



XX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica
SENDI 2012 - 22 a 26 de outubro
Rio de Janeiro - RJ - Brasil

Rogério de Lima Sá	Heldemárcio Leite Ferreira	Washington Luiz jr
Companhia Energética de Pernambuco	Companhia Energética de Pernambuco	Companhia Energética de Pernambuco
rogerio.sa@celpe.com.br	heldemarcio@hotmail.com	wjr@celpe.com.br

ANÁLISE DE FALHAS EM REGULADORES DE TENSÃO DO SISTEMA ELÉTRICO DE DISTRIBUIÇÃO - EXPERIÊNCIA CELPE

Palavras-chave

Design review

Falhas

Reguladores de Tensão

Resumo

O artigo visa apresentar a experiência acumulada pela Celpe com as falhas em reguladores de tensão instalados no sistema elétrico de distribuição e as soluções adotadas em parceria com os fabricantes, mediante uma abordagem de Análise das Falhas para identificação dos componentes críticos que permitiram o aprimoramento do projeto. Esta parceria propiciou a obtenção de resultados favoráveis para ambas as partes envolvidas, além de promover uma maior interação entre o fabricante e o cliente final, que forneceu os dados relativos ao desempenho desses ativos, bem como abriu a possibilidade de iniciar um processo de design review com a participação efetiva do usuário em futuros projetos para a concessionária em apreço.

1. Introdução

As empresas de distribuição de energia elétrica no Brasil investem cada vez mais na qualidade do fornecimento de energia elétrica. Isso ocorre porque há fortes exigências tanto dos órgãos reguladores como também dos consumidores.

Com efeito, a Celpe, por ser uma empresa regulada, possui diversos equipamentos elétricos instalados em suas subestações e na rede de distribuição que contribuem para a melhoria da qualidade do fornecimento. Um dos principais é o regulador de tensão, que serve para controlar os níveis de tensão dentro de faixas pré-

estabelecidas, fazendo com que as tensões cheguem aos consumidores sob limites adequados.

É adotada atualmente, na companhia, a política de manutenção preventiva (por tempo e sob condição), utilizando mão de obra própria. No entanto, apesar desta política adotada, o Departamento de Manutenção deparou-se com diversas falhas envolvendo os reguladores, em especial os monofásicos do tipo “B”, aplicados em subestações (equipamentos com pouco tempo de aplicação em subestações). Essas ocorrências têm como consequências falhas graves, danificando seriamente os ativos e interrompendo o fornecimento de energia por períodos consideráveis, comprometendo os índices de continuidade da empresa e causando transtornos para os consumidores. Aos poucos essas ocorrências foram registradas e as causas mapeadas, a fim de subsidiar as análises e propor recomendações a serem adotadas pelo fabricante.

2. Desenvolvimento

2.1 Análise de desempenho do sistema (ADS) de distribuição

A ADS pode ser contextualizada da seguinte forma:

Equipamentos parados em momentos inoportunos podem significar perdas irrecuperáveis perante um concorrente num momento em que o mercado procura o produto. Dentro deste contexto a manutenção deixou de ser uma atividade qualquer para se tornar uma autentica ciência face à sofisticação de instalação, máquinas e equipamentos cada vez mais envolvidos por sistemas eletro-eletrônicos com grau de complexidade e exigências de qualidade crescentes. Gerenciar corretamente esses modernos meios de produção exige conhecimentos de métodos de sistema de programação, controle e execução tão ou mais eficientes que os próprios equipamentos sob verificação. (Tavares, 1996).

Dentro deste contexto, o acompanhamento estatístico dos equipamentos de subestação é extremamente importante e possibilita um melhor entendimento das falhas e suas origens, de modo a apontar seu grupo de risco, considerando os diversos fatores que podem afetar seu desempenho, determinar os fabricantes com baixo desempenho e identificar os equipamentos que precisam ser renovados.

Dessa forma, a Análise de Desempenho de Sistemas (ADS) compreende o desenvolvimento das atividades de planejamento e gerenciamento num contexto de projeto, operação e manutenção de sistemas.

De acordo com Almeida (1986), a “avaliação de desempenho é a função da engenharia de manutenção/operação que permite, além da análise de dados do sistema e do estabelecimento de diagnósticos, a escolha de um curso de ação a ser adotado sobre este sistema de modo a otimizar o seu desempenho”.

Podem ser relacionados como atributos de desempenho do sistema:

- Disponibilidade (Confiabilidade e Manutenibilidade).
- Qualidade de Serviço.
- Custos (expressa aqui em potência interrompida em MW).
- Fatores humanos, numa abordagem mais ampla (que não serão tratados nesse estudo).

As principais atividades no desenvolvimento da avaliação de desempenho são:

- Determinação do estado do sistema: consiste no estabelecimento de valores que exprimem o estado real do sistema de forma a descrevê-lo.
- Acompanhamento periódico do sistema: consiste em saber como esta o comportamento do sistema, em dado instante, com base em um período de observação anterior.
- Tratamento de problemas decisórios: corresponde à tomada de decisão diante de problemas, de modo que se escolha um determinado nível de desempenho a ser obtido do sistema.

2.2 Taxas de falhas

A confiabilidade pode ser entendida como a ausência de falhas de um equipamento ou sistema durante a execução de uma determinada missão, sendo definida como a probabilidade de que este equipamento ou sistema continue operando dentro de suas especificações, para um dado período de tempo, sob condições ambientais predeterminadas.

A suspensão do funcionamento de um equipamento implica numa falha, que pode ser classificada em função de seus efeitos: origem ou causa.

Formulação Probabilística da Confiabilidade $R(t)$:

$$R(t) = n_s(t) / n_0$$

$$\lambda(t) = f(t) / R(t)$$

Onde:

n_0 = n° total de peças

n_s = n° de peças que sobreviveram

n_f = n° de peças que falharam

$\lambda(t)$ = taxa de falha

$f(t)$ = função densidade de probabilidade = $-dR(t) / dt$

Embora a confiabilidade seja definida como uma função de um período de tempo, o termo tempo não deve ser interpretado literalmente e pode ser associado a um período de tempo ou duração de missão. O estudo de confiabilidade pode considerar a análise de componentes ou equipamentos isoladamente ou a associação destes levando a análise do sistema.

Considerando uma taxa de falha constante, têm-se a seguinte taxa de falha para os equipamentos de subestação, por família:

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

Em que se pode adotar como aproximação:

$$\lambda = \frac{\text{n° equipamentos que falharam}}{\text{n° total de equipamentos}}$$

2.2.1 Taxas de falhas em reguladores de tensão de subestação

A tabela a seguir mostra o resultado de uma ADS dos equipamentos de subestação da Celpe para o ano de 2009. O resultado é comparado com o histórico da taxa de falha do ciclo anterior para alguns casos em que havia histórico. É possível observar que a taxa de falhas dos reguladores de tensão, que está em destaque, é preocupante, pois é muito discrepante quando comparado com os outros equipamentos (13,66%) e a pior

taxa de falhas do ano.

ANÁLISE DE FALHAS					
TIPO	EQUIPAMENTO	QUANTIDADE	QUANT. EQUIPAM. FALHARAM	TAXA DE FALHA CICLO ATUAL	TAXA DE FALHA CICLO ANTERIOR
BC	BANCO CAPACITOR	257	3	1,17%	0,67%
CF	CHAVE FUSIVEL	615	0	0,00%	nd
CH	CHAVE DE BANCO CAPACITOR	237	3	1,27%	nd
CM	CONJUNTO DE MEDIÇÃO	72	2	2,82%	nd
DI	DISJUNTOR	325	2	0,62%	0,29%
PR	PARA-RAIO	1700	1	0,06%	nd
RL	RELIGADOR	722	3	0,42%	0,98%
RT	REGULADOR DE TENSÃO	47	6	13,66%	nd
SC	CHAVE SECCIONADORA	4437	1	0,02%	nd
TC	TRANSFORMADOR DE CORRENTE	1080	0	0,00%	nd
TF	TRAFO DE FORÇA	223	4	1,81%	1,10%
TP	TRANSFORMADOR DE POTENCIA	481	1	0,21%	nd

Tabela 1: análise de falhas em 2009

Dentro da família “reguladores de tensão”, foi observado que dos seis equipamentos que apresentaram falhas, cinco eram reguladores de tensão monofásicos do tipo “B”. Tal resultado fez com que as análises se concentrassem neste tipo de regulador, sendo, em seguida, criada uma força tarefa para atuação imediata de forma a melhorar os níveis de desempenho destes ativos.

3 Características do regulador de tensão

Os principais dados técnicos dos reguladores com alta taxa de falhas são:

- Regulador de tensão automático monofásico
- Tipo: B
- Potência nominal: 333kVA
- Potência passante: 10MVA
- Tensão: 7,62kV
- Corrente: 438A
- Frequência: 60Hz
- Aplicação em subestações



Fig. 1: Banco de reguladores monofásicos

4. Históricos das principais ocorrências e falhas dos reguladores

A seguir são apresentadas as principais ocorrências envolvendo os reguladores de tensão que apresentaram alta taxa de falhas. Estas análises tinham como foco subsidiar a resolução dos problemas e propor recomendações a serem adotadas na condução do exercício da garantia do fabricante.

4.1 Ocorrência na subestação de Caetés

Esta ocorrência foi de natureza intempestiva, interrompendo o fornecimento de energia por aproximadamente uma hora. Após a inspeção interna na subestação, foi constatada uma falha no banco de reguladores monofásicos ligados em estrela aterrada, afetando os três equipamentos, conforme discriminado a seguir:

No regulador de número de série: 2072, correspondente à fase A, o conector DB 37 que alimenta o painel CTR-2 fêmea foi danificado. O conector foi recuperado e o regulador voltou a funcionar.



Fig 2: Conector DB 37 danificado

No segundo regulador, número série: 2959, correspondente à fase C, o painel eletrônico CTR-2 não indicava a posição zerado (neutro); o led não estava acendendo e o painel não estava operando em modo automático. O painel foi substituído e o regulador voltou a funcionar.

No terceiro regulador, número série: 2956, correspondente à fase B, o para-raios, as três buchas de 25 kV, a válvula de alívio de pressão e a tampa superior foram danificados. Além dessas avarias, foi constatado, mediante o teste de relação de espiras por TTR, que o enrolamento apresentou valores incompatíveis com os esperados.



Fig. 3: Regulador Avariado (buchas e para-raios)

Após a inspeção e testes no equipamento danificado, foram encontrados indícios de surto de tensão

confirmado pela perfuração do para-raios e cuja origem ainda não foi identificada.

4.2 Ocorrência na subestação de Araripina

Trata-se de uma ocorrência de natureza intempestiva, interrompendo o fornecimento de energia por aproximadamente 30 minutos. Após inspeção interna na subestação, foi constatada a falha nos equipamentos de regulação de tensão, afetando um dos reguladores.

No regulador de tensão de número de série: 1883, correspondente à fase A, foi danificado o para-raio, uma buchas de 25KV, a válvula de alívio de pressão, a tampa de acesso ao bloco de terminais e o enrolamento de AT, impossibilitando a manutenção em campo do equipamento.



Fig. 4: Regulador Avariado

4.3 Ocorrência na subestação de Trindade

A ocorrência também foi de natureza intempestiva, interrompendo o fornecimento de energia por aproximadamente 1 hora e 40 minutos. Após inspeção interna na subestação, foi constatada a falha no banco de reguladores de tensão monofásicos, afetando um dos reguladores, conforme discriminado a seguir.

No regulador de tensão de número de série: 3813, correspondente à fase B, foi verificado o bloqueio do comutador com sinalização no controle, impedindo a operação de comutação tanto no modo automático quanto ao manual.

O travamento do comutador foi a causa da indisponibilidade do equipamento.

4.4 Outras ocorrências em subestações

Além dos eventos reportados, foram observados problemas em alguns painéis CTR-2 e em TP de ajustes em reguladores instalados em subestações, conforme são discriminados a seguir.

- Na subestação de Passira foi substituído um painel CTR-2 que não estava obedecendo aos comandos de elevar e baixar TAP; além disso, também foi identificado um TP de ajuste queimado.
- Na Subestação de Riacho das Almas um painel CTR-2 apresenta defeito, o display do painel apaga com o tempo, voltando a funcionar quando se desliga e religa (RESET) a alimentação.

5. Análise do equipamento

Segundo Siqueira (2009), a disponibilidade de uma base histórica de falhas, para uma determinada população de equipamentos, constitui a melhor fonte de informações, seguida do estudo de FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis* – Análise de Modos de Falha e Efeitos). O FMEA depende de um conhecimento razoável dos princípios de funcionamento do sistema, podendo ser construído pela documentação do

fabricante ou fornecedor.

Um estudo de FMEA envolve a identificação sistemática dos seguintes aspectos, para cada função de uma instalação:

- **Função** – objetivo, com o nível desejado de performance;
- **Falha funcional** – perda da função ou desvio funcional;
- **Modo de falha** – o que pode falhar;
- **Causa da falha** – porque ocorre a falha;
- **Efeito da falha** – impacto resultante na função principal;
- **Criticidade** – severidade do efeito.

Ainda de acordo com Siqueira, uma outra ferramenta de análise de falhas é a **árvore de falhas**. Trata-se de uma ferramenta de análise de cima para baixo, que se inicia pela identificação de um evento indesejável, tal como uma falha funcional, prosseguindo pela determinação de todas as maneiras possíveis dela ocorrer.

Levando em consideração as duas ferramentas citadas acima, foi realizado um estudo de FMEA e de Árvore de falhas. Os resultados destes estudos, aliada a base histórica de falhas, contribuiu para identificar os componentes críticos, além de verificar que algumas falhas se repetiam, tais como:

- Falhas nas buchas;
- Falhas nos pára-raios;
- Falhas no painel de comando – CTR-2;
- Falhas nos TP's de ajuste.

Com isto, iniciou-se um contato com o fabricante visando propor recomendações a serem adotadas na condução do exercício da garantia dos equipamentos e, a partir daí, subsidiar a resolução dos problemas através das ações de *design review*, ou seja, revisão do projeto inicial do produto.

Este tipo de ação é também conhecido na literatura como **manutenção proativa**, ou seja, busca-se bloquear ou mitigar a causa raiz da falha na fase do projeto.

5.1 Ações de melhoria – modificações no projeto

As soluções adotadas em parceria com o fabricante permitiram o aprimoramento do projeto. Esta parceria visava a obtenção de resultados favoráveis para ambas as partes envolvidas, além de promover uma maior interação entre o fabricante e o cliente final. Abaixo seguem as principais ações adotadas:

5.1.1 Pára-raios

As figuras abaixo comparam os pára-raios de proteção tipo by-pass, com tensão nominal 3kV e corrente nominal 10kA, utilizados antes e após a análise. A diferença básica está no comprimento e no número de “saídas” dos para-raios. Esta ação trouxe benefícios, tais como:

- Aumento da distância de escoamento e consequentemente da suportabilidade de surtos e sobretensões.
- Aumento da distância entre as buchas de fonte e carga, visando uma maior segurança para o equipamento (ver foto 6).

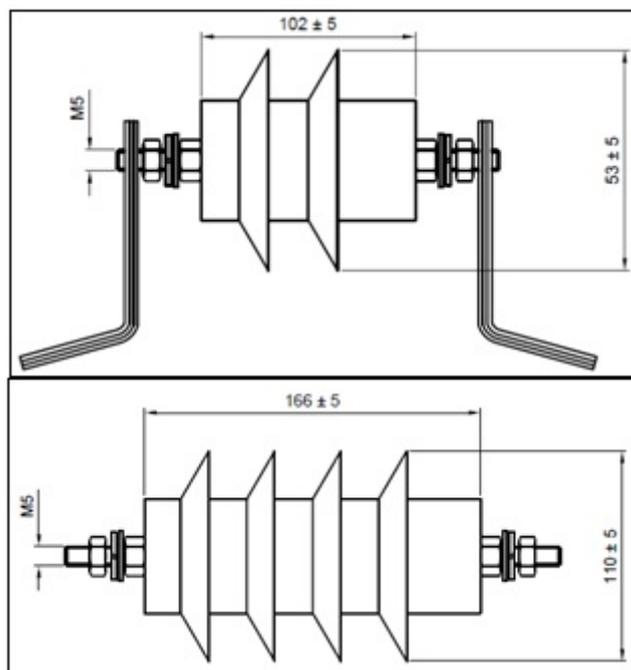


Figura 5 – Para-raios antes e após as mudanças

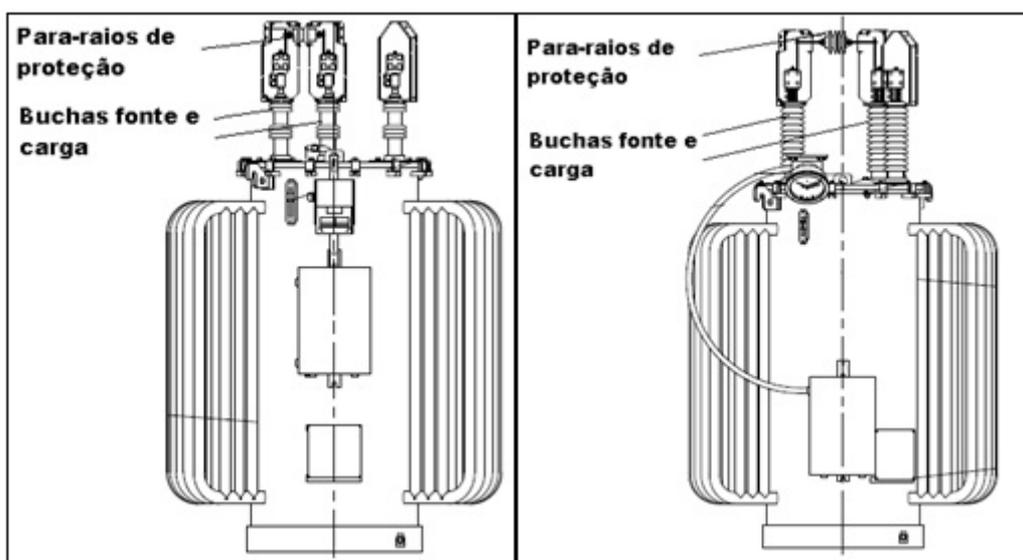


Figura 6 – Distâncias das buchas antes e após a modificação dos para-raios de proteção.

5.1.2 Buchas

A figura 7 compara as buchas utilizadas antes e após a revisão do projeto. A bucha utilizada anteriormente possuía as seguintes características: tensão nominal 25kV e corrente nominal 800A. Após a revisão, a bucha aplicada foi a de tensão nominal 36,2kV e corrente nominal 800A. Da mesma forma que os para-raios, as buchas sofreram aumento no número de “saías” e conseqüentemente no comprimento, visando uma maior suportabilidade aos surtos de tensão do sistema.

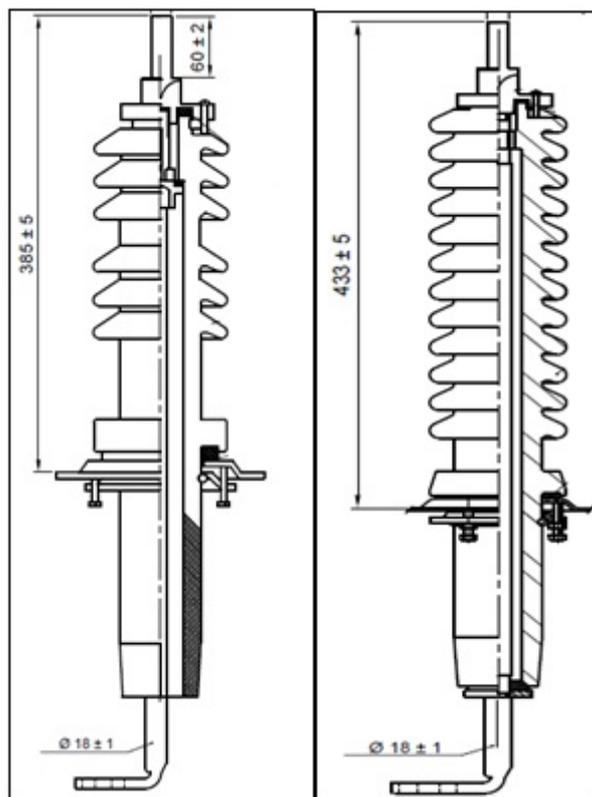


Figura 7 – Buchas dos reguladores de tensão

5.1.3 Transformador de potencial

A figura 8 mostra a caixa de controle “explodida” e destaca o componente 22 - transformador de potencial (TP) de alimentação do CTR-2 (comando e controle) . Este componente foi retirado do projeto sem prejuízo, visando eliminar mais um ponto de falha.

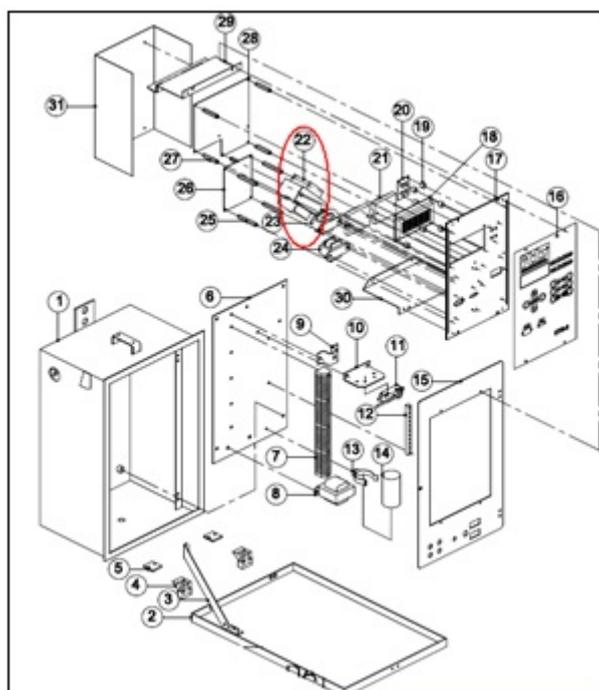


Figura 8 – caixa de controle

5.1.4 Indicador de TAP

A seguir mostramos em destaque os indicadores de TAP. O primeiro é um indicador digital, que apresentava falhas constantemente devido ao seu material construtivo de cristal líquido, sendo sensível ao clima da região. Foi solicitada a modificação destes indicadores para o modelo analógico, minimizando e até eliminando problemas de indicação de TAP errada.

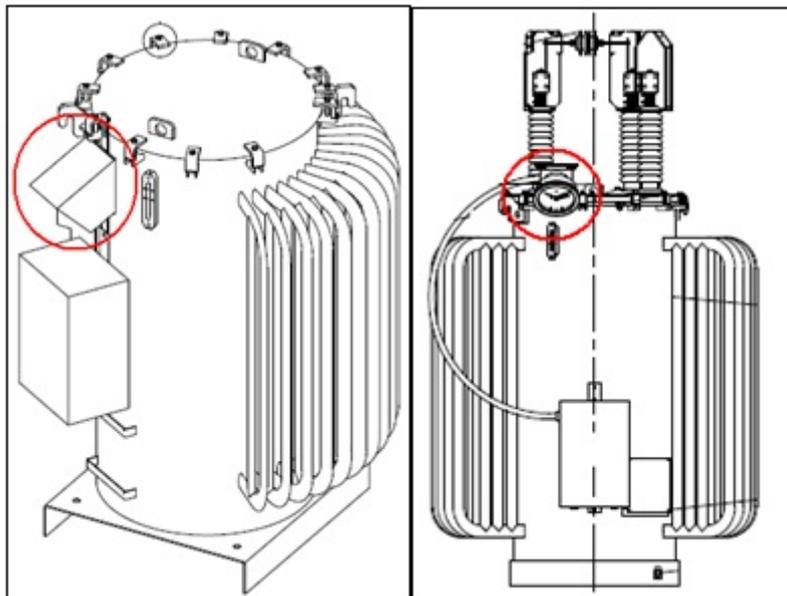


Figura 9 – Indicadores de TAP

5.1.5 Controle

O software utilizado no controle do regulador (versão CTR-2) apresentava vários problemas na navegação e operação do equipamento. O fabricante desenvolveu uma versão nova que eliminou os problemas relacionado com o desempenho do CTR-2.

6. Resultados após *design review*

Abaixo seguem os dados de taxa de falhas, comparando os valores de 2009 (ciclo anterior) com 2010, em que houve as primeiras mudanças descritas acima:

ANÁLISE DE FALHAS					
TIPO	EQUIPAMENTO	QUANTIDADE	QUANT. EQUIPAM. FALHARAM	TAXA DE FALHA CICLO ATUAL	TAXA DE FALHA CICLO ANTERIOR
RT	REGULADOR DE TENSÃO	84	4	4,9%	13,66%

Tabela 2: taxa de falhas de 2010 comparada com 2009

Analisando as taxa de falhas, podemos verificar que houve uma melhoria significativa quando comparada com o ciclo anterior de 13,66% (ano 2009) para 4,9% (2010). É importante destacar que a quantidade de reguladores em 2010 praticamente dobrou quando comparado com 2009, principalmente, por conta das novas aquisições de reguladores monofásicos do tipo “B”. Além de modificar os reguladores que sofreram avarias, os novos equipamentos já foram adquiridos com as novas concepções do projeto, considerando as ações de melhorias.

Já a planilha três abaixo mostra os resultados de taxa de falhas para o ano corrente (até agosto/2011):

ANÁLISE DE FALHAS					
TIPO	EQUIPAMENTO	QUANTIDADE	QUANT. EQUIPAM. FALHARAM	TAXA DE FALHA CICLO ATUAL	TAXA DE FALHA CICLO ANTERIOR
RT	REGULADOR DE TENSÃO	84	2	2,4%	4,9%

Tabela 3: taxa de falhas de 2011 comparada com 2010

Até o momento, a taxa de falhas reduziu de 4,9% (2010) para 2,4% (até agosto 2011). Trata-se de uma redução significativa dentro de um horizonte de dois anos. Esta redução é fruto das modificações realizadas no projeto e está proporcionando ganhos para a Celpe em relação à qualidade de energia e também continuidade no fornecimento de energia.

3. Conclusões

De tudo exposto, destacamos, a saber:

- a) Afirma-se que as modificações no projeto eliminaram as falhas recorrentes, além de ter mitigado outras falhas menos frequentes.
- b) Houve um aumento considerável em confiabilidade e disponibilidade para a família de equipamentos do modelo “B” dos reguladores de tensão monofásicos.
- c) O ocorrido proporcionou uma maior interação entre o fabricante e o cliente final, proporcionando ganhos para ambas as partes.
- d) A qualidade do fornecimento de energia melhorou a partir do momento em que as falhas dos reguladores reduziram.
- e) Os índices de fornecimento da Celpe, como o DEC e o FEC, melhoraram o desempenho.
- f) Houve redução dos gastos da concessionária com ressarcimento de consumidores devido a problemas no fornecimento nas regiões afetadas.
- g) O ocorrido proporcionou um maior conhecimento e aprofundamento técnico para esta família de equipamentos.

4. Referências bibliográficas

1. COMPANHIA ENERGÉTICA DE PERNAMBUCO. **Relatório de Desempenho de Equipamentos**. Recife: 2008/2009.
 2. COMPANHIA ENERGÉTICA DE PERNAMBUCO. **Relatório de Desempenho de Equipamentos**. Recife: 2010.
 3. ITB EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS. [**Análise de reguladores de tensão**]. São Paulo: Birigui, 2009.
 4. ITB EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS. [**Análise de reguladores de tensão**]. São Paulo: Birigui, 2011.
 5. Siqueira, Iony P. **Manutenção Centrada na Confiabilidade – Manual de Implementação**. Recife, Ed. QualityMark, 2009.
-