

# Revista Técnica da UNIVERSIDADE PETROBRAS

n.6, set. 2018



ISSN: 2359-134X

A Revista Técnica da Universidade Petrobras (RTUP), em seu 6º número digital, continua fomentando o registro dos resultados de estudos e atividades de seus empregados para disseminar o conhecimento, em todas as direções, e inspirar novas e grandes descobertas em todas as áreas da companhia.

A RTUP está disponível na versão digital e editada no RH/UP, mantendo as orientações de otimização dos recursos da companhia.

Neste número apresentamos seis novos artigos, escritos por 11 empregados da companhia e 1 colaborador e 1 autor externo, sobre os mais variados temas de interesse, tais como *business intelligence*, estruturas submarinas, *benchmarking*, manutenção de analisadores de processo, adequação de fornos e norma técnica internacional.

O artigo "Aplicação de ferramenta de *Business Intelligence* (BI) na gestão da manutenção em *facilities*: um estudo de caso", de Luiz Gustavo Fontes de Oliveira, demonstra a aplicabilidade do uso da ferramenta de BI como agregadora de valor nas atividades de manutenção em *facilities* e conseqüentemente aumentando a confiabilidade de sistemas prediais e de utilidades.

Em "Avaliação comparativa baseada em risco para destinação de estruturas submarinas: um ensaio de Modelo *Fuzzy*", de Wendell Dias Pinto e Giovanni Alessandro Fiorentini, os autores avaliam comparativamente os cenários de destinação de estruturas submarinas a serem descomissionadas.

"*Benchmarking* para engenharia de poços", de Ricardo de Melo e Silva Accioly e Rafael de Oliveira Valle dos Santos, aborda como o processo de *benchmarking* é realizado em algumas das principais empresas do setor de petróleo e gás.

O artigo "Dispositivo de processo controlado por medição analítica", de Elton Alves de Souza Filho, Eduardo Azevedo de Melo e Helcio Justiniano Cavalcante, apresenta pressupostos técnicos e embasamento para uma discussão mais aprofundada sobre a manutenção de analisadores de processos.

Já o estudo de caso "projeto de adequação dos fornos L-1A/B para atendimento a demanda ambiental e aumento de carga", de Rodrigo Penha Andrade Rocha, Laudemiro Nogueira Júnior, Renato Vianna Chagas e Paulo Henrique Ferraz do Amaral Filho, apresenta o projeto multidisciplinar elaborado para a adequação dos fornos da Unidade C da RPBC em alinhamento às diretrizes de Segurança, Meio Ambiente e Saúde (SMS) da Petrobras não só no que se refere à redução de emissões atmosféricas, mas também aos benefícios em aspectos de segurança e saúde.

No "Relato de experiência de trabalho de pesquisa que se tornou padrão internacional de normalização técnica", de Roberval Bulgarelli, é apresentado o desenvolvimento e aplicação de novo algoritmo para a proteção térmica de motores elétricos industriais, desenvolvidos por consultor da Petrobras, que serviram de base para elaboração da norma técnica internacional IEC 60255-149.

A Universidade Petrobras incentiva todas as formas de criação e compartilhamento do conhecimento e trabalha para disponibilizar para toda a companhia os resultados das ações e estudos desenvolvidos pelos empregados e colaboradores, nas mais variadas áreas de atuação.

Desejamos a todos uma excelente leitura!



Hermes Gomes Filho  
Gerente  
RH/UP



Natácia Priscila Andrade da Cunha Alves  
Gerente Setorial  
RH/UP/Recursos Educacionais

Recursos Humanos

**Universidade Petrobras**

Gerente

Hermes Gomes Filho

**Recursos Educacionais**

Gerente Setorial

Natácia Priscila Andrade da Cunha Alves

**Editora Responsável / Coordenação Editorial**

Anna Paula Tavares de Araujo / Márcia Cavalcanti Moreira (estagiária)

**Diagramação**

Anna Paula Tavares de Araujo

**Projeto Gráfico / Infografia**

Cláudio Souto Baptista (BK Consultoria) / Carla Gurjão Machado (estagiária) / Anna Paula Tavares de Araujo

**Revisão ortográfica e gramatical**

Betty Vibranovski

# SUMÁRIO

## 06

**APLICAÇÃO DE FERRAMENTA DE BUSINESS INTELLIGENCE (BI) NA GESTÃO DA MANUTENÇÃO EM FACILITIES:** um estudo de caso  
Luiz Gustavo Fontes de Oliveira

## 16

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA BASEADA EM RISCO PARA DESTINAÇÃO DE ESTRUTURAS SUBMARINAS:** um ensaio de Modelo *Fuzzy*  
Wendell Dias Pinto  
Giovanni Alessandro Fiorentini

## 28

**BENCHMARKING PARA ENGENHARIA DE POÇOS**  
Ricardo de Melo e Silva Accioly  
Rafael de Olivares Valle dos Santos



**54**

**RELATO DE EXPERIÊNCIA DE TRABALHO DE PESQUISA QUE SE TORNOU PADRÃO INTERNACIONAL DE NORMALIZAÇÃO TÉCNICA**

Roberval Bulgarelli

**46**

**PROJETO DE ADEQUAÇÃO DOS FORNOS L-1A/B PARA ATENDIMENTO A DEMANDA AMBIENTAL E AUMENTO DE CARGA**

Rodrigo Penha Andrade Rocha

Laudemiro Nogueira Júnior

Renato Vianna Chagas

Paulo Henrique Ferraz do Amaral Filho

**36**

**DISPOSITIVO DE PROCESSO CONTROLADO POR MEDIÇÃO ANALÍTICA**

Elton Alves de Souza Filho

Eduardo Azevedo de Melo

Helcio Justiniano Cavalcante

# APLICAÇÃO DE FERRAMENTA DE BUSINESS INTELLIGENCE (BI) NA GESTÃO DA MANUTENÇÃO EM FACILITIES: um estudo de caso

Luiz Gustavo Fontes de Oliveira





## RESUMO

A busca na otimização dos recursos prediais e industriais das companhias associada à necessidade de alto grau de disponibilidade e confiabilidade dos sistemas e equipamentos que compõem as edificações tornam as atividades de manutenção primordiais para o sucesso organizacional. A manutenção eficiente não pode mais focar exclusivamente em reparação, necessita de grande gama de informações referentes aos sistemas e equipamentos para que as metas organizacionais de confiabilidade sejam alcançadas. Este trabalho visa demonstrar a aplicabilidade do uso de ferramenta de *Business Intelligence* como agregadora de valor nas atividades de manutenção em *facilities* e, por conseguinte o aumento da confiabilidade de sistemas prediais (*facilities*) e de utilidades.

**Palavras-Chave:** *Facilities*. *Business intelligence*. Manutenção. Indicador. Gestão.

## ABSTRACT

The quest for optimization of the buildings and industrial resources of the companies associated with the need for a high degree of availability and reliability of the systems and equipment that make up the buildings make the maintenance activities paramount for organizational success. Efficient maintenance can no longer focus exclusively on repairing, thus requiring a wide range of information on systems and equipment for organizational reliability goals to be achieved. This work aims to demonstrate the applicability of the use of Business Intelligence tool as value aggregator in the maintenance activities in facilities and utilities and therefore the increase of the reliability of building systems.

**Keywords:** facilities, business intelligence, maintenance, key performance indicator, management.

## 1 INTRODUÇÃO

As atividades relacionadas à manutenção ganharam grandes proporções com a revolução industrial ocorrida no século XVIII, quando novas tecnologias para criação de equipamentos foram criadas no intuito de promover maior eficiência nos processos produtivos. Inicialmente os operadores eram os principais responsáveis por realizar intervenções de manutenção, não havendo segregação de profissionais de operação e manutenção.

Com os avanços tecnológicos, surgimento de maquinários cada vez mais complexos associados à necessidade de maior eficiência, as atividades de manutenção ganharam importância ímpar dentro desse contexto. A manutenção não pode mais ser resumida em retornar um equipamento à correta operação, é necessário que este tenha a maior disponibilidade e confiabilidade possível. Criação de equipes especializadas de manutenção, estudos sobre confiabilidade e análise de dados de falhas são fundamentais para alcançar os objetivos organizacionais de operacionalidade.

Aliado a tal fato, o avanço tecnológico, com difusão dos computadores a partir de meados da década de 1960, trouxe inovações para controle, medição e análise de falhas, tanto em termos de tratamento de dados quanto em termos de disponibilidade de novos instrumentos e equipamentos. Assim, foram desenvolvidos critérios de previsão de falhas, com equipes focadas no melhor aproveitamento dos recursos disponíveis, através de controles estatísticos, estudos das avarias e uso de sistemas informatizados.

A partir de 1980, com desenvolvimento dos microcomputadores a custos mais acessíveis e controles mais simples, as equipes de manutenção adquiriram maior independência para criar e aplicar seus programas, sem necessidade de analista externo à área. Isso possibilitou enorme avanço no manejo de informações e análise de dados que envolviam manutenção e produção (TAVARES, 2000).

Atualmente, a sociedade está vivenciando a era do conhecimento em que este emerge como fator primordial de geração de valor e riqueza em decorrência aos fatores clássicos de produção (capital, terra, trabalho). A criação de conhecimento depende, entre outros aspectos, da disponibilidade e facilidade de obtenção de dados organizados e sistematizados, e esta realidade está também presente e vívida na realidade das atividades de gerenciamento e execução da manutenção.

Os dados referentes aos equipamentos, sistemas, intervenções e manutenções são numerosos, variados e desconexos e, portanto, necessitam de uma plataforma tecnológica que permita transformá-los em informações lógicas e integradas para que os gestores dos processos possam gerar conhecimentos e assim tomar decisões.

A obtenção e armazenamento desses dados é trivial por meio de sistemas computadorizados. Entretanto, transformar essa grande gama de dados em informação é o grande agregador de valor do processo, e essa atividade pode ser suportada com grande efetividade através de ferramentas de *business intelligence* (BI) já que estas permitem a realização desde a extração dos dados a serem tratados até a análise dos mesmos sob múltiplas perspectivas.

## 2 OBJETIVO

A gestão de *facilities* de uma infraestrutura compreende atividades em quaisquer tipos de edificações, sejam elas industriais, instituições públicas, comerciais ou hospitalares e tem como objetivo proporcionar o bom desempenho e prolongamento da vida útil das construções. O gerenciamento efetivo de ativos proporciona economia, pois evita custos devido à degradação do patrimônio, além de prevenir acidentes causados por falhas ou defeitos em função de desgastes de utilização e manuseio.



Segundo o *International Facilities Management Association* (2003 apud FERREIRA; BONIN, 2006, p. 4) a gestão de *facilities* é uma atividade multidisciplinar que assegura funcionalidade ao ambiente predial, integrando pessoas, espaço, processos e tecnologia.

De acordo com Regonha (2014, p. 17), os ativos existem para proporcionar valor à organização conforme os seguintes parâmetros:

- objetivos organizacionais são traduzidos em decisões técnicas e financeiras que norteiam planejamentos;
- o desempenho do ativo é mensurável e rastreável;
- gerenciamento de risco de forma transparente;
- liderança e cultura são determinantes na realização do valor;
- melhorias contínuas em todos os estágios do ciclo de vida;
- o ciclo de vida dos ativos é considerado nas perspectivas organizacionais.

O objetivo deste artigo é demonstrar a aplicabilidade e possibilidade de ganhos quando da utilização adequada de ferramenta de BI para obtenção de novos conhecimentos referentes à manutenção de alguns sistemas componentes de *facilities* de uma organização empresarial, a partir da correta extração, análise, interconexão e associação de dados já disponíveis.

### 3 FUNÇÃO MANUTENÇÃO NA GESTÃO DE FACILITIES

As organizações, independentemente do porte, necessitam manter suas instalações funcionando de forma adequada e eficiente para que estas possam cumprir suas metas e objetivos organizacionais. Quanto maior a quantidade, extensão e complexidade dos ativos prediais assim como os sistemas e equipamentos que os compõem (climatização, elevadores, sistemas de combate a incêndio, geradores de energia, etc.), mais esforços de gestão para a realização das atividades de manutenção são necessários.

O nível mais elementar da gestão de *facilities* encontra-se na operação e manutenção do edifício e, em nível mais elevado, o gerenciamento de todo o ambiente de trabalho, atuando pró-ativamente para suportar os objetivos estratégicos da organização, agregando valor ao seu negócio. Assim, pode-se entender a gestão de *facilities* como um subsistema do edifício, em que as entradas (insumos, informação e tecnologia) são transformadas através de processos em produtos (serviço de suporte). É importante destacar que a maneira como a gestão de *facilities* é executada depende do desenvolvimento de sua estratégia, a qual deverá estar alinhada com a estratégia da organização. O tipo de organização e sua cultura empresarial influenciam muito a gestão de *facilities*, já que esta cultura permitirá uma maior autonomia do gestor do ambiente construído, como também maior influência deste gestor nos níveis estratégicos da organização.

Compete ao gerenciamento de *facilities* a administração dos processos de inter-relacionamento de sistemas da edificação entre si, juntamente com a gestão do edifício e tudo o que nele está contido. Para Park (1998, p. 9), uma das principais funções da gestão de *facilities* é a de coletar e interpretar dados em diversas facetas da propriedade em uso.

Em apresentação no 29º Congresso Brasileiro de Manutenção (2014), o engenheiro Lázaro Regonha apresentou um esquema sintetizando algumas das diversas atividades oriundas de gestão de *facilities* com os respectivos resultados esperados:

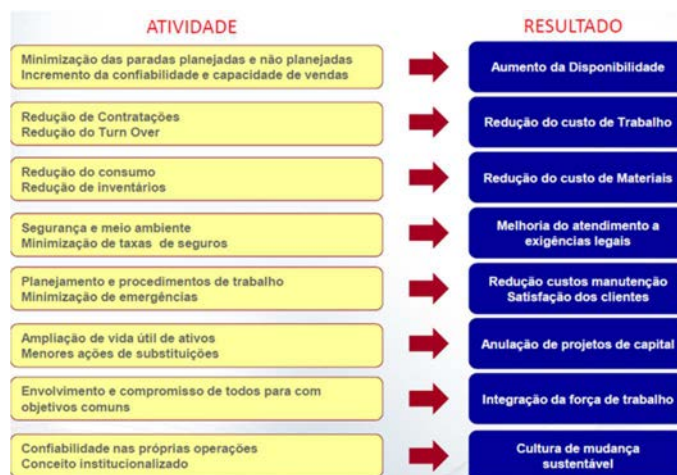


Figura 1 - Resultados obtidos pelo gerenciamento de *facilities*.

Fonte: REGONHA, 2014, p. 35.

Determinada a importância dos ativos no contexto organizacional e a disponibilidade dos mesmos, a função manutenção não pode mais ser entendida como atividade secundária apenas responsável por reparos e correções e nem mesmo como custo haja vista seu impacto na produção e custos associados ao encurtamento do período de vida útil dos equipamentos, passando a ser fator de agregação de valor no negócio das empresas.

Com a competitividade global em que a redução de custos de produção é fator primordial para a viabilização do negócio, a manutenção adquire valor estratégico. Reduzir custos passa diretamente por aumentar a eficácia. Os indicadores de Qualidade e Produtividade fornecem referências da eficácia, bem como permitem análises de tendências, permitindo assim realizações de ações gerenciais. Antes tratada como função de apoio ao processo produtivo, hoje é uma variável que compõe a produção somada à operação e à engenharia.

O mundo dos negócios atualmente está mais focado na gestão da informação e no processo decisório para obter respostas mais rápidas que se tornam armas para alcançar os resultados esperados dentro do período de tempo planejado. Embora deva ser tratada de forma estratégica, as ferramentas e conceitos de gestão devem ser compartilhados e estar ao alcance de todos. O objetivo é evitar a tomada de decisões erradas. Segundo Lafraia (2001), provavelmente existam mais decisões erradas tomadas e mais coisas erradas feitas em manutenção do que em qualquer outra atividade industrial.

Segundo Tavares (2000), para tornar possível a quantificação do retorno do investimento no que se refere às atividades de manutenção, é necessária uma administração da informação efetiva com as tomadas de decisões baseadas em informações com indicadores apropriados para cada nível de administração, consolidadas em sistemas de informação confiáveis.

Para gerenciamento da informação baseada em indicadores é necessário:

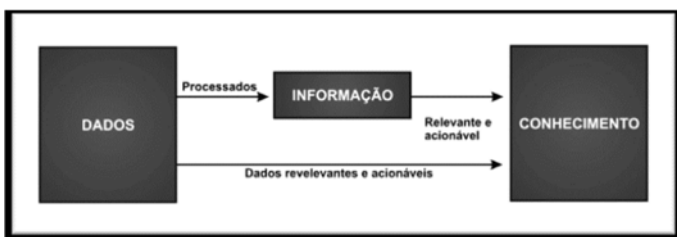
- a) definir um sistema de informação;
- b) estabelecer Indicadores de performance;
- c) construir um mapa de indicadores;
- d) estabelecer *benchmarks*.

## 4 CONHECIMENTO ORGANIZACIONAL

Considerando o volume de dados e seu contínuo crescimento, bem como a demanda por informação, faz-se necessária a gestão desses recursos, a fim de propiciar às pessoas o insumo necessário para o desenvolvimento de suas atividades. A Gestão da Informação (GI) pode ser definida como todas as ações relacionadas à

"[...] obtenção da informação adequada, na forma correta, para a pessoa indicada, a um custo adequado, no tempo oportuno, em lugar apropriado, para tomar a decisão correta" (WOODMAN, 1985 *apud* VALENTIM, 2002).

Ao buscar alguma informação, é importante que se tenha noções claras e planejamento para saber o que fazer com ela. Entender os objetivos ajuda também a determinar se uma quantidade de informação já é suficiente para determinada ação (BUKOWITZ; WILLIAMS, 2002). Segundo Fleury e Oliveira Júnior (2008), o conhecimento de uma empresa ocorre a partir das interações que ocorrem no ambiente de negócios e são desenvolvidas por meio de processos de aprendizagem. O conhecimento pode ser entendido como informação associada à experiência, intuição e valores. Turban, Mclean e Wetherbe (2004) apresentam a Figura 2 para o processo de formação do conhecimento:



**Figura 2 – Dados, informação e conhecimento.**  
Fonte: TURBAN; MCLEAN; WETHERBE, 2004, p. 327.

Sob essa perspectiva, Ponjuán Dante (1998 *apud* MARCHIORI, 2002, p. 74) afirma que,

A Gestão da Informação deve incluir, em dimensões estratégicas e operacionais, os mecanismos de obtenção e utilização de recursos humanos, tecnológicos, financeiros, materiais e físicos para o gerenciamento da informação e, a partir disso, ela mesma ser disponibilizada como insumo útil e estratégico para indivíduos, grupos e organizações.

Segundo Barbieri (2001), as empresas possuem uma grande quantidade de dados, mas têm dificuldade na

extração de informações, pois elas estão armazenadas numa forma inadequada para os tomadores de decisão, como as regras de normalização de dados do modelo relacional de banco de dados, dificultando o processamento demandado pela ótica dimensional, que oferece clara e diretamente os elementos necessários para buscar as informações sobre fatos via dimensões de referências. Nesse contexto, torna-se fundamental a utilização de tecnologias que permitam a obtenção, filtragem e análises desses dados para que possam ser insumos para a criação de conhecimentos e, por conseguinte, basear tomada de decisões e ações estratégicas.

O objetivo maior das técnicas de BI é fornecer regras e técnicas para a formatação adequada da quantidade enorme de dados, visando transformá-los em depósitos estruturados de informações, independentemente das suas origens, dados os quais são vitais para tomadas de decisões estratégicas (BARBIERI, 2001).

Segundo Oliveira e Pereira (2008, p. 2),

O BI ajuda organizações a acessar informação sintetizada de forma fácil para a tomada de decisão. Nesse processo, o ato de transformar dados em informações úteis e significativas, terá como destino a distribuição destas informações para aqueles que realmente precisarão delas e que poderão tomar decisões corretas e na hora certa.

No ambiente corporativo, a ferramenta de BI está diretamente ligada a assuntos de planejamento estratégico, armazenamento de informações e publicações de dados relevantes ao usuário final, dando suporte à tomada de decisão. É uma tecnologia fundamental nos tempos atuais para simular ambientes onde uma decisão foi tomada e seu possível resultado, pois a simulação é feita nos dados históricos da empresa. Porém, nada disso será possível se o capital humano não tiver os conhecimentos necessários para manusear a ferramenta, pois é necessário que o gestor saiba analisar as informações contextualizadas em nível de totalização e agrupamento, saiba identificar e criar relações de causa e efeito. Com isso fica claro que o BI é uma ferramenta que dará suporte aos gestores para tomada de decisões (LEME FILHO, 2006).

Como bem lembra Piedade (2011), os sistemas BI estão ligados ao gerenciamento da organização, ajudando o gestor a monitorar e controlar o desempenho da empresa dentro de suas metas, fornecendo informações sobre diversos indicadores do desempenho atual e do desejado. No nível estratégico, as ferramentas de BI mostram como a organização está se comportando com uma decisão e ainda obter informações sobre as novas tendências de negócio. Em nível operacional, os sistemas de BI fornecem informações que permitem conseguir respostas a diversas questões relacionadas com a atividade diária da empresa, do negócio ou dos clientes.

## 5 APLICABILIDADE DE FERRAMENTA DE BI NA GESTÃO DE FACILITIES

Existem diversos softwares e programas fornecedores de soluções de BI e não é o mote deste artigo discriminar as diferentes arquiteturas existentes, entretanto cabe ressaltar que, dentro do conjunto de aplicações de BI, existem as denominadas *Self Service BI (SSBI)*. Essas ferramentas se diferenciam das demais por não demandarem intervenção de equipes de tecnologia da informação (TI) para acesso e filtragem das informações constantes dos bancos de dados existentes. Nesse tipo de solução, o usuário é o único responsável pelo acesso aos dados, extração dos mesmos, modelagem e criação dos painéis.

O conceito principal do SSBI é que o consumidor das informações é o maior sabedor de suas necessidades e dos processos em que atua e gerencia e, portanto, nessa aplicação a flexibilidade para montagem das informações que gerem valor ao processo é maior e mais dinâmica ao dispensar a atuação de terceiros que, apesar de serem portadores do conhecimento técnico da ferramenta, dificilmente os têm quanto ao processo estudado.

As ferramentas de BI, por possibilitarem o tratamento de grande gama de informações e as tratarem de forma integradas, permitem que possam ser analisados diversos parâmetros correlacionados e realizar comparações entre base de dados semelhantes. Quanto à gestão da manutenção de *facilities*, essas ferramentas, além de possibilitarem acumulação de diversos dados de equipamentos, permitem a comparação entre

manutenções, operações e atuação de equipamentos em localidades distintas e com diferentes abordagens de manutenção.

Em gestão de *facilities*, especialmente quando esta aborda diversas edificações e em diferentes bases e localidades, equipamentos semelhantes podem ser utilizados com diferentes formas de aplicação e tratados de formas distintas quanto à sua criticidade (possibilidade de utilização de redundâncias, por exemplo). Além disso, muitos equipamentos podem e são entendidos como sistemas completos, como elevadores e outros como parte de um sistema como bombas a diesel. O SSBI possibilita que cada caso seja abordado e analisado de acordo com a importância determinada pelo analista da informação e gestor do processo.

Em uma abordagem sistemática de ativos imobilizados, é importante a realização de análises integradas que aborem desde o macrosistema até o equipamento individualizado para que se possa conseguir realizar a gestão da manutenção de forma a atingir alta confiabilidade. Essa visão partindo do sistema até o equipamento (macro para o micro) é facilmente gerida por SSBI. Integração e correlação de dados e aplicações como *drill down*. A Figura 3 demonstra um exemplo de painel realizado através de SSBI.

No exemplo de painel, foi criado um indicador de disponibilidade de um dado equipamento fictício. Neste painel, tem-se os seguintes campos:

- indicadores de disponibilidade por regional: *Scroller* (letreiro com informações que se movimentam horizontalmente) contendo informação da disponibilidade total dos



Figura 3 – Painel de gestão de manutenção (fictício).  
Fonte: O AUTOR, 2018.

equipamentos dispostos por cidade e comparação da disponibilidade de cada cidade com a meta do indicador demonstrando o desvio da meta;

- b) disponibilidade por regional: gráfico de barras demonstrando indicador de disponibilidade por regional (cidade);
- c) meta do indicador: meta estabelecida para este indicador de disponibilidade;
- d) KPI: valor da disponibilidade global (todas as três cidades juntas) no período e comparativo com a meta;
- e) disponibilidade por equipamento: gráfico de barras com a disponibilidade por prédio com *drill down* para disponibilidade por fabricante e novo *drill down* para disponibilidade por equipamento;
- f) disponibilidade por mês: gráfico de barras com linha onde as barras representam a disponibilidade total por mês (incluso as três cidades), e a linha de cor amarela representa a meta do indicador.

Perceptível que esse painel consegue englobar integradamente diversas informações sobre os equipamentos sob diferentes e diversas perspectivas possibilitando ao gestor tomada de decisões mais eficientes a partir de uma visão global. Caso o mesmo controle fosse disposto na maioria das ferramentas tradicionais fornecedoras de gráficos, seriam necessários criação de bases de dados distintas além de diversos gráficos distintos sem integração entre eles e sem interatividade, o que prejudica a realização de análises e simulações.

A Figura 4 mostra um exemplo da funcionalidade de interatividade da ferramenta. Ao selecionar a barra demonstrativa do mês de janeiro, todos os demais campos são alterados para apresentar a informação referente apenas relacionada com esse campo, ou seja, todos os demais campos apresentam os valores de disponibilidade apenas do mês de janeiro.

Outra maneira de realizar análise utilizando esse painel interativo seria analisar como o indicador de disponibilidade se comportou mês a mês por cidade. De forma análoga, ao selecionar qualquer das cidades, as demais informações do painel atualizariam para demonstrar apenas dados referentes à cidade selecionada.

Existe outra funcionalidade que possibilita grande poder de análise que é o *drill down*. Esse comando permite que informações sejam hierarquizadas em camadas de subgrupos. No painel exemplo deste artigo, foi selecionada a coluna referente ao Prédio Z. Através desse comando surgem os fabricantes dos equipamentos que estejam alocados nessa edificação com as respectivas disponibilidades por fabricante. Em mais uma camada deste *drill down*, tem-se os equipamentos dispostos no Prédio Z e que sejam do Fabricante 3. As Figuras 5 e 6 ilustram essas informações.

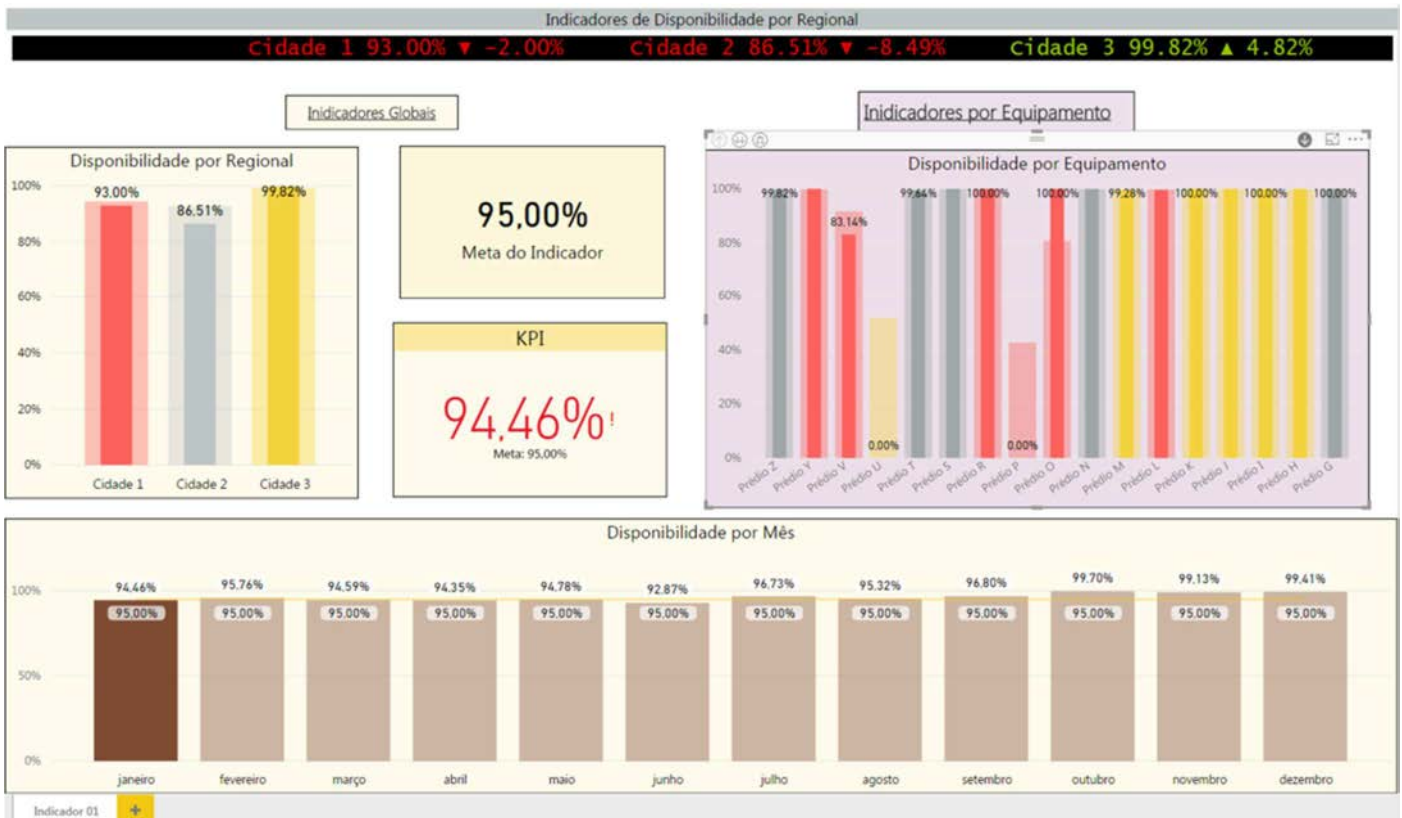


Figura 4 – Painel de Gestão com seleção de mês (fictício).  
Fonte: O AUTOR, 2018.

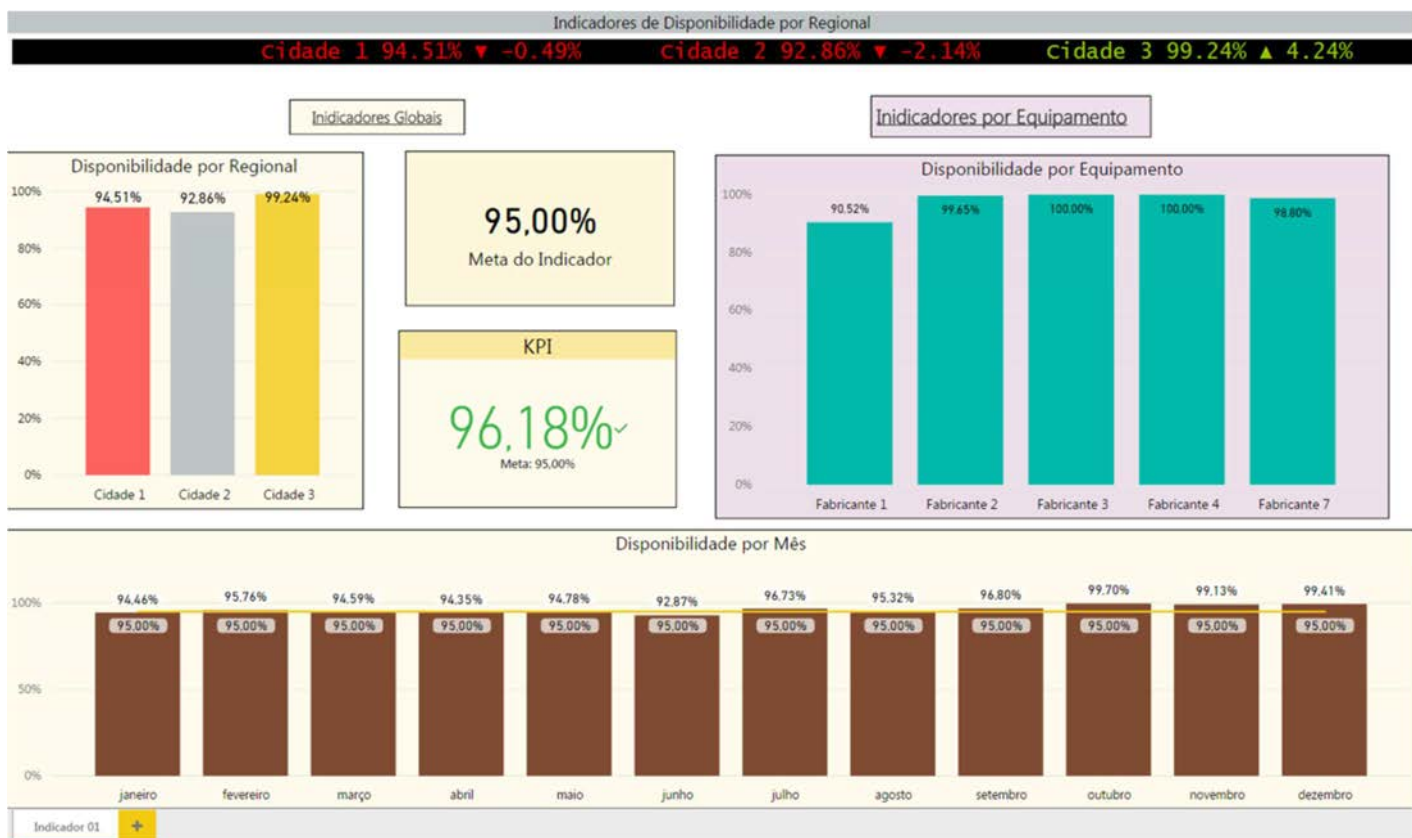


Figura 5 – Painel de Gestão com *drill down* ativado (2ª camada)

Fonte: O AUTOR, 2018.



Figura 6 - Painel de Gestão com *drill down* ativado (3ª camada).

Fonte: O AUTOR, 2018.

Além da interatividade e possibilidade de lidar com grande quantidade de informações e integrar diferentes bases de dados, os painéis oriundos das ferramentas de BI são bastante intuitivos e, portanto, facilitam por deveras a realização de simulações e comparativos. A disposição dos elementos gráficos e tipos de gráficos são de fácil gestão e utilização também gerando bastante flexibilidade e customização do consumidor da informação.

Entre as principais vantagens da utilização das ferramentas de BI na gestão dos *facilities*, podem ser destacadas:

- a) redução da quantidade de telas para apresentação de gráficos;
- b) criação de gráficos interativos permitindo cruzamento de dados entre regionais por sistema permitindo ao gestor maior flexibilidade e assertividade para tomadas de decisão;
- c) maior facilidade para realizar comparações entre diferentes regionais;
- d) análise de sistemas por camadas através de ferramenta de *Drill Down* (desmembrando o indicador consolidado da gerência em nível macro até o nível de cada equipamento cadastrado);
- e) medição e controle dos indicadores em escala individual (por equipamento e ou por pavimento);
- f) agregação de novos indicadores e cruzamento com o indicador já utilizado;
- g) maior automação no processo de alimentação das informações dos painéis propiciando maior eficiência e confiabilidade das informações.

## 6 CONCLUSÃO

Os indicadores de manutenção são instrumentos importantes e responsáveis por quantificar dados dos equipamentos a partir de uma metodologia estabelecida e assim diagnosticar a performance da operação e da manutenção dos mesmos. O estabelecimento adequado de indicadores, suportados por uma base de informações confiáveis e estruturada, fornece importante embasamento aos gestores responsáveis pelos processos de manutenção e operação nas tomadas de decisões com elevados graus de eficácia e eficiência agregando valor às atividades e consequentemente à organização.

Dentro desse contexto, as ferramentas de BI possuem características ímpares quanto ao fornecimento de dados organizados e estruturados, permitindo ao corpo gerencial ter informações precisas e detalhadas como *inputs* para tomada de decisões. Elas não atuam de forma a tomar decisões semiautônomas, mas objetivam permitir tomadas de decisões e priorização de atividades mais assertivas assim como demonstrar eventuais problemas ocultos através do estabelecimento do cruzamento de informações adequadas.

Decisões baseadas em dados de forma sistêmica contribuem para a geração de uma cultura baseada em dados e dessa forma permitem maior assertividade nas tomadas de decisões permitindo às organizações atuarem em consonância com o novo paradigma vivido pela sociedade atual em que o conhecimento se torna o principal fator de produção e agregação de valor de produtos, serviços e processos.

## REFERÊNCIAS

- BARBIERI, C. **BI – Business Intelligence: modelagem e tecnologia**. Rio de Janeiro: Axcel Books, 2001.
- BUKOWITZ, W. R.; WILLIAMS, R. L. **Manual de gestão do conhecimento: ferramentas e técnicas que criam valor para a empresa**. Porto Alegre: Bookman, 2002.
- FERREIRA, F; BONIN, L. C. **Estudo exploratório da prática em empresas instaladas na região metropolitana de Porto Alegre**. Porto Alegre: Entac, 2006.
- FLEURY, M. T. L.; OLIVEIRA JÚNIOR, M. M. (Org.). **Gestão estratégica do conhecimento: integrando aprendizagem, conhecimento e competências**. São Paulo: Atlas, 2008.
- LAFRAIA, J. R. B. **Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.
- LEME FILHO, T. **Sistemas de suporte à decisão** (disciplina da Fasp). Rio de Janeiro, 2006. Apresentação em Powerpoint.
- MARCHIORI, P. Z. A ciência e a gestão da informação: compatibilidades no espaço profissional. **Ci. Inf.**, Rio de Janeiro, v. 31, n. 2, p. 72-79, maio/ago. 2002.
- OLIVEIRA, D. T.; PEREIRA, O. J. **Um estudo do Business Intelligence no ambiente empresarial**. 2008. In: JORNADA CIENTÍFICA UVV, 6, 2008, Vila Velha. Disponível em: <[http://www.uvv.br/edital\\_doc/UM%20ESTUDO%20DO%20BUSINESS%20INTELLIGENCE%20NO%20AMBIENTE%20EMPRESARIAL\\_6d7bdd4c-5bd5-447e-9c89-e247866a265f.pdf](http://www.uvv.br/edital_doc/UM%20ESTUDO%20DO%20BUSINESS%20INTELLIGENCE%20NO%20AMBIENTE%20EMPRESARIAL_6d7bdd4c-5bd5-447e-9c89-e247866a265f.pdf)>. Acesso em: 05 jul. 2017.
- PARK, A. **Facilities management: an explanation**. 2nd. ed. London: MacMillan, 1998.
- PIEIDADE, M. B. G. P. **Business Intelligence no suporte ao conceito e a prática de Student Relationship Management em instituições de ensino superior**. 2001. 267 f. Tese (Doutorado em Tecnologias e Sistemas de Informação)– Universidade do Minho, Braga, 2001.
- REGONHA, L. **Gestão de ativos modismo ou necessidade?** 2014. Trabalho apresentado ao 29º Congresso Brasileiro de Manutenção e Gestão de Ativos, Santos, 2014.
- TAVARES, L. A. **Administração moderna de manutenção**. Rio de Janeiro: Novo Pólo, 2000.
- TURBAN, E.; MCLEAN, E.; WETHERBE, J. **Tecnologia da informação para gestão: transformando os negócios na economia digital**. Porto Alegre: Bookman, 2004.
- VALENTIM, M. L. P. Inteligência competitiva em organizações: dado, informação e conhecimento. **DataGramaZero**, Rio de Janeiro, v. 3, n. 4, ago. 2002. Disponível em: <<http://www.brapci.inf.br/index.php/article/download/7468>>. Acesso em: 26 abr. 2018.



### **Luiz Gustavo Fontes de Oliveira**

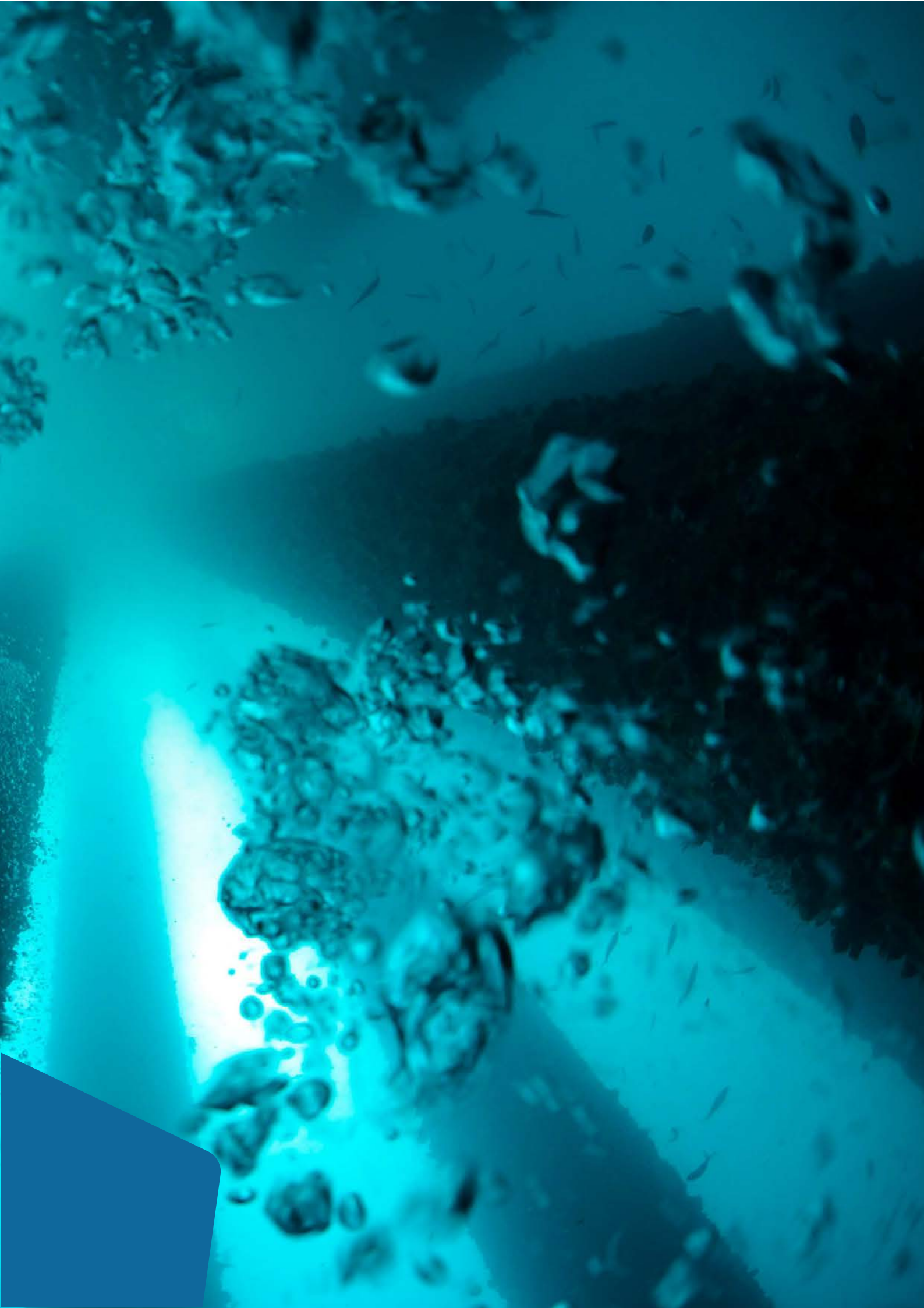
Graduação (2003) em Engenharia de Produção pelo CEFET-RJ.  
Mestrado (2011) em Engenharia de Produção na área de gestão  
pela UFRJ. Petrobras, COMPARTILHADO  
(COMPARTILHADO/CRS-BCBS/SOM) – Macaé, RJ.  
E-mail: [luizgustavooliveira@petrobras.com.br](mailto:luizgustavooliveira@petrobras.com.br)

An underwater photograph showing a diver's hand reaching towards a large, dense cluster of bubbles. The scene is illuminated with a strong blue light, creating a monochromatic effect. The bubbles are of various sizes and are concentrated in the center-right of the frame. The diver's hand is visible on the left side, reaching towards the bubbles. The background is dark and slightly out of focus, suggesting an underwater environment.

# **AVALIAÇÃO COMPARATIVA BASEADA EM RISCO PARA DESTINAÇÃO DE ESTRUTURAS SUBMARINAS: um ensaio de Modelo *Fuzzy***

**Wendell Dias Pinto  
Giovanni Alessandro Fiorentini**





## RESUMO

Sabe-se que Avaliações Comparativas baseadas em Risco são função de uma série de fatores que interagem entre si, muitos dos quais com campo de atuação e importância relativa discutíveis. No entanto, a definição e o papel de cada um desses fatores formam um panorama complexo, de fronteira nebulosa, demandando a aplicação do julgamento e da experiência de analistas de diversas áreas de conhecimento, objetivando compor tal Avaliação através de uma abordagem multidisciplinar e geralmente demandando longas e inúmeras reuniões ou Workshops. A Lógica Difusa (*Fuzzy Logic*) se mostra como uma metodologia de inteligência artificial bastante indicada na abordagem de casos onde os parâmetros envolvidos e/ou seus papéis em uma determinada resposta não estão bem definidos, são vagos ou incompletos, assim como quando os modelos já desenvolvidos para abordar o problema são incipientes ou pouco maduros. Neste trabalho em específico, o objeto da Avaliação Comparativa vem a ser cenários de destinação de estruturas submarinas a serem descomissionadas, o que reforça ainda mais o contexto estabelecido acima e, portanto, a aderência da Lógica Difusa no ataque ao problema, mesclando embasamento teórico e subjetivo. Assim, pretende-se aqui demonstrar de maneira simplificada o potencial de aplicação desta metodologia nas referidas Avaliações Comparativas, através do estabelecimento de um modelo *fuzzy* simplificado, utilizando dados hipotéticos.

**Palavras-chave:** Descomissionamento. Projetos. Sistemas Submarinos. Análise de Risco. Análise Comparativa. Lógica Difusa.

## ABSTRACT

Risk-Based Comparative analysis are function to a series of factors that interact with each other. These factors' relative importance and field of action are debatable, and their interaction creates complex panoramas, with nebulous borders, involving various fields of knowledge. The analysis of such panoramas relies upon multidisciplinary teams of experienced analysts, usually requiring several meetings and workshops. Fuzzy logic is an artificial intelligence methodology quite indicated in approaching cases whose parameters involved and/or their roles in a given response are not well defined, are vague or incomplete, as well as in cases in which the phenomena existing models are incipient or immature. In this work, scenarios for the destination of submarine structures to be decommissioned are submitted to Risk-Based Comparative Assessment. The context established above reinforces the choice of using Fuzzy Logic to approach the problem, combining theoretical and subjective knowledge in order to find a solution. The intention of this work is to demonstrate, in a simplified way, the potential and adherence of Fuzzy Logic in approaching the referred Comparative Assessment, through the establishment of a simplified fuzzy model using hypothetical data.

**Keywords:** Decommissioning. Projects. Subsea Systems. Risk Analysis. Comparative Assessment. Fuzzy Logic.

## 1 INTRODUÇÃO

A atividade de descomissionamento, no âmbito da indústria de óleo e gás, é relativamente recente, e gradativamente vem ganhando maturidade com a crescente demanda mundial por projetos deste tipo.

Neste cenário, a regulação é incipiente, inclusive não existindo em muitos países. No âmbito mundial, o Mar do Norte tem sido uma região que tem estabelecido referências para a indústria, possuindo maior histórico de projetos e regulação mais madura.

Evidente que a simples transposição de normas e regulamentos já existentes para novas realidades e cenários se mostra indevida, dado que é imperativo se considerar as particularidades de cada região produtora, assim como as características dos sistemas de produção locais, de modo a adequar a regulação às características e necessidades regionais.

Assim, considerando os sistemas *offshore* de produção, um dos objetos de grande discussão diz respeito à definição de critérios e regramentos que indiquem a adequada destinação das estruturas que compõem o sistema submarino de produção.

Neste sentido, uma das abordagens que mais tem tido aceitação na indústria é a Avaliação Comparativa Baseada em Riscos (*Comparative Assessment Risk-Based*).

Esta abordagem consta no Guia publicado pelo Departamento de Energia e Mudança Climática do Reino Unido (DEPARTMENT, 2011), intitulado *Decommissioning of Offshore Oil and Gas Installations and Pipelines under the Petroleum Act 1998*. Por sua vez, o *Petroleum Act 1998* vem a ser a publicação que estabelece as diretrizes e requisitos principais para descomissionamento na Plataforma Continental do Reino Unido (DEPARTMENT, 2011).

Já as obrigações internacionais do Reino Unido nesta matéria são estabelecidas pela *Convention for the Protection of the Marine Environment of the North-East Atlantic* (OSPAR), importante órgão regulador na Europa, que tem, no âmbito do Reino Unido, o *Department of Energy and Climate Change* (DECC) como seu representante, sendo o próprio DECC "a autoridade competente em descomissionamento no Reino Unido para os propósitos da OSPAR" (DEPARTMENT, 2011, tradução nossa). Já a OSPAR, ou *OSPAR Commission*, vem a ser a Comissão estabelecida por meio da Convenção para a Proteção do Ambiente Marinho do Atlântico Nordeste (OSPAR Convention), ocorrida em 1992.

No caso da Avaliação Comparativa (de opções) para destinação de estruturas submarinas, tem-se um grande número de variáveis envolvidas, cada uma delas contribuindo com maior ou menor grau de importância, e ainda com fronteiras de atuação imprecisas, além de pouco histórico para projetos desta tipologia. Os projetos estabelecem demandas não ou pouco executadas, o que desafia as técnicas convencionais e equipe envolvida, gerando muitas incertezas para todas as partes interessadas do Projeto.

Faltam referências e métricas de Projeto, tais como as publicadas pela *Independent Project Analysis* (IPA), ou as que existem possuem baixa consistência, visto que há poucos dados históricos e compilados a respeito desta tipologia de projeto.

O DECC (DEPARTMENT, 2011), com base na OSPAR (CONVENTION, 1998), estabelece critérios para serem considerados na avaliação comparativa (de opções) para destinação de estruturas submarinas e, para cada um destes critérios, seu documento sugere fatores a serem considerados.

No entanto, a lista de fatores a ser adotada na avaliação, assim como sua importância relativa constitui um exemplo típico e inicial que nos evidencia as incertezas, domínios vagos ou mal estabelecidos relacionados ao problema, o que não é raro na Engenharia.

Neste sentido, pode-se dizer que a tomada de decisão baseada em informações incompletas tem sempre sido um desafio na vida profissional de um engenheiro. Mesmo o mais sofisticado modelo ou técnica empreendida dificilmente poderá levar em conta em sua plenitude todos os pontos envolvidos que norteiem a tomada de decisão. Isso não ocorre apenas devido a nossa falta do entendimento completo dos fenômenos envolvidos, mas principalmente devido a limitada quantidade de informações disponíveis (CHAMEAU et al., 1983), além de sua inexatidão.

A Lógica Difusa foi desenvolvida a partir da necessidade em se transportar para o campo matemático o conceito da imprecisão decorrente de informações vagas ou incompletas. Na Lógica Booleana as informações são tratadas através de operadores "verdadeiro" e "falso", isto é, o conceito de "quanto é verdadeiro" ou "quanto é falso" um conjunto de informações ou a relação entre elas, não pode ser modelado. Isto traduz a incapacidade, por parte da Lógica Booleana, de tratar "verdades parciais".

Na Lógica Difusa, a pertinência de um dado conceito pode, em um determinado universo de discurso, assumir qualquer valor entre 0 e 1. Assim, naturalmente, a utilização de termos linguísticos na modelagem e aplicação da Lógica Difusa é corrente.

Desta forma, uma das principais características da Lógica Difusa é poder modelar variáveis linguísticas tais como baixo, velho, quente, forte, através das chamadas funções de pertinência. Estas funções têm o papel de descrever como determinado conceito se "comporta" no seu campo de verdades parciais. E isto se aproxima da forma como o cérebro humano lida com os problemas e suas complexidades relacionadas.

No campo da Engenharia, decisões são geralmente baseadas no conhecimento científico (objetivo) e na experiência traduzida no julgamento do engenheiro (subjetivo). Este, por muitas vezes, se vê obrigado a tomar decisões baseadas em informações imprecisas e subjetivas. Daí a teoria da Lógica Difusa surgir como ferramenta adequada para englobar informações de

forma racional e sistemática, assim como seu grau de imprecisão (incerteza).

Neste cenário, a Lógica Difusa se apresenta como uma importante ferramenta capaz de agregar não apenas postulados teóricos, mas também o julgamento humano, cognitivo, inclusive na avaliação comparativa (de cenários) para destinação de estruturas submarinas.

## 2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é demonstrar, através de um modelo *fuzzy* simplificado, o alto potencial que a aplicação desta metodologia de inteligência artificial possui enquanto ferramenta a ser utilizada na abordagem das avaliações comparativas baseadas em risco para definição de opção de destinação de estruturas submarinas a serem descomissionadas.

## 3 AVALIAÇÃO COMPARATIVA BASEADA EM RISCOS E A LÓGICA DIFUSA

### 3.1 A COMPARATIVE ASSESSMENT RISK BASED

Conforme já dito, no âmbito dos Projetos de Descomissionamento de sistemas offshore de produção, um dos objetos de grande discussão diz respeito à definição de critérios e regramentos que indiquem a adequada destinação das estruturas que compõem o sistema submarino de produção, sendo a Avaliação Comparativa Baseada em Riscos (*Comparative Assessment Risk-Based*) uma das abordagens que mais tem tido aceitação na indústria.

O DECC (DEPARTMENT, 2011), com base na OSPAR (CONVENTION, 1998), estabelece os seguintes critérios para serem considerados na avaliação comparativa (de opções) para destinação de estruturas submarinas, conforme a Figura 1, critério de segurança, critério ambiental, critério técnico, critério social e critério econômico. Para cada um destes critérios, há aspectos a serem considerados, tais como: risco para outros usos no mar (segurança), impactos no ambiente marinho (ambiental), impacto às comunidades costeiras (social), impacto na viabilidade econômica de novos projetos (econômico).

O formato e conteúdo estabelecidos pelo DECC (DEPARTMENT, 2011) representam um guia para a aplicação da indústria, servindo, portanto, de trilha, e não de trilho, para os analistas. Desta forma, aplicações têm sido desenvolvidas com maior ou menor grau de adaptação às necessidades locais, tais como Perenco (2014) e Maersk Oil (2016), no entanto baseadas nas referências estabelecidas pela publicação do DECC.

ASSESSMENT CRITERIA	Matters to be considered	DECOMMISSIONING OPTIONS			
		Complete removal to land	Partial removal to land	Leave wholly in place	Disposal at sea *
		█	█	█	█
Safety	risk to personnel				
	risk to other users of the sea				
	risk to those on land				
Environmental	marine impacts				
	other environmental compartments (including emissions to the atmosphere)				
	energy/resource consumption				
	other environmental consequences (including cumulative effects)				
Technical	risk of major project failure				
Societal	fisheries impacts				
	amenities				
	communities				
Economic					
		█	█	█	
		HIGH	MEDIUM	LOW	

\* Although under OSPAR Decision 98/3 the disposal of the substructure of a concrete installation at a deep-water licensed site is still an option this must be considered against the UK Government announcements at the time of the Decision when Ministers stated that there would be no toppling and no local or remote dumping of offshore installations.

Figura 1 – Critérios e Fatores de Avaliação.  
Fonte: DEPARTMENT, 2011, p. 62.

A Figura 2 mostra a aplicação para uma das estruturas do escopo do Projeto Thames da Perenco (2014).

No entanto, a importância relativa de cada um desses critérios e fatores na avaliação comparativa constitui um exemplo típico de julgamento subjetivo. Antes disto, a própria definição das variáveis que comporão a avaliação já é objeto de discussão. Quais serão consideradas? Quais serão excluídas?

Prosseguindo, que valores serão atribuídos à probabilidade e ao impacto de cada opção de descomissionamento considerada para a estrutura em avaliação? Estas definições são subjetivas e, numa condição convencional, são abordadas em longos e desgastantes Workshops de Risco com inúmeros participantes. No entanto, há uma metodologia de inteligência artificial que pode suportar a implementação de um modelo para abordar esta questão de forma mais efetiva: trata-se da Lógica Difusa, que veremos em mais detalhes na seção a seguir.

### 3.2 LÓGICA DIFUSA

A Lógica Difusa foi primeiramente proposta por Zadeh (1965) para representação de informações vagas. Ao contrário da Lógica Clássica Booleana, onde um elemento é considerado pertencer ou não a um determinado

Table 4.2: Comparative Assessment of Bure 'O' to Thames AW (PL371 and PL374) and Bure West to Thames AR (PL1635 and PL1636) Decommissioning Options

Assessment Criteria	Decommissioning Options <sup>Note 1</sup>														
	1			2			3			4			5		
	L	I	R	L	I	R	L	I	R	L	I	R	L	I	R
<b>1. Safety</b>															
1.1 Risk to other users of the sea (post ops)	1	1	2	1	2	2	2	2	4	2	1	2	3	2	6
1.2 Risk to those offshore (during ops)	3	3	9	2	3	6	1	1	1	3	3	9	1	1	1
1.3 Risk to 3rd party assets/vessels (during ops)	2	2	2	2	2	4	1	2	2	2	2	2	1	1	1
1.4 Level of Diving Intervention	2	4	8	1	1	1	1	1	1	1	4	5	2	1	1
1.5 Risk to those onshore (during ops)	3	3	9	1	2	2	1	1	1	2	2	4	1	1	1
Average Safety Value:	5.8			3.0			1.8			7.4			2.0		
<b>2. Environmental</b>															
2.1 Chemical Discharge	2	2	4	1	1	1	1	1	2	2	2	2	4	1	1
2.2 Hydrocarbon discharge	2	2	4	1	1	1	1	2	2	2	2	2	4	1	1
2.3 Seabed Disturbance	5	5	25	2	3	6	2	3	6	2	3	6	1	1	1
2.4 Energy Usage	5	5	25	5	5	25	5	5	25	5	5	25	1	1	1
2.5 Estimated Discard to Sea (% of total material)	1	1	1	5	5	25	5	5	25	5	5	25	5	5	25
2.6 Estimated Discard to Landfill (% of total material)	5	5	25	1	1	1	1	1	1	1	2	5	10	1	1
2.7 Estimated % of total area of SAC which is impacted	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Average Environmental Value:	12.1			8.6			8.9			10.7			4.4		
<b>3. Technical</b>															
3.1 Technical Challenge	3	3	9	1	1	1	1	1	1	1	3	3	9	1	1
3.2 Weather Sensitivity	3	3	9	3	3	9	2	3	6	4	3	12	1	1	1
3.3 Risk of Major Project failure	2	4	8	2	2	4	2	3	6	2	3	6	1	1	1
Average Technical Value:	8.7			4.7			4.3			9.0			1.0		
<b>4. Societal</b>															
4.1 Fisheries and Shipping Access (post ops)	1	1	1	3	4	12	3	4	12	3	4	12	3	4	12
4.2 Communities (onshore)	2	3	6	1	1	1	1	1	1	1	2	3	6	1	1
Average Societal Value:	3.5			6.5			6.5			9.0			6.5		
<b>5. Commercial</b>															
5.1 Economic	5	5	25	2	1	2	2	2	4	5	2	10	1	1	1
5.2 Ongoing Responsibility	1	1	1	3	3	9	3	3	9	3	3	9	3	3	9
Average Commercial Value:	13.0			5.5			6.5			9.5			5.0		
<b>Overall Comparative Score</b>	<b>8.6</b>			<b>5.8</b>			<b>5.6</b>			<b>9.1</b>			<b>3.8</b>		

Note 1: Decommissioning Options  
 1. Completely remove the line;  
 2. Trench and bury the approximate 9.5% of exposed line(s) (PL374);  
 3. Rock dump the line in specific areas where the line is uncovered (ca. 9.5%);  
 4. Partial removal of uncovered sections of the line;  
 5. Leave in situ with monitoring.

Figura 2 – Avaliação Comparativa para duto do Projeto de Descomissionamento do Campo de Thames.  
Fonte: PERENCO, 2014, p. 23.

conjunto, a Lógica Difusa cria um grau de pertinência deste elemento em relação aos conjuntos considerados. Isto é, um elemento pode pertencer a um conjunto dentro de um intervalo de pertinência de 0 a 1, onde os extremos representam a Lógica Booleana (Figura 3).

Essa característica da Lógica Difusa constitui-se em uma poderosa ferramenta matemática para lidar com sistemas pouco definidos, modelando o papel do cérebro humano no gerenciamento de informações inexatas. Predicados como velho, quente, alto, podem se constituir em informações extremamente vagas cujas fronteiras são áreas nebulosas.

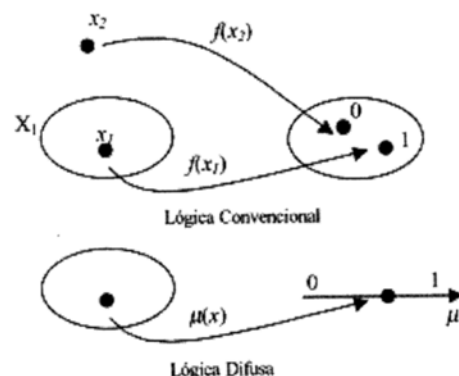


Figura 3 – Lógica Convencional e Lógica Difusa  
Fonte: BUENO; STEMMER; BORGES, 2000, p. 31.

No caso da Avaliação Comparativa, as fronteiras entre os fatores que estão intimamente ligados aos riscos associados são inexatas e suas informações idem. Por exemplo, qual o impacto para as comunidades *onshore*, no caso de recolhimento de um duto flexível de produção de 8"? Pode-se dizer que esse valor é alto ou baixo? A informação é, portanto, vaga e ganha maior complexidade quando avaliada por diferentes *stakeholders*. O mesmo se aplicaria a outros fatores como desafio técnico-operacional, sensibilidade ambiental, ou impacto ambiental *onshore*.

### 3.2.1 FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA

As funções de pertinência são o ponto chave no estabelecimento de uma modelagem baseada em Lógica Difusa e representam um conjunto de ambiguidades às quais uma variável está sujeita, traduzidas na linguagem natural. Elas relacionam, através de pares ordenados, a variável linguística com a ambiguidade da informação.

Ao se dizer que uma determinada pessoa é alta, pode-se estabelecer uma função de pertinência para representar um conjunto de valores que define o que é uma pessoa alta através da variável Altura, conforme o Gráfico 1.

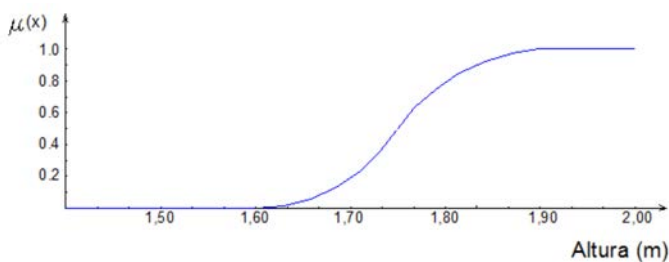


Gráfico 1 – Função de Pertinência "Altura".

Fonte: O AUTOR, 2017.

Assim, pode-se estabelecer uma função que nos diz que com 1,60m de altura a pessoa é considerada alta com uma pertinência de 0,0. Já uma pessoa com 1,70m é alta com pertinência de 0,2 e com 1,90m a pessoa é considerada alta (pertinência 1,0). No entanto se a função objetivo fosse altura para jogador de basquete a função de pertinência deveria ser refeita.

Utiliza-se, portanto, uma função contínua ou não para definir o grau de pertinência de uma determinada variável nebulosa. Essa função pode assumir uma infinidade de formas, porém as mais usadas são as funções sino (distribuição normal), trapezoidal e triangular.

### 3.2.2 MODELO BASEADO EM LÓGICA DIFUSA

Segundo Alvarez Grima e Verhoef (1999), a construção de um modelo baseado em Lógica Difusa deve apresentar essencialmente quatro estágios, descritos a seguir.

#### 3.2.2.1 Primeiro estágio: seleção das variáveis de entrada e de saída

Nesta etapa as variáveis envolvidas no fenômeno a ser estudado são selecionadas baseadas não apenas no conhecimento científico, mas também no julgamento do analista.

#### 3.2.2.2 Segundo estágio: estabelecimento da relação entre as variáveis de entrada (antecedentes) e de saída (consequentes) - Base de Regras

Cada regra estabelecida no modelo consiste basicamente de duas partes: a parte SE com uma ou várias premissas e a parte ENTÃO com uma consequência.

Esta etapa define a dependência da variável de saída às relações estabelecidas entre as variáveis de entrada através de regras do tipo "SE-ENTÃO" hierarquicamente organizadas.

#### 3.2.2.3 Terceiro estágio: definição do tipo das funções de pertinência

Os tipos mais comuns de função de pertinência são triangulares e trapezoidais. No entanto, quando análises probabilísticas estão envolvidas no processo, utilizam-se as funções de distribuição. A função triangular, pela sua simplicidade é a mais utilizada. Porém em análises complexas a definição do tipo de função de pertinência pode ser igualmente complexa.

#### 3.2.2.4 Quarto estágio: defuzzificação

A defuzzificação é a etapa de transformação das variáveis linguísticas dos conjuntos difusos de saída em um valor numérico de inferência. Vários métodos de defuzzificação são propostos na literatura (JAGER, 1995; BABUSKA, 1996), sendo o mais utilizado o Método do Centro de Gravidade (CoG), cujo resultado é proveniente da maior pertinência correspondente à abscissa do centro de gravidade do conjunto difuso de saída.

No que tange à modelagem do cérebro humano, os modelos *fuzzy* embarcarão tanto mais valor agregado quanto mais for refletido no modelo o conhecimento de especialistas no problema objeto da análise, conhecimento este incorporado fundamentalmente na definição dos fatores e sua importância relativa, assim como no estabelecimento das funções de pertinência e base de regras. Desta forma, quanto mais o conhecimento e julgamento de engenharia de especialistas de uma dada área de conhecimento for apropriado no modelo *fuzzy*, melhores serão seus resultados e comportamento.

## 4 UM ENSAIO DE MODELO FUZZY INICIAL

Como descrito anteriormente, vários fatores estão envolvidos na avaliação comparativa (de opções) para destinação de estruturas submarinas. Alguns inerentes ao material, tais como fluido transportado, diâmetro, vida útil, integridade do duto submarino; outros inerentes à condição ambiental, tais como sensibilidade do fundo marinho, lâmina d'água; já outros relacionados ao impacto ambiental, tais como emissão de gases de efeito estufa (GEE, *offshore e onshore*), volume ocupado *onshore*; havendo ainda fatores sociais, econômicos, dentre outros.

No entanto, para a montagem do modelo em Lógica Difusa, torna-se necessário o estabelecimento de relação entre as variáveis (base de regras) através de regras pré-determinadas. Como a complexidade da modelagem aumenta exponencialmente com o aumento do número de fatores envolvidos, para exemplificar, consideraremos apenas três fatores que influenciam na avaliação comparativa, baseada em risco, para destinação de estruturas submarinas: lâmina d'água, vida útil do duto e diâmetro do duto.

Nesta mesma linha, consideraremos a opção de descomissionamento como sendo a "remoção completa para terra", segundo opções contempladas no *DECC Guidance Notes* (DEPARTMENT, 2011).

Para o estabelecimento das funções de pertinência, usaremos diagramas triangulares e/ou trapezoidais que são de baixa complexidade e bastante utilizados em análises mais simplificadas.

### 4.1 VARIÁVEIS DE ENTRADA

Para o estabelecimento e análise de cada variável do modelo, é importante entender que quando da exploração de seu comportamento, assume-se o "congelamento" de todas as demais variáveis.

#### 4.1.1 LÂMINA D'ÁGUA

Parece consenso que quanto maior a lâmina d'água, maior será o risco global de remoção completa para terra, da estrutura associada. Adota-se aqui os seguintes termos linguísticos para essa variável de entrada: muito rasa, rasa, média, profunda, ultraprofunda. Assim, propõem-se a função de pertinência conforme Gráfico 2.

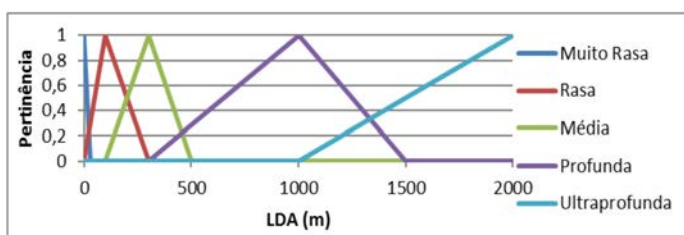


Gráfico 2 – Função de Pertinência Lâmina D'água (LDA).

Fonte: O AUTOR, 2017.

#### 4.1.2 VIDA ÚTIL REMANESCENTE DO DUTO

Considera-se aqui a vida útil remanescente da estrutura, ou seja, sua vida útil de projeto diminuída de sua idade. Não são aqui considerados possíveis períodos fora de operação do duto, o que aumentaria sua vida útil remanescente.

Assim, inversamente à variável anterior, quanto maior a vida útil remanescente do duto, menor será o risco global de remoção completa para terra, da estrutura associada. Adota-se aqui os seguintes termos linguísticos para essa variável de entrada: muito curta, curta, média, longa, muito longa. Propõem-se a função de pertinência conforme Gráfico 3.

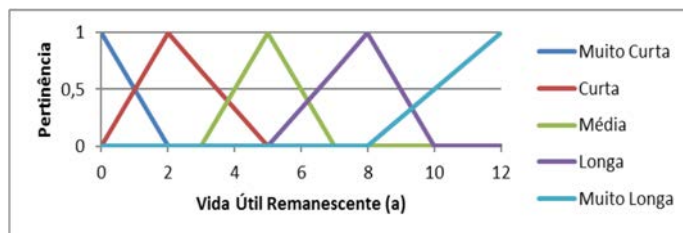


Gráfico 3 – Função de Pertinência Vida Útil do Duto.

Fonte: O AUTOR, 2017.

#### 4.1.3 DIÂMETRO DO DUTO

Neste caso, quanto maior o diâmetro da estrutura associada, maior será o risco global de remoção completa para terra já que seu recolhimento envolve maiores cargas.

Adota-se aqui os seguintes termos linguísticos para essa variável de entrada: muito baixo, baixo, médio, alto, muito alto. Assim, propõem-se a função de pertinência conforme Gráfico 4.

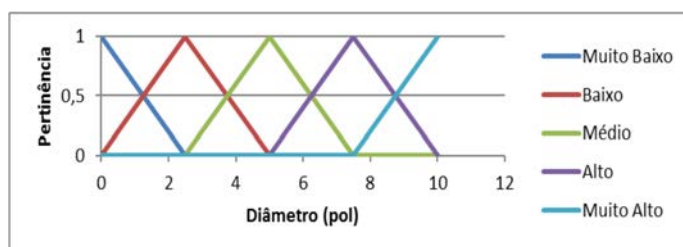


Gráfico 4 – Função de Pertinência Diâmetro do Duto.

Fonte: O AUTOR, 2017.

### 4.2 VARIÁVEIS DE SAÍDA

De forma alinhada ao estabelecido com a metodologia de *Comparative Assessment Risk-Based* (DEPARTMENT, 2011), denominaremos como variável de saída o *Risco Global*. Tal denominação vem do entendimento de que, na avaliação, há presença de riscos de diversos tipos (operacionais, ambientais, sociais, econômicos) e que, portanto, o risco obtido é composto por estes diversos aspectos, sendo aqui denominado *Risco Global*.

## 4.2.1 RISCO GLOBAL

Para a variável de saída dividiu-se o Risco Global em três diferentes graus, conforme adotado em Perenco (2014): baixo, médio e alto, utilizando-se uma escala hipotética de 0 a 25, sendo 0 (zero) um Risco Global completamente baixo e 25 (vinte e cinco) um Risco Global completamente alto. Vale ressaltar que aqui não se adotará a obtenção do risco por meio da probabilidade e impacto. Assim, no âmbito deste trabalho, esta classificação na Figura 4 tem o objetivo apenas de proporcionar uma referência de escala para a variável de saída Risco Global, suportando sua função de pertinência.

Vale ainda dizer que, para sistemas mais complexos e robustos, a variável Risco Global poderia ser dividida em um número maior de termos linguísticos.

Assim, propõem-se a função de pertinência conforme Gráfico 5.

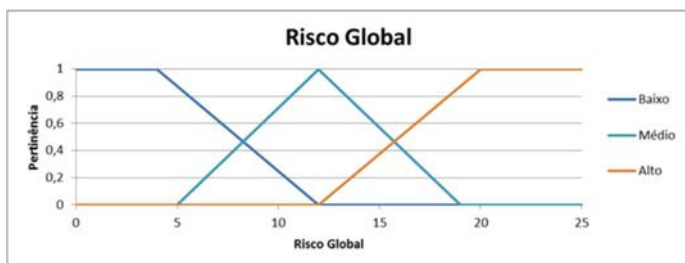


Gráfico 5 – Função de Pertinência Risco Global.

Fonte: O AUTOR, 2017.

## 4.3 BASE DE REGRAS

Uma vez estabelecidas as funções de pertinência das variáveis de entrada, deve-se então atrelá-las às variáveis de saída através de regras de relação ou base de regras. As regras de relação são basicamente inspiradas na experiência do avaliador e no conhecimento técnico científico. É nesta fase que as variáveis linguísticas tomam um papel importante nas análises subjetivas.

Para as regras de risco global de alternativas de descomissionamento de estruturas submarinas, de maneira simplificada, pode-se definir:

- se lâmina d'água é rasa e vida útil do duto é média **então** risco global é médio;
- se vida útil do duto é muito curta e diâmetro do duto é muito alto **então** risco global é alto;
- se lâmina d'água é profunda e diâmetro do duto é muito alto **então** risco global é alto;
- se vida útil do duto é longa **ou** lâmina d'água é rasa **então** risco global é baixo;
- se diâmetro do duto é baixo **ou** lâmina d'água é rasa **então** risco global é baixo.

As regras podem ser inúmeras e hierarquicamente distribuídas dando maior complexidade, consistência e robustez ao modelo, aumentando o esforço computacional. No exemplo mostrado neste trabalho a intenção é simplificar ao máximo para apresentar o método em si.

Durante o processo de inferência *fuzzy* os números *fuzzy* de saída são redefinidos, obedecendo a associação aos consequentes das regras. A combinação de tais números *fuzzy* forma o conjunto difuso de saída.

Neste nosso modelo simplificado, adotaremos como método de inferência o Operador Max-Min, em que se "corta" a função de pertinência do consequente no valor de pertinência indicado pelo antecedente (Min) e se combina (união) os números *fuzzy* ativados pelos consequentes das regras, estabelecendo o conjunto *fuzzy* de saída, que então é definido pela união dos números *fuzzy* ativados, cada qual com suas maiores pertinências respectivas (Max).

Além disso, vale destacar o papel dos operadores lógicos "E" e "OU". Tais operadores, utilizados nos antecedentes das regras, tem papel de minimização e maximização, respectivamente. Assim, quando utilizado o operador lógico "E" nos antecedentes (variáveis de entrada), o menor valor de ativação é transferido para o consequente (variável de saída). E quando utilizado o operador lógico

Likelihood / Uncertainty	Impact				
	1 (Very Low)	2 (Low)	3 (Medium)	4 (High)	5 (Very High)
1 (Very Low)	1	2	3	4	5
2 (Low)	2	4	6	8	10
3 (Medium)	3	6	9	12	15
4 (High)	4	8	12	16	20
5 (Very High)	5	10	15	20	25
Key:	High Risk	Medium Risk	Low Risk		

Figura 4 – Matriz de Classificação de Risco.

Fonte: PERENCO, 2014, p. 40.

“OU”, o maior valor de ativação dos antecedentes é transferido para o consequente.

Quanto ao Método de Defuzzificação, adotaremos o Método do CoG que consiste no cálculo da abscissa do centro de gravidade do conjunto difuso de saída.

## 4.4 SIMULAÇÃO

A seguir, apresenta-se 3 exemplos de aplicação, com 3 estruturas e condições de contorno, conforme descrito a seguir:

- estrutura 1*: duto flexível de gás lift de 6” e 425m, disposto no leito marinho a uma profundidade de 150m, com vida útil remanescente de 5 anos;
- estrutura 2*: UEH de 2,5” e 250m, numa lâmina d’água de 120m, com vida útil remanescente de 8 anos;
- estrutura 3*: duto flexível de produção de 8” e 810m, numa lâmina d’água de 900m e vida útil remanescente de 1 ano.

### 4.4.1 ESTRUTURA 1

Duto flexível de gás *lift* de 6” e 425m, disposto no leito marinho a uma profundidade de 150m, com vida útil remanescente de 5 anos.

Neste caso, tem-se os seguintes valores de inferência:

- se** lâmina d’água é rasa (0,75) **e** vida útil do duto é média (1,00) **então** risco global é médio (0,75);
- se** vida útil do duto é muito curta (0,00) **e** diâmetro do duto é muito alto (0,00) **então** risco global é alto (0,00);
- se** lâmina d’água é profunda (0,00) **e** diâmetro do duto é muito alto (0,00) **então** risco global é alto (0,00);
- se** vida útil do duto é longa (0,00) **ou** lâmina d’água é rasa (0,75) **então** risco global é baixo (0,75);
- se** diâmetro do duto é baixo (0,00) **ou** lâmina d’água é rasa (0,75) **então** risco global é baixo (0,75).

Vale reforçar, neste primeiro exemplo, o papel dos operadores lógicos “E” e “OU”, funcionando como operadores de minimização e maximização, respectivamente, conforme já colocado na seção 4.3 acima. Assim, na primeira regra, frente aos valores 0,75 e 1,00 nos antecedentes, é transferido para o consequente o valor 0,75, face à presença do operador lógico “E” (minimização). De forma similar, na quarta e quinta regras, constata-se a transferência do valor de ativação 0,75 para o consequente, apesar dos antecedentes apresentarem valores de ativação 0,00 e 0,75, face à presença do operador lógico “OU” (maximização).

Portanto, no exemplo 1, tem-se os seguintes resultados para a variável de saída Risco Global: Risco Global Baixo: 0,75; Risco Global Médio: 0,75; Risco Global Alto: 0,00.

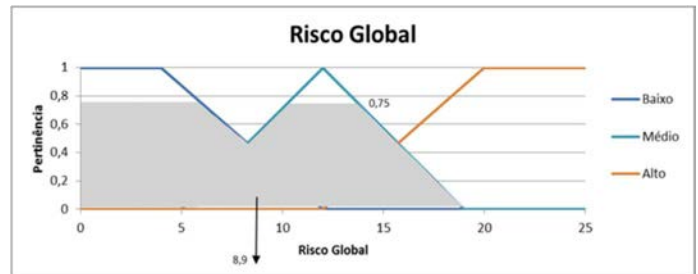


Gráfico 6 – Conjunto Difuso de Saída – Estrutura 1.

Fonte: O AUTOR, 2017.

Após a defuzzificação, tem-se como resultado, para a Estrutura 1, um risco global de 8,9, que representa a abscissa do centro de gravidade do conjunto difuso de saída. Este valor indica um risco global *médio* para a opção de “remoção completa para terra” desta Estrutura 1.

### 4.4.2 ESTRUTURA 2

UEH de 2,5” e 250m, numa lâmina d’água de 120m, com vida útil remanescente de 8 anos.

Neste caso, tem-se os seguintes valores de inferência:

- se** lâmina d’água é rasa (0,90) **e** vida útil do duto é média (0,00) **então** risco global é médio (0,00);
- se** vida útil do duto é muito curta (0,00) **e** diâmetro do duto é muito alto (0,00) **então** risco global é alto (0,00);
- se** lâmina d’água é profunda (0,00) **e** diâmetro do duto é muito alto (0,00) **então** risco global é alto (0,00);
- se** vida útil do duto é longa (1,00) **ou** lâmina d’água é rasa (0,90) **então** risco global é baixo (1,00);
- se** diâmetro do duto é baixo (1,00) **ou** lâmina d’água é rasa (0,90) **então** risco global é baixo (1,00).

Portanto, no exemplo 2, tem-se os seguintes resultados para a variável de saída Risco Global: Risco Global Baixo: 1,00; Risco Global Médio: 0,00; Risco Global Alto: 0,00.

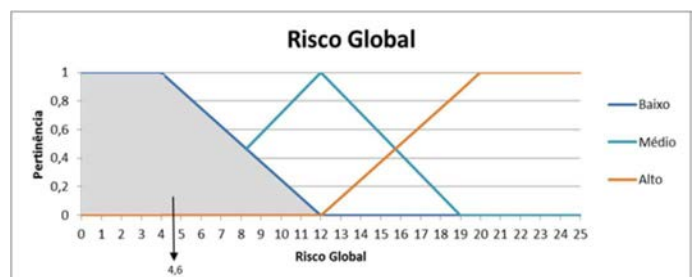


Gráfico 7 – Conjunto Difuso de Saída – Estrutura 2.

Fonte: O AUTOR, 2017.

Após a defuzzificação, tem-se como resultado, para a Estrutura 2, um risco global de 4,6, que representa a abscissa do centro de gravidade do conjunto difuso de saída. Este valor indica um risco global *baixo* para a opção de “remoção completa para terra” desta Estrutura 2.



### 4.4.3 ESTRUTURA 3

Duto flexível de produção de 8" e 810m, numa lâmina d'água de 900m e vida útil remanescente de 1 ano.

Neste caso, tem-se os seguintes valores de inferência:

- se lâmina d'água é rasa (0,00) e vida útil do duto é média (0,00) **então** risco global é médio (0,00);
- se vida útil do duto é muito curta (0,50) e diâmetro do duto é muito alto (0,20) **então** risco global é alto (0,20);
- se lâmina d'água é profunda (0,86) e diâmetro do duto é muito alto (0,20) **então** risco global é alto (0,20);
- se vida útil do duto é longa (0,00) **ou** lâmina d'água é rasa (0,00) **então** risco global é baixo (0,00);
- se diâmetro do duto é baixo (0,00) **ou** lâmina d'água é rasa (0,00) **então** risco global é baixo (0,00).

Portanto, no exemplo 3, tem-se os seguintes resultados para a variável de saída Risco Global: Risco Global Baixo: 0,00; Risco Global Médio: 0,00; Risco Global Alto: 0,20.

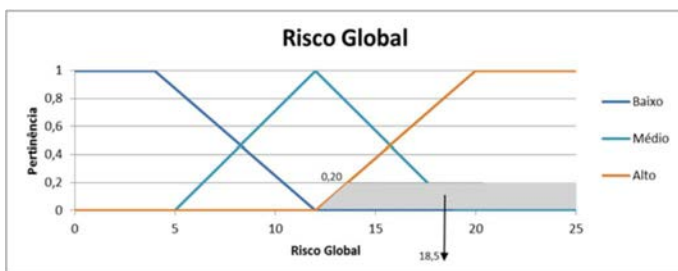


Gráfico 8 – Conjunto Difuso de Saída – Estrutura 3.

Fonte: O AUTOR, 2017.

Após a defuzzificação, tem-se como resultado, para a Estrutura 3, um risco global de 18,5, que representa a abscissa do centro de gravidade do conjunto difuso de saída. Este valor indica um risco global *alto* para a opção de "remoção completa para terra" desta Estrutura 3.

## 5 SUGESTÃO DE NOVOS TRABALHOS

Tendo em visto o caráter e abordagem introdutórios do presente trabalho (com foco na apresentação da metodologia em si) diversos outros trabalhos podem ser desdobrados, avançando no desenvolvimento do tema aqui introduzido. Neste sentido, pode-se destacar:

- trabalho focando na realização de pesquisa de opinião com especialistas das áreas relacionadas, objetivando definir variáveis de entrada, funções de pertinência e pesos relativos entre variáveis, segundo a visão destes especialistas, provendo assim insumos para um modelo *fuzzy* mais robusto e calibrado;
- trabalho aplicando modelo *fuzzy* definido em sistemas submarinos específicos, gerando um Estudo de Caso;
- trabalho aplicando resultado do modelo *fuzzy* em cartografia submarina, atribuindo às estruturas submarinas o risco obtido com o modelo *fuzzy* e

representando este resultado espacialmente. Esta abordagem pode gerar retroalimentações, com características espaciais (tais como cruzamentos) servindo de entrada para o modelo e provendo a geração de um mapa de risco de remoção das estruturas, apontando regiões de maior e menor risco no sistema submarino a ser descomissionado.

## 6 CONCLUSÃO

O uso da Lógica Difusa constitui-se em uma útil ferramenta a ser utilizada em casos onde as informações são incompletas ou vagas. Esta situação é prática comum em problemas de engenharia onde as decisões são geralmente baseadas na combinação do conhecimento científico (objetivo) e julgamento embasado na experiência (subjetiva). A teoria da Lógica Difusa vem fornecer subsídios racionais e sistemáticos às formulações matemáticas para tomadas de decisão ou previsão de algum fenômeno.

O uso desta metodologia tem se mostrado promissor, com aplicações em diversas áreas, porém o grau de complexidade do modelo aumenta consideravelmente de acordo com o número de variáveis, o número de regras de relação e grau de descrição das funções de pertinência (número de termos linguísticos).

No caso aqui apresentado, o objetivo principal foi despertar para as potencialidades da metodologia, como uma alternativa interessante para abordar e entregar avaliações comparativas de riscos de alternativas de descomissionamento, produto este com alto grau de subjetividade e que demanda trabalhos multidisciplinares habitualmente produzidos por meio de inúmeras reuniões e/ou Workshops de Risco.

A implementação de um modelo *fuzzy* que, em algum grau, possa refletir a experiência e julgamento de engenharia de especialistas nas diversas áreas envolvidas na avaliação, tem o potencial de dar consistência e maturidade ao modelo, facilitando inclusive sua validação junto às partes interessadas.

Desta forma, um considerável trabalho seria necessário na implementação do modelo *fuzzy*, é verdade, considerando este formato agregador com a participação de diversos especialistas. No entanto, após sua implementação, o modelo serviria de produto validado para novas aplicações, tirando o foco e necessidade de novos trabalhos com grandes equipes e longas análises multidisciplinares, e passando a focar na compilação de dados servindo de insumo ao modelo já estabelecido. Isso sem falar na padronização que tal abordagem geraria, já que ao longo dos Workshops é habitual e esperada a alteração nos integrantes das equipes.

Com isto, parece haver grande e interessante potencial para aplicações da Lógica Difusa no objeto aqui abordado, em diversos níveis e frentes, conforme os trabalhos sugeridos.

## REFERÊNCIAS

ALVAREZ GRIMA, M.; VERHOEF, P. N. W. Forecasting rock trencher performance using fuzzy logic. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, Amsterdam, v. 36, n. 4, p. 413-432, June 1999.

BUENO, Marcelo Lemes; STEMMER, Marcelo Ricardo; BORGES, Paulo Sérgio da Silva. Inspeção visual automática de peças cerâmicas via inteligência artificial. **Cerâmica Industrial**, São Paulo, v. 5, n. 5, p. 29-37, out. 2000. Disponível em: <[http://www.ceramicaindustrial.org.br/pdf/v05n05/v5n5\\_5.pdf](http://www.ceramicaindustrial.org.br/pdf/v05n05/v5n5_5.pdf)>. Acesso em: 06 jul. 2017.

CHAMEAU, J. L. A. et al. Potencial applications of fuzzy sets in Civil Engineering. **International Journal of Man-Machine Studies**, London, v. 19, n. 1, p. 9-18, July 1983.

CONVENTION for the protection of the marine environment of the North-East Atlantic (OSPAR). Londres, 1998. Text as amended on 24 July 1998, updated 9 May 2002, 7 February 2005 and 18 May 2006. Amendments to Annexes II and III adopted at OSPAR 2007. Disponível em: <[https://www.ospar.org/site/assets/files/1290ospar\\_convention\\_e\\_updated\\_text\\_in\\_2007\\_no\\_revs.pdf](https://www.ospar.org/site/assets/files/1290ospar_convention_e_updated_text_in_2007_no_revs.pdf)>. Acesso em: 06 jul. 2017.

DEPARTMENT OF ENERGY AND CLIMATE CHANGE. **Guidance Notes: decommissioning of offshore oil and gas installations and pipelines under the Petroleum Act 1998**. Version 6. Aberdeen, 2011.

MAERSK OIL. **Janice, James and Affleck Decommissioning Programmes**. Rev. B6. Aberdeen, 2016. Disponível em: <[https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/562398/Janice\\_James\\_and\\_Affleck\\_Decommissioning\\_Programmes\\_Final.pdf](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/562398/Janice_James_and_Affleck_Decommissioning_Programmes_Final.pdf)>. Acesso em: 31 ago. 2017.

PERENCO UK LIMITED; TULLOW OIL SK LIMITED. **Thames area decommissioning comparative assessment report**. Rev. 02. Aberdeen, 2014. Disponível em: <<https://www.tulloil.com/Media/docs/default-source/operations/thames-comparative-assessment.pdf?sfvrsn=4>>. Acesso em: 06 jul. 2017.

SABOYA JÚNIOR, Fernando; PINTO, Wendell Dias. Avaliação da compressibilidade de enrocamentos através da lógica difusa. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 24., 2002, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza, 2002. p. 55-63.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and Control**, London, v. 8, n. 3, p. 338-353, June 1965.



**Wendell Dias Pinto**

Graduação (1999) em Engenharia Civil pela UENF. Mestrado (2002) em Ciências de Engenharia (Geotecnia) pela UENF. Especialização (2008) em Gerenciamento de Projetos pela FIA/USP - Petrobras.

SUB/IPSUB/PROJSUB-III/PDES - Macaé, RJ  
E-mail: wendelldi-as@petrobras.com.br



**Giovanni Alessandro Fiorentini**

Graduação (2007) em Engenharia Elétrica pela Unicamp.  
Mestrado (2008) em Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica pela Uni-camp. Petrobras

SUB/IPSUB/PROJSUB-III/PDES – Macaé, RJ  
E-mail: gafioentini@petrobras.com.br

# BENCHMARKING PARA ENGENHARIA DE POÇOS

Ricardo de Melo e Silva Accioly  
Rafael de Olivaes Valle dos Santos





## RESUMO

*Benchmarking* é o processo de medir e melhorar o desempenho de uma empresa (ou área desta empresa) por comparação com os melhores do mercado ou indústria. Uma etapa fundamental neste processo é a definição de métricas (referenciais) de desempenho que permitam avaliar se um projeto (produto, serviço ou prática) é competitivo ou não. Em particular, na área de Engenharia de Poços, esses referenciais devem ser criados a partir de uma base de dados de poços construídos, preferencialmente com registros de diversas operadoras, para que se tenha um universo de comparação amplo. Este artigo aborda como esse processo é realizado em algumas das principais empresas do setor.

**Palavras-chave:** *Benchmarking*. Engenharia de Poços. Métricas. Indicadores.

## ABSTRACT

Benchmarking is the process of measuring and improving by comparison. A key step in the process is to define performance metrics that can lead to the correct "portrait" of a project (product, service or practice): is it competitive or not? Particularly speaking, in the Well Engineering discipline, those metrics shall be created based on some well construction database, gathering, if possible, data from multiple operators or enterprises, for the sake of broader comparisons. The present article tells about how this process is carried out by some major companies in the field.

**Keywords:** Benchmarking. Well Engineering. Metrics. Performance Measures.

## 1 INTRODUÇÃO

Se alguém é capaz de fazer melhor, mais rápido e/ou mais barato o que você está fazendo, é bem possível que ele(a) tenha práticas diferentes da sua. Descobrir quais são estas práticas, adaptá-las à sua situação e depois adotá-las no seu dia a dia vai, muito provavelmente, melhorar o seu desempenho (STAPENHURST, 2009). Este raciocínio resume bem a importância do processo de *Benchmarking*: medir e melhorar o que se está fazendo, por comparação com quem está fazendo melhor (*best-in-class*).

Não há uma metodologia única para fazer *benchmarking*, mas há elementos que devem estar, de uma forma ou de outra, presentes no processo: (i) métricas ou referenciais de comparação e (ii) dados confiáveis para o cálculo dessas métricas. As métricas podem ser elaboradas pelo próprio agente que vai desenvolver o estudo de comparação, ou escolhidas entre as publicadas pelas comunidades de *benchmarking*.

A obtenção de dados de comparação, em geral, é feita através de alguma associação ou consórcio de empresas (clube de *benchmarking*). Adicionalmente ao

*benchmarking* "externo" – que é a comparação com outras empresas –, uma empresa também pode olhar para si mesma, comparando seus próprios resultados ao longo do tempo, no que se chama *benchmarking* "interno".

Na área de Engenharia de Poços, as principais métricas estão relacionadas a prazo e custo de construção de poços (KAISER; PULSIPHER, 2007; KAISER, 2009). Isso é perfeitamente esperado, uma vez que prazo e custo são indicadores chaves em projetos de qualquer natureza. Os elementos que vão dar especificidade ao processo de *benchmarking* em uma determinada área são a (i) metodologia escolhida e, principalmente, (ii) a natureza dos dados, incluindo suas formas de obtenção e regras de pré-processamento.

O restante deste artigo está organizado da seguinte maneira: o item 2 traz definições básicas da Engenharia de Poços e apresenta, em linhas gerais, possíveis fluxos de *benchmarking* para essa área; o item 3 mostra um exemplo prático de *benchmarking* externo, baseado em modelagem estatística e o item 4 conclui o trabalho.

## 2 BENCHMARKING PARA ENGENHARIA DE POÇOS

A disciplina de engenharia de poços trata, simplificada, dos aspectos técnicos relacionados à construção – dividida nas etapas de perfuração e completação – e à manutenção (*workover*) de poços de petróleo. O principal objetivo dos poços é o acesso ao reservatório para a produção do hidrocarboneto lá contido, bem como para a injeção de água ou gás para a manutenção da sua pressão.

A construção de um poço, do ponto de vista da engenharia, segue duas grandes etapas: (i) perfuração, onde a profundidade desejada é atingida com base nas informações do reservatório e (ii) completação, onde o poço perfurado é equipado para produção. Existe uma terceira etapa, que não faz parte do processo de construção, que é a interligação do poço a uma unidade de produção (elevação e escoamento).

Os poços completados são compostos por uma série de equipamentos, que são responsáveis por: contenção do solo (revestimento condutor e telas de contenção); segurança na operação (árvore de natal e válvula de segurança de fundo - SSSV); funções operacionais (injeção de produto químico, equipamentos de elevação artificial e aquisição de dados operacionais) e interface para conexão dos dutos (Figura 1).

As companhias atuantes como operadoras na área de exploração e produção de petróleo têm o potencial de armazenar, diariamente, diversos registros relativos à construção e manutenção de poços. Cada operadora pode então organizar seus dados operacionais (transacionais) em uma base analítica (informacional), a partir da qual poderiam ser conduzidas análises diversas, incluindo o cálculo de indicadores e métricas – elementos chaves para medir o desempenho e realizar *benchmarking*.

### 3 ESTUDO DE CASO

A maioria das empresas não só participa de consórcios de *benchmarking*, como também possui programas internos de melhoria de desempenho, que implicam a construção de modelos estatísticos específicos para esse fim.

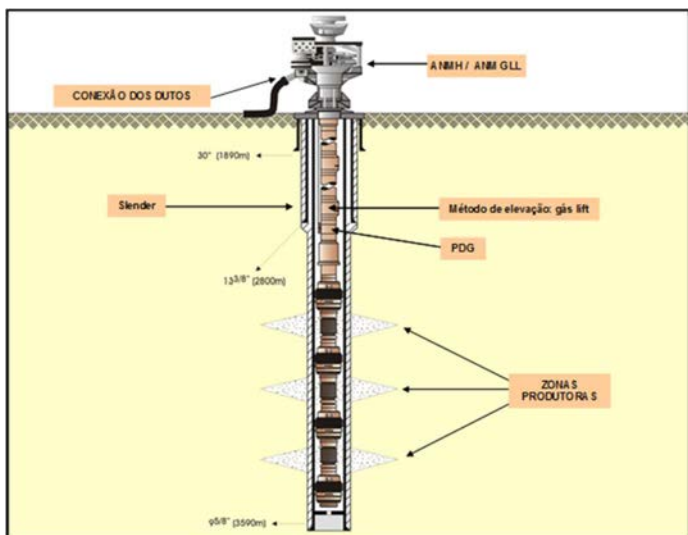
Para ressaltar a importância dessa prática de *benchmarking*, vamos utilizar um conjunto de dados disponibilizado por uma grande empresa de petróleo que tem acesso a esse tipo de informação. Os dados correspondem a perfurações de desenvolvimento da produção que ocorreram entre 2010 e 2014, em diversas áreas do mundo. Poços de desenvolvimento da produção têm seus projetos elaborados com base nas informações dos poços exploratórios, portanto é esperado que seu desempenho seja melhor que o desses últimos.

Este estudo está baseado na técnica estatística conhecida como análise de regressão (DRAPER; SMITH, 1998; FARADAY, 2015; FOX, 2016). Os modelos de regressão oferecem uma forma sistematizada e matematicamente rigorosa para construção de métricas de comparação.

Embora não exista uma literatura extensa abordando a aplicação desse tipo de modelagem na área de poços, há alguns trabalhos que podem ser citados aqui: Noerager et al. (1987), Kaiser e Pulsipher (2007), Kaiser (2009), Jablonowski e MacEachern (2009), Valle dos Santos et al. (2010) e Accioly e Valle dos Santos (2015).

O objetivo de um modelo de *benchmarking* é fornecer a métrica (ou parte dela) para comparação de desempenho entre operadoras. Aqui, a variável dependente escolhida (lado esquerdo da equação) foi o tempo de perfuração. Para variáveis independentes (lado direito da equação), foram avaliadas mais de 10 opções que representavam características técnicas da amostra de poços disponível. Foram selecionadas as variáveis mais significativas estatisticamente, buscando preservar a parcimônia do sistema.

No Gráfico 1, pode-se observar que, para a amostra selecionada, a maior parte dos poços está em lâminas d'água (LDAs) entre 1000 m e 2000 m (63,3%). Neste artigo, considera-se essa faixa como sendo de águas profundas. Considera-se também que LDAs abaixo de 1000 m sejam de águas rasas, e acima de 2000 m sejam de águas ultraprofundas (esse tipo de convenção é muito subjetivo e varia conforme a visão de cada operador). Assim, o segundo grupo mais representativo aqui foi o de poços de águas rasas (27,1%), ficando com a menor representação os poços de águas ultraprofundas (9,6%).



**Figura 1 - Esquemático de um poço de petróleo.**

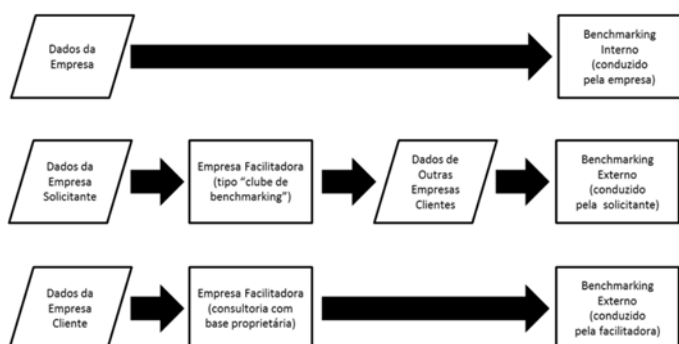
Fonte: PINTO, 2007, p. 4.

Ter uma boa organização interna dos dados de poços é uma atividade não apenas importante, mas estratégica para as empresas do setor, uma vez que essa organização é o ponto de partida para qualquer análise histórica que vise o ganho de competitividade. Se a comparação de uma empresa for com ela mesma, para medir sua evolução no tempo, isso constitui o processo de *benchmarking* interno. Mas, se o objetivo for o *benchmarking* externo, a empresa interessada vai precisar ter acesso aos dados de outras empresas.

Na prática, isso é feito através de empresas facilitadoras. Esse tipo de empresa tem característica de clube de *benchmarking* (STAPENHURST, 2009), mantendo e compartilhando dados entre suas operadoras clientes, podendo promover encontros anuais e publicar métricas específicas para um certo domínio de conhecimento.

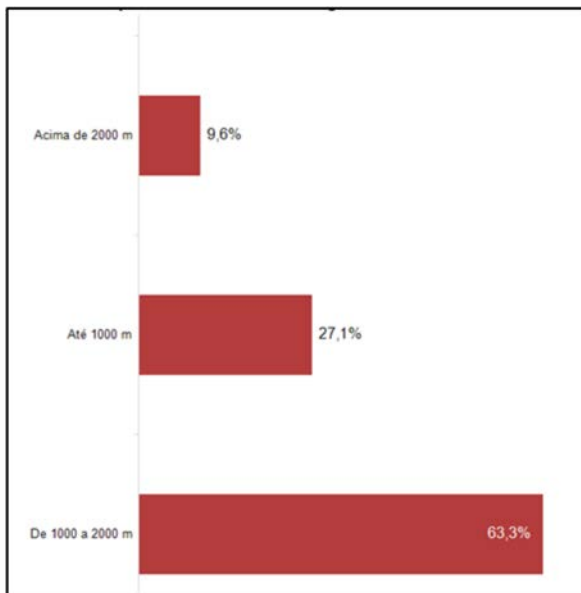
Uma outra modalidade de serviço oferecido por empresas relacionadas a *benchmarking* é uma em que os dados não são compartilhados: a empresa facilitadora tem uma base de dados proprietária e a utiliza, frente aos dados fornecidos pela empresa cliente, para informar como esta última está posicionada em relação à média da indústria (considerando um conjunto de métricas, comumente, ligadas a prazo, custo ou escopo). A *Independent Project Analysis* (IPA) é um exemplo de empresa que presta esse tipo de serviço, realizando estudos de *benchmarking* e análise de riscos para projetos em geral, incluindo a área de poços (IPA, 2017).

A Figura 2 exemplifica possíveis fluxos de *benchmarking*:



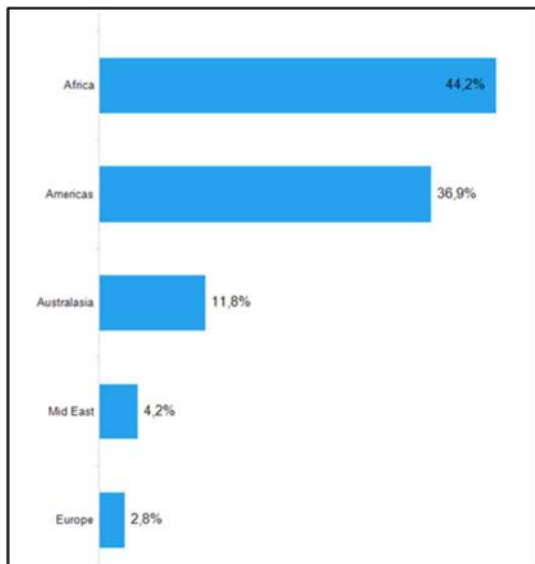
**Figura 2 - Fluxos de benchmarking (exemplos).**

Fonte: STAPENHURST, 2009, p. 19, adaptado pelos autores.



**Gráfico 1 – Distribuição por faixa de lâmina d'água.**  
Fonte: OS AUTORES, 2018.

No Gráfico 2, observa-se que a maior parte dos poços da amostra está situado na África (44,2%). O oeste da África é uma região que teve diversos projetos desenvolvidos nos últimos anos, com presença das principais operadoras do mundo. (Angola também teve muitos desenvolvimentos.) Prosseguindo, a região das Américas aparece como a segunda mais relevante da amostra (36,9%). O Golfo do México e a área marítima do Brasil são as localidades mais representativas dessa região. Por fim, aparecem Ásia e Austrália (11,8%), Oriente Médio (4,2%) e Europa (2,8%).



**Gráfico 2 – Distribuição por região geográfica.**  
Fonte: OS AUTORES, 2018.

A construção de um modelo com poços de diversas regiões geográficas requer cuidados adicionais, pois, mesmo considerando-se o uso de uma variável que controle essa característica, o modelo pode sofrer influência negativa de uma região que tenha poços muito distintos. Isso é mais evidente no caso das perfurações, onde as características geológicas de uma área têm grande influência na duração da atividade. (Essa influência é reduzida no caso das completações, pois essas estão mais relacionadas com os equipamentos e as

operações do que com os reservatórios.) Assim, a seleção de uma amostra homogênea é uma preocupação relevante nos modelos de regressão. Contudo, como o objetivo maior aqui é apenas demonstrar a metodologia e não apresentar a melhor modelagem possível, não serão executados processamentos ou análises mais aprofundadas na amostra selecionada.

Apesar do número de atributos (variáveis) disponíveis para cada poço ser relativamente grande (e.g. último diâmetro de broca, peso de lama máximo, número de desvios, inclinação etc.), opta-se quase sempre pela modelagem mais simples possível, dentro de um critério de parcimônia, i.e., um critério de balanço entre simplicidade da equação e qualidade dos seus resultados. Assim, o modelo final proposto para geração das métricas de *benchmarking* foi o da Equação 1:

$$\hat{Y} = \beta_0 A^{\beta_1} B^{\beta_2} C^{\beta_3} D^{\beta_4} \quad (1)$$

Onde:

$\hat{Y}$  = Duração estimada da perfuração (dias)

A = LDA (metros)

B = Número de revestimentos (2, 3, ou 4 – excluindo o de produção)

C = Intervalo perfurado ou soterramento (metros)

D = Região geográfica (*dummy*)

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$  = coeficientes da regressão

A partir desse modelo, pode-se estabelecer métricas de desempenho associadas a cada poço da amostra (ou a poços fora dela, mas considerados análogos) que permitam a comparação entre a duração realizada (efetivamente ocorrida) e a duração esperada (estimada pela regressão). Em particular, utilizou-se aqui o Índice de Competitividade, ICp (ACCIOLY; VALLE DOS SANTOS, 2015), definido conforme a Equação 2:

$$ICp = Y / \hat{Y} \quad (2)$$

Onde:

Y = Duração realizada da perfuração por poço (dias)

$\hat{Y}$  = Duração estimada da perfuração por poço (dias)

Em um modelo linear bem ajustado, com a devida aplicação do fator de correção oriundo da transformação logarítmica empregada na variável dependente (HU, 2005), a média do ICp na amostra é 1. Valores acima de 1 denotam poços mais lentos que a média, e abaixo de 1, tem-se os poços mais rápidos.

Na amostra original utilizada para ajuste do modelo proposto constavam 14 operadoras. Com o modelo ajustado, para representar os resultados de maneira mais sucinta e sem perda de generalidade, foram selecionadas as 4 operadoras que tinham mais poços perfurados (com seus nomes omitidos por questões de confidencialidade). Com a aplicação do modelo a cada um dos poços dessa amostra simplificada, é possível a criação de rankings de ICp's médios por operadora (Tabela 1) ou a associação de cada poço aos quartis da métrica (Tabela 2).



**Tabela 1 – Ranking de ICp's médios.**

Operadora	ICp
Operadora 1	0,86
Operadora 2	1,20
Operadora 3	0,87
Operadora 4	1,00

Fonte: OS AUTORES, 2018.

**Tabela 2 – Distribuição de poços por quartil do ICp em percentuais.**

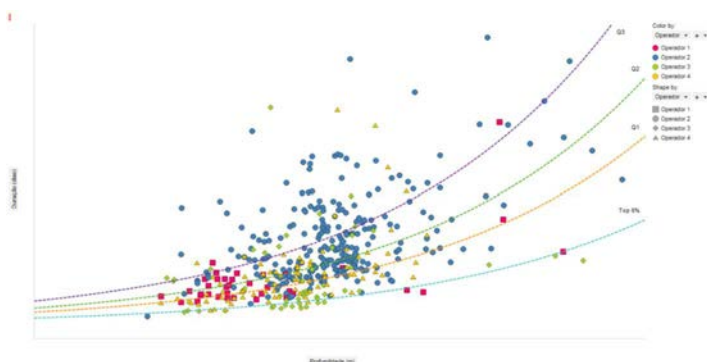
Operadora	Q1	Q2	Q3	Q4	TOTAL
Operadora 1	36	30	21	12	100
Operadora 2	9	20	31	40	100
Operadora 3	52	15	11	22	100
Operadora 4	19	29	31	21	100

Fonte: OS AUTORES, 2018.

Observa-se na Tabela 1 que a Operadora 1 é a mais competitiva, com tempos cerca de 14% menores que a média da indústria (originária da amostra original utilizada para ajuste do modelo). A Operadora 3 teve valores bem próximos, enquanto que a Operadora 4 teve resultado igual a média da indústria. A Operadora 2 teve resultados 20% maiores que a média.

Já na Tabela 2 é confirmado o bom desempenho das Operadoras 1 e 3, com destaque para a Operadora 3, que teve 52% dos poços no 1º quartil. Essa visão é interessante, pois deixa possível perceber que os poços do 4º quartil foram os que levaram a Operadora 3 a ter um desempenho pior do que o da Operadora 1.

O Gráfico 3 resume a distribuição da amostra de poços em relação ao modelo teórico, com indicação dos quartis Q1, Q2, Q3 e fronteira dos 5% melhores desempenhos (*Top 5%*) – quanto melhor o desempenho, mais metros perfurados na mesma duração.



**Gráfico 3 – Duração versus Profundidade. As curvas pontilhadas indicam os quartis e 5% melhores desempenhos.**

Fonte: OS AUTORES, 2018.

A criação desse tipo de análise pode ser encarada como o primeiro passo para a evolução do desempenho de uma operadora, pois antes de mais nada é importante saber quais são as empresas mais competitivas do mercado. A fase seguinte é compreender o que levou uma empresa a ter resultados melhores do que as outras. As razões para

desempenhos diferenciados são diversas e podem estar ligadas a questões tecnológicas, a diferenças nas práticas e processos adotados ou até mesmo a restrições de mercado e/ou governamentais. A investigação dessas questões é relevante para garantir a competitividade tanto nos custos como nos prazos das atividades.

## 4 CONCLUSÃO

Este trabalho procurou mostrar a importância e o potencial do *benchmarking* na Engenharia de Poços, utilizando um exemplo baseado em análise de regressão. Um dos fatores preponderantes para o sucesso desse tipo de trabalho é o investimento na criação de uma arquitetura de dados organizada, fundamentada na integração e unicidade, que possibilite não apenas a análise histórica dentro da própria empresa (*benchmarking* interno), mas também a participação em clubes de *benchmarking* (*benchmarking* externo).

Cabe observar também a importância de uma equipe multidisciplinar, trabalhando de forma coordenada, para que os resultados do *benchmarking* possam ser alcançados de maneira eficiente. Essa equipe deve envolver profissionais do negócio – responsáveis pela validação de modelos, críticas e sugestões relacionadas à atividade fim – e analistas de dados, responsáveis pelo suporte estatístico e estruturação de ambientes analíticos.

Finalmente, para reflexão, destacamos o seguinte trecho adaptado de Stapenhurst (2009): “Algumas pessoas podem dizer que *benchmarking* é uma perda de tempo. Mas às vezes isso é porque o *gap* entre elas e os melhores é tão grande que elas preferem não saber”. O processo de *benchmarking* não deve ser personalista, visando apontar culpados por um desempenho ruim. Deve, por outro lado, ser visto como instrumento corporativo para identificação de oportunidades de melhoria.

## REFERÊNCIAS

ACCIOLY, R. M. S; VALLE DOS SANTOS, R. O. Construção de poços marítimos. In: HAMACHER, Silvio; FERREIRA FILHO, Virgílio José Martins (Orgs.). **Aplicações de pesquisa operacional na indústria internacional de petróleo e gás: modelagem e solução para problemas da exploração à distribuição**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015. p. 95-108.

DRAPER, Norman. R.; SMITH, Harry. **Applied regression analysis**. 3<sup>rd</sup> ed. New Jersey: Wiley, 1998.

FARADAY, Julian J. **Linear models with R**. 2<sup>nd</sup> ed. London: CRC Press, 2015. Chapman & Hall/CRC Texts in Statistical Science (Book 63).

FOX, John. **Applied regression analysis and generalized linear models**. 3<sup>rd</sup> ed. New York: SAGE, 2016.

INDEPENDENT PROJECTS ANALYSIS (IPA). **Capital project risk analysis and benchmarking**. Disponível em:

<<http://www.ipaglobal.com/services/risk-analysis-and-benchmarking>>. Acesso em: 04 jul. 2017.

JABLONOWSKI, Christopher J.; MACEACHERN, Douglas P. Developing probabilistic well construction estimates using regression analysis. **Energy Exploration & Exploitation**, v. 27, n. 6, p. 439-452, 2009. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1260/0144-5987.27.6.439>>. Acesso em: 04 jul. 2017.

HU, Shu-Ping. The impact of using log-error CERs outside the data range and ping factor. In: JOINT ISPA/SCEA INTERNATIONAL CONFERENCE, 5., 2005, Broomfield. **Proceedings...**, 2005. Disponível em: <[http://cade.osd.mil/Files/CADE/References/044\\_2005\\_SCEA\\_ImpactofLogCERs\\_TRI\\_SHu.pdf](http://cade.osd.mil/Files/CADE/References/044_2005_SCEA_ImpactofLogCERs_TRI_SHu.pdf)>. Acesso em: 04 jul. 2017.

KAISER, Mark J. Modeling the time and cost to drill an offshore well. **Energy**, Amsterdam, v. 34, n. 9, p. 1097-1112, Sep. 2009. Disponível em: <[http://ac.els-cdn.com/S0360544209000383/1-s2.0-S0360544209000383-main.pdf\\_tid=2bf99d6c-6028-11e7-8547-00000aacb362&acdnat=1499111311\\_0d732c4c2163382d847875995651c8ee](http://ac.els-cdn.com/S0360544209000383/1-s2.0-S0360544209000383-main.pdf_tid=2bf99d6c-6028-11e7-8547-00000aacb362&acdnat=1499111311_0d732c4c2163382d847875995651c8ee)>. Acesso em: 04 jul. 2017.

KAISER, Mark J.; PULSIPHER, Allan G. Generalized functional models for drilling cost estimation. **SPE Drilling & Completion**, Richardson, Texas, v. 22, n. 2, p. 67-73, Jun. 2007. SPE-98401-PA. Disponível em: <<https://www.onepetro.org/download/journal-paper/SPE-98401-PA?id=journal-paper%2FSPE-98401-PA>>. Acesso em: 04 jul. 2017.

NOERAGER J. et al. Drilling time predictions from statistical analysis. In: SPE/IADC DRILLING CONFERENCE, 1987, New Orleans. **Proceedings...** New Orleans, 1987. SPE-16164-MS.

PINTO, Flávio J. C. P. **Introdução ao Sistema Submarino**. Macaé, 2007. Apresentação.

STAPENHURST, Tim. **The benchmarking book**. Amsterdam: Elsevier, 2009.

VALLE DOS SANTOS, R. O. et al. Avaliação do desempenho de perfuração para engenharia de poços. IN: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 62., 2010, Bento Gonçalves, RS. **Anais eletrônicos do...** Bento Gonçalves, RS: SOBRAPO, 2010. p. 2299-2306. Disponível em: <<http://www.din.uem.br/~ademir/sbpo/sbpo2010/pdf/72487.pdf>>. Acesso em: 04 jul. 2017.



### **Ricardo de Melo e Silva Accioly**

**Graduação (1983) em Engenharia Civil pela UFRJ. Engenheiro de Petróleo Senior. Mestrado (1995) e Doutorado (2005) em Engenharia de Produção pela COPPE/UFRJ. Petrobras. GIA-E&P/GCR/AECRio de Janeiro - RJ  
E-mail: raccioly@petrobras.com.br**



### **Rafael de Oliveira Valle dos Santos**

**Graduação (1999) em Engenharia de Computação, Mestrado (2001) e Doutorado (2012) em Engenharia Elétrica pela PUC -Rio. Pós-graduação em Petróleo & Gás pela COPPE/UFRJ (2008). Petrobras. GIA-E&P/GCR/AEC Rio de Janeiro, RJ – E-mail: rvsantos@petrobras.com.br**

# DISPOSITIVO DE PROCESSO CONTROLADO POR MEDIÇÃO ANALÍTICA

Elton Alves de Souza Filho  
Eduardo Azevedo de Melo  
Helcio Justiniano Cavalcante





Refinaria Isaac Sabbá (REMAN)

Fonte: Banco de Imagens Petrobras (BIP)/ Juez Cavalcanti (2005)

## RESUMO

Notadamente, um serviço de manutenção de analisadores de processo, seja de transmissores, sensores e sobressalentes, requer no campo de trabalho uma atenção redobrada tendo em vista as variáveis e operações de sondas, válvulas e correntes submetidas a altas pressões e temperaturas elevadas, quando não uma instalação em *by-pass*, imersão ou em linha implica inúmeras limitações para essas atividades quando não previamente planejadas e estudadas com atenção. O presente artigo tem por objetivo criar pressupostos técnicos e embasamento para uma discussão mais aprofundada acerca de manutenção de analisadores de processo.

**Palavras-chaves:** Analisador de processo. Manutenção. Simulação.

## ABSTRACT

Notably a Process Analyzers maintenance service, either transmitters, sensors and Parts requires the labor camp increased attention given the variables and probes operations, valves and chains subjected to high pressures and high temperatures, when no installation in *by-pass*, dipping or online imply several limitations to these activities when not previously planned and studied carefully. This article aims to create technical assumptions and basis for further discussion about maintenance process analyzers from the invention and creation of a process simulator that controlled by analytic measurement can allow to optimize the activity and provide theoretical subsidies in training, simulations of process conditions and daily activity, calibrations and validations analyzers.

**Keywords:** Process analyzer. Maintenance. Simulation.

## 1 INTRODUÇÃO

Ao avaliarmos os tipos de manutenção, vemos que a manutenção corretiva é a forma mais simples e mais primitiva de manutenção. De acordo com Slack, Chambers e Johnston (2002, p. 625), ela possui subdivisão em planejada e não planejada:

- a) manutenção corretiva não planejada: a correção da falha ou do desempenho abaixo do esperado é realizada sempre após a ocorrência do fato, sem acompanhamento ou planejamento anterior, aleatoriamente. Implica altos custos e baixa confiabilidade de produção, já que gera ociosidade e danos maiores aos equipamentos, muitas vezes irreversíveis (OTANI; MACHADO, 2008);
- b) manutenção corretiva planejada: quando a manutenção é preparada. Ocorre, por exemplo, pela decisão gerencial de operar até a falha ou em função de um acompanhamento preditivo. Otani e Machado apontam que “pelo seu próprio nome planejado, indica que tudo o que é planejado, tende a ficar mais barato, mais seguro e mais rápido” (2008, p. 4).

Dentro desse escopo, temos a definição ainda para a manutenção preventiva. É a manutenção voltada para evitar que a falha ocorra, através de manutenções em intervalos de tempo pré-definidos. Segundo Slack, Chambers e Johnston, “visa eliminar ou reduzir as probabilidades de falhas por manutenção (limpeza, lubrificação, substituição e verificação) das instalações em intervalos de tempo pré-planejados” (2002, p. 645).

Os serviços de manutenções corretivas e preventivas em analisadores de processos de parâmetros físico-químicos de líquidos; pH, oxirredução, condutividade, turbidez, oxigênio dissolvido, cloro livre e etc. são realizadas com um planejamento prévio e baseados em experiências anteriores a intervenção. Essas atividades sendo postas organizadas em um plano de manutenção, ela obedece a uma série de procedimentos operacionais padrão para cada analisador conforme suas especificidades e características de peças, sensores e sobressalentes.

O treinamento de um novo técnico de analisadores ou de operador de processo que trabalhe com analisadores em sua atividade pode requerer seja em laboratório ou no campo um árduo e dispendioso trabalho de treinamento e planejamento desta atividade, tendo em vista ainda as dificuldades e complexidades de um analisador de processo instalado e submetido a diversas variáveis de processo, como pressão, temperatura, escoamento de fluidos, bombeamento, elétricas, além de diversas outras que compõem um sistema analítico de processo, como sistema de amostragem, telemetria, utilidades como; ar, reagente, padrões, gases e entre outros.

No plano de manutenção geralmente não está prevista a quantidade de horas de treinamento ou discussão das ações, pois de fato ele já subtende que o técnico ou o operador esteja treinado e capacitado para determinada atividade, seja esta de caráter corretiva, preventiva ou preditiva. A provisão e planejamento desse capital intelectual bem capacitado e crítico deve ser previsto na implementação da rotina de um plano de manutenção de analisadores de processo, além de prever treinamentos e discussão de novas ações conforme necessidade vão surgindo mudanças no sistema analítico de processo.

Tendo em vista o desmembramento dessas ações, o dispositivo de processo controlado por medição analítica surge como um elo do planejamento da manutenção, pois a simulação de manutenção preventiva, corretivas, e validações, seja por comparação de dados com material de referência certificado, análise de laboratório ou ainda por analisador multiparâmetros portátil, quando realizadas previamente em bancada de laboratório com condições controladas pode contribuir para a redução significativa do número de desvios e incidentes, contribuir para aumentar a confiabilidade e otimização das atividades de intervenção em analisadores de processo de pH, oxirredução, condutividade, turbidez, oxigênio dissolvido, cloro, etc. Além de criar subsídios e capital intelectual para treinamentos de novos técnicos de manutenção, técnicos químicos, instrumentistas, e operadores de processo, dirimindo dúvidas e diminuindo o tempo de intervenção e execução das atividades.

Toda atividade segura preza por um bom planejamento e discussão das ações, uma simulação de processo em escala reduzida visa mitigar essas ações e contribuir para uma cultura de segurança de processo pautada em uma gestão de risco eficaz e comprometida com o aprendizado prévio dessas atividades.

## 2 OBJETIVOS

O presente artigo tem por objetivo criar pressupostos técnicos e embasamento para uma discussão mais aprofundada acerca de manutenção de analisadores de processo, demonstrando o ganho de produtividade e otimização em atividades de manutenção corretiva e preventiva, treinamentos de técnicos de analisadores de processo, redução da exposição de técnicos químicos, manutenção e instrumentistas com a simulação e planejamento prévio das atividades de manutenção em analisadores de processo. Além de auxiliar no treinamento de validação de analisadores de processo com a simulação em escala reduzida de uma atividade de processo em laboratório.

## 3 DESCRIÇÃO DO DISPOSITIVO CONTROLADO POR MEDIÇÃO ANALÍTICA

A partir da necessidade de simular condições de processo e avaliar dados de calibração e validação de analisadores de processo, optou-se pela invenção e criação de um dispositivo de processo que controlado por medição analítica possa permitir otimizar as atividades e fornecer subsídio teórico em treinamentos, simulações de condições de processo e do cotidiano da atividade. Foram coletados materiais de baixo custo que estavam em fase de alienação e descarte de materiais, como cilindro de acrílico, bombas, mangueiras, caixa de aço, bombona de pvc e transmissores e sensores de analisadores sobressalentes não utilizados ou descontinuados.

A disposição desses elementos foi proposta baseando-se em um fluxo de processo de um pequeno tanque que possui em seu interior uma amostra, que recebe um produto químico ou dosagem para posterior enchimento de uma câmara de amostragem que possui um ou vários elementos sensores, estes enviam a variável, diferença de potencial (DDP) em volts (V) para o transmissor que faz a conversão do sinal em corrente (mA). Podendo ser diversas variáveis físicas ou químicas medidas, seja pH, condutividade, turbidez, cloro livre e total, nitrogênio amoniacal, temperatura, oxirredução, oxigênio dissolvido e gasoso, gases e particulados, cor, densidade, destilação, sólidos dissolvidos e suspensos, e etc. No presente estudo são avaliados as variáveis pH, condutividade, e oxirredução, sendo escolhida a variável pH para o controle do equipamento e dosagem dos produtos químicos de teste.

A divisão dos componentes do sistema é distribuída da seguinte forma:

- a) tanque de processo (cilindro de acrílico, Vol. 8,62L);

- b) tanque de medição analítica (caixa de aço, Vol. 35,28L);
- c) bombona de dosagem (bombona de pvc, Vol. 10L);
- d) bomba 1 – retorno ao tanque de processo (bomba peristáltica);
- e) bomba 2 – dosagem de produto ou solução da bombona (bomba peristáltica);
- f) mangueira 1 – retorno ao tanque de processo;
- g) mangueira 2 – dosagem de produto e/ou solução;
- h) misturador (homogeneizador);
- i) elementos analíticos (sensores);
- j) computador para aquisição de dados e tratamento estatístico;
- k) painel de transmissores (pH, oxirredução, condutividade e etc.).

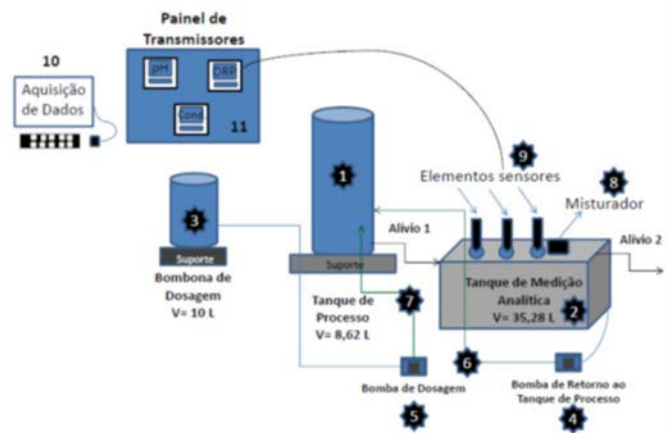


Figura 1 – Esquema do dispositivo de processo.

Fonte: OS AUTORES, 2016.

A condição de simulação ou de processo é iniciada ao colocar uma amostra em estudo que entra no tanque assim nomeado como de processo (1) por uma mangueira de plástico ou de forma manual colocada diretamente. Em seguida a amostra enche o tanque e vai aliviando por Gravidade (alívio 1) para o tanque assim denominado como de medição (2).

Após quatro bateladas ou até o enchimento prévio do tanque de processo (1), o excesso escoo para o tanque de medição (2) e sai por uma saída (orifício) na lateral do mesmo através de uma mangueira denominada de alívio 2.

Escolheu-se a variável pH (potencial hidrogeniônico que mede a acidez ou basicidade de uma solução aquosa) e atribuiu-se uma faixa de trabalho como principal e controladora da lógica do analisador com valores entre  $\text{pH} \geq 6,0$  até  $\text{pH} \leq 7,0$ .

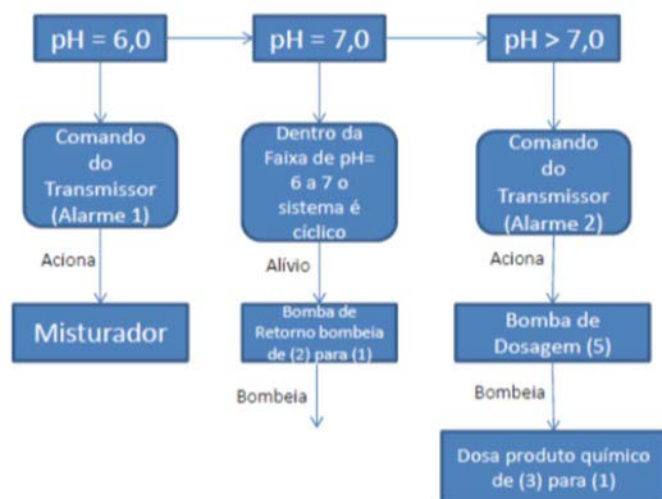
As condições de operação e simulação de variáveis de processo principais são: escoamento de fluidos, dosagem de produtos químicos ou soluções conhecidas, temperatura, pressão, bombeamento, automação, instrumentação etc. na faixa de soluções com  $\text{pH} < 6,0$  o sistema comporta-se em equilíbrio medindo as variáveis analíticas (também são medidas outras, mais sem estipular faixa de controle) em estudo (pH, condutividade, oxirredução etc.).

Entende-se por transmissor um ente eletrônico podendo ser digital ou analógico que fornece uma saída de corrente proporcional a variável estudada, por exemplo: saída de corrente 4-20 mA proporcional a pH de 0 a 14), assim por diante para condutividade, cloro, oxirredução, oxigênio dissolvido e etc. O transmissor em estudo possui acionamento por relés (Dispositivo eletromecânico) este acionamento obedece um sequenciamento definido e denominado na lógica do transmissor como alarme. Sendo assim a bomba de retorno ao tanque de processo (4) é acionada quando o transmissor de  $\text{pH} \geq 6,0$  (alarme 1 do transmissor), a bomba de dosagem (5) é acionada quando o transmissor de pH mede 7,0 pH (alarme 2 do transmissor).

O misturador (homogeneizador) é acionado no  $\text{pH} = 6,0$ . Em pH maior que 7,0 o alarme 2 aciona a bomba de dosagem que bombeia produto químico ou solução teste da bombona de dosagem com pH suficiente para abaixar do valor  $>7,0$  para a faixa de  $\text{pH} \geq 6,0$  até  $\text{pH} \leq 7,0$ .

A faixa de trabalho de pH pode ser modificada conforme conveniência ou necessidade do usuário (variação de soluções, produtos químicos, amostras). No presente trabalho foi preparada uma solução ácida ( $\text{pH} < 7$ ) e para valores de  $\text{pH} > 7$  a dosagem procede por bombeamento até estabilizar a solução do tanque de processo (1) para valores de  $\text{pH} < 7$ . O acionamento da bomba de dosagem cessa sempre que estiver nesta condição de  $\text{pH} < 7$ , mantendo-se desta forma o sistema na faixa de trabalho estipulada entre  $\text{pH} \geq 6,0$  até  $\text{pH} \leq 7,0$ .

Tal faixa de trabalho apenas tem o objetivo de simular a condição de um tanque por exemplo da área de Utilidades que possua em seu interior uma água descalcificada que necessite manter uma faixa de controle de pH entre 6 e 7. Conforme modelo resumido consta na Figura 2.

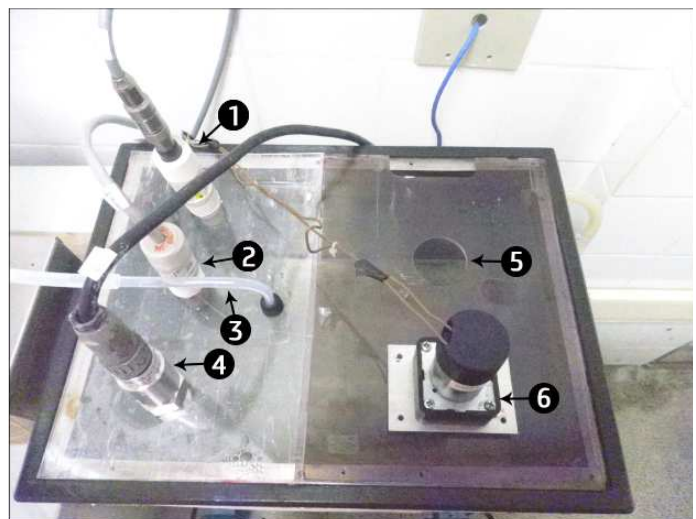


**Figura 2 – Esquema da lógica e sequenciamento da faixa de trabalho escolhida.**  
Fonte: OS AUTORES, 2016.

Os alarmes 1, 2 e, caso seja necessário, 3 ou 4 são configurados dentro da lógica do transmissor de pH (Emerson Process), todavia pode ser desenvolvido um software englobando todos esses elementos sem a necessidade da lógica do equipamento transmissor de pH (Emerson Process).

O sistema pode fazer uso de diversos tipos de transmissores, sensores, seja fabricante, sejam modelos variados, com controle definido conforme a natureza do processo e/ou planejamento da intervenção. Nossas condições de processo estão baseadas nos elementos principais; tanque de processo (1), tanque de medição analítica (2), bombona de dosagem (3), bombas de retorno (4) e bomba de dosagem (5), as aplicações vastas para estudos de processos, controle, instrumentação, automação de processo, analítica, modelagem de processos, treinamentos, intervenção em analisadores de processos, planejamento de manutenção, segurança em processos, redução de incidentes e desvios, e etc.

No painel de transmissores em (11) da Figura 1, tem-se a visualização dos resultados e o acompanhamento da faixa de controle estudada. E conforme conveniência e distinção de simulações e situações práticas, podem ser modificadas para a faixa de controle que o usuário requerer, bastando apenas definir novos valores ou até mesmo trabalhar com outros parâmetros físico-químicos já citados anteriormente. Em (10) da figura 1, pode ser acoplado um sistema de telemetria para o tratamento dos dados registrados, podendo até mesmo ser elaborado um software que compreenda toda a lógica do transmissor, um sistema autônomo.



**Figura 3 – Vista de cima do tanque de medição analítica.—Vol = 35,280L**

Fonte: OS AUTORES, 2016.

- Legenda da Figura 1:
1. Sensor de ORP (Emerson Process)
  2. Sensor de pH (Emerson Process)
  3. Alívio por gravidade da corrente do Tanque de processo
  4. Sensor de condutividade (Yokogawa)
  5. Entrada para medição por Analisador portátil
  6. Misturador

## 4 RESULTADOS

As atividades realizadas no campo após planejamento, treinamento e simulações no sistema de controle tem reduzido consideravelmente o tempo de intervenção em manutenções corretivas e preventivas em analisadores de processo supracitados.

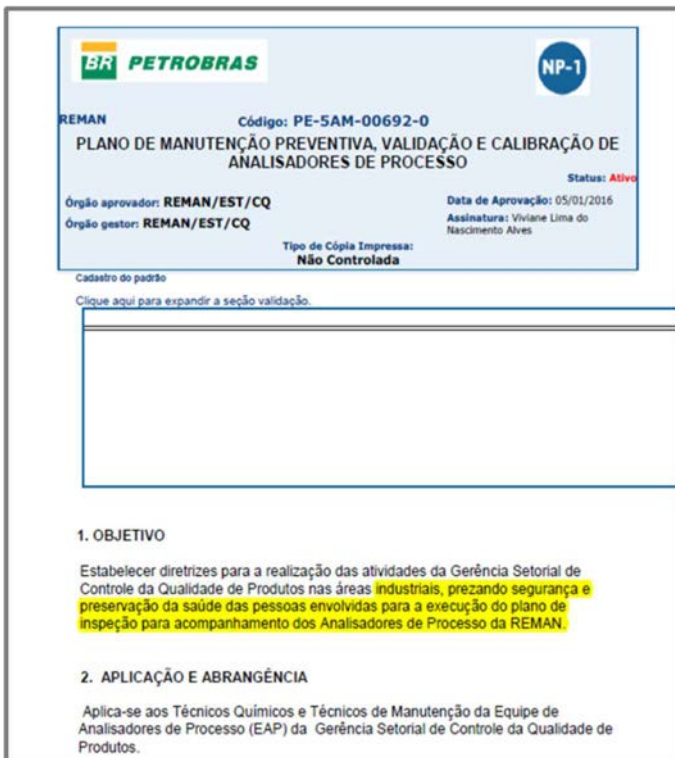


Os treinamentos teóricos e práticos de técnicos químicos, instrumentação e operadores de processos têm sido realizados com o subsídio do sistema de controle para evidenciar situações práticas com eficiência.

Têm sido realizadas simulações de manutenções preventivas, calibrações e validação de analisadores de processo com o apoio do sistema citado.

Redução de incidentes e desvios têm sido dirimidos com a simulação de situações realizadas em laboratório por técnicos químicos e instrumentistas do setor (REMAN/EST/CQ) para posteriormente replicá-las no campo.

Discussões acerca de manutenção de analisadores de processos e necessidade de planejamento prévio destas atividades deram origem ao 1º Padrão de execução da REMAN/EST/CQ, com pauta no plano de manutenção e intervenção em analisadores de processo conforme Figura 4.

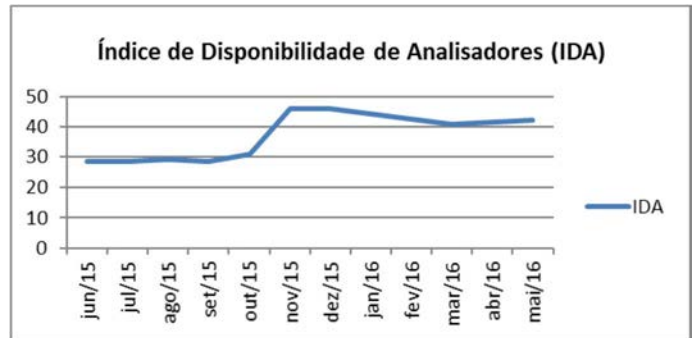


**Figura 4 – PE referente ao plano de manutenção de intervenção em analisadores de processo.**  
Fonte: REMAN, 2016.

Conforme apostila (UNIVERSIDADE, 2006) do curso de Analisadores de Processo disponibilizado pela Universidade Petrobras, temos que para uma disponibilidade de analisadores de processo aceitável (acima de 95% para a maioria das aplicações), é necessário que haja técnicos capacitados e disponíveis para a manutenção do sistema, provisão de materiais de consumo e peças de reposição.

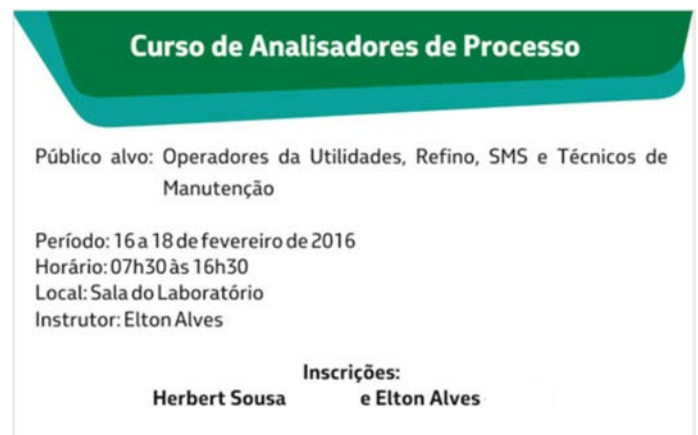
A partir da intensificação, planejamento e otimização das atividades de analisadores de processo no referido setor (REMAN/EST/CQ) no início do ano de 2015, verificou-se que o incremento do dispositivo de processo a partir do mês de setembro de 2015 ajudou a corroborar e a evidenciar somado a estes outros fatores um aumento da

disponibilidade de analisadores, tendo em vista que discussões de simulações, planejamento, treinamento, apoio as atividades de manutenção preventiva e corretivas criou um elo positivo com as atividades referidas acima, como evidenciado no Gráfico 1.



**Gráfico 1 – Índice de Disponibilidade de Analisadores da REMAN.**  
Fonte: OS AUTORES, 2016.

Tal constatação foi ainda propiciada com a criação no referido setor de um curso de Analisadores de Processo para operadores de campo, técnico químico, e instrumentista no mês de fevereiro de 2016 conforme consta no registro de abertura do curso na Figura 5.



**Figura 5 – Registro de abertura do curso de analisadores de processo na REMAN.**  
Fonte: PETROBRAS, 2016.

## 5 CONCLUSÃO

A partir da observação dos resultados qualitativos e quantitativos verificou-se que o presente dispositivo de processo controlado por medição analítica surgiu como um elo no apoio as atividades de manutenção preventiva e corretiva de analisadores de processo no referido setor (REMAN/EST/CQ) no período em estudo de setembro de 2015 a maio de 2016.

O presente instrumento acarretou a discussão e criação de um curso de analisadores de processo (implementado em fevereiro de 2016), criação de um padrão de execução com o foco nas atividades previstas em planejamento de manutenção e intervenção em analisadores de processo com aplicação prática em laboratório e simulação de condições de processo que permearam variáveis operacionais, como temperatura, pressão, escoamento de fluidos, bombeamento, automação, instrumentação, elétrica etc.

Além do estudo de variações de parâmetros físico-químicos como pH, condutividade, oxirredução, oxigênio dissolvido, cloro etc. Vale ainda ressaltar que peças do sistema em questão foram recicladas de equipamentos em fase de alienação (Reaproveitamento), já em desuso, ou descontinuados, sendo posteriormente organizados para criar este aparato, gerando, portanto, otimização de recursos e agregando a cultura de sustentabilidade da referida unidade.

## REFERÊNCIAS

- BUENO, A. et al. Validação de analisadores de processo: implantação de novos procedimentos na Petrobras. In: CONGRESSO RIO AUTOMAÇÃO: AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL E O SEU VALOR NA GERAÇÃO DE INFORMAÇÕES, 7., 2012, Rio de Janeiro, **Anais...** Rio de Janeiro: IBP, 2013.
- OTANI, M.; MACHADO, W. V. A proposta de desenvolvimento de gestão da manutenção industrial na busca da excelência ou classe mundial. **Gestão Industrial**, Curitiba, v. 4, n. 2, 2008.
- PETROBRAS. **Curso de analisadores de processo**. Manaus, 2016. Disponível em: <[http://portalpetrobras.petrobras.com.br/PetrobrasPortal/appmanager/portal/desktop?\\_nfpb=true&\\_pageLabel=home\\_reman](http://portalpetrobras.petrobras.com.br/PetrobrasPortal/appmanager/portal/desktop?_nfpb=true&_pageLabel=home_reman)>. Acesso em: 01 set. 2016.
- PETROBRAS. **Lista de presença do curso analisadores de processo**. Manaus, 2016. Disponível em: <<https://amln102.petrobras.com.br/mail03/xh0b.nsf>>. Acesso em: 01 set. 2016.
- PETROBRAS. **PE-5AM-00692-0**. Plano de manutenção preventiva, validação e calibração de analisadores de processo. Manaus, 2016.
- SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da produção**. São Paulo: Atlas, 2002.
- UNIVERSIDADE PETROBRAS. **Analisadores em linha: princípios analíticos e instrumentais**. Rio de Janeiro, 2006. Apostila do curso Analisadores de Processos, Gestão e Confiabilidade.

## AGRADECIMENTOS

A Deus pai, Filho e Espírito Santo em sua infinita misericórdia e graça abundante. A minha esposa e família pelo apoio incondicional e amoroso. A unidade e gerência REMAN/EST/CQ pela sua inestimada confiança e colaboração.

## GLOSSÁRIO

**Analisador de processo** - analisadores são equipamentos de operação automática e independente tem como finalidade medir uma ou mais características de uma amostra de um processo, excluindo as variáveis elementais: temperatura, vazão, pressão e nível. Os analisadores em linha, ou instrumentos automáticos de medição de qualidade, foram desenvolvidos inicialmente para substituir ou complementar as análises de laboratório.

**Analisador multiparâmetro portátil** - analisador capaz de monitorar diversas variáveis consecutivamente na mesma análise.

**Emerson Process** - fabricante de analisador de processo

**Lógica** - organização e planejamento das instruções, assertivas etc. em um algoritmo, a fim de viabilizar a implantação de um programa.

**Material de referência certificado** - é um Material de referência, acompanhado por um certificado, com um ou mais valores de propriedade, certificado por um procedimento que estabelece sua rastreabilidade à obtenção exata da unidade na qual os valores da propriedade são expressos, com cada valor certificado acompanhado por uma incerteza para um nível de confiança estabelecido.

**Plano de manutenção** - é um sistema de atribuição de tarefas dentro do departamento de manutenção que coordena: habilidades e o conhecimento dos operadores; trabalho e disponibilidade de equipamentos, materiais ou ferramentas; dados e história dos equipamentos.

**Processo** - sequência contínua de fatos ou operações que apresentam certa unidade ou que se reproduzem com certa regularidade; andamento, desenvolvimento, marcha.

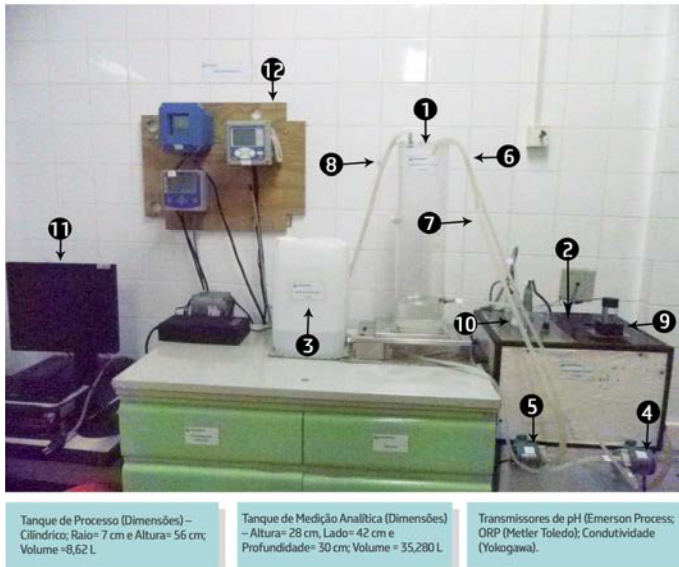
**Transmissor** - converte sinais sonoros, analógicos ou digitais em ondas eletromagnéticas.

**Validação** - procedimento para avaliar se um analisador de processo apresenta desempenho adequado para um uso pretendido.

**Yokogawa** - fabricante de analisador de processo.

## APÊNDICE A – Dispositivo de processo controlado (fotos)

## ANEXO A – Lista de frequência do curso de analisadores de processos



Tanque de Processo (Dimensões) – Cilíndrico; Raio= 7 cm e Altura= 56 cm; Volume = 8,62 L

Tanque de Medição Analítica (Dimensões) – Altura= 28 cm, Lado= 42 cm e Profundidade= 30 cm; Volume = 35,280 L

Transmissores de pH (Emerson Process; ORP (Mettler Toledo); Condutividade (Yokogawa).

**Figura 6– Foto atual do dispositivo de processo controlado por medição analítica.**

Fonte: OS AUTORES, 2016.

Legenda da Figura 6:

1. Tanque de Processo—Vol = 8,62 L
2. Tanque de Medição Analítica—Vol = 35,280 L
3. Bombona de Dosagem de Produto Químico e/ou Solução—Vol = 10 L
4. Bombona de Retorno ao Tanque de Processo (1)
5. Bombona de Dosagem (2)
- 6, 7, 8. Mangueiras da Boma de Retoro (1) e Bomda de Dosagem (2)
9. Misturador
10. Medição analítica por sensores de pH, ORP e condutividade, instalados por imersão no Tanque de Processo
11. Computados para aquisição de dados
12. Pannel de transmissores de pH, ORP e condutividade



**Figura 7– Foto do fluxo de processo do dispositivo de processo.**

Fonte: OS AUTORES, 2016.

Legenda da Figura 7:

1. A amostra entra no Tanque de Processo pela Mangueira 1
2. A amostra enche o Tanque e vai aliviando por gravidade para o Tanque de Medição Analítica
3. Após 4 bateladas do Tanque de Processo (8,62 L) o Tanque de Medição Analítico (35,280 L), o excesso sai pela Mangueira de Alívio
4. Bomba 2 de dosagem é acionada quando o Transmissor de pH mede 7,0 pH (Alarme 2 do Transmissor)
5. Bomba 1 é acionada quando o Transmissor de pH mede 6,0 ph (Alarme 1 do Transmissor)

### Lista de Frequência - Curso de Analisadores de Processos

Instrutor: Técnico Químico Elton Alves de Souza Filho Matrícula: 2507537

Carga Horária: 24 Hs

Período: 16/02 a 18/02/2016

Conteúdo programático: Sistema de Amostragem, Medição analítica em processo, Analítica de Líquidos e Gases, Parâmetros de Medição; pH, ORP, Condutividade, Turbidez, Cloro livre, Oxigênio, Amônia, Óleo em Água. Manutenção preventiva e Corretiva, CEP e validação de Analisadores de Processo, Intervenção com Analisadores Portáteis e HART, Gestão com Acompanhamento em PI, Prática em Simulador de Processo com Medição analítica.

Participantes	Matrícula	Segunda-feira 16/02	Terça-feira 17/02	Quarta-feira 18/02
Humberto Pinheiro de Jesus (OP/TEU)		<i>Humberto</i>	<i>Humberto</i>	<i>Humberto</i>
Ricardo Sergio Feitosa de Oliveira (OP/TEU)		<i>Ricardellia</i>	<i>Ricardellia</i>	<i>Ricardellia</i>
Helcio Justiniano Cavalcante - ELFE		<i>Helcio</i>	<i>Helcio</i>	<i>Helcio</i>

**Figura 8 – Registro do curso de analisadores de processo com aula prática no dispositivo de processo realizado em 02/2016 na REMAN/EST/CQ.**

Fonte: PETROBRAS, 2016b.



### Elton Alves de Souza Filho

Graduação (2014) em Tecnologia em Processos Químicos pelo IFAM. Petrobras. REMAN/EST/CQ – Manaus, AM.  
E-mail: eltonalves@petrobras.com.br



### Eduardo Azevedo de Melo

Curso Técnico (1992) em Eletrônica pela ETFAM-AM. LIGA MONTAGEM – Manaus, AM.

**Helcio Justiniano Cavalcante**  
Graduação (2012) em Engenharia de Telecomunicações pela FUCAPI-AM).

# PROJETO DE ADEQUAÇÃO DOS FORNOS L-1A/B PARA ATENDIMENTO A DEMANDA AMBIENTAL E AUMENTO DE CARGA

Laudemiro Nogueira Júnior  
Paulo Henrique Ferraz do Amaral Filho  
Renato Vianna Chagas  
Rodrigo Penha Andrade Rocha





Refinaria Presidente Bernardes (RPBC)

Fonte: Banco de Imagens Petrobras (BIP)/ André Motta de Souza (2012)

## RESUMO

Com o objetivo de adequar os fornos da Unidade C de destilação atmosférica da RPBC a um aumento de carga térmica e aos requisitos ambientais impostos pela legislação, foi realizada a troca dos queimadores convencionais existentes por modelos de baixa emissão de óxidos de nitrogênio (*low-NOx*). Em virtude das diferentes dimensões envolvidas e diferentes requisitos técnicos particulares aos novos queimadores quando comparados aos queimadores convencionais, foi necessário o projeto de uma nova câmara plena, de um novo piso e de um novo trecho final do duto de alimentação de ar preaquecido. A complexidade geométrica, o espaço reduzido e a necessidade de uma distribuição igualitária do ar de combustão entre os queimadores suscitaram a elaboração de um projeto multidisciplinar, envolvendo análise por fluidodinâmica computacional (*Computational Fluid Dynamics - CFD*), análise estrutural por elementos finitos e modelagem geométrica 3D por maquete eletrônica. Após a implementação deste projeto no campo, foram constatados o enquadramento das emissões de NOx aos níveis desejados, o bom comportamento das chamas e uma melhoria substancial nas condições de conforto térmico e de segurança na região sob os fornos.

**Palavras-chave:** Fornos. Sistema de preaquecimento. Redução de emissões. CFD. Elementos finitos.

## ABSTRACT

In order to adapt the fired heaters of Unit C (atmospheric distillation) of RPBC to an increase of heat absorption and the environmental requirements imposed by the legislation, the exchange of the existing conventional burners was done by models of low emission of oxides of nitrogen (*low-NOx* models). Due to the different dimensions involved and different technical requirements peculiar to the new burners when compared to conventional burners, it was necessary to design a new plenum, a new floor and a new end section of the preheated air supply duct. The geometric complexity, the reduced space and the need for an equal distribution of the combustion air between the burners led to the elaboration of a multidisciplinary design, involving fluid dynamics analysis by CFD, structural analysis by the finite element method and 3D modeling. After the implementation in the field, we verify NOx emissions down to desired levels, good behavior of the flames and a substantial improvement in the conditions of thermal comfort and safety in the region under the heaters.

**Keywords:** Fired heaters. APH system. Emissions reduction. CFD. Finite elements.

## 1 INTRODUÇÃO

A necessidade de aumento de produção de derivados, as demandas ambientais restritivas e a premissa de minimização de investimentos têm exigido das unidades

de refino da Petrobras a avaliação criteriosa e, eventualmente, a adequação de seus equipamentos de forma a cumprir com esses desafios. A Unidade C da Refinaria Presidente Bernardes (RPBC) é a principal unidade de destilação atmosférica da refinaria, que atualmente processa cerca de 12500 m<sup>3</sup>/d de cru. Um cenário de aumento desta capacidade para 15000 m<sup>3</sup>/d, aliado à demanda ambiental para redução de emissões de óxidos de nitrogênio (NOx), levaram a RPBC a solicitar a substituição dos queimadores convencionais dos fornos L-1A/B (os dois principais fornos desta unidade) por modelos de baixa emissão de NOx (*low-NOx*) e com maior liberação de calor. Para viabilizar tal substituição, foi necessária a elaboração do projeto de um novo trecho do sistema de preaquecimento de ar, incluindo dutos e câmara plena, e de um novo piso para os referidos fornos.

Queimadores *low-NOx* trabalham com excesso de ar menor do que o utilizado em queimadores convencionais, sendo a distribuição de ar entre os queimadores um fator crítico para a qualidade da combustão e, conseqüentemente, para a garantia do nível de emissões de poluentes. A criticidade deste tipo de equipamento no que diz respeito à distribuição de ar entre queimadores, aliada às restrições físicas da área e à necessidade de uma solução para a suportaçãõ do conjunto formado pelo piso e pela câmara plena demandaram um projeto multidisciplinar, com análise de fluidodinâmica computacional (CFD) para concepção da geometria e o uso do Método dos Elementos Finitos na verificação mecânica dos componentes, sendo ambos suportados pela modelagem 3D do sistema.

Os fornos L-1A/B operam desde dezembro de 2016 com o novo arranjo, sendo constatado o enquadramento das emissões de NOx aos limites especificados pela RPBC. Somam-se a isso considerável redução da temperatura ambiente sob o piso do forno e do descongestionamento dessa região, tornando-a bem mais segura e confortável para o operador.

## 2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é apresentar o projeto multidisciplinar elaborado para a adequação dos fornos L-1A/B da Unidade C da RPBC, de forma a atender à demanda descrita, em alinhamento às diretrizes de Segurança, Meio Ambiente e Saúde (SMS) da Petrobras não só no que se refere à redução de emissões atmosféricas, mas também trazendo benefícios em aspectos de segurança e saúde.

## 3 METODOLOGIA

Uma vez definidas as condições de processo e as limitações de emissões a serem atendidas, foi adotada a seguinte metodologia para a execução do projeto:

- a) **consulta à documentação:** nesta etapa, os diversos documentos referentes ao projeto original e às modificações ocorridas até então no equipamento são estudados de forma a tomar

ciência da configuração vigente do equipamento, bem como das suas condições de projeto;

- b) **visita técnica à unidade:** nesta etapa é realizada uma visita ao equipamento no campo com os objetivos de (i) dirimir incertezas em relação às informações contidas na documentação, principalmente referentes a dimensões; (ii) observar as diversas restrições geométricas a serem atendidas; (iii) verificar condições de operação, como a qualidade da combustão; (iv) verificar as condições de acesso para desmontagem e montagem do novo trecho;
- c) **especificação dos novos queimadores:** nesta etapa, alguns fornecedores de queimadores são consultados para especificação de modelos de queimadores que atenderão às demandas de liberação térmica e de emissões atmosféricas. A especificação dos novos modelos de queimadores traz consigo a necessidade da definição do novo círculo de queimadores para os fornos L-1A/B, que são do tipo cilíndrico vertical, e o consequente projeto de um novo piso e de uma nova câmara plena;
- d) **projeto fluidodinâmico:** esta etapa consiste na concepção geométrica do conjunto formado pelo trecho final do sistema de preaquecimento de ar do forno (sistema de PAF) e pela câmara plena. Aqui faz-se necessária a integração entre a modelagem de maquetes eletrônicas em 3D com simulações de CFD, de forma que o arranjo final não só promova uma distribuição de ar adequada entre os diversos queimadores, mas também atenda às diversas restrições geométricas levantadas através da documentação e da visita técnica. Esta etapa é iterativa e demanda um tempo relativamente longo, uma vez que diversos modelos geométricos 3D e simulações computacionais podem ser necessários até que se chegue à solução considerada como a mais adequada. Também nesta etapa é especificado o isolamento térmico visando a uma temperatura de chaparia adequada;
- e) **projeto mecânico:** uma vez concebido o arranjo pelo projeto fluidodinâmico, é realizado o projeto mecânico dos dutos, do piso e da câmara plena, visando respeitar o mais fielmente possível o arranjo definido, sendo o método dos elementos finitos empregado para o cálculo de tensões e deformações. Além disso, devem ser observadas as restrições geométricas e de acesso. Os aspectos de desmontagem e montagem são considerados visando sempre maximizar os trabalhos pré-parada e minimizar os trabalhos a serem realizados durante a parada;
- f) **emissão da documentação e pós-projeto:** por fim, são emitidos todos os documentos necessários para as etapas de engenharia de detalhamento, construção e montagem, além da prestação do devido apoio a todas estas etapas.

## 4 DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

Segue um breve descritivo dos fornos e de seu sistema de preaquecimento de ar.

### 4.1 FORNOS

Os dois fornos em questão são os L-1A/B, cujo serviço é o aquecimento e a vaporização parcial do petróleo, carga da torre de destilação atmosférica. Tais fornos são do tipo cilíndrico vertical, com dupla fileira de tubos na parede, com seção de convecção vertical e com sistema de preaquecimento de ar de combustão (sistema de PAF) compartilhado entre os dois fornos. Cada forno possui oito queimadores distribuídos em arranjo circular em seu piso.

### 4.2 SISTEMA DE PRAQUECIMENTO DE AR DE COMBUSTÃO (SISTEMA DE PAF)

Os fornos L-1 A/B utilizam um sistema de PAF compartilhado, ou seja, utilizam os gases de combustão de ambos os fornos para aquecer o ar de combustão, que será destinado aos queimadores dos mesmos. O sistema consiste em: (i) um trocador de calor rotativo (PAF), (ii) dois ventiladores, (iii) uma rede de dutos de gases e de ar; (iv) duas câmaras plenas, uma para cada forno; (v) chaminé independente. A Figura 1 traz o esquema do sistema de PAF dos fornos L-1A/B.

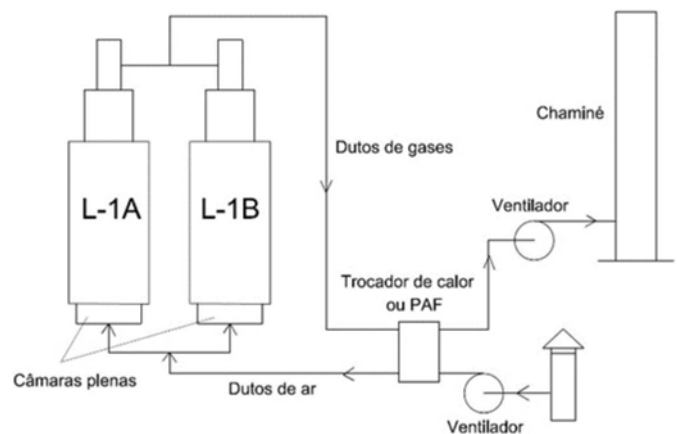


Figura 1 – Esquema do sistema de preaquecimento de ar de combustão dos fornos L-1A/B.

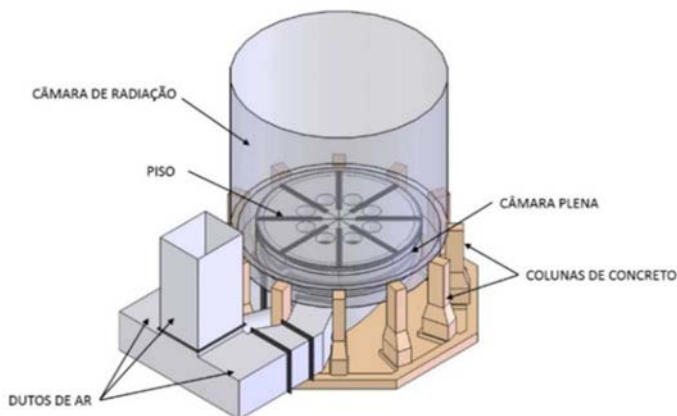
Fonte: OS AUTORES, 2018.

#### 4.2.1 CÂMARA PLENA E SISTEMA DE COMBUSTÃO

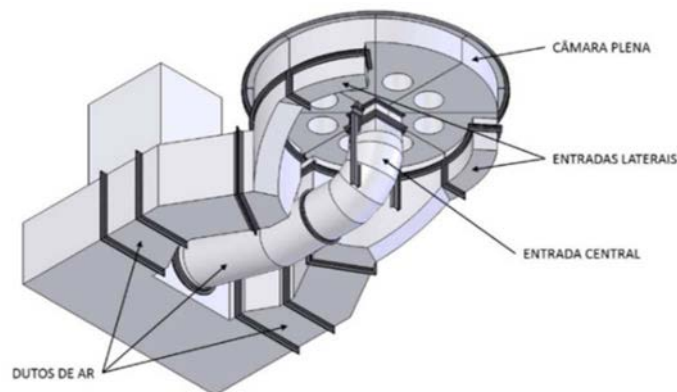
Cada forno possui oito queimadores situados em seu piso, cujas entradas de ar se encontram inseridas no interior da câmara plena. Na câmara plena, o ar preaquecido é conduzido até a admissão de ar dos queimadores para ser utilizado na combustão. Essa câmara situa-se imediatamente abaixo do piso do forno e tem o objetivo de receber o ar preaquecido vindo do PAF e distribuí-lo da forma mais uniforme possível entre os queimadores.

Antes das modificações propostas neste projeto, a câmara plena possuía geometria complexa, com área de seção livre variável, onde a alimentação do ar se dava por duas entradas laterais e por um duto de seção circular

com entrada no centro da câmara plena. O arranjo 3D desta configuração pode ser visto nas Figuras 2 e 3. Na Figura 2, com observador situado em posição acima do arranjo, são representados os dutos de ar quente, o conjunto formado pelo piso do forno e pela câmara plena com os furos ocupados pelos queimadores, as colunas de concreto presentes na área e a câmara de radiação do forno, esta última representada transparente para visualização do piso e da câmara plena. Na Figura 3, com o observador situado num nível abaixo da elevação do arranjo, podem ser visualizadas as entradas laterais e central de ar na câmara plena.



**Figura 2 – Maquete 3D da configuração antes das modificações - observador acima do arranjo.**  
Fonte: OS AUTORES, 2018.



**Figura 3 – Maquete 3D da configuração antes das modificações - observador abaixo do arranjo, mostrando as entradas de ar na câmara plena.**  
Fonte: OS AUTORES, 2018.

O conjunto formado pela complexa câmara plena e pelo duto circular deixava a região sob o piso do forno demasiadamente congestionada, o que dificultava a evasão do operador em caso de emergência. Esse congestionamento, aliado ao isolamento pouco eficiente, contribuía para a elevada temperatura ambiente nessa região, levando a falhas constantes de componentes eletrônicos dos módulos de ignição, além de grande desconforto térmico. Soma-se a isso o fato de que não se verificava visualmente uma qualidade de combustão uniforme entre os queimadores.

## 5 PROJETO DAS MODIFICAÇÕES

### 5.1 ESCOPO DO PROJETO

A necessidade da substituição dos queimadores convencionais por modelos de baixa emissão de NOx (*low-NOx*) levou à definição de um novo círculo de queimadores pelo fato desses modelos terem dimensões diferentes dos queimadores utilizados até então nos fornos L-1A/B. A modificação do círculo de queimadores demanda, então, o seguinte escopo:

- o projeto de uma nova câmara plena, que comportará os novos queimadores;
- o projeto de um novo trecho final do duto de ar preaquecido, que alimentará a nova câmara plena;
- o projeto de um novo piso.

Apesar da situação mais crítica que a original (queimadores maiores e com maior liberação de calor), perseguiu-se um projeto que proporcionasse distribuição de ar uniforme entre os queimadores e descongestionasse a região sob o piso do forno, possibilitando o trânsito e a permanência de pessoas nessa área. Além disso, o projeto deveria contemplar as restrições físicas existentes na área e ter sua montagem exequível.

### 5.2 DEFINIÇÃO DAS NOVAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

Considerando as condições de processo para o forno referentes ao novo cenário de processamento de 15000 m<sup>3</sup>/d pela Unidade C, procede-se com simulações analíticas para a troca térmica no forno e com o balanço de energia do conjunto formado pelos fornos e pelo sistema de PAF. Chega-se assim às seguintes condições do ar preaquecido:

- vazão mássica de ar para cada forno: 10,34 kg/s;
- temperatura do ar preaquecido: 330 °C.

Para as condições acima, a vazão por queimador é de 1,293 kg/s, caso a distribuição seja uniforme. Logo, deve-se perseguir uma configuração tal que minimize o desvio das vazões individuais de cada queimador em relação a esse valor médio.

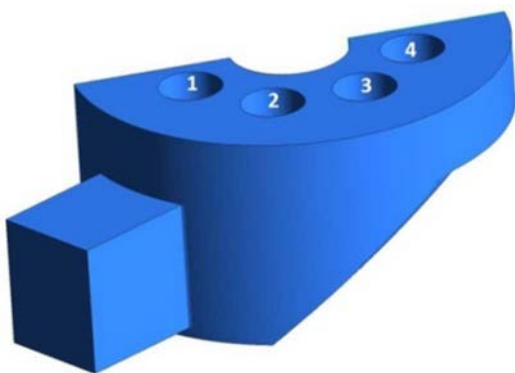
### 5.3 CONCEPÇÃO GEOMÉTRICA COM ANÁLISE POR CFD

Com o intuito de conceber uma geometria da câmara plena que garantisse a desejada distribuição uniforme de ar entre queimadores e que atendesse às restrições físicas da área, foi realizada a simulação do escoamento do ar por fluidodinâmica computacional (CFD) em maquetes eletrônicas rigorosamente geradas em 3D com o programa SolidWorks. Para as simulações em CFD, foi utilizado o programa ANSYS Fluent, que é baseado no método dos volumes finitos.



### 5.3.1 MODELO COM DUAS ENTRADAS LATERAIS

Primeiramente, foi simulada uma configuração com duas entradas laterais e área de seção variável, semelhante àquela instalada na área, mas com algumas diferenças geométricas e sem o duto central adicional. O objetivo dessa simulação era entender como se daria o escoamento do ar quente nesse tipo de arranjo e verificar a distribuição entre os queimadores, já com as novas condições de operação. Foi considerada a simetria da geometria para a construção do domínio computacional, mostrado na Figura 4 (sem os queimadores para melhor visualização da posição dos mesmos). Devido à simetria, apenas quatro queimadores e uma entrada lateral de ar são representados. Esse domínio foi então discretizado por uma malha de volumes hexaédricos.



**Figura 4 – Domínio computacional utilizado para a simulação de câmara plena com duas entradas laterais.**  
Fonte: OS AUTORES, 2018.

Nas simulações por CFD, foi adotado o modelo *k-ε* realizável para modelagem da turbulência, com tratamento de parede melhorado (*enhanced wall treatment* - EWT) para modelagem da equação para *e* perto da parede (ANSYS, 2013). Os queimadores foram modelados como meios porosos com parâmetros ajustados de forma a prover a perda de pressão adequada, conforme dados do fabricante do queimador. A região da entrada do ar no queimador foi modelada conforme desenho do fabricante.

Os resultados numéricos da vazão mássica de ar por queimador, obtidos para a configuração descrita, são apresentados na Tabela 1. Os queimadores estão numerados de 1 a 4 conforme indicado na Figura 4. Os resultados indicam considerável desvio das vazões individuais dos queimadores em relação à média esperada para distribuição uniforme, chegando a aproximadamente 5% de desvio. Se considerarmos o queimador que mais recebe ar e o que menos recebe, os resultados levaram a uma diferença superior a 8% entre eles.

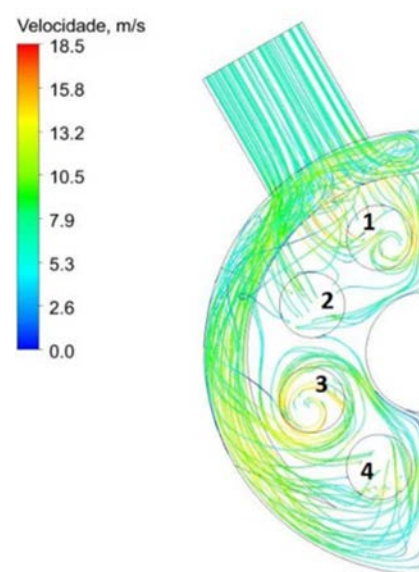
Na Figura 5, encontram-se as linhas de corrente obtidas com a simulação segundo a vista superior do domínio. Observa-se que o escoamento apresenta alguns caminhos preferenciais, além da presença de vórtices na região dos queimadores 1 e 3, que são os que menos recebem ar.

Em virtude da distribuição de ar não muito boa obtida pela análise por CFD, procurou-se investigar uma outra concepção geométrica que atendesse melhor a esse critério e que, se possível, trouxesse outros ganhos, como o descongestionamento da região sob o forno.

**Tabela 1 – Resultados obtidos por CFD para a vazão mássica (kg/s) de ar em cada queimador e respectivo desvio em relação à média (1,293 kg/s), segundo geometria com duas entradas laterais.**

Queimador	Vazão (kg/s)	Desvio
1	1,272	-1,6%
2	1,343	3,9%
3	1,230	-4,9%
4	1,326	2,6%

Fonte: OS AUTORES, 2015.



**Figura 5 – Linhas de corrente referente à simulação de câmara plena com duas entradas laterais. Vista superior.**

Fonte: OS AUTORES, 2015.

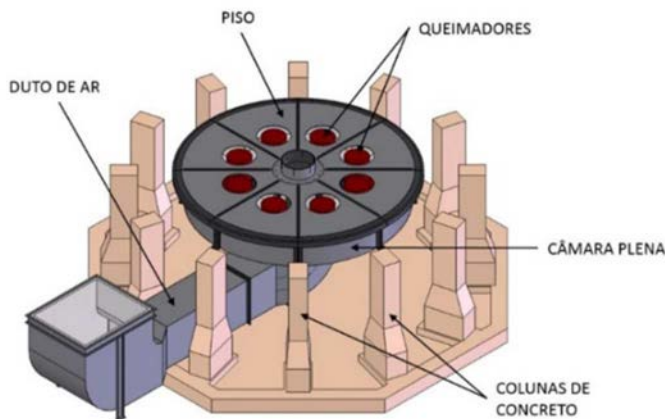
### 5.3.2 MODELO CILÍNDRICO COM ENTRADA ÚNICA CENTRAL

Na tentativa de se obter uma geometria que conciliasse uma boa distribuição de ar entre os queimadores com a liberação de área na região sob o piso do forno, partiu-se para a concepção de um modelo geometricamente mais simples que o instalado até então: um modelo cilíndrico com uma entrada única central pela face inferior da câmara plena.

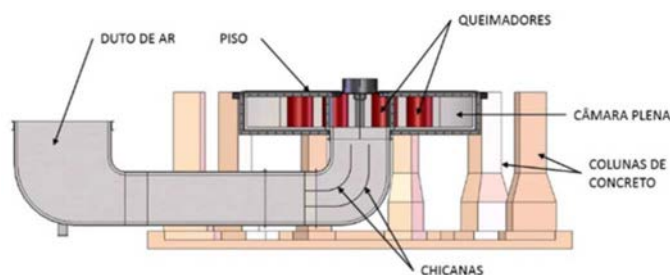
O arranjo proposto está representado nas Figuras 6 e 7. Pelo fato de a entrada na câmara plena ser única, a modificação se estendeu desde o final do trecho vertical do duto de ar quente, onde havia uma bifurcação, mostrada nas Figuras 2 e 3. O novo trecho é representado pela cor cinza nas Figuras 6 e 7.

Algumas restrições físicas presentes na área impuseram ao projeto algumas características geométricas para tornar a montagem exequível no campo durante a janela

de parada programada de manutenção da unidade. O reduzido espaçamento entre as colunas de concreto limitou as dimensões da seção reta do novo trecho horizontal do duto, levando a velocidades de ar acima dos valores recomendados. Além disso, devido à baixa elevação do piso do forno, o comprimento do trecho reto vertical imediatamente à montante da câmara plena é bastante reduzido. Esses dois fatores influenciaram negativamente em relação à distribuição de ar entre os queimadores e somente uma análise fluidodinâmica permitiria avaliar se tal arranjo atingiria seu objetivo.



**Figura 6 – Maquete 3D da proposta para a câmara plena cilíndrica - perspectiva**  
Fonte: OS AUTORES, 2018.



**Figura 7 – Maquete 3D da proposta para a câmara plena cilíndrica - corte.**  
Fonte: OS AUTORES, 2018.

Assim como no arranjo com duas entradas laterais, o domínio computacional utilizado para a simulação por CFD do novo arranjo se valeu de seu plano de simetria. Da mesma forma, os mesmos modelos de turbulência e de modelagem na parede (*k-ε* realizável e EWT, respectivamente) foram adotados.

Os resultados numéricos da vazão mássica de ar por queimador, obtidos para a configuração com entrada única, são apresentados na Tabela 2. Os queimadores seguem a mesma numeração considerada no arranjo anterior. Os resultados mostram excelente distribuição de ar, com diferença desprezível de vazão entre queimadores.

A Figura 8 mostra as linhas de corrente obtidas com a simulação segundo a vista superior do domínio. É possível observar que, após a entrada do ar quente na câmara plena, o escoamento se distribui radialmente de forma aproximadamente homogênea, sendo que uma fração

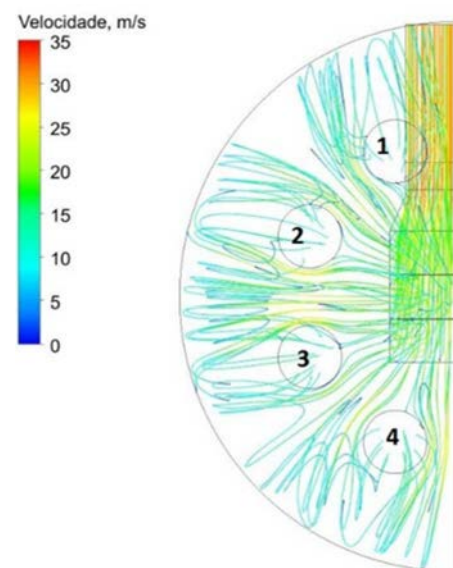
majoritária desse escoamento contorna de início os corpos dos queimadores, seguindo em direção à parede cilíndrica lateral da câmara plena. Após esta parte do escoamento chocar-se com a referida parede, ocorre uma recirculação, seguida da entrada nos queimadores.

Como já mencionado e como pode ser observado ao compararem-se as Figuras 5 e 8, a velocidade de entrada do ar no arranjo com entrada única central é bem superior à do arranjo com duas entradas laterais. Tal fator, aliado ao pequeno comprimento reto à montante da entrada na câmara plena, contribuiriam para prejudicar a equidade na distribuição entre os queimadores para o arranjo com entrada única central. No entanto, creditam-se à adoção de chicanas e à simetria aproximadamente axial da nova câmara plena os bons resultados obtidos.

**Tabela 2 – Resultados obtidos por CFD para a vazão mássica (kg/s) de ar em cada queimador e respectivo desvio em relação à média (1,293 kg/s), segundo geometria cilíndrica.**

Queimador	Vazão (kg/s)	Desvio
1	1,294	0,12%
2	1,291	-0,12%
3	1,293	0,04%
4	1,292	-0,04%

Fonte: OS AUTORES, 2015.



**Figura 8 – Linhas de corrente referente à simulação de câmara plena do tipo cilíndrico. Vista superior.**

Fonte: OS AUTORES, 2015.

Com a mesma definição de malha para a qual os resultados da Tabela 2 foram reproduzidos (para a qual houve convergência numérica), foi gerada uma nova geometria onde todo o domínio foi simulado, sem considerar plano de simetria. Como esperado, os bons resultados se confirmaram; o maior desvio observado dentre os oito queimadores foi de 0,30% em relação à média.

Os bons resultados numéricos obtidos pela análise por CFD motivaram então a adoção do arranjo cilíndrico com

entrada central única para o projeto da nova câmara plena. Soma-se à boa distribuição de ar entre os queimadores o fato de que esse novo arranjo proporcionaria o descongestionamento da região sob o piso do forno, permitindo o livre acesso aos queimadores e viabilidade do trânsito de pessoas, contribuindo positivamente para a segurança daqueles que estiverem nesta região.

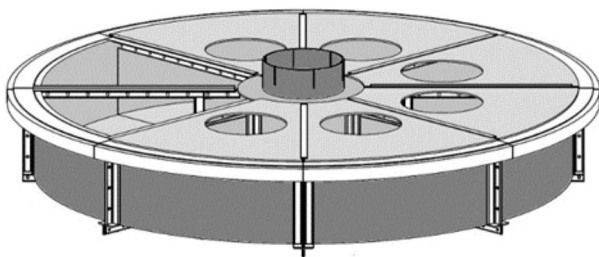
Além disso, foi especificado isolamento térmico interno com painéis de fibra cerâmica de classificação grau 12 da norma ASTM C892-10 (2010) com 51 mm de espessura. Com tal isolamento, a temperatura externa da chapa da câmara plena e do trecho de duto foi calculada em 52 °C, proporcionando uma menor temperatura na região sob piso o forno, tornando o ambiente mais confortável do que a situação encontrada até então no campo.

## 5.4 PROJETO MECÂNICO

Devido ao exíguo prazo entre a elaboração do projeto da nova câmara plena e a parada da unidade, foi necessário elaborar um projeto mecânico completo, que possibilitasse a contratação da fabricação das partes novas dos fornos, ficando apenas alguns detalhes construtivos para serem detalhados pelo fornecedor.

Durante a fase inicial do projeto foram contatados os principais fornecedores de queimadores, sendo que apenas dois apresentaram uma proposta para fornecimento. As principais diferenças entre as soluções propostas pelos fabricantes de queimadores foram o diâmetro do círculo dos queimadores e o sistema de fixação dos mesmos. Enquanto um dos queimadores propostos tinha seu peso sustentado pelo piso do forno, o outro deveria ser suportado pela chapa do fundo da câmara plena. O projeto foi realizado de modo a permitir sua adaptação para ambos os casos.

Outro condicionante foi a distância entre as colunas de concreto de sustentação do forno, que limitou o tamanho dos módulos pré-fabricados. Pelo estudo com a maquete 3D conclui-se que a câmara plena deveria ser dividida em oito setores circulares para serem unidos, por parafusos, sob o piso do forno (Figura 9).



**Figura 9 – Câmara plena dividida em oito setores.**  
Fonte: OS AUTORES, 2015.

### 5.4.1 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

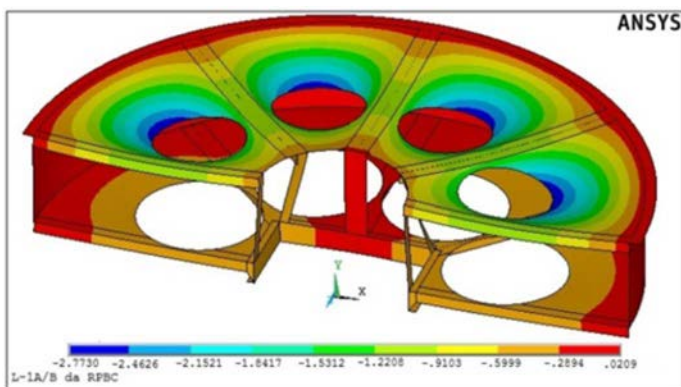
No dimensionamento do piso de um forno e de sua câmara plena é fundamental conhecer a deformação dos seus componentes, uma vez que uma pequena inclinação de um queimador pode levar a um desvio na chama que pode provocar incidência sobre os tubos. Dada a complexidade da geometria, foi necessário utilizar o cálculo por Elementos Finitos (utilizando o programa ANSYS) no dimensionamento da estrutura da câmara plena e das chapas do piso.

Foram elaborados dois modelos utilizando elementos de casca, um para cada uma das soluções propostas pelos fabricantes de queimador, sendo utilizados elementos de casca lineares (SHELL181) com tamanho médio de 40 mm. Como as tensões atuantes encontradas foram inferiores à tensão de escoamento dos materiais na temperatura de operação, as análises foram lineares elásticas com as propriedades dependentes da temperatura, obtidas no ASME BPVC seção II parte D. Como algumas das chapas são revestidas com isolamento térmico, as densidades foram alteradas de modo que a massa calculada para estes componentes correspondesse à soma das massas da chapa e do isolamento. O peso dos queimadores foi aplicado ou na chapa do piso ou no fundo da câmara plena, em função dos modelos propostos pelos diferentes fabricantes dos queimadores.

Como toda a periferia da câmara plena é simplesmente apoiada em uma cantoneira calandrada, foi aplicada uma restrição ao deslocamento na direção vertical nos nós correspondentes. Foram também aplicadas condições de contorno de restrição ao deslocamento na direção vertical na região dos pilares de apoio, situados próximos à entrada de ar na câmara plena. No plano de simetria foram aplicadas as restrições ao deslocamento na direção z e à rotação em torno do eixo x (a configuração dos eixos encontra-se na Figura 10). Para ambos os modelos foi acrescentado um caso de carga correspondente à condição de içamento, que se caracteriza pela ausência dos queimadores, pela ausência dos pilares de apoio e pela aplicação das cargas localizadas de içamento.

Na Figura 10 é mostrado o campo de deslocamentos verticais no piso e na câmara plena para o caso em que o queimador é sustentado pela chapa do piso. Pode-se observar que o deslocamento vertical da chapa do piso na região do queimador varia entre 1,2 mm e 2,7 mm, o que corresponde a uma inclinação do queimador de apenas 0,2°, que é satisfatória. Todas as tensões atuantes ficaram abaixo dos valores admissíveis pelo código de projeto estrutural AISC 360.

A análise para o caso em que o queimador é sustentado pelo fundo da câmara plena mostrou deslocamentos menores que o caso citado acima, configurando, portanto, uma situação de menor criticidade.



**Figura 10 – Deslocamento vertical para o queimador suportado pela chapa do piso do forno.**  
Fonte: OS AUTORES, 2015.

## 6 DESEMPENHO NO CAMPO

A montagem do conjunto formado pela nova câmara plena, piso e trecho final do duto de ar foi executada na parada da unidade ocorrida em novembro de 2016. A modularização da câmara plena permitiu o transporte dos componentes e bem como sua montagem compatíveis com o prazo previsto para a parada. Os oito módulos foram unidos sobre apoios no piso da unidade sob os fornos e posteriormente o conjunto foi elevado para sua posição por macacos hidráulicos. A simplicidade de montagem, evitando trabalhos a quente, contribuiu para a minimização de exposição ao risco durante a intervenção.

A unidade partiu em dezembro de 2016 e, desde então, cada um dos fornos L-1A/B tem operado com vazão aproximadamente na faixa entre 3500 e 4200 m<sup>3</sup>/d, correspondente a uma carga de processamento em torno de 12000 a 13000 m<sup>3</sup>/d da Unidade C, tipicamente. No entanto, durante um período de alguns dias, o forno L-1B foi submetido a uma carga de aproximadamente 4500 m<sup>3</sup>/d, o que significa uma aproximação do cenário de carga máxima já que, segundo a RPBC, quando a Unidade C estivesse em 15000 m<sup>3</sup>/d, cada forno L-1A/B deveria estar aproximadamente entre 4500 e 5000 m<sup>3</sup>/d, a depender das propriedades do petróleo.

A verificação quantitativa da boa distribuição de ar entre os queimadores no campo, conforme prevista pelas simulações por CFD, não é possível, pois a vazão de ar admitida por cada queimador não é medida. No entanto, segundo informado pela RPBC, a análise visual das chamas mostra boa qualidade de combustão e não evidencia diferença significativa entre os queimadores. Também não foram observados quaisquer indícios de incidência de chama nos tubos.

Em relação ao abatimento de emissões de NO<sub>x</sub>, os dados constantes no Relatório de Monitoramento de Emissões Atmosféricas (RMEA), emitido em abril de 2017 (SGS AIR SERVICES, 2017), mostram que o teor deste poluente apresentou valor médio de 101,4 mg/Nm<sup>3</sup> (corrigido a 3% vol. O<sub>2</sub>), bem abaixo, portanto, do valor máximo de 290 mg/Nm<sup>3</sup> especificado pela RPBC, o que sugere que os queimadores estão operando com quantidade de ar apropriada.

Além do abatimento de poluentes, outros dois resultados positivos de SMS devem ser aqui ressaltados: (i) aumento do conforto térmico na região sob o forno devido à redução da temperatura ambiente; (ii) aumento da segurança na mesma região em virtude do descongestionamento da área, possibilitando rotas de fuga no caso de uma emergência.

## 7 CONCLUSÃO

Em virtude da necessidade da substituição dos queimadores convencionais dos fornos L-1A/B da Unidade C da RPBC por modelos *low*-NO<sub>x</sub> para atendimento às restrições ambientais e ao aumento de carga, fez-se necessária a elaboração de um projeto multidisciplinar envolvendo análise fluidodinâmica do escoamento do ar preaquecido, análise estrutural por elementos finitos e modelagem em maquete eletrônica 3D.

Como a distribuição uniforme de ar de combustão entre os queimadores é um fator crítico para a boa operação com modelos *low*-NO<sub>x</sub>, o projeto básico da câmara plena incluiu análise por CFD do escoamento do ar preaquecido. Os resultados numéricos mostraram que a concepção de uma câmara plena cilíndrica com entrada única e central possibilitaria, em princípio, excelente distribuição de ar entre os queimadores, endossando a escolha por este arranjo.

A análise mecânica por elementos finitos da estrutura, das chapas do fundo da câmara plena e das chapas do piso do forno resultou em um projeto estrutural do conjunto com a rigidez necessária para garantir o correto posicionamento dos queimadores.

Em virtude do congestionamento da área, com espaços reduzidos para o encaminhamento de dutos, e em virtude da necessidade da avaliação e da visualização de diversos dispositivos, como portas de visitas, janelas de observação, chicanas, etc., a utilização de maquetes eletrônicas 3D mostrou-se uma ferramenta essencial para o rigoroso dimensionamento das diversas partes projetadas, minimizando a ocorrência de interferências e contribuindo para a execução da montagem em prazo exequível.

Após a partida dos fornos, a análise visual das chamas mostra que não há diferença significativa na qualidade da combustão entre os queimadores, sugerindo que o objetivo de distribuição uniforme de ar foi alcançado. Também não foram observados quaisquer indícios de incidência de chama nos tubos.

A medição de emissões de óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), após a implantação deste projeto, mostrou-se bem abaixo do limite estabelecido pela RPBC, o que também é um indicativo de sucesso na concepção do arranjo.

O projeto da adequação dos fornos L-1A/B aqui descrito está em pleno alinhamento com as diretrizes de SMS da Petrobras, uma vez que, além do aspecto da redução de emissões de NO<sub>x</sub> para a atmosfera, foram obtidos

resultados positivos tanto no que se refere à saúde (conforto térmico) quanto à segurança daqueles que venham a desempenhar tarefas na região sob o piso do forno, com este em operação.

## REFERÊNCIAS

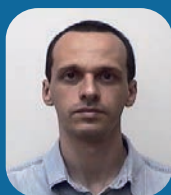
AISC International. **AISC 360-10**: Specification for Structural Steel Buildings. Chicago, IL: AISC International, 2010.

ANSYS. **ANSYS Fluent Theory Guide, Release 15.0**. Canonsburg, PA, 2013.

ASME. **ASME Boiler and Pressure Vessel Code: Section II – Materials**. New York, NY, 2015.

ASTM International. **ASTM C892-10**: Standard specification for high-temperature fiber blanket thermal insulation. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2010. DOI: 10.1520/C0892-10

SGS AIR SERVICES. **Relatório de monitoramento de efluentes gasosos da chaminé do PAF L-1A e L-1B**. Referência: OS 0946/13.85, 2017.



**Rodrigo Penha Andrade Rocha**

Graduação (1997) em Engenharia Mecânica pela UFRJ.  
Mestrado (1999) em Engenharia Mecânica pela COPPE/UFRJ. Doutorado (2007) em Engenharia Mecânica pela COPPE/UFRJ. Petrobras. PRGE/ENG/EETC/EBET Rio de Janeiro, RJ.  
E-mail: rpenha@petrobras.com.br



**Renato Vianna Chagas**

Curso Técnico (2006) em Mecânica pelo CEFET-RJ.  
Graduação (2012) em Engenharia Mecânica pela Fund. Téc. Educ. Souza Marques. Petrobras. PRGE/ENG/EETC/EBET – Rio de Janeiro, RJ.  
E-mail: renato.vianna@petrobras.com.br



**Laudemiro Nogueira Júnior**

Graduação (1986) em Engenharia Mecânica pela UFRJ.  
Mestrado (2000) em Engenharia Civil pela COPPE/UFRJ. Petrobras. PRGE/ENG/EETC/EBET Rio de Janeiro, RJ.  
E-mail: lnogueira@petrobras.com.br

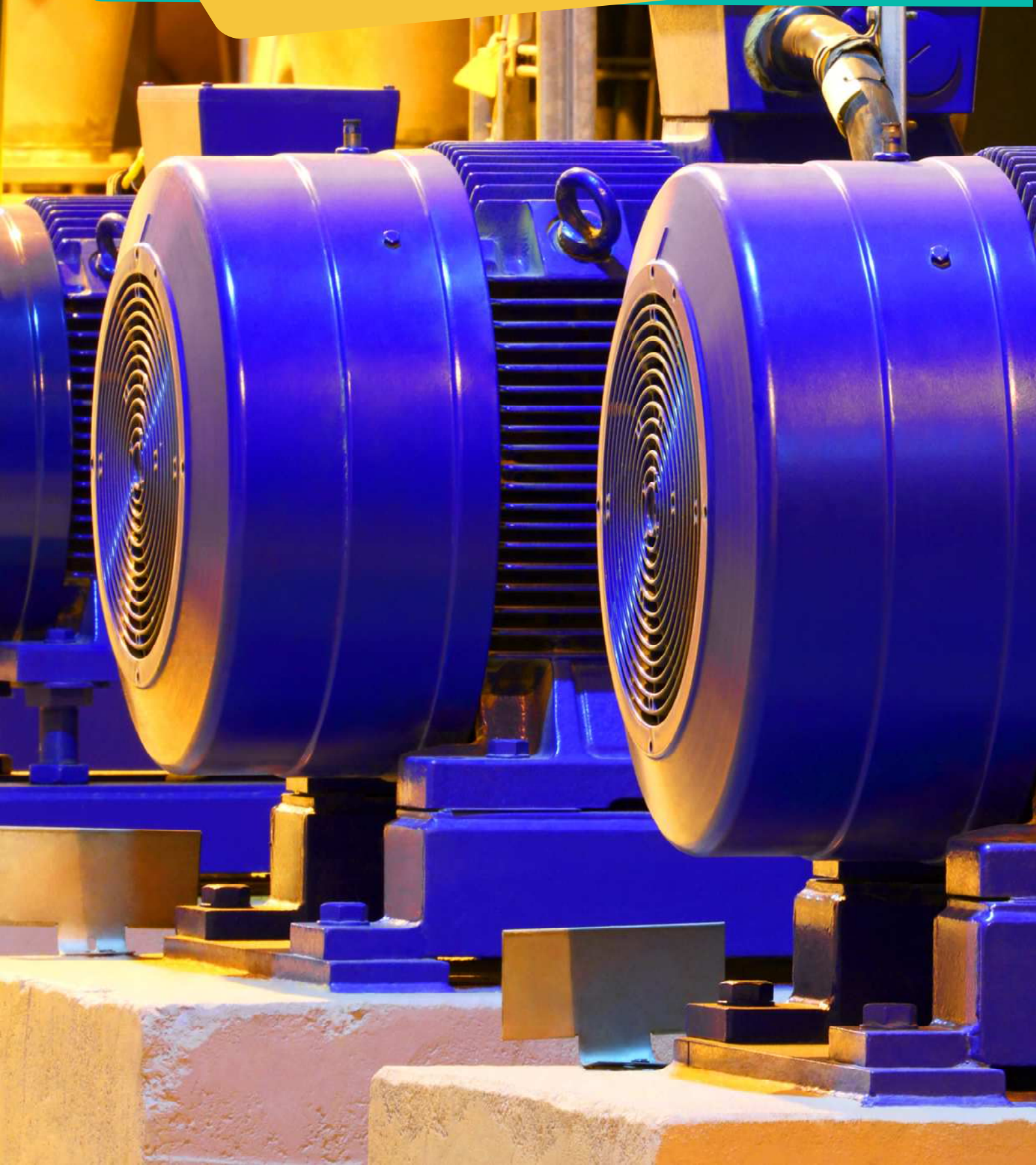


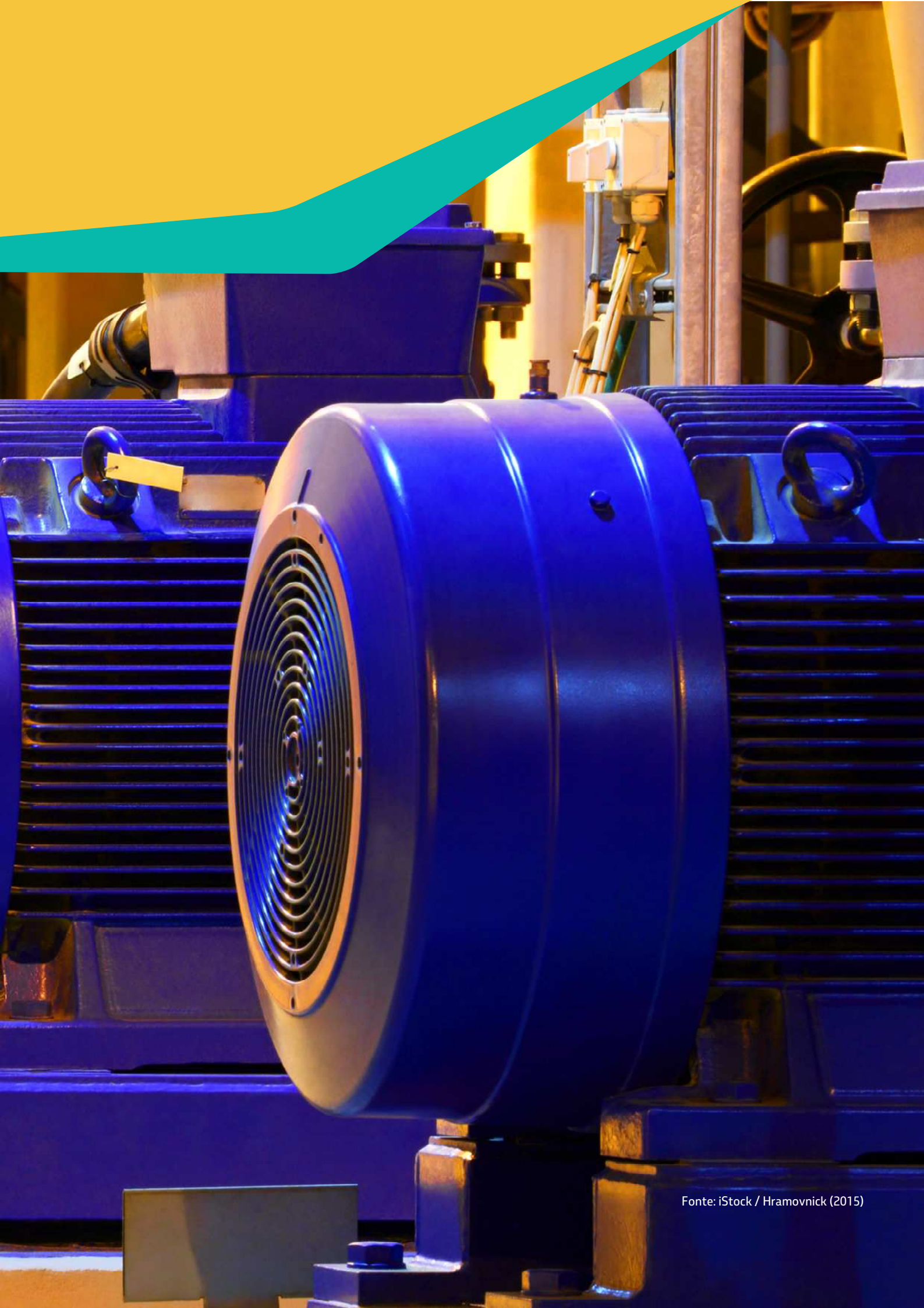
**Paulo Henrique Ferraz do Amaral Filho**

Graduação (2002) em Engenharia Mecânica pela UNESP-FEB-Campus Bauru. Mestrado (2005) em Engenharia Industrial pela UNESP-FEB-Campus Bauru. Petrobras. REPLAN/EIBR – Paulínia, SP.  
E-mail: pferraz@petrobras.com.br

# RELATO DE EXPERIÊNCIA DE TRABALHO DE PESQUISA QUE SE TORNOU PADRÃO INTERNACIONAL DE NORMALIZAÇÃO TÉCNICA

Roberval Bulgarelli





## RESUMO

Este artigo apresenta o relato de experiência do trabalho de pesquisa, desenvolvimento e aplicação de novo algoritmo para a proteção térmica de motores elétricos industriais, desenvolvidos por consultor da Petrobras, que serviram de base para a elaboração da norma técnica internacional **IEC 60255-149: Measuring relays and protection equipment - Part 149: Functional requirements for thermal electrical relay** (INTERNATIONAL, 2013). Esta norma técnica apresenta os requisitos a serem atendidos pelos dispositivos digitais de proteção para a função de proteção térmica de equipamentos elétricos, tais como motores industriais de indução trifásicos. Decorrente de uma postura de ação **inovadora**, a participação de representante da Petrobras no processo de elaboração de uma norma técnica internacional torna os benefícios resultantes das boas práticas, lições aprendidas e experiências adquiridas na companhia, sobre proteção térmica de motores elétricos industriais disponíveis, multiplicadas e aplicáveis aos 170 países do mundo que participam ou aplicam as normas técnicas internacionais publicadas pela *International Electrotechnical Commission* (IEC). A norma IEC 60255-149 (INTERNATIONAL, 2013) pode ser considerada a primeira norma internacional da IEC que foi elaborada tendo como base um trabalho de pesquisa realizado no Brasil, desde a época de criação da IEC, em 1906, e do Comitê Brasileiro de Eletricidade e Iluminação (COBEI), em 1908.

**Palavras-chave:** Função de proteção elétrica. Proteção Térmica. Norma Técnica Internacional IEC. Motores elétricos industriais. Relés de proteção digitais. IED. Trabalho de pesquisa e desenvolvimento.

## ABSTRACT

This article presents the experience on the research, development and application of a new algorithm for the thermal protection of industrial electric motors, developed by Petrobras Consultant, which were used as a basis for the elaboration of the new International Technical Standard **IEC 60255-149: Measuring relays and protection equipment - Part 149: Functional requirements for thermal electrical relay**. That technical standard presents the requirements to be met by the digital protection devices (IED) for the **thermal protection function** of electrical equipment, such as industrial three-phase induction motors. Due to an **innovative** approach, the participation of Petrobras' representative in the IEC process of elaborating an international technical standard makes the benefits resulting from good practices, lessons learned and experiences acquired in Petrobras on the thermal protection of industrial electric motors available, multiplied, and applicable to the 170 countries of the world participating or applying the international technical standards published by the IEC. The IEC 60255-149 Standard can be considered the **first international standard** of the IEC that was elaborated based on a research work carried out in **Brazil**, since the creation of the IEC in 1906 and the COBEI in 1908.

**Keywords:** Electrical protection function. Thermal protection. International Technical Standard IEC. Industrial Electric Motors. Digital Protection Relays.

## 1 INTRODUÇÃO

A fonte de motivação para a pesquisa e elaboração de um novo algoritmo para a função de proteção térmica para motores elétricos industriais teve como base o fato de que estes equipamentos elétricos são responsáveis pelo consumo de quase metade do total da energia elétrica gerada em todo o mundo.

De acordo com dados apresentados pela *International Energy Agency* (IEA), contidos no Estudo *Energy-efficiency policy opportunities for electric motor-driven systems* (2011), os motores elétricos são responsáveis pelo consumo de **46%** do total de energia elétrica demandada no mundo, como indicado no Gráfico 1. Além disso, pode ser verificado que os motores elétricos representam cerca de **90%** do total de acionamentos do setor industrial. Entre os principais tipos as máquinas rotativas acionadas por motores elétricos, estão os compressores (32%), as bombas (19%) e os ventiladores (19%), como indicado no Gráfico 1. Estes tipos de máquinas rotativas representam as que são mais frequentemente utilizadas nos processos das indústrias das áreas de petróleo, gás e petroquímica. Em nível internacional, os requisitos técnicos sobre especificações, ensaios, desempenho e eficiência energética de motores elétricos de indução e síncronos são indicados na Série IEC 60034: *Rotating electrical machines* (INTERNATIONAL, 2018a).

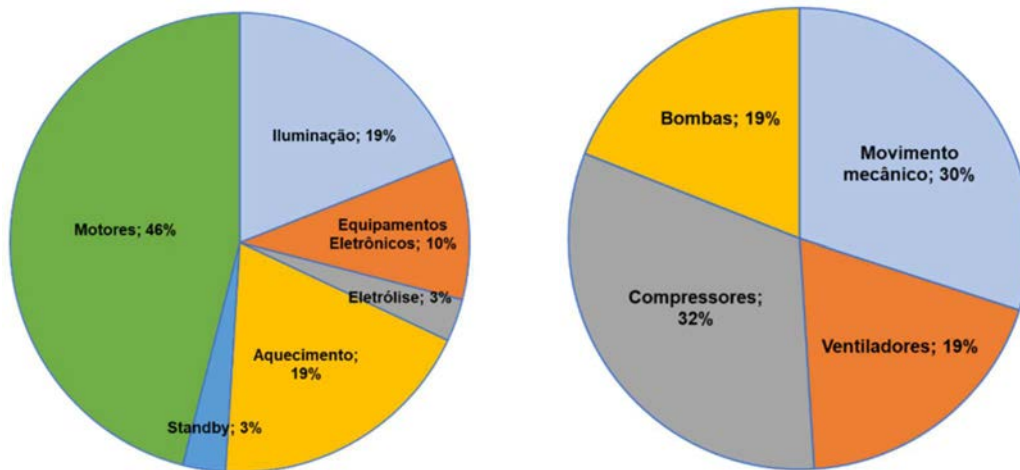
Estes dados demonstram a grande importância operacional dos motores elétricos trifásicos para a produção industrial. Desta forma, é de grande importância que os motores elétricos trifásicos, dos tipos de indução ou síncronos, utilizados na indústria, possuam elevados requisitos de proteção, os quais são executados pelos respectivos relés digitais de proteção (*Intelligent Electronic Device* - IED, de acordo com as normas internacionais da série IEC 61850: *Communication networks and systems for power utility automation*, 2018b). Pequenas melhorias representam imensos resultados.

Uma adequada proteção térmica dos motores elétricos é um fator crítico para assegurar a continuidade dos processos industriais, bem como para elevar a confiabilidade destes equipamentos e colaborar na redução de ocorrência de suas falhas.

Os motores elétricos operam com temperaturas nos seus enrolamentos por volta de 120 °C. Caso existam problemas relacionados com a proteção térmica, estas temperaturas podem exceder os limites de resistência dos materiais de isolamento dos enrolamentos. Uma elevação de apenas 10 °C acima destes limites desta temperatura acarreta uma redução de metade da vida útil prevista para os motores elétricos industriais.

Este é um dos grandes problemas enfrentados pelos motores elétricos industriais. A ação de mitigação pode





**Gráfico 1 - Participação do motor elétrico no consumo mundial de energia elétrica e tipos de máquinas rotativas industriais acionadas por motores elétricos.**

Fonte: INTERNATIONAL ENERGY, 2011, adaptado pelo autor.

ser realizada por uma nova função de proteção térmica, mais eficaz, baseada em uma norma internacional da *International Electrotechnical Commission* (IEC) atualizada, contendo um novo algoritmo matemático, apropriado para ser implantado nos dispositivos digitais de proteção (IED).

O trabalho de pesquisa que serviu de base para a elaboração da norma internacional IEC 60255-149 (INTERNATIONAL, 2013) sobre proteção térmica publicada pela IEC foi desenvolvido no Brasil, em trabalho de nova metodologia em Engenharia Elétrica, tendo como base experiências práticas e teóricas obtidas na Petrobras.

## 2 OBJETIVO

A parametrização da função de proteção térmica em IED para motores elétricos na indústria do petróleo é frequentemente um desafio para os técnicos e engenheiros que atuam na área de proteção de equipamentos e de sistemas elétricos.

Por um lado, há a necessidade de proteger termicamente os motores contra sobrecargas, que podem elevar sua temperatura acima dos valores permitidos, reduzindo a vida útil destes equipamentos e provocando falhas prematuras em seus enrolamentos, ocasionando a sua indisponibilidade, fazendo com que o motor necessite ser removido de seu local de instalação e enviado para reparo externo em oficinas especializadas e certificadas.

Por outro lado, existe o compromisso da continuidade e otimização operacional e dos processos industriais, com a necessidade de maximizar a sua faixa de operações, de forma a minimizar os desligamentos dos motores, fazendo com que estes operem no limite de sua capacidade térmica. São exemplos típicos destas aplicações os motores para acionamento industrial de bombas centrífugas de processo e de utilidades, ventiladores de *air-coolers*, compressores de gases inflamáveis e esteiras rolantes para movimentação de produtos.

Tendo como base as experiências práticas acumuladas na área de engenharia elétrica na Petrobras, pode ser verificado que em muitos casos os motores são desligados indevidamente devido a deficiências nas funções de proteção térmica, sem que estes tenham atingido o seu limite térmico, provocando paradas não previstas do processo e acarretando perdas de produção, por deficiência nos algoritmos dos relés de proteção.

Por outras vezes, também com base em experiências na área de engenharia elétrica da Petrobras, pode ser verificado que, devido à deficiência dos algoritmos das funções de proteção térmica, os motores são submetidos a sobrecargas excessivas, fazendo com que os materiais isolantes de seus enrolamentos sejam danificados, provocando falhas prematuras e curtos-circuitos, os quais requerem a remoção dos motores para serviços externos especializados de reparo e recuperação, ocasionando indisponibilidade de equipamentos e frequentemente comprometendo a **continuidade** operacional dos processos nos quais estão inseridos.

Com base nestas experiências reunidas nas áreas de manutenção, montagem, projeto, normalização e automação elétricos na Petrobras, e diante da oportunidade e do desafio de elaboração de um trabalho de mestrado na área de eletricidade, foi pesquisado e desenvolvido um novo algoritmo matemático para o modelamento de um **sistema térmico** de primeira ordem.

Este modelo simula o comportamento térmico de um motor elétrico industrial. Este algoritmo foi desenvolvido com o objetivo de ser utilizado de forma digital pelos relés de proteção microprocessados (IED), a fim de possibilitar uma proteção térmica mais eficiente, quando comparada com aquela atualmente prevista nas normas técnicas existentes sobre o assunto.

O trabalho de pesquisa desenvolvido e o novo algoritmo de proteção térmica elaborado no Brasil pelo autor, tendo como base as experiências acumuladas na área de engenharia elétrica na Petrobras, foram adotados pela IEC como base para a elaboração da norma internacional

IEC 60255-149: *Functional requirements for thermal electrical relays* (INTERNATIONAL, 2013).

As mudanças, melhorias e benefícios a serem obtidos nos processos de produção, em decorrência da continuidade da implantação mundial de relés digitais de proteção térmica que atendam aos novos requisitos desta norma técnica internacional da IEC possibilitam uma elevação da continuidade operacional e maiores níveis de utilização das capacidades térmicas e de potência dos motores elétricos industriais.

### 3 METODOLOGIA E APLICABILIDADE

A IEC foi fundada em 1906 e representa a maior organização mundial responsável pela elaboração e publicação de normas técnicas internacionais para as áreas de eletricidade para o desenvolvimento e a publicação de normas técnicas internacionais para todas as áreas de tecnologia relacionadas com a eletrotécnica e a eletrônica. A IEC conta com participação de 170 países, possuindo em seu catálogo mais de 10 mil normas técnicas internacionais. Segundo a IEC, 99% da população mundial é abrangida por estas normas técnicas internacionais sobre a eletricidade.

O TC 95 da IEC (*Measuring relays and protection equipment*) é o Comitê Técnico (*Technical Committee*) responsável pela elaboração de normas técnicas internacionais sobre relés de proteção utilizados em diversas áreas da engenharia elétrica, como por exemplo, na proteção de equipamentos elétricos de potência.

A norma IEC 60255-149 (INTERNATIONAL, 2013), elaborada pelo TC-95 especifica os requisitos para os relés de proteção térmica aplicáveis para proteção de equipamentos elétricos, tais como os motores elétricos industriais.

O objetivo daquela norma é o de estabelecer uma fonte de referência internacional para relés digitais de proteção (IED) que efetuam a proteção de equipamentos elétricos contra danos térmicos, por meio da medição das correntes de fase que circulam pelo equipamento elétrico a ser termicamente protegido. Aquela norma especifica o modelamento matemático a ser implantado nos IEDs com base em um modelo térmico de primeira ordem, com função de memória térmica, para o cálculo do estado térmico do equipamento elétrico a ser termicamente protegido.

A função de proteção térmica é classicamente identificada, de forma numérica, por F. 49, o que serviu de base para a numeração da norma IEC 60255-149 (INTERNATIONAL, 2013). Esta função de proteção é recentemente designada na norma IEC 61850-7-4: *Communication networks and systems for power utility automation - Part 7-4: Basic communication structure - Compatible logical node classes and data object classes* (INTERNATIONAL, 2018b), pelo *Logical Node* com mnemônico **PTTR** (ProTecton / TheRmal), o qual é referenciado na IEC 60255-149 (INTERNATIONAL, 2013).

O diagrama de blocos da função de proteção térmica especificada na norma IEC 60255-149 (INTERNATIONAL, 2013) é mostrado na Figura 1.

O diagrama de blocos para a função de proteção térmica de equipamentos elétricos apresenta os parâmetros de entrada para a configuração da proteção, tais como a constante de tempo térmica e a corrente nominal do equipamento do equipamento a ser protegido, bem como as funções de saída da função, tais como alarmes de sobrecarga térmica e *trip* do IED correspondente.

Este trabalho de pesquisa teve como base as experiências práticas e teóricas adquiridas ao longo de 30 anos na área de engenharia elétrica na Petrobras, em função de atividades nas áreas de especificação técnica, normalização, projeto, instalação, inspeção, manutenção e reparos de motores elétricos industriais.

Podem ser citados como exemplos de experiências práticas e teóricas na área de aplicação da função de proteção térmica as atividades de especificação técnica de relés digitais de proteção, os trabalhos de instalação e comissionamento destes equipamentos bem como a elaboração dos estudos de proteção de máquinas elétricas e parametrização das funções de proteção, bem como os testes de aceitação de campo que são realizados antes da entrada dos equipamentos em operação.

A base para o modelamento de um sistema térmico de primeira ordem que foi desenvolvida no trabalho de pesquisa e posteriormente incorporada na norma internacional IEC 60255-149 (IEC, 2013) é apresentada na Figura 2.

As equações diferenciais necessárias para modelar o elemento térmico podem ser implementadas por meio de métodos de programação de algoritmos numéricos nos IEDs. A implementação por meio de *software* do algoritmo matemático do modelo de proteção térmica para um motor é um grande exemplo da aplicação das técnicas de processamento digital de sinais e da facilidade do cálculo de componentes de sequência negativa nos IEDs para proteção de motores elétricos industriais. A Equação (1), na forma do tempo discreto, representa o nível térmico de um motor elétrico, em função da sua corrente de carga:

$$I_{eq\ pu}^2 = \tau \cdot \frac{T_n - T_{n-1}}{\Delta t} + T_n \quad (1)$$

Onde:

$I_{eq\ pu}^2$  corrente equivalente da fonte de aquecimento de entrada, considerando o efeito de aquecimento do motor devido às correntes de sequência positiva e negativa;

$T_n$  e  $T_{n-1}$  duas amostras consecutivas do valor do nível térmico calculado do motor, espaçadas do intervalo de tempo  $\Delta t$  considerado para os cálculos do processo iterativo;

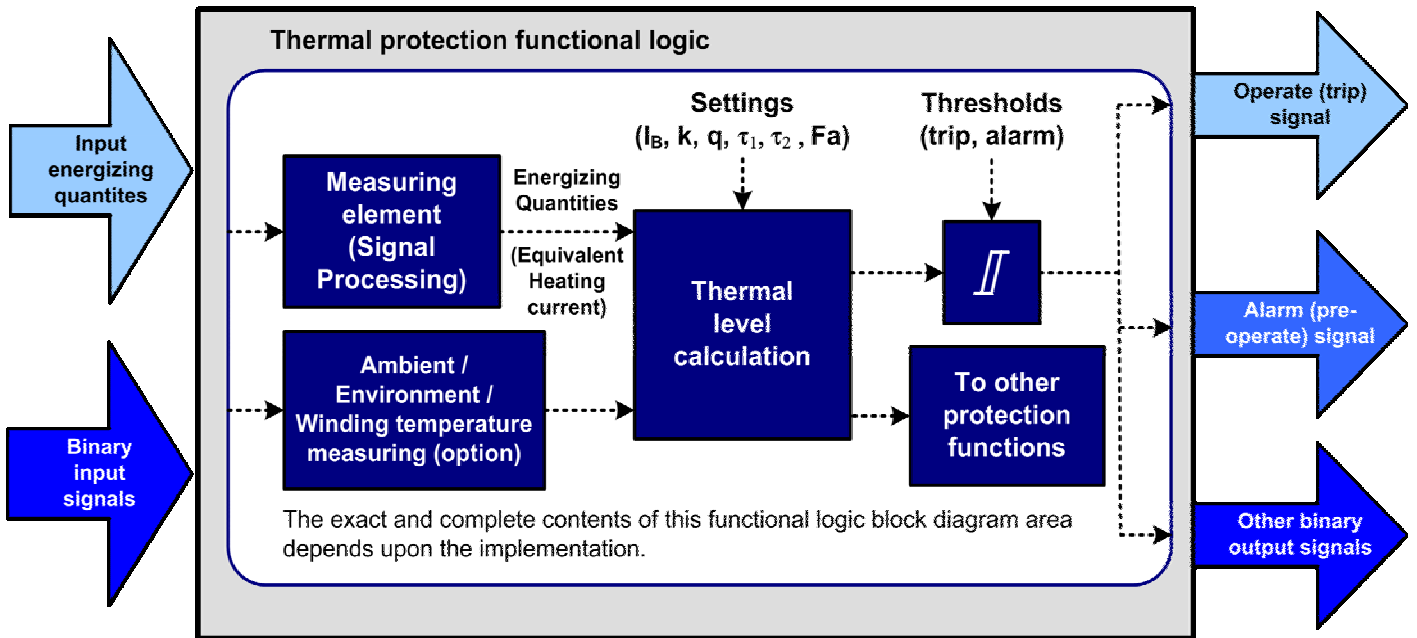


Figura 1 - Diagrama de blocos da função de proteção térmica especificada na Norma IEC 60255-149.

Fonte: INTERNATIONAL, 2013, p. 09.

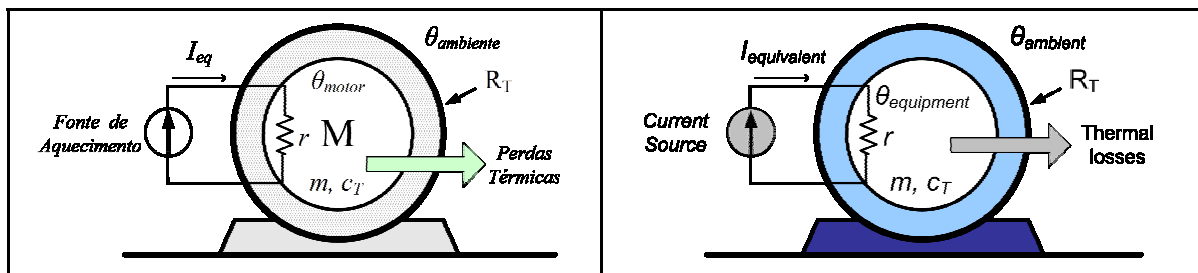


Figura 2 - Modelamento de um motor elétrico, representando um sistema térmico de primeira ordem, o qual é indicado no trabalho de pesquisa realizado no Brasil (a esquerda) e adotado na norma internacional IEC 60255-149 (a direita).

Fonte: BULGARELLI, 2006, p. 79; INTERNATIONAL, 2013, adaptado pelo autor.

- $\tau$  constante de tempo térmica de aquecimento do motor elétrico a ser protegido;
- $\Delta t$  intervalo de tempo entre duas amostras consecutivas das correntes de fase do motor, representando o período de amostragem utilizado pelo IED.

Este modelo térmico tem como base um sistema térmico de primeira ordem, com a aplicação de conceitos físicos da transferência de calor, tal como a constante de tempo térmico ( $T$ ) do corpo a ser modelado, representado neste caso por um motor elétrico, como um corpo homogêneo (incluindo carcaça, estator e rotor).

Resolvendo esta equação para  $T_n$ , que é o valor pretendido a ser calculado do nível térmico atual do motor, obtém-se uma equação iterativa representada pela seguinte equação de diferenças:

$$T_n = I_{eq\ pu}^2 \frac{\Delta t}{\tau + \Delta t} + \frac{\tau}{\tau + \Delta t} T_{n-1} \quad (2)$$

Determina-se finalmente, com o algoritmo indicado na Equação (2), a base para um adequado modelo para a

proteção térmica de motores trifásicos industriais, apropriado para a implementação em relés de proteção microprocessados (IED).

Este algoritmo permite calcular e registrar continuamente o histórico do nível térmico do motor, nas diferentes condições de corrente de partida, corrente de carga e corrente de sobrecarga. Este algoritmo permite também comparar o nível térmico atual do motor com o nível térmico máximo e selecionar o sinal de saída de alarme remoto ou de *trip*, quando os valores atuais excederem os valores de ajustes predeterminados inseridos pelo usuário na configuração do IED. Tais ações de alarme ou *trip* permitem evitar a ocorrência de sobre aquecimento e fornece uma proteção térmica ao motor em qualquer condição de operação.

O algoritmo matemático para a função de proteção térmica adotado na norma IEC 60255-149 (INTERNATIONAL, 2013) - Equação 1 - tem como base o algoritmo formulado no trabalho de pesquisa realizado no Brasil (Equação 5.33). Para fins de verificação da equivalência de algoritmos, as equações apresentadas no trabalho (BULGARELLI, 2006) e na norma internacional IEC 60255-149 (INTERNATIONAL, 2013) são apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1 -Verificação da identidade de algoritmos entre norma internacional IEC e trabalhos de pesquisa realizados no Brasil pelo autor.**

	Número da equação	Algoritmo para a função de proteção térmica
Trabalho de pesquisa (realizado pelo autor)	Equação (5.33)	$U_n = \frac{\Delta t}{\tau + \Delta t} I_{eq\ pu}^2 + \frac{\tau}{\tau + \Delta t} \cdot U_{n-1}$
Norma Técnica Internacional IEC 60255-149 elaborada pelo TC 95 da IEC	Equação (1)	$H(t) = \left( \frac{I_{eq}(t)}{k I_B} \right)^2 \cdot \frac{\Delta t}{\tau + \Delta t} + \frac{\tau}{\tau + \Delta t} \cdot H(t - \Delta t)$

Fonte: BULGARELLI, 2006; INTERNATIONAL, 2013, adaptado pelo autor.

Onde:

- $I_{eq\ pu}^2$  corrente equivalente da fonte de aquecimento de entrada, considerando o efeito de aquecimento do motor devido às correntes de sequência positiva e negativa;
- $U_n$  e  $H(t)$  valor atual calculado do nível térmico do motor;
- $U_{n-1}$  amostra do valor calculado anterior do nível térmico do motor, espaçada do intervalo de tempo  $\Delta t$  considerado para os cálculos do processo iterativo;
- $\tau$  constante de tempo térmica de aquecimento do motor elétrico;
- $I_{eq}(t)$  corrente equivalente de fase do motor no instante (t), considerando as correntes de sequência positiva e negativa;
- $I_B$  corrente nominal do motor elétrico a ser protegido termicamente;
- $k$  fator de eventual sobrecarga térmica à qual o motor pode ser continuamente submetido;
- $\Delta t$  intervalo de tempo entre duas amostras consecutivas das correntes de fase do motor, representando o período de amostragem utilizado pelo IED.

A implantação digital do algoritmo da função de proteção térmica para motores elétricos trifásicos industriais é feita por meio da configuração, nos respectivos IED, dos parâmetros das características principais do motor a ser protegido termicamente, tais como sua corrente nominal ( $I_B$ ) e sua constante de tempo térmica de aquecimento ( $T$ ). Os cálculos do estado térmico atual do motor trifásico são feitos no IED para cada uma das três fases, bem como são configuradas as respectivas saídas dos sinais de alarme e de *trip* para a Função 49 (PTTR), como apresentado na Figura 3.

O nível térmico do motor, calculado pela função de proteção térmica é utilizado também para a função de inibição por repartida dos motores elétricos (F. 66 / Logical Node *PMSS – Protection Motor Starting Time Supervision / PMRI Motor Restart Inhibition*). Esta função de proteção inibe partidas consecutivas do motor, que ultrapassem o seu limite térmico (calculado pela Função F. 49/PTTR), de forma a evitar o aquecimento excessivo dos enrolamentos do motor, o que compromete as

características dos seus materiais isolantes, reduzindo o seu tempo de vida útil, o que pode provocar falhas prematuras no sistema de isolamento, tais como correntes de fuga à terra e curtos circuitos entre espiras.

As funções de proteção típicas aplicáveis para motores elétricos trifásicos de indução industriais são mostradas no diagrama unifilar dos circuitos de força e controle da Figura 4.

As funções de proteção, medição e controle típicas aplicáveis para motores elétricos trifásicos de indução industriais, representadas por **Logical Nodes aplicáveis**, são mostradas no diagrama unifilar da Figura 5, onde são apresentados os circuitos de força, medição e controle em um sistema de "Process Bus", de acordo com Série IEC 61850.

Além da adoção do algoritmo elaborado no trabalho de pesquisa elaborado pelo autor, o Anexo A da norma IEC 60255-149, *Simple first-order thermal model of electrical equipment* (INTERNATIONAL, 2013), contendo 14 páginas, o qual descreve as bases físicas e matemáticas para a dedução do algoritmo de proteção térmica, foi elaborado com base na tradução do **português para o inglês** feita pelo autor para o TC 95 da IEC, do Capítulo 5 (Modelo para proteção térmica de motores elétricos industriais baseado em sistemas térmicos de primeira ordem) do seu trabalho de pesquisa.

Exemplos de motores elétricos industriais instalados em unidades industriais da Petrobras, protegidos por relés digitais microprocessados (IED) contendo função de proteção térmica são mostrados na Figura 6.

## 4 EFETIVIDADE DOS RESULTADOS DA PESQUISA

O trabalho de pesquisa elaborado pelo autor detalha o equacionamento matemático de um sistema térmico de primeira ordem, representado por um motor de indução trifásico, e o desenvolvimento de um algoritmo, em tempo discreto, baseado na equação diferencial de um modelo térmico, para a função de proteção térmica com memória total (Função 49/PTTR), adequado para implantação em relés digitais de proteção.

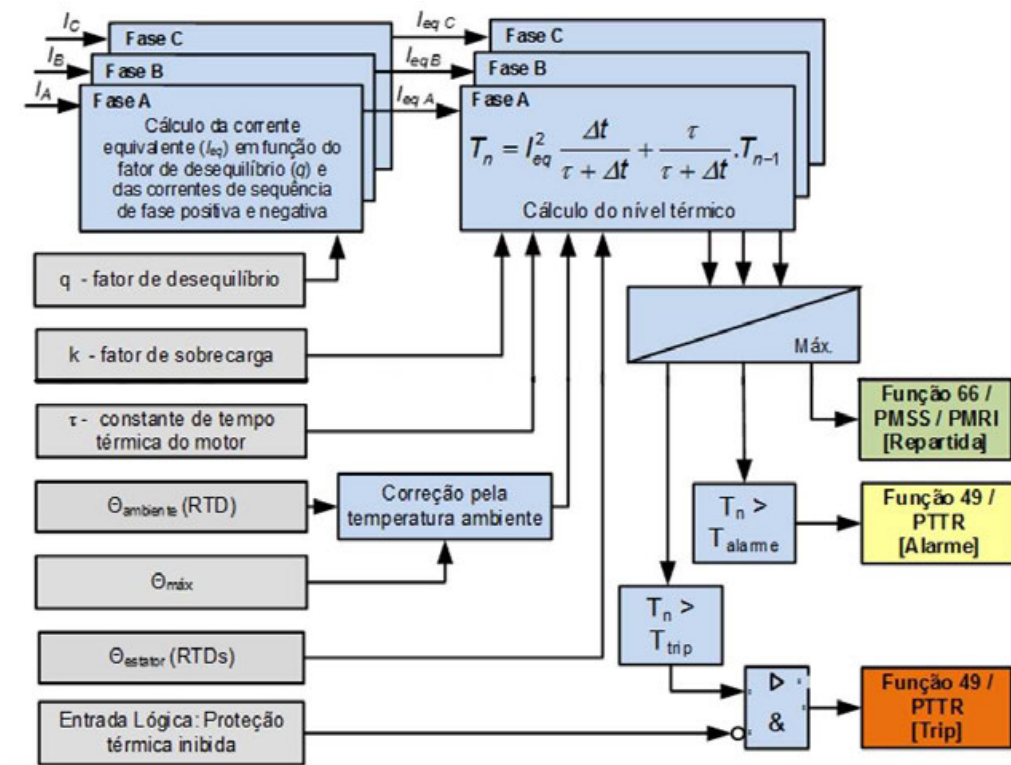


Figura 3 - Diagrama de blocos para a implementação da função de proteção térmica (Função 49 / PTTR) para motores elétricos trifásicos industriais.

Fonte: O AUTOR, 2018; INTERNATIONAL, 2013, adaptado pelo autor.

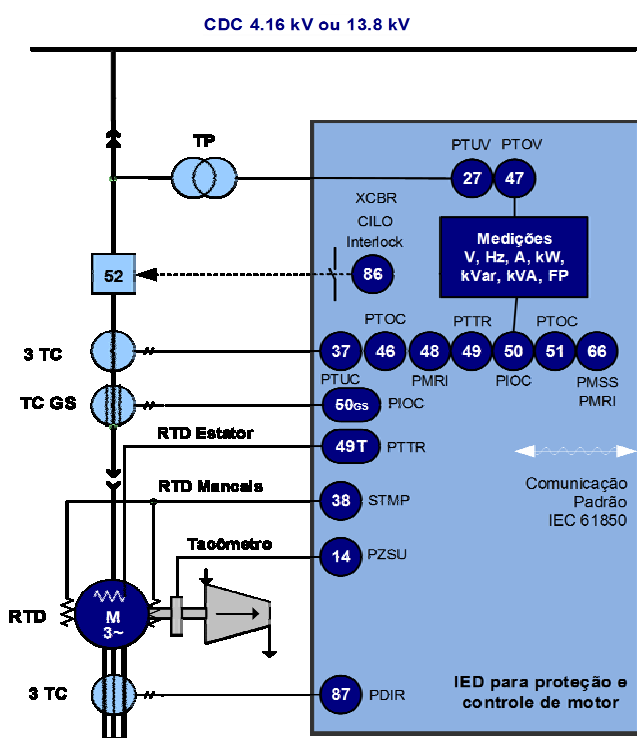


Figura 4 - Diagrama unifilar de circuito de alimentação de força e controle de motor elétrico, com as funções de proteção típicas aplicáveis, incluindo a função de proteção térmica (Função 49 / PTTR).

Fonte: O AUTOR, 2018.

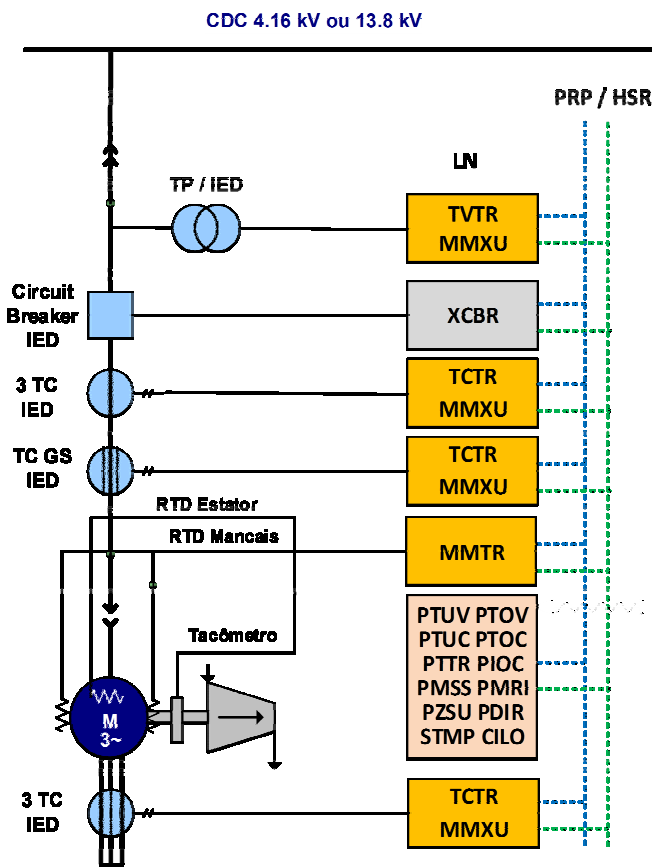


Figura 5 - Diagrama unifilar de circuito de alimentação de força e controle de motor elétrico, com as funções de proteção, controle e medição típicas aplicáveis, incluindo os Logical Nodes PPTR, PMSS, PMRI, relacionadas com a função de proteção térmica (Função 49 / PTTR).

Fonte: BULGARELLI, 2018.



**Figura 6 - Exemplos de motores elétricos industriais instalados em unidades industriais da Petrobras, protegidos por relés digitais microprocessados (IED) contendo função de proteção térmica (F. 49 / PTTR).**  
 Fonte: O AUTOR, 2018.



**Figura 7 - Exemplo de painel elétrico existente em subestação de Unidade Operacional da Petrobras, contendo relés digitais microprocessados (IED) com a função de proteção térmica (F. 49 / PTTR) para motores elétricos industriais.**  
 Fonte: O AUTOR, 2018.

O modelo proposto no trabalho de pesquisa e o algoritmo matemático decorrente deste modelo permitem calcular, em tempo real, o **nível térmico atual** de um motor elétrico em operação, protegido por um relé digital.

Este novo algoritmo considera, inclusive, os efeitos adicionais de aquecimento no rotor do motor devido ao desbalanceamento de correntes de fase, decorrente da circulação de correntes de sequência negativa, as quais ocasionam aquecimento adicional devido ao efeito pelicular que ocorre nas barras de cobre dos enrolamentos do rotor.

O algoritmo apresentado no trabalho possui a capacidade de acompanhar, em tempo real, o nível térmico do equipamento elétrico a ser protegido e possibilitar a implantação de **alarme prévio de sobrecarga**, antes da necessidade de efetuar o desligamento do motor, o que contribui para a redução de paradas de processo e de perdas de produção.

Os principais conceitos, equacionamentos, algoritmo para proteção térmica e simulações de dinâmicas do modelo analisados neste trabalho foram enviados pelo Brasil, por meio do Comitê Brasileiro de Eletricidade e Iluminação (COBEI), para análise do *Technical Committee* TC-95 da

IEC, responsável pela elaboração das normas internacionais sobre relés de proteção.

As contribuições sobre proteção térmicas enviadas em nome pelo Brasil foram muito bem recebidas pela IEC, sendo adotadas durante o processo de elaboração da norma internacional IEC 60255-149 (INTERNATIONAL, 2013).

## 5 APRENDIZADO ORGANIZACIONAL E POSSIBILIDADE DE MULTIPLICAÇÃO

O aprendizado acumulado sobre a função de proteção térmica de motores elétricos industriais foi devidamente consolidado e multiplicado em nível internacional, por meio da elaboração da norma IEC 60255-149 (INTERNATIONAL, 2013).

A multiplicação e a abrangência destes conhecimentos estão sendo realizadas em nível mundial, em função de publicação desta norma internacional, que pode obtida na página da IEC, por todas as partes envolvidas e interessadas neste tema, tais como fabricantes de IED, usuários de funções de proteção de equipamentos elétricos e empresas de engenharias, incluindo os Comitês Técnicos Nacionais de todos os países participantes do IEC.

O trabalho de pesquisa também se encontra disponível para toda a força de trabalho da companhia na Comunidade de Sistemas Elétricos da Universidade Petrobras (RH/UP).

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Decorrente de uma postura de ação inovadora, a decisão pela elaboração de uma norma técnica internacional tornou os benefícios resultantes das boas práticas, lições aprendidas e experiências adquiridas na Petrobras sobre proteção térmica de motores elétricos industriais agora disponíveis, multiplicadas e aplicáveis para os 170 países do mundo que participam ou aplicam as normas técnicas internacionais elaboradas e publicadas da IEC, inclusive o Brasil.

Estas experiências, lições aprendidas e boas práticas são também transmitidas para os empregados da Petrobras por meio da realização de cursos sobre “Características técnicas e funções de proteção de motores elétricos trifásicos para a indústria do petróleo e petroquímica”, que são ministrados pelo Consultor na Universidade Petrobras.

Estes cursos de educação continuada e de formação são ministrados para turmas de técnicos de projeto, construção, montagem, manutenção e de novos engenheiros eletricitas que ingressam na Petrobras.

A apostila deste treinamento encontra-se disponível na Comunidade de Sistemas Elétricos da Universidade Petrobras - Curso de Especialização em Equipamentos Elétricos aplicados à Indústria de Petróleo e Gás Natural (BULGARELLI, 2012).

## 7 CONCLUSÕES

Com a aplicação da norma IEC 60255-149 (IEC, 2013), em nível internacional, os relés digitais de proteção (IED) passam a efetuar uma proteção térmica de forma mais eficaz, colaborando na preservação dos equipamentos elétricos de potência, tais como os motores elétricos industriais.

Com a aplicação continuada desta norma, é esperada, ao longo do tempo, uma elevação na continuidade operacional dos motores elétricos e dos respectivos processos industriais onde estão inseridos, tais como nas refinarias de petróleo e nas plataformas de produção offshore.

Estes benefícios são decorrentes da capacidade de emissão, por parte dos respectivos relés digitais de proteção que utilizam o novo algoritmo matemático, de alarmes prévios do nível térmico dos motores elétricos que estejam sendo protegidos, proporcionando a tomada de ações preventivas por parte das equipes de operação e manutenção, antes que o motor seja desligado por sobrecarga térmica.

São esperados também ganhos relacionados com elevação da capacidade de utilização dos motores elétricos industriais, nas instalações da Petrobras e das outras empresas do mundo, em função do novo algoritmo permitir um acompanhamento do estado térmico dos motores elétricos em tempo real, de uma forma mais eficiente.

## REFERÊNCIAS

BULGARELLI, Roberval. **Características técnicas e funções de proteção de motores elétricos trifásicos para a indústria do petróleo e petroquímica**. Rio de Janeiro: Petrobras, 2012. Apostila do curso de Engenharia Elétrica. Disponível em: <<http://cv.universidade.petrobras.com.br/eletrica/minisites/CENEL-1/Material%20Did%C3%A1tico/Caracteristicas%20e%20Protecao.pdf>>. Acesso em: 21 jun. 2018.

\_\_\_\_\_. **Proteção térmica de motores de indução trifásicos industriais**. 2006. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia e Automação Elétricas)- Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-01122006-134918/pt-br.php>>. Acesso em: 21 jun. 2018.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60034: Electrical rotating machines**. Geneva, 2018a. Disponível em: <<https://webstore.iec.ch/searchform&q=60034>>. Acesso em: 21 jun. 2018.

\_\_\_\_\_. **IEC 60255-149: Measuring relays and protection equipment: Part 149: Functional requirements for thermal electrical relays**. Geneva, 2013. Disponível em: <<https://webstore.iec.ch/publication/1165>>. Acesso em: 21 jun. 2018.

\_\_\_\_\_. **IEC 61850: Communication networks and systems for power utility automation**. Geneva, 2018b. Disponível em: <<https://webstore.iec.ch/searchform&q=61850>>. Acesso em: 21 jun. 2018.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Energy- efficiency policy opportunities for electric motor-driven systems**. Paris, 2011. Disponível em: <[https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/EE\\_for\\_ElectricSystems.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/EE_for_ElectricSystems.pdf)>. Acesso em: 21 jun. 2018.



**Roberval Bulgarelli**

Graduação (1985) em Engenharia Elétrica. Mestrado (2006) em Proteção de Sistemas Elétricos de Potência pela USP/POLI. Petrobras. RPBC/ESTO – Cubatão, SP  
E mail: bulgarelli@petrobras.com.br

# ENVIO DE ARTIGOS

Os originais serão submetidos à aprovação de especialistas reconhecidos nos temas tratados. Os trabalhos serão enviados para avaliação sem identificação de autoria.

Excepcionalmente, serão aceitos trabalhos que já tenham sido publicados em periódicos estrangeiros que estarão sujeitos à mesma avaliação de originais inéditos. Deverá ser apresentada autorização do editor anterior.

O conteúdo dos artigos é de responsabilidade exclusiva dos autores.

O envio de artigos para submissão deve ser feito para:  
Email: [revistatecnicaup@petrobras.com.br](mailto:revistatecnicaup@petrobras.com.br)  
Chave: u5js

**Somente é permitido citar parte dos artigos, sem prévia autorização, com a identificação correta da fonte.**





**RECURSOS HUMANOS/UNIVERSIDADE PETROBRAS**  
R. Ulysses Guimarães, 565, Cidade Nova. - Rio de Janeiro – RJ

