISOLANTE	CURTO CIRCUITO	8	9	7	8	1	3	24
RELE	BOBINA EM CURTO	8	1	1	3	1	9	72
	CONTATO COM ALTA RESISTÊNCIA	8	1	1	3	1	9	72

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através da aplicação da ferramenta FMECA foi identificado que o modo de falha mais crítico do circuito de via de corrente contínua é “lastro alagado/contaminado (baixa resistência de lastro)”.

Após o termino deste trabalho, sugere-se dar continuidade nas análises, com foco no modo de falha mais crítico do sistema, através de levantamentos de campo, para definição de novas estratégias de manutenção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CLEMENS, P. L. Fault Tree Analysis. 4ª edição, 1993. Disponível em www.fault-tree.net.

ERICSON, C. A. Fault Tree Analysis. 1999.

LAFRAIA, J. R. B. Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade. Qualitmark Editora. 2001.

MRS, Acervo técnico e especificações.

SEIXAS, Eduardo de Santana. Failure Mode and Effect Analysis – FMEA. Qalytek - Qualidade, Tecnologia e Sistemas LTDA, 2001.

SUCENA, M. P., Engenharia de Manutenção, Instituto Militar de Engenharia, 2015.

MANUTUA