



**XXIV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GPT/09

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO 2

Grupo de Estudo de Produção Térmica e Fontes não Convencionais - GPT

DIAGNÓSTICO DA INSTRUMENTAÇÃO PARA GESTÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM UNIDADES DE GÁS E ENERGIA

**SIMIONI, T. | (*)
RADIX**

**RUCKER, C. P. R.
PETROBRAS**

**LOUREIRO, M. R. B.
PETROBRAS**

**BARROS, A. G.
PETROBRAS**

**FURLAN, L. T.
PETROBRAS**

**PINTO, P. D. M. R.
HOPE**

**RAMOS, J. A.
HOPE**

**NOBREGA, G.
RADIX**

**FONTES, M. A. S. G. D.
RADIX**

RESUMO

O presente trabalho compreende uma metodologia de diagnósticos da instrumentação disponível e identificação de lacunas visando o desenvolvimento de um sistema de medição e monitoramento para gestão eficaz da energia em usinas termelétricas, fábricas de fertilizantes nitrogenados e plantas de processamento de gás natural. A metodologia utilizada para definição da instrumentação necessária para monitorar o desempenho energético considera três níveis hierárquicos no sistema produtivo: a planta como um todo, cada unidade e os grandes equipamentos. Como resultados desse trabalho, foi possível mapear lacunas em instrumentos importantes para o monitoramento do desempenho energético.

PALAVRAS-CHAVE

Gestão Energética, Instrumentação, Usina Termelétrica, Monitoramento, Diagnóstico

1.0 - INTRODUÇÃO

As questões ambientais referentes à mitigação das mudanças climáticas e o alto custo da energia têm incentivado os setores intensivos em uso energético a buscarem soluções para a melhoria dos sistemas de medição e monitoramento de processos industriais, com foco em gestão da energia e melhoria do desempenho energético. Muitas vezes a instalação e manutenção de sistemas de medição, exceto os sistemas utilizados para controle, são deixadas em segundo plano. Porém, o monitoramento confiável de determinadas grandezas de processo possibilita a realização de ações de melhoria de desempenho energético com ganhos, por vezes, muito superiores ao investimento realizado na instalação e manutenção destes instrumentos. Portanto, para aplicação de um sistema de gestão da energia eficaz, faz-se necessário que a unidade defina e implemente um plano de medição apropriado à dimensão e complexidade dos seus processos.

Metodologias que facilitem o monitoramento e a correlação do uso da energia com a obtenção de um determinado produto são, portanto, de grande importância. Para tal, é importante que as grandezas relevantes medidas nos processos industriais estejam disponíveis e confiáveis. O objetivo do presente trabalho consistiu em realizar

diagnósticos da instrumentação disponível e identificar lacunas visando o desenvolvimento de um sistema de medição e monitoramento para gestão eficaz da energia em usinas termelétricas, fábricas de fertilizantes nitrogenados e plantas de processamento de gás.

A metodologia para definição da instrumentação necessária para monitorar o desempenho energético considera três níveis hierárquicos no sistema produtivo: a planta como um todo, cada unidade de processo e os grandes equipamentos. Por exemplo, dentro de uma usina termelétrica, para cada um dos processos específicos de geração de vapor, tratamento de água, ar comprimido, refrigeração, torres de resfriamento, compressão de gás natural, entre outros, define-se a instrumentação necessária para possibilitar o cálculo e monitoramento de sua eficiência energética. Da mesma forma, são definidos os instrumentos necessários para cálculo e monitoramento do desempenho energético dos grandes equipamentos como, por exemplo, turbinas a gás, motores a combustão, fornos, caldeiras, compressores, bombas etc.

2.0 - METODOLOGIA

O trabalho foi realizado em cinco etapas principais:

- Definição dos volumes de controle ao nível da planta, unidades de processo e principais equipamentos, visando monitorar os principais fluxos de massa e energia;
- Definição dos indicadores operacionais de desempenho energético para cada volume de controle e seleção das grandezas essenciais para possibilitar o seu monitoramento;
- Análise da documentação de instrumentação existente (folhas de dados e certificados de calibração);
- Diagnóstico do estado físico e operacional dos instrumentos, com identificação de lacunas de medição e proposição de melhorias;
- Especificação de novos instrumentos de medição para as lacunas identificadas, através da elaboração de folhas de dados.

2.1 Definição dos Volumes de Controle

A primeira etapa do trabalho consistiu na definição dos volumes de controle a partir da relevância de cada sistema, em termos energéticos, contemplando as seguintes visões: planta, unidades de processo e os principais equipamentos em uso de energia.

A análise na visão da planta consistiu na identificação das variáveis que determinam o desempenho energético da unidade como um todo, para o monitoramento energético global, como mostra o exemplo da *Figura 1*.

A análise ao nível das unidades de processo e equipamentos, exemplo apresentado na Figura 2, considera as interfaces energéticas internas à planta, de forma que a identificação de cada volume de controle é realizada através da caracterização da função produtiva principal e da relevância de cada sistema ou equipamento no consumo energético da unidade. Portanto, a definição dos volumes de controle para o levantamento da instrumentação necessária tem como base os seguintes critérios: (i) o volume de controle deve ser delimitado de acordo com a funcionalidade do sistema e suas principais correntes; e (ii) o volume de controle deve possuir alguma troca energética com outro volume de controle ou unidade e/ou consumir ou fornecer energia. Para isso, através da análise da documentação são identificados os principais equipamentos em termos de consumo energético e se eles devem ser analisados individualmente ou conjuntamente entre si.

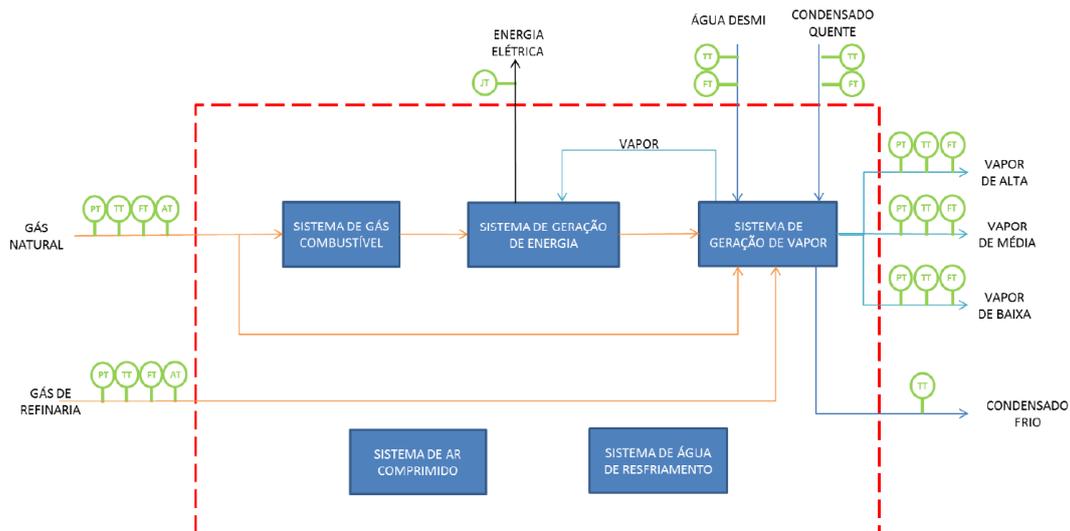


Figura 1. Volume de controle ao nível da planta (exemplo: termelétrica com cogeração).

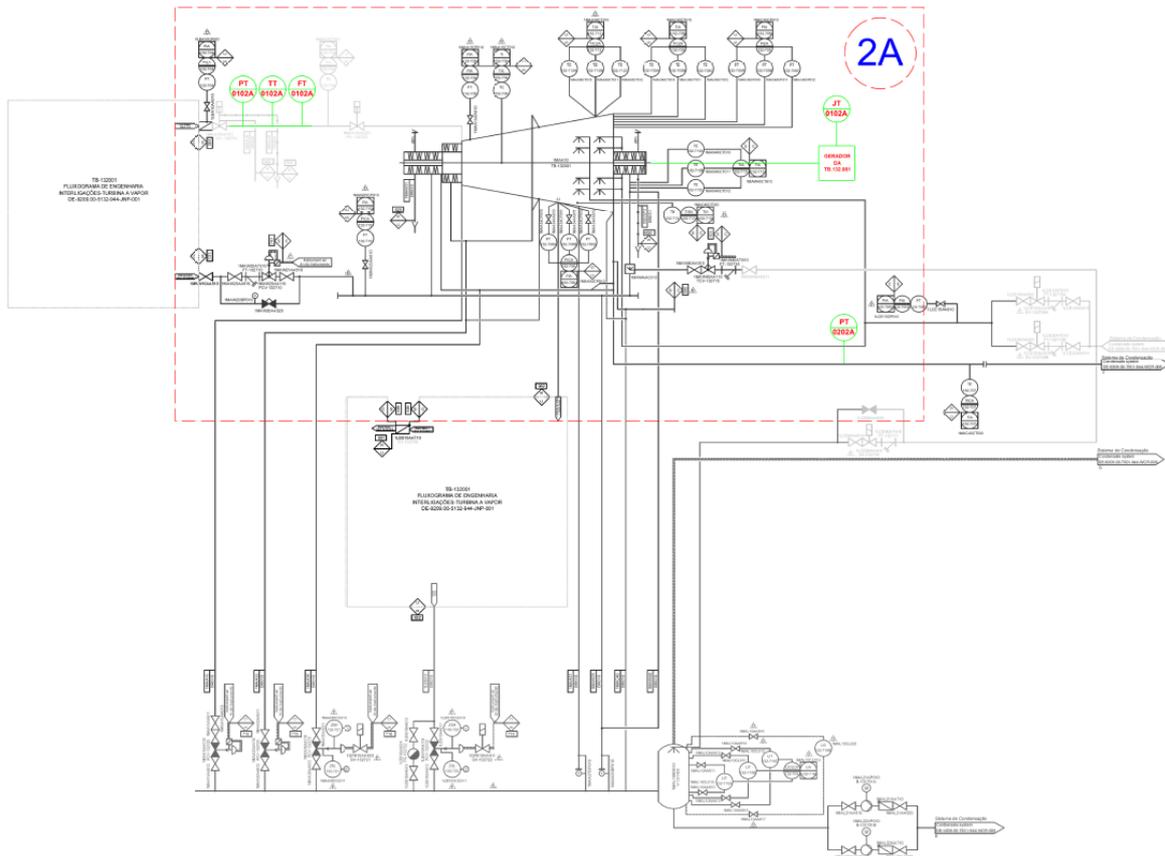


Figura 2. Volume de controle ao nível do sistema/equipamento (exemplo: turbina a vapor).

2.2 Definição dos Indicadores de Desempenho Energético e Grandezas para Monitoramento

A metodologia utilizada para definição dos pontos de medição para gestão energética consiste basicamente na definição da melhor formulação para avaliar o desempenho energético de um determinado volume de controle. Alguns equipamentos têm seu desempenho energético avaliado de forma conjunta com a máquina acionadora. Por exemplo, motores elétricos e bombas formam um conjunto, onde o motor fornece a energia para a bomba que, por sua vez, transfere a energia para o fluido. Naturalmente, essa energia cedida ao fluido é menor que a energia fornecida pelo motor, devido à existência de perdas mecânicas e térmicas. Desta forma, a razão entre a energia cedida ao fluido e a fornecida pelo motor será considerada como um indicador de eficiência. Este caso poderá ocorrer para outros equipamentos, e a eficiência será calculada da mesma forma: razão entre energia cedida e a energia fornecida.

A seguir, são apresentadas algumas premissas para avaliação do desempenho energético de tipologias de sistemas/equipamentos recorrentes nas unidades de processo estudadas.

2.2.1 Bombas

De acordo com Mattos (1998), para um cálculo genérico do rendimento de uma bomba, deve-se avaliar a relação entre a energia cedida por ela ao fluido e a energia absorvida por ela. No cálculo da eficiência da bomba, deve-se considerar tanto o trabalho cedido ao fluido, quanto o trabalho fornecido à bomba para seu acionamento.

2.2.2 Motores elétricos

A medição energética de motores elétricos é utilizada tipicamente para monitorar a energia de acionamento de bombas e compressores. A potência nominal do motor elétrico pode ser mensurada utilizando-se um medidor de potência instalado no painel ou quadro elétrico de alimentação.

2.2.3 Trocadores de calor

Os trocadores de calor têm seu desempenho energético avaliado a partir da comparação entre a transferência de calor nas condições operacionais e a transferência de calor esperada de acordo com o seu projeto. Para se determinar a transferência de calor pelo equipamento durante a operação, faz-se necessário adotar um dos métodos descritos abaixo. Já a capacidade de troca térmica de projeto é obtida a partir da documentação técnica do equipamento.

De acordo com Macintyre (1997), a modelagem de um trocador de calor é baseada na diferença de temperatura entre fluidos frios e quentes, na área de contato entre eles e na capacidade de transmissão de calor, associada ao

material e aspecto construtivo do equipamento. Essa modelagem é expressa em uma quantidade de calor transferida, conforme a Equação 1.

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T_{m\acute{e}dio} \quad (1)$$

Onde U é o coeficiente global de troca térmica, A é a área de transferência de calor e $\Delta T_{m\acute{e}dio}$ é a média logarítmica das temperaturas, um cálculo baseado nas temperaturas de entrada e saída das correntes quente e fria. O cálculo de eficiência de um trocador, portanto, poderá ser feito a partir da determinação do $\Delta T_{m\acute{e}dio}$, cuja equação varia caso as correntes frias e quentes, sejam paralelas ou contracorrentes. No entanto, independentemente do sentido das correntes, o $\Delta T_{m\acute{e}dio}$ é determinado a partir das temperaturas de entrada e saída das correntes frias e quentes. Outra maneira de efetuar o cálculo é através da medição do calor cedido ou recebido por uma das correntes:

$$q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (2)$$

Neste caso, a massa m pode ser medida através de um medidor de vazão e a diferença de temperatura ΔT , por um medidor a montante e um a jusante do trocador.

2.2.4 Compressores

Embora o cálculo de eficiência politrópica teórica varie a partir de aspectos construtivos de cada fabricante de compressor, de acordo com a norma ASME PTC 10 (1997) a eficiência politrópica pode ser calculada a partir do método do gás ideal ou método de Shultz, que trata de gases reais.

A eficiência politrópica termodinâmica determinada a partir do método do gás ideal é calculada para cada estágio de compressão. Uma vez calculada, é possível encontrar o trabalho de compressão. Nela, levam-se em consideração fatores construtivos do compressor, composição do gás, entalpia, pressão e temperatura de entrada e saída de cada estágio. Para se efetuar o cálculo de entalpia, deve-se levar em consideração a composição, temperatura, massa e pressão.

É importante obter o trabalho politrópico de compressão para a avaliação de sistemas em conjunto, por exemplo, um sistema turbina-compressor. Neste âmbito, o trabalho politrópico encontrado é referente a cada estágio de compressão. Uma vez calculado, é possível determinar o trabalho total fornecido pelas turbinas fazendo-se as devidas correções de eficiência mecânica.

Para corrigir a não idealidade do gás e calcular com precisão a eficiência do compressor, é sugerida a análise de composição do gás para que se torne possível a determinação do fator de compressibilidade. Este analisador também poderá ser excluído da lista de instrumentação necessária caso o compressor analisado possua baixa variação na composição de seus gases de processo.

2.2.5 Turbinas a gás

De acordo com a norma ASME PTC 22 (2005), o método para calcular o desempenho de uma turbina a gás é baseado no balanço de massa e de energia do equipamento. Como esta turbina aciona um gerador elétrico, sua eficiência térmica pode ser calculada através da razão entre a potência elétrica bruta medida nos terminais do gerador e o calor fornecido pelo combustível. A densidade e o poder calorífico podem ser calculados a partir da análise da pressão, temperatura e composição do gás combustível.

2.2.6 Turbinas a vapor

No caso de turbinas a vapor, a eficiência isentrópica é utilizada como indicador de desempenho do equipamento. Caso o vapor de entrada e saída da turbina possa ser bem caracterizado apenas com pressão e temperatura, tal eficiência pode ser mensurada de acordo com a ASME PTC 6 (2004) e Smith et al. (2007), as quais são iguais e necessitam dos mesmos equipamentos para que sejam medidas.

Caso o vapor de saída da turbina não possa ser bem definido em termos energéticos, devido ao fato deste ter título de vapor diferente de um, ou seja, vapor saturado, a sua eficiência é calculada com base na inferência do trabalho real e no seu trabalho isentrópico, que será calculado com informações de instrumentos. O trabalho real é medido de forma indireta, analisando o trabalho fornecido ao fluido pela máquina acionada pela turbina, e realizando as devidas correções de eficiência mecânica, a fim de se chegar ao trabalho real realizado pela turbina. Este trabalho real é dividido pelo trabalho isentrópico, o qual pode ser calculado apenas com pressão e temperatura na entrada e pressão na saída da turbina.

A Equação 3 mostra a eficiência de acordo com ASME PTC 6 (2004).

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{\Delta h + T_0 \cdot \Delta s} \quad (3)$$

Onde, Δh é igual à soma do trabalho atual da expansão do vapor, Δs é a soma das variações de entropia correspondentes às expansões e T_0 é a temperatura correspondente à seção de exaustão.

A Equação 4 mostra a eficiência isentrópica da turbina de acordo com Smith et al. (2007).

$$\eta = \frac{\Delta H}{(\Delta H)_s} \quad (4)$$

Onde $(\Delta H)_s$ corresponde à entalpia isentrópica, que, por sua vez, é igual ao trabalho isentrópico da turbina, $W_e = (\Delta H)_s$, e ΔH é a entalpia do vapor medida no momento, que é igual ao trabalho realizado pelo vapor no momento, $W_e = \Delta H$.

2.2.7 Fornos e unidades geradoras de vapor

A eficiência utilizada para o cálculo do desempenho energético das unidades geradoras de vapor convencionais e dos fornos é a eficiência pelo “método indireto”, onde se faz necessário medir a composição do gás combustível, a temperatura de admissão do ar, a temperatura do gás de exausto e a quantidade de excesso de O_2 na corrente de gás de exausto.

2.2.8 Caldeiras recuperadoras

As caldeiras recuperadoras têm sua energia fornecida por um gás a elevadas temperaturas, promovendo o aproveitamento energético da energia contida nesse gás. Portanto, o desempenho energético destes equipamentos é avaliado através das medições de temperatura dos gases na entrada e saída (chaminé) da caldeira e a temperatura ambiente.

Supondo-se que o calor máximo que poderia ser aproveitado pela caldeira seja obtido quando o gás alcançasse a temperatura ambiente, e sabendo-se que o calor real trocado é o quanto de energia este possuía na entrada da caldeira menos o quanto está saindo na chaminé, tem-se, de acordo com método proposto a eficiência da unidade recuperadora de vapor que pode ser calculada pela seguinte Equação:

$$\eta = \frac{T_{\text{entrada caldeira}} - T_{\text{chaminé}}}{T_{\text{entrada caldeira}} - T_{\text{ambiente}}} \quad (5)$$

Onde $T_{\text{entrada caldeira}}$ é a temperatura dos gases de exausto na entrada da unidade geradora de vapor, $T_{\text{chaminé}}$ é a temperatura dos gases de exausto na saída da chaminé da unidade geradora de vapor e T_{ambiente} é a temperatura ambiente.

2.2.9 Motores a combustão interna

A medida de eficiência do motor pode ser feita avaliada através da relação entre o trabalho produzido e a quantidade de energia fornecida pelo combustível na combustão:

$$\eta = \frac{W}{m_f Q_{HV}} \quad (6)$$

Onde, W é o trabalho realizado pelo motor, m_f é a massa de combustível e Q_{HV} refere-se ao poder calorífico do combustível.

2.3 Análise da documentação

A segunda etapa da metodologia, denominada coleta e análise da documentação, tem como objetivo verificar se as grandezas de medição, identificadas na etapa anterior como relevantes para o monitoramento do desempenho energético, já possuem instrumentação adequada.

O procedimento utilizado para o levantamento das informações da instrumentação é composto pelos seguintes passos:

- vi. Análise das grandezas de medição relevantes identificadas na etapa anterior;
- vii. Análise dos instrumentos de medição existentes, a partir do fluxograma de processo;
- viii. Identificação da instrumentação que poderá atender a mais de um ponto de medição;
- ix. Levantamento da documentação de instrumentos existentes (folhas de dados e certificados de calibração).

Nesta etapa, é feita a primeira análise dos instrumentos de medição existentes, a partir das folhas de dados, além da identificação das lacunas de medição, a partir dos fluxogramas de processo e do sistema supervisório. Entende-se como lacuna de medição os instrumentos inexistentes, ou aqueles que não estejam operando de forma confiável.

Ao final desta etapa, tem-se uma visão preliminar das lacunas da instrumentação para o monitoramento energético.

2.4 Diagnóstico de campo

A terceira etapa consiste no levantamento em campo para o diagnóstico da instrumentação existente, verificando o estado físico e operacional dos instrumentos listados previamente.

O diagnóstico dos instrumentos de medição segue os seguintes passos:

- x. Análise da lista de instrumentos elaborada na etapa anterior;
- xi. Verificação da confiabilidade da medição junto aos operadores;
- xii. Inspeção visual do estado físico e da instalação do instrumento;
- xiii. Registro fotográfico;
- xiv. Verificação das variáveis operacionais no sistema supervisório e historiador de processos;
- xv. Elaboração da lista de instrumentos contendo todos os instrumentos existentes e as lacunas encontradas.

Dessa forma, ao final desta etapa a lista de instrumentos atualizada contém as seguintes informações, para cada instrumento:

- xvi. Identificador do instrumento existente;
- xvii. Identificador da linha em que o instrumento está instalado;
- xviii. Serviço da linha;
- xix. Descrição do tipo de medição;
- xx. Indicação do fluxograma onde o instrumento está representado;
- xxi. Volume de controle onde está localizado o instrumento;
- xxii. Folha de dados;
- xxiii. Certificado de calibração;
- xxiv. Indicação se o instrumento está integrado com o sistema de controle e supervisão;
- xxv. Indicação se o instrumento está disponível no historiador de processo;
- xxvi. Indicação se o instrumento é confiável.

Portanto, o diagnóstico de campo é realizado através de inspeções visuais e registros de imagens dos instrumentos. São verificadas também as condições operacionais dos instrumentos em campo, a integração dos instrumentos existentes com o sistema de controle e supervisão da unidade, bem como a disponibilidade e confiabilidade no sistema historiador, ou base de dados de processo.

2.5 Especificação de novos instrumentos

A etapa final da metodologia consiste na especificação dos novos instrumentos visando suprir as lacunas identificadas no diagnóstico realizado.

A especificação dos instrumentos identificados como necessários é realizada com base nas informações obtidas durante as visitas técnicas e levantamentos complementares. Esta fase final tem como objetivo elaborar folha de dados para facilitar o processo de aquisição e instalação dos novos instrumentos.

3.0 - RESULTADOS

O diagnóstico realizado permitiu o mapeamento das lacunas de instrumentos importantes para o monitoramento do desempenho energético, tais como: inexistência de instrumentos relevantes, medidores fora de operação, falta de calibração, instrumentos sem conexão com o sistema supervisão da unidade ou sem registro no historiador de processo. Em conjunto com os engenheiros de processo, para cada unidade foi definida uma priorização das ações para correção das lacunas e problemas mais críticos para a monitoração do desempenho energético.

A Figura 3 apresenta o resultado consolidado das 21 unidades operacionais onde o diagnóstico foi realizado. De um total de 4.372 instrumentos considerados como necessários para a perfeita avaliação do desempenho energético nas 21 unidades operacionais, 1.597 instrumentos, o que equivale a 36,5% do total, não estão instalados. Analisando-se por tipologia da instrumentação, os transmissores de vazão respondem pela maior parte das lacunas (28,6%), seguidos pelos transmissores de temperatura (27,8%) e pelos transmissores de potência (20,4%).

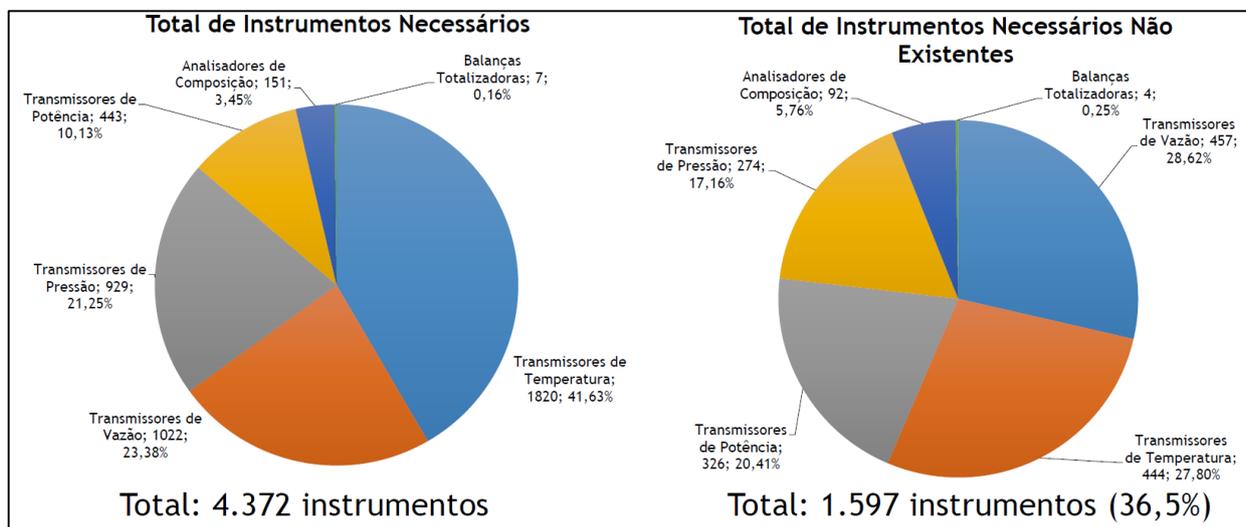


Figura 3. Total de instrumentos necessários e lacunas de medição identificadas.

A Figura 4 apresenta o percentual de lacunas de instrumentos de medição por unidade operacional, sendo que as melhores unidades apresentaram 85% da instrumentação necessária e a pior apresentou apenas 40% da instrumentação necessária para a perfeita avaliação do desempenho energético.

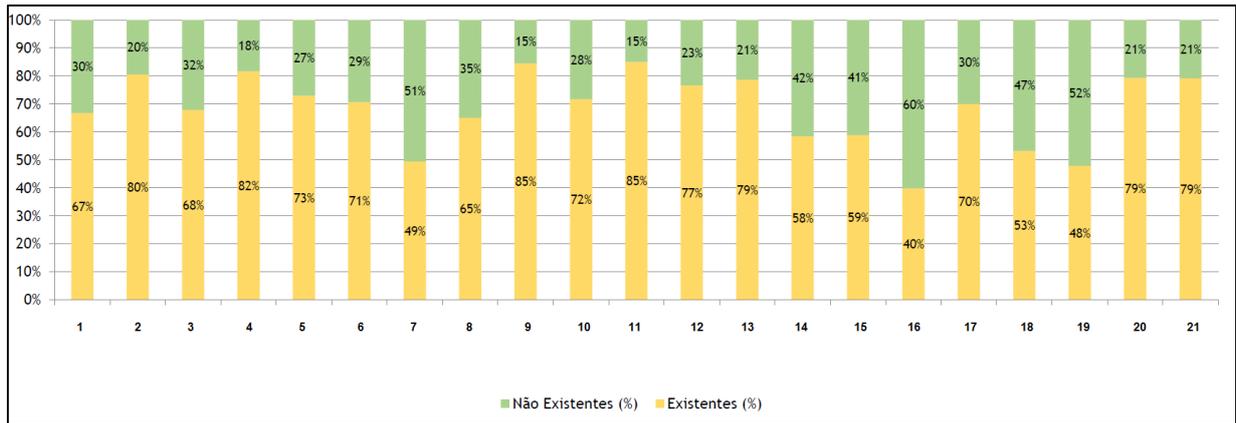


Figura 4. Percentual de lacunas de instrumentos por unidade operacional.

A Figura 5 apresenta a integração dos instrumentos existentes com o sistema supervisor por unidade operacional. A pior unidade avaliada apresentou apenas 76% destes instrumentos interligados com o sistema supervisor. Já 5 das 21 unidades avaliadas apresentaram todos os instrumentos identificados como necessários interligados ao sistema supervisor.

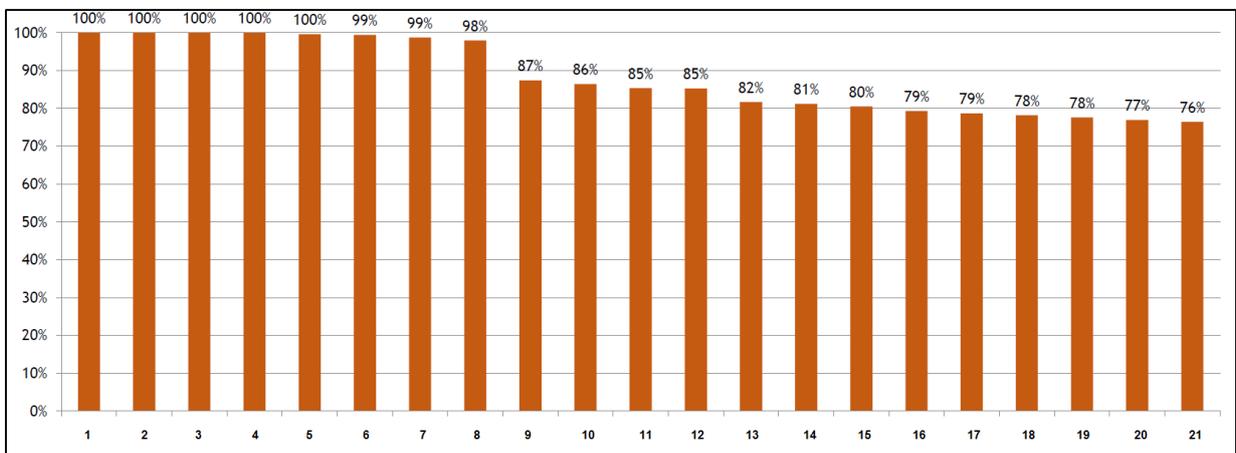


Figura 5. Integração dos instrumentos existentes com o sistema supervisor por unidade operacional.

A Figura 6 apresenta o resultado da confiabilidade dos instrumentos existentes por unidade operacional. Das 21 unidades estudadas, 8 delas apresentaram 100% dos instrumentos necessários para a avaliação do desempenho energético considerados como confiáveis. Porém, a pior unidade apresentou apenas 38% destes instrumentos avaliados como confiáveis.

A Figura 7 apresenta a integração dos instrumentos existentes com o historiador de processo por unidade operacional. A pior unidade avaliada não possui historiador de processo, sendo que a segunda pior apresentou apenas 34% dos instrumentos considerados como necessários interligados ao historiador. Já a melhor unidade avaliada neste quesito apresentou 99% dos instrumentos identificados como necessários interligados ao historiador de processo.

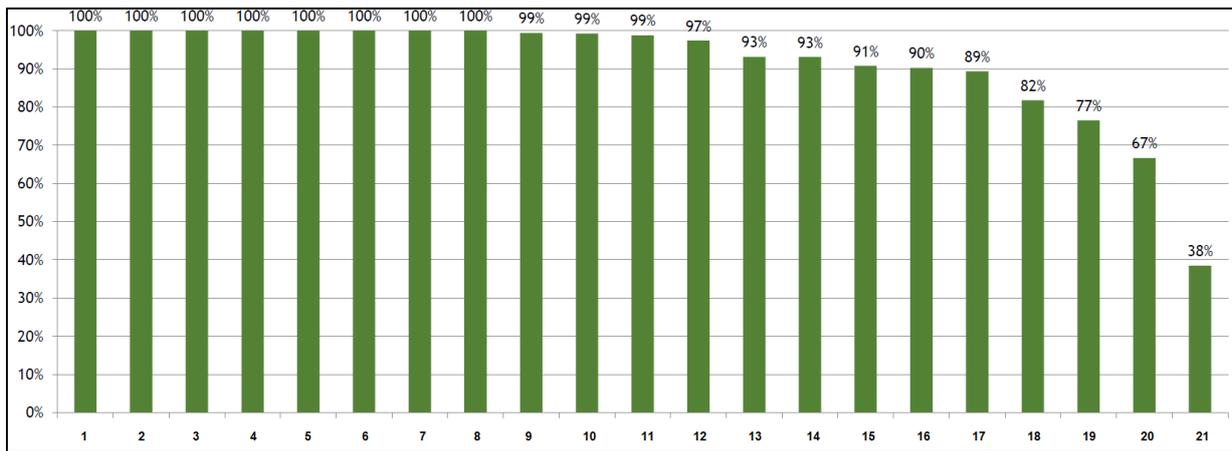


Figura 6. Prevalência da confiabilidade dos instrumentos existentes por unidade operacional.

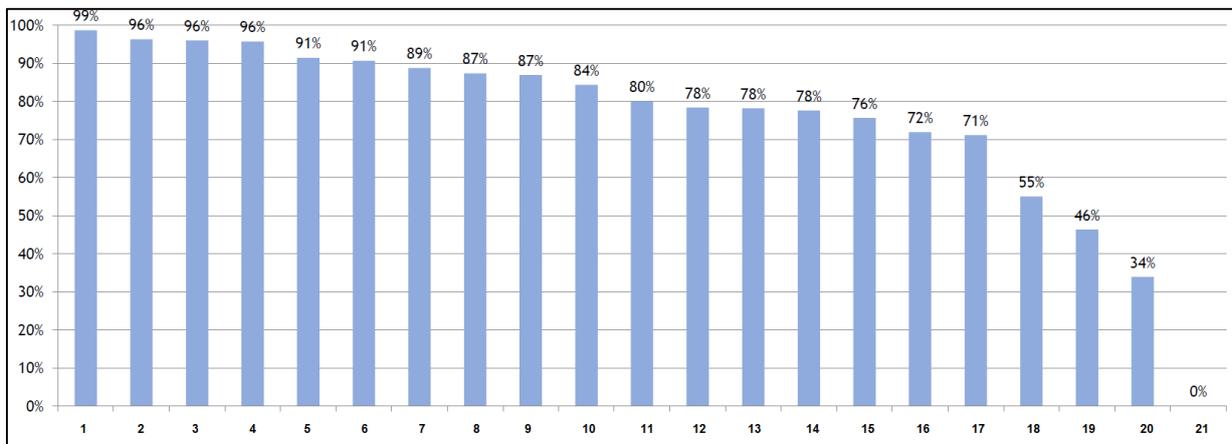


Figura 7. Integração dos instrumentos existentes com o historiador de processo por unidade operacional.

4.0 - CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma metodologia visando à realização de levantamento e diagnóstico de instrumentação para o estabelecimento de um sistema de gestão da energia, viabilizando o monitoramento do desempenho energético da unidade operacional.

A metodologia de diagnóstico de instrumentação apresentou bons resultados, à medida que permitiu a identificação da situação atual, com suas lacunas e potenciais melhorias. Além disso, a metodologia apresentou-se como uma forma prática e padronizada para o levantamento das grandezas relevantes para o monitoramento do desempenho energético das unidades de geração termelétrica, fertilizantes e processamento de gás natural, e que pode ser adaptada e replicada a outros tipos de unidades de processos.

5.0 - REFERÊNCIAS

- (1) ANSI/API STANDARD 560, 4ª ed., 2007.
- (2) ASME PERFORMANCE TEST CODE, PTC 6, 2004.
- (3) ASME PERFORMANCE TEST CODE, PTC 10, 1997.
- (4) ASME PERFORMANCE TEST CODE, PTC 22, 2005.
- (5) HEYWOOD, J. B. Internal Combustion Engine Fundamentals. Capítulo 2, 1988.
- (6) HIMMELBLAU, D. M. Principios Básicos y Cálculos em Ingeniería Química, 6ª ed., PHH, 1997.
- (7) MATTOS, E. E.; FALCO, R. Bombas Industriais, 2ª ed. Interciência, p. 474, 1998.
- (8) MACINTYRE, A. J. Equipamentos Industriais e de Processo. LTC, 1997.
- (9) Petrobras Gás e Energia, GE-Corp/SMES/EFEN, Indicadores operacionais, Rev. B, Petrobras Gás e Energia, 2013.
- (10) SMITH, J. M., VANNESS, H. C., ABBOT, M. M. Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química, 7ª ed., Apêndice F, LTC, 2007.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Tássio Simioni

Bento Gonçalves – RS (03/05/1988)

Engenheiro Químico – UFSC (2012)

Especialista em Engenharia de Processamento de Gás Natural – UFRJ (2014)

Mestre em Planejamento Energético – COPPE/UFRJ (2017)

Atualmente é coordenador de projetos de energia na RADIX. Possui experiência no desenvolvimento de projetos de otimização operacional, eficiência energética na geração de energia elétrica, sistemas de monitoramento, previsão e otimização em tempo real, e novas tecnologias para geração e transmissão de energia, com foco em energias renováveis.