

# Combinando Baterias e Fontes CA como Fonte mais Confiável de Energia para Controle

Edmund O. Schweitzer, III, David E. Whitehead, Michael Thompson,  
Krishnanjan Gubba Ravikumar, Austin Wade, Bruce Hall e Sean Robertson  
*Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.*

Apresentado na  
47<sup>th</sup> Annual Western Protective Relay Conference  
Formato Virtual  
20 a 22 de Outubro de 2020

Traduzido para o português em fevereiro de 2021

# Combinando Baterias e Fontes CA como Fonte mais Confiável de Energia para Controle

Edmund O. Schweitzer, III, David E. Whitehead, Michael Thompson, Krishnanjan Gubba Ravikumar, Austin Wade, Bruce Hall e Sean Robertson, *Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.*

**Abstract**—Os avanços tecnológicos criaram demandas crescentes de energia para os sistemas de controle das infraestruturas críticas. A energia das baterias (serviço auxiliar CC – corrente contínua) da estação costumava ser necessária apenas para operar disjuntores. Hoje é diferente: as baterias também devem fornecer energia para relés de proteção, medidores, controladores de automação, equipamentos de comunicação e computadores. Mesmo as breves interrupções da alimentação de controle são problemáticas, pois muitos dispositivos têm tempos de operação curtos e tempos de inicialização longos. Por exemplo, um computador pode demorar alguns minutos para reiniciar após uma curta interrupção no fornecimento de energia.

Este artigo apresenta uma abordagem simples, mas inovadora, para aumentar a confiabilidade do serviço auxiliar CC, combinando várias fontes e fornecendo recursos de alternância de fontes em caso de perda de todas as fontes de entrada. O artigo destaca ainda os benefícios técnicos e aplicações, ao mesmo tempo em que mostra como o aumento da diversidade de fontes pode melhorar a disponibilidade de energia do serviço auxiliar CC para os sistemas de proteção e controle e mitigar o impacto de falha ou degradação da fonte CC auxiliar, bem como para abrir disjuntores.

## I. INTRODUÇÃO

Historicamente, o serviço auxiliar CC (neste artigo referido como sistema CC) só precisava fornecer energia para as bobinas de disparo do disjuntor e as luzes indicadoras do painel. Os relés eletromecânicos dependiam apenas das grandezas secundárias do sistema de potência para operar, empregando atração ou indução eletromagnética para fechar os contatos de *trip*. Hoje é diferente; o sistema CC também deve fornecer energia para vários dispositivos eletrônicos inteligentes (IEDs), como relés de proteção, medidores, controladores de automação, equipamentos de comunicação, relógios GPS e computadores. Ao contrário dos relés eletromecânicos, esses dispositivos dependem da alimentação de controle para operar. Se a alimentação de controle for perdida ou momentaneamente interrompida, o relé pode levar vários segundos para reiniciar e habilitar-se. Computadores, controladores de automação e *switches* de rede demoram ainda mais para reiniciar. Com o uso crescente de relés baseados em microprocessadores, esquemas de proteção baseados em redes de comunicações e esquemas de proteção e controle sistêmicos, a necessidade de dispor de energia de controle confiável nunca foi tão crítica.

As últimas décadas viram várias inovações em relés de proteção, incluindo relés baseados em microprocessadores, novos algoritmos, velocidade ampliada e funções de relatório. No entanto, neste mesmo período, o sistema CC passou por

poucas mudanças ou inovações. Na verdade, se os engenheiros de proteção da década de 1950 entrassem em uma subestação moderna, eles praticamente não veriam mudanças no sistema CC.

O sistema CC pode ser facilmente esquecido por engenheiros de proteção que se concentram em compreender o sistema elétrico e o componente a ser protegido, os estudos de curto-circuito e o projeto esquemático. A confiabilidade pode ser assumida ou ignorada. Isso pode ser atribuído à divisão de propriedade e/ou responsabilidade do sistema CC, onde uma gerência ou grupo diferente é responsável pelo sistema CC e manutenção da bateria ou um consultor externo considera o sistema CC fora do escopo de uma atualização de proteção.

Um único banco de baterias é usado frequentemente devido ao “custo relativamente alto dos sistemas de baterias e à alta confiabilidade que a experiência mostrou que pode ser obtida ... com boas práticas de manutenção e monitoramento” [1]. Embora a perda completa do sistema CC possa ser um evento de baixa probabilidade, pode ter consequências extremas. Falhas no sistema CC podem resultar em danos significativos ao equipamento e à propriedade e possivelmente colocar vidas humanas em perigo. A referência [2] contém um exemplo em que um sistema CC falhou em uma subestação de distribuição e os relés de *backup* remoto não conseguiram detectar o evento. O resultado foi uma perda catastrófica completa da subestação. O evento foi capturado pela câmera (veja a Fig. 1) e, desde então, ganhou mais de 215.000 visualizações no YouTube [3].



Fig. 1. Perda de um Transformador de Subestação após uma Falha do Sistema CC.

## II. SISTEMAS CC, FALHAS E INTERRUPÇÕES

### A. Visão Geral do Sistema CC

Geralmente não se fornece energia aos sistemas de proteção e controle oriunda do sistema elétrico que está sendo protegido porque um curto-circuito no sistema de energia pode remover a fonte de energia do controle no momento necessário para isolar a falta. Assim, a maioria das subestações inclui um banco de baterias para fornecer energia auxiliar.

Um sistema CC típico compreende a alimentação CC e os circuitos de controle. A fonte CC inclui um banco de baterias e carregador. O circuito de controle CC compreende um painel de distribuição, circuitos ramificados, dispositivos de proteção e equipamentos de monitoramento [4] [5]. A Fig. 2 mostra um sistema CC típico com proteção redundante. O sistema A está em um ramo do circuito e emite comandos de disparo para a bobina de disparo 1 do disjuntor 1, enquanto o sistema B está em outro ramo e emite comandos de disparo para a bobina de disparo 2 do disjuntor 1 (bobinas de disparo e disjuntor não mostrados na figura). A proteção e as bobinas de disparo são redundantes, mas o sistema CC não. Existe apenas um banco de baterias, um carregador de baterias e um painel de distribuição CC.

O banco de baterias atende a dois propósitos principais para aplicação em subestações. Obviamente, ele deve fornecer energia CC auxiliar continuamente até que os reparos possam ser feitos para qualquer falha no sistema de carregamento e da fonte CA (corrente alternada) para aquele sistema, então o atributo mais importante para isso é a capacidade de armazenamento de energia. O segundo propósito é fornecer altas correntes momentâneas para o disparo de disjuntores, de modo que o atributo mais importante para isso é a taxa de descarga rápida adequada. Esses dois atributos estão relacionados, mas são características de desempenho de baterias muito diferentes.

Também se confia na bateria para garantir que a subestação esteja protegida e possa desarmar disjuntores quando energizada novamente após uma interrupção de longo prazo do sistema elétrico da área causada por eventos como blecautes ou eventos climáticos severos. Para abordar questões de confiabilidade de energia de controle auxiliar, este é um terceiro cenário que deve ser considerado. Durante o restabelecimento do sistema elétrico, o estado do sistema CC que atende o sistema de proteção e controle é um fator importante nos planos de reenergização.

Sob condições normais, o carregador de baterias trabalha em operação de flutuação total, fornecendo carga contínua aos dispositivos CC, enquanto o banco de baterias fornece alta corrente adicional para cargas intermitentes. Se o carregador de baterias falhar ou perder a entrada CA, as baterias fornecem energia para cargas contínuas e intermitentes e devem ser normalmente dimensionadas para ter armazenamento suficiente para durar até que o pessoal possa chegar ao local e resolver o problema. O documento IEEE 485 fornece orientação sobre o dimensionamento de bancos CC de acordo com as cargas contínuas e momentâneas conectadas [6].

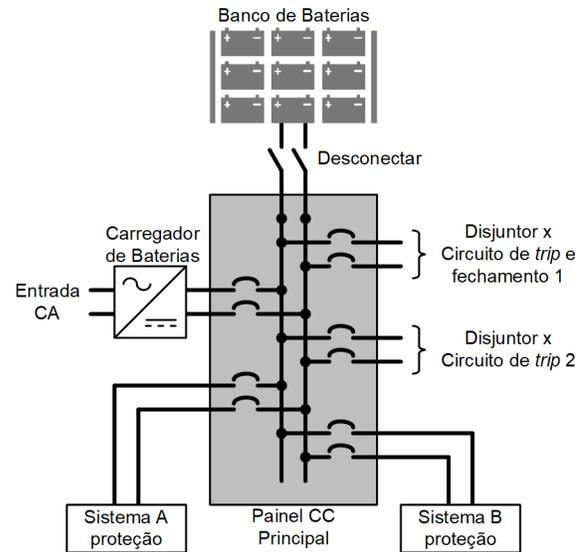


Fig. 2. Sistema CC Típico.

### B. Modos de Falha

#### 1) Falhas Internas em Baterias

Os carregadores de baterias podem ocultar falhas de baterias que só podem ser detectadas durante a manutenção usando monitoramento de célula individual ou quando o banco de baterias falha durante um evento de disparo de disjuntor. Pior ainda, se o evento que causou a queda de CA no carregador de baterias requerer relés de proteção para operar e emitir comandos de disparo para disjuntores, o banco pode falhar no momento mais importante em que está sendo chamado para funcionar.

A maioria desses modos de falha resulta em circuito aberto na célula/banco de baterias, aumento da impedância da célula ou diminuição da capacidade de descarga prolongada. Alguns dos modos de falha mais comuns são os seguintes [7] [8] [9]:

- Corrosão da grade
- Corrosão do cabo superior
- Sulfatação de placa
- Acúmulo de sedimentos
- Extremos ambientais
- Curtos francos

#### 2) Falhas Externas ao Sistema CC

Os sistemas CC aplicados a subestações normalmente não são aterrados e dispõem de meios de detecção de falta à terra. Isso dá a capacidade de resistir a uma única falta à terra e continuar a operação normal [8]. Se a falha não for reparada e ocorrer uma segunda falha, ou ocorrer um curto-circuito, todo ou parte do sistema CC terá que ser desligado para eliminar a falha. Mesmo se a falha ocorrer em um ramo, a tensão pode diminuir até que a falha seja eliminada.

Outros modos de falha externa incluem o seguinte [8]:

- Pontos de ajuste incorretos do carregador
- Falta de monitoramento remoto
- Falha do carregador
- Perda prolongada de CA

### 3) Falhas Induzidas por Erro Humano

Os bancos de baterias requerem monitoramento contínuo e manutenção periódica para garantir a operação adequada [8]. Quanto mais os seres humanos interagem com o sistema CC para manutenção, há mais chances de erro humano.

Um exemplo de falha induzida por erro humano ocorreu após o teste de rotina da bateria. Após o teste periódico de descarga da bateria, a chave geral do banco de baterias não foi fechada. Os técnicos não notaram esse erro porque o carregador de bateria estava fornecendo toda a carga de regime permanente para o sistema CC. Esse erro passou despercebido por meses, até que houve uma falta em uma linha de distribuição alimentada pela subestação. A falta anulou a tensão para o serviço auxiliar da subestação, removendo a alimentação CA do carregador de bateria e, portanto, removendo toda a energia de controle CC para a subestação. Mesmo que a alimentação CA não tenha sido afetada pela falha, o limite de corrente do carregador de bateria pode impedir as operações de desligamento do disjuntor. A falha durou minutos até ser eliminada pela proteção remota, mas somente após danos significativos.

Em outro exemplo de falha induzida por erro humano, o sistema CC estava sendo modernizado com um novo carregador e banco de baterias. Os procedimentos para remover o equipamento antigo e instalar o novo eram falhos. O técnico desligou a alimentação CA do carregador de baterias para isolá-lo com segurança. Ele então desligou o disjuntor CC do banco de baterias e removeu os fios do disjuntor, causando uma perda completa de energia CC na estação. Um engenheiro no local notou a perda de energia CC e informou o técnico. Quando o técnico reconectou rapidamente os fios do banco de baterias, ele os conectou na polaridade reversa. Quando o disjuntor CC foi ligado para reenergizar o sistema CC, vários disjuntores desarmaram devido a entrada de grandezas sensíveis à polaridade em vários relés da subestação. No entanto, mesmo se o trabalho tivesse sido feito na ordem correta, durante o tempo em que a bateria não estava conectada e apenas o carregador estava alimentando o barramento CC, se uma falha no sistema elétrico tivesse acontecido durante a troca, o carregador pode ter ficado com limitação de corrente e impossibilitado de desarmar o disjuntor.

#### C. Interrupções Momentâneas

Mesmo quando os sistemas CC não falham, interrupções curtas podem ter consequências graves. Os IEDs têm tempos de *ride-through* muito curtos e não são ativados instantaneamente quando a tensão é aplicada. Pode levar apenas uma queda de 0,1 a 0,5 segundos na tensão no sistema CC para fazer com que o IED desligue e requeira uma reinicialização [10] [11]. Os relés têm tempos de inicialização da ordem de segundos, durante os quais eles não fornecem proteção. Os equipamentos de automação e os computadores das estações demoram ainda mais para reiniciar após uma interrupção no fornecimento de energia, como mostra a Tabela I. Uma interrupção momentânea pode causar uma perda de disponibilidade muito mais longa.

TABELA I  
TEMPO DE *STARTUP* DE IEDS

IED	Tempo de <i>Startup</i> em Segundos
Relé do fabricante A	<5
Relé do fabricante B	30
Controlador de automação	60
Computador de Subestação	500 a 1.000

Em algumas situações, interrupções momentâneas podem ser propositais devido ao desligamento de circuitos por técnicos para localizar faltas à terra. Se um sistema CC em operação flutuante tiver uma falta à terra e os operadores não tiverem um sistema de localização de falta à terra, eles podem empregar o método simples de seccionar o sistema CC e desligar momentaneamente um circuito por vez para ver se a falta à terra foi removida. Se ainda estiver presente, o circuito é ligado novamente e o processo é repetido até que o circuito em falta seja descoberto [9].

### III. SOLUÇÕES ATUAIS

Para subestações críticas, é comum projetar o sistema CC com níveis de redundância para evitar interrupções ou incluir monitoramento para limitar a duração das interrupções. Dependendo do sistema, do nível de confiabilidade necessário e da alimentação CC disponível, o projeto pode incorporar sistemas CC independentes e redundantes, monitoramento de alimentação CC, IEDs com fontes de alimentação redundantes, fontes de alimentação ininterrupta ou unidades de disparo capacitivas na subestação.

#### A. Sistemas CC Duais

Um método comum para aumentar a confiabilidade dos sistemas auxiliares de energia CC de controle em subestações críticas é incorporar dois serviços auxiliares CC independentes, conforme mostrado na Fig. 3. Esta configuração compreende dois bancos de baterias independentes, cada um com seu próprio carregador de bateria. A proteção do Sistema A e do Sistema B é alimentada a partir de seu próprio banco de baterias, carregador de bateria e painel de distribuição CC. Isso fornece energia de controle para detectar e eliminar eventos do sistema, mesmo se um sistema CC falhar [12]. Embora este seja um método comum para aumentar a disponibilidade do sistema CC e às vezes seja exigido pelos conselhos regionais de confiabilidade (Procedimentos de Rede ou de Distribuição no Brasil), alguns fatores podem impedir os projetistas de implementarem um sistema CC duplo.

Esses fatores podem incluir o seguinte:

- Custo: dobrar a quantidade de equipamento dobra o custo do sistema CC.
- Requisitos de espaço: um sistema CC duplo e independente requer mais espaço nas casas de controle da subestação. Isso pode não ser uma preocupação em casas de controle com projeto greenfield, mas o espaço é frequentemente limitado em projetos brownfield.
- Mais manutenção: baterias e carregadores adicionais aumentam o tempo e as despesas com manutenção adicional.

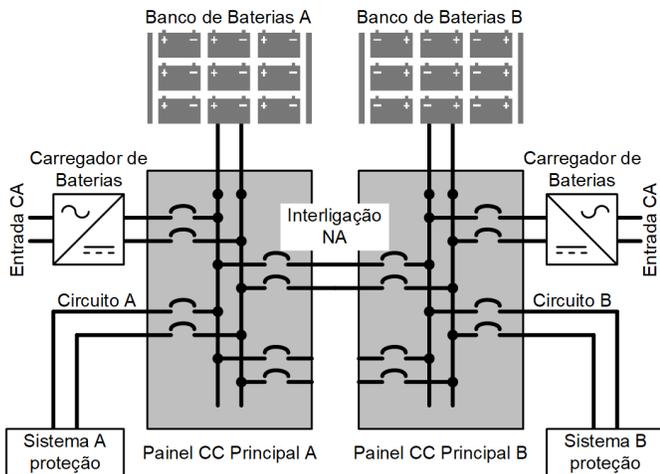


Fig. 3. Sistema CC Duplo Independente.

### B. Monitoramento Online

Para subestações que têm um único suprimento CC, a disponibilidade pode ser aumentada implementando o monitoramento online de componentes críticos que causariam uma perda total do sistema CC da subestação.

O monitoramento deve incluir bateria aberta, tensão baixa, perda de CA do carregador de baterias e falha do carregador de bateria. Todos os alarmes do sistema CC devem ser relatados a um centro de operação 24 horas por dia, 7 dias por semana, para acionar resposta imediata à emergência [5]. Mesmo assim, levará tempo para que uma equipe seja notificada, vá até a subestação, investigue o problema, conserte-o e ligue novamente a fonte CC.

### C. IEDs com Fontes de Suprimento Duais

O uso de IEDs com fontes de alimentação duplas conectadas a sistemas separados pode aumentar a diversidade e a disponibilidade do suprimento. Em uma configuração comum, uma fonte de alimentação do IED é conectada a uma fonte CC e a outra fonte de alimentação está conectada a uma fonte CA. Este é frequentemente o caso com equipamentos de automação de redes.

Isto requer fontes de alimentação duplas em cada IED e tem várias desvantagens, como as seguintes:

- Uma segunda fonte de alimentação em cada IED aumenta o custo.
- Os IEDs se tornam ineficientes, criando mais calor nos equipamentos e casas de controle.
- Nem todo IED dispõe de fontes de alimentação duplas.
- Fontes de alimentação redundantes em IEDs não resolvem de forma eficiente ou significativa o problema de falha de modo comum da perda da fonte CC.

### D. Unidades de Trip Capacitivas

Algumas subestações de distribuição pequenas ou remotas não têm um sistema CC e usam fusíveis para proteção de transformador e religadores como disjuntores de alimentadores de distribuição. Esses locais requerem que as unidades de *trip* capacitivas (UTCs) forneçam energia para ativar as bobinas de disparo no caso de uma perda da fonte CA. As UTCs também são frequentemente utilizadas em instalações industriais e de mineração.

As UTCs mostradas na Fig. 4 armazenam energia em um capacitor (C1) que é carregado por uma única fonte de alimentação de controle CA. Se o suprimento de entrada CA for perdido, a UTC fornece a energia necessária para atuar a bobina de disparo e abrir o disjuntor [13]. Um aspecto a ser observado (discutido mais adiante na Seção V) é que as UTCs não são projetadas para fornecer energia a relés baseados em microprocessadores.

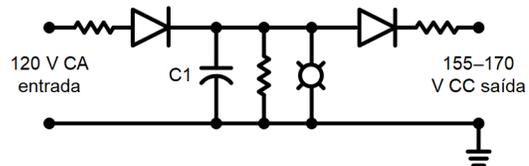


Fig. 4. Diagrama Esquemático de UTC.

### E. Fontes de Alimentação Ininterrupta

Instalações de média tensão (MT) e baixa tensão (BT) em cubículos metálicos podem usar fontes de alimentação ininterrupta (UPSs) para controle de tensão confiável. Estas podem ser grandes UPSs que fornecem energia para toda a instalação ou unidades menores que fornecem energia para cubículos e IEDs individuais [14]. UPSs pequenas usam baterias de chumbo-ácido que precisam ser substituídas a cada 3 a 5 anos para garantir uma operação confiável e têm classificações de temperatura mais baixas do que alguns ambientes de subestação. Infelizmente, esses pequenos nobreaks costumam estar localizados dentro do painel, fora da vista, longe da mente e, conseqüentemente, não são mantidos ou substituídos com frequência.

#### IV. COMBINAÇÃO DE FONTES DE ENERGIA DISPONÍVEIS

##### A. Fontes de Energia Possíveis em Subestações

Esse problema é análogo à situação difícil da pessoa em um bote salva-vidas no mar: água, água por toda parte, mas nem uma gota para beber. Se a subestação estiver energizada e precisar de proteção, existem fontes de energia prontamente disponíveis. Precisa-se apenas de uma maneira de acessá-las.

As subestações são equipadas com diferentes fontes que normalmente não são utilizadas para a alimentação CC porque, individualmente, não oferecem a confiabilidade exigida pelos sistemas de proteção e controle. As fontes que podem ser encontradas em subestações incluem baterias de estação, serviço CA da estação, transformadores de potencial e geradores de *backup*, conforme descrito a seguir:

- Uma bateria de estação é uma fonte óbvia discutida ao longo deste artigo.
- Serviços auxiliares CA fornecem toda a energia auxiliar na subestação para iluminação, HVAC, tomadas de conveniência, mecanismos de disjuntor e carregadores de bateria. Em alguns locais, dois serviços auxiliares separados estão disponíveis com uma chave de transferência automática ou manual (CTA) para alternar as fontes em caso de perda de uma fonte [15].
- Os transformadores de serviços auxiliares (TSAs) são dimensionados para fornecer à estação ou quadro de distribuição de serviços auxiliares CA. Os TSAs são dimensionados para lidar com todas as cargas da estação. Uma desvantagem dos TSAs é que eles podem ser conectados a um sistema dentro de uma das zonas de proteção da subestação. Por exemplo, se um TSA estiver conectado a um dos barramentos de distribuição e houver uma falta no barramento, a proteção do barramento isolará o componente primário para eliminar a falta e indiretamente desenergizar o TSA. Mesmo que o defeito não esteja no barramento, pode estar perto o suficiente para diminuir a tensão no TSA até que a falta seja eliminada.
- Normalmente, vários transformadores de potencial (TPs) podem ser encontrados dentro de subestações e, com relés modernos baseados em microprocessadores de baixa carga, os TPs geralmente têm menos carga conectada do que a classificação da placa de identificação permite. De acordo com [16], os TPs podem fornecer tensão nominal até a classificação VA da placa de identificação.

- Os geradores de *backup* podem estar localizados em subestações remotas, subestações de chaveamento sem um barramento de baixa tensão, subestações onde o suprimento é de uma linha de distribuição local ou uma subestação de chaveamento com barramento em anel, onde uma falta em LT poderia desenergizar um TSA. Os geradores são dimensionados para atender todas as cargas críticas, incluindo o carregador de baterias. Alguns desses geradores podem detectar uma perda de tensão, iniciar o motor principal, estabelecer frequência e tensão de saída estáveis e conectar-se às cargas em menos de 10 segundos [17].

##### B. Combinando Fontes para Ter Suprimento Confiável

E se fosse possível empregar as várias fontes disponíveis que não oferecem confiabilidade aceitável sozinhas e combiná-las em um barramento de saída CC altamente confiável? O Dispositivo de Combinação de Fontes de Alimentação (DCFA) proposto, conforme representado na Fig. 5, faz exatamente isso. O dispositivo usa uma entrada CC e até três entradas CA independentes e as combina para fornecer uma saída CC comum que pode ser usada para alimentar relés de proteção, controladores de automação, sinalização e bobinas de desarme de maneira confiável.

Visto que este dispositivo será utilizado para combinar fontes antes de fornecer energia a cargas críticas, é importante que seja altamente confiável. A Fig. 5 mostra todos os componentes principais do dispositivo proposto. Para garantir a sua confiabilidade, são usados diodos de alta suportabilidade para evitar a alimentação reversa entre as fontes. O diodo de saída possui um caminho elétrico redundante que pode ser testado externamente. O fusível de saída é usado para proteção para curtos-circuitos na saída e polaridade reversa. O fusível de saída é dimensionado e testado para suportar mais de dez mil eventos de disparo normalizados em 30 amperes por 200 milissegundos [18]. As entradas CA possuem transformadores de isolamento para permitir a conexão de fontes mistas e para remover a polaridade de conexão. Todos os barramentos de entrada e de saída são isolados eletricamente do chassi, mantendo assim o sistema CC flutuante. Ter até quatro fontes de entrada diferentes assegura uma significativa diversidade de fontes, reduzindo a chance de que o barramento de saída CC não seja alimentado por uma das entradas.

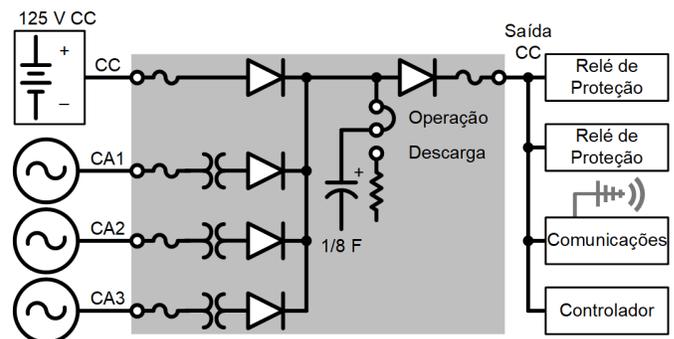


Fig. 5. Diagrama Funcional de um DCFA.

O dispositivo é projetado para ser instalado nos circuitos CC, não como uma fonte CC da estação. A Fig. 6 mostra uma aplicação típica onde vários dispositivos de diversidade de fontes são instalados nos circuitos de distribuição CC da subestação. Um dispositivo é instalado no circuito de proteção do Sistema A e é alimentado com o sistema CC e três fontes CA adicionais. Outro dispositivo é instalado no circuito de ramificação de proteção do Sistema B e é alimentado pelas mesmas fontes CC e CA, mas em fases diferentes.

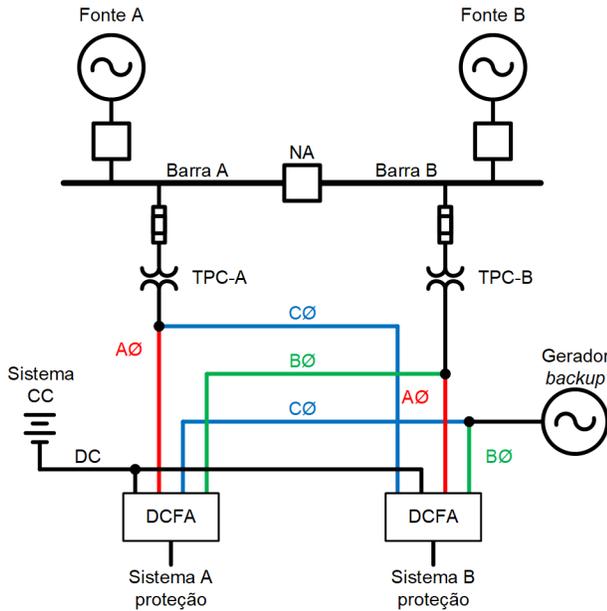


Fig. 6. Diversidade de Fontes para Proteção do Sistemas A e B com um Único Sistema CC.

### C. Estratégias de Diversidade

Conforme mencionado anteriormente, geralmente não alimentamos os sistemas de proteção e controle do sistema de energia que está sendo protegido porque um curto-circuito no sistema de energia pode remover a fonte de energia no momento necessário para isolar a falha. No entanto, as falhas do sistema de energia costumam ser desequilibradas. Na maioria das falhas, há uma ou mais fases saudáveis. Se as três entradas de tensão para o DCFA forem alimentadas por VAB, VBC e VCA para uma falha de linha única para aterramento aparafusada, então uma das entradas da fonte estará saudável e as outras duas serão reduzidas, no máximo, a  $1/\sqrt{3} = 58$  por cento do valor nominal. Para uma falha sólida entre fases, enquanto uma das entradas da fonte será zero, as outras duas serão reduzidas para  $\sqrt{3}/2 = 87$  por cento do valor nominal. Para uma falha sólida bifásica à terra, duas das entradas serão zero, mas uma entrada permanecerá em 58 por cento do valor nominal, que ainda pode estar acima da tensão de corte das fontes de alimentação do equipamento de proteção e controle. O caso problemático é a falha trifásica sólida em que o capacitor fornece conduz até que a falha seja eliminada.

Considere uma subestação com vários barramentos isolados uns dos outros por impedâncias como transformadores; por exemplo, uma subestação de distribuição com dois transformadores que é operada com barramentos abertos no

lado de baixa tensão. Quando as entradas do DCFA são conectadas a uma fonte em cada barramento, uma falta em um barramento não afetará de forma significativa a tensão no outro barramento. Se ocorrer uma falha na zona do sistema de potência que o relé está protegendo, o sistema de proteção e controle terá alimentação auxiliar confiável fornecida pelo barramento adjacente. Não há necessidade de passar por uma transferência automática porque as fontes são combinadas perfeitamente. Se os dois transformadores de serviços auxiliares da estação estiverem conectados a fases diversas, um curto-circuito desequilibrado no sistema de transmissão que alimenta os dois barramentos não afetará as duas fontes de serviço da estação igualmente, proporcionando uma diversidade ainda maior.

Para uma aplicação onde não há bateria na subestação e o projeto conta com o DCFA para alimentar os relés, o caso problemático ocorre quando a linha de transmissão que alimenta a subestação fica desligada e a estação é completamente desenergizada por mais tempo do que o tempo de *ride-through* do DCFA. Ou, quando há uma interrupção generalizada de longa duração no sistema elétrico. Nesse caso, quando a linha ou sistema é restabelecido e reenergiza a subestação, o sistema de potência fica em serviço sem proteção durante o tempo em que os dispositivos de proteção e controle estão sendo habilitados. A estratégia para este caso seria incluir lógica para abrir os disjuntores antes de perder a capacidade de disparar. Então, quando a estação é reenergizada, os disjuntores estarão abertos e em condição segura até que a proteção esteja disponível novamente. A Fig. 7 mostra um exemplo da lógica.

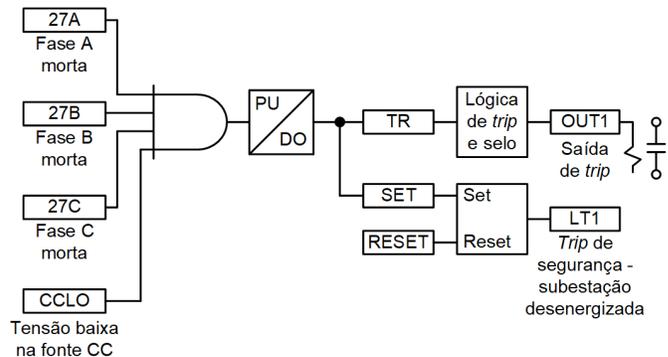


Fig. 7. Exemplo de Lógica de Disparo Seguro em Subestação Desenergizada.

A temporização é definida como longa o suficiente para superar distúrbios no sistema elétrico e no lado CC do DCFA. Por exemplo, uma falha trifásica próxima que anula as tensões das três fases é eliminada pela abertura de um disjuntor, também afeta a tensão no lado CC do DCFA. A temporização também é coordenada de forma que, uma vez que o sinal CCLO (tensão baixa na fonte CC) seja ativado, ainda haja tempo suficiente para que a tensão permaneça disponível para abrir o disjuntor. A lógica pode até ser incluir o fechamento automático do disjuntor, se LT1 estiver habilitado e as tensões do sistema elétrico estiverem sãs. Isso apenas atrasaria a ativação dos circuitos do sistema elétrico pelo tempo que os dispositivos de proteção e controle levam para reiniciar e estarem prontos para proteger o sistema elétrico.

#### D. Armazenamento de Energia para Superar Ride-Through e Disparo do Disjuntor

Para aumentar ainda mais a capacidade do dispositivo, grandes capacitores de armazenamento de energia são conectados ao barramento CC de saída para fornecer abertura do disjuntor e *ride-through* do IED. Ao contrário das baterias UPS, que exigem manutenção e substituição programada, os capacitores podem durar mais de 20 anos de operação sem manutenção. Dependendo da carga conectada, o *ride-through* pode ser da ordem de minutos.

Ao usar grandes capacitores para fornecer energia ao barramento de saída, que não é regulado, o tempo de *ride-through* é determinado por (1).

$$RT = C \cdot \left( \frac{V_{\text{INICIAL}}^2 - V_{\text{DROPOUT}}^2}{2 \cdot P_{\text{CARGA}}} \right) \quad (1)$$

onde:

RT é o tempo de *ride-through* time (s)

C é a capacitância (F)

$V_{\text{INICIAL}}$  é a tensão de saída do dispositivo no momento em que todas as fontes são perdidas (V)

$V_{\text{DROPOUT}}$  é a tensão na qual os IEDs conectados são desligados (V)

$P_{\text{LOAD}}$  é o valor medido da carga conectada (W)

Por exemplo, se o dispositivo tinha uma capacitância total instalada de 1/8 de Farad, o tempo de *ride-through* para tensões de entrada nominais e cargas conectadas é mostrado na Fig. 8.

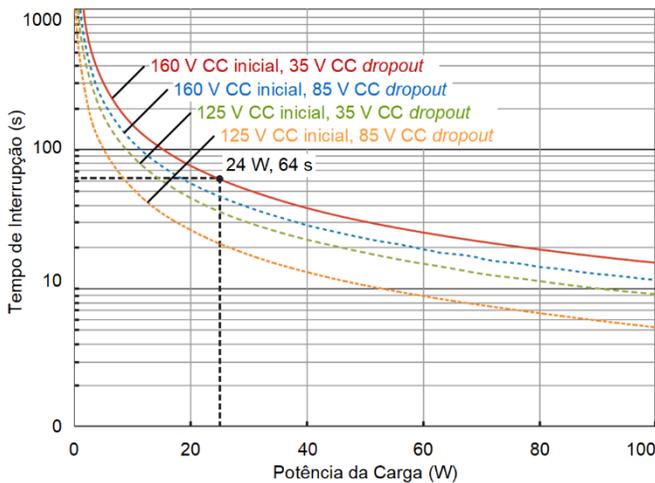


Fig. 8. Tempo de Ride-Through para Perda Total de Fonte do DCFA.

#### E. Tensão de Saída do DCFA

As três entradas CA para o DCFA são isoladas por transformador e retificadas em ponte de onda completa. Um reator de filtragem então alisa a CA retificada. As saídas do retificador acionam o mesmo barramento CC interno da entrada CC. Sem carga, o banco de capacitores é carregado quase até o pico da entrada CA mais alta, menos a queda de tensão entre os diodos. Com 120 V CA aplicados a uma ou mais entradas CA, a tensão de saída sem carga atinge cerca de  $120 \cdot \sqrt{2} - 2 = 168$  V CC.

Conforme a carga aumenta, a tensão de saída varia, de acordo com o que está mostrado na Fig. 9. Com todas as fontes alimentando o barramento de saída comum, a tensão de entrada mais alta disponível acionará a saída.

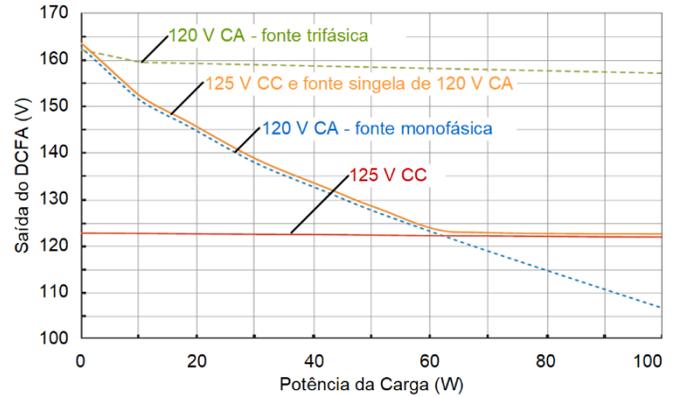


Fig. 9. Tensão de Saída do DCFA para Várias Tensões de Entrada e Cargas.

Embora muitas faixas de tensão da fonte de alimentação do relé de proteção possam acomodar uma ampla tensão de entrada, muitos outros componentes que consomem energia de controle podem não tolerar tensão mais alta, como luzes de indicação e entradas de controle binárias. É importante garantir que todos os componentes alimentados pelo DCFA possam tolerar as tensões aplicadas. Por exemplo, um relé tem uma fonte de alimentação de 48/125 V CC com um valor máximo de 140 V CC. Outra opção de fonte de alimentação no mesmo relé é 125/250 V CC, que permite tensões de até 300 V CC.

#### F. Disponibilidade Aumentada

Ter várias fontes de entrada em paralelo aumenta a disponibilidade da saída CC. Para quantificar esse aumento, a análise de árvore de falhas pode ser usada para comparar a disponibilidade de energia CC para suprir o relé e a abertura do disjuntor.

A referência [19] explica o uso detalhado da análise de árvore de falhas para sistemas elétricos. Usando o trabalho de [19], o tempo médio entre falhas (MTBF) de sistemas CC é determinado em 55 anos, assumindo que os alarmes de perda CC são monitorados e respondidos em menos de um dia. No entanto, conforme declarado anteriormente, algumas falhas de bateria podem ser ocultas por vários motivos e, assim, impedir que a bateria seja capaz de produzir corrente momentânea suficiente para abrir os disjuntores.

Usando (2) para determinar a indisponibilidade total de sistemas CC, assumindo que 99 por cento das falhas são detectadas e resolvidas em 1 dia e 1 por cento das falhas foram ocultas e apenas detectadas durante a manutenção em uma base anual é mostrado em (3).

$$q = \frac{T}{MTBF} \quad (2)$$

$$q = \left( \frac{1}{MTBF} \right) \cdot \left( 99\% \cdot \left( \frac{1}{365} \right) + 1\% \cdot \left( \frac{MI}{2} \right) \right) = 140 \cdot 10^{-6} \quad (3)$$

onde:

$q$  é a indisponibilidade

$T$  é o tempo médio de inatividade por falha

$MTBF$  é o tempo médio entre falhas

$MI$  é o intervalo de tempo de manutenção

Se a subestação tiver fontes CA adicionais que normalmente são menos confiáveis que a fonte CC, elas podem ser combinadas no DCFA. Nesta comparação, uma indisponibilidade de  $1000 \cdot 10^{-6}$  é assumida para qualquer fonte CA individual. Uma árvore de falha simples pode ser construída para analisar a indisponibilidade de fonte de energia ao usar um DCFA, como mostrado na Fig. 10. Tomando o produto das quatro entradas, a indisponibilidade total torna-se  $1,4 \cdot 10^{-13}$ , o que é uma melhoria significativa sobre o sistema CC sozinho.

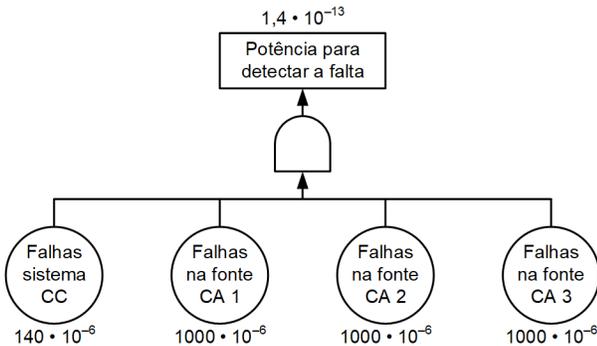


Fig. 10. Árvore de Falhas de Indisponibilidade para uma Incapacidade de Detectar uma Falha com Uso de Fontes Múltiplas.

Tomando outro cenário onde o evento de nível superior é a corrente momentânea disponível para desarmar um disjuntor e adicionando o armazenamento de energia DCFA na árvore de falhas anterior, obtém-se o resultado mostrado na Fig. 11. Supondo uma indisponibilidade conservadora de  $50 \cdot 10^{-6}$  para o armazenamento de energia do DCFA, ao incluir esta fonte de energia adicional, a indisponibilidade cai para  $7 \cdot 10^{-18}$ , o que é uma melhoria substancial em relação ao sistema CC, fornecendo apenas energia CC para relés e para abertura de disjuntor. Isso elimina essencialmente a probabilidade de que um disjuntor não seja capaz de abrir devido a falhas da energia de controle, mesmo para falhas do sistema CC e erros humanos.

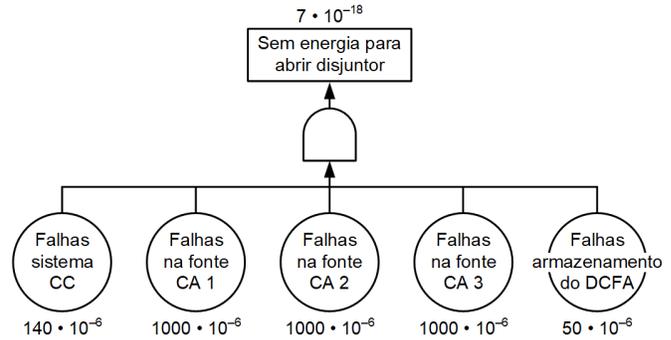


Fig. 11. Árvore de Falhas de Indisponibilidade para uma Incapacidade de Fornecer Energia para Desarmar um Disjuntor.

## V. APLICAÇÕES QUE SE BENEFICIAM DE FONTE CC CONFIÁVEL

### A. Subestação com um Único Sistema CC

#### 1) Proteção: Assegurando Energia para o Relé e Outro DCFA para Abrir um Disjuntor

Para uma instalação com um único sistema CC, a aplicação de DCFA aos diversos circuitos CC aumentaria a disponibilidade de energia para os IEDs e circuitos de disparo. Conforme mostrado na Fig. 12, os DCFAs são aplicados a circuitos individuais. A vantagem de aplicar um DCFA no nível dos circuitos é que ele permite uma aplicação escalonável e flexível.

Para uma estação com proteção redundante, um engenheiro pode decidir instalar o DCFA apenas em um dos relés redundantes. Para um sistema primário duplo, o DCFA pode ser aplicado a ambos os sistemas. As fontes CA do Sistema A podem ser diversas das fontes CA do Sistema B, aumentando ainda mais a diversidade das fontes de alimentação.

Em outra aplicação comum, o DCFA pode ser aplicado ao disjuntor principal e aos relés se os engenheiros estiverem preocupados apenas em disparar o disjuntor principal no caso de perda total do sistema CC.

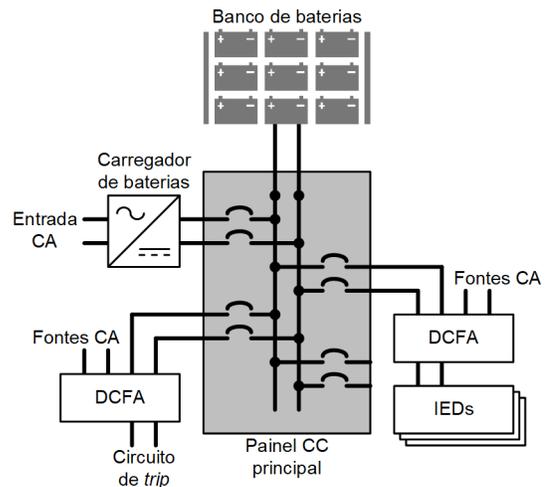


Fig. 12. DCFAs Aplicados a Circuitos Individuais.

## 2) Localizando Falta à Terra no Sistema CC

Conforme discutido anteriormente, a maneira simples de localizar faltas à terra em sistemas CC é desligar os circuitos momentaneamente para ver se a falta à terra permanece. Com os DCFAs conectados a todos os circuitos ramificados que alimentam os IEDs durante essa interrupção momentânea, as diversas fontes de energia conectadas aos IEDs impedem a reinicialização do dispositivo enquanto localizam faltas à terra no sistema CC.

## 3) Automação: Provendo Diversidade de Fontes para Equipamentos de Comunicações e SCADA

Usar o DCFA para alimentar a unidade terminal remota (UTR) e o equipamento de comunicação externo permite que a UTR permaneça em serviço durante uma interrupção de fonte CC. Isso permitiria à UTR enviar o alarme correto para o centro de operação em vez de desligar. Sem o DCFA, a UTR desligaria antes de transmitir o alarme correto e os operadores não saberiam a gravidade do problema, porque veriam apenas uma perda de comunicação com a UTR.

## B. Potência para Partida de Gerador Superar o Ride-Through

Para subestações que têm um gerador de *backup*, o DCFA pode ser usado para garantir que os equipamentos de proteção e controle possam sobreviver a um evento de perda do sistema CC. Se o sistema CC for perdido, os DCFAs podem fornecer energia de reserva para o banco de baterias enquanto o gerador é partido para fornecer energia para a subestação.

## C. Potência para o Religamento do Serviço Auxiliar Superar o Ride-Through

Para uma subestação que depende do serviço auxiliar suprido por uma fonte que está sujeita a eventos de abertura e religamento da linha, o DCFA pode ajudar a aumentar a confiabilidade, provendo outra fonte de energia para o relé e corrente de disparo no caso de falha do sistema CC; por exemplo, uma subestação alimentada por uma linha de subtransmissão radial ou uma subestação que depende de uma linha de distribuição de outra estação para suprir o seu serviço auxiliar. Usando (1) ou a Fig. 8, o *ride-through* para proteção poderia ser projetado com duração suficiente para permitir que a subestação remota que está fornecendo serviços auxiliares possa religar.

## D. Manutenção das Baterias

A manutenção periódica deve ser realizada para garantir a operação adequada e a vida útil dos bancos de baterias da subestação. Um teste periódico é o teste de capacidade. Neste teste, o banco pode ser isolado, uma carga aplicada e as taxas de descarga comparadas a uma *baseline* (patamar mínimo) [20]. O teste de descarga pode ser demorado e eventualmente introduzir uma falha no sistema CC. Em subestações com sistemas CC duplos, isolar um banco de baterias é relativamente simples. Na maioria dessas instalações, há uma seleção entre os dois sistemas CC, garantindo a capacidade de fazer uma transição de dois bancos de baterias para um único banco [12].

Para subestações com um único sistema CC, a tarefa de manutenção é mais difícil. Para completar o teste de descarga,

o único banco de baterias deve ser desconectado do resto do sistema, o que é um problema porque a maioria dos carregadores de bateria não são dimensionados para fornecer altas correntes momentâneas para desligamento, como em um evento de desligamento de barra. Se ocorrer uma falha durante esse período, o carregador de bateria pode não fornecer corrente suficiente para acionar todas as bobinas de disparo. Isso pode colocar o pessoal em perigo e danificar o equipamento. Mesmo se o carregador for dimensionado para fornecer picos de carga momentâneos, o sistema CC ainda será dependente da confiabilidade da alimentação CA para o carregador de bateria.

Para mitigar esses riscos, durante a manutenção da bateria em sistemas CC singelos, um banco de baterias portátil é transportado para o local e conectado ao sistema CC antes de desconectar o banco a ser mantido. Esses bancos portáteis podem ser tão pequenos quanto um carrinho ou tão grandes quanto um trailer pesando centenas de quilogramas.

O DCFA fornece uma solução simples para manutenção de baterias em subestações com um único sistema CC. Se os DCFAs mostrados na Fig. 13 foram instalados na estação alimentando os IEDs e as bobinas de disparo, um banco de bateria portátil não precisa ser transportado para o local ou conectado ao sistema CC durante a manutenção. O DCFA fornece a energia armazenada para ativar as bobinas de disparo e as múltiplas entradas trazem diversidade de fontes de alimentação. Essa abordagem é muito mais segura, eliminando a necessidade de mover baterias pesadas de chumbo-ácido e conectar o banco portátil a um painel de distribuição ativo.

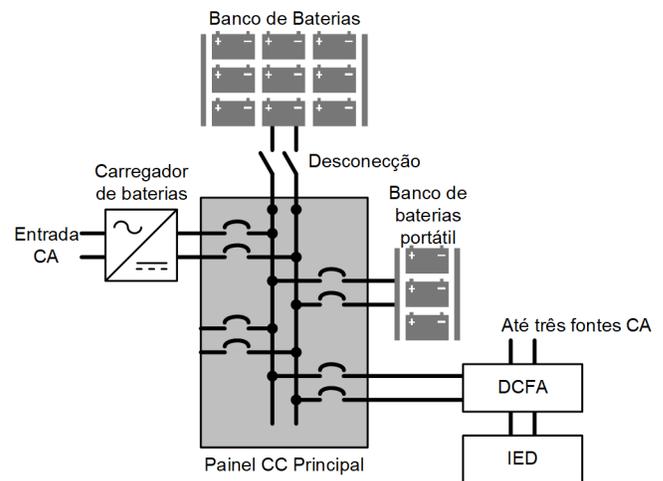


Fig. 13. DCFA Usado para Manutenção de Baterias.

## E. Substituição do Esquema de Transferência de Fontes

Os esquemas de transferência de fontes são frequentemente usados em aplicações de média e baixa tensão que não possuem um sistema CC. A Fig. 14 mostra uma aplicação típica desse esquema. Dois transformadores de serviços auxiliares (TSAs) conectados a fontes separadas fornecem energia para uma chave de transferência automática ou manual (CTA). A saída da CTA fornece energia para um sistema de fontes de alimentação ininterrupta (UPS). A saída do UPS é usada para alimentar IEDs e fornecer energia para operar bobinas de disparo. Em um evento de perda de fonte, a chave de transferência detecta a perda da fonte e inicia uma transferência.

O tempo entre perda da fonte, detecção e transferência pode ser de um ou vários segundos, dependendo da CTA. Durante esse tempo, o UPS deve fornecer toda a energia ao sistema CC usando a energia armazenada nas baterias.

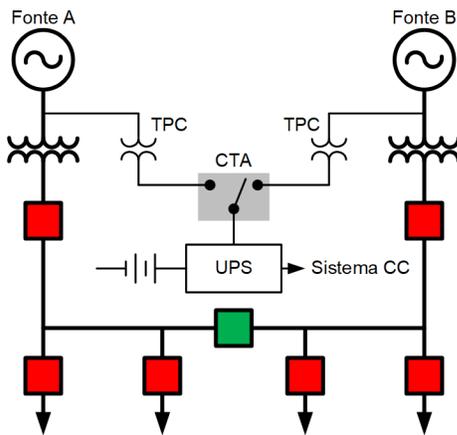


Fig. 14. Esquema de Transferência de Fontes.

A CTA e o UPS podem ser substituídos por um DCFA, conforme mostrado na Fig. 15. Nesta aplicação, os TPCs são conectados diretamente ao DCFA. A saída do DCFA é então usada para alimentar IEDs e bobinas de disparo do disjuntor. O esquema DCFA tem várias vantagens sobre o esquema CTA/UPS, incluindo o seguinte:

- O DCFA oferece uma transferência sem interrupções entre as fontes.
- O monitoramento de perda de fonte não é necessário.
- É livre de manutenção.
- São necessários menos dispositivos porque o DCFA substitui o CTA, os relés de monitoramento de subtensão, o UPS e a bateria do UPS.
- As baterias são eliminadas por questões ambientais.

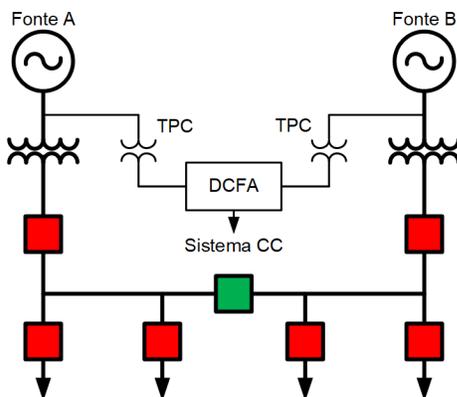


Fig. 15. Esquema com DCFA.

#### F. Substituição de UTC

Conforme discutido anteriormente, as unidades de *trip* capacitivas (UTCs) são empregadas em locais que não possuem sistema CC confiável. Nessas aplicações, a UTC é carregada com a alimentação CA do TSA, conforme mostrado na Fig. 16. Normalmente, relés eletromecânicos eram usados porque não exigiam alimentação CC para operar. O TSA pode ter uma queda de tensão por uma falta no sistema elétrico, portanto, se

for necessário um *trip*, a UTC fornece a energia para operar a bobina de disparo do disjuntor.

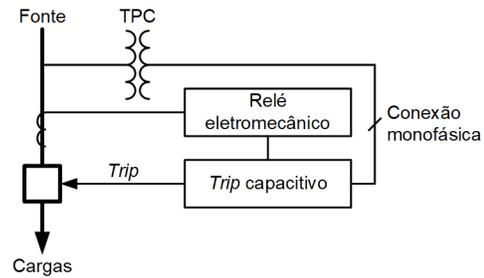


Fig. 16. Operação de UTC.

Com o tempo, os relés eletromecânicos podem ser substituídos por relés baseados em microprocessadores. Isso introduz um elo fraco na proteção porque o relé requer energia CC permanente para fornecer proteção e, conforme declarado anteriormente, pode sair de serviço rapidamente para interrupções no sistema CC. Com a possível queda de tensão devido a uma falta no sistema elétrico, este esquema corre o risco de o relé sair de serviço antes de poder emitir um comando de disparo. Se ele puder emitir um comando de *trip* antes de sair de serviço, geralmente não haverá sinalização nem registro de eventos.

Usar o DCFA como uma fonte de alimentação do relé (Fig. 17) e sua energia para operar a bobina de disparo do disjuntor tem várias vantagens. O maior benefício é que existem três entradas CA. Isso permite que todas as três fases do TSA sejam utilizadas. Pelo menos uma das fases de entrada permanecerá saudável durante todas as falhas, exceto trifásicas. Em um curto-circuito trifásico, o dispositivo fornece energia para manter o relé em serviço e operar a bobina de desarme. Se a alimentação de controle não retornar, o dispositivo fornecerá alimentação de *ride-through* suficiente para manter o relé alimentado por tempo suficiente para salvar o relatório de eventos e as sinalizações em sua memória não volátil. Depois que a energia é devolvida à estação, os técnicos podem recuperar os registros para analisar o evento.

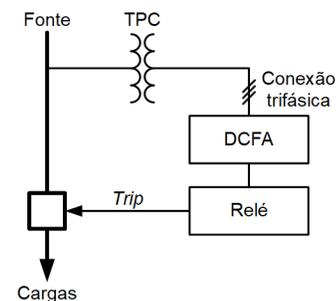


Fig. 17. Substituindo UTCs por DCFAs.

#### G. Eventos de Abertura-Fechamento-Abertura

As UTCs geralmente contêm energia suficiente para desarmar o disjuntor uma vez, antes de serem recarregadas pelo TSA. Com os grandes capacitores de armazenamento de energia no DCFA, ele tem energia suficiente para desarmar um disjuntor, esperar vários segundos, tentar um religamento e ainda ter energia suficiente para desarmar o disjuntor uma

última vez se a falta for permanente. A Fig. 18 mostra a tensão de saída do DCFA para um evento de abertura-fechamento-abertura, e pode-se ver que o relé emite um comando de *trip* no mesmo momento em que a fonte é perdida. A tensão de saída diminui à medida que o relé retira energia do DCFA. Em 10 segundos após o disparo, o relé emite um religamento, que dispara novamente o disjuntor se houver uma falta permanente. Observe que os disjuntores devem ser capazes de armazenar energia mecânica suficiente para operar para um evento de abertura-fechamento-abertura. A Fig. 19 mostra uma tentativa de religamento bem-sucedida e a tensão de saída voltando aos valores nominais.

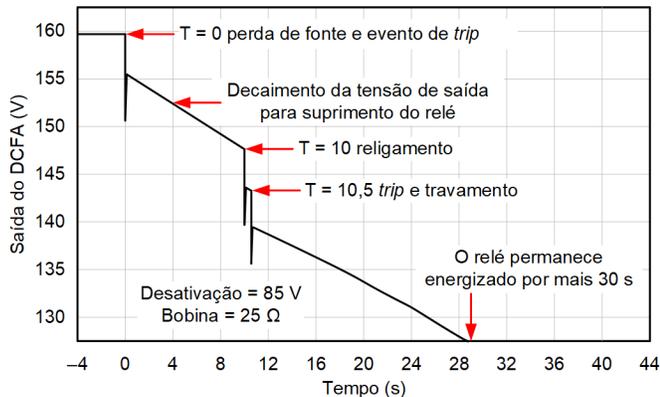


Fig. 18. Tensão de Saída de um DCFA em Evento de Abertura-Fechamento-Abertura.

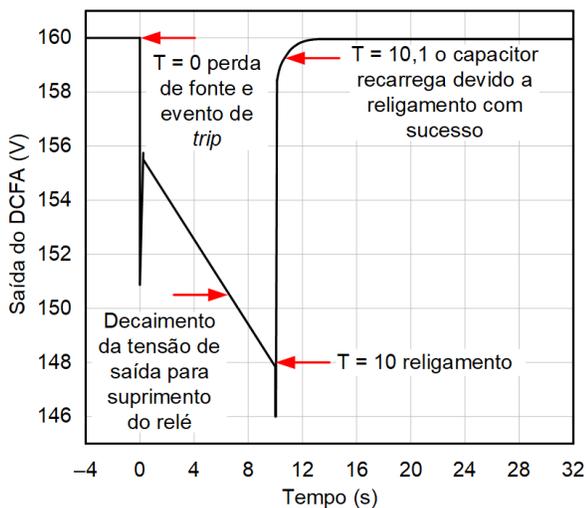


Fig. 19. Tensão de Saída de um DCFA em Evento de Abertura-Fechamento e Retorno ao Normal.

## VI. MELHORES PRÁTICAS PARA APLICAÇÃO DE DCFA

### A. Usando TPs como Fonte

Para locais que não têm fontes de alimentação auxiliar adicionais, com cuidado, o DCFA pode ser alimentado por TPs. Por exemplo, se uma subestação tem apenas uma fonte monofásica de serviço auxiliar, conectar o serviço auxiliar ao DCFA não garante maior diversidade de fonte porque o mesmo serviço auxiliar é aquele que alimenta o carregador de baterias.

No entanto, se um TP na subestação for eletromagneticamente grande o bastante, todas as três fases podem ser conectadas ao DCFA em vez do serviço auxiliar CA.

Os engenheiros devem entender o dimensionamento do TP e os efeitos que o DCFA pode introduzir nos sistemas de proteção no caso de o DCFA apresentar um curto-circuito na saída ou devido a correntes de *inrush* que carregam o capacitor. Pode não ser desejável usar o DCFA em TPs que também são usados para esquemas de proteção baseados em tensão, especialmente esquemas de proteção de alta velocidade, como elementos de distância.

### B. Saída CC Não Regulada

A saída não regulada do DCFA requer a garantia de que todos os componentes a ela conectados podem lidar com os níveis de tensão na saída do dispositivo. Por exemplo, se conectado a uma fonte trifásica de 120 V, a tensão de saída pode ser 160 V CC, que pode ser mais alta do que as tensões limites de algumas lâmpadas de sinalização, fontes de alimentação de relé e entradas binárias.

## VII. CONCLUSÃO

Com a mudança contínua para relés digitais em esquemas de proteção e controle, a confiabilidade dos serviços auxiliares CC torna-se ainda mais crítica do que antes. A alimentação permanente para interrupções curtas no sistema de alimentação é fundamental para garantir que os sistemas de controle e proteção estejam funcionando.

As subestações têm muitas fontes de energia disponíveis que sozinhas não são consideradas confiáveis o suficiente para serem usadas como fonte de energia de sistemas CC. Ao combinar várias das fontes de energia disponíveis nas subestações em uma única saída CC confiável, podemos aumentar a disponibilidade dos IEDs a ela conectados. Além disso, o uso de grandes capacitores de armazenamento de energia no barramento CC de saída fornece energia contínua significativa se todas as fontes de entrada forem perdidas, reduzindo possíveis reinicializações durante quedas de tensão.

Este artigo mostra como a diversidade de fontes e o armazenamento de energia quase eliminam a possibilidade de falhas de energia no sistema CC resultantes de falhas no equipamento da bateria e erro humano.

Os bancos de baterias atendem a vários propósitos no serviço auxiliar CC. Eles isolam o sistema de proteção dos curtos-circuitos que podem remover a fonte de alimentação justamente quando o sistema de proteção é mais necessário. O capacitor de armazenamento de energia assegura capacidade de superar o *ride-through* para as fontes de alimentação do sistema de proteção e bobinas de disparo, que é muito mais longo do que os tempos normais de eliminação de faltas. Isso abre mais aplicações onde dispositivos de proteção modernos podem ser usados em instalações sem bateria.

Os bancos de baterias fornecem energia confiável durante falhas do sistema de carregamento ou de seu suprimento, o que permite que os técnicos tenham tempo para fazer reparos. As diversas fontes CA que suprem o DCFA dão cobertura a este cenário. A energia auxiliar CC está disponível enquanto a

subestação estiver energizada, mesmo se o carregador ou sua fonte não estiverem disponíveis.

Os bancos de baterias fornecem alta corrente momentânea para abertura de disjuntores, a qual o carregador não apresenta confiabilidade para suprir. O capacitor de armazenamento de energia do DCFA também fornece alta corrente. Isso atenua os seguintes problemas:

- Falhas ocultas na bateria, que podem impedi-la de fornecer alta corrente.
- Erro humano que resulta na desconexão acidental da bateria por um curto período de tempo ou indefinidamente.
- Situações em que a bateria é temporariamente retirada de serviço durante as atividades de teste e manutenção. O carregador supre o consumo contínuo das fontes de alimentação do dispositivo de proteção, e pode-se confiar no capacitor do DCFA para fornecer a alta corrente momentânea de *trip*, se necessário.

O cenário restante para o qual o banco de baterias depende é superar um evento de subestação desenergizada por um longo período. No entanto, os operadores do sistema elétrico estão familiarizados com este cenário e têm protocolos para restaurar o serviço auxiliar antes de energizar uma subestação que ficou fora de serviço por um tempo maior do que o projetado para a bateria. O DCFA atenua e melhora o desempenho para todos os outros problemas esperados para a bateria da subestação ou os dispositivos de *trip* por capacitor.

Este artigo também destaca várias aplicações que se beneficiam do aumento da disponibilidade de energia de controle ao implementar um DCFA. O dispositivo proposto fornece uma maneira simples, confiável, econômica e flexível de aumentar a confiabilidade da energia de controle CC sem uma ação muito invasiva, requisitos de manutenção adicionais ou preocupações ambientais.

## VIII. REFERENCES

- [1] J. Blackburn and T. Domin, *Protective Relaying: Principles and Applications*, 3rd ed., CRC Press, Boca Raton, FL, 2007.
- [2] D. Costello, "Fly Safe and Level: Customer Examples in Implementing Dual Primary Protection Systems," June 2007. Available: selinc.com
- [3] "Power Substation Explosion," YouTube, uploaded by ymarkone, December 2005. Available: <https://youtu.be/ZCzdPFJ4tog>.
- [4] H. J. Altuve Ferrer and E. O. Schweitzer, III (eds.), *Modern Solutions for Protection, Control, and Monitoring of Electric Power Systems*, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., Pullman, WA, 2010.
- [5] NERC, "Protection System Reliability: Redundancy of Protection System Elements," November 2008. Available: nerc.com.
- [6] IEEE Std. 485-2010, *Recommended Practice for Sizing Lead-Acid Batteries for Stationary Applications*.
- [7] J. McDowall, "Lies, Damned Lies and Statistics: The Statistical Treatment of Battery Failures," proceedings of Battcon, January 2005. Available: semanticscholar.org.
- [8] IEEE Std. 1375-1998, *Guide for the Protection of Stationary Battery System*.
- [9] Megger, *Battery Testing Guide*, Doc. AD0009DE, 2009. Available: instrumart.com.
- [10] *SEL-751 Feeder Protection Relay Instruction Manual*. Available: selinc.com.
- [11] *SEL-451 Protection, Automation, and Bay Control System Instruction Manual*. Available: selinc.com.

- [12] M. Thompson and D. Wilson, "Auxiliary DC Control Power System Design for Substations," presented at the 60th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, March 2007.
- [13] Square D, "Sure-Trip Capacitor Trip Units," Instruction Bulletin No 44008-704-01A, July 1997. Available: schneider-electric.com.
- [14] IEEE Std. 1184-2006, *Guide for Batteries for Uninterruptible Power Supply Systems*.
- [15] IEEE Std. 1818-2017, *Guide for the Design of Low-Voltage Auxiliary Systems for Electric Power Substations*.
- [16] IEEE Std. C57.13-2008, *Standard Requirements for Instrument Transformers*.
- [17] G. LaLiberte and M. Kaderbhai, "The 10-Second Start: NFPA 110 Type 10 Starting Requirements for Generator Set Applications," April 2015. Available: earthsafe.com.
- [18] IEEE Std. C37.90.1-2012, *Standard for Surge Withstand Capability (SWC) Tests for Relays and Relay Systems Associated with Electric Power Apparatus*.
- [19] E. O. Schweitzer, III, B. Fleming, T. J. Lee, and P. M. Anderson, "Reliability Analysis of Transmission Protection Using Fault-Tree Methods," proceedings of the 24th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 1997.
- [20] IEEE Std. 450-2010, *Recommended Practice for Maintenance, Testing, and Replacement of Vented Lead-Acid Batteries for Stationary Applications*.

## IX. BIOGRAFIAS

**Dr. Edmund O. Schweitzer, III** é reconhecido como pioneiro em proteção digital e possui o grau de Fellow do IEEE, um título concedido a menos de um por cento dos membros do IEEE. Em 2002, foi eleito membro da National Academy of Engineering dos Estados Unidos da América. O Dr. Schweitzer recebeu a 2012 Medal in Power Engineering, o maior prêmio concedido pelo IEEE, por sua liderança em revolucionar o desempenho de sistemas elétricos com equipamentos de proteção e controle baseados em computador. Em 2019, o Dr. Schweitzer foi incluído no National Inventors Hall of Fame por sua invenção do primeiro relé de proteção digital. O Dr. Schweitzer recebeu o prêmio Regents' Distinguished Alumnus e o Graduate Alumni Achievement Award da Washington State University e o prêmio Purdue University Outstanding Electrical and Computer Engineer. Ele também recebeu doutorado honorário da Universidad Autónoma de Nuevo León, em Monterrey, México, e da Universidad Autónoma de San Luis Potosí, em San Luis Potosí, México, por suas contribuições para o desenvolvimento de sistemas elétricos de potência em todo o mundo. Ele escreveu dezenas de artigos técnicos nas áreas de projeto e confiabilidade de relés digitais e detém mais de 200 patentes em todo o mundo relacionadas a proteção, medição, monitoramento e controle de sistemas elétricos de potência. O Dr. Schweitzer recebeu seu bacharelado e mestrado em engenharia elétrica pela Purdue University, e seu doutorado pela Washington State University. Ele atuou no corpo docente de engenharia elétrica da Ohio University e da Washington State University e, em 1982, fundou a Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. (SEL) para desenvolver e fabricar relés de proteção digital e produtos e serviços relacionados.

**David E. Whitehead** é diretor de operações da Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. (SEL), onde supervisiona as operações globais da empresa. Por mais de uma década, Whitehead liderou a Divisão de Pesquisa e Desenvolvimento da SEL, uma equipe multidisciplinar de 800 pessoas responsável pela pesquisa, projeto, desenvolvimento e teste de sistemas que gerenciam, monitoram e controlam a infraestrutura elétrica crítica. Líder reconhecido em segurança cibernética de sistemas de controle industrial e de empresas de energia elétrica, Whitehead testemunhou perante o Senado dos EUA e a Comissão Reguladora de Energia Federal sobre a importância da inovação e da proteção contra ataques cibernéticos. Ele fez apresentações em várias conferências de segurança cibernética e escreveu dezenas de artigos sobre o assunto. Desde que ingressou na SEL em 1994, ele tem sido um impulsionador do desenvolvimento de produtos e talentos e contribuído para o desenvolvimento do fluxo constante de invenções que surgiram da SEL. Ele recebeu mais de 73 patentes em todo o mundo. Whitehead recebeu seu BSEE da Washington State University e seu MSEE do Rensselaer Polytechnic Institute. Ele é membro sênior do IEEE e Engenheiro Profissional registrado em Washington, Nova York, Michigan e Carolina do Norte.

**Michael J. Thompson** recebeu seu BS, magna cum laude, da Bradley University em 1981 e um MBA da Eastern Illinois University em 1991. Após se formar, ele serviu por quase 15 anos no Serviço Público Central de Illinois (agora AMEREN). Antes de ingressar na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. (SEL) em 2001, ele trabalhou na Basler Electric. Ele é atualmente um Fellow Engineer da SEL Engineering Services, Inc. Ele é um membro sênior do IEEE, Officer of the IEEE PES Power System Relaying and Control Committee, ex-coordenador do Substation Protection Subcommittee of the PSRC e recebeu o Standards Medallion da IEEE Standards Association em 2016. Michael é um engenheiro profissional registrado em seis jurisdições, foi um contribuidor do livro de referência, Soluções Modernas para o Controle de Proteção e Monitoramento de Sistemas Elétricos de Energia, publicou vários artigos técnicos e artigos de revistas e possui três patentes associadas a proteção e controle do sistema de potência.

**Krishnanjan Gubba Ravikumar** recebeu seu grau de PhD pela Washington State University, grau de MSEE pela Mississippi State University e seu grau de BSEE pela Anna University, Índia. Ele ingressou na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. (SEL) em 2009 como engenheiro associado em pesquisa e desenvolvimento de sistemas elétricos de potência. Atualmente, ele trabalha como engenheiro principal na SEL em Pullman, Washington, e lidera uma equipe de pesquisa e um departamento de desenvolvimento de relés de proteção. Ele foi selecionado para participar do U.S. National Academy of Engineering (NAE) 2019 Annual U.S. Frontiers of Engineering Symposium. Ele é membro sênior do IEEE, autor de vários artigos técnicos e detém patentes nas áreas de proteção, controle e monitoramento de sistemas elétricos de potência.

**Austin Wade** recebeu seu BS em engenharia eletrônica e elétrica, summa cum laude, da California State University, Sacramento, em 2013. Ele ingressou na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. (SEL) em 2012. Atualmente, ele é um engenheiro de aplicação sênior em pesquisa e desenvolvimento. Ele tem experiência em projeto de sistemas de proteção e controle, esquemas de proteção baseados em comunicação, automação de subestações, testes e manutenção. Antes de receber seu bacharelado, ele trabalhou para uma empresa de testes elétricos e manutenção como técnico de testes e eletricitista certificado. Ele é um engenheiro profissional registrado no estado da Califórnia e é membro da IEEE Power and Energy Society.

**Bruce Hall** recebeu seu diploma de bacharel em engenharia elétrica pelo Georgia Institute of Technology, Atlanta em 1982 e seu diploma de mestre em engenharia elétrica pela University of Colorado Boulder em 2014. Ele ingressou na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. (SEL) em 1998 e atualmente trabalha como engenheiro principal em projetos de eletrônica de potência e funções de consultoria. Ele é membro da IEEE Power Electronics Society. Seus interesses incluem *averaged switch modeling*, modelagem baseada em física e controle de circuitos e sistemas de eletrônica de potência.

**Sean Robertson** recebeu seu bacharelado e mestrado em engenharia elétrica pela Universidade de Idaho, Moscou, em 2011 e 2016, respectivamente. Ele ingressou na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. (SEL) em 2008, onde ocupou vários cargos em pesquisa e desenvolvimento. Atualmente, ele atua como engenheiro líder de desenvolvimento na SEL. Seus interesses incluem conversão de energia *off-line* CC-CC, projeto de sinais analógicos e mistos e simulações.