

Sistema de Monitoramento de Tempo Real para Prevenção de Vazamentos e Qualidade do SF₆ em uma Subestação Isolada a Gás

L. Ogiboski, A. C. Cunha, C. O. Kajikawa, L. C. Magrini e J. A. Jardini

Resumo – O Hexafluoreto de Enxofre (SF₆) é um importante dielétrico para os sistemas elétricos de potência, principalmente por causa de suas excelentes propriedades de isolamento. Atualmente este gás também é parte de preocupações ambientais por ser um dos gases mais danosos para o efeito estufa. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema para monitoramento de vazamentos e também de qualidade do gás SF₆ em uma subestação blindada. O objetivo principal é desenvolver um sistema de tempo real para medir a densidade do gás e o ponto de orvalho nos compartimentos da subestação. A arquitetura do sistema foi baseada na instalação de sensores para medir estas duas grandezas. Foram utilizados módulos de aquisição de dados e comunicação de baixo custo juntamente com protocolos padrão e abertos. Os resultados apresentam o sistema para monitorar três bays de uma subestação. Através da implementação do sistema espera-se a redução de vazamentos de gás, possibilidade de inspeções de gás on-line e redução de custos com a possibilidade de estender o tempo para manutenções preventivas.

Palavras-chave – Aquisição de dados, Isolação a Gás, Hexafluoreto de Enxofre, SF₆, GIS, Automação de Subestações.

I. INTRODUÇÃO

SF₆ (Hexafluoreto de Enxofre) é um gás que possui excelentes propriedades de isolamento, além de características adicionais como, inerte, não tóxico, alta capacidade dielétrica, alta capacidade de resfriamento, não inflamável, estável ao aquecimento e capacidade de auto regeneração [1]. Com o início da utilização do SF₆ pela

indústria de energia, foi possível desenvolver equipamentos de alta capacidade e alto desempenho, além de possibilitar a criação de equipamentos com outras características importantes, como, o tamanho reduzido, menor peso e maior segurança. Atualmente, o uso de subestações isoladas a gás (GIS-Gas Insulated Substation) no sistema elétrico de potência é importante, principalmente, porque elas ocupam apenas 10% do espaço necessário para sua instalação, quando comparada com subestações convencionais. Isto foi possível apenas com a introdução e desenvolvimento do SF₆ como isolador elétrico [2]. Além das características citadas acima, o SF₆ também é usado como meio de refrigeração para transformadores e extintor de arcos elétricos de seccionadoras de média e alta tensão [3].

Apesar de todas as vantagens apresentadas, o CIGRE publicou estatísticas demonstrando que 67% de todas as falhas em GIS estão relacionadas a variações na composição do SF₆ [4]. A presença de partículas ou outros fatores contaminantes, como umidade, resultantes de sua operação, bem como vazamentos de gás da GIS são fatores críticos para o funcionamento da subestação, uma vez que podem causar falhas de alto risco no equipamento. A presença de arco elétrico em um ambiente com SF₆ faz com que o gás seja decomposto em alguns subprodutos reagentes e algumas vezes produtos tóxicos [5]. Todas as reações e subprodutos gerados afetam o material dentro do encapsulamento e também contribuem para a redução da capacidade de isolamento do gás. Isso conduz a uma diminuição gradativa da confiabilidade operacional da GIS.

Uma das vantagens adicionais da utilização de GIS é a baixa necessidade de manutenção preventiva [6]. Entretanto, quando há necessidade de alguma intervenção, seja preventiva ou devido a falhas, a manutenção é complexa, de custo elevado e consome bastante tempo. Por isso, é necessário que a qualidade e a quantidade de SF₆ seja mantida ou inspecionada regularmente durante o tempo de vida do equipamento para garantir que os seus níveis sempre esteja dentro dos padrões especificados para a operacionalidade apropriada da GIS.

Atualmente, pesquisas relacionadas a monitoramento de subestações isoladas a SF₆ são bastante escassas. Isso pode ser explicado parcialmente pela alta estabilidade tanto do gás quanto da tecnologia envolvida no desenvolvimento de

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VI CITENEL), realizado em Fortaleza/CE, no período de 17 a 19 de agosto de 2011.

L. Ogiboski é pesquisador da FDTE - Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia e doutorando da Universidade de São Paulo – Departamento de Energia e Automação Elétrica (e-mail: logiboski@usp.br).

A. C. Cunha trabalha na AES Eletropaulo (e-mail: anderson.cunha@aes.com).

C. O. Kajikawa trabalha na AES Eletropaulo (e-mail: carlos.kajikawa@aes.com).

L. C. Magrini é pesquisador da FDTE - Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia (e-mail: magrini@pea.usp.br).

J. A. Jardini professor Titular da Universidade de São Paulo – Departamento de Energia e Automação Elétrica (e-mail: jardini@pea.usp.br)

subestações. Por outro lado, o estado atual da tecnologia e exigências governamentais demandam desenvolvimento de pesquisas, principalmente, com temas ambientais relacionados a prevenção de vazamentos de gás e também estratégias de manutenção para instalações GIS antigas, muitas delas com décadas de operação.

Com base no cenário exposto, este trabalho apresenta uma proposta de arquitetura para monitoramento, em tempo real, de dois parâmetros importantes:

- Ponto de orvalho, para detectar a contaminação do gás;
- Densidade, para fazer o controle de vazamentos de gás para a atmosfera.

Detalhes do desenvolvimento de um sistema de monitoramento de ponto de orvalho da GIS e também da densidade do gás dentro dos compartimentos da subestação, bem como a criação de possíveis melhorias na sua manutenção também são apresentados.

II. ESTRATÉGIAS PARA ANÁLISE DA QUALIDADE DO GÁS E PREVENÇÃO DE VAZAMENTOS

O SF₆ 100% puro possui algumas propriedades físicas e químicas, como condutividade térmica e velocidade de propagação de som que podem ser verificadas com a utilização de equipamentos portáteis. A sua contaminação por outros gases resulta em alterações destas propriedades. Uma maneira comum de detectar estes contaminantes é através da comparação de amostras com outra de SF₆ puro [7], [8]. Uma vez identificado uma alteração na pureza do SF₆ deve-se realizar análises laboratoriais adicionais para caracterizar os contaminantes. A partir da identificação, os procedimentos necessários para a recuperação do SF₆ devem ser aplicados no equipamento ou compartimento que contém o gás contaminado.

Atualmente existem diversas técnicas para monitoramento e instrumentos de ensaio para verificação de características do gás e do dielétrico, onde pode-se citar os controles recomendados pelos fabricantes:

- Densidade (contatos para alarme/desligamento);
- Teor de umidade (válvula para verificação periódica através de conexão a instrumento externo).

Outras opções de controle oferecidas pelo mercado de instrumentos que podem ser utilizados:

- Densidade on-line por sensores eletro-eletrônicos;
- Teor de pureza (% do SF₆ em relação a contaminantes);
- Teor de SO₂;

- Índice de mobilidade iônica;
- Teor de umidade (por sensores não ponto de orvalho);
- Descargas parciais acústico, VHF ou UHF.

Na ocorrência de vazamentos, é importante encontrar primeiro a localização exata do(s) ponto(s) de vazamento, que na maioria dos casos é de difícil identificação. Para este procedimento, deve ser usado um detector de vazamentos de SF₆ para que a equipe de manutenção possa identificar o local com mais precisão e possa tomar as medidas necessárias para eliminar o problema.

Entretanto, estes procedimentos tradicionais são pouco eficientes e podem consumir muitos recursos financeiros. Um dos problemas em se identificar rapidamente os vazamentos ocorre, principalmente, porque os medidores de pressão podem apenas exibir diferenças grandes de pressão ou quando a pressão atinge níveis críticos. Desta forma, o problema só é percebido quando o defeito está em estágio avançado. No caso de subestações operadas apenas remotamente estes problemas são muito mais prejudiciais. Considerando todos essas questões, o desenvolvimento de um sistema de monitoramento on-line para controle do SF₆ nos compartimentos se torna muito importante para registrar o histórico de anomalias e alterações na qualidade do gás da subestação. O SF₆ é um gás que tem poder de auto regeneração, desta forma muitos problemas podem não ser detectados ou percebidos apenas com verificações periódicas de amostras usando equipamentos analisadores de gás. Portanto, apenas um sistema de monitoramento de tempo real com armazenamento histórico pode fornecer dados para análises em situações particulares a respeito do comportamento da subestação.

O CIGRÉ publicou recentemente um guia com recomendações para testes de hermeticidade e também métodos para medições de vazamentos em equipamentos isolados a SF₆ [9]. A maioria dos métodos citados são não invasivos, podendo ser de ordem quantitativa ou qualitativa. O principal objetivo deste guia de referência é apresentar alternativas para manutenção e prevenção de perdas de gás. Entretanto, estas soluções são baseadas em verificações periódicas por equipes que utilizam dispositivos para esta finalidade. Como alternativa, a proposta deste estudo é fornecer a verificação automática por software de computador através de monitoramento on-line. Este sistema coleta dados através de sensores e realiza a verificação de vazamentos usando software de computador. A partir da detecção de qualquer possibilidade de vazamento, o software pode exibir um alarme para um operador ou notificar a ocorrência a qualquer pessoa responsável por e-mail ou outra forma de comunicação.

A verificação de ponto de orvalho nos compartimentos, através de sensores, também é uma forma de reduzir a necessidade de coleta de amostras para verificação da qualidade do gás. Isto se torna favorável para a inspeção da

qualidade do gás, uma vez que é recomendável evitar coletas constantes de amostras para evitar perdas de gás. O método proposto neste estudo difere das soluções tradicionais mencionadas acima, pois também tenta definir um modo de reduzir o número de verificações de qualidade de gás ou permite estender o intervalo de tempo necessário para realizar este procedimento.

III. ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA

A implementação de um sistema de monitoramento em uma instalação na qual não estava previsto em projeto receber os dispositivos necessários para aquisição e transmissão dos dados a serem monitorados, traz em si além da necessidade da especificação funcional e quantitativa dos novos equipamentos. Há a necessidade de desenvolvimento de soluções contemplando interfaces para instalação dos transdutores, assim como a instalação de estrutura para comunicação e alimentação, além de posicionamento do hardware para transmissão e tratamento dos dados.

O sistema apresentado neste trabalho foi projetado para uma subestação isolada a gás de 88 kV, pertencente a AES Eletropaulo. Esta subestação possui características especiais de layout e equipamentos (disjuntores de pressão diferenciada). A subestação toda possui quinze bays, como pode ser visto na Fig. 1.



Fig. 1. Subestação GIS de 88 kV da AES Eletropaulo

Cada bay é dividido em três compartimentos, um em alta pressão (disjuntor) e dois em baixa pressão (outros



dispositivos). Além disso, a composição completa da subestação é formada, ainda, por duas barras comuns conectada a todos os bays (conforme imagem na Fig. 2).

Fig. 2. Barras comuns da Subestação GIS da AES Eletropaulo

Esta barra é um compartimento utilizado para auxiliar na equalização das pressões de todos os compartimentos. A equalização é feita através de um sistema com compressores que atuam na transferência de gás de compartimentos de baixa pressão para compartimentos de alta pressão. Na Fig. 3 pode-se ver um bay com o seu disjuntor em alta pressão (parte superior da composição) e também os dispositivos que operam em baixa pressão. Pode-se observar também os dois cilindros (lado esquerdo da figura) que formam a barra comum, pelo qual todos os bays da subestação são conectados.

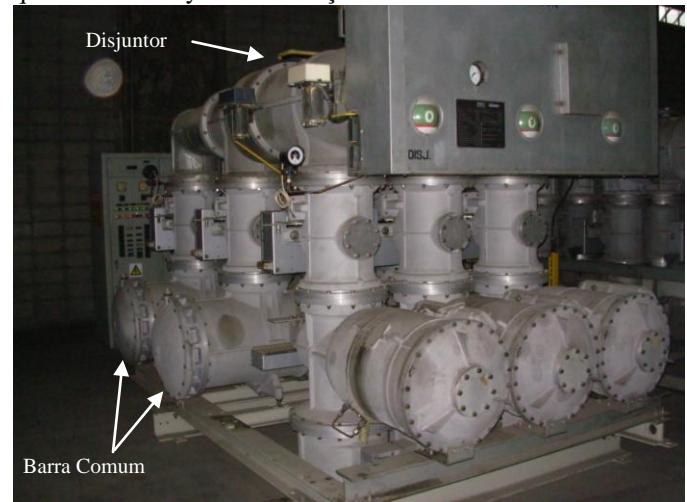


Fig. 3. Um bay da GIS da AES Eletropaulo

O sistema proposto irá monitorar duas grandezas básicas, a densidade do gás e o ponto de orvalho. O monitoramento da densidade de gás (massa/volume) dos compartimentos tem o objetivo de detectar vazamentos. Este parâmetro permite a detecção de níveis críticos da isolação que podem causar falhas no equipamento. Além disso, é possível determinar a interrupção do equipamento quando a quantidade de gás dentro dos compartimentos da GIS não forem mais suficiente para manter a isolação mínima necessária para a sua operação segura.

Umidade (H_2O) no SF_6 pode afetar o desempenho do equipamento de duas maneiras, redução da capacidade dielétrica ou, em temperaturas muito baixas, a umidade pode condensar nas superfícies de vedação e podem causar a ruptura completa da capacidade dielétrica. O monitoramento do ponto de orvalho nos compartimentos pode ajudar a reduzir os danos causados pela umidade.

Este projeto propõem o monitoramento de três bays. Para coletar os dados, será necessário a instalação de dois sensores em três pontos diferentes de cada bay, um sensor específico para ler a densidade e outro sensor específico para ler o ponto de orvalho. Os sensores usados neste projeto são:

1. Densidade – Wika GD-10;
2. Ponto de Orvalho – Michell SF 52.

Para que possam ser instalados os sensores na subestação será necessário agregar adaptadores para a conexão dos sensores em cada um dos pontos a serem monitorados. Serão utilizados três pontos distintos em cada bay, além de um ponto em cada barra da subestação. Os adaptadores serão instalados nos pontos utilizados para preenchimento de gás. Os pontos nas barras possuem manômetros fixados e necessitam de adaptadores distintos dos demais.

Uma vez que a subestação não possui qualquer ponto específico para conectar estes tipos de sensores, foi necessário desenvolver um adaptador específico para que os sensores pudessem ser conectados. Para a construção do adaptador foram utilizadas válvulas e conexões de um fabricante tradicional para montar a solução completa. Os detalhes do projeto genérico do conector podem ser observados na Fig. 4. Para cada ponto a ser monitorado será instalado um adaptador com três novas entradas. Duas delas serão utilizadas para conectar os sensores de ponto de orvalho e densidade será usada para conectar medidores de pressão ou ficará livre para ser utilizada na manutenção do gás.

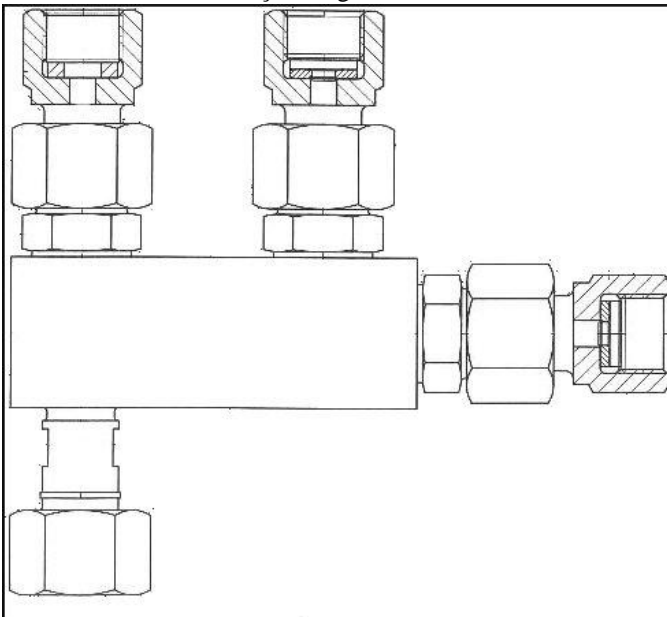


Fig. 4. Adaptador desenvolvido para conectar os sensores de ponto de orvalho e densidade

Uma vez disponíveis, os dados dos sensores devem ser coletados através de software para que possam ser manipulados, validados e armazenados. Quando os valores coletado estiverem em um banco de dados, será possível fazer análises quanto a qualidade do gás, e portanto, o dielétrico da subestação.

IV. METODOLOGIA DE DETECÇÃO

A subestação a ser monitorada foi construída com base em uma tecnologia mais antiga. Ela é dividida em três compartimentos principais para armazenar gás e possui diferentes pressões para os compartimentos dos disjuntores e os compartimentos do restante dos equipamentos. Os disjuntores operam em pressão mais alta em relação aos demais componentes do conjunto, desta forma é necessário um

sistema auxiliar para manter a pressão no nível desejado. De maneira geral, considera-se que os disjuntores operam em alta pressão, enquanto que os demais equipamentos da subestação operam em baixa pressão. Este perfil de funcionamento cria uma grande dificuldade de se monitorar apenas a pressão da subestação, principalmente devido a rápidas mudanças de pressão nos compartimentos durante a sua operação. Por este motivo, foi optado pelo monitoramento da densidade do gás nos compartimentos, em vez de sua pressão. Mais detalhes sobre estas questões são apresentados a seguir.

Durante a operação dos disjuntores, o SF₆ é transvazado do compartimento de alta pressão para o compartimento de baixa pressão, estabelecendo uma variação transitória na pressão e densidade destes compartimentos, o qual não representa necessariamente uma anormalidade. Este modo de operação expõe a dificuldade em controlar, de forma independente, a densidade do gás para cada compartimento e estabelecer níveis de alarmes para vazamentos, baseando-se apenas na variação de densidade. Entretanto, quando se considera a soma das massas, tanto dos compartimentos de alta pressão, quanto os compartimentos de baixa pressão, o total das massas sempre deve permanecer constante. Desta forma, será utilizada uma expressão, como mostrada em (1), para calcular a massa total do gás de cada bay.

$$M_{Total} = Vol_1 * Densidade_1 + Vol_2 * Densidade_2 \quad (1)$$

A soma das massas do gás deve ser obtida por um sistema de monitoramento através de um sensor de densidade em ambos os compartimentos e supervisionado por um software que irá calcular e considerar a expressão acima.

Além do sistema de monitoramento de densidade de gás, também serão coletados os sinais de abertura e os sinais de fechamento dos disjuntores. Desta forma, ao se fazer a relação da operação dos disjuntores será com a variação da densidade nos compartimentos será possível determinar se trata-se de uma variação normal originada pelo funcionamento normal do disjuntor ou se a variação pode indicar algum tipo de vazamento de gás. Após a operação do disjuntor, a densidade do gás em ambos os compartimentos deve retornar ao seu nível normal. Inicialmente, será necessário o estabelecimento do padrão de comportamento da densidade para que se possa definir os níveis normais da densidade. A partir da análise e caracterização deste comportamento, serão definidos os níveis de alarme para todos os pontos monitorados.

V. ARQUITETURA DO SISTEMA DE MONITORAMENTO

Para monitorar as condições do gás SF₆, foram definidos alguns requisitos para a arquitetura de hardware. Primeiramente, foi definido que seria priorizada a utilização de equipamentos de baixo custo, tanto para a aquisição de dados quanto para comunicação de dados. Como existem muitos pontos para aquisição de dados, os componentes especificados para realizar esta tarefa são bastante sensíveis para o custo total e devem considerar os requisitos relacionados a custos. Também foram escolhidos os protocolos abertos e

padronizados MODBUS e TCP/IP (para aquisição de dados e comunicação, respectivamente) que também ajudam na redução de custos do projeto.

De forma a fazer a aquisição destas grandezas a partir dos compartimentos da subestação, será necessário a instalação de três sensores de densidade de gás e três sensores de ponto de orvalho em cada bay. Além disso, será necessário a instalação de um sensor de densidade e outro de ponto de orvalho em cada uma das barras comum. Finalmente, será necessário monitorar os sinais de operação dos disjuntores de cada bay. O monitoramento dos dados (como, por exemplo, os dados dos sensores e outros sinais) será feito através de módulos de aquisição de dados. Os módulos utilizados neste projeto são os seguintes:

1. ICPDAS – ET 7017;
2. ICPDAS – ET 7051.

Estes módulos serão conectados a um switch através de uma rede Ethernet. Desta forma, os dados podem ser enviados através de um único cabo de fibra ótica (a partir do switch com interface para fibra ótica) para a sala de controle da subestação, distante 150 m. O protocolo de comunicação utilizado para a aquisição de dados será o MODBUS/TCP. Estes dados dos sensores serão coletados por um servidor OPC e armazenados em uma base de dados histórica para referências futuras. O projeto da arquitetura do sistema para esta solução está representado na Fig. 5.

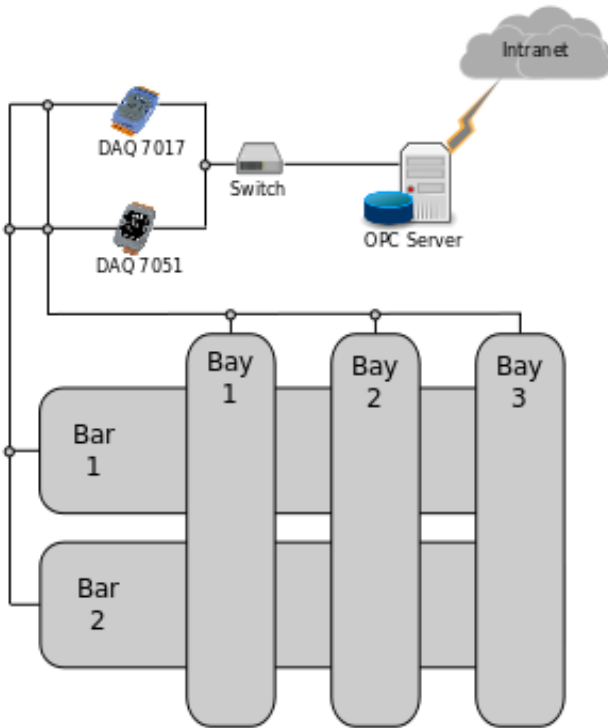


Fig. 5. Arquitetura de hardware do sistema de monitoramento

VI. AQUISIÇÃO E COMUNICAÇÃO DE DADOS

Para a aquisição e processamento de dados, foi especificado a utilização de protocolos e tecnologias abertas. O objetivo desta especificação é tornar a aplicação portátil para outras plataformas, bem como torná-la facilmente

adaptável para outras soluções similares.

Existem dois grupos de dados que devem ser coletados. O primeiro grupo consiste de dados lidos dos sensores de ponto de orvalho e densidade instalados na subestação. Estes dados são lidos através de módulos que fazem a conversão de sinais analógicos de 4-20 mA para valores que serão disponibilizados para leitura através do protocolo MODBUS. O segundo grupo consiste de dados relacionados aos sinais de abertura e fechamento dos disjuntores. Estes sinais são aquisitados através de módulos que interpretam os sinais, os convertem em dados digitais e os torna disponíveis através do protocolo MODBUS.

Os módulos de aquisição fazem a leitura dos dados dos sensores e operam em modo escravo dentro do modelo de comunicação do protocolo MODBUS. Os dados são então requisitados por um servidor OPC operando como interface mestre MODBUS. Para esta solução, o servidor OPC foi configurado para fazer requisições de dados a cada um minuto.

Os dados coletados são então armazenados em uma base de dados. Para realizar esta operação, foi desenvolvido um software que faz interface com o servidor OPC, coleta os dados e os grava na base de dados.

O nível mais alto do sistema desenvolvido é a interface de usuário, conforme representado na Fig. 6. Inicialmente, a interface terá apenas funções para exibir os dados lidos dos sensores e para fornecer dados históricos para análises. Além disso, será criada uma interface para configuração e exibição de alarmes de vazamentos. Esta interface será disponibilizada através de um servidor web conectado na rede da concessionária, de forma que possa ser acessado de qualquer computador da rede, apenas com a utilização de um navegador de internet.

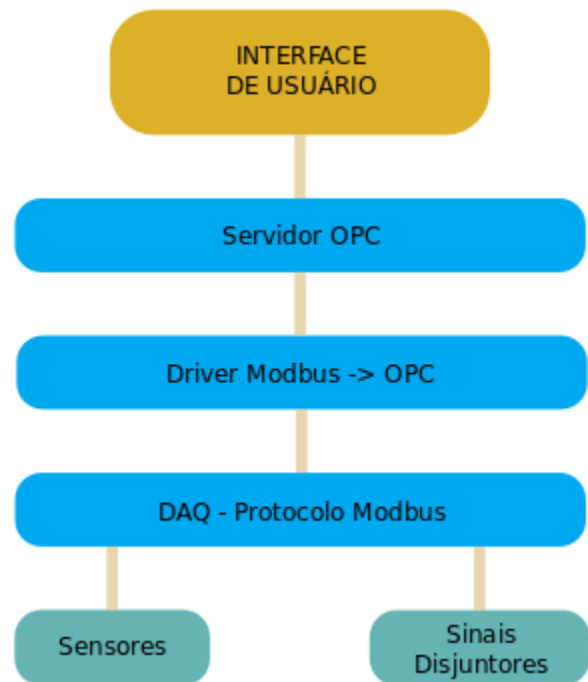


Fig. 6. Arquitetura de aquisição e comunicação de dados do sistema de monitoramento desenvolvido

VII. DISCUSSÃO

O sistema proposto para monitoramento de vazamentos de SF₆ e monitoramento da qualidade do gás está diretamente ligado a questões ambientais e também a procedimentos de manutenção de subestações isoladas a gás.

O gás SF₆ foi considerado por muito tempo como uma das melhores soluções para resfriamento e isolamento de equipamentos elétricos. Entretanto, após a constatação de que o gás é um dos mais potentes para o efeito estufa, a sua utilização foi severamente criticada e sentenciada por ambientalistas. Este fato influenciou muito a sua política de utilização e as práticas aplicadas a equipamentos elétricos. Além disso, atualmente surgiu uma grande preocupação por parte de instituições governamentais em controlar o uso indiscriminado de SF₆. Durante as visitas realizadas por parte dos autores para o desenvolvimento do trabalho, foi observado que os técnicos e pessoas ligadas a manutenção de equipamentos isolados a SF₆ demonstraram uma aderência muito grande a essas preocupações ambientais e aplicam políticas de preservação e reuso de SF₆. Também foi relatado que no passado a preocupação relacionada a equipamentos que utilizam SF₆ não era com vazamentos, mas apenas financeiras e técnicas, uma vez que o preenchimento ou substituição do gás era fácil e geralmente mais barato. Hoje em dia, existem também práticas de inspeção e regeneração de gás sendo usadas pelas concessionárias com o objetivo de preservação ambiental. Entretanto, a tecnologia utilizada em equipamentos isolados a SF₆ é bastante estável. Apesar do gás SF₆ ter um potencial muito grande para colaborar com o efeito estufa, a quantidade de gás eliminado para a atmosfera por conta desta tecnologia é muito pequeno, sendo que este número em muitas concessionárias é próximo de zero. Ao mesmo tempo, a quantidade de outros gases de efeito estufa eliminados para a atmosfera, como o CO₂, de menor efeito que SF₆, são muito maiores. Por este motivo, o uso de SF₆ não deve ser sentenciado, mas controlado através de supervisão adequada e aplicação de boas políticas de manutenção.

O segundo fator que motivou esta pesquisa está relacionado a práticas de manutenção. Atualmente, inspeções regulares são necessárias para verificar a qualidade do gás quando os componentes operam por longos períodos de tempo. Consequentemente, essas atividades consomem tempo e demandam a disponibilidade de equipe técnica. Com a instalação do sistema de monitoramento on-line será possível observar qualquer ponto monitorado a partir de qualquer computador ligado na rede da concessionária para verificar possíveis vazamentos, bem como a quantidade de umidade presente nos compartimento monitorados. Isso aumenta a eficiência na manutenção da subestação através da economia de tempo, dinheiro e recursos humanos.

O monitoramento de subestações isoladas a SF₆ é uma tarefa difícil. Enquanto a verificação da qualidade de gás e controle de vazamentos é necessária, recomenda-se que seja feito o mínimo de intervenção possível. Existem muitas soluções que podem ser usadas para verificações não invasivas como, por exemplo, a análise de descargas parciais usando

sensores acústicos. Entretanto, estas soluções não invasivas em geral são pouco eficientes e produzem resultados imprecisos ou vagos. Nos casos de plantas mais antigas, ainda em operação, as dificuldades de instalação de qualquer tipo de sistema de monitoramento muito maiores.

Devido a todos os problemas expostos, um passo importante no projeto de novas subestações isoladas a SF₆ seria a inclusão de pontos ou portas para monitoramento interno. Com isso, a verificação da qualidade do gás e também o controle de vazamentos poderia ser feito de uma forma mais simples e segura com a instalação de sensores de propósitos diversos para tornar as inspeções mais rápidas, seguras e mais eficientes.

VIII. RESULTADOS

Os valores de densidade obtidos com os sensores eletrônicos e a aplicação de comparações simultâneas dos compartimentos de alta e baixa pressão permitirão a identificação de vazamentos de gás nos compartimentos. Este método tem uma sensibilidade muito maior do que os métodos tradicionais usados atualmente, que são baseados em medidores eletromecânicos de pressão ajustados para certos níveis que expressam os limites operativos de densidade nos compartimentos devido ao deslocamento do gás utilizado para extinção por sopro do arco-elétrico nos disjuntores.

A partir dos valores obtidos on-line de umidade relativa/ponto de orvalho do SF₆, é possível estabelecer intervalos maiores, ou mais adequados, para inspeção com instrumentos externos. Desta forma, as emissões de SF₆ para a atmosfera são reduzidos, uma vez que a realização de inspeção da qualidade de gás com instrumentos externos, normalmente, resulta na eliminação da amostra de gás para o ambiente, mesmo que esta seja pequena. Além disso, a possibilidade de estender o prazo necessário para inspeções com amostras para medições com instrumentos externos também reduz o custo direto envolvido com a programação de equipe para realização desta atividade.

A supervisão e controle em tempo real da massa de gás contida nos compartimentos será feita com auxílio de sensores eletrônicos de densidade (pressão e temperatura). O controle através de sensores eletrônicos de densidade, por sua maior sensibilidade e opção de processamento digital permite, em caso de perda por vazamento, o acompanhamento de pequenas variações, a sua visualização em modo gráfico com a possibilidade de análise de tendência e/ou ocorrência periódica associada a outros eventos.

IX. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um sistema de monitoramento de baixo custo alternativo para avaliar a qualidade do gás e controle de vazamentos em uma subestação isolada a gás. Esta é uma primeira iniciativa para melhorar as práticas de manutenção e também atender as novas expectativas e exigências relativas a reduções de emissões de SF₆ para o meio ambiente. Os parâmetros monitorados podem

não ser suficientes para garantir a capacidade operacional completa da subestação para ser controlada e monitorada apenas remotamente. Entretanto, a partir deste primeiro passo, novas funcionalidades e melhoramentos podem ser incorporados ao sistema instalado para atender novas necessidades que surgirão apenas no longo prazo.

Uma das expectativas de desenvolvimentos futuros é a melhoria dos algoritmos para detecção de vazamentos. Este desenvolvimento depende da coleta de dados históricos de longos períodos, que a partir disso podem ser propostos refinamentos na metodologia e configuração do sistema. Somado a isso, o sistema e a metodologia podem ser estendidos para os demais bays da subestação. Além dos sensores instalados atualmente, outros novos tipos podem ser incluídos no sistema ou ainda podem ser desenvolvidos novos sensores de baixo custo. Também podem ser incorporados sensores para medições de outras grandezas que podem ser importantes para o diagnóstico do gás para a verificação da sua qualidade.

O sistema e a metodologia apresentados neste trabalho estão em fase de desenvolvimento e serão implementados brevemente em uma subestação isolada a gás da AES Eletropaulo. É intenção dos autores que os novos resultados e observações desta instalação sejam publicados em um evento futuro.

X. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a contribuição do Ms. José Guilherme Rodrigues Filho.

XI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] P. O'Connell et al., "SF₆ in the Electric Industry, Status 2000", *Electra*, n. 200, pp. 16-25, 2002.
- [2] P. Bolin e H. Koch, "Gas insulated substation GIS", presented at the Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE, pp. 3, 2006.
- [3] M. Etter and H. Koch, "Sulfur hexafluoride SF₆", presented at the Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE, pp. 1-4, 2008.
- [4] SF₆ Recycling Guide. International Council on Large Electric Systems (CIGRE), Task Force 23.10.01, vol. 117, 1997.
- [5] W. Tsai, "The decomposition products of sulfur hexafluoride (SF₆): Reviews of environmental and health risk analysis," *Journal of Fluorine Chemistry*, vol. 128, n. 11, pp. 1345-1352, Nov. 2007.
- [6] *IEEE guide for gas-insulated substations*. IEEE Std C37.122.1-1993, 1994.
- [7] *IEEE recommended practice for the interface of new gas-insulated equipment in existing gas-insulated substations*. IEEE Std 1416-1998, 1999.
- [8] *IEEE standard for gas-insulated substations*. IEEE Std C37.122-1983, 1988.
- [9] *SF₆ Tightness Guide*. International Council on Large Electric Systems (CIGRE), Working Group, vol. 430, 2010.