Esquema de Rejeição de Cargas Flexível e de Alta Velocidade Usando *Crosspoint Switch*

Will Allen e Tony Lee
Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.

Apresentado na
60th Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference
Atlanta, Georgia, EUA
3–5 de maio de 2006

Apresentado previamente na
5th Annual Clemson University Power Systems Conference, março de 2006

Originalmente apresentado na
32nd Annual Western Protective Relay Conference, outubro de 2005

Traduzido para o português em fevereiro de 2017

Esquema de Rejeição de Cargas Flexível e de Alta Velocidade Usando *Crosspoint Switches*

Will Allen e Tony Lee, *Schweitzer Engineering Laboratories*

***Resumo*—Os sistemas de rejeição de cargas industriais devem levar em conta os critérios de estabilidade do sistema de potência, assim como os requisitos de operação dos processos industriais. Instalações industriais de diversos tipos podem ser operadas de várias formas, o que aumenta ou diminui o grau de importância das cargas elétricas individuais da instalação. Um sistema efetivo de rejeição de cargas industriais deve fornecer um método que aumente a sobrevivência tanto do sistema elétrico de potência quanto do processo industrial que está sendo alimentado.**

As aplicações de esquemas de rejeição de cargas industriais podem ser enormemente simplificadas com o uso da tecnologia baseada na interconexão ativa de múltiplos pontos ("crosspoint switches," classe proteção). Devido a sua natureza, crosspoint switches são ideais para aplicações de rejeição de cargas onde são necessárias decisões rápidas e seguras. As tabelas de rejeição de cargas podem ser facilmente implementadas através dos crosspoint switches, que variam dinamicamente com base nas condições do sistema e prioridades de operação da usina. Usando crosspoint switches inteligentes, o sistema de comunicação pode ser totalmente supervisionado de forma a evitar que sinais falsos de rejeição de cargas e interrupções nas comunicações causem trips falsos.

Este artigo analisa o conceito e aplicação de crosspoint switches de alta velocidade para implementação do esquema de rejeição de cargas numa instalação industrial. Este projeto está sendo atualmente implementado numa refinaria de petróleo e usa: um processador da lógica de rejeição de cargas, processadores das lógicas de proteção com funções dos crosspoint switches, relés de proteção microprocessados que fornecem as entradas de status e medições das grandezas analógicas, e um sistema de gerenciamento de energia que fornece entradas para a tabela de cargas do operador. O esquema de rejeição de cargas usa um computador no nível da subestação para processar o estado atual do sistema de potência (ex., geração, cargas, topologia, etc.) e inserir os dados da tabela de cargas a serem rejeitadas nos três crosspoint switches. Diversas contingências definidas nas lógicas dos relés podem ativar o esquema de rejeição de cargas, incluindo trips dos geradores, trips das linhas de interligação com a concessionária de energia elétrica, trips do disjuntor de interligação de barras e condições de subfreqüência.

I. Introdução

Numa instalação industrial, existem duas preocupações distintas em relação à implementação do esquema de rejeição de cargas (*load-shedding scheme*): estabilidade do sistema de potência e sobrevivência do processo. A estabilidade do sistema de potência requer o desligamento rápido de uma quantidade apropriada de cargas (kW) em resposta a um evento específico no sistema de potência. A capacidade de sobrevivência do processo requer que cargas individuais (isto é, motores, aquecedores, etc.) sejam selecionadas de forma inteligente para minimização do efeito da rejeição das cargas na operação da usina. A seleção ideal das cargas a serem desligadas vai variar de acordo com a topologia do sistema de potência e com o modo atual de operação do processo industrial. Por exemplo, uma bomba pode ser de grande importância em algumas situações operacionais, porém pode ser menos importante em outras condições de operação. Este artigo analisa um método usado para abordar as diferente preocupações associadas ao esquema de rejeição de cargas, referentes tanto ao sistema de potência quanto ao processo industrial. A configuração do sistema de potência e os requisitos específicos do esquema de rejeição de cargas usados como referência neste artigo foram adaptados de um projeto recente que usou este método.

A. Visão Geral do Sistema de Potência

A Figura 1 mostra o diagrama unifilar simplificado do sistema de potência da usina usada como referência neste artigo. A instalação é alimentada por quatro geradores locais e duas linhas de interligação com a concessionária de energia elétrica local. Cada fonte alimenta uma das duas barras num arranjo de barra dupla de 20 kV. As duas barras podem ser conectadas juntas através de um disjuntor de interligação. Vários alimentadores conectam os centros de cargas da instalação à barra de 20 kV. Cada um desses alimentadores pode ser conectado a qualquer uma das barras de 20 kV. As cargas de toda a instalação são conectadas aos conjuntos de manobra de 6 kV e aos centros de controle de motores de 380 V.

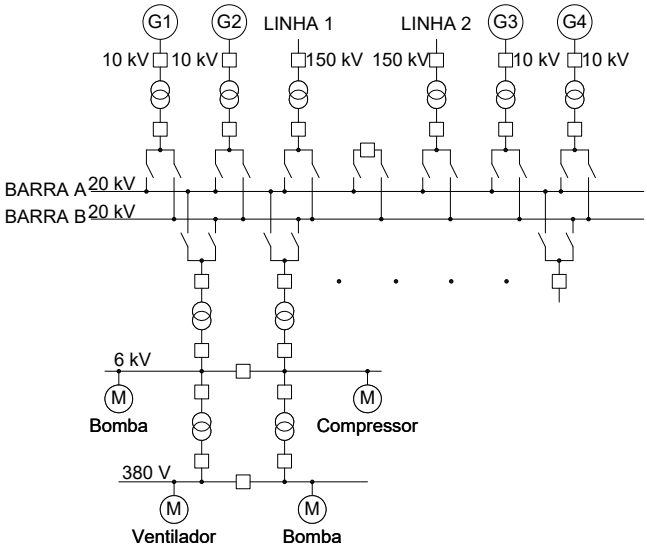

Figura 1. Diagrama Unifilar Simplificado do Sistema de Potência da Usina

B. Visão Geral do Sistema de Rejeição de Cargas

Um sistema de rejeição de cargas deve executar as seguintes funções gerais:

- Dar início à rejeição de cargas em resposta a sinais de disparos ("triggers") causados por contingencias específicas.
- Desligar rapidamente a quantidade adequada de cargas para manter a estabilidade.
- Causar o mínimo de distúrbio possível no processo de produção.
- Evitar operações desnecessárias.

O sistema de rejeição de cargas inclui dois esquemas diferentes para iniciar a rejeição das cargas. O esquema primário é baseado no déficit de potência previsto resultante de eventos com desligamentos predefinidos (isto é, abertura da fonte ou abertura do disjuntor de interligação). O esquema secundário é baseado nos limites de subfreqüência. Cada valor limite corresponde a uma quantidade de cargas que deve ser desligada antes que o sistema de potência possa se recuperar da condição de subfreqüência. Este artigo se refere a esses eventos de trip e condições de subfreqüência como contingências.

Os requisitos detalhados mostrados a seguir refinam ainda mais a lista de requisitos gerais:

- Calcular dinamicamente a quantidade de cargas a ser rejeitada para cada contingência primária.
- Usar uma quantidade de cargas a ser rejeitada, ajustável pelo operador, para cada contingência secundária.
- Selecionar dinamicamente cargas individuais a serem rejeitadas com base em prioridades ajustáveis, consumo de potência medido e topologia atual do sistema de distribuição de energia conectado.
- Suportar a operação do sistema de potência com o disjuntor de interligação de 20 kV aberto ou fechado.
- Usar métodos seguros com elevada imunidade a ruídos para transmissão dos sinais das cargas a serem rejeitadas e dos disparos gerados pelas contingências.
- Responder ao disparo de uma contingência em menos de 80 milissegundos.
- Supervisionar todos os sinais através de indicadores da qualidade das comunicações.

II. Arquitetura Conceitual

A estrutura da solução é análoga à estrutura do problema. A solução deve ser bastante flexível para acomodar os requisitos de sobrevivência do processo. A solução deve também ser determinística e de alta velocidade para acomodar os requisitos necessários para manter a estabilidade do sistema de potência. Por essa razão, a solução é dividida em duas categorias funcionais distintas: cálculos pré-evento e ações pós-evento. A Figura 2 ilustra a arquitetura conceitual do sistema de rejeição de cargas.

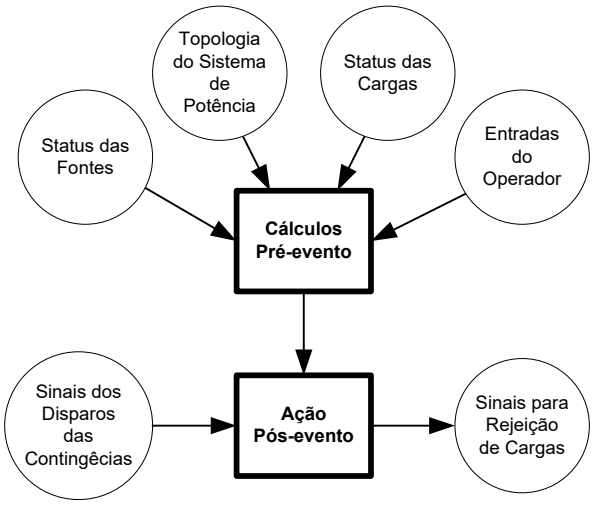

Figura 2. Arquitetura Conceitual do Sistema de Rejeição de Cargas

A. Cálculos Pré-evento

O sistema de rejeição de cargas coleta e processa os dados seguintes para selecionar dinamicamente as cargas que vão ser rejeitadas para cada contingência possível.

- *Status* das Fontes: Inclui o *status* online de cada gerador e linha de interligação com a concessionária de energia elétrica, bem como a barra de 20 kV na qual a fonte está atualmente conectada. Adicionalmente, inclui também a potência atual de saída de cada fonte.
- Topologia do Sistema de Potência: Inclui o *status* dos disjuntores e chaves seccionadoras localizadas ao longo do sistema de distribuição.
- *Status* das Cargas: Inclui o *status* de operação e consumo atual de potência de cada carga individual.
- Entradas do Operador: Inclui uma lista de prioridades ajustáveis pelo operador. O operador atribui um nível exclusivo de prioridade a cada carga do sistema. Adicionalmente, isso inclui parâmetros ajustáveis pelo operador referentes às capacidades das fontes.

O sistema de rejeição de cargas usa esses cálculos para determinar de forma inteligente quais as cargas a serem rejeitadas, e determina um grupo separado de cargas para cada contingência possível. Imagine os cálculos pré-evento como diversos cenários de "E se"—"What if"—(ex., e se o gerador 1 abrir, e se a linha 1 da concessionária abrir, e se houver subfreqüência na Barra A, etc.). Os cálculos são efetuados antes do disparo gerado por qualquer contingência; logo, eles não influenciam na velocidade da ação pós-evento.

Os cálculos pré-evento não precisam ser efetuados em alta velocidade. Na verdade, o sistema de rejeição de cargas filtra todas as medições analógicas para propiciar uma representação uniforme do fluxo de potência do sistema. Os cálculos pré-evento são executados a cada 2 segundos para atualizar dinamicamente a tabela com as cargas a serem rejeitadas, a qual será usada pelas ações pós-evento de alta velocidade.

B. Ações Pós-evento

As ações pós-evento são executadas em alta velocidade em resposta aos sinais de disparo gerados por contingências. Quando o sistema de rejeição de cargas detecta uma contingência (ex., um gerador foi desligado), o sistema desliga o grupo de cargas correspondente à contingência, conforme determinado nos cálculos pré-evento. Todas as decisões sobre quais cargas devem ser desligadas já foram tomadas antes de o sistema de rejeição de cargas detectar qualquer contingência; logo, a ação pós-evento pode ser executada rapidamente.

C. Alocação das Funções dos Dispositivos

As duas categorias funcionais distintas possuem diferentes requisitos para os dispositivos. Os cálculos pré-evento requerem flexibilidade na programação para implementação do algoritmo de seleção de cargas. As ações pós-evento requerem um processamento determinístico e de alta velocidade, bem como canais de comunicações seguros para transmissão dos sinais de rejeição de cargas e dos disparos gerados pelas contingências. A solução usa uma plataforma computacional no nível da subestação, operando um software CLP para implementação dos cálculos pré-evento, além de processadores das lógicas de proteção com recursos dos *crosspoint switches* para implementação das ações pós-evento.

Os cálculos intensivos dos processadores são executados na plataforma computacional instalada no nível da subestação. O sistema de rejeição de cargas introduz os resultados desses cálculos no *crosspoint switch* dos três processadores das lógicas de proteção, cada um deles operando a lógica Booleana em alta velocidade.

Os sinais dos disparos das contingências e da rejeição das cargas são transmitidos em alta velocidade, ao longo da instalação, através de um protocolo seguro normalmente usado para esquemas associados à proteção. Quando o sistema de rejeição de cargas detecta um disparo gerado por uma contingência, o sistema mapeia o conteúdo do *crosspoint switch*, enviando-o diretamente para os canais de comunicação para abertura das cargas predeterminadas.

III. Arquitetura Física

A arquitetura física do sistema de rejeição de cargas é formada por dispositivos dedicados que fornecem as funções centrais e por dispositivos periféricos que fornecem os dados de *status* e medição.

A. Componentes Centrais

Uma plataforma computacional no nível da subestação atua como um processador da lógica do esquema de rejeição de cargas ("load-shedding processor" – LSP). O LSP e os três processadores das lógicas de proteção fornecem as funções centrais. Além disso, os módulos remotos de entradas/saídas (I/O) estão localizados através da instalação e são conectados aos processadores lógicos via cabos de fibra-óptica. A Figura 3 ilustra a arquitetura física do núcleo do sistema de rejeição de cargas.

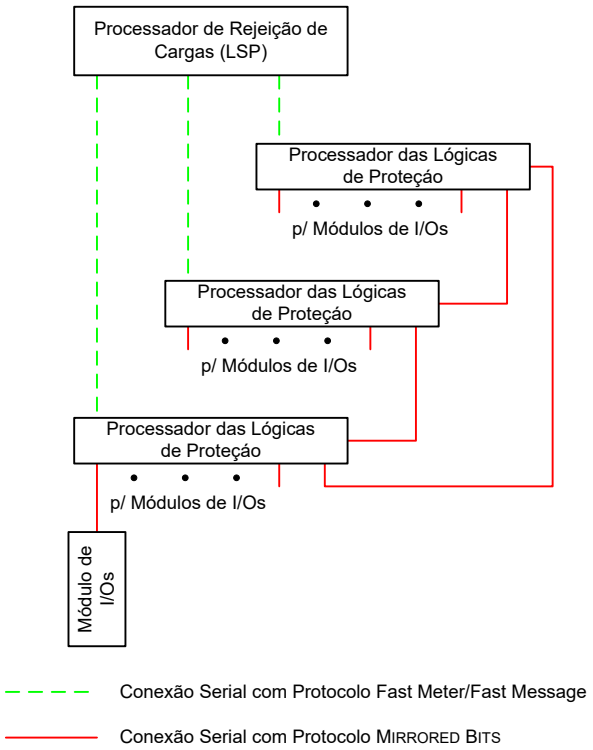

Figura 3. Arquitetura Física do Sistema de Rejeição de Cargas

O LSP usa um protocolo (Fast Meter/Fast Message) adequado ao sistema supervisório de controle e aquisição de dados (SCADA) para se comunicar com cada um dos processadores lógicos via cabos seriais de cobre. A tabela de cargas determinada dinamicamente é introduzida no *crosspoint switch* de cada um dos processadores lógicos. Adicionalmente, o link de comunicação suporta diversas mensagens de comando e *status*.

Os processadores lógicos se comunicam com vários módulos remotos de I/Os localizados através da instalação. Esses links de comunicação seguros e de alta velocidade consistem de cabos de fibra-óptica e usam o protocolo (MIRRORED BITS®) adequado à proteção. Os sinais dos disparos gerados pelas contingências e de rejeição das cargas são transmitidos através desses links de comunicação.

Os processadores lógicos se comunicam uns com os outros usando o mesmo protocolo MIRRORED BITS. Os três processadores lógicos comunicam os sinais dos disparos das contingências, assim como diversos pontos de *status*, para assegurar que os três processadores respondam como um sistema único de rejeição de cargas.

B. Componentes Periféricos

Os relés microprocessados protegem o sistema de potência. A maioria desses dispositivos também fornece dados para o sistema de gerenciamento de energia da usina, que são usados nas funções do SCADA. Um subgrupo formado pelos relés da usina também contém dados importantes para o sistema de rejeição de cargas. O sistema de rejeição de cargas usa esses relés como fontes de dados essenciais do sistema de potência.

A instalação inclui diversas subestações. Uma plataforma computacional no nível da subestação atua, em cada subestação, como um processador de dados da subestação ("substation data processor" – SDP). O SDP e varios relés de proteção fornecem os dados necessários de *status* e medição. A Figura 4 ilustra a arquitetura física do sistema que coleta os dados dentro de cada subestação.

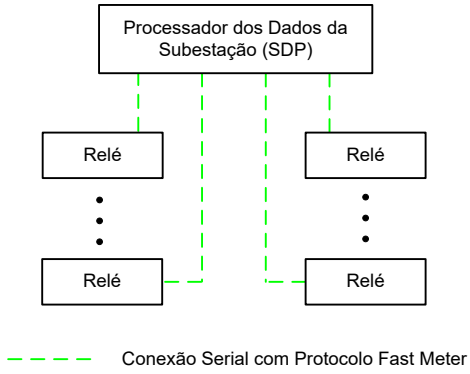

Figura 4. Arquitetura Física Dentro de Cada Subestação

O SDP usa o protocolo Fast Meter para se comunicar com cada um dos relés de proteção da subestação via cabos seriais. O SDP também coleta e organiza os dados de status e medição.

O sistema de gerenciamento de energia inclui uma interface homem máquina (IHM) normalmente adequada para uso com o SCADA. O sistema de rejeição de cargas compartilha a IHM com o sistema de gerenciamento de energia. Displays relativos ao esquema de rejeição de cargas foram integrados ao projeto da interface operador - gerenciamento de energia global.

C. *Rede LAN da Usina*

Uma rede local ("local area network" – LAN) baseada na Ethernet efetua a troca de dados entre o processador de dados de cada subestação (SDP) e o processador de rejeição de cargas (LSP). O sistema de rejeição de cargas compartilha esta LAN com o sistema de gerenciamento de energia da usina. O sistema de gerenciamento de energia usa a LAN para funções do SCADA, restituição de relatórios específicos dos relés tais como oscilografia e seqüência de eventos, e gerenciamento dos ajustes dos relés. Este artigo não discute o sistema de gerenciamento de energia. Contudo, vale observar que a LAN, a IHM e muitos dos componentes de cada subestação foram requeridos para as funções de proteção ou gerenciamento de energia. Esses dispositivos não foram adicionados especificamente para suportar o esquema de rejeição de cargas.

Cada SDP da instalação envia uma mensagem para o LSP para atualizar todos os valores relevantes de status e medição da subestação. A Figura 5 ilustra a arquitetura física da LAN que efetua a troca de dados entre os SDPs e o LSP.

A LAN consiste de quatro *switches* Ethernet robustos, conectados numa topologia em anel via cabos de fibra-óptica. Cada processador do sistema (LSP ou SDP) possui duas portas Ethernet. Cada porta é conectada a um *switch* Ethernet diferente no anel. A interface do operador também tem duas portas Ethernet conectadas a diferentes *switches* no anel. Com este projeto da rede, um cabo ou um *switch* Ethernet pode falhar sem que afete a capacidade de o sistema efetuar a troca de dados.

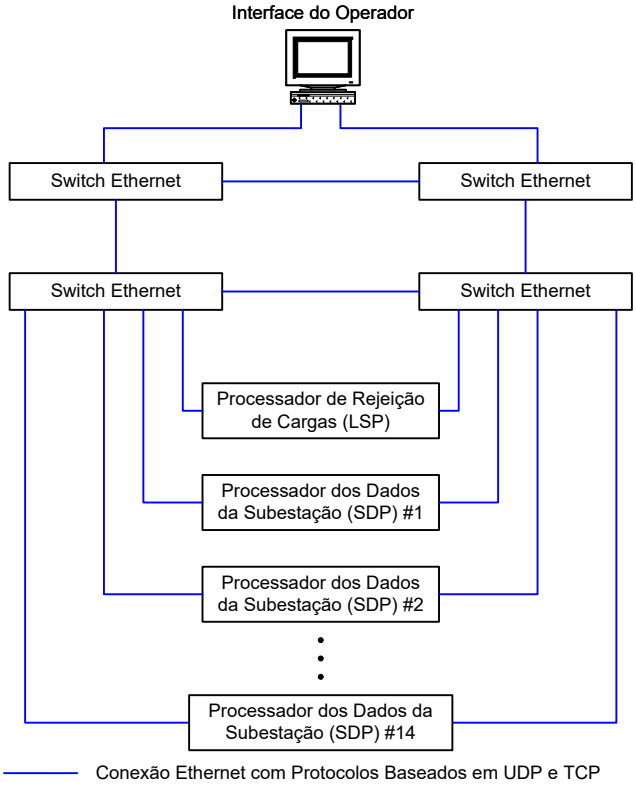

Figura 5. Arquitetura Física Entre Subestações

IV. Detalhes das Contingências

A. *Contingências Primárias*

O esquema primário é baseado no déficit de potência previsto que seria causado por uma contingência. Existem onze (11) contingências primárias que podem dar início ao processo de rejeição de cargas:

- Trip do disjuntor de 10 kV do Gerador 1
- Trip do disjuntor de 20 kV do Gerador 1
- Trip do disjuntor de 10 kV ou 20kV do Gerador 2
- Trip do disjuntor de 10 kV do Gerador 3
- Trip do disjuntor de 20 kV do Gerador 3
- Trip do disjuntor de 10 kV do Gerador 4
- Trip do disjuntor de 20 kV do Gerador 4 Trip do disjuntor de 150 kV ou 20 kV da linha 1 de interligação com a concessionária
- Trip do disjuntor de 150 kV ou 20 kV da linha 2 de interligação com a concessionária
- Trip do disjuntor de interligação de barras de 20 kV (Barra A sobrecarregada)
- Trip do disjuntor de interligação de barras de 20 kV (Barra B sobrecarregada)

Duas contingências são usadas para cada um dos geradores 1, 3 e 4 devido à presença de carga em derivação entre o disjuntor de 10 kV e o disjuntor de 20 kV desses geradores. Embora a capacidade de geração remanescente vá ser a mesma para as duas contingências, a carga remanescente

vai ser diferente. Veja a Figura 6: se o disjuntor de 10 kV abrir, o sistema perde 10 MW de geração, embora a carga do sistema permaneça inalterada. Contudo, se o disjuntor de 20 kV abrir, o sistema perde 10 MW de geração e 2 MW de carga. Logo, a quantidade de carga adicional que pode precisar ser rejeitada vai ser diferente e esses dois eventos devem ser considerados como contingências diferentes.

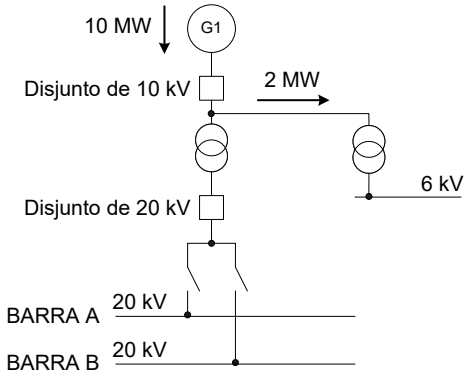

Figura 6. Gerador com Carga em Derivação

O Gerador 2 tem uma contingência que inclui o trip do disjuntor de 10 kV ou o trip do disjuntor de 20 kV. O sistema de rejeição de cargas considera os dois eventos como sendo uma contingência única, pois a capacidade remanescente e a carga remanescente vão ser as mesmas para ambos os eventos.

Cada linha de interligação com a concessionária de energia elétrica é também considerada como sendo uma contingência única. Não existe carga em derivação entre o disjuntor de 150 kV e o disjuntor de 20 kV. Portanto, a capacidade remanescente e a carga remanescente vão ser as mesmas para ambos os eventos de trip do disjuntor de 150 kV e trip do disjuntor de 20 kV.

Dependendo da configuração do sistema de potência, a potência pode ser transferida através do disjuntor de interligação de 20 kV. A potência pode ser transferida da Barra A para a Barra B ou vice-versa. Se o disjuntor de interligação abrir, não haverá perda de geração. Contudo, poderá haver déficit de potência gerado em uma das duas barras de 20 kV. A Figura 7 ilustra um caso onde a Barra B vai ser submetida a um déficit de potência se o disjuntor de interligação abrir.

Nesse exemplo, os geradores 1, 2 e 3 estão conectados à Barra A com uma capacidade total de geração de 30 MW. O Gerador 4 está conectado à Barra B com capacidade de geração de 10 MW. Ao mesmo tempo, uma carga de 25 MW está conectada à Barra A e uma carga de 15 MW está conectada à Barra B. Com o disjuntor de interligação fechado, ocorre a transferência de 5 MW da Barra A para a Barra B para equilíbrio da geração com a carga. No caso de abertura do disjuntor de interligação, a Barra A vai ter geração abundante para suportar a carga de 25 MW conectada à Barra A. Contudo, a Barra B vai ter somente 10 MW de geração para alimentar 15 MW de carga. Se não houver capacidade adicional disponível, a Barra B vai precisar rejeitar cargas para lidar com esse déficit de 5 MW. Para facilitar a programação do processador de rejeição de cargas, a contingência do trip do disjuntor de interligação de 20 kV foi separada em duas contingências. Uma incorpora o caso em que a Barra A tem um déficit de potência e a outra inclui o caso em que a Barra B tem um déficit de potência.

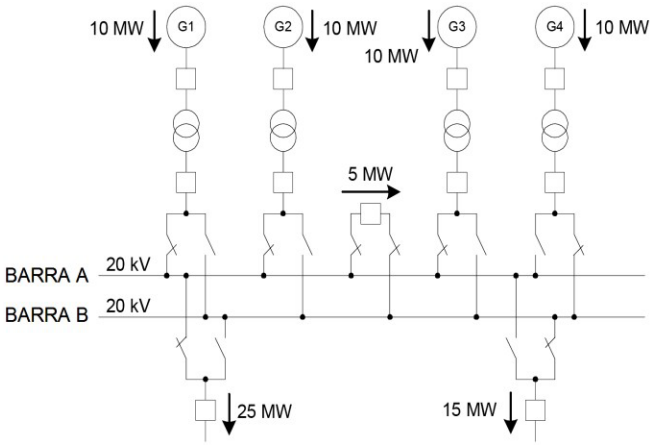

Figura 7. Contingência de Trip do Disjuntor de Interligação de Barras de 20 kV (Barra B sobrecarregada)

B. Contingências Secundárias

O esquema secundário é baseado nos limites de subfreqüência. Cada valor limite corresponde a uma quantidade de carga que precisa ser desligada antes que o sistema de potência possa se recuperar de uma condição de subfreqüência. As contingências secundárias que podem dar início à rejeição de cargas são as seguintes:

- Subfreqüência nível 1 detectada na Barra A de 20 kV
- Subfreqüência nível 2 detectada na Barra A de 20 kV
- Subfreqüência nível 1 detectada na Barra B de 20 kV
- Subfreqüência nível 2 detectada na Barra B de 20 kV

A simulação do sistema de potencia ajudou a determinar a quantidade real de carga requerida para cada nível de subfreqüência. O operador do sistema pode adequar essas quantidades com base na experiência operacional.

V. Seleção Dinâmica de Cargas

A solução deve ser bastante flexível para acomodar os requisitos de sobrevivência dos processos. O sistema de rejeição de cargas executa diversos cálculos pré-evento para selecionar dinamicamente um grupo de cargas a serem desligadas para cada contingência que possa ocorrer.

Para determinar o grupo das cargas que vão ser desligadas, o processador da lógica de rejeição de cargas executa o algoritmo básico, mostrado na Figura 8, a cada 2 segundos.

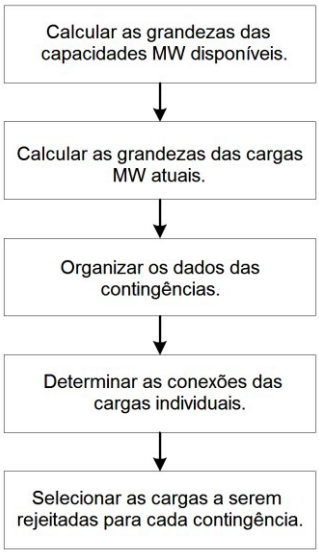

Figura 8. Algoritmo Básico de Seleção de Cargas

As seções seguintes descrevem cada etapa do algoritmo básico mostrado na Figura 8.

A. Grandezas das Capacidades Disponíveis

Conforme mostrado na Figura 9, o processador de rejeição de cargas (LSP) determina três grandezas das capacidades disponíveis para uso posterior no algoritmo: a capacidade conectada à Barra A, a capacidade conectada à Barra B e a capacidade total conectada às duas barras.

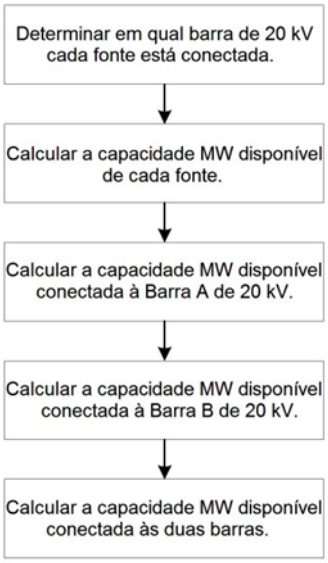

Figura 9. Cálculo das Grandezas das Capacidades Disponíveis

O processador de rejeição de cargas (LSP) examina as entradas de *status* dos disjuntores e chaves seccionadoras para determinar se cada fonte está conectada à Barra A ou à Barra B ou está desligada.

A capacidade de cada fonte é aquela que pode ser fornecida pela fonte quando solicitada ("on demand"). Para as linhas de interligação com a concessionária, a grandeza da capacidade disponível é introduzida manualmente na interface do operador. Tipicamente, a capacidade é igual à característica nominal do transformador. O operador pode inserir um valor da capacidade maior do que a característica nominal do transformador, permitindo que o transformador seja sobrecarregado para salvar o processo. Para os geradores, a capacidade é calculada com base num valor incremental introduzido na interface do operador. Este parâmetro é um valor incremental da capacidade que o gerador pode fornecer no caso de ocorrência de uma contingência. O sistema de rejeição de cargas adiciona esse parâmetro à potência atual de saída do gerador para obter a capacidade disponível do gerador.

O LSP examina cada fonte do sistema. Se a fonte estiver ligada e conectada à Barra A, o LSP vai incluir a capacidade da fonte na capacidade conectada à Barra A. Se a fonte estiver conectada à Barra B, o LSP vai incluir a capacidade da fonte na capacidade conectada à Barra B. O LSP então soma a capacidade da Barra A e a capacidade da Barra B para determinar a capacidade total do sistema.

B. Grandezas das Cargas Atuais

Conforme mostrado na Figura 10, o LSP determina três grandezas das cargas para uso posterior no algoritmo: a carga conectada à Barra A, a carga conectada à Barra B e a carga total conectada às duas barras.

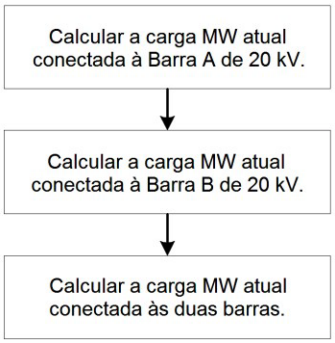

Figura 10. Cálculo das Grandezas das Cargas Atuais

O LSP calcula a carga conectada a cada uma das barras de 20 kV com base nas fontes conectadas. Em algum momento, a carga total em uma barra é igual à potência total em MW que está entrando na barra. O LSP examina cada fonte do sistema. Se a fonte estiver ligada e conectada à Barra A, o LSP inclui a saída atual da fonte na carga conectada à Barra A. Se a fonte estiver ligada e conectada à Barra B, o LSP inclui a saída atual da fonte na carga conectada à Barra B. O LSP também examina a transferência de potência atual através do disjuntor de interligação de 20 kV. Se a transferência for da Barra A para a Barra B, a transferência de potência é somada à carga conectada à Barra B e subtraída da carga conectada à Barra A. Se a transferência for da Barra B para a Barra A, então a transferência de potência é somada à carga conectada à Barra A e subtraída da carga conectada à Barra B.

C. Dados das Contingências

O sistema de rejeição de cargas deve predeterminar o conjunto de cargas a serem desligadas para cada possível contingência que possa ocorrer. O LSP organiza os dados em termos das contingências possíveis, conforme ilustrado na Figura 11.

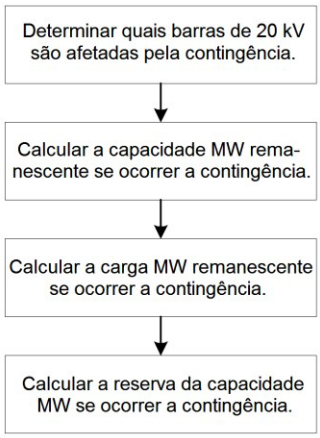

Figura 11. Organização dos Dados das Contingências

Baseando-se no status de cada fonte do sistema e no estado atual do disjuntor de interligação de 20 kV, o LSP determina qual das duas barras será afetada por cada contingência. Por exemplo, se o Gerador 1 estive ligado e conectado à Barra A e o disjuntor de interligação de 20 kV estiver aberto, a contingência trip do disjuntor de 10 kV do Gerador 1 vai afetar a Barra A e não a Barra B. Entretanto, se o disjuntor de interligação de 20 kV estiver fechado, a mesma contingência vai afetar a Barra A e a Barra B

O LSP examina quais barras são afetadas por cada contingência e calcula a capacidade máxima remanescente para cada contingência. Por exemplo, se o sistema de rejeição de cargas determinar que a contingência trip do disjuntor de 10 kV do Gerador 1 afeta a Barra A e não a Barra B, a capacidade remanescente para essa contingência é igual à capacidade conectada à Barra A menos a capacidade do Gerador 1.

O LSP examina quais barras são afetadas por cada contingência e calcula a carga perdida e a carga remanescente para cada contingência. Por exemplo, se o sistema de rejeição de cargas determinar que a contingência trip do disjuntor de 20 kV do Gerador 1 afeta a Barra A e não a Barra B, a carga remanescente para essa contingência é igual à carga conectada à Barra A menos qualquer carga que vai ser perdida se a contingência trip do disjuntor de 20 kV do Gerador 1 ocorrer.

O LSP então calcula a reserva para cada contingência , subtraindo a carga remanescente da capacidade remanescente.

$$\text{Reserva}_{\text{Contingência}} = \text{Capacidade}_{\text{Contingência}} - \text{Carga}_{\text{Contingência}} \qquad (1)$$

Se a reserva resultante for positiva, essa contingência não requer a rejeição de cargas. Se a reserva resultante for negativa, haverá um déficit de potência se essa contingencia ocorrer. Nesse caso, o LSP seleciona uma quantidade de cargas que seja suficiente para lidar com esse déficit.

D. Conexões de Cargas Individuais

Para selecionar de forma inteligente as cargas a serem rejeitadas de acordo com algumas circunstâncias, o LSP tem de determinar qual a barra de 20 kV que alimenta cada carga "rejeitável."

Conforme ilustrado na Figura 12, o LSP examina a topologia do sistema de distribuição de energia para identificar a barra de 20 kV que alimenta cada carga. As cargas estão conectadas aos cubículos de 6 kV e 380 V existentes na usina. Cada uma dessas barras de tensão mais baixa pode ser alimentada por um dos dois alimentadores. O sistema de rejeição de cargas coleta e analisa os estados dos disjuntores e chaves seccionadoras para determinar em qual barra de 20 kV cada carga está conectada.

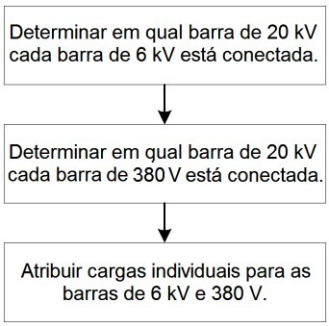

Figura 12. Determinação das Conexões de Cargas Individuais

A Figura 13 ilustra uma conexão típica da carga de um motor ao sistema de distribuição de energia. Os dispositivos de chaveamento entre a barra de 20 kV e o motor são identificados de S1 até S14.

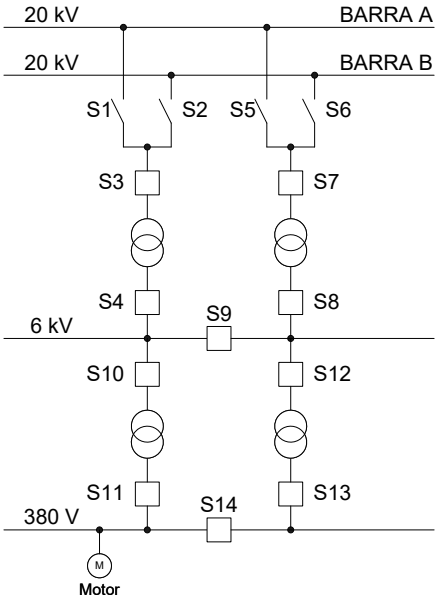

Figura 13. Conexão de uma Carga à Barra de 20 kV

Existem oito caminhos possíveis para conexão do motor a uma barra de 20 kV.

- S1-S3-S4-S10-S11
- S2-S3-S4-S10-S11
- S1-S3-S4-S9-S12-S13-S14

- S2-S3-S4-S9-S12-S13-S14
- S5-S7-S8-S9-S10-S11
- S6-S7-S8-S9-S10-S11
- S5-S7-S8-S12-S13-S14
- S6-S7-S8-S12-S13-S14

Os estados dos dispositivos de chaveamento são coletados nos relés de proteção instalados ao longo do sistema. O LSP então monitora as comunicações com cada relé pertinente para determinar se o estado coletado é válido.

O algoritmo tem início na barra de 20 kV e verifica cada dispositivo de chaveamento em série para identificar qual a barra de 20 kV que está alimentando cada uma das barras de tensão mais baixa. Existem três resultados possíveis para cada barra de tensão mais baixa do sistema:

- Há uma confirmação positiva de qual barra de 20 kV está fornecendo energia.
- Não é possível determinar qual barra de 20 kV está fornecendo energia. Isso pode ser causado por falhas na comunicação com os relés.
- Não há uma confirmação positiva de qual barra de 20 kV está fornecendo energia. Contudo, é possível pressupor uma barra baseando-se na confirmação positiva de que a outra barra não está fornecendo energia.

Os primeiros dois resultados são diretos. O exemplo a seguir, baseado no sistema da Figura 13, ilustra o terceiro resultado.

- Confirmação de que S1, S3, S4 e S10 estão fechados.
- Confirmação de que S2, S9 e S14 estão abertos.
- *Status* de S11 é desconhecido devido a uma falha na comunicação com o relé.

Nesse caso, não há uma confirmação positiva de que a Barra A de 20 kV está alimentando a barra de 380 V com a carga do motor. Entretanto, existe uma confirmação positiva de que a Barra B de 20 kV não está alimentando a carga. Em conseqüência, se o motor está em operação, o LSP vai deduzir que a Barra A de 20 kV está alimentando a carga.

E. Cargas a Serem Rejeitadas

O operador do sistema atribui um nível exclusivo de prioridade a cada carga rejeitável do sistema. Essas prioridades refletem a importância relativa de cada carga em relação à operação da usina. O LSP examina cada carga rejeitável do sistema em ordem de prioridade. Para cada contingência, o LSP examina cada carga para determinar se a mesma deve ser incluída na tabela de cargas a serem rejeitadas. A Figura 14 ilustra o processo de seleção.

O LSP exclui a carga do processo de seleção por qualquer um dos seguintes motivos.

- Canal de comunicação usado para desligar a carga não está funcionando corretamente.
- Canal de comunicação usado para coletar as medições de kW da carga não está funcionando corretamente.
- As comunicações entre o LSP e qualquer um dos três processadores das lógicas de proteção não está funcionando corretamente.
- A medição de kW da carga está fora da faixa.
- Disjuntor de interligação de 20 kV está aberto e o LSP não pode determinar qual barra de 20 kV está fornecendo energia para a carga.
- A contingência que está sendo processada envolve o disjuntor de interligação de 20 kV, e o LSP não pode determinar qual barra de 20 kV está fornecendo energia.

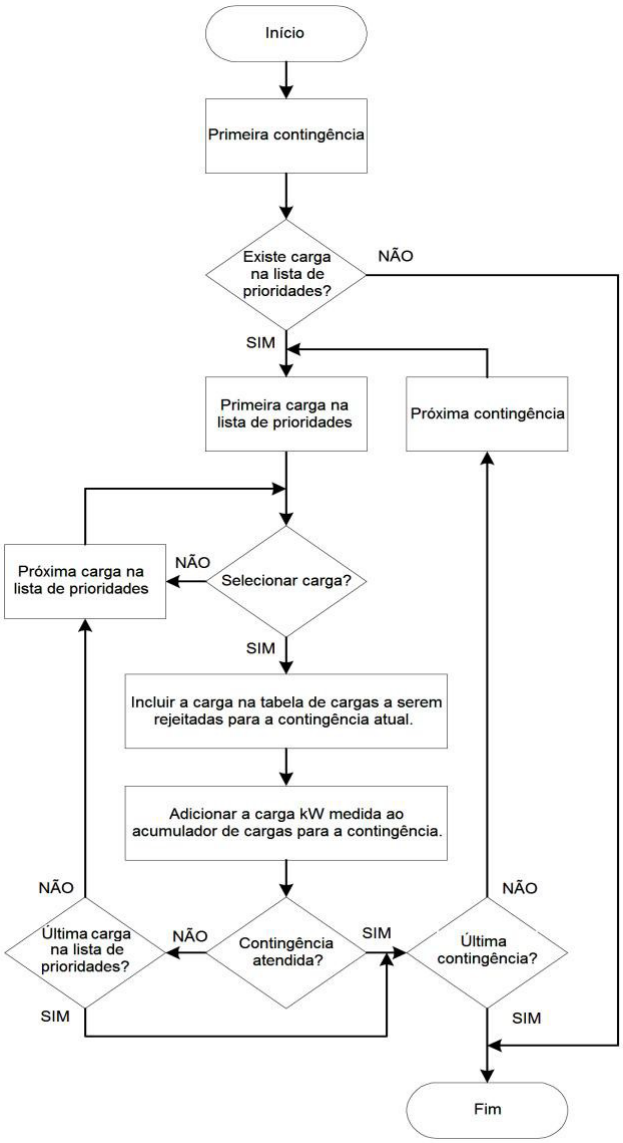

Figura 14. Seleção das Cargas a Serem Rejeitadas para Cada Contingência

Os seguintes critérios devem ser atendidos antes de o LSP incluir uma carga na tabela de cargas a serem rejeitadas.

- A carga não foi excluída.
- A carga está conectada à barra de 20 kV que é afetada pela contingência que está sendo processada.
- Não foram selecionadas cargas suficientes para compensar o déficit de potência calculado para a contingência que está sendo processada.

O LSP acumula a quantidade de cargas selecionadas para cada contingência. A potência real medida para cada carga individual é usada na acumulação. Se a quantidade de cargas

selecionadas for maior ou igual ao déficit de potência calculado, a contingência é atendida e o LSP interrompe a seleção de cargas para essa contingência. O LSP continua o processo de seleção das cargas até que todas as contingências sejam atendidas ou que não existam mais cargas rejeitáveis disponíveis para serem selecionadas. O LSP organiza os resultados desse processo em três tabelas de rejeição de cargas e introduz os valores dessa tabela nos *crosspoint switches* dos três processadores das lógicas de proteção.

VI. Crosspoint Switch

O processador das lógicas de proteção responde rapidamente aos disparos das contingências para rejeitar cargas. O processador lógico recebe os disparos das contingências via links de comunicação Mirrored Bits das conexões de fibra-óptica dos módulos remotos de I/Os. O processador das lógicas combina os disparos recebidos, gerados pela contingências, com as informações contidas na matriz dos *crosspoint switches* para determinar quais as cargas a serem rejeitadas. O processador lógico então envia os sinais das cargas a serem rejeitadas para os módulos remotos de I/Os, novamente usando os links de comunicação Mirrored Bits e fibra-óptica.

O *crosspoint switch* usa regras simples para combinar os disparos recebidos das contingências e a tabela de rejeição de cargas, existente na matriz dos *crosspoint switches*, para gerar os sinais de rejeição das cargas. Conforme mostrado na Figura 15, cada linha da matriz corresponde a um disparo da contingência. Cada coluna corresponde a um sinal de rejeição de cargas. Se ocorrer um disparo gerado pela contingência, o *crosspoint switch* ativa todos os sinais das cargas a serem rejeitadas, inserindo um "1" na linha do disparo da contingência.

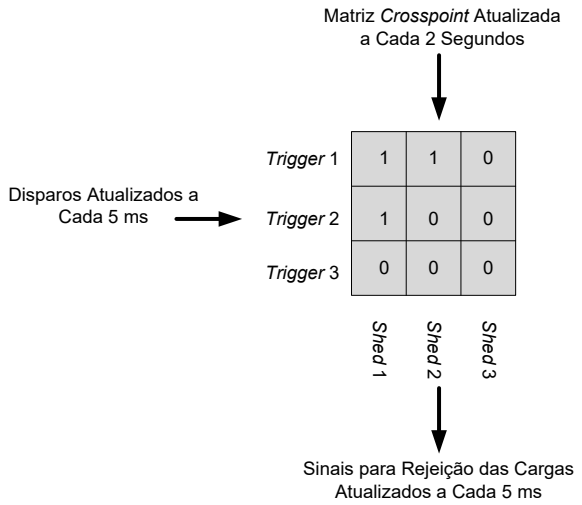

Figura 15. Exemplo da Matriz 3x3 da *Cross Point Switch*

Usando a matriz do exemplo mostrado na Figura 15, quando ocorre o Disparo 1 ("Trigger 1"), são gerados os sinais de Rejeição 1 e Rejeição 2 ("Shed 1 e Shed 2"). Quando ocurre o Disparo 2 ("Trigger 2"), somente é gerado o sinal Rejeição 1 ("Shed 1"). Na matriz desse exemplo, o sinal Rejeição 3 ("Shed 3") nunca é gerado, indicando que a configuração atual do sistema nunca vai causar a rejeição da carga 3. O processador de rejeição de cargas atualiza a matriz a cada 2 segundos, baseando-se na nova tabela de cargas a serem rejeitadas.

A matriz do exemplo da Figura 15 contém somente três disparos (linhas) e três sinais de rejeição de cargas (colunas) para efeito de simplificação. A matriz *crosspoint* real tem 32 disparos ("triggers") e até 120 sinais de rejeição de cargas. O processador de rejeição de cargas efetua o *download* de uma matriz *crosspoint* exclusiva para cada um dos três processadores lógicos mostrados na Figura 3. Os sinais de rejeição de cargas controlam diretamente as transmissões do sistema de comunicação Mirrored Bits em até 15 portas do processador lógico. Alguns dos sinais de rejeição de cargas transportam os disparos das contingências e outras informações de *status* para os outros dois processadores lógicos. A maioria dos sinais de rejeição de cargas passa pelos Módulos Remotos de I/Os que controlam os disjuntores ou contatores do motor para rejeitar cargas.

VII. Rejeição de Cargas de Alta Velocidade

A solução tem de ser de alta velocidade para acomodar os requisitos necessários para manter a estabilidade do sistema de potência. O sistema de rejeição de cargas atende aos requisitos de alta velocidade usando os processadores lógicos e um protocolo de comunicação normalmente usado para implementação de esquemas associados à proteção.

Os processadores lógicos incluem recursos dos crosspoint switches que aceitam a tabela de rejeição de cargas do processador da lógica de rejeição de cargas. Os processadores lógicos executam todos os processamentos necessários para detecção dos sinais de disparo das contingências, executam as funções lógicas e geram os sinais de rejeição das cargas desejadas de acordo com o conteúdo existente no crosspoint switch.

A velocidade com que ocorre uma ação pós-evento no esquema de rejeição de cargas depende dos seguintes tempos:

- Processamento das entradas e saídas dos módulos remotos de I/Os
- Transmissão dos sinais entre o módulo remoto de I/Os e o processador lógico
- Transmissão dos sinais entre os processadores lógicos
- Tempo de execução do programa dos processadores lógicos

O tempo total do sistema, no pior caso, ocorre quando o disparo da contingência tem de passar através de todos os três processadores lógicos. A Tabela 1 resume os tempos envolvidos.

TABELA 1: TEMPOS DE ATRASO DA AÇÃO PÓS-EVENTO

Taref	Tempo (ms)
Processamento das entradas nos módulos remotos de I/Os	4
Transmissão do módulo remoto de I/Os para o processador lógico #1 (Duas mensagens consecutivas requeridas por segurança)	8
Execução do programa no processador lógico #1	10
Transmissão do processador lógico #1 para o processador lógico #2	4
Execução do programa no processador lógico #2	10
Transmissão do processador lógico #2 para o processador lógico #3	4
Execução do programa no processador lógico #3	10
Transmissão do processador lógico #3 para o módulo remoto de I/Os (Duas mensagens consecutivas requeridas por segurança)	8
Processamento das saídas no módulo remoto de I/Os	4
Ponto-a-ponto total	62

Este caso foi testado e o tempo encontrado foi 62 ms, bem abaixo do requisito de 80 ms do projeto usado como exemplo.

VIII. FUNÇÕES ADICIONAIS

Além do processamento das contingências do esquema de rejeição de cargas, os processadores lógicos fornecem as seguintes funções de suporte para o sistema de rejeição de cargas:

- Habilitar/desabilitar o esquema primário
- Habilitar/desabilitar o esquema secundário
- Selo dos sinais de rejeição de cargas
- Resetar o sistema de rejeição de cargas
- Supervisão das comunicações com o LSP, módulos de I/Os e processadores lógicos adjacentes
- Bloqueio do esquema de rejeição de cargas em andamento

A interface do operador fornece a capacidade de habilitar e desabilitar os esquemas primário e secundário. Se um processador lógico detectar um problema nas comunicações com o LSP, ele imediatamente desabilita ambos os esquemas primário e secundário. Cada LSP monitora o *status* "Habilitado/Desabilitado" do esquema de rejeição de cargas dos processadores lógicos adjacentes para garantir que todos os três processadores lógicos confirmem que o sistema está habilitado. Se não houver a confirmação de todos, o esquema é imediatamente desabilitado. Adicionalmente, o esquema é imediatamente desabilitado se falhar o canal de comunicação entre os processadores lógicos adjacentes.

Quando ocorre o disparo de uma contingência, o conteúdo do *crosspoint switch* é enviado para os canais de comunicação da proteção para rejeitar as cargas pré-selecionadas. Cada canal permanece selado para evitar a re-partida das cargas afetadas até que o operador efetue o *reset* do sistema de rejeição de cargas.

O operador pode resetar o sistema de rejeição de cargas através da interface do operador. O LSP recebe o comando de *reset* da interface do operador e envia esse comando para todos os três processadores lógicos. Em seguida, cada processador lógico envia o comando de *reset* para os processadores lógicos adjacentes. Isso permite que o sistema possa ser resetado caso um ou dois dos processadores lógicos não esteja se comunicando com o LSP.

Quando ocorre um evento no sistema de potência, o sistema de potência precisa de um determinado tempo para se estabilizar. Adicionalmente, existe um período de tempo finito necessário para atualização do LSP. Portanto, os processadores lógicos bloqueiam todos os disparos subseqüentes de rejeição de cargas do esquema primário por 60 segundos após o disparo de uma contingência primária, visando permitir que o sistema se estabilize e que novas medições sejam disponibilizadas. O LSP bloqueia o re-cálculo do *crosspoint switch* por 60 segundos após o disparo de qualquer contingência para evitar seleções de cargas erradas.

IX. CONCLUSÕES

As estratégias do esquema de rejeição de cargas para o ambiente de instalações industriais devem levar em conta tanto a estabilidade do sistema de potência quanto os aspectos associados à sobrevivência dos processos. Os requisitos para sobrevivência dos processos requerem uma seleção dinâmica das cargas. A estabilidade do sistema de potência requer um esquema de rejeição de cargas de alta velocidade. Esses requisitos distintos podem ser abordados separadamente usando uma tecnologia que melhor atenda a cada objetivo. O *crosspoint switch* permite que as duas tecnologias efetuem a troca dos dados necessários de forma eficiente. Usando este método, os algoritmos de seleção de cargas podem ser rapidamente implementados no LSP para introduzir os dados de uma ampla faixa de critérios nos *crosspoint switches*.

X. BIOGRAFIAS

Will Allen recebeu seu BSc. em Engenharia Elétrica da University of Alberta em 1993. Ele tem experiência nas áreas de sistemas de controle industriais e automação de sistemas de potência. Ele ingressou na Schweitzer Engineering Laboratories em 2000 como Engenheiro de Automação; atualmente, ocupa a posição de Engenheiro de Aplicação e Integração. É membro do IEEE e é um engenheiro profissional na província de Alberta e estado de Washington.

Tony J. Lee recebeu seu B.S. em Engenharia Elétrica da Washington State University em 1987. Em seguida, Mr. Lee trabalhou na Texas Instruments em Dallas, Texas, de 1987 a 1991, quando ingressou na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. como engenheiro de projetos de hardware. Atualmente, ele ocupa a posição de Engenheiro de Sistemas na SEL. Mr. Lee detém três patentes dos EUA e diversas patentes de outros países sobre supressão de arcos, além de várias patentes em processo.

Copyright © SEL 2005
(Todos os direitos reservados)
20050928
TP6216-01