



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

FI/GPC/03
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO – V

**GRUPO DE ESTUDO DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO, CONTROLE E AUTOMAÇÃO EM SISTEMAS DE POTÊNCIA -
GPC**

NOVA SISTEMÁTICA DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA PARA OS RELÉS DE TECNOLOGIA DIGITAL

**Maurício Silveira Ulysséa
ELETROSUL**

**Henio de Oliveira Bez
ELETROSUL**

1.0 - RESUMO

O objetivo deste trabalho é auxiliar as engenharias de manutenção na definição de novos procedimentos de manutenção preventiva para relés de proteção digital, visando de forma segura e confiável, o máximo de disponibilidade do sistema elétrico e minimizar os custos de manutenção. Este documento apresenta índices estatísticos da manutenção de proteção e controle de Subestações, tendo como base os dados fornecidos pelas áreas executivas de manutenção ao Sistema de Gerenciamento de Serviços - SGS, do Banco de Dados de Equipamentos – BDE da Eletrosul. São analisados índices de desempenho dos equipamentos de tecnologia digital, provenientes do banco de dados do grupo da Eletrobrás (Sistema de Informações da Manutenção da Proteção - Simpweb) e utilizados modelos de confiabilidade para auxiliar na definição da periodicidade das manutenções preventivas dos relés de proteção de tecnologia digital.

2.0 - PALAVRAS-CHAVE

Confiabilidade, Periodicidade, Manutenção Preventiva, Proteção Digital, Disponibilidade

3.0 - INTRODUÇÃO

Este informe técnico visa propiciar dados para as engenharias de manutenção através dos estudos do desempenho dos equipamentos de proteção e controle digitais, visando auxiliar na definição dos novos procedimentos de manutenção preventiva dos sistemas de proteção.

4.0 - O PAPEL DA MANUTENÇÃO

Quando se fala de manutenção de equipamentos de sistemas de potência, verifica-se que ainda não é possível desenvolver uma política única a ser aplicada a grande maioria dos equipamentos, pela sua diversidade, tecnologias e fabricantes.

A principal dificuldade relativa aos métodos de manutenção encontra-se em determinar os novos procedimentos de manutenção e qual a sua frequência. Um dos grandes desafios para engenheiros e pesquisadores é elaborar um modelo matemático fiel, que represente o funcionamento dos equipamentos elétricos e os procedimentos de manutenção adequados. De um modo geral, as políticas de manutenção atuais estão baseadas em custos, experiências e dados estatísticos.

5.0 - ANÁLISE DO DESEMPENHO DA MANUTENÇÃO

Para auxiliar na análise do desempenho da manutenção foram utilizados dados do Banco de Dados de Equipamentos – BDE da Eletrosul, Sistema de Informações da Manutenção da Proteção – Simpweb e modelos de confiabilidade descritos a seguir.

5.1.1 - Análise do desempenho da manutenção – Banco de Dados de Equipamentos - BDE

A primeira análise estatística foi a partir do tratamento dos Pedidos de Serviço registrados no Banco de Dados de Equipamentos – BDE , onde foi verificado:

- Homens-horas gastos para a realização destes Pedidos de Serviços, nas manutenções preventivas periódicas dos equipamentos de proteção e controle;
- Situação e análise das anormalidades dos Pedidos de Serviços programados e realizados nas manutenções preventivas periódicas e aperiódicas dos relés de proteção no ano base 2013 e também no período compreendido entre os anos 2000 a 2013;

5.1.2 - Evolução anual da quantidade de Pedidos de Serviços e Homens-Horas gastos nas manutenções preventivas periódicas

Este item apresenta a evolução da média da quantidade de homens-hora gastos nos Pedidos de Serviços realizados para os relés de proteção no período compreendido entre os anos 2000 a 2013. No gráfico 1 observa-se que este índice aumentou gradativamente, principalmente nos últimos anos do período analisado.



Gráfico 1 – Evolução anual dos homens-horas gastos por Pedido de Serviço nas manutenções preventivas periódicas

5.1.3 - Evolução do percentual de anormalidades encontradas nos Pedidos de Serviços em todas as tecnologias

Este item apresenta a quantidade e o percentual de anormalidades encontradas nos Pedidos de Serviços realizados nos relés de proteção no período compreendido entre os anos 2000 a 2013. O percentual de anormalidades anual foi calculado a partir da relação entre o número de anormalidades encontradas no ano vigente pelo número de Pedidos de Serviços realizados pelas equipes de manutenção. No gráfico 2 observa-se que este índice aumentou gradativamente no período analisado.

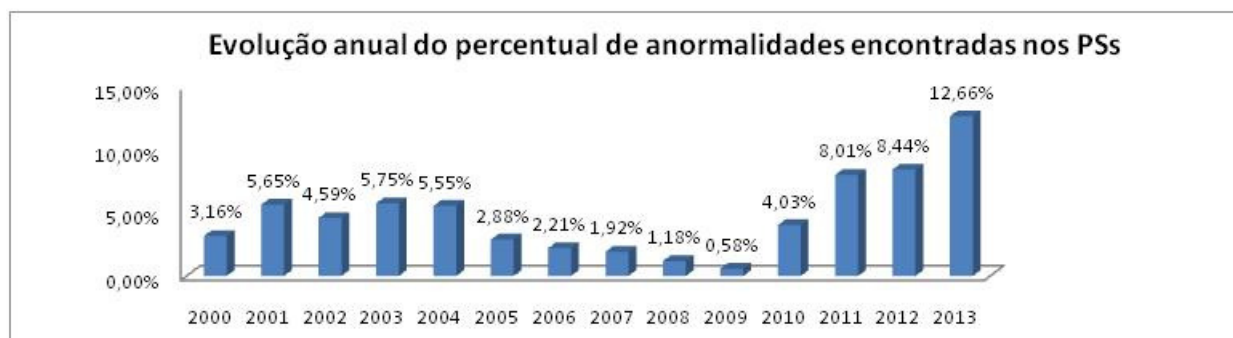


Gráfico 2 – Evolução anual das anormalidades encontradas nos Pedidos de Serviços – Total: 1104 anormalidades

Observa-se que a taxa de incidências anual de anormalidades encontradas nos Pedidos de Serviços cresceu gradativamente a partir de 2010. Neste diagnóstico também, observou-se que o preenchimento das anormalidades encontradas nos Pedidos de Serviços Periódicos para os relés de proteção é muito baixo, em torno de 4,17% no período compreendido de 2000 à 2013, isto é, de 1104 anormalidades detectadas apenas 46 anormalidades foram provenientes dos serviços periódicos e 0% no ano base 2013, isto é, nenhuma anormalidade foi detectada nos serviços periódicos no ano de 2013. O gráfico a seguir observa-se o que fora dito anteriormente.

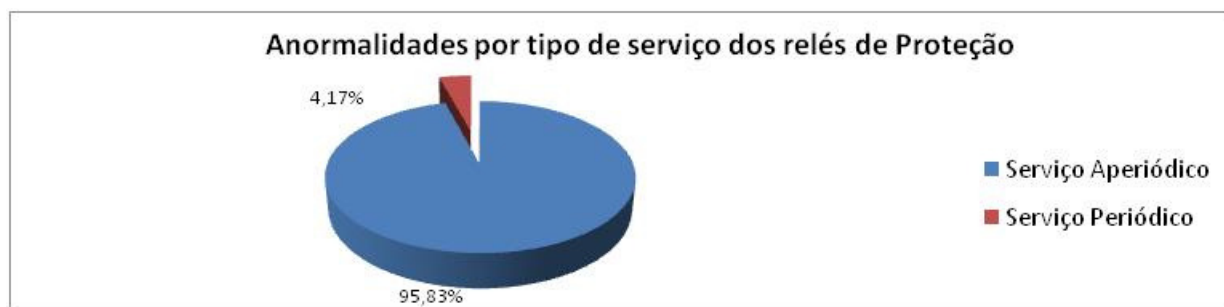


Gráfico 3 – Distribuição percentual das anormalidades encontradas nos Pedidos de Serviços nos relés de proteção por tipo de serviço – Total: 1104 anormalidades

3.1.2 - Anormalidades encontradas nos Pedidos de Serviços para a tecnologia digital

Este item apresenta a quantidade de anormalidades encontradas por tipo de serviço nos Pedidos de Serviços dos relés de proteção digital no período de 2000 a 2013. O gráfico abaixo visualiza estas anormalidades por tipo de serviço.



Gráfico 4 – Distribuição percentual das anormalidades encontradas nos Pedidos de Serviços da tecnologia digital por tipo de serviço – Total: 695 anormalidades

Observa-se graficamente para os relés de tecnologia digital que a taxa de anormalidades encontradas nos pedidos de serviços periódicos é baixa (0,58%) se comparada a taxa de anormalidades encontradas nos pedidos de serviços aperiódicos (99,42%). A tabela a seguir apresenta a taxa de incidência de anormalidades encontradas nos Pedidos de Serviços Periódicos dos relés de proteção no período compreendido entre os anos 2000 a 2013.

Tabela 1 – Taxa de incidências de anormalidades encontradas nos Pedidos de Serviços Periódicos

Grupo RE	Anormalidades (PSP)	Pedidos de Serviços Periódicos Executados	Taxa de incidência de anormalidades nos Pedidos de Serviços Periódicos
Tecnologia Fabricação			
Digital	4	1223	0,33%
Eletromecanico	41	11617	0,35%
Estatico	0	2957	0,00%
Semi-estatico	1	1766	0,06%
Total	46	17563	0,26%

5.2 - Análise do desempenho da manutenção – Banco de dados do Simpweb

A segunda análise estatística foi feita a partir do tratamento dos dados coletados no banco de dados de falhas de relés digitais (Sistema de Informações da Manutenção da Proteção - Simpweb) do grupo Eletrobrás.

Na Eletrosul a Engenharia de Manutenção de Proteção e Controle é responsável pela inclusão dos dados neste aplicativo.

5.2.1 - Análise das falhas dos relés digitais por fabricante

O gráfico a seguir apresenta uma síntese das falhas ocorridas nos relés digitais de proteção e controle instalados na Eletrosul, considerando o total de falhas por fabricante no período compreendido entre 2011 a 2013.

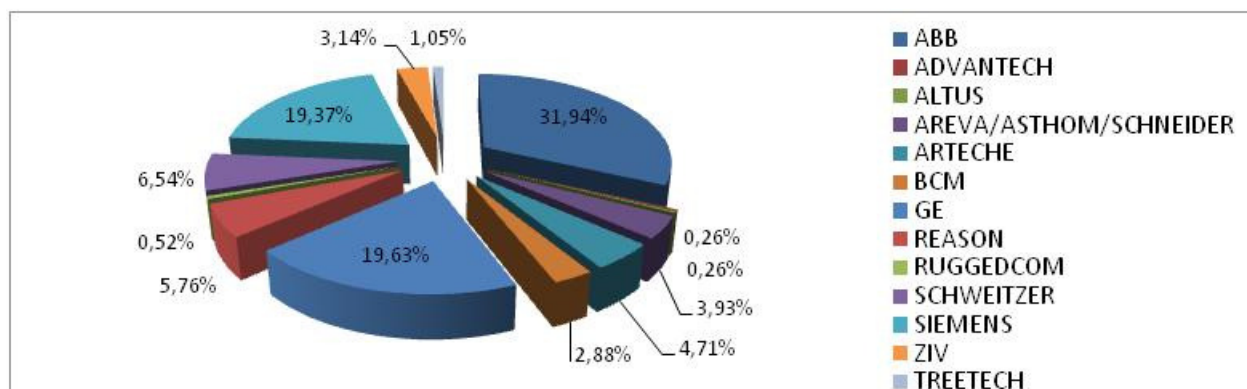


Gráfico 5 – Distribuição percentual das anormalidades encontradas por fabricante nos relés digitais

3.2.2 - Taxa de falhas dos relés de tecnologia digital

A tabela a seguir visualiza a taxa de falhas calculadas para os relés de tecnologia digital por fabricante no período compreendido entre os dias 01/01/2011 a 31/12/2013. A taxa de falhas é calculada em função da amostra total de relés em operação no período.

Tabela 2 – Taxas de falhas dos relés digitais por fabricante e totalidade

FABRICANTE	TOTAL DE FALHAS	TOTAL DE RELÉS	TAXA DE FALHAS
ABB	122	358	34,08%
ADVANTECH	1	28	3,57%
ALTUS	1	15	6,67%
AREVA/ASTHOM/SCHNEIDER	15	149	10,07%
ARTECHE	18	139	12,95%
BCM	11	49	22,45%
GE	75	202	37,13%
REASON	22	127	17,32%
RUGGEDCOM	2	151	1,32%
SCHWEITZER	25	400	6,25%
SIEMENS	74	563	13,14%
ZIV	12	153	7,84%
TREE TECH	4	134	2,99%
TOTAL	382	2468	15,48%

5.3 – Aplicação dos Modelos de Confiabilidade

A terceira análise é através da aplicação de modelos de confiabilidade. Foram desenvolvidos dois modelos de confiabilidade que poderão ser utilizados para determinar as periodicidades de quaisquer tecnologias de relés (eletromecânicos, semi-estáticos, estáticos e digitais). O primeiro modelo foi desenvolvido através das equações do ANDERS (1990) e o segundo modelo de confiabilidade foi desenvolvido através das equações matemáticas apresentadas por ZIEGLER (1999, p. 304-305).

3.3.1 – Modelo 1 (Modelo de ANDERS)

O modelo matemático para a determinação do intervalo ótimo de inspeção, foi desenvolvido a partir da consideração de que o relé de proteção se encontra em “standby”, cuja principal finalidade leva em consideração a maximização da disponibilidade. Em uma manutenção preventiva de um relé de proteção, as falhas podem ser descobertas e corrigidas e, após a execução da mesma o relé é classificado como “bom” ou “falhado”. Na maior parte dos modelos de inspeções adotados por ANDERS (1990, p. 425), assume-se que toda a falha será detectada pela inspeção, isto é a taxa de detecção de falhas pela rotina de manutenção é igual a 1.

As principais definições e hipóteses para a aplicação deste modelo serão as seguintes:

- a) $f(T_i)$ é a função densidade do tempo para a falha do relé de proteção.
- b) $R(T_i)$ é a função confiabilidade dos grupos/modelos de relé de proteção.
- c) As falhas dos grupos/modelos relés de proteção podem ser descritas a partir do modelo probabilístico exponencial para análise de tempo de falha, modelo este que utiliza a distribuição exponencial. Para este modelo tem-se $f(T_i) = \lambda e^{-\lambda T_i}$ e $R(T_i) = e^{-\lambda T_i}$, onde λ é a taxa de falha e T_i é o tempo entre as manutenções preventivas do grupo/modelo de relé de proteção.
- d) A duração média dos tempos de reparo (T_r), pode ser desprezada, tendo em vista que os mesmos são bem menores do que os intervalos médios entre as manutenções preventivas.
- e) β é a probabilidade de erro humano da rotina de manutenção. Esta é a probabilidade de que a falha do relé não será descoberta em uma inspeção, sendo equivalente a $(1-\gamma)$, onde γ é a taxa de detecção de falhas pela rotina de manutenção.
- f) T_f é o tempo decorrido entre o aparecimento da falha no relé de proteção e sua detecção (falha oculta).
- g) A taxa de detecção de falhas pelo automonitoramento do relé de proteção (α), não foi considerada neste modelo.

Cálculo da Indisponibilidade dos grupos/modelos de relés

Dado que A (disponibilidade):

$$A(T_i)_R = \frac{\int_{-\infty}^{T_i} R(T_i) dT_i (1-\beta)}{(T_i + T_r)[1-\beta R(T_i)] + (1-\beta) T_f [1-R(T_i)]} \quad (1)$$

Assumindo-se distribuição exponencial, onde $f(T_i) = \lambda e^{-\lambda T_i}$ e $R(T_i) = e^{-\lambda T_i}$,

Logo:

$$A(T_i)_R = \frac{(1-e^{-\lambda T_i})(1-\beta)}{\lambda \{ (T_i + T_r)[1-\beta e^{-\lambda T_i}] + [1-\beta] T_f [1-e^{-\lambda T_i}] \}} \quad (2)$$

Considerando $T_r = 0$ resulta:

$$A(T_i)_R = \frac{(1-e^{-\lambda T_i})(1-\beta)}{\lambda \{ T_i [1-\beta e^{-\lambda T_i}] + [1-\beta] T_f [1-e^{-\lambda T_i}] \}} \quad (3)$$

MODELO 1 ESTENDIDO: Aplicado para relés com rotina de automonitoramento (relés digitais)

Com a finalidade de aplicar o Modelo 1 a relés que possuem rotinas de automonitoramento, fez-se uma extensão do Modelo 1, de modo a incluir o parâmetro α na equação de indisponibilidade dos relés de proteção (para $\beta = 0$

e $T_f = \frac{1}{2} T_i$).

$$I(T_i)_R = 1 - \frac{1 - e^{-(1-\alpha)\lambda T_i}}{(1-\alpha)\lambda \left[T_i + \frac{T_i}{2} (1 - e^{-(1-\alpha)\lambda T_i}) \right]} \quad (4)$$

3.3.2 – Modelo 2 (Modelo de ZIEGLER)

As suposições do Modelo 2 são idênticas a do Modelo 1, diferenciando-se:

- a) O intervalo de inspeções periódicas (T), será considerado o tempo necessário entre as manutenções preventivas para maximizar a disponibilidade dos equipamentos.
- b) N é o número de manutenções preventivas já efetuadas nos grupos/modelos de relés desde a sua entrada em operação.

ZIEGLER (1999, p. 305) salienta que as equações de indisponibilidade dos grupos/modelos de relés podem ser determinadas, levando em consideração alguns parâmetros importantes tais como: rotinas de manutenção e de automonitoramento. São quatro as equações desenvolvidas por ZIEGLER

- 1) Sem rotina de automonitoramento e sem rotina de manutenção

$$I(Ti)_R = 1 - e^{-\lambda Ti} \quad (5)$$

2) Sem rotina de automonitoramento e com rotina de manutenção

$$I(Ti)_R = 1 - e^{-\lambda(1-\gamma)Ti} \cdot e^{-\lambda\gamma(Ti-NT)} \quad (6)$$

3) Com rotina de automonitoramento e sem rotina de manutenção

$$I(Ti)_R = 1 - e^{-\lambda(1-\alpha)Ti} \quad (7)$$

4) Com rotina de automonitoramento e com rotina de manutenção

$$I(Ti)_R = 1 - e^{-\lambda Ti(1-\alpha)(1-\gamma)} \cdot e^{-\lambda(1-\alpha)\gamma(Ti-NT)} \quad (8)$$

Cálculo da probabilidade de falha do equipamento protegido

Assumindo a distribuição exponencial, calcula-se esta probabilidade, tomando como base o tempo correspondente à indisponibilidade dos grupos/modelos de relés considerado no período analisado, a partir das seguintes equações:

$$R(Ti)_{EQ} = e^{-\lambda_{EQ} Ti_{EQ}} \quad (9)$$

$$F(Ti)_{EQ} = 1 - R(Ti)_{EQ} \quad (10)$$

onde:

R(Ti) EQ – confiabilidade do equipamento protegido;

F(Ti) EQ – probabilidade de falha do equipamento protegido;

Ti EQ – tempo de indisponibilidade dos grupos/modelos de relés considerados no intervalo analisado;

λ EQ – taxa de falha do equipamento protegido.

O tempo de indisponibilidade dos grupos/modelos de relés no intervalo analisado (TiEQ) é calculado a partir da seguinte equação:

$$Ti_{EQ} = I(Ti)_R \cdot Ti \quad (11)$$

As estimativas para F(Ti)EQ foram obtidas a partir das taxas de falha do equipamento protegido (Linha de Transmissão).

Cálculo da probabilidade de falha múltipla

A falha múltipla corresponde à falha operacional por recusa ou a atuação incorreta do relé de proteção. A probabilidade da ocorrência de falha múltipla no intervalo a ser analisado, será calculada a partir da seguinte equação:

$$PFM = I(Ti)_R \cdot F(Ti)_{EQ} \quad (12)$$

Taxa de falha dos equipamentos protegidos

Estas taxas de falhas das linhas de transmissão da ELETROSUL são obtidas dos relatórios retirados emitidos pelo Departamento de Operação de Sistemas da ELETROSUL.

Falha múltipla dos relés de proteção

A falha múltipla corresponde à falha do relé na presença de uma demanda operacional (sub-alcance ou sobre-alcance). A tabela a seguir apresenta os limites considerados aceitáveis, conforme os critérios do ONS – Operador Nacional do Sistema – para o comportamento dos relés de proteção.

Tabela 3: Critérios adotados pelo ONS para as atuações dos relés de proteção

ATUAÇÕES	CRITÉRIOS
Corretas	Superior a 90% das solicitações
Incorretas	Inferior a 3,5% das solicitações
Recusa	Inferior a 2,5% das solicitações
Acidentais (Intempestivas)	Inferior a 0,1 atuação acidental por relé de proteção/ano, isto é, 1 atuação em 10 anos de operação do relé de proteção

HIPÓTESE: “Taxa de falha estimada a partir do intervalo médio entre as falhas dos relés (MTBF)”

Para esta suposição, considera-se que a taxa de falha é obtida a partir do MTBF (tempo médio entre falhas – “mean time between failures”). Esta taxa é definida pelos Catálogos de Fabricantes dos relés de proteção. A Tabela 4 apresenta o MTBF e a taxa de falha para o modelo de relé digital SEL-321 da SCHWEITZER.

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\mu} = MTTF + MTTR$$

onde: MTTF - Tempo médio até a falha

MTTR - Tempo médio de reparo

Considerando $MTTR \ll MTTF$

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (13)$$

Tabela 4: Tempo médio entre falhas e a taxa de falha do relé digital

MODELO DE RELÉ	MTBF (ANOS)	TAXA DE FALHA (λ)
SEL-321	240	0,42%

Com estas taxas de falhas e com as equações 4, 10 e 12 para o Modelo 1 e 8, 10 e 12 para o Modelo 2, determina-se a periodicidade entre as manutenções preventivas para um risco assumido de 3%.

Tabela 5: Periodicidade encontrada aplicando os modelos de confiabilidade para os relés de tecnologia digital

PERIODICIDADE (anos)				
RELÉ	Modelo aplicado	λ MTBF (%)	PER (λ MTBF)	Empregada pela ELETROSUL
SCHWEITZER (SEL-321)	Modelo 1	0,42	133 a 134	Estava em estudo
	Modelo 2		131 a 132	

4.0 - Constatações referente a Análise de Desempenho dos relés de proteção

Em função dos dados encontrados, seguem as constatações deste trabalho:

- ❖ o percentual de anormalidades encontradas nos pedidos de serviços periódicos de 0,58%, para os relés de proteção digital é extremamente baixo. O período compreendido para esta análise é entre os anos 2000 a 2013.
- ❖ O percentual da taxa de falha encontrado para os relés de tecnologia digital foi extremamente alta entre o período compreendido entre as manutenções preventivas periódicas de 15,48%. Estes índices foram calculados após a análise dos dados coletados no Simpweb (período analisado: 2011 à 2013). Estas falhas ocorreram entre as manutenções preventivas dos relés de proteção, certificando que o relé de tecnologia digital tem um comportamento diferenciado em relação aos relés de tecnologia eletromecânica, pois a influência da manutenção preventiva não tem o mesmo efeito desejado. Na tecnologia eletromecânica, após

o reparo mínimo o equipamento retorna para a operação, no estado que ele se encontrava antes da ocorrência da falha.

- ❖ a análise científica apresentada por ULYSSEA em 2002, indicou a mudança de procedimento das rotinas de manutenção para os relés de tecnologia digital (Mestrado: Definição da periodicidade ótima da manutenção preventiva de relés de proteção).

5.0 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

- ❖ A adequação da periodicidade de manutenções preventivas em função das características de confiabilidade, tanto dos dispositivos de proteção (relés), quanto dos equipamentos protegidos (linhas de transmissão), representa um ganho para a ELETROSUL, bem como para outras empresas do setor elétrico, tendo em vista a otimização dos custos de manutenção e das indisponibilidades destes equipamentos;
- ❖ Os modelos de confiabilidade relatados neste relatório são coerentes entre si e bastante flexíveis, apontando para a mesma solução (ULYSSEA, 2002);
- ❖ A introdução de técnicas quantitativas de confiabilidade ao estudo de engenharia de manutenção (através dos modelos desenvolvidos), constituiu-se em um grande passo para o aprimoramento do plano de manutenção das empresas, tendo em vista que a grande maioria das empresas do setor elétrico brasileiro baseia-se em critérios subjetivos para a determinação dos procedimentos e periodicidades entre as manutenções preventivas de seus relés de proteção;
- ❖ Os índices de desempenho da manutenção, aqui apresentados, são oriundos das informações prestadas pelas áreas de manutenção através dos Pedidos de Serviços. Enfatiza-se a importância da emissão e do correto preenchimento dos mesmos, para qualquer tipo de serviço executado pelas equipes de manutenção, permitindo dessa forma, a melhoria da qualidade das informações, propiciando tomadas de decisões mais acertadas.
- ❖ É importante as empresas possuam uma política de sobressalentes adequada para os relés digitais, levando em conta o tempo de resposta para reparos de cada fabricante.
- ❖ A Eletrosul está finalizando as definições dos novos procedimentos de manutenção preventiva e periodicidades adequadas para os relés de proteção e controle digitais.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ULYSSÉA, M. S. – Definição da periodicidade ótima da manutenção preventiva de relés de proteção. Florianópolis 2002. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Elétrica) – UFSC.
- (2) ANDERS, G. J. – Probability Concepts in Electric Power System. A Wiley-Interscience publication, 1990.
- (3) ELETROSUL – Relatórios de Análise Estatística das Proteções das Linhas de Transmissão e outros equipamentos elétricos, DPES/SEPRO, 1991-1999.
- (4) ONS – Relatório de Análise Estatística do Desempenho das Proteções do Sistema Elétrico Brasileiro, referente ao ano de 1998, DPP-GPE 32, 2000.
- (5) ZIEGLER, G. – Numerical Distance Protection – Principles and Applications. SIEMENS – Erlangen: Publics_MCD-Verl., 1999.

6.0 – DADOS BIBLIOGRÁFICOS

- Nome: Maurício Silveira Ulysséa
- Local e ano de nascimento: Florianópolis/SC – 1965
- Experiência profissional:
Superior: Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

Mestrado: Mestre em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC,
Dissertação: “Definição da periodicidade ótima da manutenção preventiva de relés de proteção”.
Área de atuação: Engenharia de manutenção de proteção e controle da Eletrosul.

- Nome: Henio de Oliveira Bez
- Local e ano de nascimento: Gravatal/SC – 1957
- Experiência profissional:
Formação: Curso Técnico de Eletrotécnica na Escola Técnica Federal de Santa Catarina – IFSC.
Área de atuação: Técnico de engenharia de manutenção de proteção e controle da Eletrosul.