



**XXII SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GTL/06
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO XV

GRUPO DE ESTUDO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO E TELECOMUNICAÇÃO PARA SISTEMAS ELÉTRICOS - GTL

ESTUDO DA SEGURANÇA E CONFIABILIDADE DE ESQUEMAS DE TELEPROTEÇÃO BASEADO NA IEC 60834-1 E NOS PROCEDIMENTOS DE REDE DO ONS

Carlos Henrique da Silva Certório
FURNAS

RESUMO

O estudo realizado se propõe a comparar o desempenho de diferentes topologias de teleproteção avaliando a disponibilidade, segurança e confiabilidade destas topologias sob a ótica da engenharia de confiabilidade, considerando os requisitos mínimos exigidos nas normas brasileiras e internacionais vigentes e ainda as especificidades de cada tecnologia. Aos objetivos a serem alcançados adicionam-se, com importância cada vez maior, os custos associados, seja ao projeto e aquisição de equipamentos e sobressalentes, seja à operação e manutenção, que precisam ser minimizados sem causar prejuízos à confiabilidade, disponibilidade, segurança e manutenibilidade do sistema.

PALAVRAS-CHAVE

Teleproteção, Engenharia de Confiabilidade, Disponibilidade

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a engenharia de confiabilidade tem sido muito utilizada em todo o mundo na realização de estudos e análises de sistemas dos mais diversos tipos. O estudo da confiabilidade e disponibilidade de sistemas eletrônicos e de telecomunicações é uma das aplicações possíveis, tanto de forma analítica quanto por simulações numéricas.

Os equipamentos de teleproteção ainda são muito utilizados no Brasil e em todo o mundo por empresas geradoras e transmissoras de energia elétrica, compondo esquemas de proteção de linhas de transmissão e equipamentos associados, esquemas de controle de emergência, etc. Até o final da década de 90, esses equipamentos eram predominantemente analógicos, com projetos baseados em transistores e componentes eletrônicos discretos. Eram utilizados principalmente em sistemas de ondas portadoras ou de microondas analógica e utilizavam modulação analógica (SSB, FSK...) em tons de áudio. Porém, no final da década de noventa, houve crescimento na utilização de equipamentos de teleproteção digital com tecnologia microprocessada, cujos sinais podiam trafegar diretamente em sistemas de microondas digitais, sistemas ópticos, etc., através do uso de modulações digitais diversas. A evolução tecnológica nos projetos desses equipamentos com tecnologia de transmissão digital possibilitou o incremento de desempenho de sistemas de teleproteção em suas características mais desejáveis: segurança (probabilidade de falso comando) e confiabilidade (probabilidade de perda de comandos).

Este trabalho mostra os resultados dos estudos de engenharia de confiabilidade de sistemas de teleproteção, considerando os aspectos técnicos dos equipamentos, analisando os resultados com base nas recomendações das normas IEC 60834-1 e nos procedimentos de rede do ONS.

2. NORMAS E RECOMENDAÇÕES PARA SISTEMAS DE TELEPROTEÇÃO:

Os equipamentos de teleproteção são projetados para atender, de forma equilibrada, a três parâmetros básicos: segurança, confiabilidade e tempo de transmissão de comandos. Estes parâmetros são concorrentes, ou seja, o incremento excessivo de um reflete-se no decréscimo de outro. Sendo assim, é necessário encontrar o equilíbrio entre esses três fatores, considerando o esquema de proteção utilizado. Além destes três parâmetros básicos, é necessário que o equipamento possua alta disponibilidade.

A principal diretiva utilizada pelos fabricantes de equipamentos de teleproteção é a norma da Comissão Eletrotécnica Internacional (International Electrotechnical Commission) IEC 60834-1.

Existe ainda uma diretiva brasileira que trata do assunto em pauta: o sub-módulo 2.6 dos procedimentos de rede do Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS (revisão 2.0 de 11/11/2011), redigido sob a ótica sistêmica. No texto são descritos os requisitos mínimos que devem ser atendidos para os esquemas de teleproteção de linhas de transmissão participantes da rede básica, em função da classe de tensão a qual cada linha de transmissão está inserida.

2.1. A Norma IEC 60834-1:

A norma internacional IEC 60834-1, revisada em 1999 (revisão 2), direciona todos os grandes fabricantes de equipamentos de teleproteção com representação no Brasil. Esta norma indica, entre outros, os requisitos mínimos de segurança e confiabilidade exigidos para os diferentes esquemas de teleproteção e a metodologia padrão que deve ser utilizada para comprovação, através de ensaios em laboratório, do alcance efetivo destes requisitos. O requisito de segurança indica a probabilidade de um equipamento de teleproteção receber um comando indevidamente (P_{uc} = *Probability of unwanted commands*) e a confiabilidade (*dependability*) indica a probabilidade de um equipamento de teleproteção não receber um comando real (P_{mc} = *Probability of missing commands*). A tabela 1 indica os valores esperados para segurança e confiabilidade de equipamentos de teleproteção, dependendo da interface de comunicação utilizada e do esquema de proteção.

Esquema de Proteção	Segurança (P_{uc})		Confiabilidade (P_{mc})
	Analógico	Digital	
Bloqueio	$<10^{-3}$	$<10^{-4}$	$<10^{-3}$
Permissivo Sub-alcance	$<10^{-4}$	$<10^{-7}$	$<10^{-2}$
Permissivo Sobre-alcance	$<10^{-3}$	$<10^{-7}$	$<10^{-3}$
Disparo Direto	$<10^{-6}$	$<10^{-8}$	$<10^{-4}$

Tabela 1: Requisitos de segurança e confiabilidade indicados pela norma IEC 60834-1 para diferentes esquemas de teleproteção.

2.2. Os Procedimentos de Rede do ONS:

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), com a participação dos agentes, elaborou os procedimentos de rede, um conjunto de documentos que definem, entre outros, os procedimentos e os requisitos necessários à administração do sistema de transmissão da rede básica. Dos diversos módulos que o compõem, o sub-módulo 2.6 (revisão 2.0 de 11/11/2011) trata dos requisitos mínimos que devem ser atendidos para os esquemas de teleproteção de linhas de transmissão participantes da rede básica, em função da classe de tensão a qual cada linha de transmissão está inserida.

Nos procedimentos de rede, porém, não são discutidas as especificidades das tecnologias analógica e digital. Nota-se ainda a ausência de definições de desempenho mínimo esperado para estes sistemas, em termos de disponibilidade, segurança e confiabilidade.

Ainda sobre o sub-módulo 2.6 dos procedimentos de rede, no seu item 8.2 são definidos requisitos para esquemas de teleproteção de linhas de transmissão com tensão nominal igual ou superior a 345kV. A interpretação deste item, em Furnas e outras transmissoras, conduz à necessidade de haver dois canais de teleproteção independentes por via, nos quais o sinal de transferência de disparo deve ser replicado. Esta interpretação é reforçada pelo subitem 8.1.9, onde explicita-se a exigência de implantação de lógica monocanal para estes esquemas.

3. DISPONIBILIDADE, SEGURANÇA E CONFIABILIDADE DE SISTEMAS DE TELEPROTEÇÃO:

3.1. Parâmetros de Segurança e Confiabilidade de Equipamentos de Teleproteção

Para realização dos estudos apresentados neste trabalho, foram analisados os parâmetros de segurança e confiabilidade de equipamentos de teleproteção analógica e digital de dois dos principais fornecedores de equipamentos de teleproteção de Furnas, identificados como fornecedores A e B.

Os primeiros equipamentos de teleproteção analógicos para uso em sistemas de microondas (analógico) e sistemas de ondas portadoras não eram considerados suficientemente seguros e confiáveis. Na tabela 2 são mostrados os valores de P_{uc} e P_{mc} de dois modelos de equipamentos de teleproteção do fabricante B, com interface analógica, comercializados nas décadas de 80 e início da década de 90.

Fabricante	Modelo	Modo de Proteção	Segurança (P_{uc})	Confiabilidade (P_{mc}) - SNR=6dB
B	1	Permissivo	$< 10^{-4}$	$< 10^{-1}$
		Disparo Direto	$< 10^{-5}$	$< 10^{-1}$
	2	Permissivo	$< 10^{-3}$	$< 10^{-3}$
		Disparo Direto	$< 10^{-7}$	$< 10^{-4}$

Tabela 2: Valores mínimos de P_{uc} e P_{mc} indicado pelos fabricantes A e B nos manuais técnicos dos equipamentos de Teleproteção.

Através da observação da tabela 2, percebe-se que os equipamentos em questão não atendem a norma IEC 60834-1 na revisão 2, sua versão atual. Com a finalidade de reduzir a probabilidade de falso comando nos esquemas de teleproteção, Furnas utilizava (e ainda utiliza) redundância de equipamentos dentro de uma mesma via, chamando-os de canal A e B. Nesta topologia, um mesmo comando de disparo direto é enviado simultaneamente pelos canais A e B e, na estação receptora, tal comando só será entregue ao relé se este for recebido também pelos dois canais, conforme mostra a figura 1.

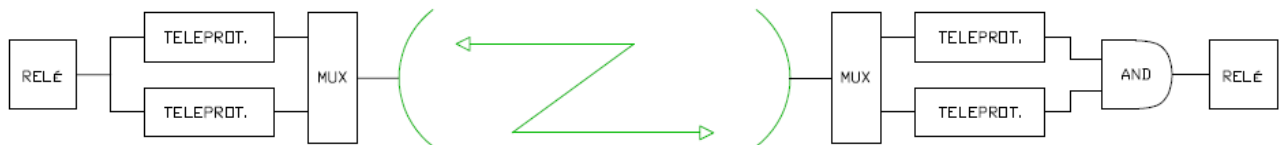


Figura 1: Comando de disparo direto transmitido por dois canais distintos de teleproteção.

Assim, com o uso de dois equipamentos de teleproteção e a lógica “AND” na recepção, conseguia-se reduzir significativamente a probabilidade de falso comando, com um aumentando em proporções aceitáveis da probabilidade de perda de comandos reais, como mostram as equações 1 e 2.

$$P_{uc}(\text{total}) = P_{uc}(\text{Equip. 1}) \times P_{uc}(\text{Equip. 2}); \quad (1)$$

$$P_{mc}(\text{total}) = P_{mc}(\text{Equip. 1}) + P_{mc}(\text{Equip. 2}); \quad (2)$$

Desta forma, se um sistema fosse composto de dois equipamentos de teleproteção do modelo 2, por exemplo, ter-se-ia uma $P_{uc} < 10^{-14}$ e uma $P_{mc} < 2 \cdot 10^{-4}$ para os comandos de disparo direto, atendendo plenamente a norma IEC 60834-1. Em adição, presume-se a redução da indisponibilidade do esquema de teleproteção através da lógica de monocal – o esquema de teleproteção continua operando no caso de falha de um dos equipamentos.

Porém vale comentar uma fragilidade prática do sistema de conversão monocal. A conversão ocorre através da informação, ao relé de proteção, da ocorrência de um alarme geral no equipamento de teleproteção (normalmente um contato seco). Mas, em alguns casos, o equipamento de teleproteção não ativa o seu contato de alarme geral em situações de alarme no equipamento remoto, com exceção de falhas que afetem a CPU ou o canal de comunicação. Neste caso, ocorre a conversão monocal no terminal em falha, mas o mesmo não ocorre no terminal remoto. Quando isso acontece, o terminal convertido para monocal envia o comando de disparo direto apenas pelo canal disponível mas o terminal remoto, que não está convertido, permanecerá aguardando a

recepção de comandos pelos dois canais, impedindo o correto funcionamento do sistema. A lógica monocal é comprovadamente eficiente para proteger o esquema de teleproteção no caso de falhas no meio de comunicação.

Na tabela 3 são mostrados os valores de P_{uc} e P_{mc} de um modelo de equipamento de teleproteção do fabricante A e outro do fabricante B, ambos de geração atual.

Através da comparação da tabela 3 com a tabela 2 percebe-se que, com o advento da tecnologia de transmissão digital, conseguiu-se um incremento sensível de desempenho nos parâmetros de confiabilidade e segurança. Desta forma, nos dias atuais consegue-se alcançar, com a utilização de apenas um equipamento de teleproteção digital, níveis de segurança e confiabilidade que eram conseguidos no passado apenas através da utilização de dois equipamentos por via.

Fabricante	Interface	Modo de Proteção	Segurança (P_{uc})	Confiabilidade (P_{mc})
A	Digital	Bloqueio	$< 10^{-7}$	$< 10^{-30}$
		Permissivo	$< 10^{-14}$	$< 10^{-35}$
		Disparo Direto	$< 10^{-20}$	$< 10^{-19}$
	Analogico (single tone)	Bloqueio	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$
		Permissivo	$< 10^{-6}$	$< 10^{-4}$
		Disparo Direto	$< 10^{-11}$	$< 10^{-4}$
B	Digital	Bloqueio	$< 10^{-5}$	$< 10^{-3}$
		Permissivo	$< 10^{-9}$	$< 10^{-4}$
		Disparo Direto	$< 10^{-12}$	$< 10^{-4}$
	Analogico (single tone)	Bloqueio	$< 10^{-3}$	$< 10^{-3}$
		Permissivo	$< 10^{-5}$	$< 10^{-3}$
		Disparo Direto	$< 10^{-8}$	$< 10^{-4}$
	Analogico (dual tone)	Bloqueio	$< 10^{-4}$	$< 10^{-3}$
		Permissivo	$< 10^{-6}$	$< 10^{-3}$
		Disparo Direto	$< 10^{-9}$	$< 10^{-4}$

Tabela 3: Valores mínimos de P_{uc} e P_{mc} indicados pelos fabricantes A e B nos manuais técnicos dos equipamentos de Teleproteção.

3.2. A Engenharia de Confiabilidade no Estudo da Disponibilidade de Sistemas de Teleproteção

A engenharia de confiabilidade é uma metodologia que é aplicada para conhecer a performance de vida de sistemas, equipamentos ou processos, de forma a assegurar que estes executem suas funções sem falhar durante um período de tempo e condições específicas, podendo ter duas abordagens distintas: qualitativa, onde considera-se os modos de falha e suas consequências para o sistema – abordagem utilizada no MCC (manutenção centrada em confiabilidade) ou quantitativa, pela medição de número de falhas e tempo de parada do sistema, associados à falhas e/ou a manutenções corretivas ou preventivas. Trata-se de um estudo estatístico, no qual o sistema é modelado por uma distribuição de falha que o caracterize. Em ambas as abordagens, o sistema é descrito por meio de diagramas em blocos representando equipamentos, módulos, componentes, subsistemas, etc. e a cada bloco é atribuindo um grau de confiabilidade.

Os sistemas de teleproteção e comunicação são compostos, de forma predominante, por equipamentos eletrônicos. Como estes equipamentos falham aleatoriamente, a distribuição de falha exponencial é a que melhor os representa, e é dada por:

$$f(t) = \lambda \cdot e^{(-\lambda t)} \quad (3)$$

onde λ = MTBF (*Mean Time Between Failures* – Tempo Médio entre Falhas). Da mesma forma, pode-se modelar a manutenibilidade “M” dos sistemas estudados, caracterizada pelo MTTR (*Mean Time to Repair* – Tempo Médio para Reparo), também através de uma distribuição exponencial, dada por:

$$M(t) = 1 - e^{(-\mu t)} \quad (4)$$

onde μ = taxa de reparo = $\frac{1}{MTTR}$.

Na tabela 4 são apresentados os valores de MTBF e MTTR estimados para cada sistema.

	MTBF		MTTR
	Anos	Horas	Horas
Teleproteção Digital	28,84	252655	8
SDH	32,41	283928	8

Tabela 4: Valores estimados de MTBF e MTTR para os equipamentos/sistemas associados aos esquemas de teleproteção do sistema de Furnas, baseados em informações oficiais dos fabricantes.

Sobre os parâmetros apresentados, vale ressaltar que o tempo entre falhas e tempo de reparo de cada bloco representa um sistema, com um conjunto de equipamentos ou componentes, calculado através do MTBF dos módulos que compõem cada equipamento/sistema, fornecido pelos respectivos fabricantes. Os diagramas em bloco utilizados para o cálculo do MTBF dos equipamentos de teleproteção e SDH são ilustrados na figura 2.

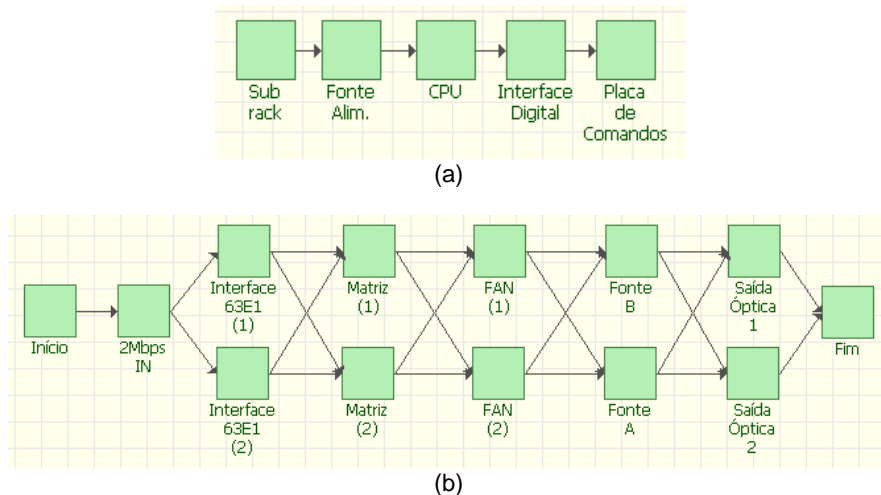


Figura 2: Diagrama em blocos utilizado para cálculo do MTBF e MTTR dos equipamentos (a) de Teleproteção e (b) SDH.

Foram simulados quatro cenários:

- Cenário 1: Uma via de teleproteção com um único equipamento;
- Cenário 2: Uma via de teleproteção com dois equipamentos em paralelo;
- Cenário 3: Duas vias de teleproteção com um único equipamento em cada via;
- Cenário 4: Duas vias de teleproteção com dois equipamentos em paralelo, para cada via;

Os cenários 1 e 2 são aplicáveis em linhas de transmissão com tensão inferior à 345kV e os cenários 3 e 4, em linhas com tensão igual ou superior à 345kV, onde exige-se duas vias de teleproteção trafegando por meios de comunicação distintos.

A figura 3 ilustra um dos diagramas em bloco utilizados para as simulações numéricas no software de confiabilidade, representando um sistema de teleproteção com duas vias independentes (primária e alternada), cada uma com dois equipamentos de teleproteção digital (canais).

Os valores de disponibilidade média e confiabilidade encontrados na simulação numérica dos quatro cenários propostos são mostrados na tabela 5, considerando um período de operação do sistema de 20 anos.

Vale ressaltar a diferença conceitual entre os valores de confiabilidade apresentados na tabela 5 e nas tabelas 1, 2 e 3. Conforme já comentado, nas tabelas 1 a 3, o termo confiabilidade (do inglês *dependability*) indica a probabilidade de um equipamento de teleproteção não receber um comando real quando este for transmitido pelo equipamento remoto. Já na tabela 5, o termo confiabilidade (do inglês *reliability*) indica a probabilidade de que a função teleproteção fique indisponível ao menos uma vez no período de tempo de operação estabelecido (20 anos).

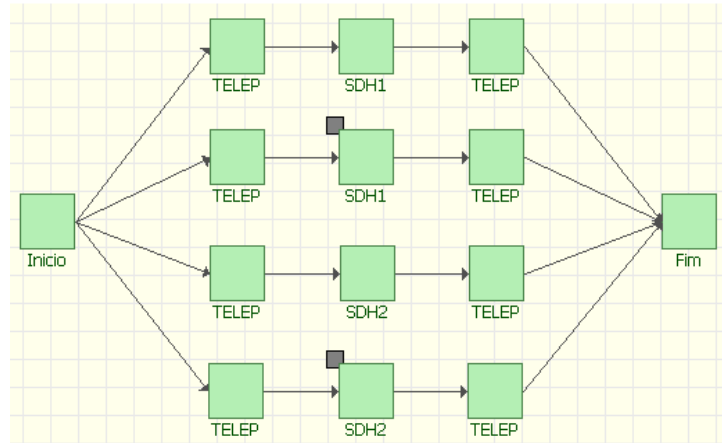


Figura 3: Diagrama em blocos utilizado na simulação de um sistema de teleproteção de duas vias (principal e alternada) com dois equipamentos de teleproteção digital em cada via.

Cenário	Quantidade de Vias	Quantidade de Equipamentos por Via	Disponibilidade Média (%)	Confiabilidade (%)
1	1	1	99,9908	13,21
2		2	99,9971	53,82
3	2	1	99,9999	99,96
4		2	99,9999	99,99

Tabela 5: Valores de disponibilidade média e confiabilidade para as quatro topologias de teleproteção propostas, obtidos através de simulação numérica, para um período de operação de 20 anos.

A análise dos resultados de disponibilidade média constantes na tabela 5 mostra que é possível atingir níveis elevados de disponibilidade em todas as topologias avaliadas.

Embora o cenário 1 tenha apresentado um baixo índice de confiabilidade, esta topologia pode ser utilizada na prática, dependendo da aplicação, lembrando que em geral, para linhas de transmissão de tensão inferior à 345kV, existe um único relé de proteção, que também possui seus índices de confiabilidade e disponibilidade. Ou seja, dependendo da aplicação, não existe ganho relevante de confiabilidade na função proteção se existir redundância de equipamentos apenas no sistema de teleproteção.

Analisando os cenários 3 e 4, percebe-se que as diferenças de desempenho de um sistema com um ou dois equipamentos de teleproteção são desprezíveis. Quando existem duas vias distintas, caso das linhas de transmissão com tensão igual ou superior à 345kV, é tecnicamente eficaz a utilização de um único equipamento de teleproteção digital.

Desta forma, com uma política de sobressalentes e uma infra-estrutura adequada (redundância de meios de transmissão, sistemas de alimentação, etc.) é possível reduzir pela metade a aquisição de equipamentos de teleproteção, gerando ainda economia significativa de espaço em bastidores e canaletas, economia de canalização nos sistemas de telecomunicações e ainda simplificação dos projetos e instalações.

5. CONCLUSÃO:

O estudo realizado comparou o desempenho de diferentes topologias de teleproteção, utilizando equipamentos digitais, avaliando a disponibilidade, segurança e confiabilidade destes esquemas sob a ótica da engenharia de confiabilidade, considerando os requisitos mínimos exigidos nas normas brasileiras e internacionais vigentes e ainda as especificidades de cada tecnologia, com o objetivo de otimizar custos de projeto, implantação, operação e manutenção de sistemas de teleproteção de linhas de transmissão e equipamentos associados.

Foram analisadas as documentações técnicas de equipamentos de teleproteção dos dois principais fornecedores de Furnas. Foram realizadas, ainda, simulações de quatro topologias práticas utilizando software específico de análise de confiabilidade e disponibilidade.

Concluiu-se, com estes estudos, que o projeto de esquemas de teleproteção deve ser baseado no tipo de tecnologia de transmissão (interface) aplicada – analógica ou digital, considerando objetivos específicos de disponibilidade, segurança e confiabilidade a serem atendidos. Quando o foco é a segurança, os documentos analisados mostram que o desempenho de um equipamento de teleproteção utilizando interfaces digitais pode ser milhares de vezes superior, tanto quanto ao exigido na norma IEC 60834-1 quanto ao desempenho de uma interface analógica de geração anterior. Quanto à disponibilidade mostra-se que, com a utilização de um equipamento de teleproteção por via, dependendo do tipo de tecnologia envolvida, é possível atingir níveis elevados de disponibilidade. Com esta topologia, por exemplo, é possível superar os requisitos mínimos descritos para os serviços de mais alta classe – a Classe A, definidos nos procedimentos de rede do ONS para canais de telecomunicações de alta criticidade, utilizados em supervisão e controle, cuja disponibilidade mínima exigida é de 99,98%.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] S. Ward, T. Dahlin, W. Higinbotham, "Improving Reliability for Power System Protection", 58th Annual Protective Relay Conference, Atlanta, USA, 2004;
- [2] Procedimentos de Rede do ONS, sub-módulo 2.6, revisão 2, 2011;
- [3] E. O. Schweitzer, D. Whitehead, H. Ferrer, D. A. Tziouvaras, D. A. Costello, D. S. Escobedo, "Line Protection: Redundancy, Reliability and Affordability", Schweitzer Engineering Laboratories, 2010.
- [4] S. Ward, T. Dahlin, B. Ince, "Pilot Protection Communication Channel Requirements", 2007.
- [5] D. Kececioglu, "Reliability Engineering Handbook", vol. 1 and 2, DEStech Publications, Lancaster, USA, 2002.
- [6] D. J. Smith, "Reliability, Maintainability and Risk", Butterworth-Heinemann, 2001.

7. DADOS BIOGRÁFICOS

Carlos Henrique da Silva Certório, nasceu em Macaé, Rio de Janeiro em 24 de julho de 1981. Graduado em Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica e Sistemas de Energia Elétrica na PUC-Rio e Mestre em Sistemas de Comunicações Ópticas na UERJ. Trabalha em Furnas no Departamento de Equipamentos Eletroeletrônicos desde 2005, atuando na engenharia de manutenção de fibras ópticas e sistemas OPLAT e teleproteção.