



**XXI SNPTTE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0  
23 a 26 de Outubro de 2011  
Florianópolis - SC

**Grupo Estudo de Aspectos Técnicos e Gerenciais de Manutenção – GMI**

**Sistema de Monitoração de Disjuntores da SE Rio Verde – Uma Análise da Funcionalidade e Desempenho**

**Daniel C. P. Araujo\***

**Marcos E. G. Alves**

**Fernando Alves Ribeiro**

**Tretech Sistemas Digitais Ltda.**

**UFMG – Universidade Federal de  
Minas Gerais**

**Tretech Sistemas Digitais Ltda.**

**Furnas Centrais Elétricas S/A**

**RESUMO**

O atual cenário dos mercados de energia elétrica no Brasil e no mundo tem levado as empresas do setor a operar em um contexto de alta competitividade, induzindo a uma busca constante por maior eficiência, melhor qualidade de fornecimento e menores custos. Seguindo essa tendência geral, tem ocorrido uma migração da manutenção preventiva para a manutenção preditiva, o que só é possível através de sistemas de monitoração on-line. Nestas circunstâncias, os disjuntores, equipamentos responsáveis pelo acionamento elétrico de linhas de transmissão, transformadores, reatores e outros equipamentos nas subestações, também estão sendo monitorados.

O sistema de monitoramento de disjuntores permite, local ou remotamente e em tempo real, fornecer informações precisas ao pessoal de manutenção sobre o estado dos disjuntores, minimizando os riscos de falhas e o custo de manutenção.

Uma análise prática do desempenho deste sistema é relatada neste artigo, onde se mostram os tipos de diagnóstico, seus objetivos e os tipos de falhas que eles podem prevenir ou caso as mesmas aconteçam subitamente, ajudar a diagnosticar a causa da falha. Desta forma futuras medidas preventivas poderão ser utilizadas. Nesta linha de raciocínio, a utilização da monitoração pode mostrar uma nova gama de abordagens para problemas antes desconhecidos ou tratados taxonomicamente como um mesmo tipo de falha.

**PALAVRAS-CHAVE**

Disjuntores, Monitoração, Manutenção Preditiva, Sistemas de Diagnóstico, Sistemas Online.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Durante muito tempo, a integridade dos equipamentos nas subestações e usinas dependia da manutenção preventiva. Atualmente as empresas de energia e as indústrias convivem com reduzidas equipes de engenharia de manutenção, e torna-se necessário o desenvolvimento de ferramentas que auxiliem no processo de tomada de decisão para uma precisa intervenção.

Uma destas ferramentas é a implantação de um programa de manutenção preditiva em equipamentos de alta tensão baseada na condição de operação desses equipamentos (1). Neste paradigma, os disjuntores assumem grande importância, já que são responsáveis pela segurança do sistema elétrico em caso de faltas. Isso somada a sua natural importância como dispositivo de manobra.

As práticas de manutenção atualmente adotadas são baseadas em intervalos de tempos fixos ou pela quantidade de manobras realizadas, indicadas através dos contadores de operação (2). A manutenção, antes baseada no tempo, agora passa a considerar o estado do equipamento. O surgimento de sistemas que permitem a organização, armazenamento, visualização e interpretação de dados importantes para a manutenção tornou esta mudança de paradigma possível. Estes sistemas permitem uma segura operação dos equipamentos e fornece os elementos necessários para as atuais exigências da manutenção baseada no estado.

A Tabela 1 apresenta um breve comparativo entre as filosofias de manutenção baseadas no tempo e no estado.

(\*) Rua José Alvim, 100 – Centro – Atibaia – São Paulo – Brasil  
Email: carrij@cpdee.ufmg.com.br

Tabela 1: Comparativo entre as filosofias de monitoração

Manutenção por Tempo	Manutenção por Estado
Exige inspeção preliminar do equipamento, para levantar o estado do disjuntor.	Principais indicadores do estado do disjuntor obtidos online.
Possível realização de ensaios e testes desnecessários.	Intervenção precisa. A Manutenção atua somente onde realmente é necessário. Evita a inserção de novas falhas. Redução de custos e paralisações desnecessárias.
Possibilidade de a manutenção ocorrer quando o equipamento já se encontra deteriorado.	O disjuntor não deixa de receber manutenção quando é necessário.
Fácil planejamento da manutenção.	Auxilia nos planejamentos e procedimentos de manutenção, agregando valor as análises de desempenho, confiabilidade e falhas.
Técnica consagrada.	Proporciona aumento da confiabilidade e segurança do sistema elétrico. Possibilita a antecipação ou prevenção da reconfiguração do sistema elétrico de potência
Não aproveita potencial do ativo de forma integral.	Com a manutenção adequada aumentam-se as chances de extensão da vida útil do equipamento.

Apenas como exemplo, alguns sinais que podem ser monitorados para a detecção do mau funcionamento de componentes do disjuntor, tais como tempos de abertura e fechamento do disjuntor, pressão do gás SF<sub>6</sub>, tempo de operação da bomba, foram citados na literatura (3). Fazendo-se uma análise desses sinais e comparando com a faixa de valores especificada pelos fabricantes, podem-se detectar defeitos incipientes no disjuntor e classificá-los como sendo de origem mecânica, elétrica considerando os circuitos principais ou nos circuitos de controle e auxiliares.

Esta é a ideia por trás do sistema de diagnóstico baseado em regras.

## 2.0 - O DISJUNTOR – FUNCIONAMENTO E MODOS DE FALHA

### 2.1 Breve descrição do funcionamento do disjuntor

Os disjuntores são dispositivos de chaveamento elétrico que devem ser capazes de conduzir, interromper e estabelecer correntes das redes de energia elétrica, incluindo as altas correntes de falta (curto-circuito) (4). Eles são constituídos por unidades interruptoras, também chamadas de câmaras de extinção, que é onde ocorre a extinção do arco voltaico produzido durante a interrupção de corrente e podem ser de diversas tecnologias. Possuem um sistema de acionamento ou mecanismo de operação, que é o subconjunto constituído de componentes que possibilitam o armazenamento da energia necessária à operação mecânica do disjuntor, bem como à liberação desta energia através de mecanismos apropriados, quando enviado o comando de abertura e fechamento do mesmo, e por fim uma unidade de comando, que é constituída dos elementos de comando, controle e supervisão do disjuntor.

### 2.2 Modos de falha conhecidos dos disjuntores

Com o objetivo de identificar as causas mais comuns de falhas nos disjuntores, algumas pesquisas foram realizadas pelo CIGRÉ (5). A primeira destas pesquisas foi realizada entre os anos de 1974 e 1977, a partir de uma base de dados obtida de observações realizadas em 20.000 disjuntores com tensão acima de 63 kV.

Os resultados desta pesquisa mostraram que 70% das falhas mais frequentes em disjuntores têm como origem fatores mecânicos, 19% são relacionadas aos circuitos de controle e auxiliares e 11% a fatores elétricos do circuito principal.

O resumo dos resultados da segunda pesquisa realizada pelo CIGRÉ no período de 1988 a 1991 em 18.000 disjuntores a SF<sub>6</sub> para tensões acima de 63 kV, são apresentados na Tabela 2, publicada no guia IEEE Std.C37.10-1995 (6) e aqui transcrita.

Trata-se de um procedimento para a investigação de diagnósticos e falhas em disjuntores, dando uma visão geral dos componentes nos disjuntores responsáveis pelas falhas mais frequentes.

Tabela 2: Estatística de causas de falhas em disjuntores (6)

<b>Mecanismos de operação</b>	<b>43 – 44%</b>
Sistema Hidráulico, bombas, compressores e afins	13,6-18,7%
Acumuladores de energia	7,2-7,6%
Elementos de controle	9,3-11,6%
Atuadores, dispositivos de amortecimento	5,1-8,9%
Transmissão mecânica	1,4-3,8%
<b>Componentes de alta tensão</b>	<b>21-31%</b>
Interruptores	9,4-14%
Interruptores auxiliares e resistores	0,6-1,3%
Isolação	5,7-20,9%
<b>Circuitos de controle e auxiliares</b>	<b>20-29%</b>
Circuitos de fechamento e abertura	1,5-10%
Contatos auxiliares	2,1-7,4%
Contatores, aquecedores e afins	5,4-7,6%
Monitores de densidade do gás SF <sub>6</sub>	4,0-10,7%
<b>Outras Causas</b>	<b>5,4-6,8%</b>

Os resultados obtidos nestas pesquisas permite-nos concluir que a maioria das falhas nos disjuntores está associada aos componentes do mecanismo de operação dos disjuntores, num segundo índice aos componentes de alta tensão e em ultimo grau aos circuitos de controle (7).

O objetivo da monitoração online é precaver de problemas advindos dos pontos apresentados na Tabela 2.

### 3.0 - A ESPECIFICAÇÃO BÁSICA DO SISTEMA DE MONITORAÇÃO DE DISJUNTORES ADOTADA NA SE RIO VERDE

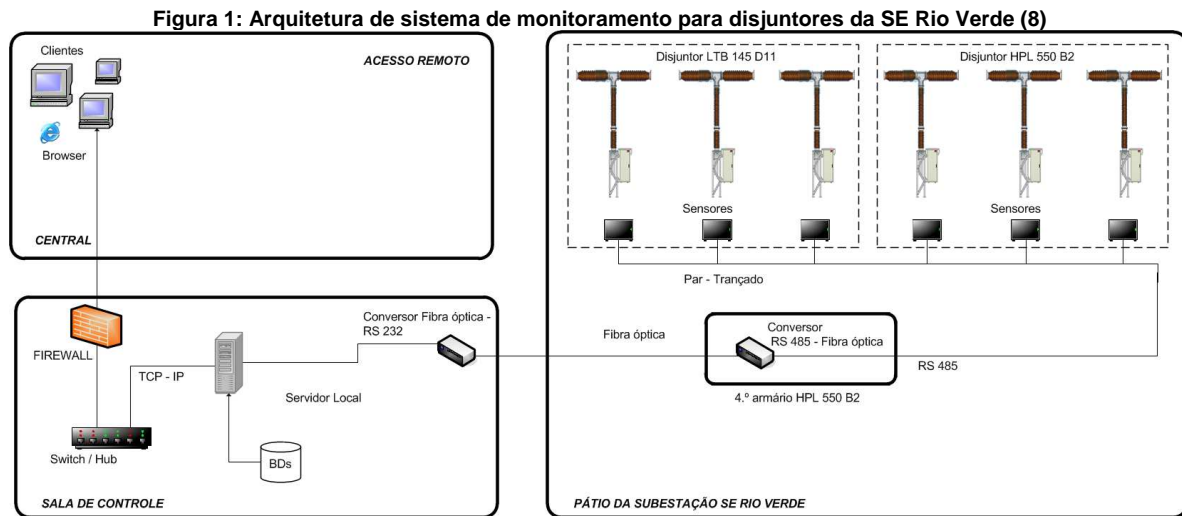
O Sistema de Monitoração Disjuntores instalado na SE Rio Verde é uma ferramenta para a engenharia de manutenção que efetua a aquisição, armazenamento e tratamento das medições efetuadas nos equipamentos monitorados, gerando diagnósticos e prognósticos de eventuais problemas que poderão ocasionar interrupções no fornecimento de energia elétrica (8).

Entre as várias análises deste sistema de monitoração, citamos os considerados mais importantes nesse projeto:

- O rápido diagnóstico do estado atual do equipamento, de modo a fornecer subsídios à tomada de decisão quanto à operação ou não do disjuntor, ajudando assim a preservar não só a ele mesmo, quanto ao equipamento que ele está energizando.
- O prognóstico precoce de condições de falha antes de sua operação, de modo a aumentar a disponibilidade do sistema e possibilitar a parada do equipamento apenas quando for necessário para ações corretivas, ou não colocá-lo no sistema a fim de evitar danos ao mesmo.
- O Monitoramento das condições de operação do equipamento ao longo de toda sua vida, a fim de manter os equipamentos disponíveis para operação, além do controle de equipamentos em fim de vida útil.
- Acesso rápido às informações do estado dos equipamentos através da rede Intranet de Furnas, facilitando o acesso a todas as informações do equipamento.
- Possibilidade de integração com os demais sistemas de Monitoramento e de gerenciamento de manutenção da empresa.
- A integração do gerenciamento da manutenção e a redução de seus custos.
- O monitoramento de vários tipos de disjuntores.
- O gerenciamento de investimentos e a negociação de prêmios de seguros.
- Preservação da imagem corporativa.

### 3.1 Arquitetura do sistema de monitoramento

A arquitetura utilizada é na rede de sensoriamento é mostrado na Figura 1:



As principais variáveis obtidas pelo sensoriamento do sistema de monitoração são mostradas na Tabela 3:

**Tabela 3: Principais variáveis obtidas pelo sistema de monitoração (8)**

Variáveis de Aquisição Contínua	Variáveis de Aquisição Disparada por Manobra
Densidade e Pressão do gás SF6	Movimento do contato principal
Temperatura ambiente	Corrente interrompida
Continuidade das bobinas de abertura e fechamento	Tempos de operação
Posição dos contatos auxiliares do disjuntor	Número de operações
Número de partidas do motor	
Autodiagnóstico do Sistema	
Tensões AC e DC	
Supervisão dos sensores	

Como podemos observar pela Figura 1, para que todo o sistema seja funcional, existem etapas sucessivas na aquisição dos dados para que estes possam ser utilizados nas regras de monitoramento.

- 1ª Etapa: O sensoriamento de campo é responsável pela aquisição de todas as variáveis no sistema de monitoramento de disjuntores, durante operações de abertura e fechamento, carregamento de molas, motor e variáveis que possam ser obtidas sem que haja operação, por exemplo, a pressão do gás SF6.
- 2ª Etapa: Os dados obtidos são transferidos para o software localizado no servidor de monitoração onde, são efetuados todos os cálculos necessários para que estas informações sejam exibidas ao usuário. Todos estes dados são gravados no banco de dados SQL Server instalado no servidor de monitoramento após esta etapa.
- 3ª Etapa: Este banco de dados SQL Server do OLM Explorer é lido pelo sistema de monitoramento de disjuntores, a cada novo registro incluído, efetuando assim todas as comparações e cálculos necessários para que o resultado das regras de monitoramento sejam exibidas aos usuários.

Após esta etapa caso algum alarme seja detectado, a informação será mostrada na página Web do sistema de monitoramento e um alerta via e-mail será recebido pelos responsáveis da manutenção.

### 4.0 - O SISTEMA DE REGRAS: TRANSFORMANDO INFORMAÇÕES EM DIAGNÓSTICOS

O sistema de regras codificado no software de monitoração permite que as informações obtidas pelos sensores sejam transformadas em diagnósticos automáticos, indicando a equipe de manutenção a classe do problema, a gravidade dele e o tempo máximo para a intervenção, se esta situação se aplicar.

Na Tabela 4: Principais regras de diagnóstico utilizadas pelo sistema de monitoração, são mostradas as regras de diagnóstico e sua principal função:

Tabela 4: Principais regras de diagnóstico utilizadas pelo sistema de monitoração (8)

Nome da Regra	Descrição do Funcionamento / Condição de Atuação
<b>Corrente no Motor</b>	Para que esta regra atue é necessário que a corrente do motor, após a operação de fechamento e o carregamento da mola, ultrapasse os limites, alto ou muito alto, baixo ou muito baixo. Caso seja alto ou muito alto será atuado o Diagnóstico informando que a corrente está fora dos limites estabelecidos, da mesma forma ocorre quando o valor ultrapassa os limites de baixo ou muito baixo.
<b>Corrente interrompida</b>	Para que esta regra atue é necessário que o percentual de erosão dos contatos fique acima dos 70% ou a vida útil dos mesmos fique abaixo dos 30% conforme especificado do fabricante do disjuntor. Para que isso seja possível é efetuado o cálculo de somatória de corrente a cada operação do disjuntor. Caso ultrapasse estes limites descritos no momento em que o alarme atua, é feita uma tendência em quantas operações o disjuntor atingirá 100% da vida útil dos contatos. Atingindo 100% da vida útil dos contatos é informado o segundo nível de diagnóstico.
<b>Corrente na Bobina de Abertura ou Fechamento</b>	Para que esta regra atue é necessário que a corrente na bobina de abertura ou fechamento no momento da operação de abertura ou fechamento fique fora dos limites especificados.
<b>Corrente nominal do sistema durante o fechamento</b>	Para que esta regra atue é necessário que a corrente nominal do sistema fique acima dos limites estabelecidos na operação de fechamento.
<b>Densidade do gás SF6</b>	Para que esta regra atue é necessário que haja perda de densidade de SF6 na câmara do disjuntor. Este diagnóstico possui 3 níveis de alarme. Para o nível de tendência, o sistema efetua um cálculo com as variáveis de densidade atual do SF6 e perda de densidade média diária, então uma tendência em dias para atingir o primeiro estágio do nível de alarme de SF6 é obtida. Após atingindo este estágio e o vazamento permanecer, o sistema continua efetuando o mesmo cálculo com tendências em dias para atingir o segundo nível.
<b>Diferença de tempos de abertura ou fechamento entre fases</b>	Para que esta regra atue é necessário que no momento da operação de abertura ou fechamento os tempos de operação entre as fases fiquem fora dos limites especificados.
<b>Supervisão da Bobina de Abertura 1 e 2</b>	Esta regra é atuada quando a bobina de abertura é interrompida.
<b>Supervisão da Bobina de Fechamento</b>	Esta regra é atuada quando a bobina de fechamento é interrompida.
<b>Temperatura do Painel de comando disjuntor</b>	Para que esta regra atue é necessário que a temperatura do painel de comando do disjuntor esteja fora dos limites estabelecidos.
<b>Tempo de Abertura Correlacionado à Velocidade de Abertura e Tensão DC</b>	Para que esta regra atue é necessário que o tempo no momento da operação de abertura seja diferente dos limites estabelecidos, sendo que esta variável é inversamente proporcional a variável correlacionada de velocidade de abertura do disjuntor.
<b>Tempo de Abertura Correlacionado à Tensão DC</b>	Para que esta regra atue é necessário que o tempo no momento da operação de abertura seja diferente dos limites estabelecidos, sendo que esta variável é inversamente proporcional a variável correlacionada (Tensão DC) do disjuntor.
<b>Tempo de Abertura Longo e Tempo de Fechamento Curto</b>	Para que esta regra atue é necessário que o tempo de abertura, em sua operação, seja maior que os limites estabelecidos, juntamente com o tempo de fechamento, em sua operação.
<b>Tempo de Fechamento Longo e Tempo de Abertura Curto</b>	Para que esta regra atue é necessário que o tempo de fechamento, em sua operação, seja maior que os limites estabelecidos, juntamente com o tempo de abertura, em sua operação.
<b>Tempo de Carregamento da mola</b>	Para que esta regra atue é necessário que o tempo de carregamento da mola no momento da operação de fechamento seja maior que os limites especificados, e sua variável correlacionada (Tensão AC) é inversamente proporcional à sua atuação.
<b>Tempo de Extinção do Arco</b>	Esta regra é atuada no momento de abertura, quando ficar fora dos limites especificados, com isso é possível identificar quando há algum problema na câmara, ou nos contatos de arco principais.
<b>Tensão Auxiliar AC</b>	Esta regra é atuada quando o nível de tensão auxiliar AC ficar fora dos limites estabelecidos, esta regra pode atuar sem que haja operação no disjuntor, sendo de suma importância para outras regras conforme citada acima sua correlação.
<b>Velocidade de Abertura e Fechamento</b>	Para que esta regra atue é necessário que no momento da operação de abertura ou fechamento o valor de velocidade fique fora dos limites estabelecidos. Esta variável é utilizada para criar correlação para outras regras

O sistema emite diversos tipos de diagnósticos conforme as condições de atuação de cada uma destas regras. O diagnóstico poderá ser reconhecido pelo usuário, liberando a condição de atuação da regra.

## 5.0 - CONCLUSÕES

A partir da técnica aqui proposta, pode-se desenvolver um procedimento de diagnóstico e acompanhamento do estado dos disjuntores através do monitoramento de diversas variáveis relevantes ao seu diagnóstico.

O uso do sistema de regras de diagnóstico associado ao monitoramento de sinais possibilita a realização de um sistema de diagnóstico de falhas de disjuntores, podendo atuar como uma ferramenta auxiliar junto ao setor de manutenção e na prevenção de futuras falhas.

O sistema de monitoração de disjuntores baseado em regras de diagnóstico instalado na SE Rio Verde possui a interessante característica da rápida interpretação dos dados obtidos e a emissão de diagnósticos

O sistema está instalado e em operação desde janeiro de 2010.

## 6.0 - BIBLIOGRAFIA

1. **YAMAGIWA, T. et al.** Development of Preventive Maintenance System for Highly Reliable Gas Insulated Switchgear. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1991, Vol. 6, 2, pp. 840-848.
2. **MCLLOROY, C. et al.** Circuit Breaker Condition Based Monitoring Developments. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1994.
3. **GOTO, K. et al.** On-Line Monitoring and Diagnosis of Gas Circuit Breakers. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 01 de 1989, Vol. 4, 1, pp. 375-381.
4. **MILACH, M.** *Manutenção de Disjuntores de Alta Tensão*. 1993.
5. **Janssen, A. L. J. et al.** *Summary of CIGRE' 13.06 Working Group World Wide Reliability Data and maintenance Cost Data on High Voltage Circuit Breakers Above 63 kV*. s.l. : IEEE, 1994.
6. **IEEE**. Std C37.10-1995. *IEEE Guide for Diagnostics and Failure Investigation of Power Circuit Breakers*. 1995.
7. *Metodologia de desenvolvimento de um Sistema de Monitoramento e Diagnóstico de Disjuntores a SF6*. **Filho, José Eduardo N. S., Aguiar, Marcos A. e Jr, Pyramo P. Costa**. Belo Horizonte : Anais do XVII Sendi, 2006.
8. **Treetech Sistemas Digitais Ltda.** *Manual do Sistema Sigma - SE Rio Verde - Furnas*. Atibaia : s.n., 2010.