

## COMPARAÇÃO ESTATÍSTICA E AVALIAÇÃO DOS ESQUEMAS DE PROTEÇÃO PILOTO

**Edmund O. Schweitzer, III**

**John J. Kumm**

Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.  
Pullman, WA, USA

### INTRODUÇÃO

Esquemas de proteção piloto agilizam a liberação de faltas. Foi desenvolvida uma variedade de esquemas para atender às necessidades de confiabilidade, segurança, custo e outros fatores. Por exemplo, esquemas de bloqueio desligam rapidamente para faltas dentro da seção, ao risco de operação errônea no caso de faltas externas se o canal falhar. Os esquemas permissivos compensam o risco de sobredisparo com o risco de desligamento retardado para uma falta interna.

Nós quantificamos a probabilidade de operações errôneas (sobredisparo, desligamento retardado), cobertura da resistência da falta, tempos de operação e complexidade dos diversos esquemas de proteção populares. Propomos um novo esquema, que proporciona operação mais rápida, melhor cobertura da resistência da falta e minimiza os riscos das operações irregulares.

### MEDIDAS DE DESEMPENHO DO ESQUEMA

Selecionamos a segurança, confiabilidade, tempo de operação, cobertura de resistência da falta e complexidade como cinco fatores-chave na comparação de esquemas de proteção piloto.

#### Segurança

A segurança mede a capacidade de um sistema de operar somente para as faltas pretendidas. Nós desenvolvemos modelos de Markov para estimar a falta de segurança como uma probabilidade de operar para faltas fora da seção.

#### Confiabilidade

A confiabilidade é a confiança de que o esquema responde a todas as faltas internas. O mesmo modelo de Markov nos ajuda a estimar a falta de confiabilidade como uma probabilidade de um esquema piloto falhar em operar para faltas dentro da seção.

#### Tempo de operação

Uma falta não é liberada até que a proteção em ambos os extremos da linha tenha operado satisfatoriamente. Nossa medida do tempo de operação é a partir do início da falta até que ambas as extremidades liberem.

### **Cobertura da resistência da falta**

A cobertura da resistência da falta é uma medida de sensibilidade. Nós supomos que são usados elementos de sobrecorrente direcionais, com um ajuste de imantação de 0,5 A. Supomos também que essa configuração (não o elemento direcional) governa a sensibilidade do elemento.

### **Valores de mérito**

Desenvolvemos dois valores de mérito para os esquemas piloto. O primeiro é a soma de operações irregulares previstas por ano resultando em sobredisparo (perda de segurança) e resultando em desligamento retardado (perda de confiabilidade). Uma soma simples iguala os fatores de custo para um sobredisparo e um desligamento com tempo de retardo. Outras ponderações poderiam ser usadas. Somas menores indicam esquemas mais confiáveis.

O segundo valor de mérito é o tempo de liberação médio dividido pelo total da cobertura de resistência da falta. Esquemas mais rápidos e mais sensíveis possuem valores de mérito mais baixos (melhores).

### **Complexidade**

Complexidade do esquema é uma medida das zonas, temporizadores e lógica adicional exigida para implementar a proteção. Esquemas mais complexos podem ser mais caros ou difíceis de implementar.

## **SEGURANÇA E CONFIABILIDADE**

Os esquemas antigos auxiliados pelas comunicações usavam canais de qualidade questionável. Uma importante consideração no projeto de um esquema piloto era o efeito da falha de um canal sobre o esquema. Esquemas de bloqueio arriscavam o sobredisparo por falhas fora da seção que ocorressem enquanto o canal estava fora do ar. Esquemas de disparo transferido apresentavam segurança mais elevada, porém confiabilidade mais baixa – as faltas dentro da seção teria de ser liberadas com retardo caso o canal estivesse fora do ar.

Canais de comunicação modernos apresentam confiabilidade mais alta devido a aperfeiçoamentos nas diretrizes do equipamento e aplicação. Mesmo assim, a segurança e a confiabilidade do esquema de comunicação permanecem como fatores importantes.

Para quantificar a segurança e confiabilidade de três tipos populares de esquemas de comunicações, desenvolvemos modelos de probabilidade de Markov para cada um. Esses modelos produzem probabilidades que nós usamos para determinar o tempo previsto para um sobredisparo ou disparo com retardo. Os modelos de Markov são mostrados no Anexo B.

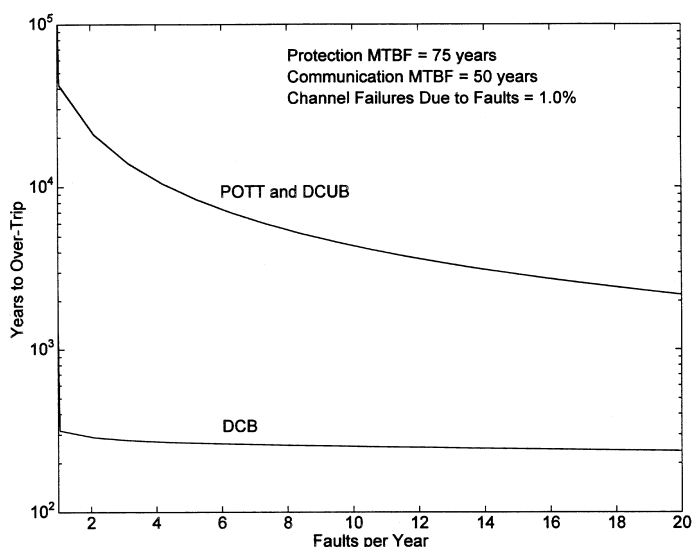
Figura 1 mostra o número de anos previsto para um sobredisparo para esquemas de comunicação de Transferência de Disparo com Sobre-alcance Permissivo (POTT), Desbloqueio de comparação Direcional (DCUB) e Bloqueio de Comparação Direcional (DCB) para linhas que experimentam números variáveis de faltas por ano.

Figura 2 mostra o número de anos previsto para um disparo com retardo para cada um dos esquemas.

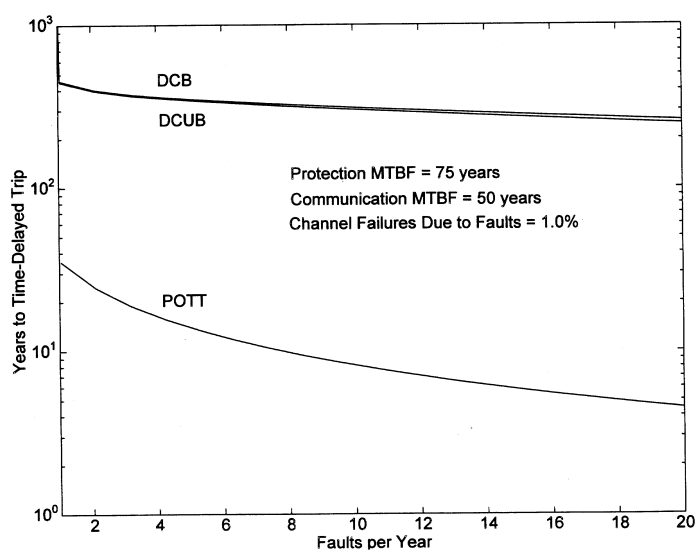
Tabela 1 relaciona os valores de desempenho de esquema de proteção usados nos modelos de Markov.

**Tabela 1 – Variáveis do Modelo de Markov**

Variável	Valor usado	Descrição
MTBF	75 anos	Tempo Médio entre Falhas da Proteção (2 relés, MTBF de 150 anos cada)
ST	0,80	Eficácia de auto-teste do relé
MTBFc	50 anos	MTBF do equipamento do canal
Fcf	1,0% ou 0,1%	Falhas de canais adicionais devido a Faltas
MTRT	2 horas	Tempo médio Para Teste do Relé
MTTR	4 horas	Tempo Médio para Reparo do ele ou Equipamento do Canal
MTT79	35 ciclos	Intervalo Aberto de Religamento Mais Longo, mais Tempo do Disjuntor
MTTc	5 ciclos	Tempo de Liberação da Falta Auxiliado pelas Comunicações
Z2D	24 ciclos	Tempo de Liberação da Falta Zona 2
Z1D	3,5 ciclos	Tempo de Liberação da Falta Zona 1
kz	0,01%	Porcentagem de Faltas Externas que Causam Operação Irregular do Canal de Comunicação

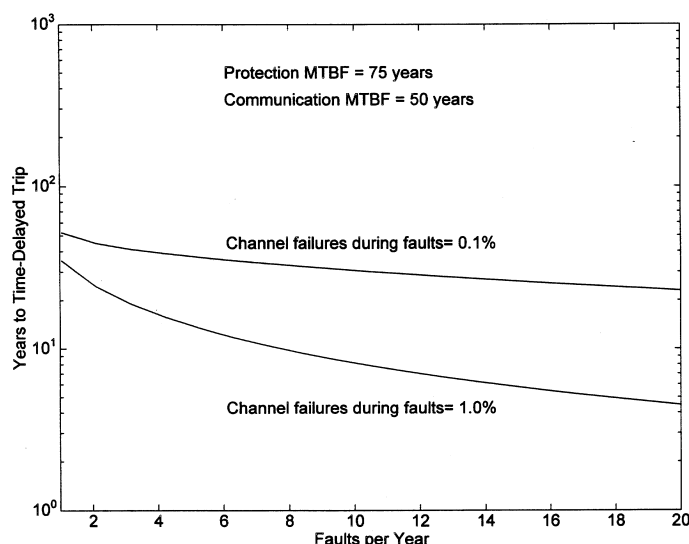


**Figura 1: Anos para um Sobredisparo para Esquemas de Proteção POTT, DCUB e DCB**



**Figura 2: Anos para um Disparo Retardado para Esquemas de Proteção POTT, DCUB e DCB**

O roteamento do canal de comunicações pode ter um impacto sobre esses valores. Por exemplo, em um esquema de transferência de disparo, há uma probabilidade maior de um disparo retardado devido à falha em receber permissão se o canal está na faixa de domínio da linha. Figura 3 compara dois canais de desligamento permissivo. Um tem 1% de chance de ser interrompido por uma falta dentro da seção e o outro tem 0,1% de chance. Esses valores supõem que a probabilidade de uma falha de canal para um canal na área de domínio defeituoso é dez vezes maior que a de um canal em um trajeto diferente.



**Figura 3: Anos para um Disparo Retardado para Esquemas POTT com 1% e 0,1% de Chance de Interrupção devido a uma Falta na Seção**

O melhor modo de usar esses valores é no âmbito geral do sistema. Suponha que um sistema de potência consista de 100 linhas, todas protegidas pela unidade usando esquemas de proteção POTT, DCUB ou DCB idênticos e que cada linha sobre dez falhas por

ano. Tabela 2 mostra os sobredisparos previstos por ano e disparos retardados por ano, em termos do sistema total, para cada esquema.

**Tabela 2: Segurança e Confiabilidade do Esquema para um Sistema de 100 Linhas sofrendo 1000 Falhas por Ano**

Esquema	Probabilidade de Perda de Canal devido à Falta	Sobredisparos por Ano	Disparos Retardados por Ano	Valor de Mérito de Confiabilidade (Sobredisparos e Disparos Retardados por Ano)
POTt	0,1%	0,022	3,20	3,222
POTT	1,0%	0,022	12,20	12,222
DCB	1,0%	0,380	0,33	0,710
DCUB	1,0%	0,022	0,33	0,352

## VELOCIDADE DE OPERAÇÃO E COBERTURA DE RESISTÊNCIA DA FALTA

### Exemplos de Sistemas

Para avaliar a cobertura de resistência de falta do esquema de proteção, nós consideramos modelos de sistema de linha longa e linha curta, mostrados nas Figuras 4 e 6, respectivamente. Em ambos os casos, consideramos a sensibilidade resistiva apenas para faltas à terra. Para Zona 2, usamos um elemento de sobrecorrente direcional terra sensível, ajustado para operar se corrente residual está acima de 0,5 A secundário. Para Zona 1, usamos um elemento de distância terra quadrilateral, ajustado para cobertura resistiva de 50 ohms num sistema radial. O alcance de 60% da Zona acomoda erros do transformador de instrumentação, que pode ser significativo em altos valores de resistência da falta. As sensibilidades resistivas da Zona 1 e Zona 2 são mostradas para linha longa e linha curta nas Figuras 5 e 7, respectivamente. A cobertura resistiva é mostrada supondo que os disjuntores de ambas as linhas estão fechados.

**Erro! Vínculo não válido.**

### Figura 4: Exemplo de Sistema com Linha Longa

Erro! Vínculo não válido.

Figura 5: Regiões de Cobertura de Falta Resistiva em Linha Longa

Tabela 3: Regiões de Cobertura de Linha Longa

Região 1	37.4 $\Omega$
Região 2	13.7 $\Omega$
Região 3	4.7 $\Omega$
Região 4	25.6 $\Omega$
Região 5	6.6 $\Omega$
<b>Total</b>	<b>88.0 <math>\Omega</math></b>

Tabela 3 relaciona a área, em ohms, de cada região para o sistema de linha longa. Posteriormente, veremos que cada esquema de proteção libera faltas em tempos diferentes para as diversas regiões. A medida de unidade de área para essas regiões é ohms para simplificar as comparações entre linhas longas e curtas. Para determinar a área de cada região, calculamos a área geométrica em ohms (verticalmente) vezes m por unidade da linha (horizontalmente).

Erro! Vínculo não válido.

Figura 6: Exemplo de Sistema com Linha Curta

Erro! Vínculo não válido.

**Figura 7 – Regiões de cobertura de falta resistiva em Linha Curta**

**Tabela 4: Regiões de Cobertura de Linha Curta**

Região 1	13,0 Ω
Região 2	32,0 Ω
Região 3	9,8 Ω
Região 4	17,7 Ω
<b>Total</b>	<b>72,5 Ω</b>

Em todos os casos, supomos os parâmetros adicionais mostrados na Tabela 5.

**Tabela 5: Parâmetros Adicionais do Sistema**

Tempo de Operação do Elemento	1,0 – 1,5 ciclos
Tempo de Liberação do Disjuntor	2,0 ciclos
Retardo de operação do canal	1,0 ciclo
Retardo da Zona 1	20 ciclos

### Valores de Mérito do Sistema

Para comparar os esquemas, elaboramos um valor de mérito simples:

$$\rho_{TR} = \frac{T_{ave}}{R_f}$$

Eq. 1

onde:

$T_{ave}$  = a média ponderada dos tempos de liberação da falta para faltas detectáveis

$R_f$  = a área total das faltas resistivas detectáveis pelo esquema

Um esquema de proteção que dê um valor de mérito menor oferece melhor desempenho.

### Proteção de tempo escalonado

Como referência para comparações do valor de mérito, considere um esquema de tempo escalonado. Figura 8 mostra o tempo de liberação total da falta para faltas à terra resistivas em diversos locais na linha longa. Faltas detectadas pelos elementos de distância Zona 1 em ambas as extremidades são liberadas em um máximo de 3,5 ciclos. As faltas detectadas pelos elementos retardados de sobrecorrente direcional de terra em 25 ciclos. Faltas que são detectadas por apenas um elemento de sobrecorrente direcional de terra da Zona 2 são liberadas pelo desligamento seqüencial, em 50 ciclos, uma vez que a Zona 2 não pode detectar a falta até o disjuntor local abra. O valor de mérito,  $\rho_{TR}$ , para o esquema de tempo escalonado e linha longa é calculado usando a Equação 2.

$$\rho_{TR} = \frac{\left(\frac{50 \text{ cyc} \cdot (37.4 \Omega + 6.6 \Omega)}{88 \Omega}\right) + \left(\frac{25 \text{ cyc} \cdot (13.7 \Omega + 25.6 \Omega)}{88 \Omega}\right) + \left(\frac{3.5 \text{ cyc} \cdot 4.7 \Omega}{88 \Omega}\right)}{88 \Omega} = 413 \times 10^{-3} \quad \text{Eq. 2}$$

O tempo médio de desligamento para todas as faltas detectáveis é:

$$T_{avc} = 36,6 \text{ ciclos}$$

$$\rho_{TR} = 366 \times 10^{-3}$$

$$T_{avc} = 26,5 \text{ ciclos}$$

Os valores mérito e tempos médios de desligamento para todos os esquemas são resumidos nas Tabelas 6a e 6b.

**Erro! Vínculo não válido.**

**Figura 8: Tempos de Liberação da Falta (ciclos) para Proteção de Tempo Escalonado, Linha Longa**

### Transferência de Disparo com Sub-alcance Direto (DUTT)

Figura 9 mostra as área de tempo de liberação da falta para a proteção DUTT. As faltas detectadas por ambos os elementos da Zona 1 são liberadas sem tempo de retardo nas duas extremidades. As faltas detectadas por um único elemento da Zona 1 são liberadas com um retardo adicional de 1 ciclo por conta do atraso no canal de comunicação. Faltas dentro da seção na Zona 2 são liberadas simultaneamente em 25 ciclos, ou seqüencialmente em 50 ciclos, dependendo de sua localização e resistência.

Para o caso da linha longa, o valor de mérito de DUTT é calculado:

$$\rho_{TR} = \frac{\left(\frac{50 \text{ cyc} \cdot 37.4 \Omega}{88 \Omega}\right) + \left(\frac{25 \text{ cyc} \cdot 13.7 \Omega}{88 \Omega}\right) + \left(\frac{4.5 \text{ cyc} \cdot (25.6 \Omega + 6.6 \Omega)}{88 \Omega}\right) + \left(\frac{3.5 \text{ cyc} \cdot 4.7 \Omega}{88 \Omega}\right)}{88 \Omega} = 307 \times 10^{-3} \quad \text{Eq. 3}$$

**Erro! Vínculo não válido.**

**Figura 9: Tempos de Liberação de Falta para Proteção DUTT, Linha Longa**

### Transferência de Disparo com Sub-alcance Permissivo (PUTT)

Figura 10 mostra os tempos de liberação da falta no esquema PUTT. As faltas resistivas são liberadas rapidamente pelo esquema PUTT somente se forem detectadas por ambos os elementos da Zona 1, ou pelos elementos Zona 1 local e Zona 2 remoto. As faltas que recaem dentro da área coberta por ambos os elementos da Zona 2 são liberados em 25 ciclos e as faltas que caem dentro da Zona 2 simples são liberadas seqüencialmente dentro de 25 ou 50 ciclos.

Para o caso da linha longa, o valor de mérito PUTT é:

$$\rho_{TR} = \frac{\left(\frac{50 \text{ cyc} \cdot 37.4 \Omega}{88 \Omega}\right) + \left(\frac{25 \text{ cyc} \cdot (13.7 \Omega + 6.6 \Omega)}{88 \Omega}\right) + \left(\frac{4.5 \text{ cyc} \cdot 25.6 \Omega}{88 \Omega}\right) + \left(\frac{3.5 \text{ cyc} \cdot 4.7 \Omega}{88 \Omega}\right)}{88 \Omega} = 324 \times 10^{-3} \quad \text{Eq. 4}$$

**Erro! Vínculo não válido.**

**Figura 10: Tempos de liberação de faltas (ciclos) para Proteção PUTT, Linha Longa.**

### Transferência de Disparo com Sobre-alcance Permissivo (POTT)

Figura 11 mostra os tempos de liberação de faltas no esquema POTT. As faltas resistivas são liberadas no tempo auxiliado por comunicação se forem detectadas por ambos os elementos da Zona 2. As faltas que recaem dentro de uma Zona 2 singela são liberadas seqüencialmente em 25 ciclos, supondo que o tempo de *dropout* do relé da Zona 2 é igual ou maior que o tempo de *pickup* do relé Zona 2.

Para o caso da linha longa, o valor de mérito de POTT é:

$$\rho_{TR} = \frac{\left( \frac{25 \text{ cyc} \cdot (37.4 \Omega + 6.6 \Omega)}{88 \Omega} \right) + \left( \frac{4.5 \text{ cyc} \cdot (13.7 \Omega + 25.6 \Omega)}{88 \Omega} \right) + \left( \frac{3.5 \text{ cyc} \cdot 4.7 \Omega}{88 \Omega} \right)}{88 \Omega} = 167 \times 10^{-3} \quad \text{Eq. 5}$$

**Erro! Vínculo não válido.**

**Figura 11: Tempos de liberação de faltas (ciclos) para Proteção POTT, Linha Longa**

### Bloqueio de Comparação Direcional (DCB)

Figura 12 mostra os tempos de liberação de faltas D no esquema DCB. Ambas as extremidades operam e liberam em 5 ciclos quando a resistência da falta é suficientemente baixa para que ambos os elementos Zona 2 operem. Isso é muito similar ao esquema POTT. O tempo de 5 ciclos para DCB é maior que o tempo do POTT de 4,5 ciclos, por causa do retardo de tempo de coordenação de *carrier* (portadora), que é adicionado ao tempo da Zona 2 no esquema de bloqueio.

Para faltas de resistência mais elevada, o esquema DCB proporciona liberação mais rápida (10 ciclos) do que os esquemas POTT, porque uma extremidade desliga em 5 ciclos, em seguida a outra extremidade detecta a falta e a libera após outros 5 ciclos.

Para o caso de linha longa, o valor de mérito de DCB é:

$$\rho_{TR} = \frac{\left(\frac{10 \text{ cyc} \cdot (37.4 \Omega + 6.6 \Omega)}{88 \Omega}\right) + \left(\frac{5 \text{ cyc} \cdot (13.7 \Omega + 25.6 \Omega)}{88 \Omega}\right) + \left(\frac{3.5 \text{ cyc} \cdot 4.7 \Omega}{88 \Omega}\right)}{88 \Omega} = 84 \times 10^{-3} \quad \text{Eq. 6}$$

**Erro! Vínculo não válido.**

**Figura 12: tempos de Liberação de Faltas (ciclos) para Proteção DCB, Linha Longa**

### Desbloqueio de Comparação Direcional (DCUB)

O esquema DCB trabalha de maneira idêntica ao esquema POTT, com respeito à sensibilidade e à velocidade operacional, tendo em vista que a filosofia (desligamento com permissão a partir da zona 2 remota) é igual à do POTT.

### Sumário

Tabelas 6a e 6b resumem a média de cobertura de resistência de falta média por desligamento de alta velocidade, tempos médios de liberação de faltas para todas as faltas e os valores de mérito para cada um dos esquemas quando aplicado aos exemplos de linhas longa e curta.

**Tabela 6a. Valores de mérito e Tempos Médios de Liberação de Faltas para Todos os Esquemas, Linha Longa**

	Esquema de Passo de Tempo	DUTT	PUTT	POTT	DCB	DCUB
Cobertura de RF em alta velocidade, ohms	4,7	36,9	30,3	44	44	44
T <sub>ave</sub> cic	36,3	27,0	28,5	14,7	7,4	14,7
ρ <sub>TR</sub> (x 10 <sup>3</sup> )	413	307	324	167	84	167

**Tabela 6b: Valores de mérito e tempos médios de liberação para todos os esquemas, linha curta**

	Esquema de Passo de Tempo	DUTT	PUTT	POTT	DCB	DCUB
Cobertura de RF em alta velocidade, ohms	9,8	27,5	27,5	59,5	59,5	59,5
T <sub>ave cic</sub>	26,5	21,5	21,5	8	5,7	8
ρTR (x 10 <sup>3</sup> )	366	297	297	111	79	111

## COMPLEXIDADE

Tabela 7 compara o número de zonas de proteção e temporizadores adicionais que são exigidos por uma extremidade simples de cada esquema. Salvo se um elemento da Zona 1 for necessário para implementar o esquema, nós não incluímos Zona 1 na contagem de zonas para comparação de complexidade.

**Tabela 7 – Complexidade do Esquema de Proteção Auxiliado por Comunicações**

	POTT	PUTT	DCB	DCUB	DUTT
<b>Esquema Básico:</b>					
Número de Zonas	1	2	2	1	1
Número de Temporizadores:	0	0	1	1	0
<b>Reversão de Corrente:</b>					
Zonas Adicionadas:	0	0	0	0	0
Temporizadores Adicionados	1	0	1	1	0
<b>Alimentação Fraca:</b>					
Zonas Adicionadas:	1	0	N/A	1	0
Temporizadores adicionados:	1	0		1	0
<b>Terminal da Terceira Linha:</b>					
Temporizadores adicionados:	0	0	0	1	0
Lógica Adicionada:	1	1	0	1	0
<b>TOTAIS:</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>7</b>	<b>1</b>

## UM NOVO ESQUEMA DE PROTEÇÃO AUXILIADO PELAS COMUNICAÇÕES

Essas avaliações sugerem um novo esquema de proteção auxiliado por comunicações, que ofereceria liberação de alta velocidade de mais faltas, sendo ao mesmo tempo tão confiável e seguro quanto os esquemas de comunicações existentes.

Figura 13 mostra a lógica do novo esquema de proteção. Enquanto o canal está em serviço, o esquema pode desligar de três modos diferentes:

- Uma falta é detectada na Zona 2 para o tempo de coordenação da portadora (CC), se nenhum sinal Block Trip (bloqueio de Trip) é recebido (DCB tradicional).

- Um sinal Permissive Trip é recebido e a falta não está atrás do terminal (DCB pela perspectiva da extremidade remota).
- Um sinal Direct Trip é recebido (economiza 0,5 ciclo para faltas de resistência mais baixa).

Se o canal falha (!ROK), a lógica DCB (Porta 1 AND) é bloqueada para manter segurança. Uma janela de disparo de 10 ciclos é aberta (Porta 2 AND), a qual permite ao relé desligar se uma falta direta for detectada. Isso melhora a confiabilidade nos casos onde o canal falha como resultado da falta. Um temporizador de bloqueio de reversão simples (B) desautoriza a lógica de desligamento permissivo e estende o sinal de Block Trip para proporcionar segurança durante as inversões de corrente.

**Erro! Vínculo não válido.**

### Figura 13: Nova Lógica de Desligamento Auxiliada por Comunicações

A confiabilidade e segurança deste esquema de proteção são ambas elevadas, com desempenho idêntico à DCUB. Todas as falhas detectadas em qualquer das extremidades são liberadas em ambas as pontas dentro de 5 ciclos ou menos. Liberação mais rápida melhora significativamente o valor de mérito.

**Erro! Vínculo não válido.**

### Figura 14: Tempos de Liberação de Falta (ciclos) para Novo Esquema de Proteção, Linha Longa.

$$\rho_{TR} = \frac{\left( \frac{5 \text{ cyc} \cdot (37.4 \Omega + 13.7 \Omega)}{88 \Omega} \right) + \left( \frac{4.5 \text{ cyc} \cdot (25.6 \Omega + 6.6 \Omega)}{88 \Omega} \right) + \left( \frac{3.5 \text{ cyc} \cdot 4.7 \Omega}{88 \Omega} \right)}{88 \Omega} = 54 \times 10^{-3} \quad \text{Eq. 7}$$

O tempo de liberação médio da falta é:

$$T_{ave} = 4,74 \text{ cic}$$

Tabela 8 mostra os valores de complexidade para o novo esquema. Um elemento Zona 1 pode ser usado para enviar o sinal Direct Trip – assim, duas ou três zonas são usadas pelo esquema básico. Três temporizadores (coordenação de carrier, uma janela de desligamento de perda de sinal e um temporizador de bloqueio de reversão) são usados no esquema básico, de modo que o esquema básico também é o esquema completo.

**Tabela 8: Complexidade do Novo Esquema de Proteção**

<b>Esquema Básico:</b> Número de Zonas Número de Temporizadores:	2 (3) 3
<b>Reversão de Corrente:</b> Zonas Adicionadas: Temporizadores Adicionados	0 0
<b>Alimentação Fraca:</b> Zonas Adicionadas: Temporizadores adicionados:	0 0
<b>Terminal da Terceira Linha:</b> Temporizadores adicionados: Lógica Adicionada:	0 0
<b>TOTAIS:</b>	5 (6)

Este esquema requer que três bits sejam comunicados ponta a ponta. Um relé micro-processado inclui capacidade de comunicação que tornam este esquema bastante viável e prático.

## CONCLUSÕES

Tabela 9 resume o desempenho dos quatro esquemas de proteção auxiliados por comunicação discutidos acima sobre critérios de sobre-disparos por ano e disparos com retardo de tempo por ano (supondo um sistema com 100 linhas), cobertura de falta resistiva de alta velocidade, cobertura de falta resistiva total, valores de mérito brutos e normalizados e complexidade.

O novo esquema de proteção oferece vantagens marcantes em termos de cobertura da resistência da falta e velocidade operacional, sem qualquer prejuízo para a segurança ou a confiabilidade. A complexidade do esquema é comparável à dos esquemas POTT.

**Tabela 9: Sumário de Desempenho das Proteções auxiliadas por Comunicações, Linhas Longas**

Esquema	Operação Incorreta			Performace do Tempo de Operação, cobertura Rf					Complexidade  Zonas, Timers, & Lógica
	Sobre disparo por ano	Atraso do disparo por ano	Valores de Mérito	Cobertura Rf em alta Veloc. $\Omega$	Cobertura Total Rf, $\Omega$	Tempo de eliminação da falta, $T_{ave}$ ciclos	Valor de Mérito $\rho_{TR}$	Valores de Mérito, Normalizada $\rho_{TRN}$	
POTT	0.022	12.20	12.222	44	88	14.7	$167 \times 10^{-3}$	3.1	5
DCB	0.380	0.33	0.710	44	88	7.4	$84 \times 10^{-3}$	1.6	4
DCUB	0.022	0.33	0.352	44	88	14.7	$167 \times 10^{-3}$	3.1	7
Novo	0.022	0.33	0.352	88	88	4.7	$54 \times 10^{-3}$	1.0	5 (6)

*Considerando: Linha Longa, 1% de perda de canal durante uma falta.*

## ***Apêndice A: Lógica dos Esquemas de Proteção***

### **TRANSFERÊNCIA DE DISPARO DIRETO COM SUB-ALCANCE**

#### ***Direct Underreaching Transfer Trip (DUTT)***

O esquema DUTT usa um elemento de Zona 1 instantâneo para disparar o disjuntor local e iniciar uma transferência de disparo para a zona afastada. A ponta remota desliga imediatamente ao receber o sinal de disparo transferido, sem qualquer qualificação adicional. Este esquema é extremamente simples, porém é suscetível de operação irregular no caso de ruído do canal ativar o sinal Direct Trip.

**Erro! Vínculo não válido.**

#### **Figura A1: Lógica da Transferência de Disparo Direto com Sub-alcance (DUTT)**

### **TRANSFERÊNCIA DE DISPARO PERMISSIVO COM SUB-ALCANCE**

#### ***Permissive Underreaching Transfer Trip (PUTT)***

O esquema PUTT usa Zona 1 para desligar o disjuntor local e enviar um sinal de desligamento permissivo para a extremidade remota. O disjuntor da extremidade remota desliga quando recebe o sinal permissivo, se o seu elemento Zona 2 estiver detectando uma falta. Por usar o elemento da Zona 2 para supervisionar o desligamento ao receber o sinal permissivo, este esquema fica menos suscetível à operação irregular sob condições de canal com ruídos do que o esquema DUTT, acima. Pelo fato deste esquema usar um elemento de sub-alcance para enviar a permissão, PUTT não envia um sinal de permissão para faltas fora da seção. Os esquemas PUTT não requerem lógica supervisória adicional para manter a segurança sob condições de inversão de corrente nas linhas paralelas.

**Erro! Vínculo não válido.**

#### **Figura A2: Lógica de Transferência de Disparo Permissivo com sub-Alcance (PUTT)**

### **TRANSFERÊNCIA DE DISPARO PERMISSIVO COM SOBRE-ALCANCE**

#### ***Permissive Overreaching Transfer Trip (POTT)***

Os esquemas POTT usam um elemento de sobre-alcance da Zona 2 para enviar um sinal de permissão de trip para a extremidade remota. O disjuntor da extremidade remota desliga ao receber o sinal permissivo, caso o seu elemento Zona 2 esteja detectando uma falta. Uma vez que o esquema usa um elemento de sobre-alcance para enviar permissão, os esquemas POTT necessitam de lógica supervisória adicional para manter segurança sob condições de inversão de corrente em linhas paralelas.

**Erro! Vínculo não válido.**

#### **Figura A3: Lógica de Transferência de Disparo Permissivo com Sobre-Alcance (POTT)**



## **BLOQUEIO DE COMPARAÇÃO DIRECIONAL (DCB)**

### ***Directional Comparison Blocking (DCB)***

Ao contrário dos esquemas descritos acima, que enviam um sinal quando uma falta é detectada no sentido direto, os esquemas DCB enviam um sinal (Block Trip) quando uma falta é detectada no sentido inverso.

Se o relé local detecta uma falta inversa, ele envia um sinal de Bloqueio de Desligamento para a extremidade remota. Na ponta remota, os elementos de sobre-alcance da Zona 2 têm permissão para desligar, após um curso retardo de tempo de coordenação, se não forem bloqueados pela chegada de um sinal Block Trip. Em muitas aplicações, um elemento não direcional é usado para enviar o sinal de Block Trip. Nesses casos, o sinal de bloqueio é rapidamente desligado se a falta for no sentido direto.

**Erro! Vínculo não válido.**

### **Figura A4: Lógica de Bloqueio de Comparação Direcional (DCB)**

## **DESBLOQUEIO DE COMPARAÇÃO DIRECIONAL**

### ***Directional Comparison Unblocking (DCUB)***

Em esquemas DCUB, um sinal de guarda é continuamente enviado entre as duas pontas da linha de transmissão. Se uma falta é detectada pelo elemento da Zona 2 do relé local, o sinal de guarda é desligado e um sinal de desligamento enviado. O relé remoto detecta a mudança dos sinais, de guarda para trip. Se ele também detectar uma falta na Zona 2, ele desliga. Os esquemas DCUB também usa lógica que permite um desligamento se uma perda de guarda for detectada e uma falta na Zona 2 também for detectada, mesmo se um sinal de trip não é recebido.

## Apêndice B: Modelos de Confiabilidade de MARKOV

Estes modelos de Markov foram desenvolvidos para comparações de segurança e confiabilidade. Os resultados de modelos de esquemas POTT, DCB e DCUB foram comparados. Nós supomos que os relés ideais de proteção de retaguarda de tempo escalonado foram aplicados com cada esquema primário de desligamento auxiliado por comunicações, de modo que uma falta nunca permaneceria no sistema por tempo maior do que o tempo de desligamento da Zona 2. Nós supomos ainda que cada desligamento resultou em um religamento satisfatório. Com alguma complexidade adicional, os modelos poderiam ser modificados para levar em conta os religamentos infrutíferos. Tabela B2 relaciona as hipóteses de performance remanescentes. Figuras B1, B2 e B3 ilustram os modelos POTT, DCB e DCUB e suas resultantes matrizes de cálculo.

**Tabela B1: Variáveis do Modelo de Markov**

Variável	Valor Usado	Descrição
MTBF	75 anos	Tempo Médio da Proteção entre falhas (2 relés, MTBF 150 anos, cada)
ST	0,80	Eficácia de Auto-Teste do Relé
MTBFc	50 anos	MTBF do Equipamento do Canal
Fcf	1,0%	Falhas de Canal Adicional devido a Faltas
MTRT	2 horas	Tempo Médio para Testar Relé
MTTR	4 horas	Tempo Médio para Reparar Relé ou Equipamento do Canal
MTT79	35 ciclos	Mais Longo Intervalo Aberto de religamento, mais Tempo do Disjuntor
MTTc	5 ciclos	Tempo de Liberação de Falta Auxiliado por Comunicações
Z2D	24 ciclos	Tempo de Liberação de Falta da Zona 2
Z1D	3,5 ciclos	Tempo de Liberação de Falta da Zona 1
kz	0,01%	Porcentagem de Faltas Externas que Causam Operação Irregular do Canal de comunicação

**Erro! Vínculo não válido.**

### **Figura B1: Modelo de Markov POTT**

Estado 1 deste modelo de Markov representa a condição operacional normal do sistema de potência e proteção: a linha protegida está energizada, o relé está em serviço e o canal de comunicação está operando corretamente. Quando ocorre uma falta no sistema, o sistema passa ao Estado 2. O desligamento auxiliado pelas comunicações leva o sistema para o Estado 3, enquanto o religamento restaura o sistema para o Estado 1. Essas são as transições normais e preferíveis.

Nos estados 7, 8 e 9, os relés de proteção primária estão fora de serviço devido a uma falha não detectada (Estado 7), uma falha detectada (Estado 8) ou um teste rotineiro (Estado 9). Se uma falta ocorre enquanto o sistema está em um desses estados, a proteção de retaguarda retardada libera a falta (Estado 5) e o religamento restaura o sistema. É suposto que a liberação de falta retardada irá resultar em uma checagem da subestação, que fará com que os relés sejam rapidamente recolocados de volta em serviço.

Se ocorrer uma falta enquanto o canal de comunicação está fora do ar devido a falha ou reparo (Estados 4 e 6), o sistema passa para Estado 5, onde a liberação da falta retardada e o religamento restauram o sistema.

O modelo de Markov leva em conta a pequena porcentagem de faltas dentro da seção que causam falha do canal de comunicação, resultando em um desligamento retardado. Essas são representadas pela transição direta do Estado 1 para Estado 5. Em um esquema POTT, supomos que há uma ainda uma porcentagem menor ( $k_z = 0,01\%$ ) de falhas do canal de comunicação durante as faltas externas detectadas que podem fazer com que um sinal de trip permissivo seja recebido erroneamente por um relé. Isso resultaria em uma operação de sobre-trip e religamento, representado pelos Estados 10 e 11.

As probabilidades de interesse são  $P_5$ , representando operações irregulares de desligamento retardado e  $P_{10} + P_{11}$ , representando operações irregulares de sobre-trip. As taxas de transição do modelo são definidas em termos de operações por hora, de forma que a matriz T abaixo é usada para calcular as probabilidades individuais.

$$T = \begin{matrix} & a_{11} & F_s & 0 & F_c & F_f & 0 & F_{pp} & F_{st} & Tr & F_z & 0 \\ 0 & a_{22} & S_n & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ R_s & 0 & a_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} & F_s & T_c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_d & 0 & a_{55} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ R_c & 0 & 0 & 0 & F_s & a_{66} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & F_s & 0 & a_{77} & Tr & 0 & 0 & 0 & 0 \\ R_r & 0 & 0 & 0 & F_s & 0 & 0 & a_{88} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ R_t & 0 & 0 & 0 & F_s & 0 & 0 & 0 & a_{99} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{aa} & S_n & 0 \\ R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{bb} \end{matrix}$$

$$\begin{aligned} a_{11} &= 1 - (F_s + F_c + F_f + F_{st} + F_{pp} + Tr + F_z) \\ a_{22} &= 1 - S_n \\ a_{33} &= 1 - R_s \\ a_{44} &= 1 - (F_s + T_c) \\ a_{55} &= 1 - S_d \\ a_{66} &= 1 - (R_c + F_s) \\ a_{77} &= 1 - (F_s + Tr) \\ a_{88} &= 1 - (F_s + R_r) \\ a_{99} &= 1 - (F_s + R_t) \\ a_{aa} &= 1 - S_n \\ a_{bb} &= 1 - R_s \end{aligned}$$

$$P^T = [P_1 \ P_2 \ P_3 \ P_4 \ P_5 \ P_6 \ P_7 \ P_8 \ P_9 \ P_{10} \ P_{11}]$$

$$P^T * T = P^T \text{ or } P^T * [T - I] = 0$$

Where I = Identity Matrix  
and  $\sum P_i = 1$

$$\begin{aligned} InDep &= P(5) \\ InSec &= P(10) + P(11) \end{aligned}$$

Erro! Vínculo não válido.

**Figura B2: Modelo de Markov DCB**

O Modelo Markov para o esquema DCB difere do modelo POTT em como o sistema responde a faltas que ocorrem enquanto o canal está fora de serviço. As faltas dentro da seção são liberadas no tempo normal auxiliado por comunicação, logo que os temporizadores de coordenação da portadora do relé terminarem sua contagem (transição de Estado 4 para Estado 2). Uma operação irregular de *overtrip* ocorre (Estado 10) se uma falta fora da seção detectada ocorrer enquanto o canal está fora do ar. Como acontece com o esquema POTT, uma porcentagem muito pequena de faltas externas também gera operações irregulares quando o sinal de bloqueio não consegue alcançar o relé remoto (transição direta do Estado 1 para Estado 10). A matriz de Markov e os cálculos para o esquema DCB são mostrados abaixo.

$$T = \begin{matrix} & a_{11} & F_s & 0 & F_c & 0 & 0 & F_{pp} & F_{st} & Tr & F_z & 0 \\ 0 & a_{22} & S_n & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ R_s & 0 & a_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & F_s & 0 & a_{44} & 0 & T_c & 0 & 0 & 0 & 0 & F_x & 0 \\ 0 & 0 & S_d & 0 & a_{55} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ R_c & 0 & 0 & 0 & F_s & a_{66} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & F_s & 0 & a_{77} & Tr & 0 & 0 & 0 & 0 \\ R_r & 0 & 0 & 0 & F_s & 0 & 0 & a_{88} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ R_t & 0 & 0 & 0 & F_s & 0 & 0 & 0 & a_{99} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{aa} & S_n \\ R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{bb} \end{matrix}$$

$$\begin{aligned} a_{11} &= 1 - (F_s + F_c + F_{st} + F_{pp} + Tr + F_z) \\ a_{22} &= 1 - S_n \\ a_{33} &= 1 - R_s \\ a_{44} &= 1 - (F_x + F_s + T_c) \\ a_{55} &= 1 - S_d \\ a_{66} &= 1 - (R_c) \\ a_{77} &= 1 - (F_s + Tr) \\ a_{88} &= 1 - (F_s + R_r) \\ a_{99} &= 1 - (F_s + R_t) \\ a_{aa} &= 1 - S_n \\ a_{bb} &= 1 - R_s \end{aligned}$$

$$P^T = [P_1 \ P_2 \ P_3 \ P_4 \ P_5 \ P_6 \ P_7 \ P_8 \ P_9 \ P_{10} \ P_{11}]$$

$$P^T * T = P^T \text{ or } P^T * [T - I] = 0$$

Where I = Identity Matrix  
and  $\sum_i P_i = 1$

$$\begin{aligned} InDep &= P(5) \\ InSec &= P(10) + P(11) \end{aligned}$$

Erro! Vínculo não válido.

**Figura B3: Modelo de Markov DCUB**

O Modelo de Markov para o esquema DCUB também é similar ao modelo POTT, porém leva a conta a janela de desligamento de 150 ms que é aberta na perda de guarda usando Estado 4. As faltas interna e externa detectada são ambas rapidamente liberadas (Estado 2 ou Estado 10) se ocorrerem enquanto o sistema está no Estado 4. Nós supomos que uma perda de guarda sustentada irá gerar um alarme, permitindo que o equipamento do canal seja reparado, levando o sistema do Estado 6 para o Estado 1.

$$\begin{matrix} a_{11} & F_s & 0 & F_c & 0 & 0 & F_{pp} & F_{st} & Tr & F_z & 0 \\ 0 & a_{22} & S_n & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix}$$



$$T = \begin{matrix} & R_s & 0 & a_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 0 & F_s & 0 & a_{44} & 0 & R_l & 0 & 0 & 0 & F_x \\ & 0 & 0 & S_d & 0 & a_{55} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & R_c & 0 & 0 & 0 & F_s & a_{66} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ T = & 0 & 0 & 0 & 0 & F_s & 0 & a_{77} & T_r & 0 & 0 \\ & R_r & 0 & 0 & 0 & F_s & 0 & 0 & a_{88} & 0 & 0 \\ & R_t & 0 & 0 & 0 & F_s & 0 & 0 & 0 & a_{99} & 0 \\ & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{aa} \\ & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{bb} \end{matrix}$$

$$\begin{aligned} a_{11} &= 1 - (F_s + F_c + F_{st} + F_{pp} + T_r + F_z) \\ a_{22} &= 1 - S_n \\ a_{33} &= 1 - R_s \\ a_{44} &= 1 - (F_s + R_l + F_x) \\ a_{55} &= 1 - S_d \\ a_{66} &= 1 - (R_c + F_s) \\ a_{77} &= 1 - (F_s + T_r) \\ a_{88} &= 1 - (F_s + R_r) \\ a_{99} &= 1 - (F_s + R_t) \\ a_{aa} &= 1 - S_n \\ a_{bb} &= 1 - R_s \end{aligned}$$

$$P^T = [P_1 \ P_2 \ P_3 \ P_4 \ P_5 \ P_6 \ P_7 \ P_8 \ P_9 \ P_{10} \ P_{11}]$$

$$P^T * T = P^T \text{ or } P^T * [T - I] = 0$$

Where I = Identity Matrix  
and  $\sum P_i = 1$

$$\begin{aligned} InDep &= P(5) ; \\ InSec(k) &= P(10) + P(11) \end{aligned}$$