



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Thiago Marques da Vinha


**Análise da Disponibilidade de Arquiteturas de Automação de Subestações
Elétricas Utilizando os Protocolos PRP e HSR**

Rio de Janeiro

2017

Thiago Marques da Vinha

**Análise da Disponibilidade de Arquiteturas de Automação de Subestações Elétricas
Utilizando os Protocolos PRP e HSR**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Eletrônica, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Redes de Telecomunicações

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Gonçalves Rubinstein

Rio de Janeiro

2017

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

V766 Vinha, Thiago Marques da.
Análise da disponibilidade de arquiteturas de automação de subestações elétricas utilizando os protocolos PRP e HSR / Thiago Marques da Vinha – 2017.
119f.

Orientador: Marcelo Gonçalves Rubinstein.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia Eletrônica. 2. Subestações elétricas - Automação - Dissertações. 3. Automação industrial - Protocolos - Dissertações. I. Rubinstein, Marcelo Gonçalves. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. III. Título.

CDU 621.311.4

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Thiago Marques da Vinha

**Análise da Disponibilidade de Arquiteturas de Automação de Subestações Elétricas
Utilizando os Protocolos PRP e HSR**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Eletrônica, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Redes de Telecomunicações.

Aprovada em 21 de Fevereiro de 2017.

Banca Examinadora:

Prof. D. Sc. Marcelo Gonçalves Rubinstein (Orientador)
Faculdade de Engenharia - UERJ

Prof. Ph.D. Célio Vinicius Neves de Albuquerque
Universidade Federal Fluminense - UFF

Prof. D. Sc. Rodrigo de Souza Couto
Faculdade de Engenharia - UERJ

Rio de Janeiro

2017

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família e aos meus amigos, bases imprescindíveis na minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Marcelo G. Rubinstein, meu orientador, por transmitir os conceitos de forma clara e objetiva na pós-graduação e por justificar o título de orientador durante a elaboração desta dissertação, me incentivando sempre a buscar o melhor neste trabalho.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica da UERJ e a todos os professores que proporcionaram esta excelente oportunidade de aprendizado.

Agradeço aos amigos de classe que me ajudaram a transpor as dificuldades naturais de uma pós-graduação.

Agradeço à minha família pela ideia transmitida desde a minha infância de que o conhecimento nunca é demais.

Agradeço à minha esposa Laura Maria pela paciência e constante lembrança de que nada é impossível se nos esforçarmos.

Agradeço aos meus amigos, em especial ao Alessandro Bunn por fazer com que eu não desistisse no meio do caminho.

Agradeço à Petrobras e aos gestores deste período por permitirem que eu fizesse esta pós-graduação e além de permitirem, por me incentivarem a concluir a mesma.

Por fim, mas não menos importante, agradeço a todos os colegas de trabalho que me auxiliaram durante este tempo, em especial ao Jorge Esposte que foi o maior incentivador para que eu iniciasse e continuasse no mestrado, ao Carlos Cavaliere que me auxiliou na busca pela instituição e ao Marcelo Borges que me mostrou o que é automação de sistemas elétricos e me incentiva todos os dias a buscar excelência em tudo que faço.

RESUMO

VINHA, Thiago Marques da. *Análise da disponibilidade de arquiteturas de automação de subestações elétricas utilizando os protocolos PRP e HSR*. 2017. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

A automação industrial vem sendo bastante utilizada em subestações elétricas. Nesse contexto, a norma IEC 61850 prevê a utilização de redundância na camada de enlace, de forma a aumentar a probabilidade de recepção dos quadros. Dois protocolos descritos na IEC 62439-3 têm esta finalidade: o PRP (*Parallel Redundancy Protocol*) e o HSR (*High-availability Seamless Redundancy*). O objetivo desta dissertação é analisar a disponibilidade de quatro arquiteturas de automação de subestações elétricas sem a utilização de protocolos de redundância da camada de enlace e com a utilização dos protocolos PRP e HSR. O método do diagrama de blocos foi utilizado para todas as arquiteturas e posteriormente os cálculos de MTTF e disponibilidade foram realizados. Análises de sensibilidade para todos os componentes, em todas as arquiteturas, complementam o estudo. Os cálculos demonstram que em 100% dos casos, a utilização dos protocolos PRP e HSR aumenta a disponibilidade das arquiteturas analisadas. Os cálculos demonstram ainda que a utilização dos protocolos de redundância aliada ao reparo durante a missão permite classificar todas as arquiteturas na mais alta classe de disponibilidade de acordo com a CEI IEC 870-4. A análise de sensibilidade dos componentes demonstra que, independente do protocolo utilizado, a disponibilidade com reparo das arquiteturas é muito sensível à disponibilidade de fontes de alimentação, baias de controle da unidade, interfaces Ethernet e *switches*.

Palavras-chave: Disponibilidade; Arquitetura; Automação; Protocolo; PRP; HSR.

ABSTRACT

VINHA, Thiago Marques da. *Availability analysis of power substation automation architectures using PRP and HSR protocols*. 2017. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

Industrial automation has been widely used in power substations. In this context, the IEC 61850 standard provides for the utilization of redundancy in the data link layer, in order to increase the frame reception probability. Two protocols described in IEC 62439-3 have this goal: PRP (Parallel Redundancy Protocol) and HSR (High-availability Seamless Redundancy). This dissertation aims to evaluate the availability of four power substation automation architectures without the utilization of data link layer redundancy protocols and with the utilization of PRP and HSR protocols. The reliability block diagram method was used for all architectures and afterwards the MTTF and availability calculations were performed. Sensitivity analysis for all components, in all architectures, complements the study. The calculations demonstrate that in 100% of the cases, the utilization of PRP and HSR increases the availability of the analyzed architectures. The calculations demonstrate yet that the utilization of redundancy protocols allied to the repair during the mission allows classifying all architectures in the higher availability class according to the CEI IEC 870-4. The sensitivity analysis of the components demonstrates that, independent of the protocol that was used, the availability with repair of the architectures is very sensitivity to the availability of the power supply, bay control units, Ethernet interfaces, and switches.

Keywords: Availability; Architecture; Automation; Protocol; PRP; HSR.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Diagrama unifilar típico de uma UEP. | 21 |
| Figura 2 - Exemplo de arquitetura de automação do sistema elétrico..... | 23 |
| Figura 3 - Modelagem de dados da IEC 61850..... | 28 |
| Figura 4 - Arquitetura do sistema de configuração de arquivos de linguagem SCL..... | 32 |
| Figura 5 - Comunicação horizontal entre IEDs através de GOOSE..... | 33 |
| Figura 6 - Comunicação vertical com troca de mensagens entre cliente-servidor através de MMS..... | 34 |
| Figura 7 - Exemplo de rede redundante utilizando PRP com duas LANs distintas..... | 38 |
| Figura 8 - DANP comunicando através do protocolo de camada de enlace PRP. | 39 |
| Figura 9 - Quadro PRP estendido pelo RCT. | 40 |
| Figura 10 - Configuração de rede em anel para tráfego <i>multicast</i> utilizando o protocolo de camada de enlace HSR. | 42 |
| Figura 11 - Configuração de rede em anel para tráfego <i>unicast</i> utilizando o protocolo de camada de enlace HSR. | 42 |
| Figura 12 - Estrutura do DANH. | 43 |
| Figura 13 - Formato do quadro HSR. | 45 |
| Figura 14 - Exemplo de árvore de falhas em que o evento de topo é uma falha de comunicação na rede. | 49 |
| Figura 15 - Exemplo de árvore de evento em que o evento inicial é a falha de um <i>switch</i> | 50 |
| Figura 16 - Exemplo de <i>tie-sets</i> | 51 |
| Figura 17 - Exemplo de modelo de estados de Markov. | 52 |
| Figura 18 – RDB de dois componentes em série. | 53 |
| Figura 19 – RDB de dois componentes em paralelo. | 54 |
| Figura 20 -Arquitetura 1 utilizada na avaliação. | 58 |
| Figura 21 - Arquitetura 2 utilizada na avaliação. | 58 |
| Figura 22 - Arquitetura 3 utilizada na avaliação. | 59 |
| Figura 23 - Arquitetura 4 utilizada na avaliação. | 59 |
| Figura 24 - RBD da Arquitetura 1 sem utilizar o protocolo PRP..... | 61 |
| Figura 25 - RBD da Arquitetura 1 utilizando o protocolo PRP. | 62 |
| Figura 26 - RBD da Arquitetura 2 sem utilizar o protocolo PRP..... | 62 |
| Figura 27 - RBD da Arquitetura 2 utilizando o protocolo PRP. | 63 |
| Figura 28 - RBD 1 da Arquitetura 3 sem utilizar o protocolo PRP..... | 63 |

| | |
|--|----|
| Figura 29 - RBD 1 da Arquitetura 3 utilizando o protocolo PRP..... | 63 |
| Figura 30 - RBD 2 da Arquitetura 3 sem utilizar o protocolo PRP..... | 64 |
| Figura 31 - RBD 2 da Arquitetura 3 utilizando o protocolo PRP..... | 64 |
| Figura 32 - RBD 1 da Arquitetura 4 sem utilizar o protocolo HSR..... | 65 |
| Figura 33 - RBD 1 da Arquitetura 4 utilizando o protocolo HSR..... | 65 |
| Figura 34 - RBD 2 da Arquitetura 4 sem utilizar o protocolo HSR..... | 65 |
| Figura 35 - RBD 2 da Arquitetura 4 utilizando o protocolo HSR..... | 65 |
| Figura 36 - RBD 3 da Arquitetura 4 sem utilizar o protocolo HSR..... | 66 |
| Figura 37 - RBD 3 da Arquitetura 4 utilizando o protocolo HSR..... | 66 |
| Figura 38 - MTTF das arquiteturas avaliadas..... | 76 |
| Figura 39 - Indisponibilidade sem reparo das arquiteturas avaliadas..... | 78 |
| Figura 40 - Indisponibilidade com reparo das arquiteturas avaliadas..... | 79 |
| Figura 41 - MTTF com reparo das arquiteturas avaliadas..... | 80 |
| Figura 42 - Análise de sensibilidade à FAC..... | 84 |
| Figura 43 - Análise de sensibilidade ao CI..... | 85 |
| Figura 44 - Análise de sensibilidade à IHM..... | 86 |
| Figura 45 - Análise de sensibilidade ao SCCR..... | 86 |
| Figura 46 - Análise de sensibilidade à BCU..... | 87 |
| Figura 47 - Análise de sensibilidade à IE..... | 88 |
| Figura 48 - Análise de sensibilidade ao SWE..... | 89 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Grupos de nós lógicos..... | 29 |
| Tabela 2 – Relações entre tipo de mensagens, aplicação e protocolo utilizado..... | 35 |
| Tabela 3 - MTTFs dos componentes utilizados na análise..... | 74 |

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|--------------|--|
| A com reparo | Disponibilidade com reparo |
| A sem reparo | Disponibilidade sem reparo |
| ARP | <i>Address Resolution Protocol</i> |
| BCU | Baia de Controle da Unidade |
| BPDU | <i>Bridge Protocol Data Unit</i> |
| BT | Baixa Tensão |
| CA | Corrente Alternada |
| CC | Corrente Contínua |
| CCM | Centro de Controle de Motores |
| CDC | Centro de Distribuição de Cargas |
| CI | Computador Industrial |
| CID | <i>Configured IED Description</i> |
| CLP | Controlador Lógico Programável |
| DANH | <i>Doubly Attached Node with HSR Protocol</i> |
| DANP | <i>Double Attached Node Implementing PRP</i> |
| DCS | <i>Distributed Control System</i> |
| FAC | Fonte de Alimentação CC |
| FPGA | <i>Field Programmable Gate Array</i> |
| GGIO | <i>Generic General I/O</i> |
| GOOSE | <i>Generic Object Oriented Substation Event</i> |
| HSR | <i>High-availability Seamless Redundancy</i> |
| IE | Interface Ethernet |
| IED | <i>Intelligent Electronic Device</i> |
| IEC | <i>International Electrotechnical Commission</i> |
| ICD | <i>IED Capability Description</i> |
| IHM | Interface Homem-Máquina |
| IP | <i>Internet Protocol</i> |
| LAN | <i>Local Area Network</i> |
| LD | <i>Logical Device</i> |
| LN | <i>Logical Node</i> |

| | |
|-----------------|---|
| LRE | <i>Link Redundancy Entity</i> |
| LSDU | <i>Link Service Data Unit</i> |
| MAC | <i>Medium Access Control</i> |
| MMS | <i>Manufacturing Message Specification</i> |
| MMTF | <i>Mean Time To Failure</i> |
| MT | Média Tensão |
| MTTF com reparo | <i>Mean Time To Failure</i> com reparo |
| MMTR | <i>Mean Time To Repair</i> |
| OSI | <i>Open Systems Interconnection</i> |
| PLC | <i>Programmable Logic Controller</i> |
| PMS | <i>Power Management System</i> |
| psi | <i>Pound per Square Inch</i> |
| PTP | <i>Precision Time Protocol</i> |
| PRP | <i>Parallel Redundancy Protocol</i> |
| QR | <i>Quick Removing</i> |
| RBD | <i>Reliability Block Diagram</i> |
| RCT | <i>Redundancy Check Trailer</i> |
| RSTP | <i>Rapid Spanning Tree Protocol</i> |
| SAN | <i>Singly Attached Node</i> |
| SCCR | Servidor de Controle Central da Rede |
| SCD | <i>Substation Configuration Description</i> |
| SCL | <i>Substation Configuration Language</i> |
| SDCD | Sistema Digital de Controle Distribuído |
| Sntp | <i>Simple Network Time Protocol</i> |
| SSD | <i>System Specification Description</i> |
| STP | <i>Spanning Tree Protocol</i> |
| SV | <i>Sampled Values</i> |
| SWE | <i>Switch Ethernet</i> |
| TC | Transformador de Corrente |
| TCP | <i>Transmission Control Protocol</i> |
| TP | Transformador de Potencial |
| UEP | Unidade Estacionária de Produção |
| VLAN | <i>Virtual Local Area Network</i> |

| | |
|-------|---------------------------------|
| VRing | <i>Virtual Ring</i> |
| VSD | <i>Variable Speed Drive</i> |
| XML | <i>Extended Markup Language</i> |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| INTRODUÇÃO | 15 |
| 1 SISTEMAS ELÉTRICOS DE UNIDADES ESTACIONÁRIAS DE PRODUÇÃO | 20 |
| 2 A NORMA IEC 61850 | 26 |
| 2.1 Modelo de Dados | 27 |
| 2.2 Linguagem de Configuração | 30 |
| 2.3 Pilha de Protocolos e Tipos de Mensagem | 32 |
| 3 PROTOCOLOS DE REDUNDÂNCIA DA CAMADA DE ENLACE | 36 |
| 3.1 RSTP | 36 |
| 3.2 PRP | 37 |
| 3.3 HSR..... | 41 |
| 3.4 Comparativo PRP x HSR..... | 45 |
| 4 MÉTODOS PARA O CÁLCULO DA DISPONIBILIDADE..... | 48 |
| 4.1 O Método da Árvore de Falhas | 48 |
| 4.2 O Método da Árvore de Eventos..... | 50 |
| 4.3 O Método <i>Cut-Set</i> | 51 |
| 4.4 O Método de Markov | 52 |
| 4.5 O Método RBD | 53 |
| 5 AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE DE ARQUITETURAS UTILIZANDO OS PROTOCOLOS DE REDUNDÂNCIA PRP E HSR | 55 |
| 5.1 Arquiteturas de Automação de Subestações | 55 |
| 5.1.1 <u>Componentes de automação das subestações</u> | 56 |
| 5.1.2 <u>Arquiteturas utilizadas na avaliação</u> | 57 |
| 5.2 Diagramas de Bloco de Confiabilidade | 60 |
| 5.3 Índices de Disponibilidade..... | 66 |
| 5.4 Cálculos de Disponibilidade | 68 |
| 5.5 Resultados | 74 |
| 5.5.1 <u>MTTF</u> | 75 |
| 5.5.2 <u>Indisponibilidade sem reparo</u> | 76 |
| 5.5.3 <u>Indisponibilidade com reparo</u> | 78 |
| 5.5.4 <u>MTTF com reparo</u> | 80 |
| 5.5.5 <u>Discussões dos Resultados</u> | 81 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 6 | ANÁLISE DE SENSIBILIDADE AOS COMPONENTES UTILIZADOS | 83 |
| 6.1 | Resultados | 83 |
| 6.1.1 | <u>Discussões dos Resultados</u> | 89 |
| 7 | CONCLUSÕES | 91 |
| | Trabalhos Futuros | 93 |
| | REFERÊNCIAS | 94 |
| | ANEXOS | 98 |
| | Anexo A – MEMÓRIA DE CÁLCULO DAS AVALIAÇÕES DA DISPONIBILIDADE DAS ARQUITETURAS | 98 |
| | Anexo B – MEMÓRIA DE CÁLCULO DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE | 108 |

INTRODUÇÃO

A automação industrial e mais especificamente, a automação de sistemas elétricos, atualmente é largamente difundida nas indústrias que utilizam energia elétrica em seus processos. Um exemplo de sistema elétrico que depende fortemente da atuação da automação é o sistema elétrico de Unidades Estacionárias de Produção (UEPs), ou as subestações que operam em UEPs.

A preocupação por questões de segurança, meio-ambiente e saúde está contribuindo decisivamente para uma mudança de hábitos de projeto, construção e montagem dos sistemas elétricos de UEPs e da indústria em geral. Aliado a isso, a alta demanda mundial por petróleo e seus derivados de óleo e gás, aumentam a necessidade de se ter um sistema elétrico específico UEPs cada vez mais estável e confiável. Especificamente no Brasil, as descobertas de reservas de petróleo acompanharam o aumento de demanda por esta riqueza e seus derivados.

As reservas brasileiras de petróleo, em sua grande maioria, se encontram em campos marítimos. Foi a partir de 1968 que o Brasil começou a desenvolver tecnologia para a produção em mar, com a descoberta do campo de Guaricema, no Sergipe, em poço pioneiro localizado em lâmina d'água de 28 m. Através de investimentos em levantamentos sísmicos, geológicos e gravimétricos, iniciou-se uma expedição em maiores profundidades (acima de 100 m) na Bacia de Campos, no início da década de 1970 [MORAIS, 2013]. A partir de 1984 e 1985 foram descobertos os campos gigantes de Albacora e Marlim, respectivamente, em águas acima de 500 m e utilizando uma nova tecnologia à época no país, plataformas de perfuração com posicionamento dinâmico. Já no final da década de 1980 descobria-se o campo gigante de Barracuda com lâminas d'água até além dos 1000 m. Com avanços cada vez mais significativos em termos de pesquisa, exploração e produção, e perfurações de poços em águas marítimas ultra-profundas de mais de 2000 m, foram alcançados reservatórios em 2007 em rochas do pré-sal, ou seja, após a camada do sal, proporcionando maior acúmulo de riquezas minerais ao país [MORAIS, 2013]. No entanto, a tecnologia embarcada nas plataformas, na busca por petróleo, demanda do sistema elétrico da UEP, uma maior confiabilidade para a manutenção da produção contínua. A operação contínua do sistema elétrico evita a perda de rendimentos por *downtime*, ou tempo de indisponibilidade operacional, que acarreta direta e indiretamente, em perdas nos investimentos feitos. Neste sentido, o custo do *downtime*, ou seja, da perda de produção, é altíssimo, devido aos custos inerentes ao processo de exploração e produção e devido ao valor perdido de petróleo não

explorado. É necessário, então, um sistema inteligente de automação que garanta maior confiabilidade ao sistema elétrico.

Segundo Lopes et al. (2012), a inteligência de um sistema de comunicação está na capacidade dos dispositivos se comunicarem com fins de tornarem a rede mais segura e eficiente. Automação Industrial (2016) e Silveira e Q. Lima (2003) salientam que “automação industrial é a aplicação de técnicas, *softwares*, e/ou equipamentos específicos” que traz dentre tantos benefícios, eficiência, segurança, menor custo e maior produção. Obviamente, os benefícios de um sistema elétrico automatizado variam direta e proporcionalmente à medida que este sistema influencia nos sistemas de processo. No caso de uma plataforma estacionária de produção, uma parada não programada dos sistemas de processos pode causar transtornos do ponto de vista técnico, econômico e ambiental. Daí pode-se compreender a importância que o sistema elétrico industrial de uma plataforma tem como sistema auxiliar dos sistemas de processo existentes, sendo necessários sistemas de automação com alta disponibilidade e confiáveis, tendo como vantagens a melhoria da qualidade do fornecimento de energia, o menor (ou nulo) tempo de interrupção, o comando por salas de controle remotas das cargas existentes e um menor custo operacional com maior segurança para os operadores e instalações [SOUZA, 2011].

Verificou-se ao longo do tempo uma evolução na automação industrial que paralelamente foi seguida de perto pela automação de sistemas elétricos de UEPs. Na década de 1940 o controle dos sistemas industriais era manual e dependia diretamente do operador. Em meados da década de 1960 surgia o sinal pneumático de 3 a 15 psi e o sinal elétrico analógico de 4 a 20 mA quando os sistemas ainda eram totalmente distribuídos e locais, ou seja, não havia uma concentração dos dados obtidos. Entre as décadas de 1960 e 1970 nasce a sala de controle e o controle passa a ser remoto. Mais tarde, próximo da década de 1980, o sistema passa a ser totalmente centralizado com o controle remoto e os sinais elétricos analógicos dominam o mercado. Mas a partir da década de 1980 até os anos 2000 a tendência passou aos sistemas parcialmente distribuídos com SDCD/DCS (Sistema Digital de Controle Distribuído/*Distributed Control System*) ou com o CLP/PLC (Controlador Lógico Programável/*Programmable Logic Controller*), mais usual nos sistemas elétricos. Dos anos 2000 até os dias atuais, o controle tem a tendência a voltar a ser totalmente distribuído com sinais puramente digitais e desenvolvem-se as chamadas redes de campo (redes de computadores utilizadas nos processos) [VIEIRA, 2006].

Com o advento das redes de campo, surgiu o interesse na camada de enlace, por proporcionar a possibilidade de redundância e consequente aumento da confiabilidade das

redes de automação dos sistemas elétricos em geral, e em particular de UEPs. No contexto de redes industriais elétricas, a norma IEC 61850 vem desempenhando papel preponderante no que tange à padronização e interoperabilidade entre diversos fabricantes. Lopes et al. (2012) e Miranda (2009), dentre outros, destacam a história da criação da norma IEC 61850 assim como seus benefícios e os desafios que ainda existem na implementação da norma em diversos segmentos da indústria. Outra norma importante dentro do contexto de confiabilidade das redes de automação de subestações elétricas é a IEC 62439-3 (2016), que é referenciada na IEC 61850. A parte 8-1 da norma IEC 61850 (2011) descreve os requisitos para operação entre dispositivos para promoção da interoperabilidade, detalhando como criar e trocar mensagens. Neste sentido, a Tabela 4 da IEC 61850-8-1 (2011) determina os serviços e protocolos no Perfil-T para cliente/servidor TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*). O Perfil-T representa os protocolos e acordos referentes às quatro camadas inferiores do modelo de referência OSI (*Open Systems Interconnection*), ou seja, as camadas de Transporte, de Rede, de Enlace e Física. No contexto de redundância de enlace, a Tabela 4 recomenda ainda os protocolos PRP (*Parallel Redundancy Protocol*) e HSR (*High-availability Seamless Redundancy*) abordados na norma IEC 62439-3 (2016), além do protocolo RSTP (*Rapid Spanning Tree Protocol*) abordado no padrão IEEE Std. 802.1D (2004).

Diversos autores analisam topologias de automação de diversas configurações como anel, barramento ou estrela, implementando protocolos PRP e HSR na camada 2. Este é o caso de Tan e Luan (2011) que observam que algumas aplicações requerem implementação de HSR/PRP no nível do IED (*Intelligent Electronic Device*) para assegurar confiabilidade da proteção relacionada à transmissão de dados e que implementações baseadas em HSR irão prevalecer no futuro devido a excelente desempenho e custo. García et al. (2012) também estudam os protocolos HSR e PRP focando em uma implementação em máquinas virtuais para comprovação do tempo zero de recuperação dos protocolos. São diversas as variáveis que possibilitam a escolha entre utilizar ou não os protocolos de camada de enlace e entre utilizar o protocolo HSR ou o PRP. Dentre estas variáveis podemos destacar a complexidade da rede, o custo, o tempo de recuperação, a funcionalidade da implementação transparente para camadas superiores, o tráfego de dados; e cada uma destas características são mais ou menos importantes a depender do tipo e criticidade da rede industrial a ser projetada ou analisada. Nos casos de redes industriais elétricas de UEPs, um dos fatores mais críticos é a continuidade operacional e, em função disso, talvez uma das características mais importantes que as instalações de redes devem atender é abordada neste trabalho: a disponibilidade. De

acordo com a norma ISO 14224 (2016), disponibilidade significa item em operação em um determinado instante.

Diversos métodos podem ser utilizados para calcular a disponibilidade de um determinado sistema. O bloco de diagramas de confiabilidade ou RBD (*Reliability Block Diagram*) é um método bastante difundido em que seu desenvolvimento é o primeiro passo no cálculo da disponibilidade de um determinado sistema. O RBD ilustra as conexões lógicas entre os componentes, descrevendo a função do sistema. Hajian-Hoseinabadi (2013) desenvolve o RBD de nove tipos distintos de arquiteturas de automação de subestações utilizando diversos índices para esta análise e afirma que a metodologia analisada no artigo também pode ser estendida para a análise com HSR e PRP. Kanabar e Sidhu (2009) e Zhang, Portillo e Kezunovic (2006) também se utilizam do método RBD para análises de arquiteturas de automação de subestações.

Como objetivo, este trabalho visa apresentar de forma resumida as normas IEC 61850 e IEC 62439-3 (2016), que aborda os protocolos de redundância PRP e HSR. Para efeito de exemplo, o primeiro capítulo visa demonstrar um sistema elétrico típico que pode utilizar protocolos de redundância na rede de automação: o sistema elétrico de uma UEP, e seus componentes. Outro alvo de estudo da dissertação é a comparação de arquiteturas que não utilizam os protocolos de camada de enlace com arquiteturas que utilizam os protocolos PRP e HSR, desta forma, procura-se conhecer a real utilidade destes protocolos na disponibilidade dos sistemas de automação de subestações elétricas. Como complemento desta análise de disponibilidade, uma análise de sensibilidade aos componentes utilizados é realizada.

Esta dissertação está dividida em seis capítulos. No Capítulo 1 apresenta-se uma breve explanação de como é estruturado um sistema elétrico de uma UEP padrão com as definições de equipamentos e níveis de tensão. No Capítulo 2 é apresentado o estado da arte da norma IEC 61850 que é o padrão utilizado em automação de sistemas elétricos (principalmente em média tensão) e que referencia os protocolos da camada de enlace estudados neste trabalho. O Capítulo 3 aborda a norma IEC 62439, parte 3 (2016) e conseqüentemente os protocolos PRP e HSR que são o cerne da solução no que diz respeito à disponibilidade destes sistemas. O Capítulo 4 descreve alguns métodos utilizados no cálculo de disponibilidade e o Capítulo 5 apresenta efetivamente a análise de disponibilidade de quatro arquiteturas genéricas que se utilizam dos protocolos PRP e HSR. O Capítulo 5 visa apresentar os resultados da análise de disponibilidade para as mesmas arquiteturas com e sem o uso de protocolos de redundância. Adicionalmente, no Capítulo 6, uma análise de sensibilidade aos componentes utilizados é

realizada para estas arquiteturas. As conclusões e os trabalhos futuros finalizam esta dissertação, em conjunto com os anexos que mostram os cálculos utilizados nas análises.

1 SISTEMAS ELÉTRICOS DE UNIDADES ESTACIONÁRIAS DE PRODUÇÃO

Este capítulo apresenta a estrutura de um sistema elétrico de uma UEP padrão, contendo equipamentos e níveis de tensão utilizados.

Sistemas elétricos de UEPs geralmente são divididos em cinco níveis de tensão, dois em MT (Média Tensão), iguais ou acima de 1000 V, e três em BT (Baixa Tensão), abaixo de 1000 V. Qualquer sistema elétrico pode ser representado através de um diagrama unifilar geral que demonstra os principais equipamentos e interligações das três fases de um sistema elétrico através de uma única linha. Cargas de potência representativas são alimentadas pelos CDCs (Centros de Distribuição de Cargas) de MT, como compressores de gás, bombas de injeção de água, motores com potência acima de 1200 kW, além de transformadores que rebaixam a tensão para outros níveis. O segundo nível de tensão que pode ser considerado é o de 4,16 kV, que alimenta as cargas dos CCMs (Centros de Controle de Motores) de MT, como motores com potência entre 150 kW e 1200 kW. No nível de BT pode haver cargas alimentadas em 480 V, 220 V e 127 V como tomadas simples e cargas de navegação, além de outras demandas de produção e do próprio sistema elétrico, como cargas auxiliares de turbogeração. Alguns exemplos de cargas que são utilizadas em UEPs são: aquecedores anti-condensação, analisadores de instrumentação e iluminação normal e de emergência. Na Figura 1 pode-se verificar um diagrama unifilar típico de uma UEP onde são demonstradas as interligações entre os principais equipamentos de uma subestação e da indústria elétrica, como painéis, transformadores, motores, geradores movidos à turbina (turbogeradores) e disjuntores. Outros detalhes e equipamentos foram suprimidos deste diagrama unifilar para melhor entendimento.

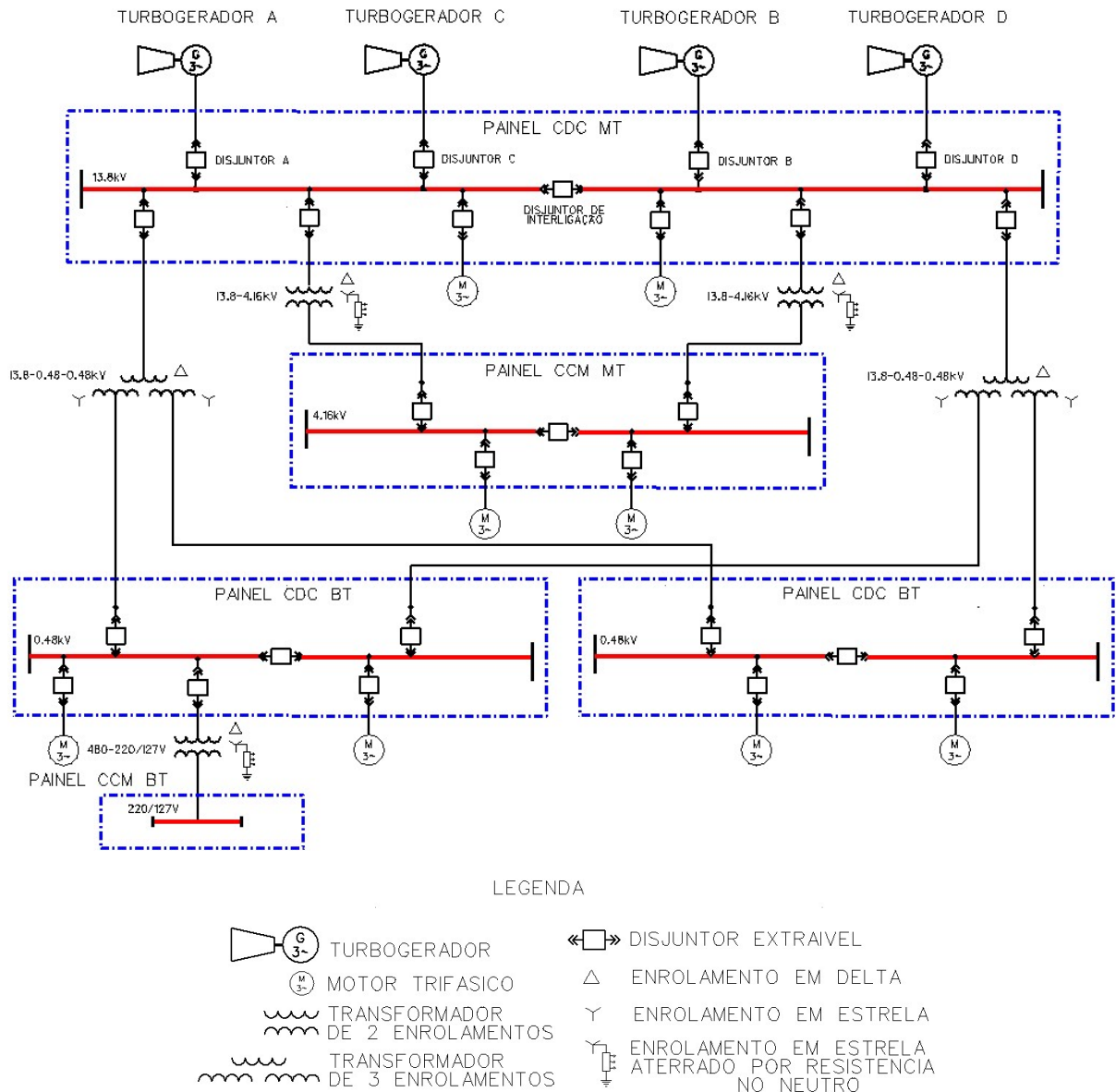


Figura 1 - Diagrama unifilar típico de uma UEP.

Neste contexto, cada equipamento elétrico desempenha um papel importante no sistema elétrico: o gerador, por exemplo, é um dos principais equipamentos de uma instalação industrial elétrica. Existem inúmeros tipos de geradores: geradores de CC (corrente contínua), geradores de CA (corrente alternada), chamados alternadores, que podem ser do tipo assíncrono, ou o mais comum, do tipo síncrono. [FITZGERALD et al., 2006].

O gerador também se diferencia por sua máquina primária ou máquina motriz que, basicamente, transmite força girante ao rotor do gerador. Este acionador pode ser de baixa velocidade, como uma turbina hidráulica, utilizada em usina hidrelétrica, de velocidade moderada, que é o caso de motores a gasolina, óleo diesel, gás ou vapor, e de alta velocidade

como em turbinas a vapor ou a gás, normalmente utilizadas em plantas petroquímicas e UEPs [KOSOW, 2005].

Outro equipamento fundamental em qualquer planta industrial elétrica é o painel elétrico. Os painéis elétricos são divididos em painéis de MT e painéis de BT e podem ainda ser denominados CDCs, formados por colunas que contém disjuntor extraível, equipamentos de controle, medição e proteção, tais como IEDs, TCs (Transformadores de Corrente) e TPs (Transformadores de Potencial). Normalmente os CDCs são alimentados por geradores ou transformadores que interligam outros painéis principais. A função principal deste tipo de painel é distribuir a energia elétrica a outras cargas maiores como motores principais da planta ou a outros painéis secundários, como os CCMs. Normalmente os CCMs são alimentados pelos CDCs e são painéis formados por cubículos e disjuntores associados a dispositivos de controle, medição e proteção, cuja função principal é alimentar e controlar cargas elétricas, como motores da UEP.

Os disjuntores são equipamentos que têm por objetivo, interromper e restabelecer correntes elétricas, seja por motivos de segurança, como num caso de um curto-circuito, seja por motivos operacionais, como manobras. Normalmente, os disjuntores que operam na indústria são acompanhados dos relés elétricos, que são responsáveis por enviar o comando de abertura ou fechamento aos disjuntores. Uma característica importante do disjuntor é a função de interrupção do arco elétrico que é definido como o caminho condutor que se forma num meio fortemente ionizado. Desta forma, existem diversos tipos de disjuntores construídos para a extinção do arco elétrico e interrupção de correntes: disjuntor a óleo, disjuntor a sopro magnético, disjuntor a vácuo, disjuntor a SF₆, disjuntor a arco comprimido [FILHO, 2005].

O transformador de potência também exerce papel importante nos sistemas elétricos. É o equipamento que transforma energia elétrica de um determinado nível de tensão para outro mais elevado ou mais baixo. Também define e limita a corrente de curto-circuito do secundário. Este fenômeno ocorre por meio de indução eletromagnética entre circuitos, sendo mais comum em UEPs, os transformadores com dois circuitos (primário e secundário) e com três circuitos (primário, secundário e terciário). Quanto ao meio isolante, os transformadores podem ser feitos em líquido isolante (óleo) ou a seco. Os transformadores podem ter seus enrolamentos de fases ligados em triângulo ou delta, em estrela ou em zig-zague [FILHO, 2005].

Os motores elétricos são as principais cargas em uma UEP. Existem diversos tipos de motores: de corrente contínua, motores síncronos, servomotores, e os mais utilizados no mundo, os motores de indução eletromagnética. O princípio ativo do motor de indução, como

o próprio nome diz, é o da indução eletromagnética. No motor de indução, a corrente alternada é aplicada nos enrolamentos do estator e, por consequência, correntes são induzidas no rotor. O motor de indução pode ser entendido como um transformador, que transforma a energia elétrica do estator, em energia cinética no rotor por meio da ação eletromagnética [FITZGERALD et al., 2006]. Em UEPs, os motores elétricos são frequentemente utilizados para acionamento de bombas e compressores, capazes de produzir escoamento de óleo, gás e seus derivados.

Com o aumento dos níveis de segurança, meio-ambiente e saúde, as especificações técnicas de equipamentos e das diversas integrações necessárias no sistema elétrico requerem um alto nível de automação, desde intertravamentos entre disjuntores e chaves seccionadoras até o controle de quanto cada gerador deve fornecer de potência ativa e reativa. Portanto, foi necessário que o sistema elétrico passasse por uma automatização, e com isso, novos componentes foram integrados ao sistema elétrico, de maneira a aumentar o controle e o monitoramento dos equipamentos elétricos e seus processos relacionados. Na Figura 2, um exemplo genérico de uma arquitetura de automação de sistema elétrico e seus diversos componentes utilizados é demonstrado. Outros detalhes foram suprimidos desta arquitetura para melhor entendimento.

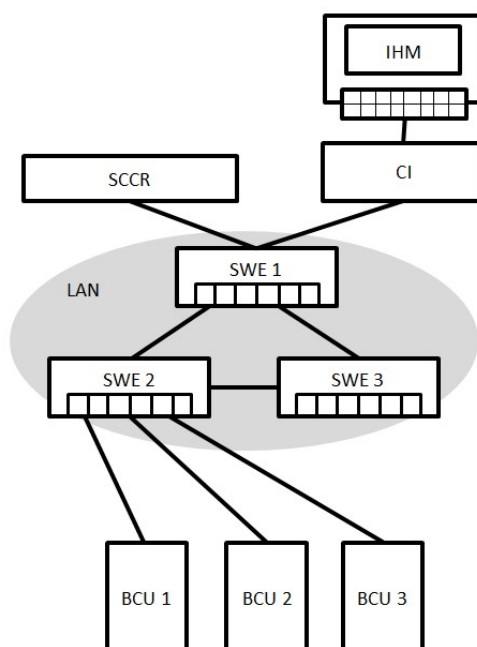


Figura 2 - Exemplo de arquitetura de automação do sistema elétrico.

O Computador Industrial (CI) é o equipamento que processa todas as informações de automação dos sistemas elétricos. As principais diferenças para um computador pessoal são as

entradas e saídas analógicas e digitais que um computador comum não tem e a robustez física e de processamento própria para o ambiente industrial. É comum utilizar um CLP para esta função, que nada mais é do que um computador baseado em microprocessador que tem a capacidade de controlar processos através de *softwares* especializados. Os CLPs podem executar diversas funções como “operações lógicas, sequencialização, temporização, computação numérica, armazenamento de procedimentos para controle e controle em rede” [MIRANDA, 2009].

Os CLPs podem acionar ou controlar saídas em função de entradas e toda esta lógica de acionamento pode ser desenvolvida através de *software*, determinando a sequência de acionamento. Dentre as vantagens destes equipamentos, o Programa Prodenge [PROGRAMA PRODENGE] cita baixo consumo de energia elétrica, confiabilidade, flexibilidade, facilidade de programação e facilidade de interface com outros CLPs e computadores. A estrutura básica de um CLP é composta pelas entradas e saídas que podem ser do tipo analógicas ou digitais e pela unidade central de processamento; no entanto, outros componentes como a memória e a fonte de energia também fazem parte do equipamento. Os módulos de entrada e saída são compostos por conjuntos de 8 ou 16 bits a depender do tipo de unidade de processamento e tanto as entradas quanto as saídas analógicas contam com módulos de conversão de sinal analógico para digital (ou vice-versa) [PROGRAMA PRODENGE].

A IHM (Interface Homem-Máquina) é a interface que torna possível o ser humano interagir com a máquina ou sistema. Em muitos casos, a IHM pode ser entendida como a tela (e todos os componentes de *hardware* e *software* inerentes) que permite esta interação, seja através de teclado e *mouse*, seja através do toque (*touchscreen*), ou por outros métodos. Na indústria, a IHM permite monitorar e controlar, com a ajuda do CI, a planta industrial. É normal que as IHMs tenham controle de acesso através de senhas para garantir a segurança da instalação. Em sistemas elétricos, as IHMs normalmente mostram o diagrama unifilar elétrico contendo os dados elétricos de cada barramento (painéis), disjuntores, geradores e cargas como motores que alimentam bombas e compressores, por exemplo.

O equipamento que opera em paralelo com o CLP na Figura 2 é o SCCR (Servidor de Controle Central da Rede). O servidor é um computador com recursos de *hardware* mais potentes do que um computador comum e, na área industrial, com requisitos a mais de segurança, tanto física quanto cibernética. O servidor se comunica com outros computadores através de uma rede [DELL, 2016].

Os servidores servem, sobretudo, para realizar conexões externas ao sistema que está instalado, seja através da Internet ou através de uma rede corporativa. No caso da Figura 2, o

SCCR tem como um dos principais objetivos o fornecimento de acesso a dados e controle a uma Central da Rede, que frequentemente está fisicamente distante do sistema elétrico. Em casos de UEPs, já existem unidades marítimas que podem ser monitoradas, ou mesmo controladas, de uma Central de Rede em terra, proporcionando maior segurança aos operadores. Outra função do servidor é a de fornecer sincronização de tempo para a rede, através de protocolos como o SNTP (*Simple Network Time Protocol*) e o PTP (*Precision Time Protocol*), mencionados pela IEC 61850.

Com a finalidade de interligar os diversos equipamentos de automação dos sistemas elétricos, são utilizados os meios de transmissão guiados: os cabos coaxiais, os cabos de pares trançados, as fibras ópticas, que vêm se tornando o padrão de meio físico em automação de sistemas elétricos, e os *switches*, que permitem a comunicação de dados em uma rede.

A IEC 61850 denomina de nível de *bay*, o nível na automação de sistemas elétricos em que estão localizados os equipamentos de proteção e controle. Neste sentido, a BCU (Baía de Controle da Unidade) pode ser entendida como o conjunto de equipamentos frequentemente localizados no painel, que engloba disjuntores, TCs, TPs e, dentre outros componentes, um dos principais, o IED. O IED é a evolução dos relés que antigamente eram mecânicos; é o relé digital moderno, que atualmente pode ser microprocessado.

Mais especificamente em relação à automação do sistema elétrico, com o aumento da demanda por confiabilidade, os dispositivos denominados relés microprocessados, ou IEDs, agrupam diversas funções de proteção elétricas em um único equipamento (exemplo: funções de sobrecorrente instantânea e temporizada). Os IEDs ainda são capazes de acionar disjuntores ou outros dispositivos e servem também como nós na rede de comunicação, possibilitando a troca de mensagens com o SCCR e com a IHM/CI.

Devido aos fatores mencionados, com a alta demanda mundial por petróleo, questões de segurança, meio-ambiente e saúde, mais o alto custo de exploração e produção, abriu-se uma nova perspectiva para as instalações elétricas de plataformas que suportam todos os processos inerentes às atividades desta área. Requerendo uma maior confiabilidade, o sistema elétrico em questão e outros passaram obrigatoriamente a necessitar de requisitos mais expressivos de monitoramento e controle. Surgiu então uma norma que tem como um dos principais objetivos prover interoperabilidade entre equipamentos de diversos fabricantes distintos, reduzindo a quantidade de cabos na instalação e proporcionando menores tempos de atuação: a IEC 61850.

2 A NORMA IEC 61850

No contexto de serviços de automação de sistemas elétricos, as indústrias e os fabricantes desta área devem estar em conformidade com a norma IEC 61850, denominada: “*Communication networks and systems for power utility automation*”. A norma IEC 61850, parte 1, IEC 61850-1 (2013), tem como objetivos, dentre outros:

- especificar, através de uma linguagem, informação que trafega entre IEDs e informação da topologia completa de um sistema elétrico (diagrama unifilar);
- especificar uma sintaxe e semântica de comunicação baseada no uso de objetos relacionados ao sistema elétrico;
- especificar protocolos que sejam abertos;
- ser flexível permitindo que novas funcionalidades sejam adicionadas.

Desta forma, a norma IEC 61850 abrange desde plantas hidroelétricas até redes de Média Tensão, passando por centros de controle, subestações de potência, dentre outras aplicações. A norma está dividida em 10 partes: as partes 1 a 5 apresentam os requisitos gerais, demonstrando quais são os termos e definições da norma, o escopo de aplicação, os objetivos e as funções e aplicações que abrangem desde subestações e controle de rede até energia hídrica e eólica. A linguagem de configuração é demonstrada na parte 6, em que se apresenta uma gramática que possibilita associar elementos e atributos. O principal capítulo da parte 6 diz respeito à linguagem de configuração SCL (*Substation Configuration Language*), que contém elementos de sintaxe que vão desde a descrição da subestação, até a descrição do IED e do sistema de comunicação propriamente dito, propiciando uma padronização entre todos os equipamentos de uma rede de comunicação de dados. A parte 7, dos princípios, inclui um guia de aplicação, nós lógicos e classes de dados, dentre outras características da norma que são mais bem detalhadas na Seção 2.1 dessa dissertação. Na parte 8 consta a definição de como trocar informação entre componentes do sistema. Esta parte demonstra ainda diversos modelos, dentre eles, dos dispositivos lógicos, dos nós lógicos, dos objetos e atributos de dados, dentre outros que são necessários à comunicação de dados padronizada. A parte 9 também determina a troca de informações, no entanto, com foco entre sensores e IEDs, tratando principalmente do modelo de transmissão da mensagem denominada SV (*Sampled Value*), que normalmente é portadora de sinais analógicos de equipamentos de medição instalados no painel elétrico. Por fim, a parte 10 aborda os testes

necessários para garantia de qualidade, mencionando a metodologia de teste, os procedimentos e os resultados aceitáveis.

Segundo Mackiewicz (2006), algumas das grandes vantagens que fazem a norma IEC 61850 ser amplamente utilizada são, dentre outras:

- eliminação de ambiguidades com a padronização da configuração através de uma linguagem;
- custo de instalação reduzido com a redução de fios: não há mais necessidade de uma grande quantidade de fios nos relés, com a implementação da rede;
- custo com configuração reduzido, pois já não é mais necessária a configuração manual em cada ponto da rede, reduzindo os erros e o retrabalho;
- interoperabilidade, que permite a utilização de fabricantes diferentes na mesma rede, através da padronização preconizada pela norma.

2.1 Modelo de Dados

Com a crescente utilização de várias funções pelos IEDs, entendeu-se que era necessária a criação de um modelo de dados, ou uma representação lógica dos equipamentos e componentes do sistema elétrico baseado numa estrutura de dados orientada a objeto. Desta forma, a norma IEC 61850-7-1 (2011) definiu um modelo de dados que é desdobrado desde o dispositivo físico até um determinado atributo de dados, conforme a Figura 3.

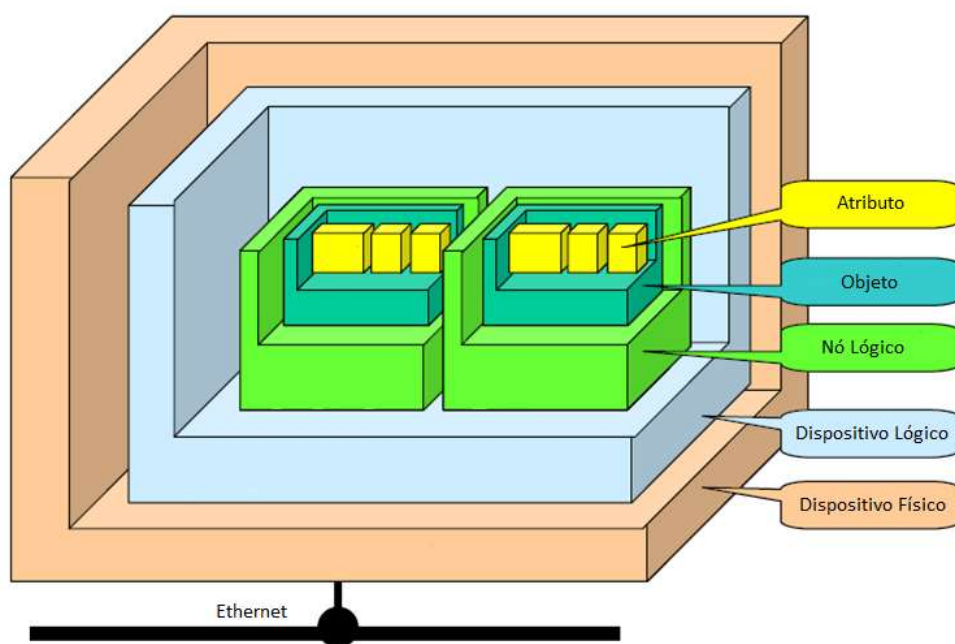


Figura 3 - Modelagem de dados da IEC 61850.

Fonte: Adaptado de IEC 61850-1 (2013).

O dispositivo físico é um equipamento ou componente real do sistema elétrico que se conecta à rede e é desdobrado em um ou mais dispositivos lógicos, também chamados de LDs (*Logical Devices*). Os dispositivos lógicos são então desdobrados em nós lógicos, também chamados LNs (*Logical Nodes*), que correspondem à menor entidade capaz de trocar informações. Ou seja, diversos nós lógicos formam um dispositivo lógico. Os nós lógicos são classificados em grupos de nós lógicos que correspondem às mais variadas aplicações, conforme a Tabela 1 [IEC 61850-7-1, 2011]. Estes grupos possuem, por sua vez, diversas classes de nós lógicos associadas, por exemplo, para o grupo de nó lógico P (Funções de Proteção) há várias classes possíveis: subtensão (PTUV), elemento direcional (PDIR), dentre outros; já para o grupo de nó lógico M (Medição), há outras classes como harmônicos e inter-harmônicos (MHAI), medição operativa e indicativa (MMXU), e assim por diante.

Tabela 1 – Grupos de nós lógicos.

| INDICADOR DO GRUPO | GRUPOS DE NÓS LÓGICOS |
|--------------------|--|
| A | Controle Automático |
| C | Controle Supervisório |
| D | Recursos de Energia Distribuída |
| F | Blocos Funcionais |
| G | Referências de Funções Genéricas |
| H | Energia Hidráulica |
| I | Arquivamento e Interface |
| K | Equipamentos mecânicos e não-elétricos primários |
| L | Nós lógicos do Sistema |
| M | Medição |
| P | Funções de Proteção |
| Q | Relacionados à detecção de Eventos de Qualidade de Energia |
| R | Funções relacionadas à Proteção |
| S | Supervisão e Monitoramento |
| T | Transformadores e Sensores |
| W | Energia Eólica |
| X | Disjuntores / Seccionadores |
| Y | Transformadores de Potência e funções relacionadas |
| Z | Outros Equipamentos do Sistema de Potência |

Os nós lógicos, por sua vez, se desdobram em objetos que são compostos por atributos. Um objeto poderia, portanto, ser a posição de um disjuntor e o atributo o estado da posição (aberto ou fechado). Cada objeto segue, portanto, uma hierarquia e semântica

associadas; assim, utiliza-se o formato: *DispositivoLógico.NóLógico.ObjetodeDados.AtributodeDados* [LOPES et al., 2012].

Uma das principais vantagens da norma IEC 61850 são seus requisitos intrínsecos de interoperabilidade. Nesse sentido, é preponderante que o usuário utilize os LNs listados na norma, evitando a utilização do GGIO (*Generic General I/O*), LN que não é pré-configurado nos dispositivos.

Como se pode verificar, existem inúmeras funções que podem estar localizadas em um dispositivo único, enquanto funções lógicas, ou em diversos dispositivos físicos (como por exemplo, funções de proteção em IEDs). Assim, a função localizada em nós físicos distintos que se utiliza de vários nós lógicos chama-se função distribuída [APOSTOLOV e PAULINO, 2012]. Um exemplo de função distribuída é a função de proteção composta por dois nós lógicos, em que o nó lógico XCBBR (disjuntor) fica localizado em um IED e o nó lógico TCTR (transformador de corrente) fica localizado em outro IED.

2.2 Linguagem de Configuração

Um dos principais objetivos da norma IEC 61850 é a padronização de linguagem entre diversos fabricantes. Esta linguagem de configuração padronizada está especificada na parte 6 da norma e é denominada SCL, uma linguagem baseada em XML (*Extended Markup Language*). A linguagem SCL permite que se configure IEDs com segurança e confiabilidade, a fim de garantir a interoperabilidade entre fabricantes [LOPES et al., 2012].

A norma IEC 61850-6 (2009) especifica a linguagem SCL que é composta por arquivos de configuração, cada um com sua função específica na configuração do sistema:

- SSD (*System Specification Description*): descreve os dados gerais do sistema elétrico, como diagrama unifilar, funcionalidade de automação e proteção, como os nós lógicos. A configuração é feita através do arquivo .ssd;

- SCD (*Substation Configuration Description*): descreve a configuração da subestação, incluindo o fluxo de dados de comunicação e uma seção para descrição da subestação;

- ICD (*IED Capability Description*): descreve as pré-configurações do IED, com funções que podem ser utilizadas por este dispositivo. Este arquivo .icd é normalmente fornecido pelo fabricante do IED;

- CID (*Configured IED Description*): descreve as configurações de determinado IED, com funções dos dados fornecidos pelos LNs. O próprio usuário pode parametrizar estas funções no dispositivo através do arquivo .cid.

Através da Figura 4 pode-se visualizar a arquitetura do sistema de configuração, em que se utilizam os diversos arquivos de configuração apresentados anteriormente. Lopes et al. (2012) descrevem cinco passos segundo a norma IEC 61850-6 (2009):

- Passo 1: dados como o diagrama unifilar e os nós lógicos são disponibilizados para o configurador do sistema (engenheiro responsável por configurar os parâmetros do sistema), no formato .ssd;

- Passo 2: o configurador do sistema também recebe o arquivo .icd de pré-configuração do IED;

- Passo 3: o configurador do sistema gera então o arquivo .scd que servirá como base para o configurador do IED (engenheiro responsável por configurar os parâmetros do IED);

- Passo 4: o configurador do IED gera o formato .cid para cada IED específico e envia esta informação ao local de trabalho de engenharia (computador onde são feitas as configurações);

- Passo 5: o arquivo .cid é distribuído local (diretamente ao IED) ou remotamente (através de um *gateway* de subestação) pelo local de trabalho de engenharia.

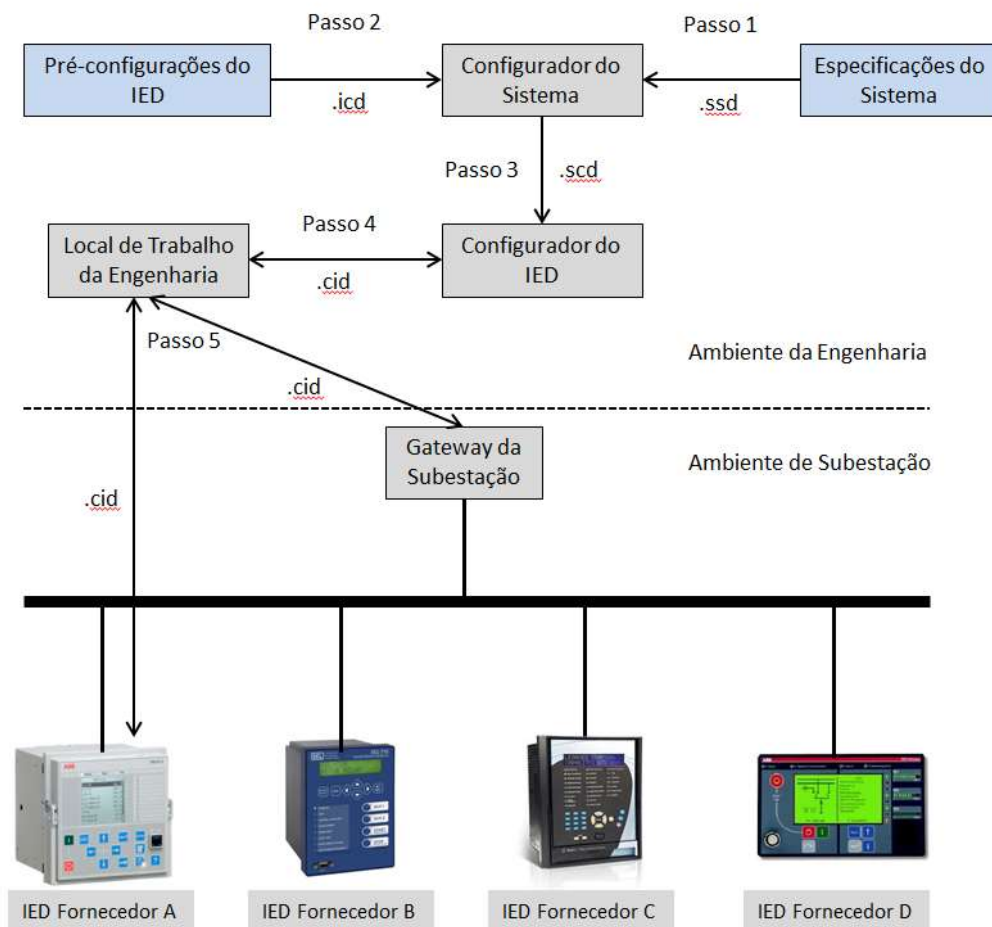


Figura 4 - Arquitetura do sistema de configuração de arquivos de linguagem SCL.

Fonte: Adaptado de IEC 61850-6 (2009).

2.3 Pilha de Protocolos e Tipos de Mensagem

A norma IEC 61850 determina dois principais tipos de mensagens que se diferenciam quanto ao tempo: as mensagens que não têm restrição de tempo e as mensagens com alta restrição de tempo. As mensagens que demandam uma alta restrição de tempo são mapeadas diretamente na camada de enlace; caso das mensagens referentes aos protocolos de redundância apresentados no Capítulo 3. É também o caso das mensagens SV e GOOSE (*Generic Object Oriented Substation Event*). As mensagens SV são de alta prioridade e correspondem a amostragens de transdutores de tensão e corrente como TCs e TPs. As mensagens GOOSE são mensagens de alta prioridade e alta velocidade que são utilizadas para comandos de *trip* e intertravamentos, importantes comandos para a automação do sistema

elétrico, no entanto, as mensagens GOOSE não são implementadas a nível de transdutores e sim a nível de IEDs. Miranda (2009) descreve as mensagens GOOSE como mensagens enviadas em *multicast* e que cada IED ao recebê-las, deve determinar o emissor da mensagem GOOSE e se esta mensagem é de seu interesse. Por ser implementada diretamente na camada de enlace, permite maior rapidez na comunicação, pois não trabalha a nível de aplicação, como é o caso de mensagens sem criticidade de tempo; no entanto, perde em confiabilidade, já que não há confirmação de recepção de mensagens. A mensagem GOOSE é orientada a eventos e baseada no envio assíncrono de variáveis binárias. As mensagens GOOSE são utilizadas para comunicação horizontal, de IED para IED, conforme a Figura 5.

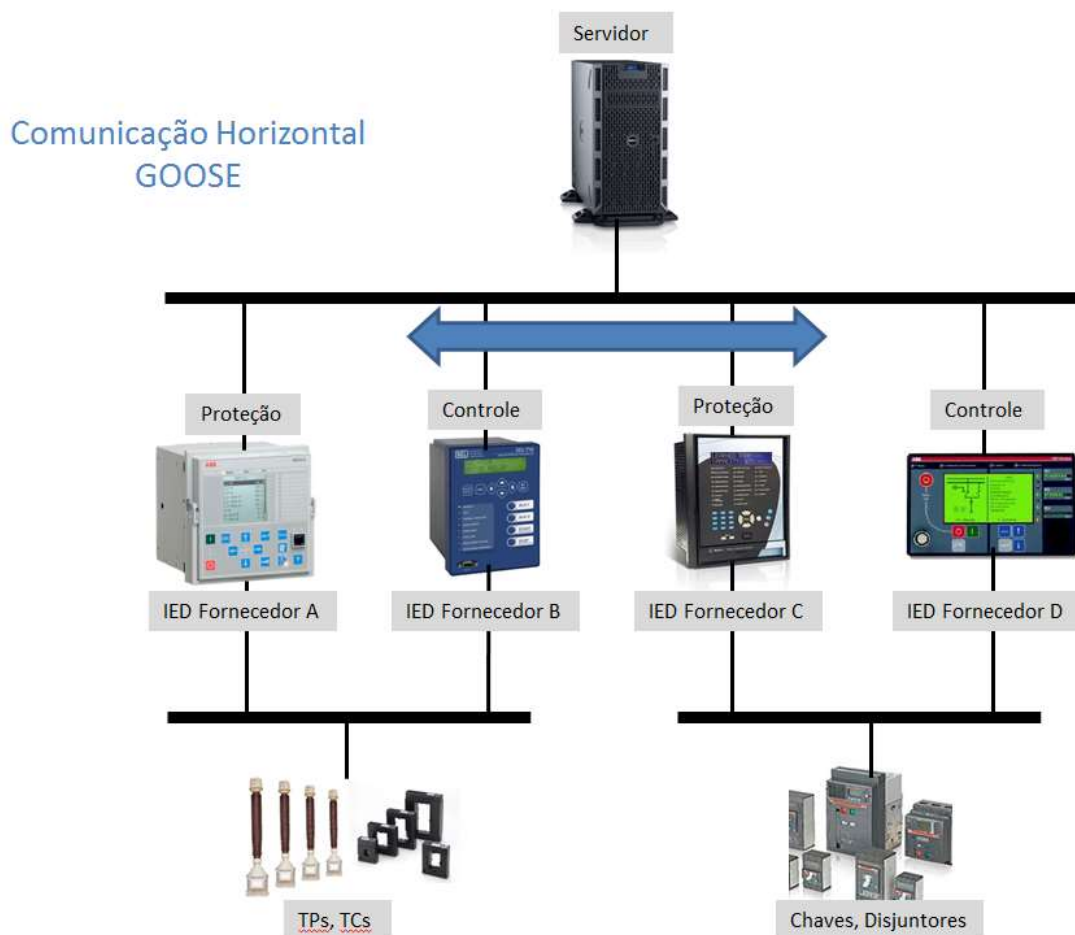


Figura 5 - Comunicação horizontal entre IEDs através de GOOSE.

Fonte: Adaptado de Lopes et al. (2012).

Dentre as mensagens que não tem restrição de tempo destacam-se as mensagens *TimeSync* que servem para sincronizar todos os equipamentos na mesma base de tempo e as

mensagens MMS (*Manufacturing Message Specification*). Estas mensagens são do tipo cliente-servidor e utilizam toda a pilha de protocolos. As mensagens MMS trabalham sobre TCP/IP e servem para transmitir alarmes menos críticos, medições de energia elétrica dos IEDs para as estações de controle, dentre outras aplicações que não requerem uma maior velocidade de comunicação. As mensagens MMS são utilizadas para comunicação vertical de IED para as estações de controle, conforme a Figura 6.

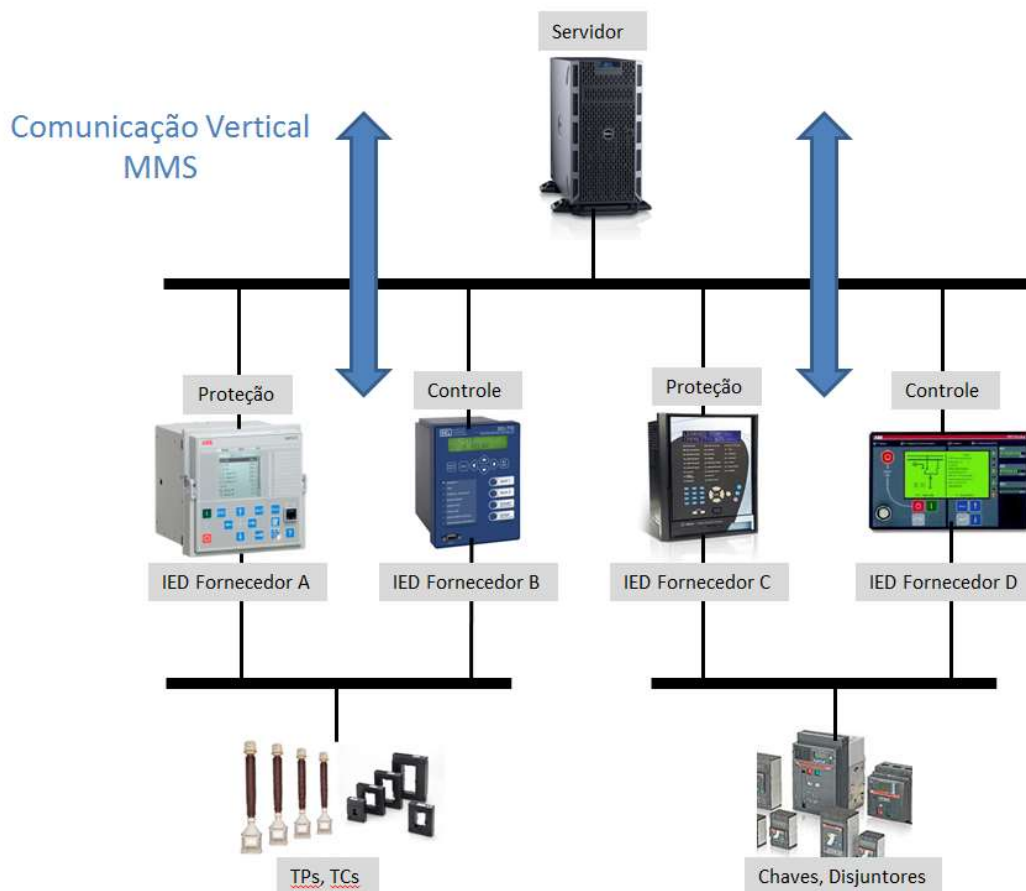


Figura 6 - Comunicação vertical com troca de mensagens entre cliente-servidor através de MMS.

Fonte: Adaptado de Lopes et al. (2012).

Diante do contexto tempo x aplicação, a IEC 61850-5 (2013), além de determinar todas as funcionalidades relacionadas a cada LN, também determina os tipos de mensagens relacionados a cada aplicação e protocolo utilizados. Desta forma, as mensagens do tipo 1 são denominadas mensagens rápidas (de proteção), as mensagens do tipo 2 são mensagens de velocidade média, as do tipo 3 são mensagens de velocidade baixa, as do tipo 4 são usadas para rajada de dados da saída de instrumentos como TCs e TPs, as do tipo 5 são utilizadas

para funções de transferência de arquivos e as do tipo 6 são mensagens de comando e transferência de arquivos com controle de acesso (autenticação de usuário). A IEC 61850-5 (2013) também determina os tempos máximos de transferência para cada aplicação, por exemplo, para *trips* normalmente utiliza-se 3 ms como valor máximo de tempo de transferência da mensagem. A Tabela 2 apresenta as relações entre tipo de mensagem, aplicação e protocolo utilizado.

Tabela 2 – Relações entre tipo de mensagens, aplicação e protocolo utilizado.

| Tipo | Exemplo de Aplicação | Protocolo Utilizado |
|------------------------------|--|----------------------------|
| 1- Mensagens Rápidas | Informações de <i>trips</i> | GOOSE |
| 2- Velocidade Média | Informações entre subestações | MMS |
| 3- Velocidade Baixa | Informações de funções de auto-controle | MMS |
| 4- Rajada de Dados | Informações de dados de instrumentos | SV |
| 5- Transferência de Arquivos | Informações na transferência de arquivos grandes | MMS |
| 6- Sincronização de Tempo | Informações de sincronização de tempo | TimeSync |
| 7- Mensagem de comando | Informações de comandos da IHM | MMS |

Fonte: Adaptado de 61850-5 (2013).

A parte 8-1 da norma IEC 61850 (2011) descreve os requisitos para operação entre dispositivos para promoção da interoperabilidade, detalhando como criar e trocar mensagens. Neste sentido, dois tipos de perfis são apresentados: o perfil A (*Application Profile*) que engloba as camadas de Aplicação, Apresentação e Seção e o perfil T (*Transport Profile*) que engloba as camadas de Transporte, Rede, Enlace e Física. No contexto de redundância de enlace, a Tabela 4 da IEC 61850-8-1 (2011), intitulada “Serviços e protocolos para Perfil-T cliente/servidor TCP/IP” recomenda os protocolos PRP e HSR abordados na norma IEC 62439-3 (2016), além do protocolo RSTP abordado no padrão IEEE Std. 802.1D (2004). Os protocolos de redundância da camada de enlace recomendados pela IEC 61850 são apresentados no Capítulo 3 dessa dissertação.

3 PROTOCOLOS DE REDUNDÂNCIA DA CAMADA DE ENLACE

Os protocolos PRP e HSR são protocolos da camada de enlace, que objetivam a redundância de quadros de dados em redes. Ambos protocolos são abordados por normas específicas da IEC (*International Electrotechnical Commission*).

Tanto o protocolo HSR, quanto o PRP, ambos recomendados pela norma IEC 61850 (2013), são especificados pela norma IEC 62439-3 (2016) que contém um capítulo para cada protocolo e envolve, dentre outras questões, os princípios de operação e especificações dos nós e dos protocolos.

A primeira edição da norma IEC 62439-3 é de 2010 e contemplava apenas o protocolo PRP. A edição atual de 2016 já abrange os protocolos PRP e HSR. Nesse sentido, este capítulo visa apresentar os protocolos com base nas referências normativas e nos últimos estudos na área, além de apresentar uma breve explanação sobre o protocolo RSTP que foi o precursor do PRP e do HSR.

3.1 RSTP

O protocolo RSTP, que é uma evolução do protocolo STP (*Spanning Tree Protocol*), tem como objetivo o fornecimento de caminhos alternativos se houver a falha de um enlace ativo na rede. O RSTP se utiliza de pacotes denominados BPDUs (*Bridge Protocol Data Units*), que são pacotes de controle trocados entre os *switches*, com a função de transmitir informações a respeito da topologia do sistema, tais como endereço MAC e custo do enlace. O padrão do RSTP é selecionar caminhos ativos, ou seja, selecionar caminhos que estejam aptos e em melhores condições de desempenhar a tarefa de entrega da mensagem, a fim de minimizar o tempo dos caminhos entre os *switches* e conseqüentemente, minimizar o tempo de entrega aos dispositivos finais. Para isso, se utiliza de enlaces com a maior largura de banda possível.

O protocolo RSTP determina um *switch* principal denominado *switch* raiz (*root bridge*) e desta forma, opera um sistema de convergência de topologia gerando um caminho lógico único entre os dispositivos por uma topologia em árvore. Esta convergência é realizada através da comparação entre os BPDUs que são enviados por todos os *switches*. É através desta comparação que o *switch* raiz é eleito com o menor valor numérico nos campos do

pacote BPDUs. O algoritmo opera distributivamente, em cada *switch* da rede. Caso haja uma perda de conectividade, de um enlace, por exemplo, o *switch* que detecta esta mudança apaga de uma tabela o endereço MAC associado a todas as portas do *switch* e encaminha a informação através de suas portas fazendo com que rapidamente BPDUs espalhem esta informação por toda a rede. Dependendo do tamanho da rede, em poucos segundos o sistema faz nova convergência [PINOTTI, 2009]. Goraj e Harada (2012) mostram que o desempenho do protocolo RSTP é definido usualmente através do tempo de recuperação da rede por salto para uma simples conexão entre dois *switches* adjacentes e que este tempo é de 5 ms. Logo, o tempo de recuperação da rede total seria o tempo típico de 5 ms de recuperação de cada salto, multiplicado pelo número de saltos no novo caminho de rede. Nsaif e Rhee (2012) salientam que a reconfiguração praticada pelo protocolo RSTP usualmente requer muito tempo, tipicamente na faixa de 1 s.

Para sistemas de aplicação em tempo real e particularmente Redes de Automação de Sistemas Elétricos, mesmo alguns milissegundos podem ser significativos na operação e conseqüente segurança dos equipamentos e pessoal. Por este motivo, surgiram dois protocolos, PRP e HSR, que têm como principal vantagem em relação ao RSTP, um tempo de recuperação igual a zero. Salienta-se que, mesmo se uma rede utilizar o protocolo PRP, pode se valer do protocolo RSTP para reconfiguração. Esta utilização conjunta do RSTP com o PRP acontece da seguinte forma: se uma das LANs (*Local Area Networks*) do PRP tiver uma topologia em anel, neste anel o protocolo RSTP pode ser implementado. Desta forma, há a redundância entre LANs e dentro da LAN(s) formada(s) por um anel também há redundância devido ao protocolo RSTP. A utilização do RSTP também pode ocorrer em conjunto com a utilização do protocolo HSR [TAN e LUAN, 2011].

3.2 PRP

O princípio de operação do protocolo PRP, de IEC 62439-3 (2016), define que o nó DANP (*Double Attached Node Implementing PRP*) é conectado a duas LANs que operam em paralelo. O nó fonte, denominado DANP, envia dois quadros redundantes que trafegam por cada LAN, podendo ser recebidos pelo nó de destino, denominado também de DANP. Existe a possibilidade de uma LAN ser distinta da outra ao que se refere à topologia e ao desempenho. Existe também uma forma de conexão do nó a apenas uma LAN, através do

SAN (*Singly Attached Node*). Desta forma, o SAN conectado a uma determinada LAN só consegue transmitir na mesma LAN a que está conectado. No entanto, existe um método para que um nó SAN possa transmitir quadros como se fosse um DANP. Para que isso ocorra, é necessário que o SAN esteja conectado a ambas LANs através de uma caixa de redundância (*Redundancy Box*), também denominada RedBox. Como exemplos de SANs em uma rede industrial, podem-se citar os computadores ou *laptops* e impressoras. Na Figura 7 verifica-se um exemplo de rede redundante utilizando PRP. Pode-se observar que cada DANP está interligado às duas redes (LANs A e B), que no exemplo são redes formadas por *switches* em diferentes topologias. Um nó fonte transmite dois quadros redundantes (A e B) para o nó destino. O nó destino recebe a primeira cópia, a repassa às camadas superiores e descarta a segunda cópia.

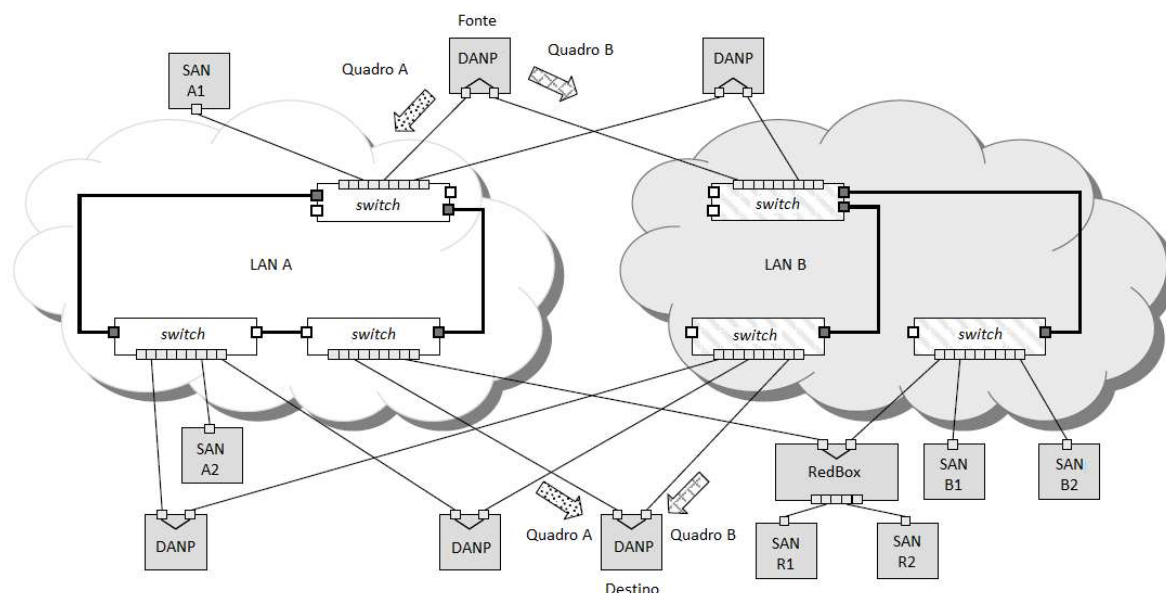


Figura 7 - Exemplo de rede redundante utilizando PRP com duas LANs distintas.

Fonte: Adaptado de IEC 62439-3 (2016).

Conforme a IEC 62439-3 (2016), as LANs podem ser de diversas topologias diferentes ou iguais. Neste sentido, o nó DANP é estruturado de forma que possa atender às características do protocolo PRP. Na Figura 8 são observados dois nós conectados a duas LANs em barra (as LANs completas não aparecem na figura). Cada nó é representado com duas portas que operam em paralelo e que se comunicam com as camadas superiores através da interface LRE (*Link Redundancy Entity*) que tem duas tarefas: manuseio de duplicatas e gerenciamento de redundância. Quando recebe um quadro das camadas superiores, o LRE anexa o RCT (*Redundancy Check Trailer*) ao quadro e quando recebe os quadros redundantes

de outros nós, o LRE encaminha o primeiro quadro sem erros para as camadas superiores e descarta a duplicata, removendo o RCT quando requerido. Periodicamente, o LRE envia um quadro de supervisão PRP e pode também avaliar este mesmo quadro enviado por outros nós, o que possibilita o gerenciamento da redundância e o controle da presença de outros DANPs.

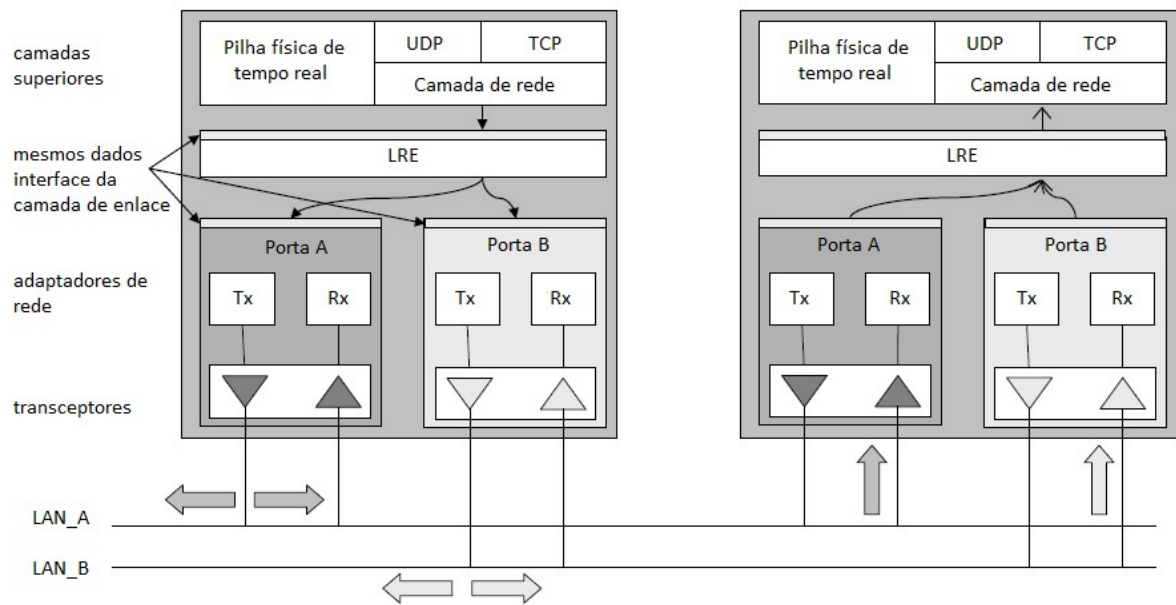


Figura 8 - DANP comunicando através do protocolo de camada de enlace PRP.

Fonte: Adaptado de IEC 62439-3 (2016).

Com relação ao gerenciamento da rede, o nó apresentado na Figura 8 tem o mesmo endereço MAC para as duas portas e apenas um endereço IP assinalado, possibilitando o funcionamento do ARP (*Address Resolution Protocol*) como se fosse em um nó comum (SAN) e fazendo com que a redundância seja transparente para as camadas superiores.

O manuseio das duplicatas é feito de duas maneiras: modo de aceitação de duplicatas e modo de descarte de duplicatas. O modo de aceitação é utilizado apenas para propósitos de testes para verificação se os quadros duplicados foram realmente descartados pela camada de enlace e não por camadas superiores. A IEC 62439-3 (2016) salienta que as camadas superiores também podem descartar as duplicatas, no entanto, de forma menos eficiente que a camada de enlace. Com relação ao modo de descarte de duplicatas, o LRE do emissor anexa um campo de seis octetos, chamado RCT que contém um número de sequência, que é um campo de 16 bits incrementado de uma unidade a cada quadro enviado pelo DANP. O número de sequência é utilizado junto ao endereço MAC da fonte para detectar as duplicatas. Assim,

no nó de destino encaminha-se apenas o primeiro quadro para as camadas superiores. A Figura 9 mostra o formato do quadro com o RCT.

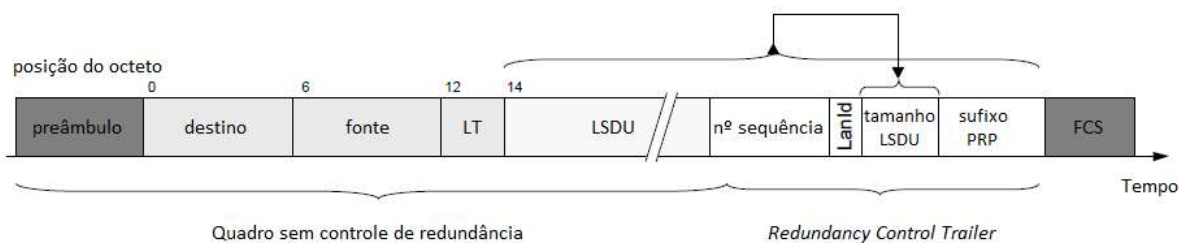


Figura 9 - Quadro PRP estendido pelo RCT.

Fonte: Adaptado de IEC 62439-3 (2016).

O RCT consiste de um número de sequência de 16 bits, um identificador de LAN (*LanId*) de 4 bits, um campo de tamanho de LSDU (*Link Service Data Unit*) de 12 bits e um sufixo PRP de 16 bits que são detalhados a seguir:

Sufixo PRP: identifica quadros PRP e distingue estes quadros de outros protocolos que também anexam um trailer aos dados;

Tamanho LSDU: este campo contém o comprimento em octetos da LSDU, permitindo assim, que o destinatário reconheça quadros PRP como uma checagem adicional, não os confundindo com quadros não-redundantes, ou seja, o destinatário quando recebe a mensagem, além do sufixo PRP, também confere se os 12 bits antes do sufixo, correspondem ao tamanho LSDU, além da conferência do identificador de LAN;

Identificador de LAN: este campo identifica quadros oriundos da LAN A (código 1010) ou da LAN B (código 1011). O destinatário verifica se o quadro vem da LAN “correta” (arbitrariamente denominada), mas não o rejeita se vier da LAN “errada”, já que pode ser um quadro legítimo;

Número de Sequência: este campo é incrementado para cada quadro enviado pelo DANP. Os campos de endereço MAC da fonte e número de sequência identificam cópias do mesmo quadro. O algoritmo para descarte de duplicatas não é especificado, porém, este nunca deve rejeitar um quadro legítimo, ao passo que ocasionalmente um quadro duplicado possa ser tolerado. Como os números de sequência não são necessariamente contíguos e podem se repetir após 65536 quadros, as entradas mais antigas do que um determinado tempo são excluídas.

De acordo com a ISO/IEC/IEEE 8802-3 (2012), os quadros são restritos ao tamanho de 1522 octetos, no entanto, já é esperado um aumento de 6 bytes devido ao RCT, em que o

quadro estaria restrito a 1528 octetos. Outra importante funcionalidade do protocolo PRP é o quadro de supervisão PRP [IEC 62439-3, 2016]. Este quadro enviado periodicamente por cada DANP permite checar a integridade da rede e presença dos nós. Além disso, o quadro de supervisão PRP permite checar quais dispositivos são DANP, os seus respectivos endereços MAC e qual modo de operação eles suportam. Este atributo do protocolo PRP é muito importante porque permite um monitoramento do status de cada LAN e de seus respectivos nós, pois, caso contrário, somente a redundância presente seria de pouca utilidade. O receptor verifica se o quadro foi corretamente recebido e desta forma, tanto o receptor quanto o emissor da mensagem mantêm tabelas atualizadas de quando os nós tiveram quadros recebidos e enviados. Caso não houvesse a supervisão de rede, continuaria havendo redundância, no entanto, uma redundância sem controle. O quadro de supervisão é enviado por cada nó a cada 2 s, uma constante chamada *LifeCheckInterval*. Além do quadro de supervisão, o protocolo PRP através do LRE, mantêm em cada porta do dispositivo, um contador de mensagens recebidas (corretamente) e de mensagens recebidas com erro, servindo para verificação de aumento de taxa de erros em cada LAN.

3.3 HSR

O protocolo HSR, se comparado ao PRP, permite manter a propriedade de recuperação em tempo igual zero com metade da infraestrutura de rede, visto que não é necessário haver duas LANs para a implementação do protocolo HSR, conforme deve ocorrer no protocolo PRP. A recuperação em tempo zero ocorre, tanto no PRP quanto no HSR, devido à duplicação dos quadros quando do envio da mensagem. Devido a esta duplicação, mesmo que haja uma quebra de enlace, o outro quadro provavelmente chegará ao destino sem a passagem de um tempo de reconfiguração de enlaces utilizado em outros protocolos, como, por exemplo, o RSTP. Conforme a IEC 62439-3 (2016), o princípio básico de operação do HSR é baseado em uma topologia de anel, com nós interconectados em *full-duplex*, onde cada nó também opera com duas portas em paralelo e é chamado de DANH (*Doubly Attached Node with HSR Protocol*). Ao contrário do protocolo PRP em que o SAN poderia se conectar à rede podendo se comunicar somente através de uma mesma LAN, no HSR, os SANs, ou seja, dispositivos como *laptops* ou impressoras, não podem de maneira alguma se conectar diretamente ao anel da rede, a não ser que haja uma interface através de uma *RedBox*.

A IEC 62439-3 (2016) fornece dois exemplos de redes numa configuração em anel utilizando-se de protocolo HSR: um no qual se supõe o envio de tráfego em *multicast* (Figura 10) e outro cujo tráfego enviado é *unicast* (Figura 11).

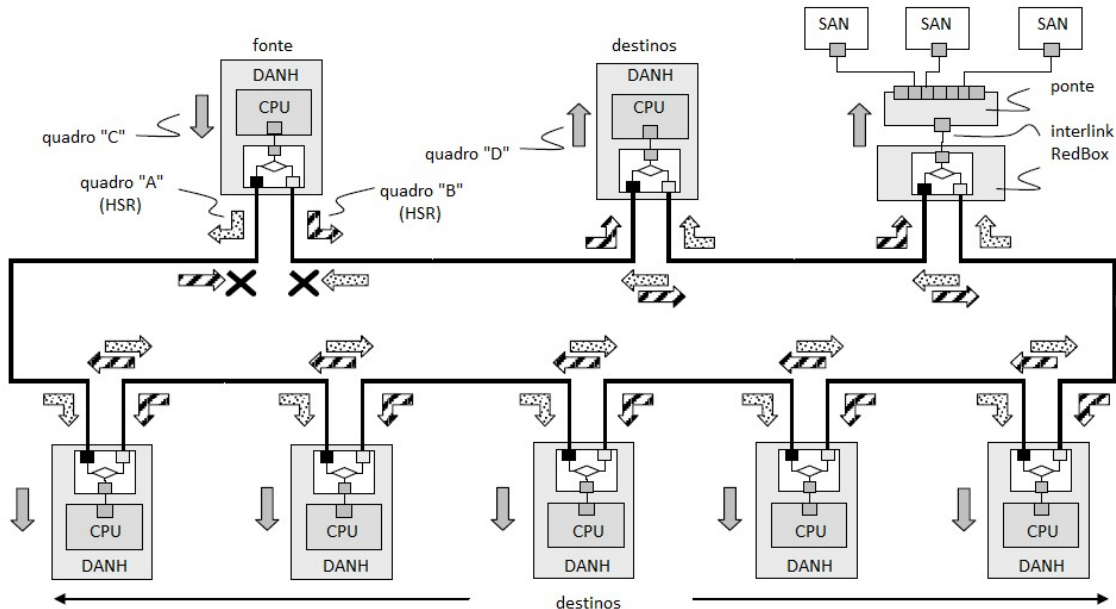


Figura 10 - Configuração de rede em anel para tráfego *multicast* utilizando o protocolo de camada de enlace HSR.

Fonte: Adaptado de IEC 62439-3 (2016).

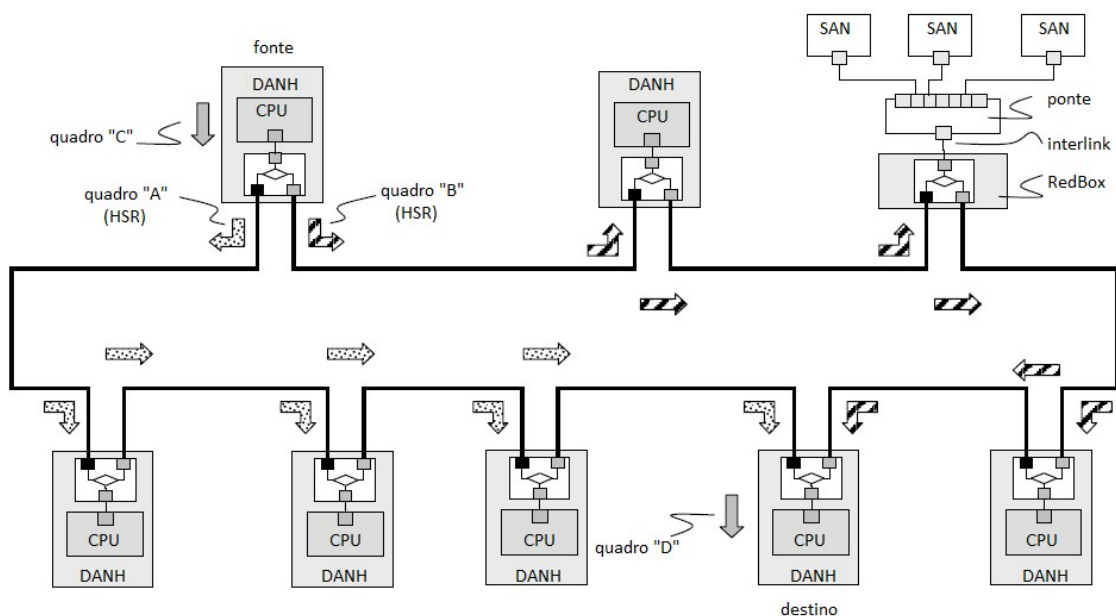


Figura 11 - Configuração de rede em anel para tráfego *unicast* utilizando o protocolo de camada de enlace HSR.

Fonte: Adaptado de IEC 62439-3 (2016).

Conforme pode ser verificado na Figura 10, o quadro “C” é remetido pelas camadas superiores do DANH de origem e após passar pelo LRE do nó em questão, é convertido em dois quadros, “A” e “B” contendo uma etiqueta HSR (conjunto de informações adicionadas

ao quadro, a ser apresentado a seguir) cada um. O DANH de destino, então, recebe o primeiro quadro, remove sua etiqueta HSR antes de passar para suas camadas superiores, o que torna o quadro transparente para estas (quadro “D”) e descarta a duplicata que vem a seguir. Como o nó suporta o padrão IEEE Std. 802.1D (2004) e sua funcionalidade de ponte, ele encaminha quadros de uma porta a outra, fazendo com que o tráfego flua no anel, exceto se já tiver encaminhado o mesmo quadro na mesma direção. A grande diferença do tráfego *multicast* para o tráfego *unicast* é que o nó que é destino único não encaminha quadros, conforme pode ser verificado na Figura 11. Assim como no protocolo PRP, o endereço MAC da origem e o número de sequência são os responsáveis por identificar cópias do mesmo quadro. Um ponto que a IEC 62439-3 (2016) destaca quanto ao atraso de entrega, um importante parâmetro em sistemas industriais elétricos, é que, assumindo o maior quadro definido pelo padrão IEEE Std. 802.2 (2003) de 1536 octetos, cada nó pode introduzir um atraso de 125 μ s em uma rede de 100 Mbit/s, o que em uma rede com 50 nós poderia extrapolar o valor de 6 ms, valor extremamente alto para os padrões elétricos, podendo ocasionar falhas na proteção.

O nó DANH é implementado em *hardware* e estruturalmente concebido conforme a Figura 12. As portas A, B e C são integradas através do LRE que permite o encaminhamento de quadros de uma porta para outra. O descarte de duplicatas é feito nas filas de saída.

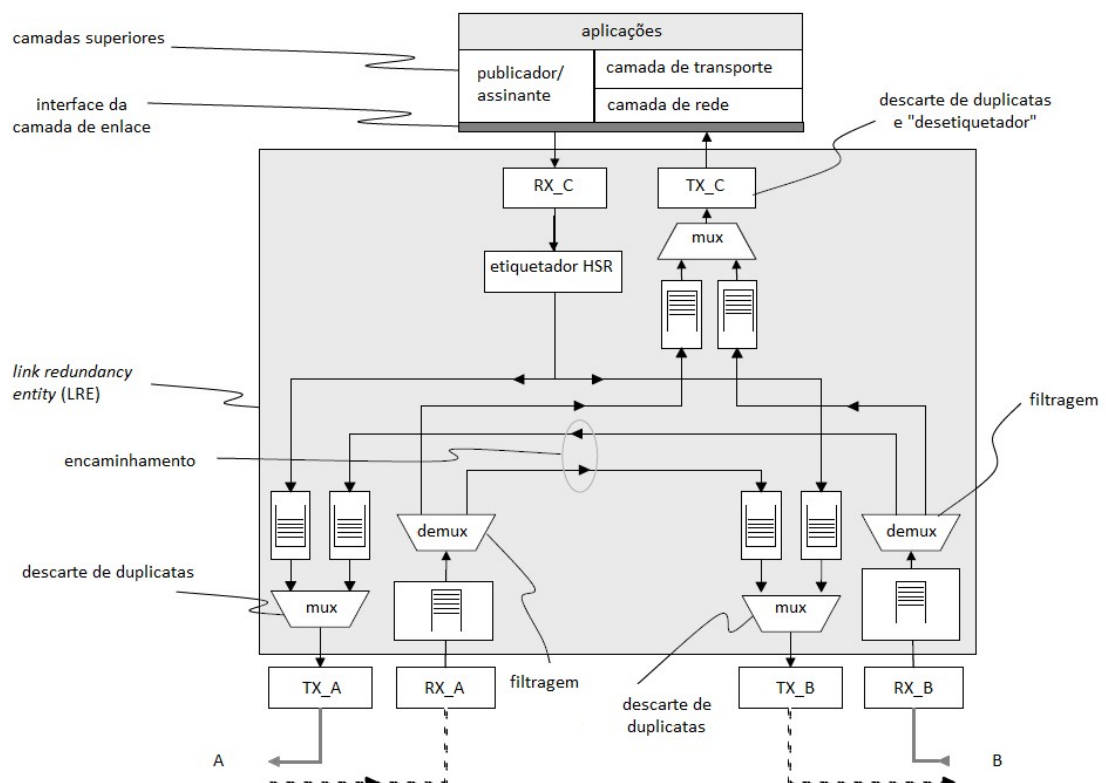


Figura 12 - Estrutura do DANH.

Fonte: Adaptado de IEC 62439-3 (2016).

O nó DANH foi concebido para operar em cinco modos distintos, sendo que o modo H é o padrão mandatório e os outros quatro são opcionais. No modo H, “o nó deve inserir a etiqueta HSR e encaminhar o quadro para o anel, exceto para quadros que já foram enviados pelo próprio nó. Quadros duplicados e quadros onde o nó é o destino *unicast* não devem ser encaminhados.”.

As regras e passo a passo de recebimento de quadros das camadas superiores pelo LRE e recebimento de quadros pelas portas HSR do DANH estão todas especificadas na norma IEC 62439-3 (2016), no entanto, como regras gerais de encaminhamento, podem-se citar as principais:

- 1 - o DANH não deve enviar um quadro duplicado que já fora enviado pela mesma porta na mesma direção;
- 2 - o DANH que detectar um quadro danificado ou truncado não deve encaminhá-lo;
- 3 - se uma porta é desconectada da rede, o DANH deve excluir o *buffer* da porta de forma a não enviar nenhum quadro obsoleto.

Além dessas regras, o DANH deve suportar ao menos dois níveis de prioridade, filtrar tráfego VLAN (*Virtual Local Area Network*) e filtrar tráfego *multicast*.

O quadro contendo o protocolo HSR é modificado devido à etiqueta HSR que consiste de um *EtherType* de 16 bits (HSR_EtherType = 0x892F), um identificador de caminho de 4 bits (*PathId*), tamanho de quadro (LSDU) de 12 bits (*LSDUsize*) e um número de sequência de 16 bits (*SeqNr*) que são detalhados a seguir:

Identificador de caminho: previne reinjeção de quadros vindos de uma rede PRP para outra rede PRP quando várias redes são interconectadas.

Tamanho LSDU: o tamanho mínimo do quadro deve ser de 70 octetos sem etiqueta VLAN e 74 incluindo a etiqueta VLAN. Este tamanho mínimo é abordado pela ISO/IEC/IEEE 8802-3 (2012) que especifica um quadro mínimo de 64 octetos após remoção da etiqueta HSR e da etiqueta VLAN;

Ethertype: campo que define qual protocolo da camada superior é transportado pelo quadro;

Número de Sequência: consiste do mesmo objetivo que no protocolo PRP.

A Figura 13 mostra o formato do quadro HSR sem a etiqueta VLAN.

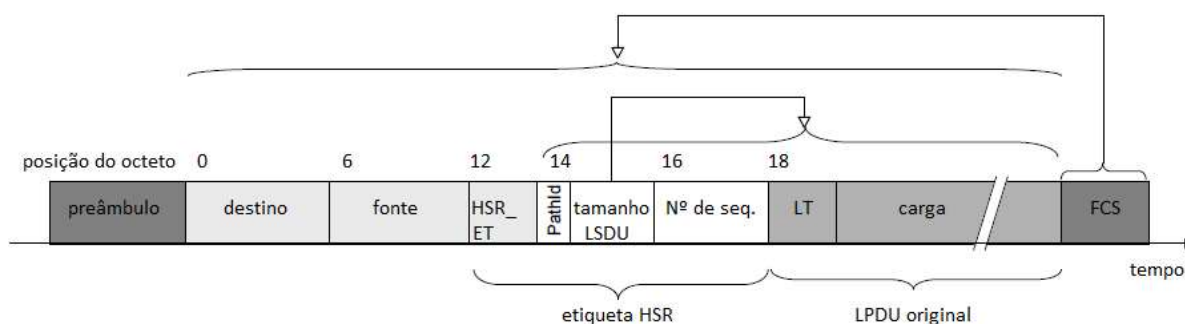


Figura 13 - Formato do quadro HSR.

Fonte: Adaptado de IEC 62439-3 (2016).

Da mesma forma que no protocolo PRP, cada DANH também envia por *multicast* um quadro de supervisão HSR por ambas portas. O formato é praticamente o mesmo do protocolo PRP. Sempre que um nó receber um quadro de supervisão HSR, ele deve criar uma tabela de nós correspondente ao endereço MAC do nó de origem indicado na mensagem, registrando a porta de onde o quadro foi recebido com o objetivo de identificar erros de recepção.

3.4 Comparativo PRP x HSR

A norma IEC 62439-3 (2016) traz inúmeros benefícios na aplicação dos protocolos de redundância PRP e HSR, no entanto, sem dúvidas, o mais importante deles é o tempo de recuperação igual a zero na ocorrência de uma falha na rede, o que não era atingido pelo protocolo RSTP. Tanto o protocolo HSR quanto o PRP atingem o tempo de recuperação zero em redes de comunicação industrial; no entanto, ambos apresentam outras vantagens e desvantagens a depender do campo de aplicação.

Apesar da vantagem de redução dos custos com dispositivos físicos praticamente pela metade com a utilização do protocolo HSR ao invés do PRP devido a não necessidade de se utilizar duas LANs, Kumar et al. (2015) afirmam que o protocolo PRP oferece uma melhor proteção quando há duplicação dos anéis (duas redes com topologia em anel), já que é mais resiliente à faltas, ganhando em confiabilidade. Uma desvantagem do PRP é a maior complexidade de sua estrutura, nesse sentido, o HSR leva vantagem por ter seus dispositivos SANs e DANH em um único anel. Quanto ao tráfego, o protocolo HSR utiliza menos *hardware* implicando num maior tráfego que pode gerar colisões; porém, nas simulações

feitas por Kumar et al. (2015), há a contrapartida do atraso de entrega ter sido ligeiramente menor em comparação ao PRP, fato atribuído à simplicidade da topologia.

Goraj e Harad (2012) também fazem considerações a respeito da melhor alternativa a seguir na escolha do protocolo de redundância e comentam que o tráfego processado em um nó HSR (DANH) é muito maior do que o tráfego em um nó PRP (DANP) devido ao *overhead* significativo implementado pelo protocolo HSR e que o fato do próprio IED ser o nó da rede de comunicação também traz uma desvantagem na medida em que falhas no *hardware* ou *software* do IED podem levar a uma “quebra” na rede. Os autores ainda levam em consideração que esta desvantagem pode ser minimizada caso o módulo HSR de *switching* dos IEDs tiver sua própria fonte de alimentação, o que ainda não é implementado pelos fabricantes e certamente levaria a uma elevação nos custos dos projetos. Apesar dos problemas de manutenção que também são introduzidos nos *switches* dos nós DANH, os autores acreditam em uma topologia híbrida PRP-HSR para o caso de aplicações em subestações de alta e extra-alta tensão pois o PRP pode ser utilizado para acesso redundante aos IEDs enquanto o HSR pode ser aplicado aos *switches*.

Quanto à transparência que ambos protocolos fornecem para as camadas superiores, García et al. (2012) implementa condições de operação normal e condições com enlace em falha para configurações típicas de HSR e PRP em máquinas virtuais e também utilizando-se de dois computadores e um FPGA (*Field Programmable Gate Array*). Nos dois protótipos verificaram-se que não há diferenças significativas entre os dois protocolos e, portanto, em ambas comunicações, houve tempo zero de recuperação e implementação transparente para as camadas acima da camada de enlace.

Quanto ao problema de tráfego desnecessário inerente à topologia em anel do protocolo HSR causado pela duplicação de quadros, duas soluções são propostas por Nsaif e Rhee (2012) que minimizam o tráfego: QR (*Quick Removing*) e VRing (*Virtual Ring*). O objetivo do QR é remover os quadros duplicados quando todos os nós receberem o primeiro quadro saudável e a segunda solução divide qualquer *loop* fechado em diversos anéis virtuais, chamados VRings, uma solução similar às técnicas de VLAN. Segundo os autores, a redução de tráfego podem chegar até a 49,5% em um caso extrapolado de QR para 200 nós e até 89,7% para uma abordagem em que o VRing é aplicado junto ao QR. Ainda com relação ao tráfego de dados, existem diversos simuladores que permitem ainda na fase de projeto, uma mensuração das latências médias e máximas de um determinado sistema. Molano, Fernandes e Malcher (2014) apresentam uma lista com as plataformas que simulam redes IEC 61850, dentre elas podem-se destacar: OPNET, C#, NS-2, NS-3 e o OMNET++ que foi utilizado para

a medição das latências em três casos específicos, incluindo o caso do PRP em funcionamento conjunto com RSTP.

Conforme apresentado neste capítulo, são diversas as variáveis que influenciam a escolha entre os protocolos de redundância da camada de enlace: HSR ou PRP. Dentre estas variáveis podemos destacar a complexidade da rede, o custo, o tempo de recuperação, a implementação transparente para camadas superiores e o tráfego de dados. Cada uma destas variáveis é mais ou menos importante a depender do tipo e da criticidade da rede industrial a ser projetada ou analisada. Nos casos de redes industriais elétricas de Unidades Estacionárias de Produção, um dos fatores mais críticos é a continuidade operacional e, em função disso, talvez uma das características mais importantes que as instalações de redes devem atender é abordada neste trabalho: o cálculo de disponibilidade. Diversos métodos podem ser utilizados para calcular a disponibilidade de um determinado sistema conforme mencionado no Capítulo 4.

4 MÉTODOS PARA O CÁLCULO DA DISPONIBILIDADE

Existem diversos métodos para se calcular a disponibilidade de um determinado sistema, seja ele com a finalidade de comunicação via redes ou com outro objetivo. Dentre os diversos métodos existentes pode se destacar o método da árvore de falhas (*Fault Tree Analysis*), o método árvore de eventos (*Event Tree Analysis*), o método *cut set*, o método de Markov e o método RBD (*Reliability Block Diagram*) ou método do diagrama de blocos de confiabilidade, método utilizado nos cálculos deste trabalho.

4.1 O Método da Árvore de Falhas

A análise de árvore de falhas é uma das técnicas mais utilizadas em estudos de disponibilidade. É também uma análise frequentemente utilizada em estudos de análise de risco servindo para demonstrar a efetividade de sistemas de proteção em plantas industriais. Esta análise corresponde a um diagrama lógico que mostra o inter-relacionamento entre um potencial evento crítico (acidente) e as causas que levam a este evento [RAUSAND e HOYLAND, 2004].

Utilizando-se da lógica booleana pode-se construir a árvore de falhas em que uma condição particular de falha é considerada e outras falhas que levam até esta condição são gradualmente dispostas em níveis hierárquicos abaixo desta na árvore. Símbolos que representam portas “E”, “OU”, dentre outros, são utilizados na árvore de falhas. A probabilidade de o evento principal acontecer pode então ser calculada a partir da soma, produto, negação (ou qualquer outro operador booleano) das probabilidades, de acordo com a representação na árvore de falhas [BILLINTON e ALLAN, 1992].

Como exemplo, na Figura 14 tem-se um evento de topo ou evento principal em que há uma falha de comunicação na rede e, a partir deste evento, desmembra-se a árvore com os possíveis eventos que podem levar a esta consequência como a falha de um *switch*, a falha de uma fibra óptica, a falha da fonte de alimentação de um IED ou a falha do próprio IED.

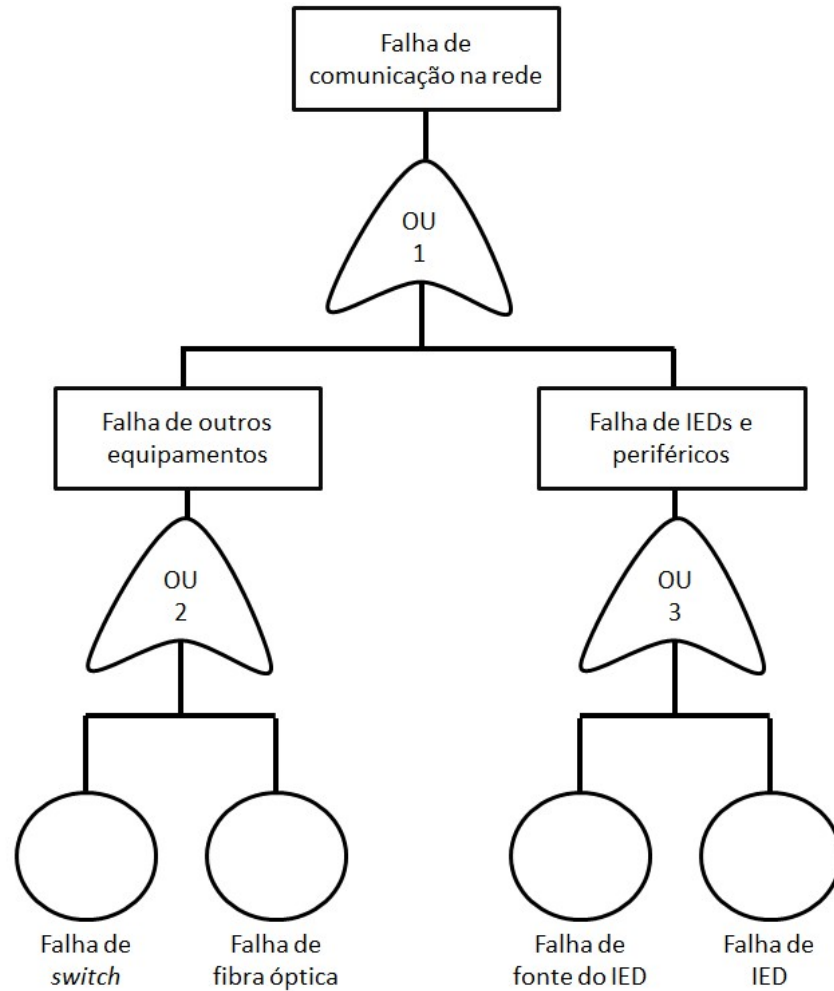


Figura 14 - Exemplo de árvore de falhas em que o evento de topo é uma falha de comunicação na rede.

Scheer (1998) e Scheer (1999) utilizam a análise de árvore de falhas para comparar a disponibilidade de diversas topologias de sistemas de automação. Utilizando-se das indisponibilidades de componentes usuais de subestações como disjuntores, transformadores de corrente e de tensão, relés de proteção, controladores lógicos programáveis, dentre outros, os trabalhos abordam falhas de topo que podem ocorrer em diversos tipos de topologia diferentes.

4.2 O Método da Árvore de Eventos

Assim como na análise de árvore de falhas, na árvore de eventos também se utiliza um diagrama, no entanto, este se inicia com um determinado evento básico, sendo seguido por potenciais eventos de consequência ou de saída. Normalmente os eventos de saída são do tipo verdadeiro ou falso (sim ou não), mas também podem ser expandidos para outras saídas [RAUSAND e HOYLAND, 2004].

Este método pode ser utilizado para sistemas com operação contínua ou para sistemas que contenham alguns componentes em modos *standby* que envolvam sequência lógica e chaveamento. Assim como no método da árvore de falhas, no método da árvore de eventos a disponibilidade do sistema também pode ser calculada a partir do diagrama [BILLINTON e ALLAN, 1992].

Suponha-se que hipoteticamente um evento inicial seja a falha de um *switch* e que este *switch* esteja em paralelo, ou seja redundante, com outro *switch*. Neste caso, a árvore de evento é apresentada na Figura 15.

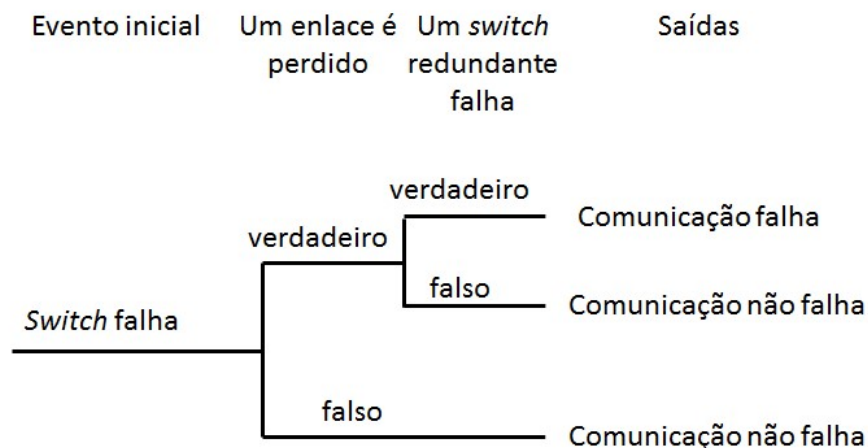


Figura 15 - Exemplo de árvore de evento em que o evento inicial é a falha de um *switch*.

Castro Ferreira et al. (1999) propõem uma análise baseada no método de árvore de eventos para avaliar quantitativamente o mérito de diferentes abordagens de controle de subestações. Dentre as árvores de evento que são mencionadas no trabalho, destaca-se o fechamento e abertura de um disjuntor e uma operação de desconexão de uma chave de terra. A técnica proposta é aplicada para determinar a disponibilidade de um sistema de controle

para diversos tipos de subestação. Hajian-Hoseinabadi (2011) também propõe uma análise baseada no método da árvore de eventos para uma ação de chaveamento automático.

4.3 O Método *Cut-Set*

O método *cut-set* gera basicamente, em termos de diagrama de blocos, uma configuração dos componentes que precisam falhar para que todos os caminhos entre a entrada e a saída sejam desfeitos. Neste sentido, o caminho mínimo que causa a falha do sistema é chamado de mínimo *cut-set*, que pode ser traduzido como mínima configuração de corte. O método *tie-set* é um complemento do método *cut-set*. É na verdade, o caminho mínimo do sistema ou o caminho em que o sistema falha mais rápido e em diagrama de blocos é representado como uma configuração de componentes conectados em série [BILLINTON e ALLAN, 1992]. Suponha, portanto, que para o sistema falhar, é necessário que os dois *tie-sets* compostos pelos componentes A, B, C, D e E, representados na Figura 16, falhem. Pode-se notar que no sistema montado na Figura 16 um possível *cut-set* seria formado pelos componentes A e C, pois se A e C falhassem ambos *tie-sets* seriam desfeitos e o sistema deixaria de funcionar.

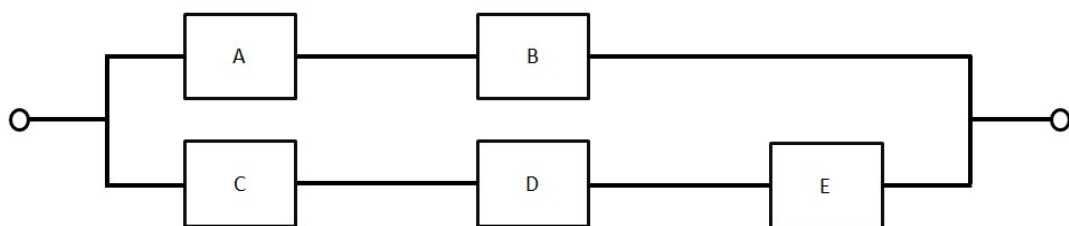


Figura 16 - Exemplo de *tie-sets*.

Hajian-Hoseinabadi (2010) apresenta uma técnica para avaliar quantitativamente a disponibilidade de sistemas de automação de subestações baseada nos métodos *tie-set*. A técnica consiste em utilizar os caminhos mínimos (*tie-set*) para calcular a disponibilidade dos sistemas baseada em diagramas de blocos de confiabilidade. Conforme mencionado acima, no método utilizado por Hajian-Hoseinabadi (2010), todo o sistema *tie-set* falha se apenas um

componente do *tie-set* falha. Desta forma, é calculada a probabilidade de sucesso das arquiteturas analisadas (disponibilidade), assumindo a probabilidade de ocorrência de *tie-sets*.

4.4 O Método de Markov

Um método bem conhecido que também relaciona estados de funcionamento e estados de falha é o método de Markov. Este método pode ser modelado com diversos estados e transições entre estes estados. Além disso, esta abordagem pode ser aplicada a sistemas que variam discretamente ou continuamente no que diz respeito ao tempo e espaço. No caso particular de avaliação de disponibilidade de sistemas, o espaço é representado como uma função discreta enquanto o tempo pode ser discreto ou contínuo [BILLINTON e ALLAN, 1992].

Um exemplo de modelagem do método de Markov é apresentado na Figura 17. Há três estados: o primeiro em que um *switch* está funcionando normalmente em seu estado “normal”, em seu estado de “falha não detectada”, o *switch* tem uma falha que não é detectada por nenhum tipo de alarme e em seu estado “falha detectada e não reparada” a falha do *switch* é detectada. As transições de estados “falha reparada”, “falha ocorreu” e “falha detectada” têm, então, probabilidades da ocorrência de um estado para o outro atribuídas. Desta forma, é possível criar uma matriz de probabilidades transicional que permite calcular a probabilidade de ocorrência de cada estado.

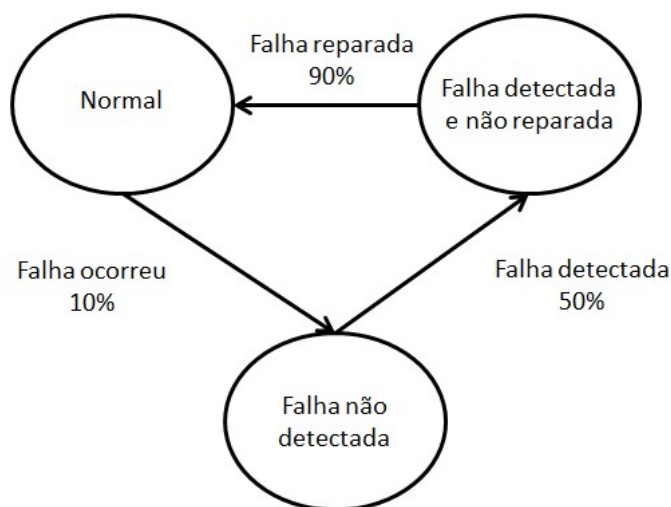


Figura 17 - Exemplo de modelo de estados de Markov.

Andersson et al. (2005) utilizam-se do modelo de Markov para definir a disponibilidade e discutir economicamente algumas arquiteturas básicas de automação de subestações baseadas na IEC 61850. Desta forma, o artigo demonstra diversos sistemas de comunicação e os compara do ponto de vista da disponibilidade (MTTF) e do custo da arquitetura.

4.5 O Método RBD

O diagrama de blocos de confiabilidade corresponde ao método que representa através de blocos em série ou paralelo, os componentes de um determinado sistema. Para sistemas em série, do ponto de vista da disponibilidade, basta um componente falhar para que todo o sistema falhe, ou seja, em um sistema de dois componentes independentes em série, ambos componentes devem estar operacionais para que o sistema funcione a contento. Para sistemas em paralelo, do ponto de vista da disponibilidade, basta um componente funcionar para que o sistema funcione a contento, ou seja, em um sistema de dois componentes independentes em paralelo, o sistema só falha se ambos componentes falharem [BILLINTON e ALLAN, 1992].

A Figura 18 demonstra um RBD com dois componentes em série. Neste caso, se o componente 1 ou o componente 2 falhar, o sistema não estará operante. No caso de automação de sistemas elétricos ou redes de computadores, um quadro que precisasse trafegar por esta rede não iria chegar ao seu destino se o componente 1 ou o componente 2 falhassem.



Figura 18 – RBD de dois componentes em série.

A Figura 19 demonstra um RBD com dois componentes em paralelo. Neste caso, se o componente 1 ou o componente 2 falhar, o sistema vai continuar operante. No caso de automação de sistemas elétricos ou redes de computadores, um quadro que precisasse trafegar por esta rede iria chegar ao seu destino se o componente 1 ou o componente 2 falhasse. No entanto, o quadro não iria chegar ao seu destino se ambos componentes falhassem.

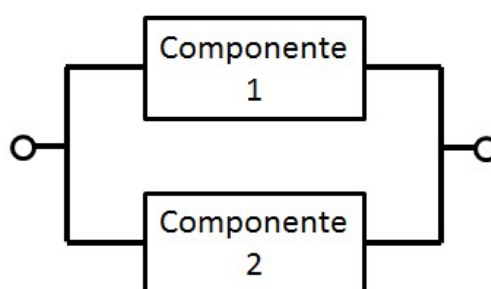


Figura 19 – RBD de dois componentes em paralelo.

Fazendo uma analogia com o método da árvore de falhas, o RBD chega ao mesmo resultado quando a árvore de falhas é limitada a portas “E” e portas “OU”; logo, pode-se converter um método no outro caso haja esse condicionante (que é o caso deste trabalho) [RAUSAND e HOYLAND, 2004].

O método escolhido para a análise da disponibilidade das arquiteturas de automação das subestações apresentada no Capítulo 5 é o RBD por dois motivos. A primeira razão para esta escolha é a simplicidade do método. Billinton e Allan (1992) apresentam em seu livro um capítulo para modelagem e avaliação de sistemas simples, abordando o método RBD e outro capítulo para modelagem e avaliação de sistemas complexos, abordando métodos como o *cut-set*, a árvore de eventos e a árvore de falhas. Consideram-se as arquiteturas apresentadas neste trabalho como arquiteturas simples, visto que o objetivo principal da análise é comparar a disponibilidade de arquiteturas que não utilizam os protocolos da camada de enlace (HSR e PRP) com a disponibilidade de arquiteturas que os utilizam. Desta forma, não é necessário que arquiteturas envolvendo muitos componentes, mais complexas, sejam utilizadas. A segunda razão para a escolha do método RBD neste trabalho é a utilização deste método em outros trabalhos importantes na área. Hajian-Hoseinabbadi (2013), Hajian-Hoseinabbadi (2011), Kanabar e Sidhu (2009), Mekkanen et al. (2012), Zhang et al. (2006) utilizam o método RBD em suas análises.

Hajian-Hoseinabbadi (2013) desenvolve o RBD de nove tipos distintos de arquiteturas de automação de subestações que servirão como importante fonte e base comparativa de arquiteturas que não se utilizam de protocolos de redundância da camada 2. O Capítulo 5 também faz uma comparação entre arquiteturas que não implementam os protocolos PRP e HSR e as mesmas arquiteturas implementando estes protocolos de camada de enlace. Desta forma é possível verificar se os protocolos PRP e HSR efetivamente têm a característica de aumentar a disponibilidade do sistema ou arquitetura no qual estão implementados.

5 AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE DE ARQUITETURAS UTILIZANDO OS PROTOCOLOS DE REDUNDÂNCIA PRP E HSR

Este capítulo apresenta uma análise da disponibilidade das duas arquiteturas de automação de subestações mais básicas apresentadas como exemplos na IEC 62439-3 (2016) e de duas variações dessas arquiteturas, seguindo a abordagem apresentada em Hajian-Hoseinabadi (2013) de utilização de seis BCUs e controle via SCCR ou CI em série com IHM. A análise foi realizada para casos sem a utilização de protocolos de redundância da camada de enlace e com a utilização dos protocolos PRP e HSR.

5.1 Arquiteturas de Automação de Subestações

No contexto de equipamentos de subestações, o principal diagrama que representa o sistema elétrico e suas interligações é o diagrama unifilar elétrico que além dos equipamentos (motores, geradores, painéis etc.) apresenta algumas características importantes destes componentes para o sistema elétrico como um todo, como por exemplo, a capacidade de curto-circuito do painel, a corrente nominal de cabos e os barramentos de interligação, dentre outros parâmetros. Neste mesmo sentido, a automação de subestações também é representada através de um diagrama de projeto que mostra os principais equipamentos (*switches*, CLPs, computadores industriais, interfaces homem-máquina) e suas interligações do ponto de vista da automação; o que é denominado arquitetura de automação de subestações. A arquitetura de automação de subestações tem também a finalidade de mostrar as principais interligações com outros sistemas, como por exemplo, os sistemas de automação e controle da plataforma, turbo-geradores e outros componentes do sistema elétrico como o PMS (*Power Management System*), VSD (*Variable Speed Drives*) etc.

Como princípio básico, a arquitetura de automação deve apresentar de forma clara como os equipamentos que controlam ou monitoram o sistema elétrico estão interligados. Conforme verificado na norma IEC 61850, é definido um modelo de comunicação de dados que divide um sistema de automação em três níveis distintos: nível de estação, nível de vão

(ou *bay*) e nível de processo. O nível de processo compreende os sensores (transformadores de corrente e tensão, por exemplo) e atuadores (disjuntores e chaves, por exemplo) que normalmente, mas não proibitivamente, não são mostrados numa arquitetura de automação. O nível de vão contém os equipamentos que controlam e fazem a proteção do sistema. Esses equipamentos são identificados numa arquitetura comum como IEDs ou de forma mais abrangente como BCUs, que compreendem os IEDs e as gavetas dos painéis elétricos, responsáveis por comandar cargas elétricas, como motores. Não menos importante é a função dos equipamentos que integram o nível de estação, que são apresentados numa arquitetura de automação como IHMs e CIs. Ainda aparecem num diagrama de projeto de automação outros equipamentos que integram o sistema de automação como os *switches* que interligam os níveis ou ainda os próprios equipamentos elétricos (VSDs, PMS, painéis de outros equipamentos), conforme já mencionado. As arquiteturas apresentadas neste trabalho consideram os níveis de vão e de estação. O nível de processo não é considerado, de forma a não complicar demasiadamente as análises de disponibilidade.

5.1.1 Componentes de automação das subestações

Os principais componentes utilizados em automação de subestações elétricas são: a IHM (Interface Homem-Máquina), o CI (Computador Industrial), o SCCR (Servidor de Controle Central da Rede) e a BCU (Baia de Controle da unidade) que, fazendo parte do painel elétrico, inclui o IED ou relé eletrônico digital. Outros componentes utilizados são: a FAC (Fonte de Alimentação CC), o SWE (*Switch Ethernet*) e a IE (Interface Ethernet). Ressalta-se com relação à IE, que esta inclui o meio físico da rede Ethernet (cabo de pares trançados, por exemplo) e que, quando o IED envia dois quadros redundantes, se utiliza de duas IEs. A maioria desses componentes foi apresentada no Capítulo 1. Conforme demonstrado no Capítulo 2, o IED pode ser considerado como o DANH, ou nó que se utiliza do protocolo HSR, ou o DANP, que é o nó que se utiliza do protocolo PRP, dependendo do protocolo utilizado.

5.1.2 Arquiteturas utilizadas na avaliação

Assume-se que cada arquitetura contém seis BCUs com seus respectivos IEDs com portas redundantes, no entanto, um cálculo generalizado para n BCUs poderia ser realizado. Três arquiteturas que devido à sua topologia podem utilizar o protocolo PRP são apresentadas nas Figuras 20, 21 e 22 e uma arquitetura que devido à sua topologia pode utilizar o protocolo HSR é apresentada na Figura 23. Na Figura 20, pode-se observar que foram utilizados dois *switches*, onde cada um é considerado uma rede que interliga as BCUs. Esta arquitetura representa o caso da LAN mais simples possível numa configuração que permite a utilização do protocolo PRP. Na Figura 21, as LANs têm configurações diferentes, sendo a LAN 1 em anel e a LAN 2 numa topologia em árvore ou barramento; outra opção que pode ser utilizada com o protocolo PRP. Na Figura 22, verifica-se que as duas LANs são iguais, em anel com quatro *switches*. Esta arquitetura representa um exemplo em que as LANs contêm mais *switches*, numa configuração mais robusta que se aproxima de uma arquitetura utilizada na prática em automação de subestações elétricas e que permite a utilização do protocolo PRP. Na Figura 23, as BCUs estão interligadas em anel junto com um *switch* que possibilita a comunicação das BCUs com a SCCR e a IHM; permitindo a utilização do protocolo HSR.

As arquiteturas das Figuras 21 e 23 são baseadas em exemplos na IEC 62439-3 (2016) e as arquiteturas das Figuras 20 e 22 foram incluídas para verificação do comportamento de LANs simples com apenas um switch em cada rede e LANs mais robustas (com quatro switches em cada rede). Todas as arquiteturas seguem a abordagem apresentada em Hajian-Hoseinabbadi (2013) de utilização de seis BCUs e controle via SCCR ou CI em série com IHM. Dessa forma, algumas alterações em relação às arquiteturas da norma IEC 62439-3 (2016) foram realizadas, tais como a inclusão de um *switch* na arquitetura que utiliza o protocolo HSR e a inclusão dos componentes SCCR, CI e IHM em todas as arquiteturas, de forma que os resultados de arquiteturas sem a utilização dos protocolos de camada de enlace possam ser comparados com os resultados das Arquiteturas 5 e 7 de Hajian-Hoseinabbadi (2013), que poderiam utilizar os protocolos HSR e PRP respectivamente, devido às topologias apresentadas.

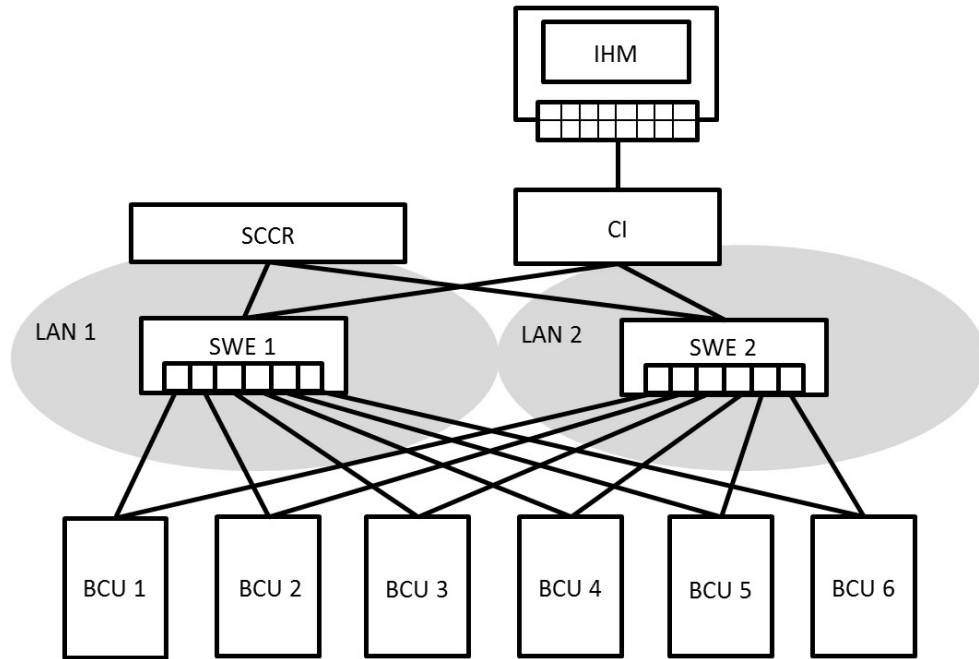


Figura 20 -Arquitetura 1 utilizada na avaliação.

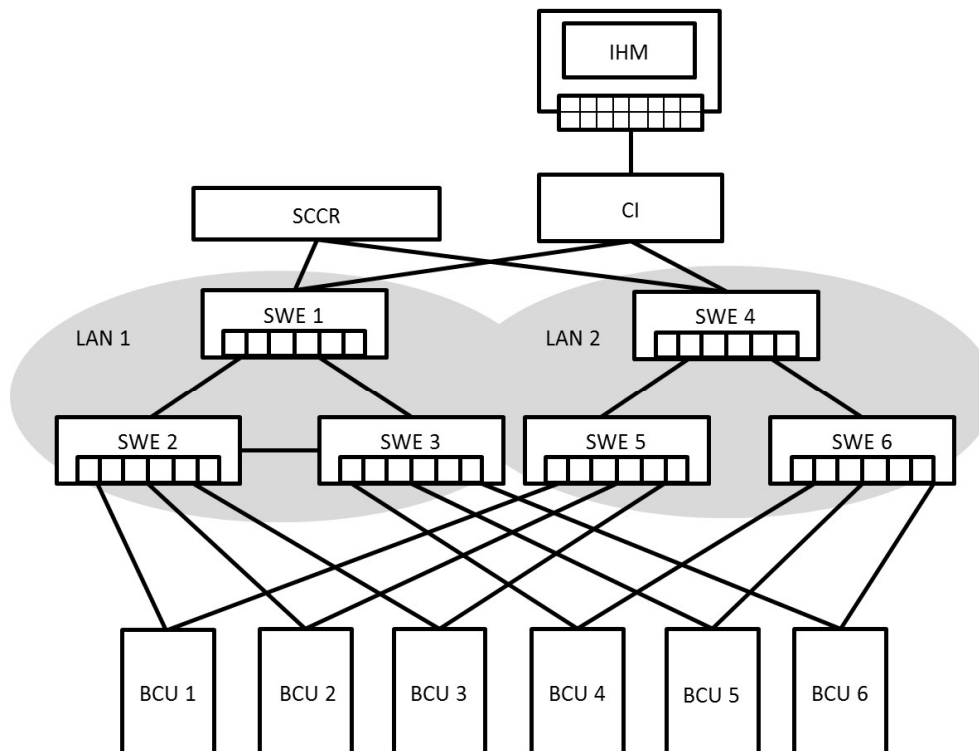


Figura 21 - Arquitetura 2 utilizada na avaliação.

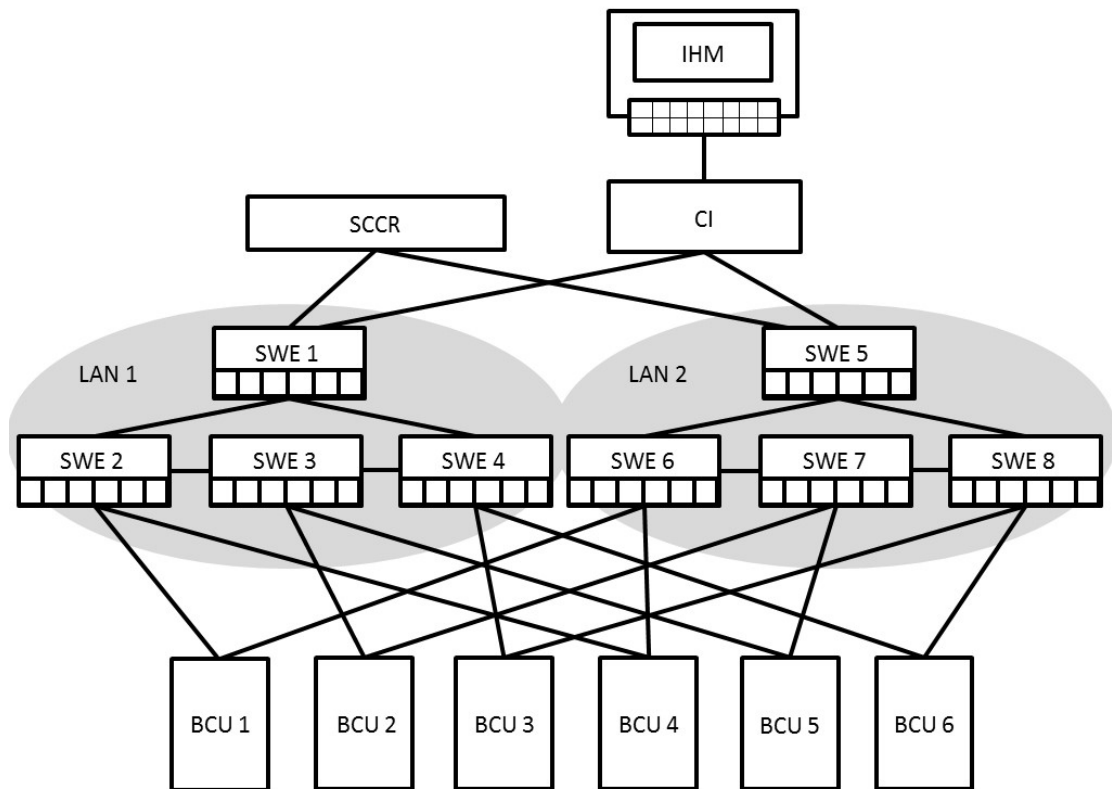


Figura 22 - Arquitetura 3 utilizada na avaliação.

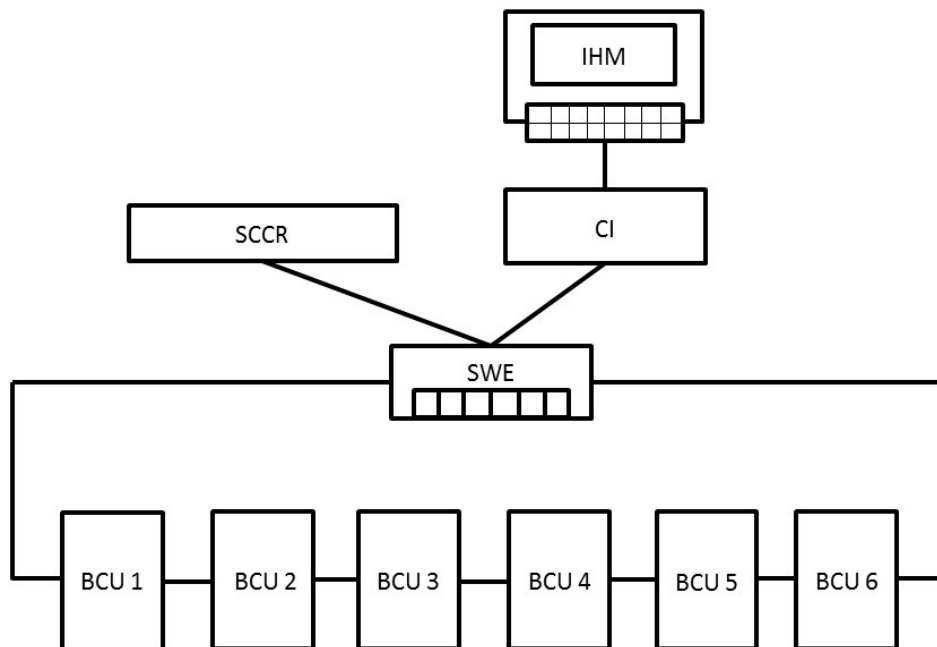


Figura 23 - Arquitetura 4 utilizada na avaliação.

5.2 Diagramas de Bloco de Confiabilidade

Em um RBD, conforme apresentado na Seção 4.5, estruturas em série significam que o sistema só funciona se e somente se todos os componentes da estrutura estiverem operacionais e estruturas em paralelo significam que o sistema funciona se no mínimo um componente desta estrutura estiver em operação [RAUSAND e HOYLAND, 2004]. O desenvolvimento do RBD é de capital importância para o cálculo de disponibilidade.

Na introdução desses componentes nos RBDs, foram realizadas algumas suposições. Nos casos em que diversas FACs são colocadas em série, apenas um bloco será representado para este fim no RBD, por simplicidade. Todos os cálculos partem da premissa que a disponibilidade é calculada a partir de um determinado acionamento, controle ou monitoramento na BCU e conseqüente visualização pela IHM ou processamento pelo SCCR; portanto, a BCU em operação influencia diretamente a montagem do RBD e conseqüentemente na disponibilidade calculada. Considera-se a comunicação como tendo origem na BCU e destino no CI e IHM ou no SCCR, simulando um acionamento no painel e monitoramento remoto em uma central de controle da rede através do SCCR (por exemplo, em terra para operações *offshore*) ou na IHM (por exemplo, em uma sala de controle na plataforma); no entanto, os mesmos cálculos poderiam ser aplicados no sentido inverso. Esta premissa poderia ser modificada conforme o sistema a ser analisado já que em alguns sistemas há apenas controle remoto ou apenas controle local. Com relação à representação dos protocolos da camada de enlace, segundo Hajian-Hoseinabadi (2013), para esta análise com PRP, os diagramas de bloco de duas LANs devem ser inseridos em paralelo e no caso do HSR, para a construção do anel, os dois caminhos devem ser modelados como blocos paralelos.

Duas outras premissas são adotadas para maior simplicidade dos cálculos e se refletem na montagem dos RBDs. A primeira premissa é a abstenção da utilização do protocolo RSTP nos anéis e a segunda premissa refere-se ao fato que o quadro sempre “procura” o menor caminho para chegar ao seu destino. Por exemplo, na Arquitetura 2 (Figura 21), caso houvesse a quebra de enlace entre os *switches* 2 e 1 na LAN 1, não há a possibilidade de reconfiguração e comunicação através do “outro lado” do anel, ou seja, através dos *switches* 2, 3 e 1. E de acordo com a segunda premissa, uma vez que o quadro chegue ao *switch* 2 na

Arquitetura 2, somente o caminho mais curto é representado no RBD, ou seja, considera-se somente o caso do envio do quadro para o *switch 2* e em seguida para o *switch 1*.

Neste contexto, nenhum protocolo de roteamento ou outro protocolo de enlace é utilizado e a análise de cada quadro fica restrita apenas a um caminho único deste mesmo quadro. Conforme premissas apresentadas anteriormente, o quadro é emitido pela BCU explicitada no RBD, trafega pelo menor caminho até os pontos de controle que são o SCCR ou os equipamentos CI e IHM em série. E se um enlace for quebrado neste menor caminho que o quadro realiza, esta tentativa de transmissão entra nos resultados como uma falha, já que não há reconfiguração por RSTP.

A utilização do protocolo RSTP é anulada porque, conforme mencionado na Seção 3.1, a implementação do RSTP insere um tempo de reconfiguração alto para os padrões dos sistemas elétricos. Além disso, o intuito deste trabalho é a análise pura e simples da disponibilidade como consequência da utilização ou não dos protocolos PRP e HSR. A simples utilização de outros protocolos de reconfiguração, sejam da própria camada de enlace ou de outra camada, iria deturpar os resultados consequentes da utilização do PRP ou do HSR.

O RBD para a Arquitetura 1 sem a utilização do protocolo PRP é apresentado na Figura 24. Como se considera que o controle pode ser realizado pela IHM ou pelo SCCR, os conjuntos de blocos relativos aos dois (IE-CI-IHM e IE-SCCR) estão organizados em paralelo. Além disso, a fonte (FAC) é colocada em série com os outros blocos, como descrito anteriormente. Considerando que cada BCU não envia quadros redundantes apesar de estar conectada às duas LANs, por não utilizar o protocolo PRP, a representação no RBD é de apenas um *switch*, visto que é o único caminho possível para o quadro. Como esta análise é realizada para o caso de não utilização do protocolo PRP, a retirada de uma das duas LANs da Arquitetura 1 não iria influenciar no resultado, já que o quadro único trafega apenas por uma das LANs. No entanto, é preferível manter a mesma representação da Figura 20, justamente para salientar a que a mesma arquitetura pode ser utilizada implementando o protocolo PRP. O mesmo ocorre com as Arquiteturas 2 e 3.

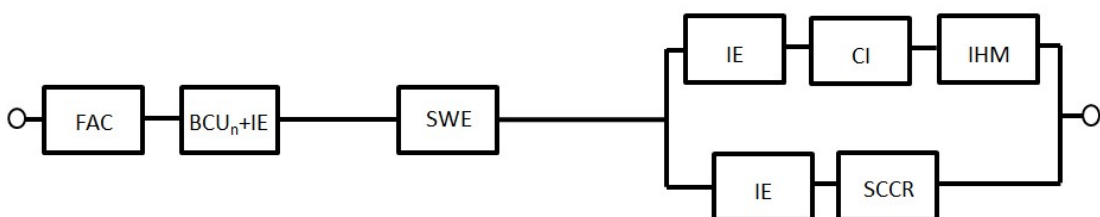


Figura 24 - RBD da Arquitetura 1 sem utilizar o protocolo PRP.

O RBD para a Arquitetura 1 com a utilização do protocolo PRP é apresentado na Figura 25. Este RBD, conforme o anterior, também considera os blocos relativos ao IHM, SCCR e FAC da mesma forma, o que ocorrerá também nos demais RBDs. No entanto, considerando que cada BCU envia dois quadros redundantes para duas LANs distintas que estão representadas por SWE 1 e SWE 2 e que qualquer BCU precisa se comunicar com um dos dois *switches* para o sistema estar operante, os blocos SWE 1 e SWE 2 estão em paralelo.

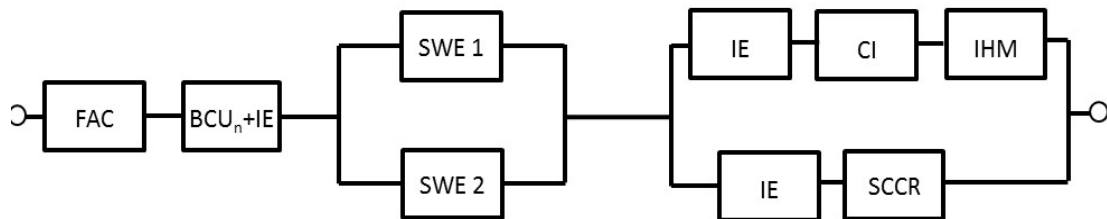


Figura 25 - RBD da Arquitetura 1 utilizando o protocolo PRP.

O RBD para a Arquitetura 2 sem a utilização do protocolo PRP é apresentado na Figura 26. Considera-se duas LANs distintas, de acordo com a Figura 21, em que a LAN 1 é um anel e a LAN 2 possui uma topologia em árvore; no entanto, para representação no RBD da Arquitetura 2 sem a utilização do PRP, apenas uma das LANs (2 *switches* em série) é considerada. Apesar de as BCUs estarem conectada às duas LANs, estas não enviam quadros redundantes e por esse motivo um quadro enviado só pode trafegar por uma das LANs. Ressalta-se que a montagem do RBD parte do pressuposto que o protocolo RSTP não é utilizado, conforme mencionado anteriormente.

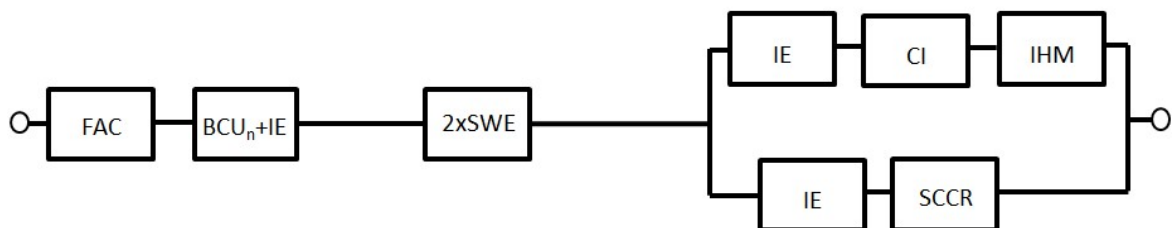


Figura 26 - RBD da Arquitetura 2 sem utilizar o protocolo PRP.

O RBD para a Arquitetura 2 com a utilização do protocolo PRP é apresentado na Figura 27. A LAN 2 é representada como dois *switches* em série; o mesmo para a LAN 1. No entanto, diferentemente da análise sem a utilização do PRP, neste caso, as duas LANs são representadas no RBD, já que cada BCU envia quadros redundantes por suas portas.

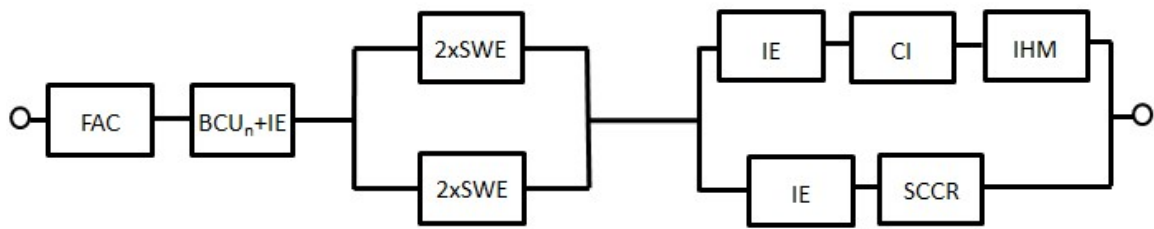


Figura 27 - RBD da Arquitetura 2 utilizando o protocolo PRP.

O RBD para a Arquitetura 3 pode ser representado de duas formas conforme a BCU de origem da mensagem em função de uma quantidade diferente de *switches* utilizados na comunicação. Considera-se que a BCU de origem é a BCU 1, 3, 4 ou 6 para o RBD 1 da Arquitetura 3 e que a BCU de origem é a BCU 2 ou 5 para o RBD 2 da Arquitetura 3.

No RBD 1 da Arquitetura 3 sem a utilização do protocolo PRP apresentado na Figura 28, verifica-se que há apenas uma possibilidade de caminho da mensagem por dois *switches*. Analogamente para a Figura 29 verifica-se que há possibilidade de redundância por dois *switches*, devido à utilização do protocolo PRP.

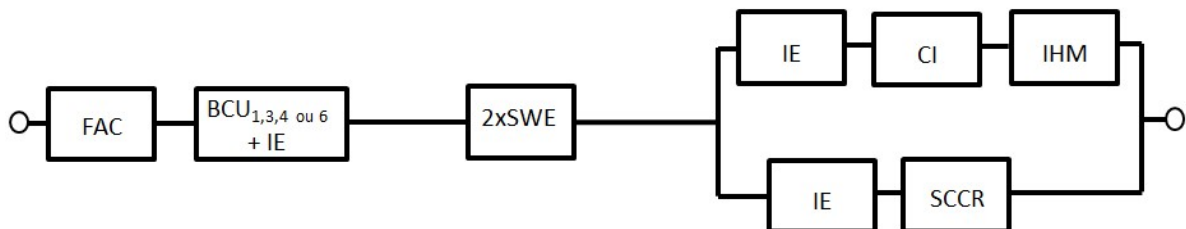


Figura 28 - RBD 1 da Arquitetura 3 sem utilizar o protocolo PRP.

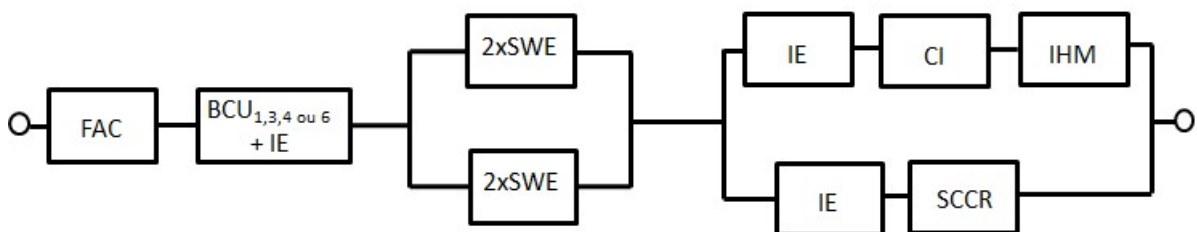


Figura 29 - RBD 1 da Arquitetura 3 utilizando o protocolo PRP.

No RBD 2 da Arquitetura 3 sem a utilização do protocolo PRP, apresentado na Figura 30, verifica-se que há apenas uma possibilidade de caminho da mensagem por

três *switches*. Analogamente para a Figura 31, verifica-se que há a possibilidade de redundância por três *switches* em função do uso do protocolo PRP.

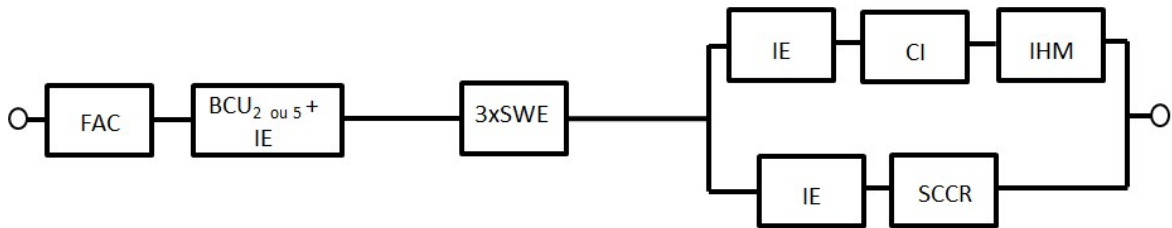


Figura 30 - RBD 2 da Arquitetura 3 sem utilizar o protocolo PRP.

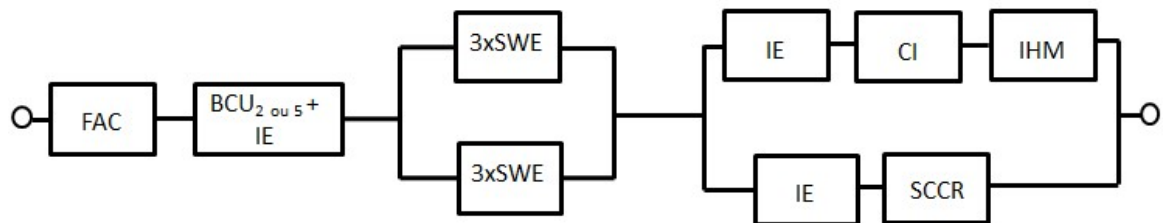


Figura 31 - RBD 2 da Arquitetura 3 utilizando o protocolo PRP.

Os RBDs para a Arquitetura 4 são apresentados a seguir. Considerando que pelo conceito do protocolo HSR cada BCU envia dois quadros redundantes, um em cada sentido do anel e que este quadro pode ser enviado de qualquer BCU do anel, seja este o equipamento mais próximo ou o mais distante do *switch*, pode haver três RBDs distintos, a depender da posição da BCU emissora para o caso de utilização do protocolo HSR. Da mesma forma, pode haver três RBDs distintos, a depender da BCU emissora, para um anel em que a BCU só envia quadros em um sentido do anel (no sentido onde o caminho é mais curto conforme premissa apresentada anteriormente), ou seja, em que não há utilização do protocolo HSR.

Os RBDs 1 da Arquitetura 4, representados nas Figuras 32 e 33, consideram que a BCU emissora é a mais próxima ao *switch*, ou seja, a BCU 1 ou analogamente a BCU 6 da Figura 23.

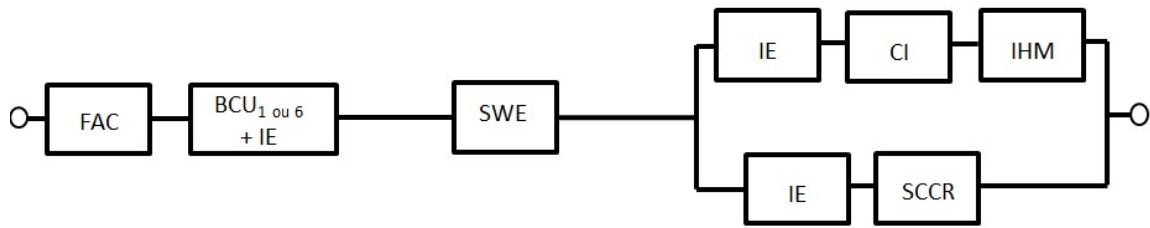


Figura 32 - RBD 1 da Arquitetura 4 sem utilizar o protocolo HSR.

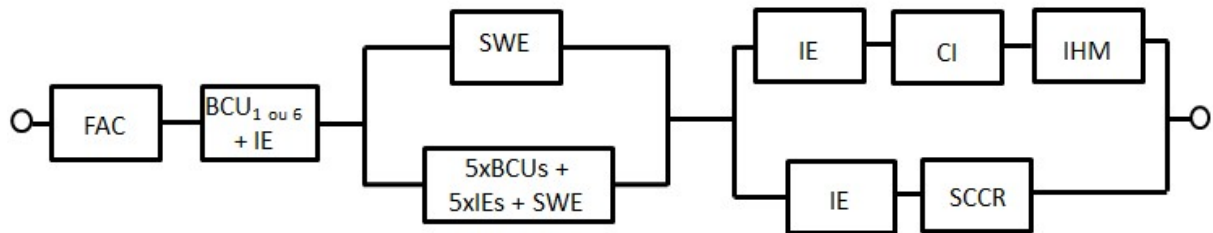


Figura 33 - RBD 1 da Arquitetura 4 utilizando o protocolo HSR.

Os RBDs 2 da Arquitetura 4, representados nas Figuras 34 e 35, consideram que a BCU emissora é a segunda mais próxima ao *switch*, ou seja, a BCU 2 ou analogamente a BCU 5 da Figura 23.

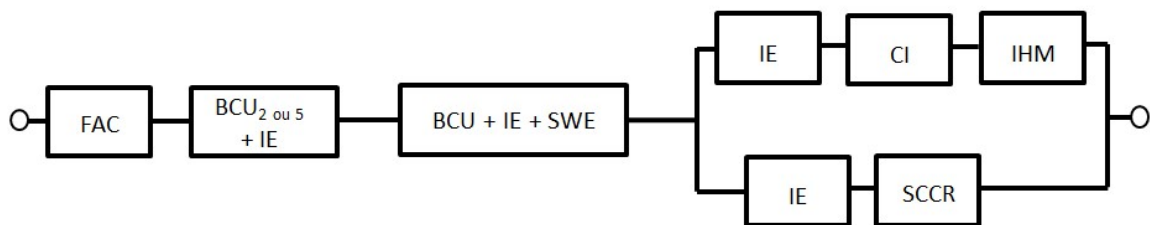


Figura 34 - RBD 2 da Arquitetura 4 sem utilizar o protocolo HSR.

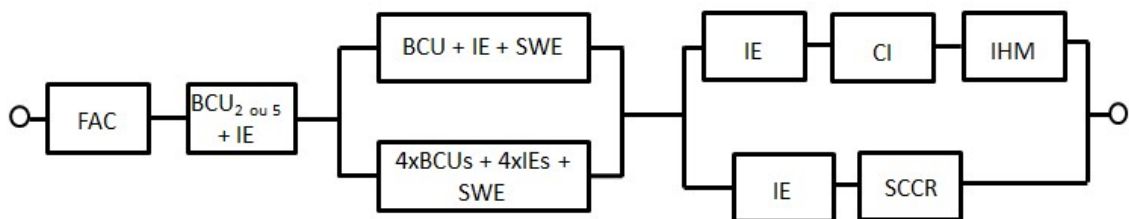


Figura 35 - RBD 2 da Arquitetura 4 utilizando o protocolo HSR.

Os RBDs 3 da Arquitetura 4, representados nas Figuras 36 e 37, consideram que a BCU emissora é a terceira mais próxima ao *switch*, ou seja, a BCU 3 ou analogamente a BCU 4 da Figura 23.

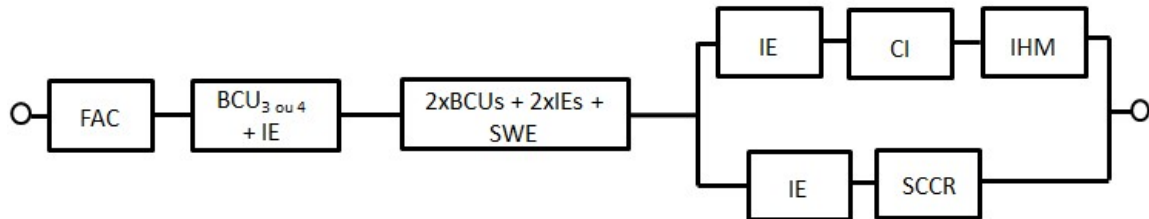


Figura 36 - RBD 3 da Arquitetura 4 sem utilizar o protocolo HSR.

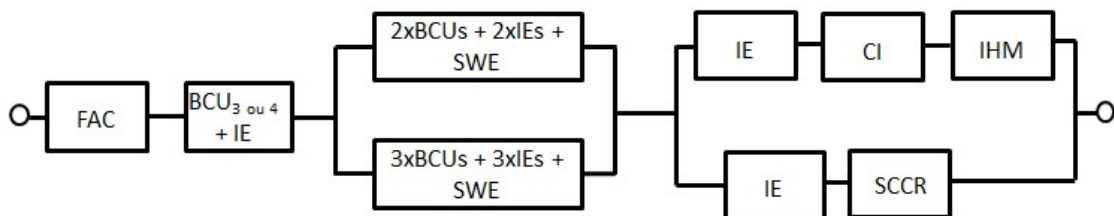


Figura 37 - RBD 3 da Arquitetura 4 utilizando o protocolo HSR.

5.3 Índices de Disponibilidade

Os seguintes índices de disponibilidade (métricas) [BILLINTON e ALLAN, 1992] foram utilizados na análise:

- MTTF (*Mean Time To Failure*): é o tempo médio até um componente necessitar de reparo;

- MTTR (*Mean Time To Repair*): é o tempo decorrido entre a detecção e o reparo de uma falha. Nesta dissertação, este tempo foi considerado como sendo de 48 h, seguindo Hajian-Hoseinabadi (2013), Scheer (1999) e SEL (2011); incluindo todo o processo de reparo, desde o diagnóstico até o funcionamento normal;

- $A_{\text{sem reparo}}$ (Disponibilidade Sem Reparo): é a disponibilidade do sistema se o reparo for feito apenas após uma missão (de reparo), ou seja, com todo o sistema inoperante. É calculado a partir do MTTF do sistema e do MTTR;

- $A_{\text{com reparo}}$ (Disponibilidade Com Reparo): é a disponibilidade do sistema se o reparo for feito imediatamente após a falha dentro do tempo do MTTR, ou seja, se o reparo for feito durante a missão com o sistema ainda operante;

- $MTTF_{\text{com reparo}}$ (*Mean Time To Failure* com reparo): é o tempo médio até uma segunda falha ocorrer, antes de a primeira falha ser reparada (durante a missão), e o sistema todo ser declarado indisponível devido às duas falhas;

As seguintes equações, de acordo com Billinton e Allan (1992), foram utilizadas para os cálculos de disponibilidade de cada arquitetura, onde $MTTF_1$ e $MTTF_2$ são os índices MTTF considerando somente dois componentes (1 e 2), respectivamente:

$$MTTF = MTTF_1 + MTTF_2, \quad (1)$$

se os componentes 1 e 2 são redundantes, ou seja, se estão em paralelo no RBD, e

$$MTTF = ((MTTF_1)^{-1} + (MTTF_2)^{-1})^{-1}, \quad (2)$$

se os componentes 1 e 2 estão em série no RBD.

A disponibilidade sem reparo do sistema é dada por:

$$A_{\text{sem reparo}} = MTTF / (MTTF + MTTR). \quad (3)$$

A disponibilidade com reparo é dada por:

$$A_{\text{com reparo}} = A_1 + A_2 - A_1 \times A_2, \quad (4)$$

onde A_1 é a disponibilidade sem reparo do componente 1 e A_2 é a disponibilidade sem reparo do componente 2, se os componentes 1 e 2 são redundantes, ou seja, se estão em paralelo no RBD e:

$$A_{\text{com reparo}} = A_1 \times A_2, \quad (5)$$

se os componentes 1 e 2 estão em série no RBD.

O MTTF com reparo do sistema é dado por:

$$MTTF_{\text{com reparo}} = A_{\text{com reparo}} \times MTTR / (1 - A_{\text{com reparo}}). \quad (6)$$

Os índices de disponibilidade foram calculados de acordo com o procedimento a seguir. Os cálculos do MTTF resultante de cada arquitetura foram realizados a partir dos dados de MTTFs de cada componente pelas Equações (1) e (2). A partir do MTTF resultante de cada arquitetura e do MTTR (48h), pôde-se obter a disponibilidade sem reparo de cada arquitetura através da Equação (3). Para o cálculo da disponibilidade com reparo de cada arquitetura foram utilizadas as Equações (4) e (5) de acordo com as disponibilidades sem reparo de cada componente (A_1 e A_2). A partir da disponibilidade com reparo de cada arquitetura e do MTTR (48h), pôde-se obter o MTTF com reparo de cada arquitetura através da Equação (6).

5.4 Cálculos de Disponibilidade

Os cálculos consideram a disponibilidade total do controle pela IHM ou remotamente pelo servidor (SCCR).

Os MTTFs referentes a todos os RBDs são apresentados a seguir:

$$MTTF^{-1} = MTTF^{-1}_{FAC} + MTTF^{-1}_{BCU} + MTTF^{-1}_{IE} + MTTF^{-1}_{\alpha} + MTTF^{-1}_{\beta}, \quad (7)$$

onde α corresponde ao(s) bloco(s) logo em seguida ao segundo bloco (da esquerda para a direita) do RBD e antes de β que corresponde aos blocos IE, CI e IHM em paralelo com os blocos IE e SCCR.

Para o RBD da Arquitetura 1 sem utilizar PRP:

$$MTTF^{-1}_{\alpha} = 1 / (MTTF_{SWE}). \quad (8)$$

Para o RBD da Arquitetura 1 utilizando o protocolo PRP:

$$MTTF^{-1}_{\alpha} = 1 / (MTTF_{SWE1} + MTTF_{SWE2}). \quad (9)$$

Para o RBD da Arquitetura 2 sem utilizar PRP:

$$MTTF^{-1}_{\alpha} = 1 / (MTTF_{2SWE}). \quad (10)$$

Para o RBD da Arquitetura 2 utilizando o protocolo PRP:

$$MTTF^{-1}_{\alpha} = 1 / (MTTF_{2SWE} + MTTF_{2SWE}). \quad (11)$$

Para o RBD 1 da Arquitetura 3 sem utilizar PRP:

$$MTTF^{-1}_{\alpha} = 1 / (MTTF_{2SWE}). \quad (12)$$

Para o RBD 1 da Arquitetura 3 utilizando o protocolo PRP:

$$MTTF^{-1}_{\alpha} = 1 / (MTTF_{2SWE} + MTTF_{2SWE}). \quad (13)$$

Para o RBD 2 da Arquitetura 3 sem utilizar PRP:

$$MTTF^{-1}_{\alpha} = 1 / (MTTF_{3SWE}). \quad (14)$$

Para o RBD 2 da Arquitetura 3 utilizando o protocolo PRP:

$$MTTF^{-1}_{\alpha} = 1 / (MTTF_{3SWE} + MTTF_{3SWE}). \quad (15)$$

Para o RBD 1 da Arquitetura 4 sem utilizar HSR:

$$MTTF^{-1}_{\alpha} = 1 / (MTTF_{SWE}). \quad (16)$$

Para o RBD 1 da Arquitetura 4 utilizando o protocolo HSR:

$$MTTF^{-1}_{\alpha} = 1 / (MTTF_{SWE} + (MTTF^{-1}_{5xBCUs} + MTTF^{-1}_{5xIEs} + MTTF^{-1}_{SWE})^{-1}). \quad (17)$$

Para o RBD 2 da Arquitetura 4 sem utilizar HSR:

$$MTTF^{-1}_{\alpha} = 1 / (MTTF^{-1}_{BCU} + MTTF^{-1}_{IE} + MTTF^{-1}_{SWE})^{-1}. \quad (18)$$

Para o RBD 2 da Arquitetura 4 utilizando o protocolo HSR:

$$MTTF^{-1}_{\alpha} = 1 / ((MTTF^{-1}_{BCU} + MTTF^{-1}_{IE} + MTTF^{-1}_{SWE})^{-1} + (MTTF^{-1}_{4xBCUs} + MTTF^{-1}_{4xIEs} + MTTF^{-1}_{SWE})^{-1}). \quad (19)$$

Para o RBD 3 da Arquitetura 4 sem utilizar HSR:

$$MTTF^{-1}_{\alpha} = 1 / (MTTF^{-1}_{2xBCU} + MTTF^{-1}_{2xIE} + MTTF^{-1}_{SWE})^{-1}. \quad (20)$$

Para o RBD 3 da Arquitetura 4 utilizando o protocolo HSR:

$$MTTF^{-1}_{\alpha} = 1 / ((MTTF^{-1}_{2xBCUs} + MTTF^{-1}_{2xIEs} + MTTF^{-1}_{SWE})^{-1} + (MTTF^{-1}_{3xBCUs} + MTTF^{-1}_{3xIEs} + MTTF^{-1}_{SWE})^{-1}). \quad (21)$$

Para todos os RBDs:

$$MTTF^{-1}_{\beta} = 1 / ((MTTF^{-1}_{IE} + MTTF^{-1}_{CI} + MTTF^{-1}_{IHM})^{-1} + (MTTF^{-1}_{IE} + MTTF^{-1}_{SCCR})^{-1}). \quad (22)$$

Para todas as arquiteturas a $A_{\text{sem reparo}}$ é dada pela Equação (3) convertendo-se o valor de MTTF para horas e utilizando-se o MTTR de 48 h, conforme descrito na Seção 5.3.

Para o RBD da Arquitetura 1 sem utilizar PRP:

$$A_{\text{com reparo}} = A_{FAC} \times A_{BCU} \times A_{IE} \times (A_{SWE}) \times (A_{\beta}). \quad (23)$$

Para o RBD da Arquitetura 1 utilizando o protocolo PRP:

$$A_{\text{com reparo}} = A_{FAC} \times A_{BCU} \times A_{IE} \times (A_{SWE1} + A_{SWE2} - A_{SWE1} \times A_{SWE2}) \times (A_{\beta}), \quad (24)$$

onde A_{β} (válido para os demais RBDs) é igual a:

$$A_{\beta 1} + A_{\beta 2} - A_{\beta 1} \times A_{\beta 2} \quad (25)$$

e $A_{\beta 1}$ é igual a:

$$A_{IE} \times A_{CI} \times A_{IHM} \quad (26)$$

e $A_{\beta 2}$ é igual a:

$$A_{IE} \times A_{SCCR} \quad (27)$$

Para o RBD da Arquitetura 2 sem utilizar PRP:

$$A_{\text{com reparo}} = A_{FAC} \times A_{BCU} \times A_{IE} \times (A_{2xSWE}) \times (A_{\beta}). \quad (28)$$

Para o RBD da Arquitetura 2 utilizando o protocolo PRP:

$$A_{\text{com reparo}} = A_{FAC} \times A_{BCU} \times A_{IE} \times (A_{\alpha 1} + A_{\alpha 2} - A_{\alpha 1} \times A_{\alpha 2}) \times (A_{\beta}), \quad (29)$$

onde $A_{\alpha 1}$ e $A_{\alpha 2}$ são:

$$A_{2SWE}. \quad (30)$$

Para o RBD 1 da Arquitetura 3 sem utilizar PRP:

$$A_{\text{com reparo}} = A_{FAC} \times A_{BCU} \times A_{IE} \times (A_{2xSWE}) \times (A_{\beta}). \quad (31)$$

Para o RBD 1 da Arquitetura 3 utilizando o protocolo PRP:

$$A_{\text{com reparo}} = A_{FAC} \times A_{BCU} \times A_{IE} \times (A_{\alpha 1} + A_{\alpha 2} - A_{\alpha 1} \times A_{\alpha 2}) \times (A_{\beta}), \quad (32)$$

onde $A_{\alpha 1}$ e $A_{\alpha 2}$ são:

$$A_{2SWE}. \quad (33)$$

Para o RBD 2 da Arquitetura 3 sem utilizar PRP:

$$A_{\text{com reparo}} = A_{\text{FAC}} \times A_{\text{BCU}} \times A_{\text{IE}} \times (A_{3\text{xSWE}}) \times (A_{\beta}). \quad (34)$$

Para o RBD 2 da Arquitetura 3 utilizando o protocolo PRP:

$$A_{\text{com reparo}} = A_{\text{FAC}} \times A_{\text{BCU}} \times A_{\text{IE}} \times (A_{\alpha 1} + A_{\alpha 2} - A_{\alpha 1} \times A_{\alpha 2}) \times (A_{\beta}), \quad (35)$$

onde $A_{\alpha 1}$ e $A_{\alpha 2}$ são:

$$A_{3\text{SWE}}. \quad (36)$$

Para o RBD 1 da Arquitetura 4 sem utilizar HSR:

$$A_{\text{com reparo}} = A_{\text{FAC}} \times A_{\text{BCU}} \times A_{\text{IE}} \times (A_{\text{SWE}}) \times (A_{\beta}). \quad (37)$$

Para o RBD 1 da Arquitetura 4 utilizando o protocolo HSR:

$$A_{\text{com reparo}} = A_{\text{FAC}} \times A_{\text{BCU}} \times A_{\text{IE}} \times (A_{\text{SWE}} + A_{\alpha 2} - A_{\text{SWE}} \times A_{\alpha 2}) \times (A_{\beta}), \quad (38)$$

onde $A_{\alpha 2}$ é igual a:

$$A_{5\text{BCU}} \times A_{5\text{IE}} \times A_{\text{SWE}}. \quad (39)$$

Para o RBD 2 da Arquitetura 4 sem utilizar HSR:

$$A_{\text{com reparo}} = A_{\text{FAC}} \times A_{\text{BCU}} \times A_{\text{IE}} \times (A_{\text{BCU}} \times A_{\text{IE}} \times A_{\text{SWE}}) \times (A_{\beta}). \quad (40)$$

Para o RBD 2 da Arquitetura 4 utilizando o protocolo HSR:

$$A_{\text{com reparo}} = A_{\text{FAC}} \times A_{\text{BCU}} \times A_{\text{IE}} \times (A_{\alpha 1} + A_{\alpha 2} - A_{\alpha 1} \times A_{\alpha 2}) \times (A_{\beta}), \quad (41)$$

onde $A_{\alpha 1}$ é igual a:

$$A_{\text{BCU}} \times A_{\text{IE}} \times A_{\text{SWE}}, \quad (42)$$

e $A_{\alpha 2}$ é igual a:

$$A_{4BCU} \times A_{4IE} \times A_{SWE}, \quad (43)$$

Para o RBD 3 da Arquitetura 4 sem utilizar HSR:

$$A_{\text{com reparo}} = A_{FAC} \times A_{BCU} \times A_{IE} \times (A_{2xBCU} \times A_{2xIE} \times A_{SWE}) \times (A_{\beta}). \quad (44)$$

Para o RBD 3 da Arquitetura 4 utilizando o protocolo HSR:

$$A_{\text{com reparo}} = A_{FAC} \times A_{BCU} \times A_{IE} \times (A_{\alpha 1} + A_{\alpha 2} - A_{\alpha 1} \times A_{\alpha 2}) \times (A_{\beta}), \quad (45)$$

onde $A_{\alpha 1}$ é igual a:

$$A_{2BCU} \times A_{2IE} \times A_{SWE} \quad (46)$$

e $A_{\alpha 2}$ é igual a:

$$A_{3BCU} \times A_{3IE} \times A_{SWE}. \quad (47)$$

Por último, os MTTFs com reparo são calculados de acordo com as Equações (6) e (23) a (47).

5.5 Resultados

As disponibilidades para os RBDs apresentadas na Seção 5.4 são obtidas utilizando-se os parâmetros da Tabela 3.

Tabela 3 - MTTFs dos componentes utilizados na análise.

| <i>Componentes</i> | <i>MTTF (anos)</i> |
|--------------------|------------------------|
| IE | 300 |
| FAC | 109,6 |
| BCU | 103,5 |
| CI | 14,3 |
| SCCR | 14,3 |
| SWE | 11,5 |
| IHM | 10 |

Fonte: *U.S. Military Standard*, 1980.

Os cálculos das disponibilidades com e sem reparo além dos índices de MTTF com e sem reparo são apresentados no Anexo A. Os gráficos referentes aos índices de disponibilidade calculados no Anexo A são apresentados nas Seções 5.5.2 a 5.5.4.

Para melhor visualização dos gráficos apresentados, a seguinte notação foi utilizada: A n (x) PPP, onde A é denominado arquitetura e aparece em todas as arquiteturas avaliadas, n é o número da arquitetura variando de 1 a 4 conforme apresentado na Seção 5.1.2, x é o número do RBD de determinada arquitetura que contenha mais de uma opção de RBD e pode variar de 1 a 3 e PPP é o protocolo (PRP ou HSR) caso seja utilizado na avaliação. Ao invés da métrica disponibilidade, os resultados são apresentados em termos de indisponibilidade, para maior representação das diferenças de desempenhos entre arquiteturas. .

A CEI IEC 870-4 (1990) define três classes de disponibilidade para sistemas de automação em subestações: A1 para disponibilidades iguais ou acima de 99%, A2 para disponibilidades iguais ou acima de 99,75% e A3 para disponibilidades iguais ou acima de 99,95%. Diante destes parâmetros, serão verificadas as classes das arquiteturas analisadas.

5.5.1 MTTF

De acordo com a Figura 38, pode-se verificar que a arquitetura que apresenta maior MTTF é a Arquitetura 1 (Figura 20), pois não depende de mais de *switch* ou BCU em série em nenhum dos ramos do seu RBD (Figuras 24 e 25). Esta característica vai se refletir positivamente com relação a esta arquitetura nos demais índices de disponibilidade analisados.

Ainda com relação à característica dos componentes serem dispostos em série, comparando-se a Arquitetura 4 (Figura 23) com as Arquiteturas 2 e 3 (Figuras 21 e 22) verifica-se que a Arquitetura 4 tem um MTTF maior. Isso ocorre até mesmo comparando seu RBD mais crítico, ou seja, o MTTF é maior mesmo no RBD 3 (Figuras 36 e 37), em que as BCUs 3 ou 4 são consideradas como BCUs de origem do quadro e conseqüentemente mais BCUs em série são dispostas nos ramos do RBD. Este fato ocorre devido ao MTTF da BCU (103,5 anos) ser muito maior do que o MTTF do SWE (11,5 anos) e em função das Arquiteturas 2 e 3 utilizarem um número maior de switches no caminho de comunicação com os componentes de controle. Esta característica se repete nos demais índices de disponibilidade.

Tendo em vista que a Arquitetura 7 de Hajian-Hoseinabbadi (2013) poderia se valer de sua topologia para utilizar o protocolo PRP e comparando com os resultados obtidos neste trabalho, verifica-se que o MTTF de 4,25 anos não é muito diferente dos resultados obtidos na Figura 38 para as Arquiteturas 1, 2 e 3 que não utilizam o protocolo PRP. Da mesma forma, a Arquitetura 5 de Hajian-Hoseinabbadi (2013) que poderia se valer de sua topologia para utilizar o protocolo HSR, tem um MTTF de 5,22 anos que não é muito distinto dos MTTFs encontrados na Arquitetura 4 deste trabalho. Esta comparação permite afirmar que os resultados obtidos neste trabalho não estão divergentes em relação aos resultados obtidos por Hajian-Hoseinabbadi (2013).

Dentre todos os RBDs avaliados, o RBD 2 da Arquitetura 3 (Figuras 30 e 31) é o que tem o menor MTTF. Isto se deve principalmente ao fato de esta arquitetura ter o maior número de *switches* em série em um mesmo ramo (três *switches*) dentre todas as arquiteturas analisadas. Esta característica se repete nos demais índices de disponibilidade.

Comparando-se todas as arquiteturas sem a utilização de protocolos de camada de enlace com suas respectivas arquiteturas com a utilização de protocolos de redundância (PRP ou HSR), observa-se que há um aumento expressivo de no mínimo 1,5 anos até mais de

2 anos no MTTF do sistema. Esta característica se repete nos demais índices de disponibilidade. Ainda com relação ao aumento do MTTF devido à utilização de protocolos de redundância de camada 2, todos os valores de MTTF oriundos da utilização dos protocolos PRP e HSR estão com pelo menos 2 anos de diferença acima dos valores das arquiteturas apresentadas por Hajian-Hoseinabadi (2013) que utilizam *switches*, mas que não utilizam protocolos de redundância de camada de enlace.

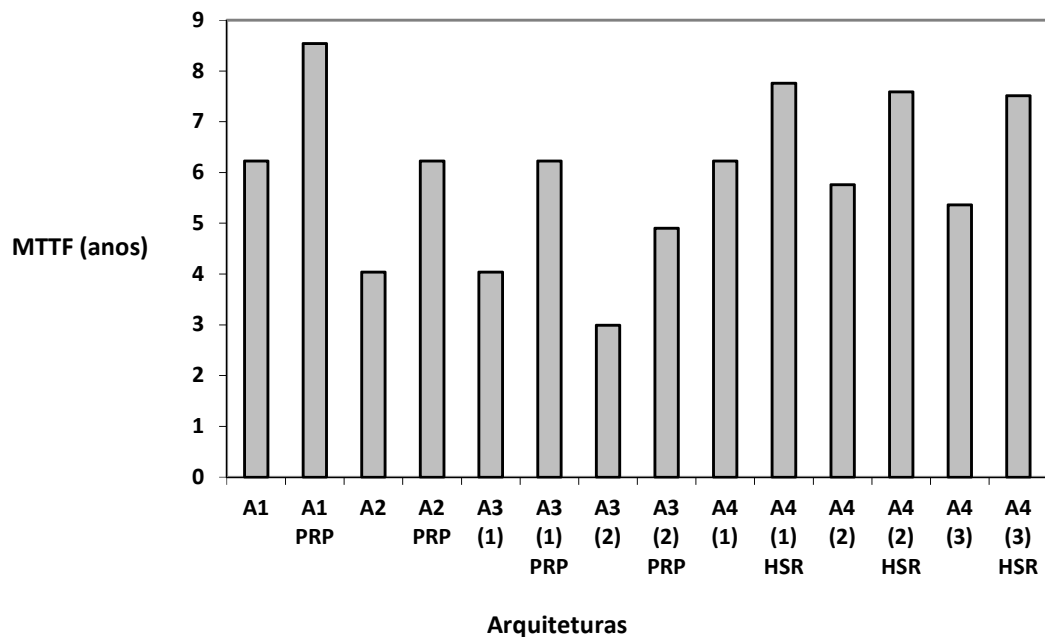


Figura 38 - MTTF das arquiteturas avaliadas.

5.5.2 Indisponibilidade sem reparo

A indisponibilidade sem reparo da Arquitetura 4 aumenta à medida que o acionamento, controle ou monitoramento tem como origem uma BCU que esteja mais próxima ao meio do anel, pois mais BCUs ficam em série nos ramos dos RBDs. Pode-se observar na Figura 39 que a indisponibilidade sem reparo cresce gradualmente do RBD 1 da Arquitetura 4 até o RBD 3 da Arquitetura 4. Esta característica se repete nos demais índices de disponibilidade.

A indisponibilidade da Arquitetura 7 de Hajian-Hoseinabbadi (2013) é de aproximadamente 0,13%, muito semelhante às das Arquiteturas 2 e 3 (RBD 1) e não muito distante das outras arquiteturas que poderiam utilizar o protocolo PRP, o que demonstra a similaridade dos resultados deste trabalho com a abordagem de Hajian-Hoseinabbadi (2013). Da mesma forma, a indisponibilidade de 0,1049% da Arquitetura 5 de Hajian-Hoseinabbadi (2013) não é muito diferente dos resultados obtidos para a Arquitetura 4 deste trabalho, sem a utilização do protocolo HSR.

Para efeito de comparação entre protocolos de redundância, a forma mais representativa é a análise entre duas arquiteturas que tenham índices similares sem a utilização do protocolo de redundância, o que caracteriza que suas arquiteturas são “equivalentes” sem a utilização de protocolos PRP ou HSR. Isto ocorre com as Arquiteturas 1 e 4 no seu primeiro RBD, onde ambas apresentam o valor 0,0879 de indisponibilidade sem reparo. Para estas duas arquiteturas, observa-se que o protocolo PRP leva vantagem em relação ao protocolo HSR, já que para a Arquitetura 1 com utilização do protocolo PRP a indisponibilidade sem reparo é de 0,0641 e para o RBD 1 da Arquitetura 4 com utilização do protocolo HSR a indisponibilidade sem reparo é de 0,0706, ou seja, 10 % maior. Este fato também ocorre para o MTTF sem reparo. No entanto, quando a mesma análise é feita para os índices de indisponibilidade com reparo, este fenômeno não ocorre, como verificado nas Seções 5.5.3 e 5.5.4 a seguir. Isso se deve ao fato de que os reparos aliados à operação com os protocolos de redundância reduzem as probabilidades de falha a um mínimo comum.

De acordo com a CEI IEC 870-4 (1990), todas as arquiteturas analisadas (mesmo as arquiteturas que não utilizam protocolos de redundância) atendem à classe A2, no entanto, não atendem à classe A3 de disponibilidade.

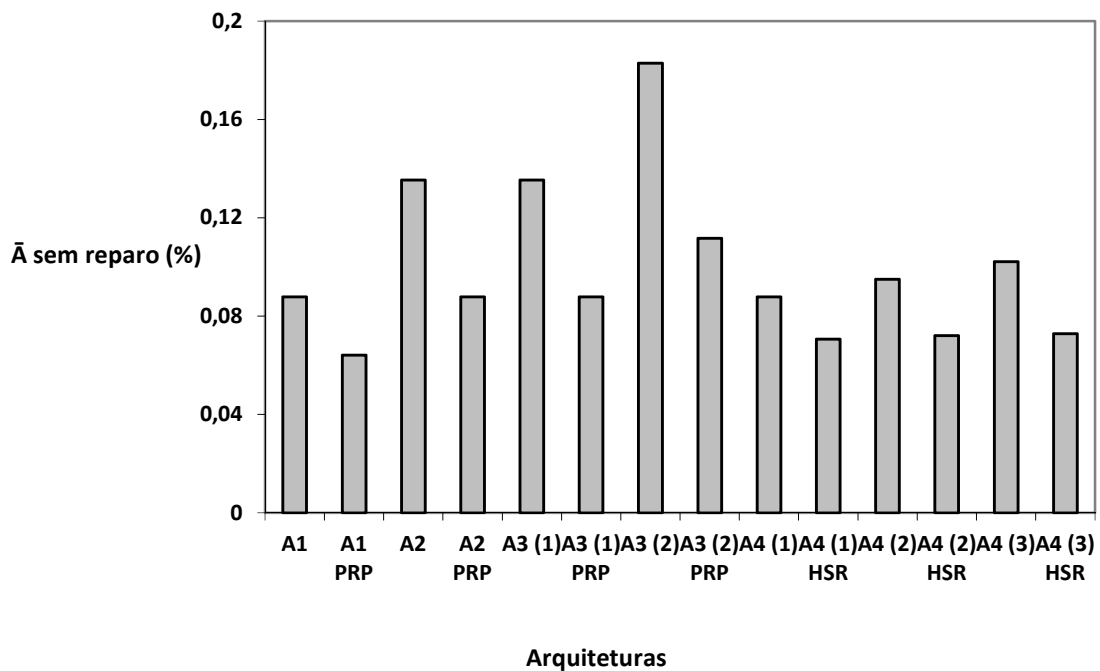


Figura 39 - Indisponibilidade sem reparo das arquiteturas avaliadas.

5.5.3 Indisponibilidade com reparo

Verifica-se por análise da Figura 40, que as indisponibilidades com reparo utilizando protocolos de redundância apresentam praticamente os mesmos valores em todas as arquiteturas analisadas. Atribui-se este fato ao alto índice de redundância encontrado em todas as arquiteturas, devido às próprias topologias e aos protocolos de camada de enlace utilizados. Este fato ainda é corroborado pela possibilidade de troca do elemento em falha durante a missão, fazendo com que o sistema continue operando pelos caminhos redundantes. Diante de todas as formas de minimizar interrupções na operação utilizadas, as diferenças entre as indisponibilidades destas arquiteturas diminuem até um mínimo comum a todas elas, que pode ser visto no gráfico analisado.

Comparando as indisponibilidades, verifica-se que, de acordo com o esperado, houve queda no índice de indisponibilidade com reparo em relação ao índice de indisponibilidade sem reparo, já que é mais difícil que um sistema fique inoperante quando há o reparo da falha dentro de um determinado tempo. Um exemplo desse comportamento pode ser observado na Arquitetura 4 (Figura 23) operando com o protocolo HSR. Suponha que a BCU 6 envie um

quadro para o *switch* (pelo menor caminho possível) e logo após enviar o quadro, o enlace entre a BCU 6 e o *switch* falhe. De acordo com o princípio do protocolo HSR, outro quadro foi enviado também pelo outro lado do anel, ou seja, passando pelas demais BCUs até o *switch*. Pelas próximas 48 h o enlace entre a BCU 6 e o *switch* ficará inoperante e a probabilidade de ocorrer outra falha que comprometa a operação é pequena, pois esta deveria ocorrer em menos de 48 h. Já para uma arquitetura sem reparo, a probabilidade de outra falha ocorrer aumenta já que o sistema ficará sem redundância mesmo após o tempo previsto para o reparo.

De acordo com a CEI IEC 870-4 (1990), todas as arquiteturas analisadas que não utilizam os protocolos de redundância atendem à classe A2, no entanto, não atendem à classe A3 de disponibilidade. Porém, com a utilização dos protocolos de redundância, as arquiteturas passam a atender a classe A3 para disponibilidade com reparo, o que denota um nível ótimo de acordo com a norma.

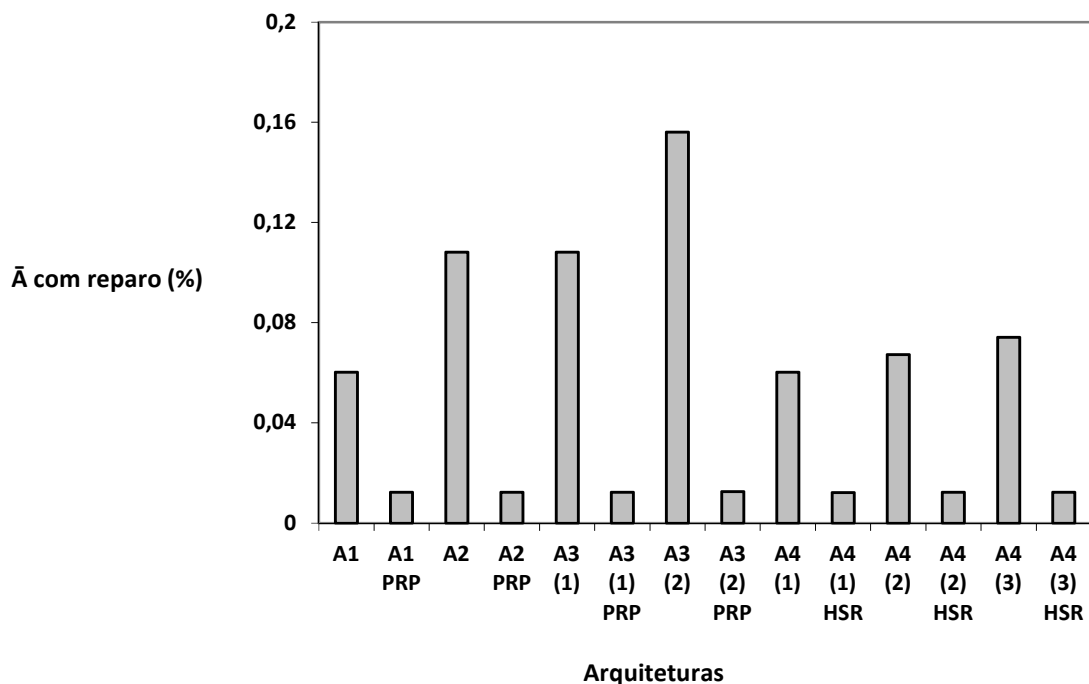


Figura 40 - Indisponibilidade com reparo das arquiteturas avaliadas.

5.5.4 MTTF com reparo

Verifica-se por análise da Figura 41, que os MTTFs com reparo têm praticamente os mesmo valores nas arquiteturas que utilizam protocolos de redundância. Assim como na análise da disponibilidade com reparo apresentada na Seção 5.5.3, atribui-se este fato ao alto índice de redundância encontrado em todas as arquiteturas que é ainda corroborado pela possibilidade de troca do elemento em falha durante a operação, fazendo com que o sistema continue operando pelos caminhos redundantes.

Comparando os MTTFs sem reparo com os MTTFs com reparo, nota-se um considerável aumento, principalmente nas arquiteturas que utilizam os protocolos da camada de enlace. Como exemplo do exposto, observa-se que a Arquitetura 1 com o protocolo PRP, que tem o maior MTTF sem reparo (8,541 anos), tem um crescimento de expressivos 522%, apresentando um MTTF com reparo de 44,615 anos muito maior, por exemplo, do que a vida útil de uma UEP (25 anos).

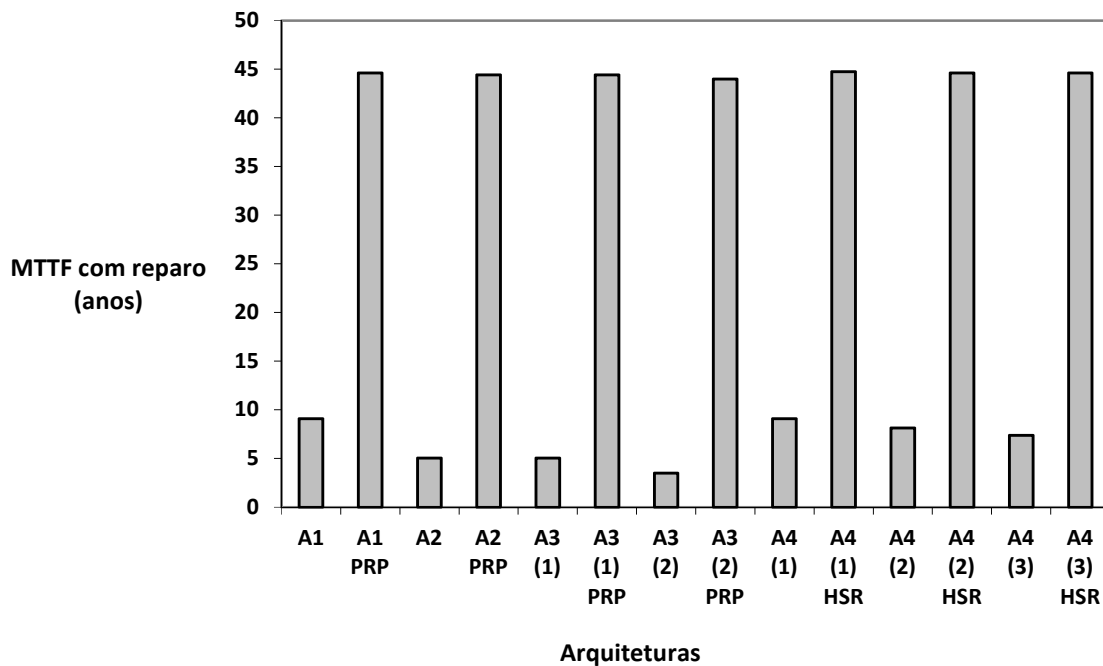


Figura 41 - MTTF com reparo das arquiteturas avaliadas.

5.5.5 Discussões dos Resultados

Pode-se verificar em todos os índices analisados, que a utilização dos protocolos PRP ou HSR, nas arquiteturas analisadas, melhora significativamente o desempenho em 100% dos casos. No entanto, algumas particularidades são evidenciadas, como por exemplo, a relação índice de disponibilidade x utilização de determinado componente na arquitetura. Os componentes com maior MTTF, como por exemplo, a BCU, aumentam a disponibilidade do sistema e os componentes com menor MTTF, como por exemplo, o SWE, a diminuem. A disposição dos componentes também modifica os resultados. Pode-se verificar que quanto menos switches em série houver, maior será o MTTF e menor será a indisponibilidade do sistema.

Salienta-se também que os índices de indisponibilidade em uma topologia em anel dependem da origem do quadro no anel. Quanto mais próximo às extremidades, menor a indisponibilidade e maior o MTTF e quanto mais próximo ao meio do anel, maior a indisponibilidade e menor o MTTF. Este fenômeno ocorre devido ao aumento da probabilidade de defeito de um dos componentes em série na medida em que este número aumenta. Por esse motivo, caso uma escolha de MTTF tivesse que ser feita para uma arquitetura em anel, o MTTF calculado de uma BCU do meio do anel como origem seria o escolhido por ser o mais crítico dentre todos os demais.

Para as arquiteturas analisadas neste trabalho em sistemas em que os componentes só são reparados após a missão (ou seja, sem reparo), as arquiteturas com o protocolo PRP são melhores quando comparadas com arquiteturas similares que utilizam o protocolo HSR. Para sistemas em que os componentes são reparados durante a missão (ou seja, com reparo), a escolha do protocolo não é relevante do ponto de vista da análise de disponibilidade, e por isso devem-se levar em consideração os outros fatores mencionados na Seção 3.4;

Outro fator importante é a comparação entre arquiteturas considerando índices sem reparo e com reparo. O reparo no tempo determinado pelo MTTR, ou seja, 48 h, faz com que as indisponibilidades diminuam para as arquiteturas que não utilizam protocolos de redundância e diminuam ainda mais drasticamente para as arquiteturas que utilizam protocolos de redundância. O mesmo fenômeno ocorre para o MTTF, porém inversamente, ou seja, os MTTFs aumentam consideravelmente com reparo, principalmente para arquiteturas que utilizam protocolos PRP ou HSR.

Por último, para as arquiteturas analisadas, o reparo durante a missão aliado à utilização de protocolos de redundância permite a elevação de classificação de A2 para A3, a classe de disponibilidade mais alta de acordo com a norma CEI IEC 870-4 (1990).

6 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE AOS COMPONENTES UTILIZADOS

Este capítulo apresenta uma análise de sensibilidade aos componentes utilizados nas arquiteturas analisadas no Capítulo 5. A análise de sensibilidade consiste em variar as disponibilidades dos componentes e verificar os efeitos destas variações na disponibilidade das arquiteturas. Neste capítulo, todos os componentes são submetidos à análise de sensibilidade para todas as arquiteturas.

A abordagem escolhida para a análise de sensibilidade considera que todos os componentes são igualmente confiáveis e desta forma, pode-se verificar através dos resultados, quais os componentes que oferecem o maior risco de indisponibilidade ao sistema ou arquitetura analisada. Neste sentido, a disponibilidade com reparo das arquiteturas é analisada. A disponibilidade com reparo de cada arquitetura é calculada de acordo com o último parágrafo da Seção 5.3. Esta abordagem de variar da análise de sensibilidade mede a importância da tarefa que cada componente desempenha no sistema como um todo. Desta forma, considerou-se que todos os componentes, exceto o componente analisado, têm uma disponibilidade que é igual à média das disponibilidades de todos os componentes, ou 0,999727, calculada com base nos MTTFs de cada componente apresentados na Tabela 3. A média das disponibilidades é utilizada no cálculo da análise de sensibilidade, de forma que se todos os módulos de *hardware* são igualmente confiáveis; os resultados obtidos indicam mais claramente o componente que tem maior ou menor contribuição no sistema de automação como um todo [HAJIAN-HOSEINABBADI, 2013].

Devido ao foco da dissertação, neste capítulo são consideradas apenas as arquiteturas que utilizam os protocolos PRP e HSR, demonstrando a importância de cada componente analisado nas arquiteturas apresentadas no Capítulo 5.

6.1 Resultados

Os cálculos da análise de sensibilidade desta seção são apresentados no Anexo B. Todos os gráficos desta seção contêm a variação em porcentagem da disponibilidade do componente analisado no eixo horizontal e a variação em porcentagem da disponibilidade da arquitetura analisada no eixo vertical.

Na Figura 42 verifica-se a variação da disponibilidade com reparo de todas as arquiteturas de acordo com a variação da disponibilidade da Fonte de Alimentação CC. As arquiteturas 1, 2 e 3 apresentam o mesmo gráfico para o componente analisado e os 3 RBDs da Arquitetura 4 variam ligeiramente devido às disponibilidades em α . Repara-se que a disponibilidade com reparo das arquiteturas varia linearmente com a disponibilidade de FAC. Este fenômeno se justifica devido ao fato de que as disponibilidades de α e β (apresentados na Seção 5.4) em todas as arquiteturas se aproximam de 1, além do bloco de BCU + IE à direita da FAC ser igual para todas as arquiteturas avaliadas. Verifica-se que em todas as arquiteturas, conforme esperado, a disponibilidade é altamente sensível à variação do componente FAC.

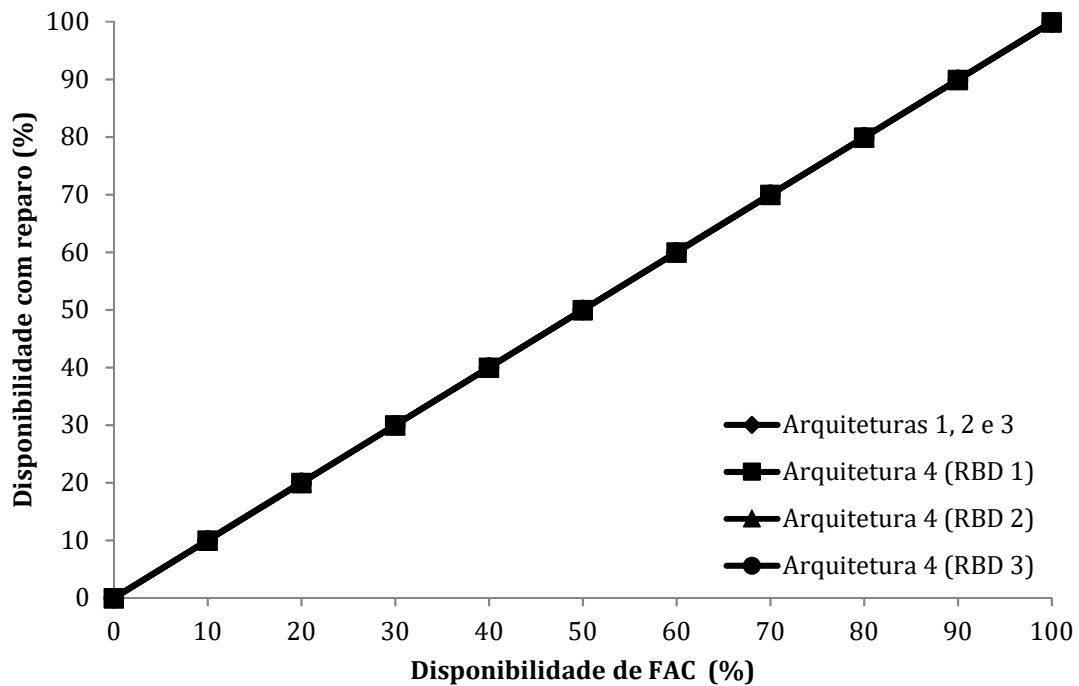


Figura 42 - Análise de sensibilidade à FAC.

As Figuras 43, 44 e 45 apresentam a variação da disponibilidade com reparo de todas as arquiteturas de acordo com a variação da disponibilidade dos componentes presentes apenas em β , ou seja, o Computador Industrial, a Interface Homem-Máquina e o Servidor de Controle Central da Rede. As arquiteturas 1, 2 e 3 apresentam o mesmo gráfico para o componente analisado e os 3 RBDs da Arquitetura 4 variam ligeiramente devido às disponibilidades em α . Repara-se que, diferente das demais análises, a variação da disponibilidade das arquiteturas avaliadas é muito pequena e muito próxima aos 100%. O

SCCR tem uma inclinação ligeiramente maior com relação ao CI e IHM. O CI e a IHM têm análises de sensibilidade praticamente iguais pois ambos componentes são posicionados no mesmo ramo e apenas nesta posição em todos os RBDs. O SCCR tem análise de sensibilidade ligeiramente distinta do CI e da IHM porque está posicionado, dentre os dois ramos de β , no ramo que contém menos componentes. Verifica-se o comportamento linear dos três componentes analisados.

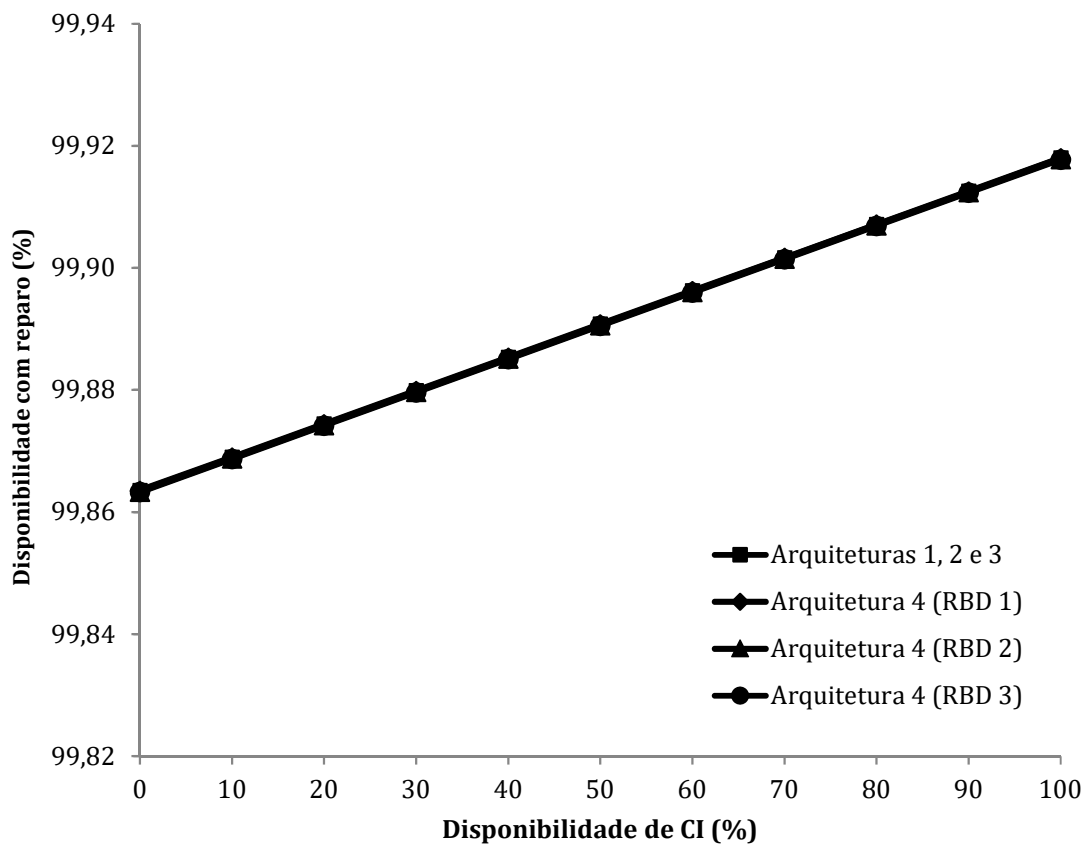


Figura 43 - Análise de sensibilidade ao CI.

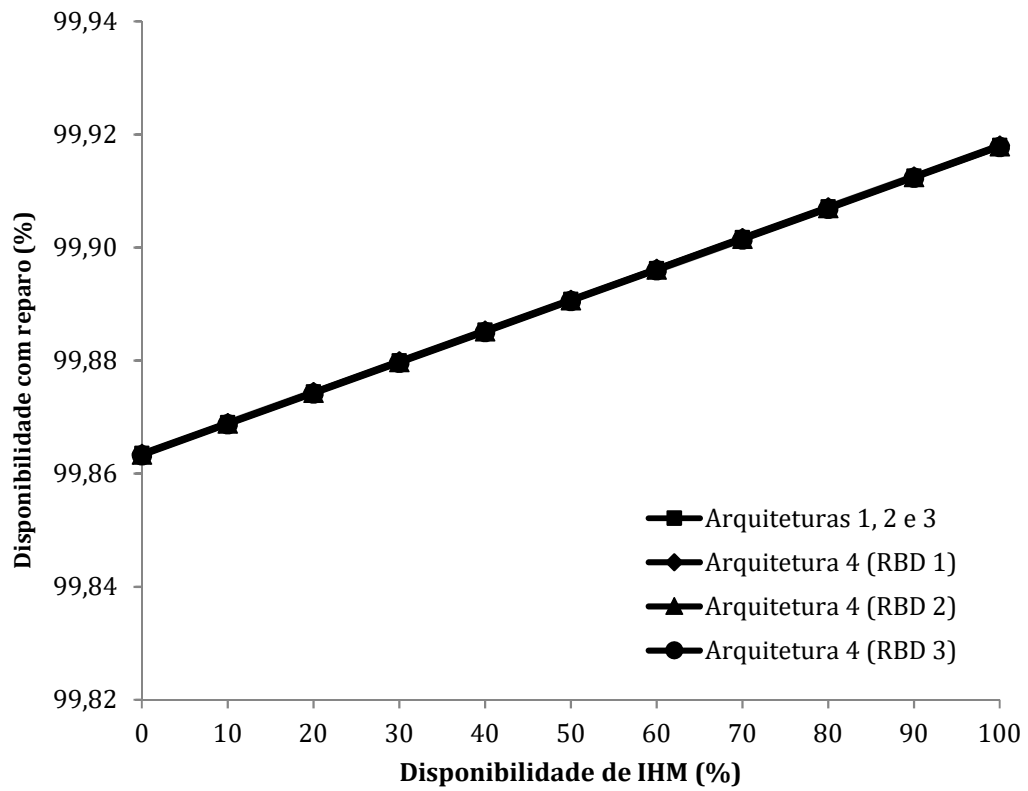


Figura 44 - Análise de sensibilidade à IHM.

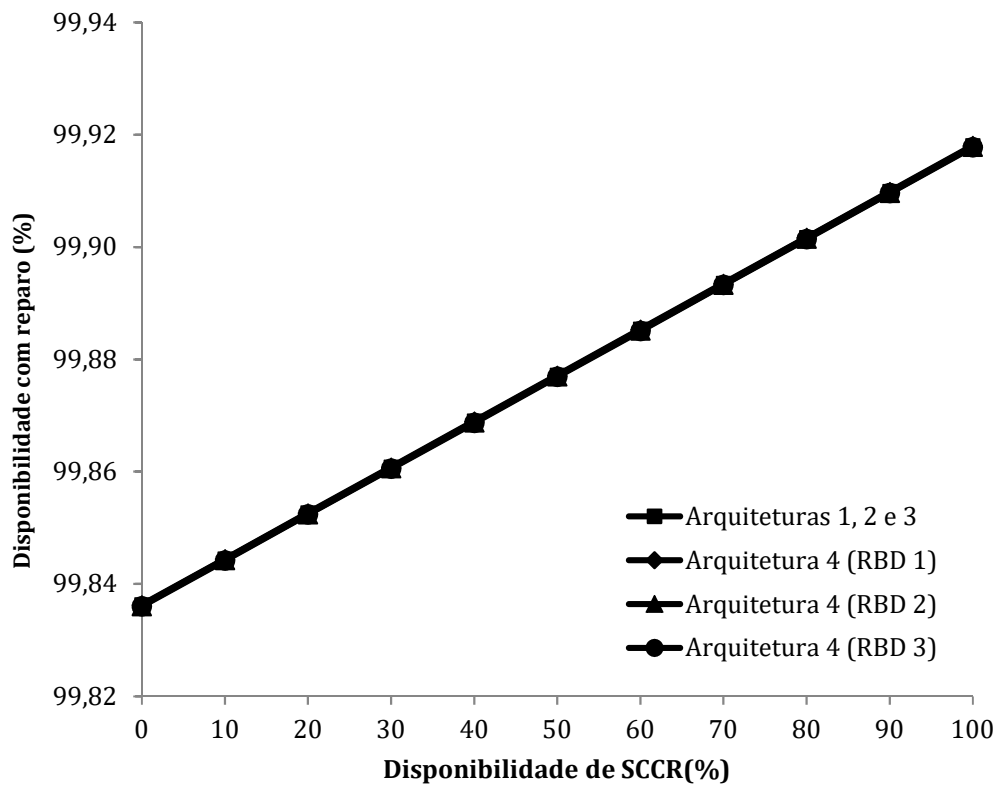


Figura 45 - Análise de sensibilidade ao SCCR.

A Figura 46 apresenta a análise de sensibilidade à Baía de Controle da Unidade. Salienta-se que para o RBD 1 da Arquitetura 4, os valores são ligeiramente distintos em alguns pontos (de 0 a 2 centésimos) em relação às Arquiteturas 1, 2 e 3. Pode-se verificar no gráfico de análise de sensibilidade que as BCUs das Arquiteturas 1, 2, 3 e 4 (RBD 1) têm um comportamento praticamente linear e que as BCUs dos RBDs 2 e 3 da Arquitetura 4 alteram a disponibilidade com reparo das arquiteturas mais lentamente para disponibilidades baixas de BCUs e mais rapidamente para disponibilidades altas de BCUs. Por exemplo, quando a disponibilidade da BCU está em 50%, a disponibilidade com reparo é de menos de 30% para os RBDs 2 e 3 da Arquitetura 4, enquanto que para as Arquiteturas 1, 2, 3 e RBD 1 da Arquitetura 4, a disponibilidade com reparo é de 49,97%. Com relação à Arquitetura 4, este comportamento é devido ao fato que quanto mais ao meio do anel é a origem do envio de quadros, mais sensível a arquitetura é à variação da disponibilidade de BCU.

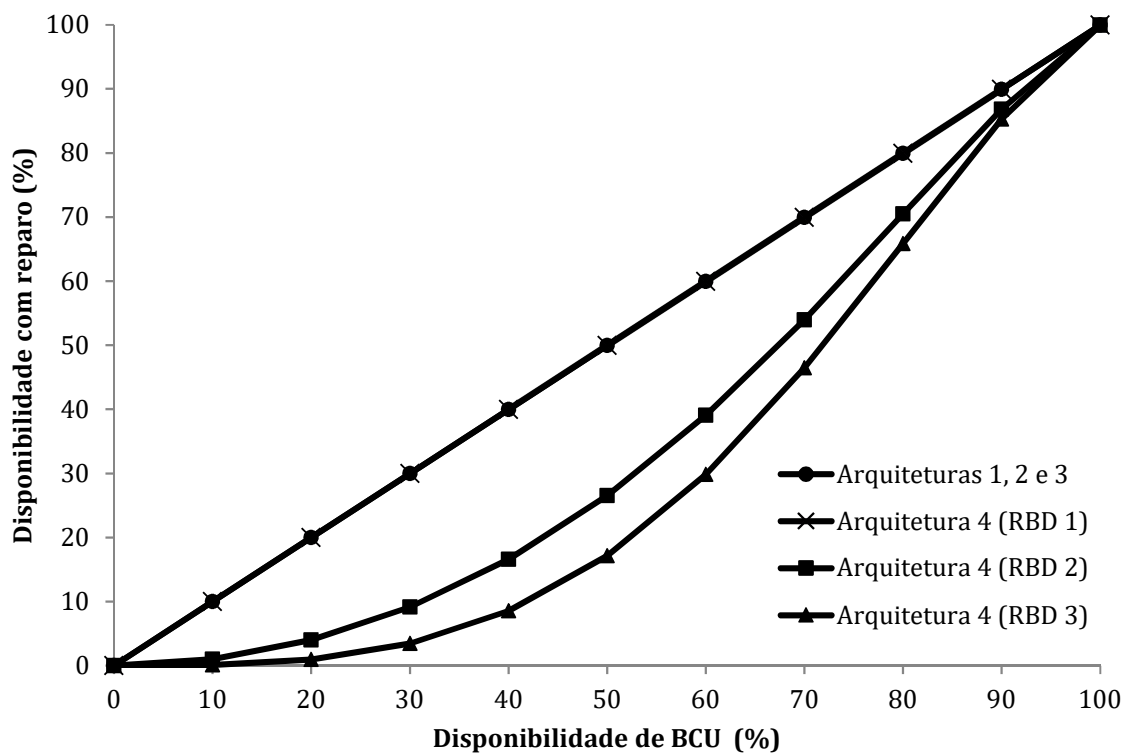


Figura 46 - Análise de sensibilidade à BCU.

A Figura 47 apresenta a análise de sensibilidade à Interface *Ethernet*. Salienta-se novamente que para o RBD 1 da Arquitetura 4, os valores são ligeiramente distintos em alguns pontos (de 0 a 6 centésimos) em relação às Arquiteturas 1, 2 e 3. Pode-se verificar no gráfico de análise de sensibilidade que as IEs das Arquiteturas 1, 2, 3 e 4 (RBD 1) alteram a

disponibilidade das arquiteturas mais lentamente para disponibilidades baixas de IEs e mais rapidamente para disponibilidades altas de IEs com relação aos IEs dos RBDs 2 e 3 da Arquitetura 4. Por exemplo, a 30% da disponibilidade da IE, a disponibilidade com reparo dos RBDs 2 e 3 da Arquitetura 4 não chegam a 5%, enquanto que nas demais arquiteturas é de aproximadamente 15%. Verifica-se que, similarmente à análise de BCUs, quanto mais no meio do anel é a origem do envio de quadros na Arquitetura 4, mais sensível a arquitetura é à variação da disponibilidade da IE.

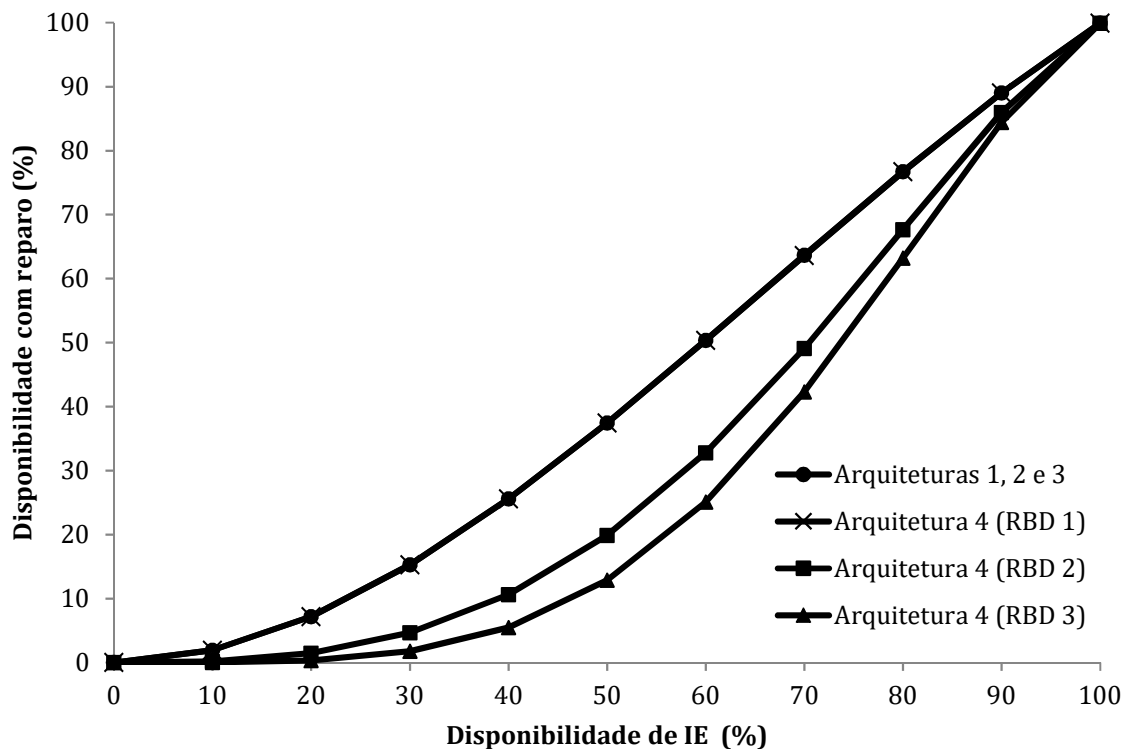


Figura 47 - Análise de sensibilidade à IE.

A Figura 48 demonstra a análise de sensibilidade ao *Switch Ethernet*. Salienta-se que a Arquitetura 1 apresenta valores ligeiramente distintos em alguns pontos (de 0 a 7 centésimos) dos valores da Arquitetura 4. Pode-se verificar no gráfico de análise de sensibilidade que os SWEs das Arquiteturas 1 e 4 alteram a disponibilidade das arquiteturas mais rapidamente com relação aos SWEs das Arquiteturas 2 e 3. Neste caso, a disponibilidade da arquitetura não se altera de um RBD para o outro na Arquitetura 4, pois a posição do *Switch* entre RBDs também não se altera.

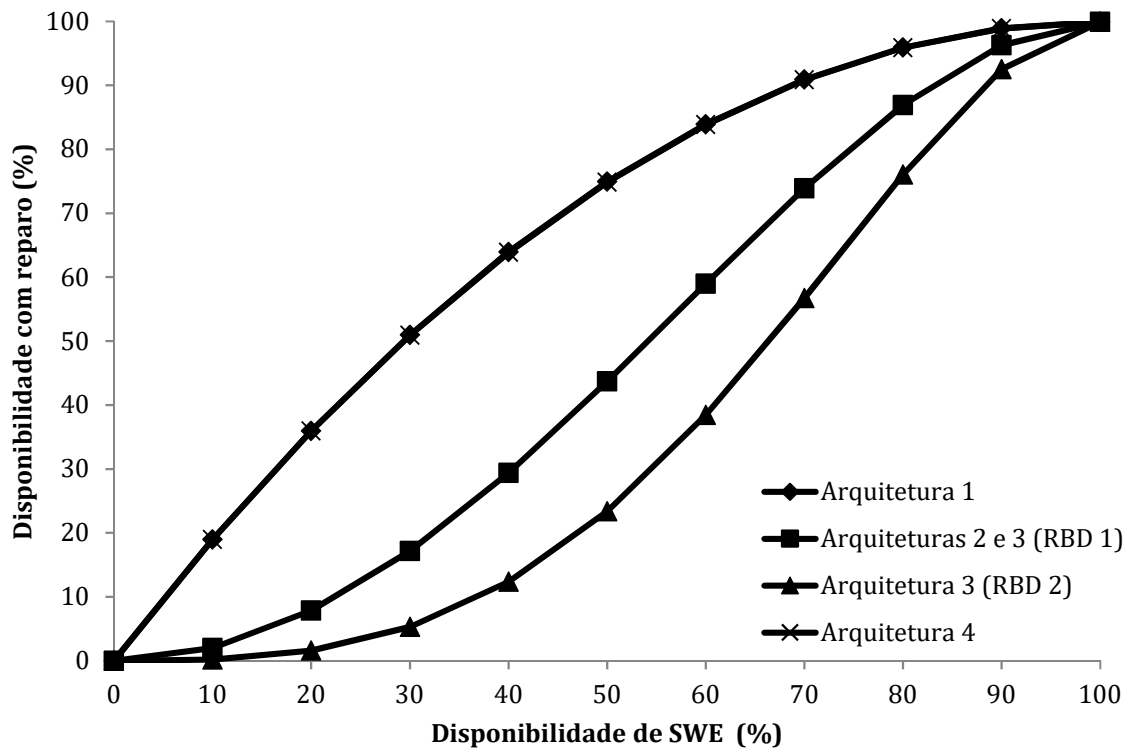


Figura 48 - Análise de sensibilidade ao SWE.

6.1.1 Discussões dos Resultados

Algumas conclusões são obtidas da análise de sensibilidade desta seção. Primeiramente, a disponibilidade com reparo de cada arquitetura aumenta quando a disponibilidade de cada componente aumenta. A disponibilidade com reparo das arquiteturas é mais sensível a alguns componentes em relação a outros. Por exemplo, os resultados mostram que a disponibilidade com reparo das arquiteturas é muito sensível à disponibilidade de FAC, BCU, IE e SWE, independente se o protocolo de redundância utilizado for o PRP ou o HSR, no entanto, os resultados também mostram que a disponibilidade com reparo das arquiteturas não é tão sensível à disponibilidade de CI, IHM e SCCR. O motivo é a redundância que existe nos pontos de controle (pela estação ou remoto). Logo, estes componentes não são considerados críticos em todas as arquiteturas.

Para a análise de sensibilidade de BCUs e IEs, verifica-se que a disponibilidade destes componentes, influencia igual ou mais intensamente na disponibilidade com reparo das arquiteturas que utilizam o protocolo HSR se comparada às arquiteturas que utilizam o

protocolo PRP, visto que nas Figuras 46 e 47 as curvas da Arquitetura 4 (HSR) sempre estão iguais ou abaixo das demais curvas referentes às demais arquiteturas (PRP). Por outro lado, para a análise de sensibilidade de SWEs, verifica-se que a disponibilidade deste componente, influencia igual ou mais intensamente na disponibilidade com reparo das arquiteturas que utilizam o protocolo PRP se comparada às arquiteturas que utilizam o protocolo HSR, conforme pode ser visto na Figura 48. Nessa figura, a curva da Arquitetura 4 (HSR) está igual ou acima das demais curvas referentes às demais arquiteturas (com PRP).

Pode-se verificar que, excluindo os componentes analisados nas Figuras 43, 44 e 45, o componente que gera menos impacto na disponibilidade das arquiteturas é o SWE para o caso das Arquiteturas 1 e 4 em que, mesmo com uma disponibilidade de 30% do SWE, há uma disponibilidade com reparo de 50,96% nestas arquiteturas, em parte devido à utilização dos protocolos de redundância (PRP e HSR).

7 CONCLUSÕES

Com a evolução da indústria, processos cada vez mais complexos aliados à preocupação com o meio-ambiente, além da segurança e saúde das pessoas, levaram as empresas a um rápido processo de automação dos sistemas elétricos. Um exemplo de sistema elétrico que sofreu grandes mudanças ao longo do tempo foi o sistema elétrico de UEPs (Unidades Estacionárias de Produção) que tem por finalidade suprir estas unidades de energia elétrica de forma cada vez mais confiável. Neste sentido, a norma IEC 61850 determinou uma grande mudança em automação de sistemas elétricos, na medida em que padronizou uma linguagem de configuração utilizando um modelo de dados, permitindo que diversos fabricantes se comunicassem de forma mais clara e fácil. Uma das recomendações da norma IEC 61850 é a utilização de um dos dois protocolos de redundância da camada de enlace: o PRP (*Parallel Redundancy Protocol*) ou o HSR (*High-availability Seamless Redundancy*).

A norma IEC 62439-3 descreve os princípios de operação dos protocolos PRP e HSR. Apesar de ambos os protocolos proverem redundância na camada de enlace através da duplicação no envio de quadros, eles têm diferenças, principalmente no que tange à topologia em que cada protocolo pode ser utilizado. O protocolo PRP é utilizado em arquiteturas que contenham duas LANs, de maneira que cada duplicata trafegue por cada LAN de forma independente. Distintamente, o protocolo HSR é utilizado apenas em arquiteturas com topologia em anel, em que cada duplicata do quadro do remetente trafega por um sentido diferente. Diversas características devem ser analisadas quando o objetivo é escolher um dos dois protocolos: a topologia de aplicação, qual fornece os mesmos benefícios com o menor custo, manutenção, processamento de dados, transparência para as camadas superiores, dentre outras. No entanto, antes mesmo da escolha entre um dos protocolos, o projetista de rede deve decidir se a utilização destes protocolos é vantajosa ou não, do ponto de vista da disponibilidade do sistema.

A disponibilidade do sistema elétrico para as indústrias em geral é cada vez mais importante se for levado em conta que este sistema é o responsável por manter os processos em operação. Novamente as UEPs nos dão um exemplo da importância dos sistemas elétricos, já que é impossível a atividade de produção de petróleo em unidades deste porte, em alto-mar, caso o sistema elétrico esteja inoperante. Neste sentido, o método RBD (*Reliability Block Diagram* – diagrama de blocos de confiabilidade) foi o escolhido para analisar a disponibilidade de quatro arquiteturas de automação de subestações elétricas, das quais três

têm topologias distintas que permitem a utilização do protocolo PRP e uma utiliza a topologia em anel, permitindo o uso do protocolo HSR. Cada RBD foi montado tendo em vista que a disponibilidade é calculada a partir do controle, monitoramento ou acionamento de cada baia de controle da unidade.

Os cálculos de disponibilidade de cada RBD foram então realizados para alguns índices de disponibilidade: $MTTF$, $MTTF_{\text{com reparo}}$, $A_{\text{sem reparo}}$ e $A_{\text{com reparo}}$ e os gráficos de disponibilidade foram apresentados como indisponibilidade para uma melhor visualização das diferenças. A análise dos gráficos permitiu chegar a algumas conclusões: uma das mais importantes foi a constatação de que a utilização dos protocolos PRP e HSR melhoram o desempenho para todos os índices analisados em 100 % dos casos. A disposição dos componentes na arquitetura analisada e a quantidade de determinado componente em cada RBD também influenciam diretamente nos resultados. Um exemplo deste comportamento é o fato de que quanto maior for o $MTTF$ de determinado componente e quanto mais componentes deste tipo forem inseridos na análise, maior será a disponibilidade do sistema. Obviamente o inverso também ocorre, ou seja, quanto menor for o $MTTF$ de determinado componente e mais componentes destes forem inseridos na arquitetura analisada, menor será a disponibilidade do sistema. Conforme já mencionado, a disposição dos componentes na arquitetura também determina o resultado da análise, na medida em que os componentes inseridos em série ou em paralelo no RBD têm comportamentos distintos em termos de disponibilidade. Verificou-se também que a escolha de arquiteturas que utilizam determinado protocolo (PRP ou HSR), para as arquiteturas analisadas, não influencia nos índices calculados se os componentes forem reparados durante a missão, ou seja, é indiferente escolher uma arquitetura que utilize PRP ou que utilize HSR, pois os índices não têm variações significativas de um protocolo para o outro. A opção de utilizar os protocolos de redundância aliada a uma estratégia de reparar os componentes durante a (MTTR de 48h) se mostrou positiva visto que permitiu a elevação da classificação das arquiteturas analisadas de A2 (disponibilidade $\geq 99,75\%$) para A3 (disponibilidade $\geq 99,95\%$) de acordo com a classificação da CEI IEC 870-4.

A análise de sensibilidade aos componentes utilizados nas arquiteturas também foi realizada, possibilitando algumas conclusões relacionadas especificamente às arquiteturas analisadas. Dentre as conclusões a respeito da análise de sensibilidade aos componentes, destacam-se as observações de que a disponibilidade com reparo de cada arquitetura aumenta quando a disponibilidade do componente analisado também aumenta e que, independente do protocolo de redundância utilizado, os resultados mostram uma sensibilidade alta das

disponibilidades com reparo das arquiteturas à disponibilidade dos componentes FAC, BCU, IE e SWE. Por outro lado, a sensibilidade aos componentes CI, IHM e SCCR é baixa, devido à redundância que existe nas arquiteturas nos pontos de controle.

Trabalhos Futuros

Em relação à análise dos protocolos PRP e HSR, diversos trabalhos com diferentes objetivos podem ser realizados. Especificamente em relação à disponibilidade da automação dos sistemas elétricos, todas as análises realizadas nesta Dissertação podem ser estendidas para casos de arquiteturas reais, como por exemplo, o caso de uma arquitetura utilizada em UEPs, em que são encontradas muito mais interfaces e componentes do que os demonstrados nas arquiteturas analisadas neste trabalho. Neste caso, como as arquiteturas utilizadas na prática, contém mais interfaces do que as arquiteturas que foram utilizadas neste trabalho, talvez fossem necessários algoritmos que calculassem automaticamente os diversos caminhos possíveis de tráfego na arquitetura. Se algoritmos de rede e demais protocolos como o RSTP, fossem levados em consideração, certamente acarretaria em uma maior complexidade na montagem dos possíveis RBDs e nos cálculos. Estes cálculos podem inclusive, fazer parte do acordo entre empresas na contratação de determinado projeto. O parâmetro das classes de disponibilidade definido pela CEI IEC 870-4 pode servir de importante instrumento legal na contratação do serviço.

Outros fatores além da disponibilidade podem ser fruto de estudos futuros. As arquiteturas analisadas nesta Dissertação ou outras arquiteturas (até mesmo arquiteturas híbridas que utilizam PRP em parte da topologia e HSR em outra parte) podem ser comparadas por outras características tais como: custo, tráfego de dados, tempo de recuperação em caso de falha etc.

REFERÊNCIAS

ANDERSSON, L., BRAND, K.P., BRUNNER, C., WIMMER, W., Reliability Investigations for SA Communication Architectures Based on IEC 61850, IEEE St. Petersburg PowerTech, junho de 2005.

APOSTOLOV, A. e PAULINO, M. Smart Grids - Redes Inteligentes, - Interfaces de Comunicação no Smart Grid. Portal O Setor Elétrico, junho de 2012.

Automação Industrial. Disponível em “http://pt.wikipedia.org/wiki/Automação_industrial” em Dezembro de 2016.

BILLINTON, Roy e ALLAN, Ronald N., Reliability Evaluation of Engineering Systems: Concepts and Techniques, 2ª ed. Nova York: Plenum, 1992.

CASTRO FERREIRA, L. R., CROSSLEY, P. A., GOODY, J., e ALLAN R. N., Reliability Evaluation of Substation Control Systems, em Proc. Inst. Elect. Eng., Gen. Transm. Distrib., vol. 146, no. 6, novembro de 1999.

CEI IEC 870-4, Telecontrol Equipments and Systems. Part 4: Performance Requirements. 1990.

DELL, Servidores. Disponível em: <<http://www.dell.com/learn/br/pt/brbsdt1/sb360/what-is-a-server>>. Acesso em: 30 de Dezembro de 2016.

FILHO, João Mamede, Manual de Equipamentos Elétricos. Terceira Edição, 2005.

FITZGERALD A.E., JR. C.K., UMANS S.D., Máquinas Elétricas com Introdução à Eletrônica de Potência, 6ª edição. 2006.

GARCÍA et al. High Availability Automation Networks: PRP and HSR Ring Implementations. Industrial Electronics (ISIE), 2012 IEEE International Symposium on Hangzhou. 2012.

GORAJ, M., HARADA, R. Migration Paths for IEC 61850 Substation Communication Networks Towards Superb Redundancy Based on Hybrid PRP and HSR Topologies. Developments in Power Systems Protection, 2012. DPSP 2012. 11th International Conference on Birmingham, UK. 2012.

HAJIAN-HOSEINABADI, Hamze, Availability Comparison of Various Power Substation Automation Architectures, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 28, nº. 2, abril de 2013.

HAJIAN-HOSEINABADI, Hamze, Impacts of Automated Control Systems on Substation Reliability, IEEE Trans. Power Del., vol. 26, no. 3, julho de 2011.

HAJIAN-HOSEINABADI, Hamze, Electrical Power and Energy Systems, Electrical Power and Energy Systems, julho de 2010.

IEEE Std 802.1D, IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks: Media Access Control (MAC) Bridges, IEEE, 2004.

IEEE Std 802.2, IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between System - Local and Metropolitan Area Network - Specific Requirements. Part 2: Logical Link Control, IEEE, 2003.

International Electrotechnical Commission, IEC 61850-1 Communication Network and Systems for Power Utility Automation – Part1: Introduction and Overview, IEC, 2013.

International Electrotechnical Commission, IEC 61850-5 Communication Network and Systems for Power Utility Automation – Part 5: Communication Requirements for Functions and Device Models, IEC, 2013.

International Electrotechnical Commission, IEC 61850-6: Communication Network and Systems for Power Utility Automation – Part 6: Configuration Description Language for Communication in Electrical Substations Related to IEDs, IEC, 2009.

International Electrotechnical Commission, IEC 61850-7-1: Communication Network and Systems for Power Utility Automation – Part 7-1: Basic Communication Structure – Principles and Models, IEC, 2011.

International Electrotechnical Commission, IEC 61850-8-1: Communication Network and Systems for Power Utility Automation – Part 8-1: Specific communication Service Mapping (SCSM) – Mappings to MMS (ISO 9506-1 and ISO 9506-2) and to ISO/IEC 8802-3, IEC, 2011.

International Electrotechnical Commission, IEC 62439-3: Industrial Communication Networks – High Availability Automation Networks – Part 3: Parallel Redundancy Protocol (PRP) and High-availability Seamless Redundancy (HSR), IEC, 2016.

ISO 14224, Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries — Collection and Exchange of Reliability and Maintenance Data for Equipment. 2016.

ISO/IEC/IEEE 8802-3, Standard for Ethernet, IEEE, 2012.

JAIN, Raj. The Art of Computer Systems Performance Analysis. Techniques for Experimental Design, Measurement, Simulation, and Modeling. 1991.

KANABAR, M. G. e SIDHU, T. S., Reliability and Availability Analysis of IEC 61850 Based Substation Communication Architectures, 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting, julho de 2009.

KOSOW Irving I. Máquinas Elétricas e Transformadores, 15ª edição. 2005.

KUMAR S. High Performance Communication Redundancy in a Digital Substation based on IEC 62439-3 with a Station Bus Configuration. 2015 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), setembro de 2015.

LOPES, Yona et al. Smart Grid e IEC 61850: Novos Desafios em Redes e Telecomunicações para o Sistema Elétrico. In: XXX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, 2012, Brasília. Minicurso para o SBrT'2012. Brasília. 2012.

MACKIEWICZ, R. E., Overview of IEC 61850 and Benefits, em 2005/2006 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, maio de 2006.

MEKKANEN, M., VIRRANKOSKI, R., ELMUSRATI, M., ANTILA, E. Reliability and Availability Investigation for Next-Generation Substation Function Based on IEC 61850, 3rd Workshop on Wireless Communication and Applications (WoWCA2012). Vaasa, Finlândia, abril de 2012.

MIRANDA, Juliano Coêlho. IEC 61850: Interoperabilidade e Intercambialidade entre Equipamentos de Supervisão, Controle e Proteção Através das Redes de Comunicação de Dados [Dissertação]. São Carlos. 2009.

MOLANO, D. L. A., FERNANDES, N. C., MALCHER, C. A. Modelo de Simulação em OMNET++ para a Avaliação de Desempenho da Rede de Comunicação de um SAS baseado na Norma IEC61850. XIII Workshop em Desempenho de Sistemas Computacionais e de Comunicação - Brasília, DF. 2014

MORAIS, José Mauro de. Pétroleo em Águas Profundas: uma História Tecnológica da Petrobras na Exploração e Produção Offshore. Brasília: Ipea, 2013.

NSAIF S.A., RHEE J.M. Improvement of High-Availability Seamless Redundancy (HSR) Traffic Performance for Smart Grid Communications. Journal of Communications and Networks, vol. 14, nº 6, dezembro de 2012.

PINOTTI, Igor Kramer. Desenvolvimento do Protocolo RSTP – Rapid Spanning Tree Protocol. Trabalho de Conclusão de Curso, dezembro de 2009.

Programa Prodenge / Sub-Programa Reenge, Curso de Controladores Lógicos Programáveis, Faculdade de Engenharia, Laboratório de Engenharia Elétrica, Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

RAUSAND, Marvin e HOYLAND, Arnljot, System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications, 2nd ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2004.

SEL (Schweitzer Engineering Laboratories). Confiabilidade de Sistemas de Automação de Subestações, Revista O Setor Elétrico, edição 62, março de 2011.

SCHEER, G. W., Answering Substation Automation Questions Through Fault Tree Analysis, apresentado no 4º Annu. Texas A&M Substation Automation Conf., College Station, TX, abril de 1998.

SCHEER, G. W., Comparison of Fiber-optic Star and Ring Topologies for Electric Power Substation Communications, apresentado no 1º Annu. Western Power Del. Autom. Conf., Spokane, WA, abril de 1999.

SILVEIRA, Leonardo e LIMA, Weldson Q.. Um Breve Conceito da Automação Industrial e Redes para Automação Industrial, [Artigo]. UFRN, PPgEE, 2003.

SOUZA, André França de. Estudo da IEC 61850 e seus Impactos nas Plantas da Petrobras. Rio de Janeiro [Monografia]. 2011.

TAN, Jian-cheng; LUAN, Wenpeng. IEC 61850 Based Substation Automation System Architecture Design. Power and Energy Society General Meeting , IEEE. 2011.

TANENBAUM, Andrew S. e WETHERALL, David. Redes de Computadores. 2011.

U.S. Military Standard 785B, Reliability Program for Systems and Equipment Development and Production, setembro de 1980.

VIEIRA, Pedro. Apostila de Redes de Computação Industrial, 2006.

ZHANG, P., PORTILLO, L. e KEZUNOVIC M., Reliability and Component Importance Analysis of All-Digital Protection Systems, 2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, Atlanta, outubro de 2006.

ANEXOS

Anexo A – MEMÓRIA DE CÁLCULO DAS AVALIAÇÕES DA DISPONIBILIDADE DAS ARQUITETURAS

A.1 - Memória de Cálculo dos MTTFs

Os cálculos dos MTTFs das arquiteturas são apresentados a seguir:

$$\text{MTTF}^{-1} = \text{MTTF}^{-1}_{\text{FAC}} + \text{MTTF}^{-1}_{\text{BCU}} + \text{MTTF}^{-1}_{\text{IE}} + \text{MTTF}^{-1}_{\alpha} + \text{MTTF}^{-1}_{\beta}.$$

Para o RBD da Arquitetura 1 sem utilizar PRP:

$$\text{MTTF}^{-1}_{\alpha} = 1 / (\text{MTTF}_{\text{SWE}}),$$

$$\text{MTTF}^{-1}_{\alpha} = 1 / 11,5 \text{ anos}^{-1}.$$

Para o RBD da Arquitetura 1 utilizando o protocolo PRP:

$$\text{MTTF}^{-1}_{\alpha} = 1 / (\text{MTTF}_{\text{SWE}1} + \text{MTTF}_{\text{SWE}2}),$$

$$\text{MTTF}^{-1}_{\alpha} = 1 / 23 \text{ anos}^{-1}.$$

Para o RBD da Arquitetura 2 sem utilizar PRP:

$$\text{MTTF}^{-1}_{\alpha} = 1 / (\text{MTTF}_{2\text{SWE}}),$$

$$\text{MTTF}^{-1}_{\alpha} = 1 / 5,75 \text{ anos}^{-1}.$$

Para o RBD da Arquitetura 2 utilizando o protocolo PRP:

$$\text{MTTF}^{-1}_{\alpha} = 1 / (\text{MTTF}_{2\text{SWE}} + \text{MTTF}_{2\text{SWE}}),$$

$$\text{MTTF}^{-1}_{\alpha} = 1 / 11,5 \text{ anos}^{-1}.$$

Para o RBD 1 da Arquitetura 3 sem utilizar PRP:

$$\text{MTTF}^{-1}_{\alpha} = 1 / (\text{MTTF}_{2\text{SWE}}),$$

$$\text{MTTF}^{-1}_{\alpha} = 1 / 5,75 \text{ anos}^{-1}.$$

Para o RBD 1 da Arquitetura 3 utilizando o protocolo PRP:

$$\text{MTTF}^{-1}_{\alpha} = 1 / (\text{MTTF}_{2\text{SWE}} + \text{MTTF}_{2\text{SWE}}),$$

$$\text{MTTF}^{-1}_{\alpha} = 1 / 11,5 \text{ anos}^{-1}.$$

Para o RBD 2 da Arquitetura 3 sem utilizar PRP:

$$MTTF^{-1}_{\alpha} = 1 / (MTTF_{3SWE}),$$

$$MTTF^{-1}_{\alpha} = 1 / 3,833 \text{ anos}^{-1}.$$

Para o RBD 2 da Arquitetura 3 utilizando o protocolo PRP:

$$MTTF^{-1}_{\alpha} = 1 / (MTTF_{3SWE} + MTTF_{3SWE}),$$

$$MTTF^{-1}_{\alpha} = 1 / 7,667 \text{ anos}^{-1}.$$

Para o RBD 1 da Arquitetura 4 sem utilizar HSR:

$$MTTF^{-1}_{\alpha} = 1 / (MTTF_{SWE}),$$

$$MTTF^{-1}_{\alpha} = 1 / 11,5 \text{ anos}^{-1}.$$

Para o RBD 1 da Arquitetura 4 utilizando o protocolo HSR:

$$MTTF^{-1}_{\alpha} = 1 / (MTTF_{SWE} + (MTTF^{-1}_{5xBCUs} + MTTF^{-1}_{5xIEs} + MTTF^{-1}_{SWE})^{-1}),$$

$$MTTF^{-1}_{\alpha} = 1 / (11,5 + (5/103,5 + 5/300 + 1/11,5)^{-1}),$$

$$MTTF^{-1}_{\alpha} = 1 / 18,082 \text{ anos}^{-1}.$$

Para o RBD 2 da Arquitetura 4 sem utilizar HSR:

$$MTTF^{-1}_{\alpha} = 1 / (MTTF^{-1}_{BCU} + MTTF^{-1}_{IE} + MTTF^{-1}_{SWE})^{-1},$$

$$MTTF^{-1}_{\alpha} = 1 / (1/103,5 + 1/300 + 1/11,5)^{-1},$$

$$MTTF^{-1}_{\alpha} = 1 / 10,005 \text{ anos}^{-1}.$$

Para o RBD 2 da Arquitetura 4 utilizando o protocolo HSR:

$$MTTF^{-1}_{\alpha} = 1 / ((MTTF^{-1}_{BCU} + MTTF^{-1}_{IE} + MTTF^{-1}_{SWE})^{-1} + (MTTF^{-1}_{4xBCUs} + MTTF^{-1}_{4xIEs} + MTTF^{-1}_{SWE})^{-1}),$$

$$MTTF^{-1}_{\alpha} = 1 / ((1/103,5 + 1/300 + 1/11,5)^{-1} + (4/103,5 + 4/300 + 1/11,5)^{-1}),$$

$$MTTF^{-1}_{\alpha} = 1 / 17,202 \text{ anos}^{-1}.$$

Para o RBD 3 da Arquitetura 4 sem utilizar HSR:

$$MTTF^{-1}_{\alpha} = 1 / (MTTF^{-1}_{2xBCU} + MTTF^{-1}_{2xIE} + MTTF^{-1}_{SWE})^{-1},$$

$$MTTF^{-1}_{\alpha} = 1 / (2/103,5 + 2/300 + 1/11,5)^{-1},$$

$$MTTF^{-1}_{\alpha} = 1 / 8,854 \text{ anos}^{-1}.$$

Para o RBD 3 da Arquitetura 4 utilizando o protocolo HSR:

$$MTTF^{-1}_{\alpha} = 1 / ((MTTF^{-1}_{2xBCUs} + MTTF^{-1}_{2xIEs} + MTTF^{-1}_{SWE})^{-1} + (MTTF^{-1}_{3xBCUs} + MTTF^{-1}_{3xIEs} + MTTF^{-1}_{SWE})^{-1}),$$

$$MTTF^{-1}_{\alpha} = 1 / ((2/103,5 + 2/300 + 1/11,5)^{-1} + (3/103,5 + 3/300 + 1/11,5)),$$

$$MTTF^{-1}_{\alpha} = 1 / 16,794 \text{ anos}^{-1}.$$

Para todas as Arquiteturas $MTTF^{-1}_{\beta}$ é igual a:

$$MTTF^{-1}_{\beta} = 1 / ((MTTF^{-1}_{IE} + MTTF^{-1}_{CI} + MTTF^{-1}_{IHM})^{-1} + (MTTF^{-1}_{IE} + MTTF^{-1}_{SCCR})^{-1}),$$

$$MTTF^{-1}_{\beta} = 1 / ((1/300 + 1/14,3 + 1/10)^{-1} + (1/300 + 1/14,3)^{-1}),$$

$$MTTF^{-1}_{\beta} = 1 / 19,421 \text{ anos}^{-1}.$$

Desta forma:

$$MTTF^{-1} \text{ RBD da Arquitetura 1 sem PRP} = 1/109,6 + (1/103,5 + 1/300) + (1/11,5) + (1/19,421),$$

$$MTTF \text{ RBD da Arquitetura 1 sem PRP} = 6,228 \text{ anos}.$$

$$MTTF^{-1} \text{ RBD da Arquitetura 1 com PRP} = 1/109,6 + (1/103,5 + 1/300) + (1/23) + (1/19,421),$$

$$MTTF \text{ RBD da Arquitetura 1 com PRP} = 8,541 \text{ anos}.$$

$$MTTF^{-1} \text{ RBD da Arquitetura 2 sem PRP} = 1/109,6 + (1/103,5 + 1/300) + (1/5,75) + (1/19,421),$$

$$MTTF \text{ RBD da Arquitetura 2 sem PRP} = 4,04 \text{ anos}.$$

$$MTTF^{-1} \text{ RBD da Arquitetura 2 com PRP} = 1/109,6 + (1/103,5 + 1/300) + (1/11,5) + (1/19,421),$$

$$MTTF \text{ RBD da Arquitetura 2 com PRP} = 6,228 \text{ anos}.$$

$$MTTF^{-1} \text{ RBD 1 da Arquitetura 3 sem PRP} = 1/109,6 + (1/103,5 + 1/300) + (1/5,75) + (1/19,421),$$

$$MTTF \text{ RBD 1 da Arquitetura 3 sem PRP} = 4,04 \text{ anos}.$$

$$MTTF^{-1} \text{ RBD 1 da Arquitetura 3 com PRP} = 1/109,6 + (1/103,5 + 1/300) + (1/11,5) + (1/19,421),$$

$$MTTF \text{ RBD 1 da Arquitetura 3 com PRP} = 6,228 \text{ anos}.$$

$MTTF^{-1}$ RBD 2 da Arquitetura 3 sem PRP = $1/109,6 + (1/103,5 + 1/300) + (1/3,833) + (1/19,421)$,

MTTF RBD 2 da Arquitetura 3 sem PRP = 2,99 anos.

$MTTF^{-1}$ RBD 2 da Arquitetura 3 com PRP = $1/109,6 + (1/103,5 + 1/300) + (1/7,667) + (1/19,421)$,

MTTF RBD 2 da Arquitetura 3 com PRP = 4,901 anos.

$MTTF^{-1}$ RBD 1 da Arquitetura 4 sem HSR = $1/109,6 + (1/103,5 + 1/300) + (1/11,5) + (1/19,421)$,

MTTF RBD 1 da Arquitetura 4 sem HSR = 6,228 anos.

$MTTF^{-1}$ RBD 1 da Arquitetura 4 com HSR = $1/109,6 + (1/103,5 + 1/300) + (1/18,082) + (1/19,421)$,

MTTF RBD 1 da Arquitetura 4 com HSR = 7,757 anos.

$MTTF^{-1}$ RBD 2 da Arquitetura 4 sem HSR = $1/109,6 + (1/103,5 + 1/300) + (1/10,005) + (1/19,421)$,

MTTF RBD 2 da Arquitetura 4 sem HSR = 5,762 anos.

$MTTF^{-1}$ RBD 2 da Arquitetura 4 com HSR = $1/109,6 + (1/103,5 + 1/300) + (1/17,202) + (1/19,421)$,

MTTF RBD 2 da Arquitetura 4 com HSR = 7,591 anos.

$MTTF^{-1}$ RBD 3 da Arquitetura 4 sem HSR = $1/109,6 + (1/103,5 + 1/300) + (1/8,854) + (1/19,421)$,

MTTF RBD 3 da Arquitetura 4 sem HSR = 5,36 anos.

$MTTF^{-1}$ RBD 3 da Arquitetura 4 com HSR = $1/109,6 + (1/103,5 + 1/300) + (1/16,794) + (1/19,421)$,

MTTF RBD 3 da Arquitetura 4 com HSR = 7,51 anos.

A.2 - Memória de Cálculo de $A_{\text{sem reparo}}$ e $\bar{A}_{\text{sem reparo}}$

$$A_{\text{sem reparo}} \text{ RBD da Arquitetura 1 sem PRP} = (6,228 \times 365 \times 24 \times 100)/(6,228 \times 365 \times 24) + 48,$$

$$A_{\text{sem reparo}} \text{ RBD da Arquitetura 1 sem PRP} = 99,9121\%.$$

$$\bar{A}_{\text{sem reparo}} \text{ RBD da Arquitetura 1 sem PRP} = 0,0879\%.$$

$$A_{\text{sem reparo}} \text{ RBD da Arquitetura 1 com PRP} = (8,541 \times 365 \times 24 \times 100)/(8,541 \times 365 \times 24) + 48,$$

$$A_{\text{sem reparo}} \text{ RBD da Arquitetura 1 com PRP} = 99,9359\%.$$

$$\bar{A}_{\text{sem reparo}} \text{ RBD da Arquitetura 1 com PRP} = 0,0641\%.$$

$$A_{\text{sem reparo}} \text{ RBD da Arquitetura 2 sem PRP} = (4,04 \times 365 \times 24 \times 100)/(4,04 \times 365 \times 24) + 48,$$

$$A_{\text{sem reparo}} \text{ RBD da Arquitetura 2 sem PRP} = 99,8645\%.$$

$$\bar{A}_{\text{sem reparo}} \text{ RBD da Arquitetura 2 sem PRP} = 0,1354\%.$$

$$A_{\text{sem reparo}} \text{ RBD da Arquitetura 2 com PRP} = (6,228 \times 365 \times 24 \times 100)/(6,228 \times 365 \times 24) + 48,$$

$$A_{\text{sem reparo}} \text{ RBD da Arquitetura 2 com PRP} = 99,9121\%.$$

$$\bar{A}_{\text{sem reparo}} \text{ RBD da Arquitetura 2 com PRP} = 0,0879\%.$$

$$A_{\text{sem reparo}} \text{ RBD 1 da Arquitetura 3 sem PRP} = (4,04 \times 365 \times 24 \times 100)/(4,04 \times 365 \times 24) + 48,$$

$$A_{\text{sem reparo}} \text{ RBD 1 da Arquitetura 3 sem PRP} = 99,8645\%.$$

$$\bar{A}_{\text{sem reparo}} \text{ RBD 1 da Arquitetura 3 sem PRP} = 0,1354\%.$$

$$A_{\text{sem reparo}} \text{ RBD 1 da Arquitetura 3 com PRP} = (6,228 \times 365 \times 24 \times 100)/(6,228 \times 365 \times 24) + 48,$$

$$A_{\text{sem reparo}} \text{ RBD 1 da Arquitetura 3 com PRP} = 99,9121\%.$$

$$\bar{A}_{\text{sem reparo}} \text{ RBD 1 da Arquitetura 3 com PRP} = 0,0879\%.$$

$$A_{\text{sem reparo}} \text{ RBD 2 da Arquitetura 3 sem PRP} = (2,99 \times 365 \times 24 \times 100)/(2,99 \times 365 \times 24) + 48,$$

$$A_{\text{sem reparo}} \text{ RBD 2 da Arquitetura 3 sem PRP} = 99,8171\%.$$

$$\bar{A}_{\text{sem reparo}} \text{ RBD 2 da Arquitetura 3 sem PRP} = 0,1829\%.$$

$$A_{\text{sem reparo}} \text{ RBD 2 da Arquitetura 3 com PRP} = (4,901 \times 365 \times 24 \times 100)/(4,901 \times 365 \times 24) + 48,$$

$$A_{\text{sem reparo}} \text{ RBD 2 da Arquitetura 3 com PRP} = 99,8883\%.$$

$$\bar{A}_{\text{sem reparo}} \text{ RBD 2 da Arquitetura 3 com PRP} = 0,1117\%.$$

$$A_{\text{sem reparo RBD 1 da Arquitetura 4 sem HSR}} = (6,228 \times 365 \times 24 \times 100) / (6,228 \times 365 \times 24) + 48,$$

$$A_{\text{sem reparo RBD 1 da Arquitetura 4 sem HSR}} = 99,9121\%.$$

$$\bar{A}_{\text{sem reparo RBD 1 da Arquitetura 4 sem HSR}} = 0,0879\%.$$

$$A_{\text{sem reparo RBD 1 da Arquitetura 4 com HSR}} = (7,757 \times 365 \times 24 \times 100) / (7,757 \times 365 \times 24) + 48,$$

$$A_{\text{sem reparo RBD 1 da Arquitetura 4 com HSR}} = 99,9294\%.$$

$$\bar{A}_{\text{sem reparo RBD 1 da Arquitetura 4 com HSR}} = 0,0706\%.$$

$$A_{\text{sem reparo RBD 2 da Arquitetura 4 sem HSR}} = (5,762 \times 365 \times 24 \times 100) / (5,762 \times 365 \times 24) + 48,$$

$$A_{\text{sem reparo RBD 2 da Arquitetura 4 sem HSR}} = 99,905\%.$$

$$\bar{A}_{\text{sem reparo RBD 2 da Arquitetura 4 sem HSR}} = 0,095\%.$$

$$A_{\text{sem reparo RBD 2 da Arquitetura 4 com HSR}} = (7,591 \times 365 \times 24 \times 100) / (7,591 \times 365 \times 24) + 48,$$

$$A_{\text{sem reparo RBD 2 da Arquitetura 4 com HSR}} = 99,9279\%.$$

$$\bar{A}_{\text{sem reparo RBD 2 da Arquitetura 4 com HSR}} = 0,0721\%.$$

$$A_{\text{sem reparo RBD 3 da Arquitetura 4 sem HSR}} = (5,36 \times 365 \times 24 \times 100) / (5,36 \times 365 \times 24) + 48,$$

$$A_{\text{sem reparo RBD 3 da Arquitetura 4 sem HSR}} = 99,8979\%.$$

$$\bar{A}_{\text{sem reparo RBD 3 da Arquitetura 4 sem HSR}} = 0,1021\%.$$

$$A_{\text{sem reparo RBD 3 da Arquitetura 4 com HSR}} = (7,51 \times 365 \times 24 \times 100) / (7,51 \times 365 \times 24) + 48,$$

$$A_{\text{sem reparo RBD 3 da Arquitetura 4 com HSR}} = 99,9271\%.$$

$$\bar{A}_{\text{sem reparo RBD 3 da Arquitetura 4 com HSR}} = 0,0729\%.$$

A.3 - Memória de Cálculo de $A_{\text{com reparo}}$ e $\bar{A}_{\text{com reparo}}$

$$A_{\text{sem reparo FAC}} = 109,6 \times 365 \times 24 / ((109,6 \times 365 \times 24) + 48) = 0,99995.$$

$$A_{\text{sem reparo BCU}} = 103,5 \times 365 \times 24 / ((103,5 \times 365 \times 24) + 48) = 0,999947.$$

$$A_{\text{sem reparo IE}} = 300 \times 365 \times 24 / ((300 \times 365 \times 24) + 48) = 0,999981.$$

$$A_{\text{sem reparo SWE}} = 11,5 \times 365 \times 24 / ((11,5 \times 365 \times 24) + 48) = 0,999524.$$

$$A_{\text{sem reparo CI}} = 14,3 \times 365 \times 24 / ((14,3 \times 365 \times 24) + 48) = 0,999617.$$

$$A_{\text{sem reparo SCCR}} = 14,3 \times 365 \times 24 / ((14,3 \times 365 \times 24) + 48) = 0,999617.$$

$$A_{\text{sem reparo IHM}} = 10 \times 365 \times 24 / ((10 \times 365 \times 24) + 48) = 0,999452.$$

$$A_{\beta} = A_{\beta 1} + A_{\beta 2} - A_{\beta 1} \times A_{\beta 2},$$

onde $A_{\beta 1}$ é igual a:

$$A_{IE} \times A_{SCCR} = 0,999981 \times 0,999617 = 0,999598$$

e $A_{\beta 2}$ é igual a:

$$A_{IE} \times A_{CI} \times A_{IHM} = 0,999981 \times 0,999617 \times 0,999452 = 0,99905,$$

$$\text{logo } A_{\beta} = 0,999598 + 0,99905 - (0,999598 \times 0,99905) = 0,99999962.$$

E para todos os casos abaixo:

$$A_{FAC} \times A_{BCU} \times A_{IE} = 0,99995 \times 0,999947 \times 0,999981 = 0,999878.$$

$$A_{\text{com reparo do RBD da Arquitetura 1 sem PRP}} = 0,999878 \times A_{\alpha} \times 0,99999962,$$

$$\text{onde } A_{\alpha} = A_{SWE} = 0,99952.$$

$$A_{\text{com reparo do RBD da Arquitetura 1 sem PRP}} = 99,93977\%$$

$$\bar{A}_{\text{com reparo do RBD da Arquitetura 1 sem PRP}} = 0,06023\%$$

$$A_{\text{com reparo do RBD da Arquitetura 1 com PRP}} = 0,999878 \times A_{\alpha} \times 0,99999962,$$

$$\text{onde } A_{\alpha} = (A_{SWE1} + A_{SWE2} - A_{SWE1} \times A_{SWE2}) = (0,99952 + 0,99952 - 0,99952 \times 0,99952) = 0,99999977.$$

$$A_{\text{com reparo do RBD da Arquitetura 1 com PRP}} = 99,98772\%$$

$$\bar{A}_{\text{com reparo do RBD da Arquitetura 1 com PRP}} = 0,01228\%$$

$$A_{\text{com reparo do RBD da Arquitetura 2 sem PRP}} = 0,999878 \times A_{\alpha} \times 0,99999962,$$

$$\text{onde } A_{\alpha} = (A_{SWE} \times A_{SWE}) = (0,99952 \times 0,99952) = 0,99904.$$

$$A_{\text{com reparo do RBD da Arquitetura 2 sem PRP}} = 99,89177\%$$

$$\bar{A}_{\text{com reparo do RBD da Arquitetura 2 sem PRP}} = 0,10823\%$$

$$A_{\text{com reparo do RBD da Arquitetura 2 com PRP}} = 0,999878 \times A_{\alpha} \times 0,99999962,$$

$$\text{onde } A_{\alpha} \text{ é igual a: } (A_{2SWE} + A_{2SWE} - A_{2SWE} \times A_{2SWE}) = (0,99904 + 0,99904 - 0,99904 \times 0,99904) = 0,9999991,$$

$$A_{\text{com reparo do RBD da Arquitetura 2 com PRP}} = 99,98767\%$$

$$\bar{A}_{\text{com reparo do RBD da Arquitetura 2 com PRP}} = 0,01233\%$$

$A_{\text{com reparo}}$ do RBD 1 da Arquitetura 3 sem PRP = $0,999878 \times A_{\alpha} \times 0,99999962$,

onde $A_{\alpha} = (A_{\text{SWE}} \times A_{\text{SWE}}) = (0,99952 \times 0,99952) = 0,99904$.

$A_{\text{com reparo}}$ do RBD 1 da Arquitetura 3 sem PRP = 99,89177%

$\bar{A}_{\text{com reparo}}$ do RBD 1 da Arquitetura 3 sem PRP = 0,10823%

$A_{\text{com reparo}}$ do RBD 1 da Arquitetura 3 com PRP = $0,999878 \times A_{\alpha} \times 0,99999962$,

onde A_{α} é igual a: $(A_{2\text{SWE}} + A_{2\text{SWE}} - A_{2\text{SWE}} \times A_{2\text{SWE}}) = (0,99904 + 0,99904 - 0,99904 \times 0,999904) = 0,9999991$,

$A_{\text{com reparo}}$ do RBD 1 da Arquitetura 3 com PRP = 99,98767%

$\bar{A}_{\text{com reparo}}$ do RBD 1 da Arquitetura 3 com PRP = 0,01233%

$A_{\text{com reparo}}$ do RBD 2 da Arquitetura 3 sem PRP = $0,999878 \times A_{\alpha} \times 0,99999962$,

onde $A_{\alpha} = (A_{\text{SWE}} \times A_{\text{SWE}} \times A_{\text{SWE}}) = (0,99952 \times 0,99952 \times 0,99952) = 0,998561$.

$A_{\text{com reparo}}$ do RBD 2 da Arquitetura 3 sem PRP = 99,84388%

$\bar{A}_{\text{com reparo}}$ do RBD 2 da Arquitetura 3 sem PRP = 0,15612%

$A_{\text{com reparo}}$ do RBD 2 da Arquitetura 3 com PRP = $0,999878 \times A_{\alpha} \times 0,99999962$,

onde A_{α} é igual a: $(A_{3\text{SWE}} + A_{3\text{SWE}} - A_{3\text{SWE}} \times A_{3\text{SWE}}) = (0,998561 + 0,998561 - 0,998561 \times 0,998561) = 0,999998$,

$A_{\text{com reparo}}$ do RBD 2 da Arquitetura 3 com PRP = 99,98755%

$\bar{A}_{\text{com reparo}}$ do RBD 2 da Arquitetura 3 com PRP = 0,01245%

$A_{\text{com reparo}}$ do RBD 1 da Arquitetura 4 sem HSR = $0,999878 \times A_{\alpha} \times 0,99999962$,

onde A_{α} é igual a: $A_{\text{SWE}} = 0,99952$

$A_{\text{com reparo}}$ do RBD 1 da Arquitetura 4 sem HSR = 99,93977%

$\bar{A}_{\text{com reparo}}$ do RBD 1 da Arquitetura 4 sem HSR = 0,06023%

$A_{\text{com reparo}}$ do RBD 1 da Arquitetura 4 com HSR = $0,999878 \times A_{\alpha} \times 0,99999962$,

onde A_{α} é igual a: $(A_{\text{SWE}} + A_{\alpha 2} - A_{\text{SWE}} \times A_{\alpha 2})$,

e $A_{\alpha 2}$ é igual a: $A_{5\text{BCU}} \times A_{5\text{IE}} \times A_{\text{SWE}} = 0,999167$,

$A_{\text{com reparo}}$ do RBD 1 da Arquitetura 4 com HSR = 99,98776%

$\bar{A}_{\text{com reparo}}$ do RBD 1 da Arquitetura 4 com HSR = 0,01224%

$A_{\text{com reparo}}$ do RBD 2 da Arquitetura 4 sem HSR = $0,999878 \times A_{\alpha} \times 0,99999962$,

e A_{α} é igual a: $A_{BCU} \times A_{IE} \times A_{SWE} = 0,99945$,

$A_{\text{com reparo}}$ do RBD 2 da Arquitetura 4 sem HSR = 99,93277%

$\bar{A}_{\text{com reparo}}$ do RBD 2 da Arquitetura 4 sem HSR = 0,06731%

$A_{\text{com reparo}}$ do RBD 2 da Arquitetura 4 com HSR = 0,999878 x A_{α} x 0,99999962,

onde A_{α} é igual a: $(A_{\alpha 1} + A_{\alpha 2} - A_{\alpha 1} \times A_{\alpha 2})$,

e $A_{\alpha 1}$ é igual a: $A_{BCU} \times A_{IE} \times A_{SWE} = 0,99945$,

e $A_{\alpha 2}$ é igual a: $A_{4BCU} \times A_{4IE} \times A_{SWE} = 0,99924$.

$A_{\text{com reparo}}$ do RBD 2 da Arquitetura 4 com HSR = 99,98772%

$\bar{A}_{\text{com reparo}}$ do RBD 2 da Arquitetura 4 com HSR = 0,01228%

$A_{\text{com reparo}}$ do RBD 3 da Arquitetura 4 sem HSR = 0,999878 x A_{α} x 0,99999962,

onde A_{α} é igual a: $(A_{2BCU} \times A_{2IE} \times A_{SWE}) = 0,99938$,

$A_{\text{com reparo}}$ do RBD 3 da Arquitetura 4 sem HSR = 99,92577%

$\bar{A}_{\text{com reparo}}$ do RBD 3 da Arquitetura 4 sem HSR = 0,07423%

$A_{\text{com reparo}}$ do RBD 3 da Arquitetura 4 com HSR = 0,999878 x A_{α} x 0,99999962,

onde A_{α} é igual a: $(A_{\alpha 1} + A_{\alpha 2} - A_{\alpha 1} \times A_{\alpha 2})$,

e $A_{\alpha 1}$ é igual a: $A_{2BCU} \times A_{2IE} \times A_{SWE} = 0,99938$,

e $A_{\alpha 2}$ é igual a: $A_{3BCU} \times A_{3IE} \times A_{SWE} = 0,99931$.

$A_{\text{com reparo}}$ do RBD 3 da Arquitetura 4 com HSR = 99,98772%

$\bar{A}_{\text{com reparo}}$ do RBD 3 da Arquitetura 4 com HSR = 0,01228%

A.4 - Memória de Cálculo de MTTF_{com reparo}

MTTF_{com reparo} do RBD da Arquitetura 1 sem PRP = 0,9993977 x (2/365) / (1-0,9993977),

MTTF_{com reparo} do RBD da Arquitetura 1 sem PRP = 9,092 anos.

MTTF_{com reparo} do RBD da Arquitetura 1 com PRP = 0,9998772 x (2/365) / (1-0,9998772),

MTTF_{com reparo} do RBD da Arquitetura 1 com PRP = 44,615 anos.

MTTF_{com reparo} do RBD da Arquitetura 2 sem PRP = 0,9989177 x (2/365) / (1-0,9989177),

MTTF_{com reparo} do RBD da Arquitetura 2 sem PRP = 5,057 anos.

$MTTF_{\text{com reparo}}$ do RBD da Arquitetura 2 com PRP = $0,9998767 \times (2/365) / (1-0,9998767)$,

$MTTF_{\text{com reparo}}$ do RBD da Arquitetura 2 com PRP = 44,435 anos.

$MTTF_{\text{com reparo}}$ do RBD 1 da Arquitetura 3 sem PRP = $0,9989177 \times (2/365) / (1-0,9989177)$,

$MTTF_{\text{com reparo}}$ do RBD 1 da Arquitetura 3 sem PRP = 5,057 anos.

$MTTF_{\text{com reparo}}$ do RBD 1 da Arquitetura 3 com PRP = $0,9998767 \times (2/365) / (1-0,9998767)$,

$MTTF_{\text{com reparo}}$ do RBD 1 da Arquitetura 3 com PRP = 44,435 anos.

$MTTF_{\text{com reparo}}$ do RBD 2 da Arquitetura 3 sem PRP = $0,9984388 \times (2/365) / (1-0,9984388)$,

$MTTF_{\text{com reparo}}$ do RBD 2 da Arquitetura 3 sem PRP = 3,504 anos.

$MTTF_{\text{com reparo}}$ do RBD 2 da Arquitetura 3 com PRP = $0,9998755 \times (2/365) / (1-0,9998755)$,

$MTTF_{\text{com reparo}}$ do RBD 2 da Arquitetura 3 com PRP = 44,006 anos.

$MTTF_{\text{com reparo}}$ do RBD 1 da Arquitetura 4 sem HSR = $0,9993977 \times (2/365) / (1-0,9993977)$,

$MTTF_{\text{com reparo}}$ do RBD 1 da Arquitetura 4 sem HSR = 9,092 anos.

$MTTF_{\text{com reparo}}$ do RBD 1 da Arquitetura 4 com HSR = $0,9998776 \times (2/365) / (1-0,9998776)$,

$MTTF_{\text{com reparo}}$ do RBD 1 da Arquitetura 4 com HSR = 44,761 anos.

$MTTF_{\text{com reparo}}$ do RBD 2 da Arquitetura 4 sem HSR = $0,9993277 \times (2/365) / (1-0,9993277)$,

$MTTF_{\text{com reparo}}$ do RBD 2 da Arquitetura 4 sem HSR = 8,145 anos.

$MTTF_{\text{com reparo}}$ do RBD 2 da Arquitetura 4 com HSR = $0,9998772 \times (2/365) / (1-0,9998772)$,

$MTTF_{\text{com reparo}}$ do RBD 2 da Arquitetura 4 com HSR = 44,615 anos.

$MTTF_{\text{com reparo}}$ do RBD 3 da Arquitetura 4 sem HSR = $0,9992577 \times (2/365) / (1-0,9992577)$,

$MTTF_{\text{com reparo}}$ do RBD 3 da Arquitetura 4 sem HSR = 7,376 anos.

$MTTF_{\text{com reparo}}$ do RBD 3 da Arquitetura 4 com HSR = $0,9998772 \times (2/365) / (1-0,9998772)$,

$MTTF_{\text{com reparo}}$ do RBD 3 da Arquitetura 4 com HSR = 44,615 anos.

Anexo B – MEMÓRIA DE CÁLCULO DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Todos os cálculos foram realizados com 6 casas decimais.

Nas análises serão explicitados apenas os cálculos para 100 e 90%, o mesmo procedimento ocorre para as demais porcentagens.

$$\text{Média de } \bar{A} = [(50 + 53 + 18 + 476 + 383 + 383 + 548) \times 10^{-6} / 7] = 273 \times 10^{-6}.$$

$$\text{Média de } A = 1 - (273 \times 10^{-6}) = 0,999727.$$

Quando o componente em α não varia, $A\alpha$ é igual a $A\alpha_1 + A\alpha_2 - A\alpha_1 \times A\alpha_2$,

onde $A\alpha_1$ é igual a: 0,999727 e

e $A\alpha_2$ é igual a: 0,999727 e, logo,

$A\alpha$ é igual a 1 para a Arquitetura 1.

Onde $A\alpha_1$ é igual a: 0,999454 e

e $A\alpha_2$ é igual a: 0,999454 e, logo,

$A\alpha$ é igual a 1 para as Arquiteturas 2 e 3.

Onde $A\alpha_1$ é igual a: 0,999727 e

e $A\alpha_2$ é igual a: 0,997001 e, logo,

$A\alpha$ é igual a 0,999999 para a Arquitetura 4 (RBD1).

Onde $A\alpha_1$ é igual a: 0,999181 e

e $A\alpha_2$ é igual a: 0,997818 e, logo,

$A\alpha$ é igual a 0,999998 para a Arquitetura 4 (RBD2).

Onde $A\alpha_1$ é igual a: 0,998636 e

e $A\alpha_2$ é igual a: 0,998091 e, logo,

$A\alpha$ é igual a 0,999997 para a Arquitetura 4 (RBD3).

Quando o componente em β não varia, $A\beta$ é igual a $A\beta_1 + A\beta_2 - A\beta_1 \times A\beta_2$,

onde $A\beta_1$ é igual a:

$$A_{IE} \times A_{SCCR} = 0,999727 \times 0,999727 = 0,999454$$

e $A\beta_2$ é igual a:

$$A_{IE} \times A_{CI} \times A_{IHM} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,999727 = 0,999181.$$

Logo, A_{β} é igual a 1.

Análise de FAC

$$A_{100\%}, A_{\text{com reparo}} = 0,99995 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (1) \times (1) = 0,99940410.$$

$$A_{90\%}, A_{\text{com reparo}} = 0,899955 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (1) \times (1) = 0,89946369.$$

Estes resultados da análise de FAC se repetem para as Arquiteturas 1, 2 e 3.

$$A_{100\%}, A_{\text{com reparo}} = 0,99995 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (0,999999) \times (1) = 0,99940310.$$

$$A_{90\%}, A_{\text{com reparo}} = 0,899955 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (0,999999) \times (1) = 0,89946279.$$

Estes resultados da análise de FAC se referem à Arquitetura 4 (RBD 1).

$$A_{100\%}, A_{\text{com reparo}} = 0,99995 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (0,999998) \times (1) = 0,99940210.$$

$$A_{90\%}, A_{\text{com reparo}} = 0,899955 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (0,999998) \times (1) = 0,89946189.$$

Estes resultados da análise de FAC se referem à Arquitetura 4 (RBD 2).

$$A_{100\%}, A_{\text{com reparo}} = 0,99995 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (0,999997) \times (1) = 0,99940110.$$

$$A_{90\%}, A_{\text{com reparo}} = 0,899955 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (0,999997) \times (1) = 0,89946099.$$

Estes resultados da análise de FAC se referem à Arquitetura 4 (RBD 3).

Análise de CI

$$A_{100\%}, A_{\beta} = A_{\beta 1} + A_{\beta 2} - A_{\beta 1} \times A_{\beta 2},$$

onde $A_{\beta 1}$ é igual a:

$$A_{IE} \times A_{SCCR} = 0,999727 \times 0,999727 = 0,999454$$

e $A_{\beta 2}$ é igual a:

$$A_{IE} \times A_{CI} \times A_{IHM} = 0,999727 \times 0,999617 \times 0,999727 = 0,999071.$$

Logo, A_{β} é igual a 0,999999.

$$A_{100\%}, A_{\text{com reparo}} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (1) \times (0,999999) = 0,99918064.$$

$$A_{90\%}, A_{\beta} = A_{\beta 1} + A_{\beta 2} - A_{\beta 1} \times A_{\beta 2},$$

onde $A_{\beta 1}$ é igual a:

$$A_{IE} \times A_{SCCR} = 0,999727 \times 0,999727 = 0,999454$$

e $A_{\beta 2}$ é igual a:

$$A_{IE} \times A_{CI} \times A_{IHM} = 0,999727 \times 0,9 \times 0,999617 \times 0,999727 = 0,899164.$$

Logo, A_{β} é igual a 0,999945.

$$A_{90\%}, A_{com\ reparo} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (1) \times (0,999945) = 0,99912614.$$

Estes resultados da análise de CI se repetem para as Arquiteturas 1, 2 e 3.

$$A_{100\%}, A_{com\ reparo} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (0,999999) \times (0,999999) = 0,99917972.$$

$$A_{90\%}, A_{com\ reparo} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (0,999999) \times (0,999945) = 0,99912521.$$

Estes resultados da análise de CI se referem à Arquitetura 4 (RBD1).

$$A_{100\%}, A_{com\ reparo} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (0,999998) \times (0,999999) = 0,99917872.$$

$$A_{90\%}, A_{com\ reparo} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (0,999998) \times (0,999945) = 0,99912421.$$

Estes resultados da análise de CI se referem à Arquitetura 4 (RBD2).

$$A_{100\%}, A_{com\ reparo} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (0,999998) \times (0,999999) = 0,99917772.$$

$$A_{90\%}, A_{com\ reparo} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (0,999998) \times (0,999945) = 0,99912321.$$

Estes resultados da análise de CI se referem à Arquitetura 4 (RBD3).

Análise de SCCR

$$A_{100\%}, A_{\beta} = A_{\beta 1} + A_{\beta 2} - A_{\beta 1} \times A_{\beta 2},$$

onde $A_{\beta 1}$ é igual a:

$$A_{IE} \times A_{SCCR} = 0,999727 \times 0,999617 = 0,999344.$$

e $A_{\beta 2}$ é igual a:

$$A_{IE} \times A_{CI} \times A_{IHM} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,999727 = 0,999181.$$

Logo, A_{β} é igual a 0,9999995.

$$A_{100\%}, A_{com\ reparo} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (1) \times (0,9999995) = 0,99918069.$$

$$A_{90\%}, A_{\beta} = A_{\beta 1} + A_{\beta 2} - A_{\beta 1} \times A_{\beta 2},$$

onde $A_{\beta 1}$ é igual a:

$$A_{IE} \times A_{SCCR} = 0,999727 \times 0,9 \times 0,999617 = 0,899410.$$

e $A_{\beta 2}$ é igual a:

$$A_{IE} \times A_{CI} \times A_{IHM} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,999727 = 0,999181.$$

Logo, A_{β} é igual a 0,999918.

$$A_{90\%}, A_{com\ reparo} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (1) \times (0,999918) = 0,99909893.$$

Estes resultados da análise de SCCR se repetem para as Arquiteturas 1, 2 e 3.

$$A_{100\%}, A_{com\ reparo} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (0,999999) \times (0,9999995) = 0,99917969.$$

$$A_{90\%}, A_{com\ reparo} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (0,999999) \times (0,999918) = 0,99909793.$$

Estes resultados da análise de SCCR se referem à Arquitetura 4 (RBD 1).

$$A_{100\%}, A_{com\ reparo} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (0,999998) \times (0,9999995) = 0,99917869.$$

$$A_{90\%}, A_{com\ reparo} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (0,999998) \times (0,999918) = 0,99909693.$$

Estes resultados da análise de SCCR se referem à Arquitetura 4 (RBD 2).

$$A_{100\%}, A_{com\ reparo} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (0,999997) \times (0,9999995) = 0,99917769.$$

$$A_{90\%}, A_{com\ reparo} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (0,999997) \times (0,999918) = 0,99909593.$$

Estes resultados da análise de SCCR se referem à Arquitetura 4 (RBD 3).

Análise de IHM

$$A_{100\%}, A_{\beta} = A_{\beta 1} + A_{\beta 2} - A_{\beta 1} \times A_{\beta 2},$$

onde $A_{\beta 1}$ é igual a:

$$A_{IE} \times A_{SCCR} = 0,999727 \times 0,999727 = 0,999454$$

e $A_{\beta 2}$ é igual a:

$$A_{IE} \times A_{CI} \times A_{IHM} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,999452 = 0,998906.$$

Logo, A_{β} é igual a 0,999999.

$$A_{100\%}, A_{com\ reparo} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (1) \times (0,999999) = 0,99918072.$$

$$A_{90\%}, A_{\beta} = A_{\beta 1} + A_{\beta 2} - A_{\beta 1} \times A_{\beta 2},$$

onde $A_{\beta 1}$ é igual a:

$$A_{IE} \times A_{SCCR} = 0,999727 \times 0,999727 = 0,999454$$

e $A_{\beta 2}$ é igual a:

$$A_{IE} \times A_{CI} \times A_{IHM} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,9 \times 0,999452 = 0,899016.$$

Logo, A_{β} é igual a 0,999945.

$$A_{90\%}, A_{com\ reparo} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (1) \times (0,999945) = 0,99912622.$$

Estes resultados da análise de IHM se repetem para as Arquiteturas 1, 2 e 3.

$$A_{100\%}, A_{com\ reparo} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (0,999999) \times (0,999999) = 0,99917972.$$

$$A_{90\%}, A_{com\ reparo} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (0,999999) \times (0,999945) = 0,99912522.$$

Estes resultados da análise de IHM se referem à Arquitetura 4 (RBD 1).

$$A_{100\%}, A_{com\ reparo} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (0,999998) \times (0,999999) = 0,99917872.$$

$$A_{90\%}, A_{com\ reparo} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (0,999998) \times (0,999945) = 0,99912422.$$

Estes resultados da análise de IHM se referem à Arquitetura 4 (RBD 2).

A 100%, $A_{\text{com reparo}} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (0,999997) \times (0,999999) = 0,99917772$.

A 90%, $A_{\text{com reparo}} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (0,999997) \times (0,999945) = 0,99912322$.

Estes resultados da análise de IHM se referem à Arquitetura 4 (RBD 3).

Análise de BCU

A 100%, $A_{\text{com reparo}} = 0,999947 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (1) \times (1) = 0,99940110$.

A 90%, $A_{\text{com reparo}} = 0,8999523 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (1) \times (1) = 0,89946099$.

Estes resultados da análise de BCU se repetem para as Arquiteturas 1, 2 e 3.

A 100%, $A_{\text{com reparo}} = 0,999947 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (0,999999) \times (1) = 0,99940058$.

A 90%, $A_{\text{com reparo}} = 0,8999523 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (0,999888) \times (1) = 0,89936016$.

Estes resultados da análise de BCU se referem à Arquitetura 4 (RBD 1).

A 100%, $A_{\text{com reparo}} = 0,999947 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (0,999999) \times (1) = 0,99940016$.

A 90%, $A_{\text{com reparo}} = 0,8999523 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (0,965321) \times (1) = 0,86826830$.

Estes resultados da análise de BCU se referem à Arquitetura 4 (RBD 2).

A 100%, $A_{\text{com reparo}} = 0,999947 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (0,999999) \times (1) = 0,99939995$.

A 90%, $A_{\text{com reparo}} = 0,8999523 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (0,948133) \times (1) = 0,85280879$.

Estes resultados da análise de BCU se referem à Arquitetura 4 (RBD 3).

Análise de IE

A 100%, $A_{\beta} = A_{\beta 1} + A_{\beta 2} - A_{\beta 1} \times A_{\beta 2}$,

onde $A_{\beta 1}$ é igual a:

$A_{IE} \times A_{SCCR} = 0,999981 \times 0,999727 = 0,999708$.

e $A_{\beta 2}$ é igual a:

$$A_{IE} \times A_{CI} \times A_{IHM} = 0,999981 \times 0,999727 \times 0,999727 = 0,999435.$$

Logo, A_{β} é igual a 1.

$$A_{100\%}, A_{com\ reparo} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,999981 \times (1) \times (1) = 0,99943485.$$

$$A_{90\%}, A_{\beta} = A_{\beta 1} + A_{\beta 2} - A_{\beta 1} \times A_{\beta 2},$$

onde $A_{\beta 1}$ é igual a:

$$A_{IE} \times A_{SCCR} = 0,9 \times 0,999981 \times 0,999727 = 0,899737.$$

e $A_{\beta 2}$ é igual a:

$$A_{IE} \times A_{CI} \times A_{IHM} = 0,9 \times 0,99981 \times 0,999727 \times 0,999727 = 0,899492.$$

Logo, A_{β} é igual a 0,989923.

$$A_{90\%}, A_{com\ reparo} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,9 \times 0,99981 \times (1) \times (0,989923) = 0,89042710.$$

Estes resultados da análise de IE se referem às Arquiteturas 1,2 e 3.

$$A_{100\%}, A_{\beta} = A_{\beta 1} + A_{\beta 2} - A_{\beta 1} \times A_{\beta 2},$$

onde $A_{\beta 1}$ é igual a:

$$A_{IE} \times A_{SCCR} = 0,999981 \times 0,999727 = 0,999708.$$

e $A_{\beta 2}$ é igual a:

$$A_{IE} \times A_{CI} \times A_{IHM} = 0,999981 \times 0,999727 \times 0,999727 = 0,999435.$$

Logo, A_{β} é igual a 1.

Similarmente ao calculado em β , A_{α} é igual a 1.

$$A_{100\%}, A_{com\ reparo} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,999981 \times (1) \times (1) = 0,99943485.$$

$$A_{90\%}, A_{\beta} = A_{\beta 1} + A_{\beta 2} - A_{\beta 1} \times A_{\beta 2},$$

onde $A_{\beta 1}$ é igual a:

$$A_{IE} \times A_{SCCR} = 0,9 \times 0,999981 \times 0,999727 = 0,899737.$$

e $A_{\beta 2}$ é igual a:

$$A_{IE} \times A_{CI} \times A_{IHM} = 0,9 \times 0,99981 \times 0,999727 \times 0,999727 = 0,899492.$$

Logo, A_{β} é igual a 0,989923.

Similarmente ao calculado em β , A_{α} é igual a 0,999888.

$$A_{90\%}, A_{com\ reparo} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,9 \times 0,99981 \times (0,999888) \times (0,989923) = 0,89042710.$$

Estes resultados da análise de IE se referem à Arquitetura 4 (RBD 1).

$$A_{100\%}, A_{\beta} = A_{\beta 1} + A_{\beta 2} - A_{\beta 1} \times A_{\beta 2},$$

onde $A_{\beta 1}$ é igual a:

$$A_{IE} \times A_{SCCR} = 0,999981 \times 0,999727 = 0,999708.$$

e $A_{\beta 2}$ é igual a:

$$A_{IE} \times A_{CI} \times A_{IHM} = 0,999981 \times 0,999727 \times 0,999727 = 0,999435.$$

Logo, A_{β} é igual a 1.

Similarmente ao calculado em β , A_{α} é igual a 0,999999.

$$A_{100\%}, A_{\text{com reparo}} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,999981 \times (0,999999) \times (1) = 0,99943411.$$

$$A_{90\%}, A_{\beta} = A_{\beta 1} + A_{\beta 2} - A_{\beta 1} \times A_{\beta 2},$$

onde $A_{\beta 1}$ é igual a:

$$A_{IE} \times A_{SCCR} = 0,9 \times 0,999981 \times 0,999727 = 0,899737.$$

e $A_{\beta 2}$ é igual a:

$$A_{IE} \times A_{CI} \times A_{IHM} = 0,9 \times 0,99981 \times 0,999727 \times 0,999727 = 0,899492.$$

Logo, A_{β} é igual a 0,989923.

Similarmente ao calculado em β , A_{α} é igual a 0,965340.

$$A_{90\%}, A_{\text{com reparo}} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,9 \times 0,99981 \times (0,958738) \times (0,989923) = 0,85956513.$$

Estes resultados da análise de IE se referem à Arquitetura 4 (RBD 2).

$$A_{100\%}, A_{\beta} = A_{\beta 1} + A_{\beta 2} - A_{\beta 1} \times A_{\beta 2},$$

onde $A_{\beta 1}$ é igual a:

$$A_{IE} \times A_{SCCR} = 0,999981 \times 0,999727 = 0,999708.$$

e $A_{\beta 2}$ é igual a:

$$A_{IE} \times A_{CI} \times A_{IHM} = 0,999981 \times 0,999727 \times 0,999727 = 0,999435.$$

Logo, A_{β} é igual a 1.

Similarmente ao calculado em β , A_{α} é igual a 0,999999.

$$A_{100\%}, A_{\text{com reparo}} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,999981 \times (0,999999) \times (1) = 0,99943394.$$

$$A_{90\%}, A_{\beta} = A_{\beta 1} + A_{\beta 2} - A_{\beta 1} \times A_{\beta 2},$$

onde $A_{\beta 1}$ é igual a:

$$A_{IE} \times A_{SCCR} = 0,9 \times 0,999981 \times 0,999727 = 0,899737.$$

e $A_{\beta 2}$ é igual a:

$$A_{IE} \times A_{CI} \times A_{IHM} = 0,9 \times 0,99981 \times 0,999727 \times 0,999727 = 0,899492.$$

Logo, A_{β} é igual a 0,989923.

Similarmente ao calculado em β , A_{α} é igual a 0,943394.

$$A_{90\%}, A_{\text{com reparo}} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,9 \times 0,99981 \times (0,958738) \times (0,989923) = 0,84426945.$$

Estes resultados da análise de IE se referem à Arquitetura 4 (RBD 3).

Análise de SWE

$$A_{100\%}, A_{\alpha} = A_{\alpha 1} + A_{\alpha 2} - A_{\alpha 1} \times A_{\alpha 2},$$

onde $A_{\alpha 1}$ é igual a:

$$A_{SWE} = 0,999524$$

e $A_{\alpha 2}$ é igual a:

$$A_{SWE} = 0,999524.$$

Logo, A_{α} é igual a 1.

$$A_{100\%}, A_{\text{com reparo}} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (1) \times (1) = 0,99918100.$$

$$A_{90\%}, A_{\alpha} = A_{\alpha 1} + A_{\alpha 2} - A_{\alpha 1} \times A_{\alpha 2},$$

onde $A_{\alpha 1}$ é igual a:

$$A_{SWE} = 0,999524$$

e $A_{\alpha 2}$ é igual a:

$$A_{SWE} = 0,999524.$$

Logo, A_{α} é igual a 1.

$$A_{90\%}, A_{\text{com reparo}} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (0,989914) \times (1) = 0,98910362.$$

Estes resultados da análise de SWE se referem à Arquitetura 1.

$$A_{100\%}, A_{\alpha} = A_{\alpha 1} + A_{\alpha 2} - A_{\alpha 1} \times A_{\alpha 2},$$

onde $A_{\alpha 1}$ é igual a:

$$A_{2XSWE} = 0,999048$$

e $A_{\alpha 2}$ é igual a:

$$A_{2XSWE} = 0,999048.$$

Logo, A_{α} é igual a 0,999999.

$$A_{100\%}, A_{\text{com reparo}} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (0,999999) \times (1) = 0,99918032.$$

$$A_{90\%}, A_{\alpha} = A_{\alpha 1} + A_{\alpha 2} - A_{\alpha 1} \times A_{\alpha 2},$$

onde $A_{\alpha 1}$ é igual a:

$$A_{2XSWE} = 0,9 \times 0,999048$$

e $A_{\alpha 2}$ é igual a:

$$A_{2XSWE} = 0,9 \times 0,999048.$$

Logo, A_{α} é igual a 0,963606.

$$A_{90\%}, A_{\text{com reparo}} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (0,963606) \times (1) = 0,96281747.$$

Estes resultados da análise de SWE se referem à Arquitetura 2 e Arquitetura 3 (RBD 1).

$$A_{100\%}, A_{\alpha} = A_{\alpha 1} + A_{\alpha 2} - A_{\alpha 1} \times A_{\alpha 2},$$

onde $A_{\alpha 1}$ é igual a:

$$A_{3XSWE} = 0,998573$$

e $A_{\alpha 2}$ é igual a:

$$A_{3XSWE} = 0,998573.$$

Logo, A_{α} é igual a 0,999998.

$$A_{100\%}, A_{\text{com reparo}} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (0,999998) \times (1) = 0,99917919.$$

$$A_{90\%}, A_{\alpha} = A_{\alpha 1} + A_{\alpha 2} - A_{\alpha 1} \times A_{\alpha 2},$$

onde $A_{\alpha 1}$ é igual a:

$$A_{3XSWE} = 0,9 \times 0,998573$$

e $A_{\alpha 2}$ é igual a:

$$A_{3XSWE} = 0,9 \times 0,998573.$$

Logo, A_{α} é igual a 0,925994.

$$A_{90\%}, A_{\text{com reparo}} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (0,925994) \times (1) = 0,92523578.$$

Estes resultados da análise de SWE se referem à Arquitetura 3 (RBD 2).

$$A_{100\%}, A_{\alpha} = A_{\alpha 1} + A_{\alpha 2} - A_{\alpha 1} \times A_{\alpha 2},$$

onde $A_{\alpha 1}$ é igual a:

$$A_{SWE} = 0,999524$$

e $A_{\alpha 2}$ é igual a:

$$A_{5xBCU+5xIE+SWE} = 0,996799.$$

Logo, A_{α} é igual a 0,999998.

$$A_{100\%}, A_{\text{com reparo}} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (0,999998) \times (1) = 0,99917970.$$

$$A_{90\%}, A_{\alpha} = A_{\alpha 1} + A_{\alpha 2} - A_{\alpha 1} \times A_{\alpha 2},$$

onde $A_{\alpha 1}$ é igual a:

$$A_{SWE} = 0,9 \times 0,999524$$

e $A_{\alpha 2}$ é igual a:

$$A_{5xBCU+5xIE+SWE} = 0,897119.$$

Logo, A_{α} é igual a 0,989668.

$$A_{90\%}, A_{\text{com reparo}} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (0,989668) \times (1) = 0,98885749.$$

Estes resultados da análise de SWE se referem à Arquitetura 4 (RBD 1).

$$A_{100\%}, A_{\alpha} = A_{\alpha 1} + A_{\alpha 2} - A_{\alpha 1} \times A_{\alpha 2},$$

onde $A_{\alpha 1}$ é igual a:

$$A_{BCU+IE+SWE} = 0,998978$$

e $A_{\alpha 2}$ é igual a:

$$A_{4xBCU+4xIE+SWE} = 0,997343.$$

Logo, A_{α} é igual a 0,999997.

$$A_{100\%}, A_{\text{com reparo}} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (0,999997) \times (1) = 0,99917851.$$

$$A_{90\%}, A_{\alpha} = A_{\alpha 1} + A_{\alpha 2} - A_{\alpha 1} \times A_{\alpha 2},$$

onde $A_{\alpha 1}$ é igual a:

$$A_{BCU+IE+SWE} = 0,899081$$

e $A_{\alpha 2}$ é igual a:

$$A_{4xBCU+4xIE+SWE} = 0,897609.$$

Logo, A_{α} é igual a 0,989667.

$$A_{90\%}, A_{\text{com reparo}} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (0,989667) \times (1) = 0,98885642.$$

Estes resultados da análise de SWE se referem à Arquitetura 4 (RBD 2).

$$A_{100\%}, A_{\alpha} = A_{\alpha 1} + A_{\alpha 2} - A_{\alpha 1} \times A_{\alpha 2},$$

onde $A_{\alpha 1}$ é igual a:

$$A_{2xBCU+2xIE+SWE} = 0,998433$$

e $A_{\alpha 2}$ é igual a:

$$A_{3xBCU+3xIE+SWE} = 0,997888.$$

Logo, A_{α} é igual a 0,999997.

$$A_{100\%}, A_{\text{com reparo}} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (0,999997) \times (1) = 0,99917792.$$

$$A_{90\%}, A_{\alpha} = A_{\alpha 1} + A_{\alpha 2} - A_{\alpha 1} \times A_{\alpha 2},$$

onde $A_{\alpha 1}$ é igual a:

$$A_{2xBCU+2xIE+SWE} = 0,898590$$

e $A_{\alpha 2}$ é igual a:

$$A_{3xBCU+3xIE+SWE} = 0,898099.$$

Logo, A_{α} é igual a 0,989666.

$$A_{90\%}, A_{\text{com reparo}} = 0,999727 \times 0,999727 \times 0,999727 \times (0,989666) \times (1) = 0,98885588.$$

Estes resultados da análise de SWE se referem à Arquitetura 4 (RBD 3).